

EFFECTO DE LOS FÍLLERES ACTIVOS EN LA RESISTENCIA AL ENVEJECIMIENTO DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS MEDIANTE EL USO DEL ENSAYO FÉNIX

Hugo Bianchetto¹, Adriana Martínez Reguero², Rodrigo Miró Recasens³, Félix Pérez Jiménez⁴,
José Amorós Parras⁵

¹ Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Avellaneda (UTN-FRA). Ramón Franco 5050, Villa Domínico (B1874), Avellaneda, Argentina, hbianchetto@fra.utn.edu.ar

² Universitat Politècnica de Catalunya. Campus Nord, Carrer de Jordi Girona, 1, 3, 08034 Barcelona, España adriana.martinez@upc.edu

³ Universitat Politècnica de Catalunya. Campus Nord, Carrer de Jordi Girona, 1, 3, 08034 Barcelona, España r.miro@upc.edu

⁴ Universitat Politècnica de Catalunya. Campus Nord, Carrer de Jordi Girona, 1, 3, 08034 Barcelona, España edmundoperez@upc.edu

⁵ Universitat Politècnica de Catalunya. Campus Nord, Carrer de Jordi Girona, 1, 3, 08034 Barcelona, España j.amoros@upc.edu

Resumen

Se presentan los resultados de investigaciones realizadas para tratar de esclarecer los beneficios que otorga la incorporación de filleres activos a las mezclas asfálticas en caliente, en particular los derivados del incremento de la resistencia al envejecimiento del mástico y los consecuentes efectos sobre propiedades funcionales y mecánicas de las mezclas después de un cierto período de servicio.

Se empleó para estas experiencias de simulación una mezcla patrón, con los mismos agregados pétreos y ligante bituminoso pero variando el tipo y porcentaje de filler de aporte (cal, carbonato de calcio o una composición de ambos). La metodología de análisis fue el Ensayo Fénix, que evalúa los fallos por fisuración a partir de parámetros representativos, sometiendo las probetas elaboradas a distintos tiempos de envejecimiento acelerado en laboratorio y ensayándolas a temperaturas medias y bajas.

De los resultados logrados se obtienen, mediante un análisis cuali-cuantitativo de los indicadores puestos en juego, conclusiones valiosas acerca de la acción protectora de los filleres activos ante los mecanismos que rigen el fallo por fisuras en mezclas asfálticas envejecidas, puntualizándose las diferencias encontradas en los parámetros representativos que evalúa el Ensayo Fénix al emplear diferentes proporciones de los filleres de aporte incorporados.

Palabras Clave: mezclas asfálticas, filleres activos; envejecimiento; Ensayo Fénix.

1 Introducción

Según el Asphalt Institute, un concreto asfáltico se compone de “ligante asfáltico y agregados bien graduados y de alta calidad” [1]; y define a los agregados como “material duro e inerte, de composición mineral, como arena, grava, escoria o piedra partida”. Quizás sea hora de pensar en una acepción más amplia y adecuada que la admitida por esta institución centenaria.

La propiedad fundamental de las mezclas asfálticas para pavimentación es su capacidad de deformarse sin perder sus cualidades funcionales y estructurales ante solicitaciones relativamente elevadas y repetidas. El parámetro que explica dicho comportamiento es la resistencia al corte, con sus dos factores principales: el friccional, aportado por los componentes granulares, y el cohesivo, provisto por el medio ligante continuo o “mástico” constituido por asfalto y polvo mineral (“filler”), con propiedades reológicas superiores a la del asfalto sólo y cuyo comportamiento depende de las características y proporciones relativas de sus componentes, de la temperatura y de la carga aplicada. La adición de filler modifica ventajosamente las propiedades del conjunto y, consecuentemente, la Tecnología del Asfalto debería admitir a este material como un componente más de las mezclas.

El carácter reológico que presentan los materiales asfálticos complejiza su caracterización. Las propiedades mecánicas, entre ellas la resistencia a la fisuración, varían drásticamente con la temperatura y la velocidad de aplicación de las cargas debido a la susceptibilidad térmica y el comportamiento viscoelástico del ligante [2].

Las fisuras constituyen uno de los tipos de fallas más deletéreas de los pavimentos asfálticos; diseñar mezclas asfálticas resistentes a este mecanismo de deterioro permite lograr pavimentos durables, especialmente para obras localizadas en zonas donde la temperatura ambiente puede sufrir un descenso significativo, aumentando la rigidez de la mezcla [3].

Existen diferentes métodos de ensayo para simular el origen y la propagación de las fisuras a fin de determinar su origen, evaluar las variables condicionantes (tránsito, clima, tiempo de servicio, composición de la mezcla, entre otras) y prever las consecuencias sobre el pavimento, pero son en general complejos y de larga duración. Por tal motivo, la resistencia a la fisuración no suele considerarse adecuadamente en el diseño y en el control de calidad. Respondiendo a esta necesidad, la Universitat Politècnica de Catalunya desarrolló una alternativa de fácil ejecución, el “Ensayo Fénix”, que permite la determinación de parámetros representativos de los mecanismos que rigen los procesos de aparición y propagación de fisuras del concreto asfáltico envejecido y/o desempeñándose a bajas temperaturas en el camino. Se trata de un procedimiento de laboratorio que consiste en exponer media probeta cilíndrica de mezcla asfáltica a un esfuerzo de tracción directa, brindando la posibilidad de considerar variables como la tipología de la mezcla asfáltica, la temperatura de ensayo y los efectos del envejecimiento en el camino durante su vida útil [4, 5].

