



Octava Edición

2019 - 2020

Accésit - Texto completo

Estudio de riegos asfálticos de liga entre capas asfálticas para rehabilitación de pavimentos flexibles fresados

Autor:

José Julián Rivera. Doctor Ingeniero de LeMAC
Centro de investigaciones viales dependiente de la
Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional
La Plata y la Comisión de Investigaciones Científicas
de la provincia de Buenos Aires (Argentina)

RESUMEN

Cuando un pavimento asfáltico es sometido, durante su etapa de explotación, a una rehabilitación mediante la aplicación de una nueva capa asfáltica superpuesta, elaborada en caliente, es requisito extender sobre éste un riego asfáltico de liga en una dotación dada, lo cual genera una interfase entre las capas. Si al pavimento existente se le realizan, además, operaciones previas de fresado superficial, las texturas resultantes pueden ser variadas y diferentes a la que presentaría si se tratara de una superficie sin fresar; lo cual incide en esa dotación de riego de liga a aplicarse en la interfase. Esto se debe a que, por un lado, al fresar se produce un incremento de superficie en la interfase entre ambas capas, lo que podría llevar a la necesidad de aumentar la dotación del riego de liga a emplearse. Por otro lado, se debe considerar que por causa del fresado se forman surcos paralelos longitudinales, que pueden producir el escurrimiento del riego asfáltico incrementado desde sus cumbres hacia sus valles; lo que podría generar una deposición excesiva en estos últimos. El problema planteado permite observar que es necesario llegar a una solución de compromiso intermedia entre ambas situaciones, que permita alcanzar un comportamiento óptimo. Ese comportamiento óptimo puede lograrse al analizar la respuesta mecánica de la interfase ante diversas dotaciones de riego. Se estudia entonces, desde el punto de vista mecánico, cómo debe encararse la situación planteada y cuáles son los parámetros decisivos en análisis. Luego, se procede al diseño de un procedimiento de elaboración de los especímenes en estudio y al desarrollo de la sistemática de ensayo, con su posterior aplicación. Además, se establece que las dotaciones de riego de liga en estudio pueden ser estimadas en función de proporcionalidades respecto del incremento de la superficie de la interfase debido a la operación de fresado. Para hallar una vía que permita estimar la magnitud de ese incremento de la superficie, en función del grado de textura generado por el fresado, se desarrolla, mediante simulación numérica basada en registros de campo, una adaptación al Ensayo de Parche de Arena. Esta metodología se verifica por medio de aplicaciones en situaciones de laboratorio que buscan reflejar el espectro de texturas obtenibles en obra. Luego, se estima a través de ensayos con sollicitación estática al corte, tanto en situaciones de interfase lisa como en aquellas en las cuales se simulan en laboratorio diferentes grados de fresado, la dotación de riego de liga óptima expresada en términos del incremento de superficie. Se arriba así a un modelo de aplicación en campo para establecer ese contenido óptimo de riego de liga a ser utilizado y a su procedimiento de aplicación. Esta investigación se realiza sobre los materiales característicos de la región central de la Argentina, empleados en los casos que implican las tareas de rehabilitación con fresado de la capa existente y la aplicación de una mezcla asfáltica en caliente con aporte estructural.

Como alternativas para la validación del modelo y el procedimiento desarrollados, se abordan tres líneas de estudio. La primera, se basa en el análisis de la resistencia a la fatiga del sistema mediante sollicitaciones dinámicas sobre un grado de textura determinado de la interfase. La segunda, se basa en la aplicación del modelo y el procedimiento en una obra de rehabilitación en la provincia de Buenos Aires, sometiéndose a muestras testigos extraídas de la obra, a la sistemática de ensayo

propuesta. La tercera, se basa en la aplicación del modelo sobre otra tipología de materiales y procedimiento de ensayo, específicamente, las utilizadas típicamente en obras de rehabilitación en Cataluña (España).

Finalmente, se vuelca como conclusión más relevante el modelo desarrollado que relaciona el coeficiente de incremento de riego a ser aplicado en función del diámetro de parche de arena resultante al analizar la superficie fresada y se elaboran recomendaciones para futuros análisis relacionados con la temática.

1. DESARROLLO DEL MODELO DE APLICACION

Durante la explotación de un pavimento flexible se desarrollan actividades dirigidas a su rehabilitación, eliminándose en ocasiones parte de la capa de rodamiento por medio de técnicas de fresado, evitándose la influencia del ahuellamiento de la capa existente y eliminándose el fenómeno de recrecido (Martínez-Echevarría, 2012; NCHRP, 2004; Miller & Bellinguer, 2003). Esta tarea requiere el uso de equipos rotatorios, provistos de herramientas de desbaste que pueden presentar diferentes características, dando lugar a distintos grados de textura, diferentes a la de la superficie original, pues esta última en términos relativos puede considerarse “lisa” (Delbono, 2014; Wirtgen, 2015).

Previo a la colocación de la capa de refuerzo, corresponde disponer un riego de liga de una emulsión asfáltica para generar una adecuada interfase (Bussard, 2014), a fin de que si el pavimento existente presenta una buena condición estructural, las tensiones y deformaciones generadas por efecto del tránsito no afecten la vida útil prevista (Espinoza, 2015; Montestrusque et al., 2015). Pero existen pocos estudios que hayan encarado la temática cuando dichos riegos se aplican sobre una superficie asfáltica fresada, por lo que se realiza el trabajo que se presenta, en el marco de una tesis doctoral en ingeniería de materiales.

1.1. Materiales y métodos abordados en el capítulo

1.1.1. El riego de liga

El vínculo entre la superficie existente y la capa de refuerzo en caliente aplicada, depende fundamentalmente de la cantidad de ligante asfáltico residual del riego efectuado con una emulsión asfáltica (parámetro mediante el cual se expresa la dotación en cuestión) (Ricci, 2011). 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, Figura 1) (DNV, 2017).



Figura 1. Máquina de ensayo SBT. Fuente: Montestrusque et al., 2015

1.1.2. El fresado en la rehabilitación

Los equipos de fresado dan origen a diversos resultados de textura superficial, Figura 2, que van desde el fresado estándar (izquierda), pasando por el fino (centro) y llegando al microfresado (derecha) [11].



Figura 2. Tipos de fresado. Fuente: Bonfim, 2008

Puede establecerse en vistas a los estudios a realizarse que, fijándose una escala de seis casos patrones de fresado a ser considerados, los mismos registrarían los valores que se observan en la Tabla 1 (Wirtgen, 2015; The Asphalt Contractor, 2011; Montestrusque et al., 2015; Bussard, 2014).

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

1.1.3. El análisis de la respuesta mecánica en la interfase

El análisis estructural de la interfase que se realice estará condicionado al modelo estructural que se emplee (EICAM, 1998; Uzan, 1978). Específicamente en los pavimentos flexibles multicapas, las solicitaciones del tránsito introducen tensiones en la estructura que son absorbidas por el conjunto de las distintas capas, desde la capa de rodamiento hacia las capas inferiores de la estructura y la subrasante (Giovanon & Buono, 2008; Yaacob et al., 2014), por lo que un adecuado modelado de la interfase lleva a optimizar los costos de una rehabilitación (Romanoschi, 1999) si considera la incidencia del fresado y sus características en cada caso en particular (Brown & Bruton, 1984). La mayoría de los investigadores en tal sentido desarrollan nuevos prototipos para mejorar las investigaciones correspondientes, demostrándose que los ensayos de corte son un buen y efectivo método de análisis (Giovanon

& Pagola, 2012). Los modelos mecánicos de interfaces expresan la relación entre el desplazamiento de corte a lo largo del plano de interfase y los esfuerzos normales y de corte. Ante solicitaciones estáticas hasta rotura, Romanoschi (1999) ha obtenido gráficas de las curvas típicas de esfuerzo de corte vs. desplazamiento, en su estudio de interfaces entre capas asfálticas. Dada la naturaleza cíclica de la carga en las interfaces de un pavimento, sólo los sectores elásticos y el sector de fricción del ensayo estático hasta rotura son empleables en su descripción. 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. El módulo K en el modelo constitutivo se da hasta el Esfuerzo de Corte Máximo (S_{max}); 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 K difiere fuertemente con el nivel del esfuerzo normal aplicado. Se puede pensar entonces en el modelo resumido de la Figura 3, con un punto de falla S_{max} a 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.