En este trabajo se conjugan los preceptos del Ensayo Fénix con los correspondientes al Método Universal de Caracterización de Ligantes (UCL) [6], específicamente al utilizarse las mezclas patrón previstas en éste, con una modificación que consiste en mantener el tipo y las proporciones de áridos y de ligante pero incorporando filleres cálcicos de aporte hasta el máximo de su “concentración crítica” [7], concretamente cal hidráulica hidratada o “apagada”, polvo calizo (carbonato de calcio) o una combinación de ambos.

La incorporación a las mezclas bituminosas de filleres de aportación, especialmente de naturaleza cálcica, otorga una serie de beneficios relacionados con la resistencia al envejecimiento y el incremento de la cohesión y la adhesión que promueven un aumento de la vida útil del pavimento, en particular cuando está sometido a condiciones climáticas extremas [8]. Los filleres, en su rol de material pulverulento de relleno, producen el espesamiento de la película de ligante y el cierre parcial de huecos obstaculizando el paso del aire, lo que retarda los mecanismos de oxidación y de volatilización de las fracciones más livianas del asfalto por un efecto de índole física; adicionalmente, los filleres activos, como la cal y el carbonato de calcio, captan diferentes catalizadores de la oxidación que existen naturalmente en el asfalto y atraen moléculas polares que, de estar libres, interaccionarían con los nuevos productos de la oxidación [9].

Se utilizan probetas fabricadas con la mezcla patrón prevista en el Método Universal de Caracterización de Ligantes (UCL), las cuales poseen un elevado contenido de vacíos, lo que posibilita envejecer el ligante aceleradamente en laboratorio en un horno con ventilación forzada, pero ya no como un material aislado como ocurre con los procedimientos de película delgada sino como integrante de una mezcla en la cual interactúa con los agregados y con los filleres; la gran cantidad de huecos interconectados posibilita que el endurecimiento provocado por la acción conjunta del calor y la oxidación sea homogéneo en todo el espécimen.

El proceso de rotura es una combinación de todas las energías liberadas durante la deformación y la falla del material [10]; en tal sentido, el Ensayo Fénix permite calcular de forma efectiva la energía disipada midiendo la resistencia a la fisuración a partir de parámetros representativos. En las experiencias aquí reportadas se corroboran la sensibilidad y la versatilidad del procedimiento, revelando la influencia benéfica de los filleres activos cal y polvo calizo frente a los causales del deterioro por fisuras, exponiendo las mezclas a variados niveles de envejecimiento y evaluando su susceptibilidad térmica al ensayar las probetas a 5°C y 25°C. Durante el ensayo se generan tensiones de tracción alrededor del área de fractura, propagándose la grieta a través del plano inducido.

2 Ensayo Fénix. Fundamentos y propiedades que evalúa

“El ser humano y el Fénix tienen muchas similitudes. Esa emblemática criatura... simboliza el poder de la resiliencia, esa capacidad inigualable donde renovarnos y ser mucho más fuertes...” [11].

El ensayo Fénix determina el esfuerzo necesario para fisurar una probeta semicilíndrica aplicando tracción, Figura 1. Tal sollicitación se aplica mediante dos placas pegadas a la probeta en su plano diametral, sujetas a los anclajes de la prensa. La probeta presenta una pequeña ranura entre las dos placas para facilitar la zona de fisuración. El ensayo se realiza a velocidad constante (1 mm/min) y durante su ejecución se van registrando las cargas generadas en función del desplazamiento, para así luego calcular los parámetros vinculados al proceso de fisuración.

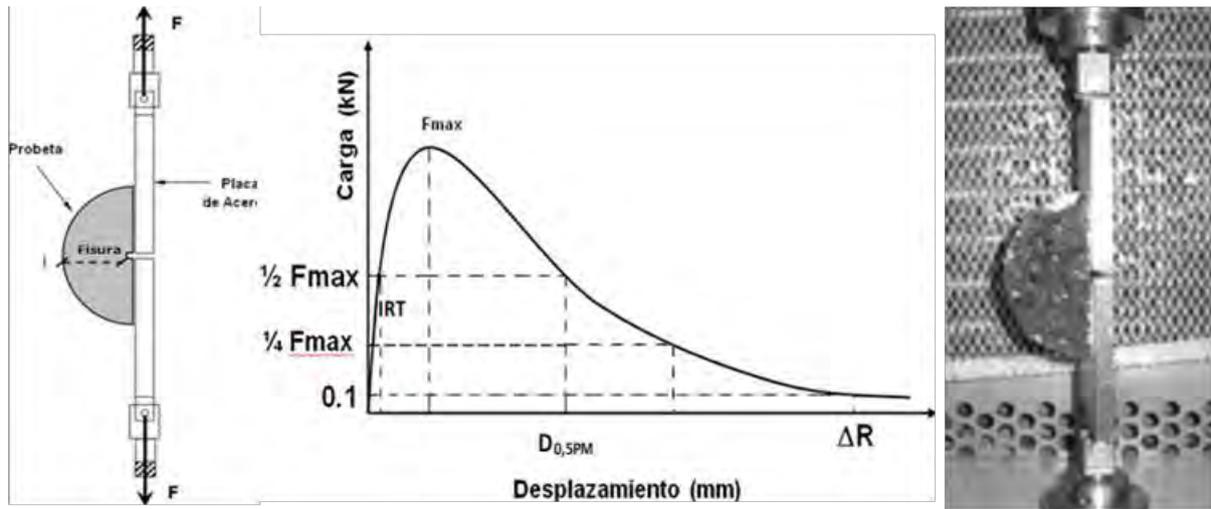


Figura 1. Esquema y fotografía del ensayo Fénix; curva carga-desplazamiento

El aumento casi lineal inicial del esfuerzo aplicado depende de la rigidez de la mezcla. En el ensayo se determina un índice de rigidez a tracción, IRT (1), que es la pendiente de la curva carga-desplazamiento entre el 25 y el 50% de la carga máxima. Este parámetro se relaciona muy bien con el Módulo Dinámico cuando se aplica este ensayo y el de fatiga de tres puntos en probetas fabricadas con el mismo tipo de mezcla [12].