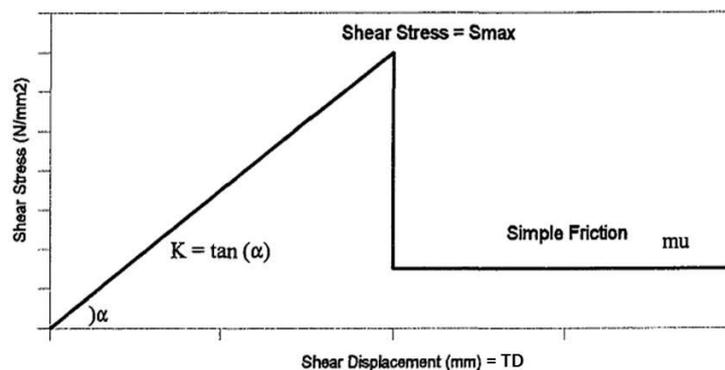


Figura 3. Modelo constitutivo simplificado. Fuente: Romanoschi, 1999

1.1.4. El ensayo al corte de la interfase

A nivel mundial se observan numerosos ensayos, dado que los distintos investigadores de la temática no se han puesto de acuerdo hasta el momento en cuanto a cuál utilizar (D'andrea et al., 2013; Tostiscarelli, 2002). 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 (D'andrea et al., 2013). 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 4.



Figura 4. Ensayo seleccionado para el estudio

En función de los datos recabados y de las experiencias efectuadas por Delbono (2014) y Ricci (2011), 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 Argentina y de fácil obtención mediante sistemas sencillos de acondicionamiento.

El equipo de estudio liderado por D'Andrea (2013), ha relevado que con el compactador Marshall se pueden confeccionar probetas dobles cilíndricas aplicando la compactación sólo en la cara superficial. Ricci (2011) ha efectuado estudios de series de probetas dobles confeccionadas con una metodología de compactación análoga, con lo que determinó que las diferencias de densidades a lo largo de la probeta son estadísticamente despreciables. Entre ambas capas de este tipo de probetas se materializa el riego de liga, con un curado estandarizable en laboratorio (Yaacob et al., 2014), 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 ha decidido 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, según puede observarse en la Figura 5. Por esto las deformaciones tangenciales y las tensiones de corte resultan diferentes a las obtenibles con el ensayo de corte SBT, donde 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.



Figura 5. Deformación en zona central de la probeta doble durante el ensayo

1.1.5. Determinación del incremento de área de interfase por fresado

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), por ejemplo mediante simulación numérica, 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 (IRAM, 1997). Siguiéndose esta línea de trabajo, se ha logrado establecer que la fórmula que permite estimar el Coeficiente del Incremento del Area (*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 ha sido corroborada en laboratorio sobre probetas de los 6 casos representativos establecidos, simulándose mediante el uso de una hoja diamantada los distintos grados de fresado (Figura 6); y 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 6. Simulación fresado 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

En la Figura 7, se observa en la imagen superior un corte proviene de un testigo extraído en obra luego del proceso de fresado y en la imagen inferior de la sección lograda para el Caso 3,

que se identifica como el correspondiente a la situación real, ambas en una misma escala. El análisis visual comparativo demuestra la similitud lograda con la técnica de simulación del fresado.

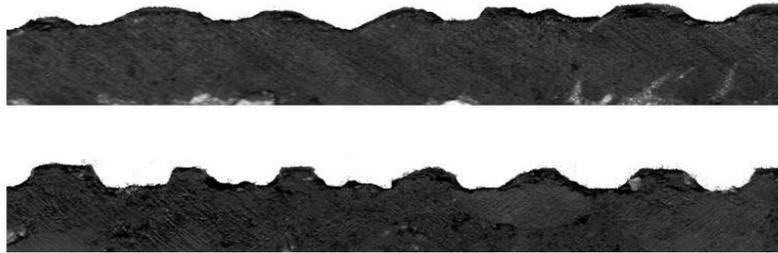


Figura 7. Perfil de fresado real versus simulación por aserrado

Además, se arriba a la Tabla 3 con los valores representativos basados en observaciones de campo de las magnitudes 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 8.

Tabla 3. 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

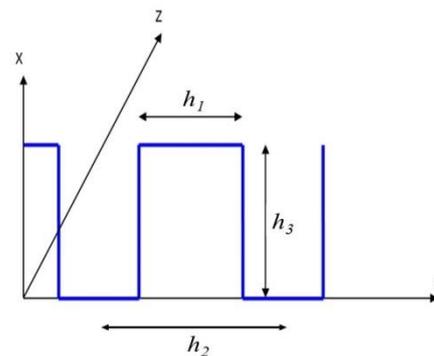


Figura 8. Dimensiones del perfil dentado

1.2. Resultados y discusión del análisis ante solicitaciones estáticas

1.2.1. Contenido óptimo de riego de liga 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 liga para el caso de la no existencia del fresado en la interfase (superficie "lisa"). Para eso se selecciona una emulsión asfáltica catiónica de corte rápido a ser empleada y una mezcla asfáltica 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 decide analizar los contenidos de riego de liga de 0,0 l/m², 0,1 l/m², 0,2 l/m², 0,3 l/m² y 0,4 l/m². Estableciéndose un número de 3 probetas por contenido, se procede a moldear entonces las 15 probetas a ser

analizadas de la Figura 9. A dichas probetas se le determina 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.



Figura 9. Probetas dobles 1 a 12 y I a III

Un juego de curvas resultantes tipo y los parámetros en análisis obtenidos para la serie de probetas ensayadas puede observarse de la Figura 10, correspondiente a la dotación de 0,1 l/m², donde las gráficas de cada probeta ha sido desplazada en el eje de las deformaciones una distancia correspondiente a los 4,0 mm, para una mejor observación.

Puede elaborarse luego el resumen de resultados de la Tabla 4 con los valores promedios de la tensión de corte máxima S_{max} y de desplazamiento al corte en la rotura TD .

Tabla 4. 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

Máquina: **Emic DL3000N** Célula: **Trd 26** Extensômetro: - 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

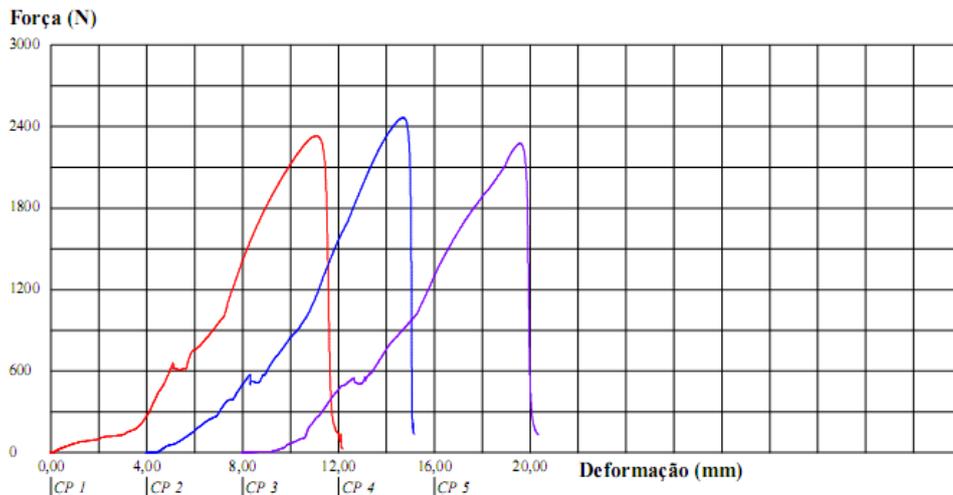


Figura 10. Resultados para las probetas con dotación 0,1 l/m²

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 (DNV, 2017), 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, donde según la norma NLT-382 permite el uso de dos dispositivos de corte diferentes; el Dispositivo A (Ensayo de SBT) y el Dispositivo B (Ensayo de LCB), obteniéndose resultados aproximadamente en un 20 % superiores cuando se utiliza el Dispositivo A. Dado lo expresado, se decide llevar adelante ensayos complementarios mediante el equipo de Ensayo de LCB disponible, 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 descritos 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 5. En la Figura 11 se observa una imagen durante la realización de los ensayos, en todos los casos la rotura se ha producido en la interfase. 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.