$$IRT = \frac{F_{50} - F_{25}}{(d_{50} - d_{25})} \times \frac{1}{S} = \frac{0,25P_{max}}{(d_{50} - d_{25})} \times \frac{1}{S} \quad (1)$$

Donde:

IRT: índice de rigidez a tracción, en MPa/mm

F_{50} y F_{25} : 50% y 25% de la carga máxima, post-pico, en kN, respectivamente

P_{max} : carga máxima, en kN

d_{50} y d_{25} : desplazamiento en 50% y 25% de la carga máxima, en mm, respectivamente

S: superficie de rotura, en m^2

Por otra parte, la resistencia máxima de la curva carga-desplazamiento estaría asociada con la cohesión proporcionada por el mástico (filler+asfalto) a la mezcla (2).

$$RT_{max} = \frac{P_{max}}{S} \quad (2)$$

Donde RT_{max} es la tensión máxima o resistencia a tracción, en MPa

La cohesión de la mezcla está relacionada con la energía empleada para la rotura total de la probeta. Esta energía disipada de fractura GF se corresponde con el área bajo la curva de carga-desplazamiento respecto de la superficie de fractura; a mayor GF, mayor resistencia a la fisuración de la mezcla (3). Este parámetro, representativo de la respuesta dúctil de la mezcla bituminosa, tiene en cuenta todo el proceso de rotura del material tras la carga máxima y es muy útil para diseñar mezclas resistentes a la fisuración.

$$\int_{df} F(x).dx \quad (3)$$

$$GF = \frac{\int_0^d F \, dx}{S}$$

Donde:

GF: energía de fractura o disipada, en J/m²

F: fuerza en función del desplazamiento x, en N

S: superficie de fractura, en m²

df: desplazamiento final del ensayo, en m

La capacidad de la mezcla a admitir deformaciones después de manifestada la fisura se evalúa con el desplazamiento al 50% de la carga máxima post-pico, $d_{0,5Pm}$ (mm).

Otros parámetros de interés son el desplazamiento en la carga máxima, d_{Pmax} (mm) y el Índice de Tenacidad, IT (mN), medida que identifica la capacidad de la mezcla de mantener unidos sus componentes una vez alcanzada la resistencia máxima.

3 Desarrollo experimental

En este trabajo interinstitucional internacional entre la Universitat Politècnica de Catalunya y la Universidad Tecnológica Nacional de Argentina se estudia el efecto de la adición de filleres comerciales activos de origen cálcico (cal y carbonato de calcio) sobre la resistencia al envejecimiento del mástico bituminoso y su incidencia en la resistencia a la fisuración de las mezclas asfálticas, mediante el análisis con Ensayo Fénix de probetas UCL envejecidas y sin envejecer, ejecutado a 20°C y 5°C (que representan temperaturas media y baja de servicio).

Estas experiencias continúan una línea de investigación de larga data [8, 13, 14] en base al Método UCL, que promovieron la exigencia en las nuevas Especificaciones Técnicas de la Dirección Nacional de Vialidad de Argentina [15] de incorporar cal hidratada en las mezclas asfálticas de tipo superior, respetando un valor mínimo del 1% en peso de la mezcla y un máximo determinado por el Ensayo de Concentración Crítica [7].

3.1 Materiales empleados y mezclas elaboradas

Se utilizaron agregados pétreos porfídicos de trituración con una granulometría tal que el 80% en peso queda comprendido entre los tamices de 5 mm y 2.5 mm, y el 20% restante corresponde a la fracción con tamaños entre 2.5 mm y 0.63 mm. Su densidad es de 2,700 g/cm³.

Los filleres comerciales empleados fueron un carbonato de calcio ((Co₃Ca, de densidad $\rho = 2,717$ g/cm³ y concentración crítica $Cs = 0,304$) y una cal hidratada ($\rho = 2,261$ g/cm³, $Cs = 0,131$).

Las mezclas patrón UCL se dosificaron con un contenido fijo (4,5% en peso sobre agregados) de un asfalto clasificado por penetración como 50-70. Todas ellas consisten en 900 gramos de agregados pétreos, 40,5 gramos de asfalto y una cantidad de filler tal que la concentración volumétrica iguala a la concentración crítica ($Cv/Cs=1$). Con 100% de Co₃Ca, la adición es de 46,6 gramos; con 100% de cal es sólo de 13,4 gramos. Las combinaciones restantes (75% de Co₃Ca y 25% de cal; 25% de Co₃Ca y 75% de cal; y 50% de cada filler) poseen pesos totales incorporados, densidades y concentraciones críticas intermedios respecto de los filleres puros. También se utilizaron mezclas patrón sin filler.

Las probetas Marshall se fabricaron con 50 golpes por cara a una temperatura del orden de 160°C. Un tercio del total se sometió a un envejecimiento acelerado en laboratorio de 7 días a 80°C con ventilación mecánica, otro tercio se envejeció 15 días con la misma temperatura y el tercio restante de las probetas no fueron acondicionadas.

3.2 Resultados de ensayos Fénix

Se dispuso de 4 probetas para cada situación (envejecimiento y temperatura de ensayo) para promediar los valores; en la Tabla 1 se vierten los promedios de los resultados de los vacíos de las mezclas y de los parámetros P_{max} (carga máxima), RT (resistencia a tracción), IRT (índice de rigidez a tracción), GF (energía de fractura) y $d_{0,5Pm}$ (desplazamiento post pico en 50% de la carga máxima).

Tabla 1. Resultados de parámetros del Ensayo Fénix

Serie/filler	Vacíos	Envej. (días)	Temp. (°C)	P _{máx} (kN)	RT (MPa)	IRT (MPa/mm)	GF (J/m ²)	d _{0,5P_m}
100% CO ₃ Ca	22,9	0	5	1,03	0,41	2,76	341	0,68
			20	0,25	0,12	0,71	166	2,05
		7	5	1,08	0,41	2,68	273	0,52
			20	0,35	0,13	1,20	170	1,45
		15	5	1,62	0,60	4,04	230	0,37
			20	0,61	0,18	2,06	232	0,99
75% CaCO ₃ + 25% cal	24,7	0	5	1,12	0,40	2,96	349	0,68
			20	0,33	0,10	0,62	97	2,02
		7	5	1,05	0,41	3,18	252	0,50
			20	0,31	0,12	1,03	188	1,45
		15	5	1,27	0,46	3,63	233	0,42
			20	0,46	0,17	1,40	207	1,01
50% CaCO ₃ + 50% cal	24,9	0	5	0,95	0,36	2,67	315	0,68
			20	0,18	0,07	0,44	89	1,99
		7	5	1,19	0,46	3,31	255	0,45
			20	0,33	0,12	0,95	151	1,28
		15	5	1,24	0,46	3,29	224	0,38
			20	0,44	0,16	1,25	163	0,94
25% CaCO ₃ + 75% cal	25,3	0	5	0,87	0,33	2,82	317	0,68
			20	0,14	0,05	0,38	77	1,70
		7	5	1,23	0,46	3,31	251	0,45
			20	0,35	0,13	0,82	169	1,22
		15	5	1,21	0,46	3,33	220	0,40
			20	0,42	0,17	1,46	188	0,96
100% cal	25,9	0	5	0,82	0,33	2,69	349	0,69
			20	0,18	0,07	0,92	88	1,76
		7	5	1,41	0,44	2,70	279	0,47
			20	0,47	0,16	1,10	258	1,30
		15	5	1,20	0,46	3,67	203	0,37
			20	0,46	0,17	1,73	153	0,86
Sin filler	29,0	0	5	0,59	0,22	1,92	413	1,61
			20	0,11	0,04	0,48	27	2,90
		7	5	0,80	0,30	2,86	245	0,69
			20	0,25	0,10	0,54	184	2,20
		15	5	0,73	0,27	2,96	185	0,58
			20	0,31	0,12	1,11	221	2,05

En la Figura 2 se grafican los resultados de ensayos a 20°C y 5°C del parámetro “Resistencia a Tracción”, RT (MPa), en tanto que en la Figura 3 se muestran las gráficas obtenidas con el parámetro “Desplazamiento al 50% de la carga máxima post pico”, d_{0,5P_m}, capacidad de admitir deformaciones sin romper.

En la Figura 2 se verifica el aumento que presenta la resistencia a tracción ante la disminución de la temperatura de ensayo y a medida que envejecen las probetas, para cualquiera de las diferentes combinaciones de filleres. Se observa además que la substitución de filler calizo por cal apenas tendría efecto sobre la resistencia, obteniéndose en general valores paulatinamente inferiores cuanto mayor es el porcentaje de cal. La mezcla sin filler, previsiblemente, presenta resistencias a tracción mucho menores que las mezclas fillerizadas. En la Figura 2 a., ensayo a 20°C, se destaca la resistencia a tracción de la mezcla con carbonato cálcico sin envejecer por sobre las demás mezclas fillerizadas, emparejándose los resultados cuando las mezclas se someten a envejecimiento. En la Figura 2 b., ensayo a 5°C, sucede algo parecido pero ahora con el ensayo de probetas muy envejecidas (15 días)