Tabla 5. Resultados Ensayo LCB

Prob.	Carga (kg)	<i>S_{max}</i> por LCB (MPa)	<i>S_{max}</i> corregida SBT (MPa)	<i>TD</i> (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 11. Ensayo de LCB

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 liga 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 del Caso 3, a la aplicación con pincel de la dotación de riego de liga 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, logrando imágenes como las de la Figura 12. 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 12. 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, para la Situación 1 a la Situación 4 respectivamente, en los 6 casos de simulación de fresado. Se procede al moldeo de las probetas dobles a ser analizadas, estableciéndose un número de 3 probetas por caso. Luego de moldeadas las bases se procede al aserrado superficial de las probetas, según se observa en la Figura 13 para una probeta correspondiente al Caso 5. En la Figura 14 se observan las probetas moldeadas para la Situación 4, a manera de ejemplo. Nuevamente, se les determina su Densidad Marshall, obteniéndose los resultados que verifican la forma de moldeo adoptada y se procede a su ensayo mediante el procedimiento desarrollado. Cabe destacar aquí que dado que la flexión principal del pavimento se da en su sentido longitudinal y que el fresado presenta su superficie dentada también en este sentido, se decide efectuar los ensayos con la probeta doble dispuesta de acuerdo a la orientación que puede observarse en la Figura 15.



Figura 13. Aserrado de una probeta del Caso 5



Figura 14. Probetas de la Situación 4

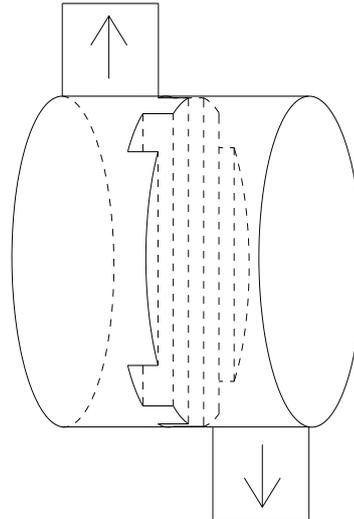


Figura 15. Orientación en el ensayo

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 parte en el riego y parte en la textura de la probeta en la interfase. Los resultados obtenidos permiten desarrollar la Tabla 6 y la Tabla 7, donde 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 $DRI = CIR \cdot DR$.

Tabla 6. Resumen de resultados de S_{max} para ensayos sobre superficie fresada

	Caso 1		Caso 2		Caso 3		Caso 4		Caso 5		Caso 6	
	CI	S_{max} (MPa)										
Sit. 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
Sit. 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
Sit. 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
Sit. 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 7. 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)										
Sit. 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
Sit. 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
Sit. 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
Sit. 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

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 8 se observan los valores de ambas variables a ser correlacionadas y en la Figura 16 la gráfica con la correlación obtenida.

Tabla 8. Valores de *CIR* vs *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

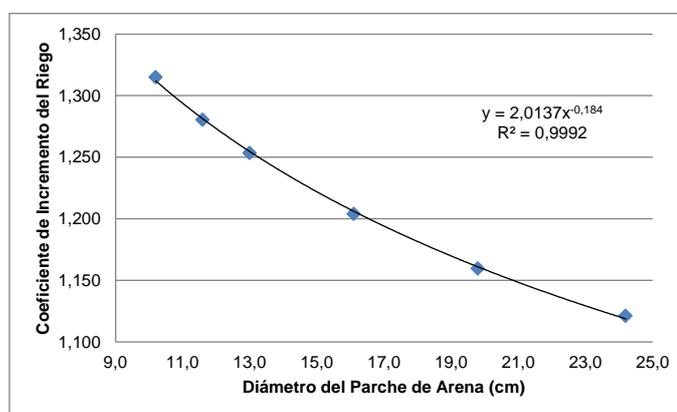


Figura 16. Gráfica de *CIR* versus *DPA*

Como se observa en la Figura 16, 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 (Bello, 2016). La fórmula que permite finalmente establecer el *CIR* en función del *DPA*, resultante para un volumen de arena de 40 cm^3 , es entonces $CIR = 2,014 \cdot DPA^{-0,184}$.

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 liga 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 liga 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 liga 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 asfáltica, previo a la colocación de la capa de rodamiento asfáltica. En dicha situación, la determinación de la dotación óptima de riego de liga, 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 pavimentos muy envejecidos, en las cuales el moldeo 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 situación de muestra, el Caso 4, analizándose su respuesta a fatiga en las cuatro Situaciones que fueran descriptas para el estudio basado en solicitaciones estáticas (Situación 1 a Situación 4); y de ese modo observar si el contenido óptimo establecido por ambas vías se condice.

Para conducir los análisis a fatiga, se toma de la recopilación bibliográfica aquella sistemática de ensayo que se presume refleja de mejor manera las condiciones de campo, y resulta de aplicación probable a los propósitos de este trabajo. El ensayo en cuestión es el propuesto por Romanoschi (1999), denominado *Shear Fatigue Test of the Asphalt-to-Asphalt Interfaces* (ensayo de fatiga al corte de interfases entre capas asfálticas), cuyo esquema puede observarse en la Figura 17. Se ve como, dada la inclinación adoptada, la carga cíclica vertical P se descompone en una carga normal N y en una carga de corte tangencial a la interfase en análisis T . Como en este caso la inclinación es cercana a los 25° , se obtiene una relación 2:1 entre la fuerza N y la fuerza T .

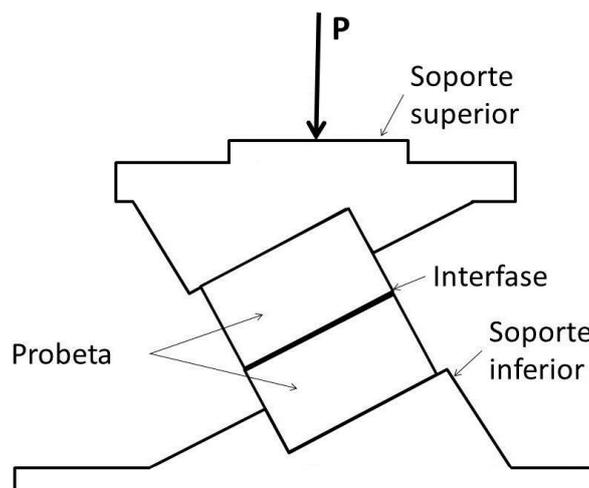


Figura 17. Esquema del *Shear Fatigue Test*

Para efectuar este ensayo se cuenta con el equipo destinado al ensayo de Módulo Dinámico conforme a la Norma UNE-EN 12697-26 [12], el cual puede ser empleado mediante algunas modificaciones menores a tales efectos. Dicho equipo se configura para otorgar una dada cantidad de ciclos de carga por segundo, con la gráfica de sollicitación que se observa en la Figura 18.

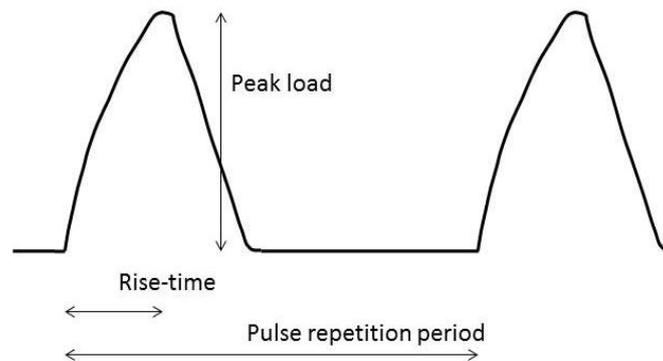


Figura 18. Ciclo de carga para el ensayo a fatiga

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

El esquema del sistema de ensayo adaptado a los efectos del desarrollo de este trabajo puede observarse en la Figura 19, con los surcos del fresado dispuesto en dirección al plano de deslizamiento a generarse durante el ensayo.

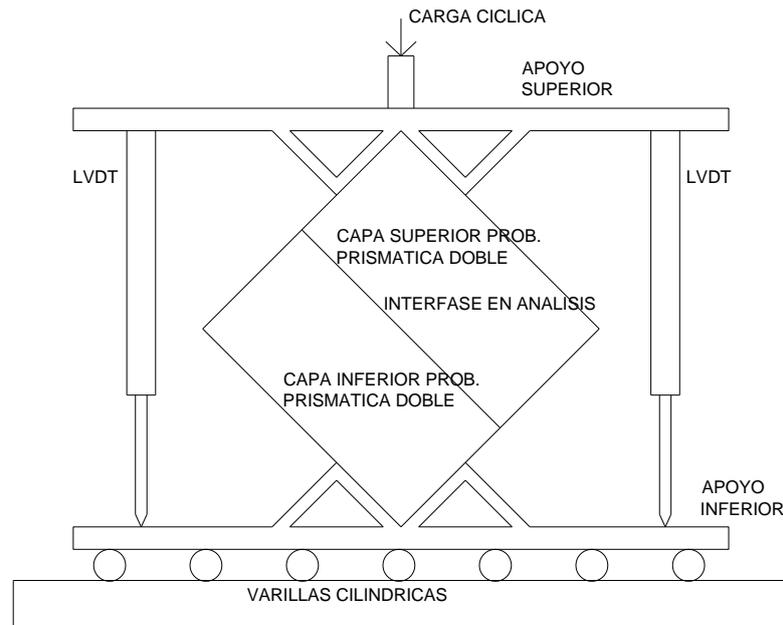


Figura 19. Esquema de ensayo de fatiga de la interfase adaptado

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

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

En la Figura 20 se observa una imagen de las dos probetas de base, luego de moldeadas mediante el compactador *Roller Compact*, habiéndose señalado el sentido de compactación, para que sea coincidente luego con el sentido de la simulación de fresado.



Figura 20. Bases para las probetas moldeadas con *Roller Compact*

En la Figura 21 se observan las probetas de base una vez que se les ha realizado la simulación del fresado mediante aserrado. Se puede ver en la imagen como se ha delimitado los sectores de 15 cm x 30 cm destinados a la aplicación del riego para cada una de las Situaciones, es decir la mitad de cada una de las probetas de base moldeadas.



Figura 21. Bases para las probetas con fresado simulado para Caso 4

En la Figura 23 se muestran las probetas dobles resultantes, luego de ser efectuada la capa de revestimiento.



Figura 23. Probetas dobles prismáticas moldeadas

A partir de las probetas dobles prismáticas, y mediante aserrado con hoja diamantada, se arriban a las 12 probetas cúbicas a ser ensayadas a la fatiga que se muestran en la Figura 24.



Figura 24. Probetas cúbicas generadas por aserrado para análisis a fatiga, Caso 4

Con un escáner Epson Stylus CX9400, se obtiene una imagen en alta resolución de la cara transversal a la dirección de fresado de la probeta, que se observa en la Figura 25 para el caso de la Situación 1, que es la que presenta mayor dotación del riego. Puede verse en la imagen que la interfase se torna imperceptible a simple vista, lo cual puede tomarse como un indicio de la validez del procedimiento de moldeo adoptado. Cabe acotar que la imagen se ha insertado en este documento en escala real. Se efectúa además el análisis de dicha superficie de corte con lupa. En la Figura 26 se observa en la imagen de la izquierda la fotografía tomada con la lupa, y en la de la derecha como sobre esa fotografía se ha marcado la interfase en rojo. Por comparación entre ambas imágenes se puede ratificar que la interfase resulta casi imperceptible (para una idea de la escala considerar que la altura de fresado se encuentra en aproximadamente 5 mm).

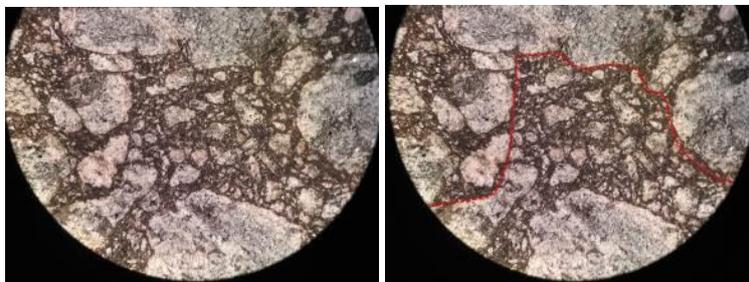


Figura 26. Imágenes con lupa de un corte en sentido transversal al fresado



Figura 25. Escaneo en alta resolución de un corte en sentido transversal al fresado

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 un periodo de aplicación de la carga de 1 ciclo por segundo y con 100.000 repeticiones. Las probetas son ensayadas de acuerdo al procedimiento descrito. En la Figura 27 se observan imágenes tomadas durante el ensayo de una de las probetas. En la imagen de la izquierda se ve una probeta dentro de la cámara de acondicionamiento y en la de la derecha el equipo completo (que incluye el regulador neumático de carga, la adquisidora de datos y la computadora con el programa de regulación del ensayo). Las probetas ensayadas dejan observar que la evolución en la deformación vertical registrada tiene su correlato en el desplazamiento de ambas capas en la interfase. Lo señalado se observa en las imágenes de la Figura 28, en las cuales se ve a la izquierda la probeta ensayada no deformada, y en las imágenes de la derecha el desplazamiento entre las capas en la interfase (ambas imágenes de la derecha son idénticas, sólo que en la superior se ha marcado con rojo la interfase para que sea más fácilmente observable).

Las curvas de evolución del desplazamiento en la interfase (calculado a partir de la deformación vertical registrada) versus los ciclos de carga, para la primera serie de probetas se observa en la Figura 29.