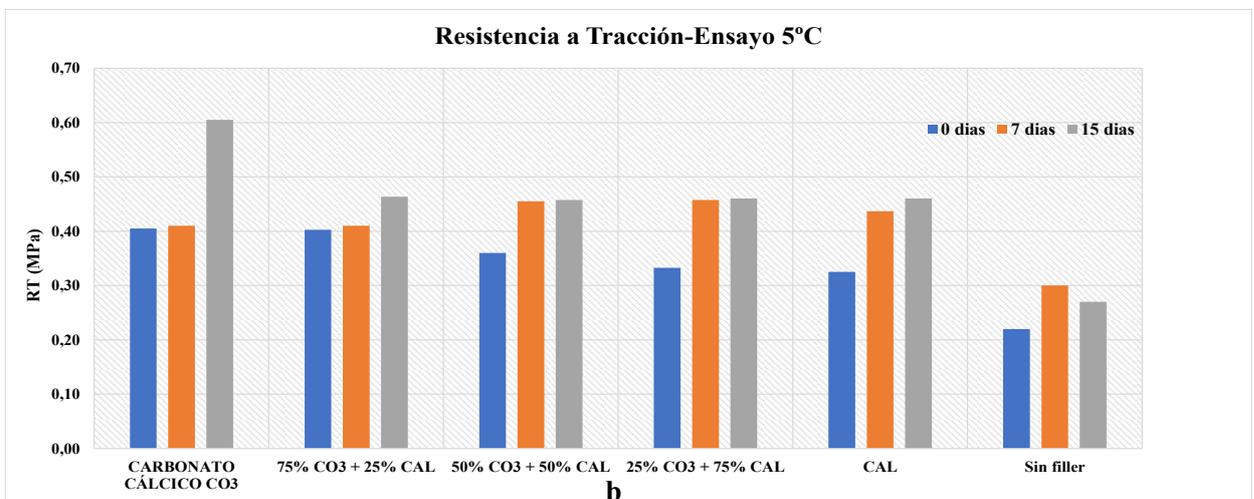
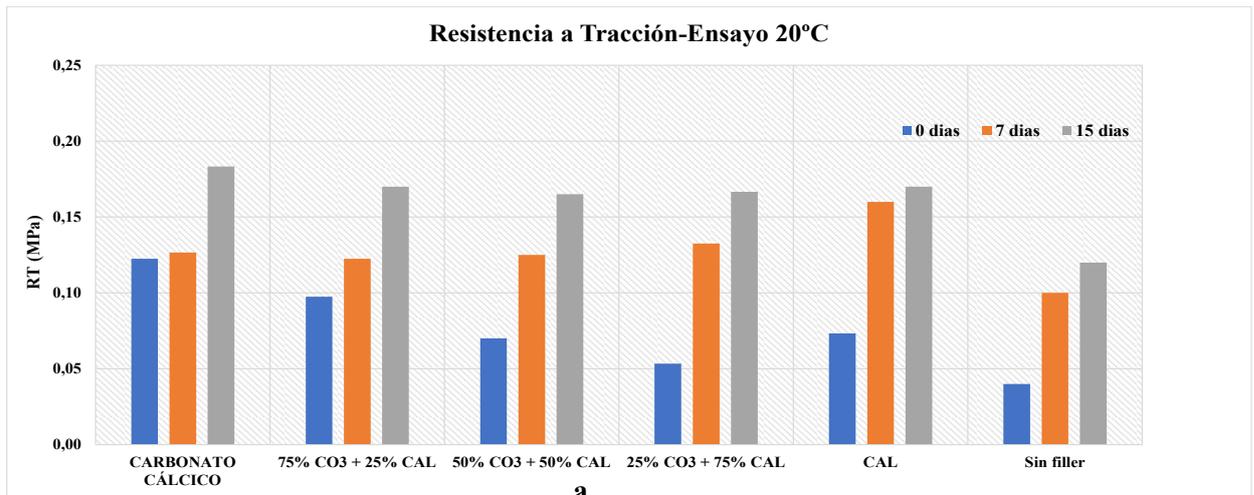


Figura 2. Valores promedio de Resistencia a Tracción: a. ensayo a 20°C; b. ensayo a 5°C

En la Figura 3 (a y b) se puede distinguir la deformabilidad de las mezclas evaluadas mediante el parámetro “Desplazamiento al 50% de la carga máxima post-pico”, $d_{0,5Pm}$ (mm), ensayadas a 20°C y a 5°C

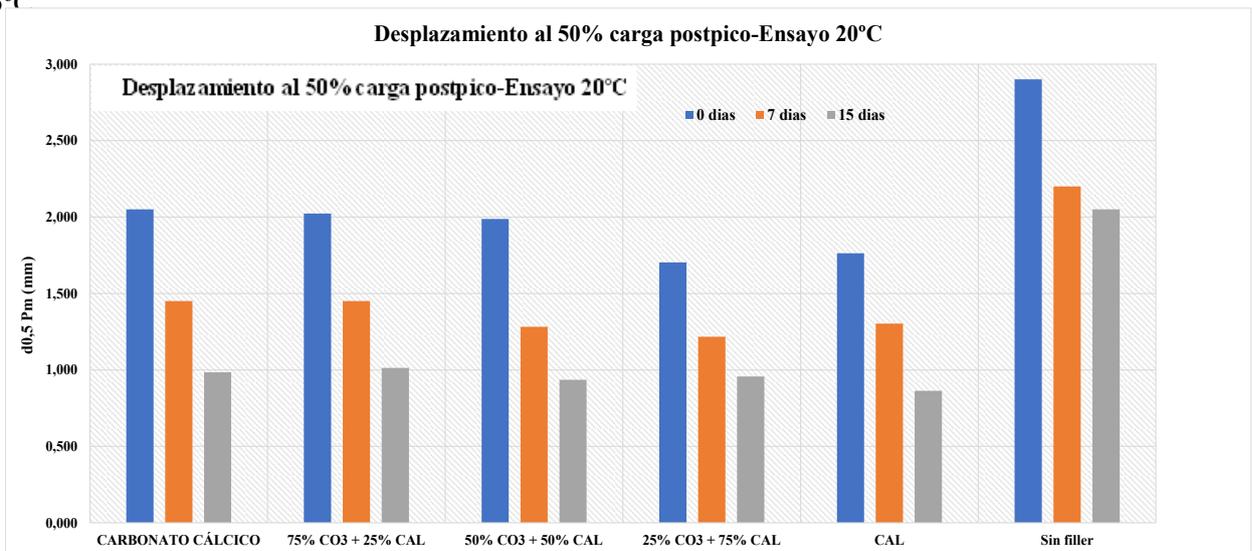


Figura 3 a. Valores promedio de Desplazamiento al 50% de $P_{máx.}$ post-pico, ensayo a 20°C

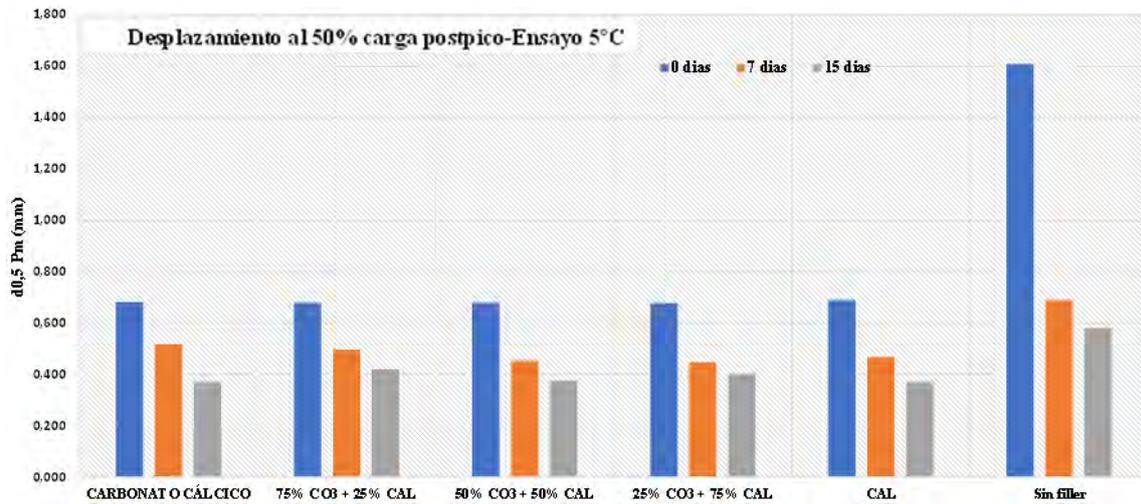


Figura 3 b. Valores promedio de Desplazamiento al 50% de P_{máx.} post-pico, ensayo a 5°C

Las mezclas se vuelven menos deformables a menor temperatura y a medida que envejecen, por ser más rígidas. La adición creciente de cal apenas causaría efecto sobre la deformación. La mezcla sin filler exhibe mayor deformabilidad que las restantes para cualquier combinación de rellenos minerales.

Las Figuras 4 y 5 ilustran los resultados a 5°C del “Índice de Resistencia a Tracción”, IRT (KN/mm) y de la “Energía disipada de Fractura”, GF (J/m²). En estos parámetros intervienen tanto la carga y como la deformación.

En la Figura 4 se muestra cómo varía el IRT con el envejecimiento y con el tipo de filler en los ensayos a 5°C y 20°C. Este parámetro refleja la rigidez y la fragilidad de las mezclas. Se registra un incremento en las probetas envejecidas; los resultados de las mezclas con filler son parecidos entre sí, mientras que la mezcla sin filler ofrece valores moderadamente menores. En las mezclas ensayadas a 20°C los valores de IRT son marcadamente menores que en las ensayadas a 5°C, pero se mantienen las tendencias en cuanto a las variaciones por edad, envejecimiento y fillerización.