Figura 27. Imágenes durante el ensayo a fatiga de una de las probetas cúbicas

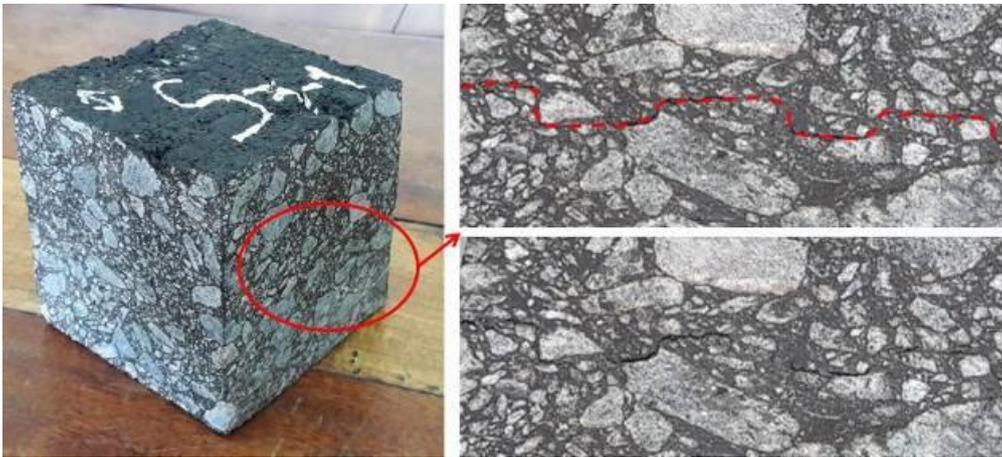


Figura 28. Detalle de probeta ensayada a fatiga y su interfase

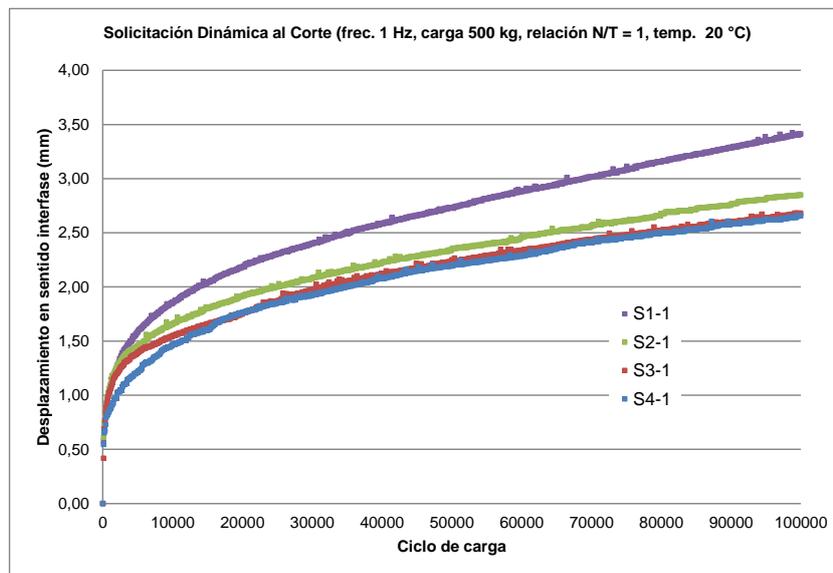


Figura 29. Curvas desplazamiento versus ciclos de carga para la primera serie

Si bien las curvas volcadas en la Figura 29 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 9 en la cual se vuelcan los resultados obtenidos para la primera serie de ensayos.

Tabla 9. 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 solicitaciones estáticas, pues demostraría que la Situación 3 sería también, ante las condicionantes establecidas para esta primera serie de probetas, la que mejor respuesta daría ante las solicitaciones dinámicas.

Segunda serie de ensayos a fatiga

La primera serie de ensayos demuestra una tendencia en los resultados coincidentes con los obtenidos ante solicitaciones estáticas. Se observa que la temperatura de ensayo y la frecuencia de carga seleccionadas requerirían de una cantidad de repeticiones en las solicitaciones para llevar a las probetas a situaciones cercanas a la rotura marcadamente por encima de las analizadas. En tal sentido, cabe señalar que para la frecuencia establecida, los 100.000 ciclos de carga insumen más de 30 horas de ensayo por probeta, incluyéndose su acondicionamiento. Se decide ensayar la segunda serie de probetas a una temperatura de ensayo de 40 °C, habitual en otros estudios sobre sistemas que involucran mezclas asfálticas, como es el caso de la determinación de su Módulo Dinámico, para observar el comportamiento esperable a mayores temperaturas. El resto de los parámetros, como la frecuencia de cargas y su amplitud, se decide dejarlos constantes. Al ensayar las probetas se obtienen diferentes

comportamientos. En la Figura 30 se observa la probeta S_{1-2} ya ensayada, vista de perfil a la izquierda y con un detalle de la interfase a la derecha; en ambas imágenes se ve como la falla se ha producido claramente por el desplazamiento relativo de las capas en la interfase. Por su parte en la Figura 31 se observa la probeta S_{4-2} ya ensayada, con una vista de perfil a la izquierda y ese mismo perfil pero con el camino de la fisura remarcado a la derecha; lo que deja ver que la falla se produce parte por el desplazamiento relativo en la interfase y parte por la rotura de la mezcla asfáltica. Se deduce en tal sentido, un mejor comportamiento ante las menores dotaciones de riego de liga analizadas. Las curvas de evolución del desplazamiento en la interfase (calculado a partir de la deformación vertical registrada) versus los ciclos de carga, para la segunda serie de probetas se observa en la Figura 32. 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 10 muestra los resultados obtenidos en tal sentido.



Figura 30. Imágenes de la probeta S_{1-2} ya ensayada

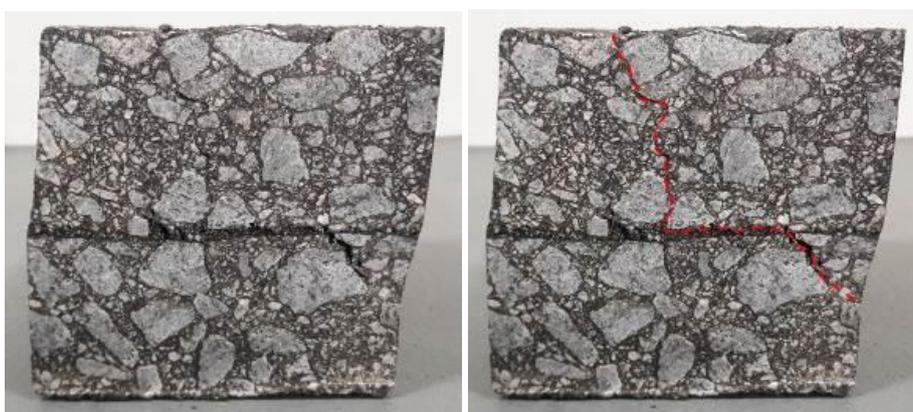


Figura 31. Imágenes de la probeta S_{4-2} ya ensayada

Puede observarse como la cantidad de ciclos para los TD_{5mm} resulta óptima para la Situación 3. En cambio, al observar los ciclos para los TD_{10mm} , se ve que la situación óptima se da claramente en la probeta S_{4-2} . Esto podría interpretarse como un indicio en cuanto a que a

temperaturas elevadas de operación, al menos para los materiales analizados, el mejor comportamiento de la interfase se da con menores dotaciones de riego de liga que a temperaturas de operación intermedias. De todos modos, también es probable, dado las fisuras observadas en las probetas, que a ese nivel de desplazamientos relativos el sistema se encuentre ya en falla. Por lo expuesto, los resultados de los ensayos efectuados con esta serie de probeta estarían nuevamente en coincidencia con los obtenidos de manera estática.

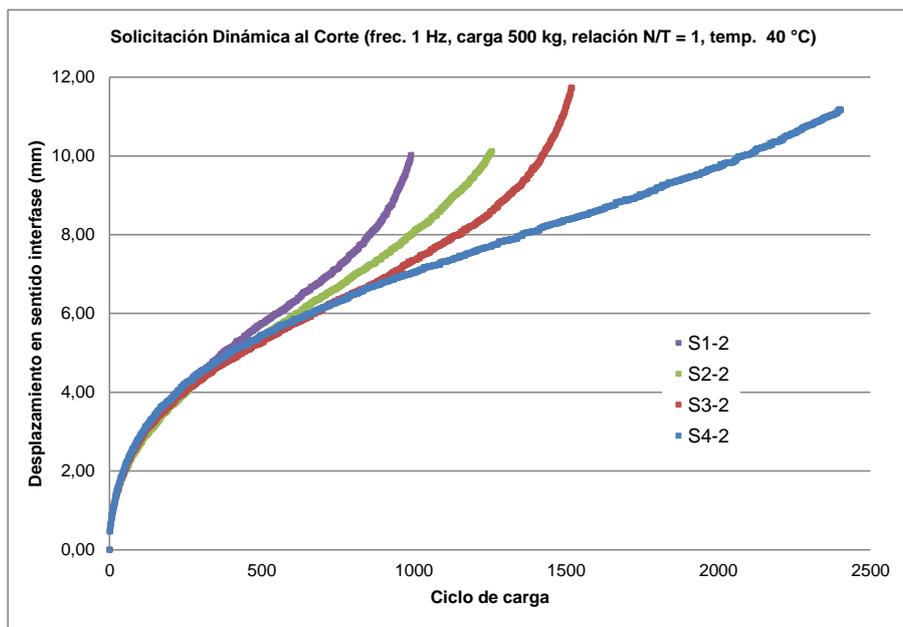


Figura 32. Curvas desplazamiento versus ciclos de carga para la segunda serie

Tabla 10. Resultados para la segunda serie de probetas

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

Tercera serie de ensayos a fatiga

Se decide ensayar la tercera serie de probetas a una temperatura de 5 °C, habitual en otros estudios sobre sistemas que involucran mezclas asfálticas, como es el caso de la determinación de su Módulo Dinámico, para observar el comportamiento esperable a bajas temperaturas. También se modifica la frecuencia de cargas, estableciéndola en 2 ciclos por segundo. Las curvas de evolución del desplazamiento en la interfase (calculado a partir de la deformación vertical registrada) versus los ciclos de carga, para la tercera serie de probetas se observa en la Figura 33. En esta imagen se ve que las curvas de las probetas S₁₋₃ y S₂₋₃ no se muestran hasta los 100.000 ciclos debido a inconvenientes registrados en el equipo adquirente

de datos durante su ensayo; para el ensayo de las probetas S₃₋₃ y S₄₋₃ esos inconvenientes pudieron ser solucionados. Para permitir la mejor observación de las diferencias relativas se decide volcar en la Tabla 11 los desplazamientos en la interfase para 35.000 ciclos (D_{35}), 50.000 ciclos (D_{50}) y 100.000 ciclos (D_{100}).

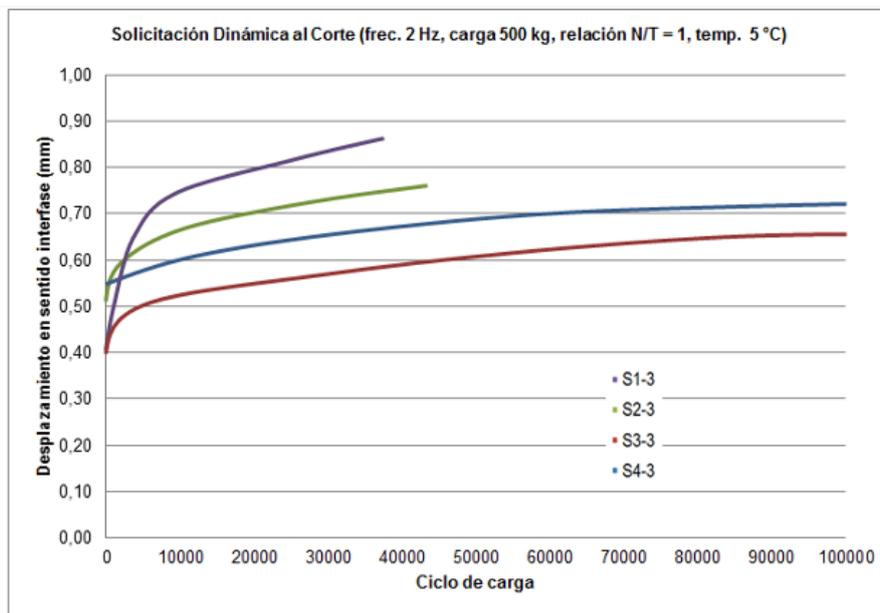


Figura 33. Curvas desplazamiento versus ciclos de carga para la tercera serie

Tabla 11. Resultados para la tercera serie de probetas

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

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

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 aplique el fresado de la capa de rodamiento existente, con la presencia de un espesor remanente de mezcla asfáltica 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. 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 Lérica (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 de 109 km de extensión en el noreste de la Provincia de Buenos Aires, que une el Canal Oeste en la ciudad de Ensenada y el empalme con la Ruta Nacional N° 3 en San Miguel del Monte, tal cual puede observarse en la Figura 34.

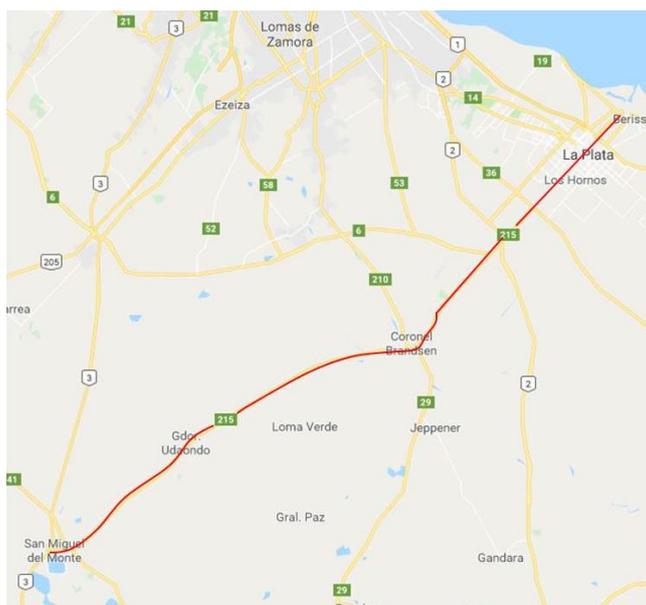


Figura 34. Trazado de la RP215. Fuente: www.google.com.ar/maps (adaptación propia)

En diciembre de 2017, esta ruta 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. Entre los ítems que involucran dicha obra se encuentran los de fresado de la carpeta asfáltica existente en la calzada en sus 5 cm superficiales, la aplicación de un riego de liga asfáltico y la colocación de una capa asfáltica 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. Por lo señalado, se contacta a representantes de la Empresa ICF, contratista de la obra, para solicitar la realización de los estudios. Se obtiene la aprobación correspondiente,

previa consulta a la Dirección de Vialidad de la Provincia de Buenos Aires (DVBA), que posee jurisdicción en el tramo. Paso seguido, se realiza la visita a obra el día 07/12/17, en el sector inicial del tramo en cuestión (cercanía a la localidad de Coronel Brandsen), por haber sido recientemente sometido al fresado correspondiente. En la Figura 35 se observa la ubicación del punto seleccionado para realizar el análisis. En la Figura 36 se observa una vista general del sector y en la Figura 37 el espesor remanente de mezcla asfáltica luego del fresado (aproximadamente 8 cm), dispuesto sobre un pavimento de hormigón. En la Figura 38 se ve el equipo de fresado utilizado en la obra, como así también un detalle de su denominación comercial.



Figura 35. Sector en el cual se realiza el análisis. Fuente: Google Maps (adaptación propia)



Figura 36. Vista general del sector analizado

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 cm^3 de arena establecido como óptimo. En la Figura 39 se observa una imagen general con las tres determinaciones realizadas sobre una misma línea de fresado, las que permite arribar a un *DPA* representativo de 21,6 cm.



Figura 37. Vista lateral del espesor remanente de mezcla asfáltica



Figura 38. Equipo de fresado utilizado en la obra



Figura 39. 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 9 testigos de 10 cm de diámetro de la mezcla asfáltica remanente. En la Figura 40 se observan imágenes tomadas durante la extracción de dichos testigos.



Figura 40. Extracción de testigos en el sector en análisis

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. En la Figura 41 se observan los testigos obtenidos por esta vía. Al material sobrante del acondicionamiento por corte de los testigos se le realiza la determinación del contenido de cemento asfáltico 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 (Rivera & Botasso, 2019). Se obtiene como resultado un contenido de cemento asfáltico del 4,8 %. Los áridos recuperados de la muestra dejan apreciar visualmente que se trata de una mezcla asfáltica 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 (DNV, 2017), estableciéndose que encuadran perfectamente. Por todos los datos recabados se arriba a la conclusión de que la mezcla asfáltica remanente en obra es una típica mezcla CAC-D19 de la zona, con similares características a la mezcla asfáltica utilizada en las experiencias de laboratorio.