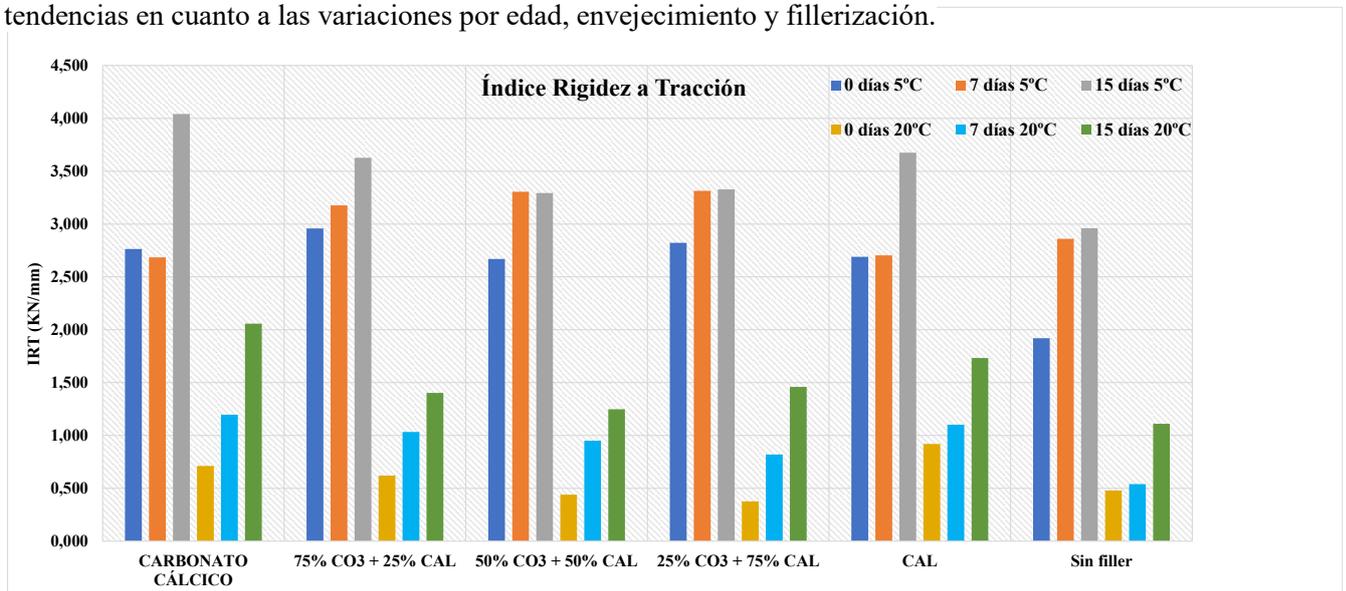


Figura 4. Valores promedio del Índice de Rigidez a Tracción, a 5°C

En la Figura 5 (a y b) puede verse la gráfica correspondiente a la energía de fractura, GF, de las probetas ensayadas a 5°C y a 20°C. En primer lugar, es dable resaltar que las probetas ensayadas a 5°C tienen una energía disipada mayor que las ensayadas a 20°C. Pero además se observa una particularidad que es el cambio de tendencia de GF a diferentes temperaturas: a 5°C (Figura 5 b.), a mayor

envejecimiento menor es GF debido a su comportamiento más frágil, hecho que se invierte a 20°C (Figura 5 a) donde en apariencia la mayor consistencia de las mezclas envejecidas es favorable.

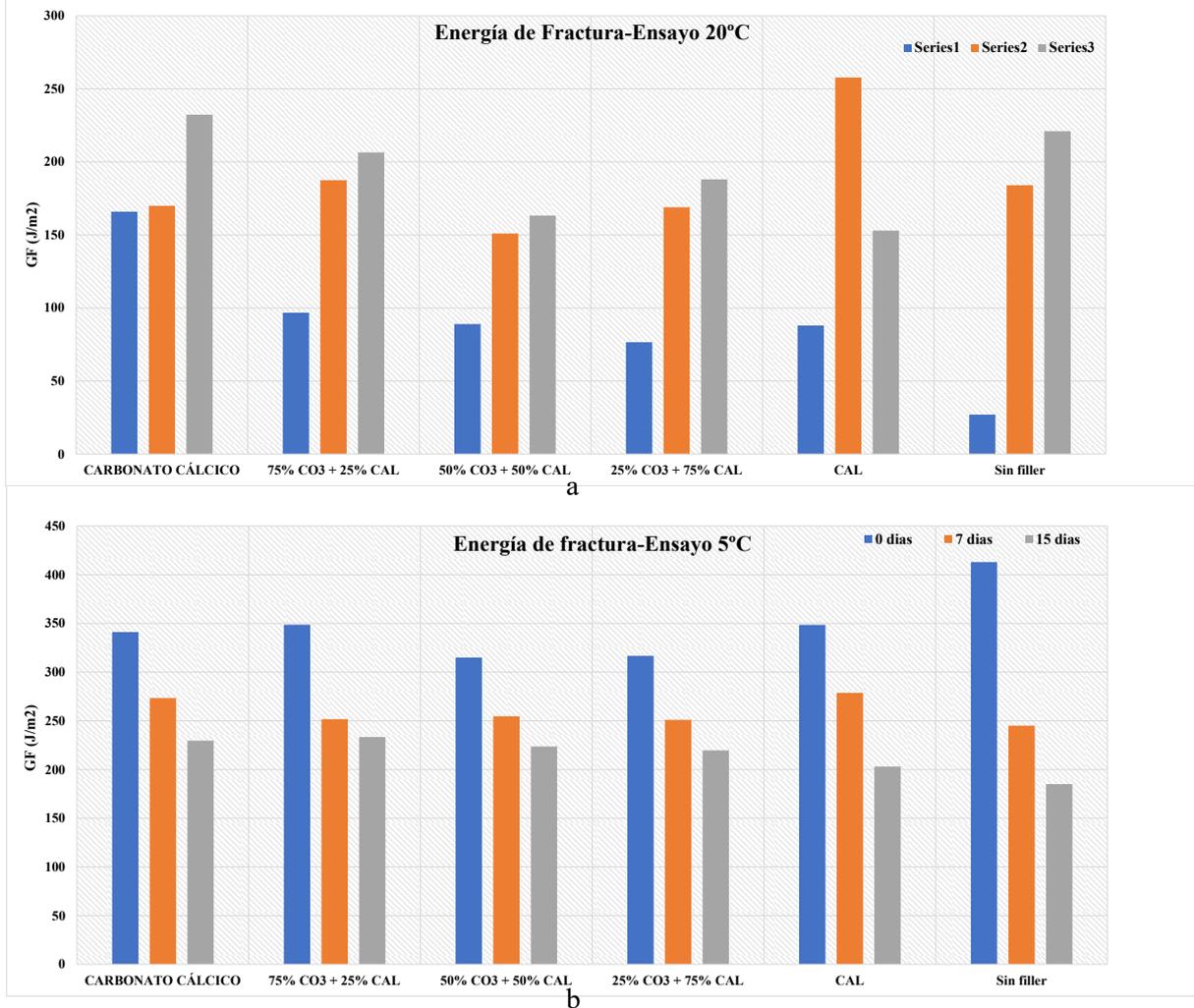


Figura 5. Valores promedio de la Energía disipada de Fractura: a. a 20°C; b. a 5°C

3.3 Resultados de ensayos Fénix corregido por vacíos

Más allá de los resultados informados en 3.2 y considerando que una mayor exposición al aire por huecos interconectados implica un endurecimiento más acelerado del asfalto [16], es importante ponderar cómo influyen en los parámetros analizados los vacíos registrados en las mezclas, cuyas cuantías son disímiles por causa de las cantidades variables de filleres de aporte en peso (ver en 3.1).