Figura 41. Testigos obtenidos acondicionados

Si bien para la obra se cuenta con una dotación del riego de liga a ser aplicado, constituido por una emulsión asfáltica 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 liga 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 liga óptima establecida para la interfase en superficies lisas (es decir, la Situación 4).
- Dotación II: dotación de riego de liga establecida mediante la fórmula desarrollada para estimar el *CIR* (es decir, la Situación 3).
- Dotación III: dotación de riego de liga establecida mediante el incremento directo de la superficie de contacto en la interfase, es decir empleando el *CIA* (es decir, la Situación 1).

Las probetas dobles moldeadas, luego de haber sido aplicadas las dotaciones de riego calculadas, se muestran en la Figura 42; en la cual se observa en la columna de la izquierda las probetas correspondientes a la Dotación I, en la columna central las de la Dotación II y en la columna de la derecha las de la Dotación III.



Figura 42. Probetas dobles moldeadas a partir de los testigos extraídos

En la Figura 43 se puede apreciar una probeta ya ensayada representativa de cada una de las dotaciones (Dotación I a III, desde abajo hacia arriba, respectivamente). La imagen permite ver como con la Dotación I la rotura se genera casi en su totalidad en el riego de liga, 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.



Figura 43. Probetas ensayadas de la Dotación I a III

El resumen de los resultados promedios se observa en la Tabla 12, en la que se señala la tensión de corte máxima S_{max} y el desplazamiento al corte en la rotura TD .

Tabla 12. Resumen de los resultados de la Dotación I a III

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

Se ve 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 ; a pesar de que no es posible establecer si se trata de la dotación óptima ajustada. 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 asfáltica fresada de una obra existente como base y un revestimiento de carpeta asfáltica nueva moldeado en laboratorio. Por el otro, se encuentran las que poseen la capa de base (con fresado simulado por aserrado) y 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.

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 asfálticas que emplean áridos calizos y cementos asfálticos de baja penetración. A raíz de la existencia de un proyecto de investigación conjunto, relacionado con la temática que aborda la presente tesis, 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 asfálticas 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. Este último establece que esta mezcla asfáltica debe responder a ciertos límites granulométricos, presentar un contenido mínimo de cemento asfáltico de 4,5 % y estar colocada en espesores de entre 4 cm y 5 cm (BOE, 2015). También el PG-3 estipula las características a ser cumplidas por el riego de liga a ser utilizado, del tipo C60B3ADH.

La formulación de la mezcla asfáltica 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 cemento asfáltico 35/50 (en un 4,75 %). En la Figura 44 se observan muestras de los agregados en cuestión utilizados en la confección de las mezclas asfálticas a ser empleadas en la experiencia. La emulsión asfáltica empleada para el riego de liga es del tipo C60B4ADH, la cual presenta una velocidad de rotura menor a la C60B3ADH, con un residuo de cemento asfáltico del 60 % y una penetración del asfalto residual (en 0,1 mm) de 180-200.



Figura 44. Agregados calizos utilizados en la experiencia

A partir de estos materiales y dosificación, se moldean las probetas dobles con interfase lisa correspondientes a las dotaciones de residuo asfáltico del riego de liga de 200 g/m², 300 g/m², 400 g/m², 500 g/m², 600 g/m² y 800 g/m², a razón de tres probetas por dotación. 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 cemento asfáltico. 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 y que se observa en la Figura 45.



Figura 45. Equipo para la compactación de laboratorio

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, de acuerdo a lo que se observa en la Figura 46. Las probetas se ensayan finalmente mediante la metodología especificada. En la Figura 47 se observa una imagen tomada durante la realización de un ensayo y en la Figura 48 se ve una probeta ya ensayada, aún en la cámara de la prensa de ensayo. Se obtienen, una vez ensayadas las probetas, los resultados promedio que se observan en la Tabla 13 y la gráfica de la Figura 49.



Figura 46. Probetas en acondicionamiento a 20 °C. Fuente: Christian Selk



Figura 47. Equipo de Ensayo de LCB



Figura 48. Probeta ensayada en el equipo LCB. Fuente: Christian Selk

Tabla 13. Resultados de los ensayos al corte con interfase lisa

Dotación (g/m^2)	S_{max} (MPa)	TD (mm)
200	0,868	1,21
300	0,904	1,24
400	0,923	1,17
500	0,923	1,28
600	0,912	1,17
800	0,754	1,32

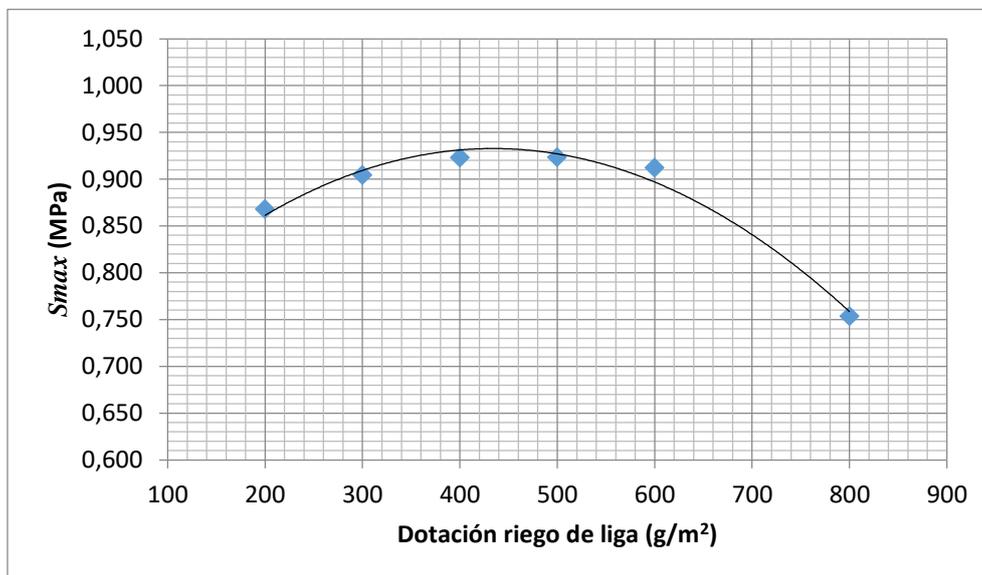


Figura 49. Resistencia al corte versus dotación de riego, interfase lisa

De acuerdo a lo que se aprecia en la Figura 49, se establece para esta sección del estudio un contenido óptimo de riego de liga para la interfase lisa de 400 g/m^2 . De todos modos, se observa también en esta imagen 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 asfáltico implicado. Uno de ellos es que la penetración del cemento asfáltico residual del riego de liga 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 este 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 liga empleados.

A continuación se procede a trasladar este contenido óptimo de riego de liga 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 asfáltica realizada con los materiales en estudio. Dicho tramo de prueba, ubicado como ya se expresara en la provincia de Lérica, se encuentra en las instalaciones del obrador que la empresa Benito Arnó e Hijos SAU posee en el municipio de Alfarrás. En la Figura 50 se observa una vista del mismo, una vez efectuado el fresado en julio de 2018.



Figura 50. Detalle de la textura del fresado superficial. Fuente: Benito Arnó e Hijos SAU

En la Figura 51 se puede observar a la izquierda la realización de las mediciones con parche de arena de la textura del tramo (el valor de *DPA* se sitúa en 15,9 cm) 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, tal cual se observa en la Figura 52.



Figura 51. Tareas en el tramo en estudio. Fuente: Benito Arnó e Hijos SAU



Figura 52. Testigos numerados y acondicionados en espesor

Las dotaciones son aplicadas a los testigos, de acuerdo a lo que puede verse en la Figura 53. 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, según se observa en la Figura 54.



Figura 7-30. Testigos con el riego de liga aplicado



Figura 7-31. Probetas dobles parcialmente desmoldadas para su ensayo

Entonces, se procede al ensayo de las probetas, obteniéndose curvas de esfuerzo al corte versus desplazamiento en la interfase, como la que se observa en la Figura 55, perteneciente a la Probeta 5, a manera de ejemplo. 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.

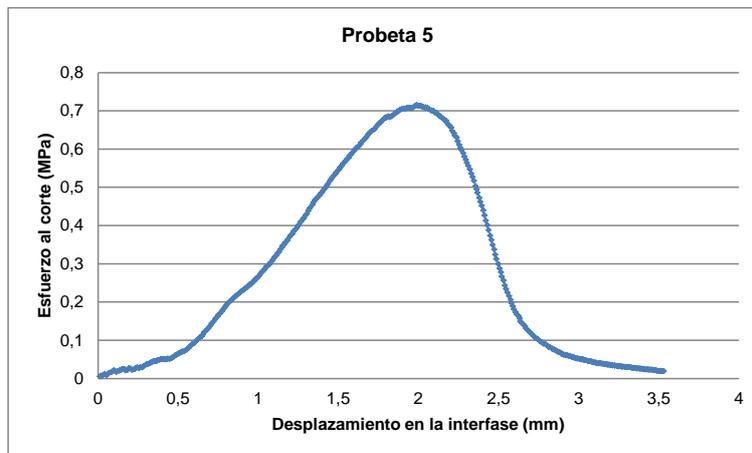


Figura 55. Curva de esfuerzo al corte vs. desplazamiento en la interfase, Probeta 5

Mediante los ensayos se obtuvieron los resultados que se observan en la Tabla 14. Para el cálculo de estos valores se ha dejado de lado los correspondientes a la Probeta 1, debido a dificultades presentadas por la misma durante su acondicionamiento, aplicación del riego de liga y moldeo de la capa de revestimiento. También se han descartado los resultados obtenidos con la Probeta 8, porque luego de realizado el ensayo se ha podido determinar, en forma visual por la rotura obtenida, que el sentido de los surcos no ha respetado adecuadamente el paralelismo con el sentido de ensayo previsto. Esto se deduce al observar que, en esta probeta, se produjo la rotura de la capa de revestimiento en un ángulo oblicuo al sentido de los

surcos, sin que ello se percibiera en las restantes probetas, según se puede ver en la Figura 56.

Tabla 14. Resultados de las probetas dobles con interfase fresada

Dotación	CIR	Probeta	S_{max_i} (MPa)	S_{max} (MPa)	TD_i (mm)	TD (mm)
I	1,000	2	0,838	0,847	1,69	1,67
		3	0,855		1,65	
II	1,211	4	0,851	0,804	1,29	1,82
		5	0,715		1,99	
		6	0,845		2,17	
III	1,618	7	0,655	0,742	1,71	1,48
		9	0,829		1,25	



Figura 56. Probeta 8 ensayada, base (izq.) y revestimiento (der.)

Los resultados obtenidos permiten deducir que el contenido óptimo de riego de liga debería ubicarse entre la Dotación I y la Dotación II, más cerca 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 Y RECOMENDACIONES

8.1. Conclusiones

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

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

Previo a la colocación de la capa de refuerzo, corresponde disponer un riego de liga de una emulsión asfáltica para generar una adecuada interfase; a fin de que, si el pavimento existente presenta una buena condición estructural, las tensiones y deformaciones generadas por efecto del tránsito no afecten la vida útil prevista.

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

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

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

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

La fórmula que permite establecer el CIR en función del Diámetro de Parche de Arena (DPA), resultante para un volumen de arena de 40 cm³, es:

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

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

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.

8.2. Recomendaciones

Dado los diversos aspectos abordados y los resultados arribados a lo largo del desarrollo de la tesis, surgen una serie de recomendaciones a ser tenidas en cuenta en futuros análisis que traten la temática. Se enumeran aquellas que se consideran de mayor relevancia:

- Profundizar el análisis en lo referido a la manera de representar en los diseños estructurales de rehabilitaciones sobre pavimentos flexibles, el grado de adherencia generado en la interfase, en función de la textura resultante en la misma.
- Buscar de introducir criterios de fallas a fatiga de las interfases entre capas asfálticas en estos sistemas de diseño estructural mencionados.
- Establecer adecuadas correlaciones entre las diversas tipologías de ensayos existentes con sollicitación al corte de la interfase, tanto ante cargas estáticas como dinámicas, a fin de poder contar con parámetros de referencia comparativos.
- Analizar la correlación entre el régimen de temperaturas de la zona de emplazamiento de una obra vial y la temperatura de ensayo de la interfase, tanto ante cargas estáticas como dinámicas, a fin de establecer la dotación óptima del riego de liga a ser empleado en dicha obra; sobre todo cuando se presuponen temperaturas

características alejadas de los 20 °C, establecidos como de referencia en la presente tesis.

- Corroborar ante diversos materiales empleados en la elaboración de mezclas asfálticas en caliente, en obras viales ubicadas en otras zonas de la Argentina o países de la región, si la proporción de incremento del riego de liga en función del aumento de la textura determinado en esta tesis, resulta también en la situación óptima desde el punto de vista de la respuesta mecánica de la interfase. En caso de no ser así, realizar los análisis en base a la metodología análoga al Ensayo de Parche de Arena desarrollada, como base para futuros análisis comparativos en tal sentido, a partir de proporcionalidades diferentes de dicha relación para diversas tipologías de materiales, o grupos de ellos.

REFERENCIAS

BELLO, M., "Apuntes de la capacitación sobre predicción y bondad de ajuste", Capacitaciones Software-Shop, Colombia, 2016.

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.

BONFIM, V., "Fresado de pavimentos asfálticos", Editorial Exceção, primera edición, Brasil, 2008.

BROWN, S.F., BRUNTON, J.M., "The influence of bonding between bituminous layers", Highways Transportation, 31(5), 16-17, EEUU, 1984.

BUSSARD, M., "Milling & Micro Milling", P.R. Systems Inc., EE UU, 2014.

D'ANDREA, A., TOZZO, C., BOSCHETTO, A., BOTTINI, L., "Interfase roughness parameters and shear strength", Modern Applied Science (ISSN 1913-1844), Canadian Center of Science and Education, vol 7, n 10, Canada, 2013.

DELBONO, H.L., "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 (inédita), 379 p. La Plata, Argentina, 2014.

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]

EICAM, "Curso de actualización de diseño estructural de caminos, método AASHTO93", Universidad Nacional de San Juan, Argentina, 1998.

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.

GIOVANON, O., BUONO, F., "Riego de liga su importancia estructural y análisis tensional", XXXV Reunión del Asfalto, Comisión Permanente del Asfalto, Rosario, Argentina, 2008.

GIOVANON, O., PAGOLA, M., “Modelo mecanicista empírico para análisis de pavimentos flexibles desarrollado en Argentina”, Revista Carreteras, Asociación Argentina de Carreteras, número 208, diciembre, pp 76-86, Argentina, 2012.

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.

MARTÍNEZ-ECHEVARRÍA, M.J., “Estudio de compactación en laboratorio para mezclas recicladas en frío con emulsión bituminosa”, Tesis Doctoral, Universidad de Granada, España, 2012.

MILLER, J., BELLINGER, W., “Distress identification manual for the long-term pavement performance program”, fourth revised edition, report n° FHWA-RD-03-031, Washington DC, EEUU, 2003.

MONTETRUSQUE, M., BERNUCCI, L., LEITE, F., TEORO CARMO, C.A., “Avaliação da adherencia de geogrelhas entre camadas asfálticas”, Memorias XVIII Congreso Ibero-Latinoamericano del Asfalto, ISBN 978-950-630-031-9, Bariloche, Argentina, 2015.

NCHRP, “Guide for mechanistic-empirical design of new and rehabilitated pavement structures”, National Research Board, 1-37A team, EEUU, 2004.

RICCI, L.A., “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.

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.

ROMANOSCHI, S.A., “Characterization of Pavement Layer Interfaces”, Louisiana State University and Agricultural & Mechanical College, EEUU, 1999.

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>]

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.

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.

WIRTGEN, “El mundo de las fresadoras en frío de Wirtgen”, Wirtgen Group Company, Alemania, 2015.

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.