Para ello, se procedió a preparar y ensayar mezclas sin filler más cerradas que la mezcla patrón UCL; el objetivo de esta operación complementaria es determinar coeficientes de corrección, al menos para un par de variables representativas. Tales mezclas se denominan aquí como “G1” y “G2”: la G1 tiene 70% de áridos entre 5 mm y 2.5 mm, y 30% entre 2.5 mm y 0.63 mm, y las probetas moldeadas tuvieron en promedio 26,7% de vacíos; mientras que la G2 tiene proporciones relativas de 60% y 40%, respectivamente, con vacíos promedio de 24,7%; las probetas UCL sin filler (denominadas como “G” en las gráficas) poseen un promedio de 29,0% de vacíos, como consta en la Tabla 1.

La Figura 6 muestra la variación con los vacíos de dos parámetros de interés para estas experiencias, la Resistencia a Tracción, RT, y el desplazamiento al 50% de la carga máxima post pico, $d_{0,5Pm}$, a 0 y 7 días de envejecimiento, en mezclas sin filler con proporciones variables de áridos entre 5 mm y 2.5 mm y entre 2.5 mm y 0.63 mm.

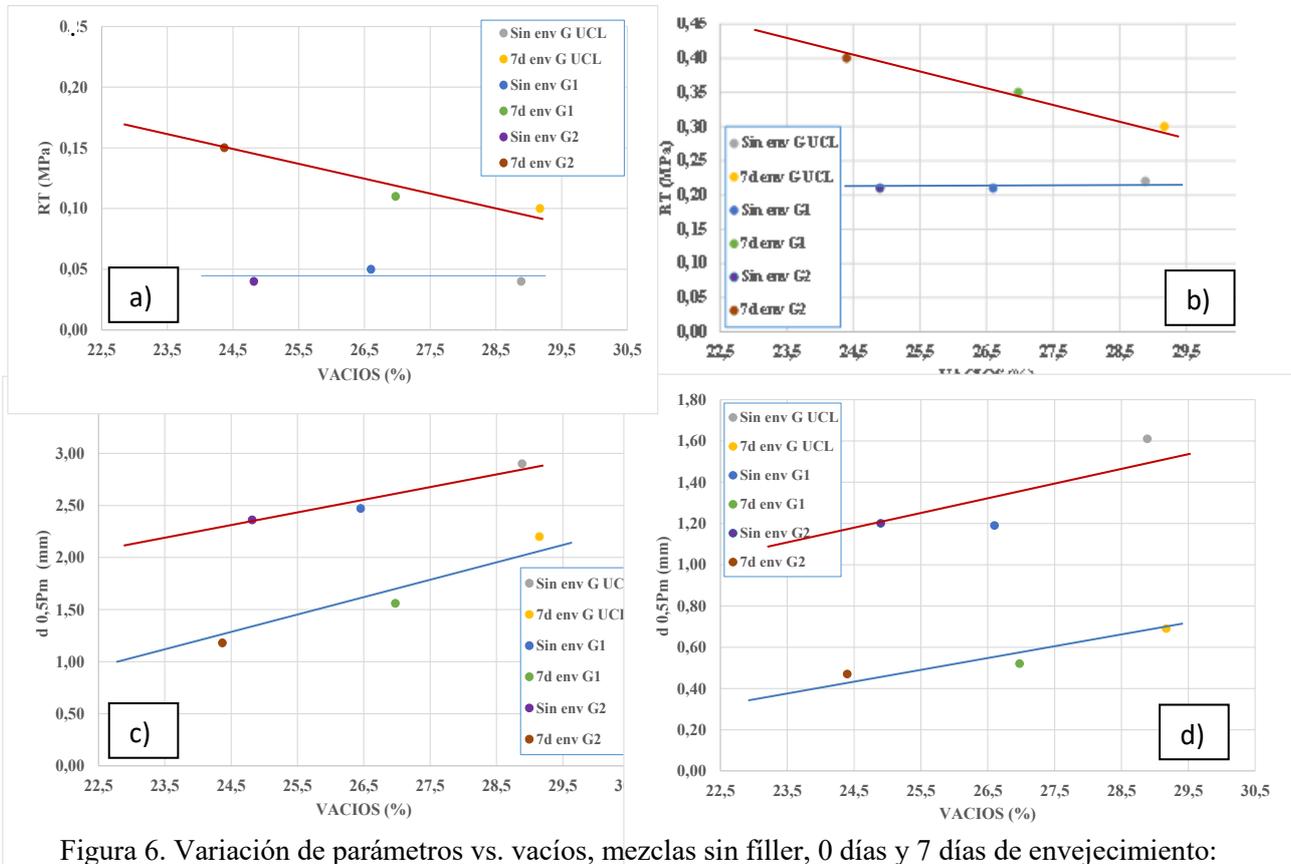


Figura 6. Variación de parámetros vs. vacíos, mezclas sin filler, 0 días y 7 días de envejecimiento: a) RT, 20°C; b) RT, 5°C; c) $d_{0,5Pm}$, 20°C; d) $d_{0,5Pm}$, 5°C

Con el fin de simplificar el cálculo de los resultados corregidos, se han tratado de unificar coeficientes dentro de los parámetros considerados, los que se muestran en la Tabla 2. Se ha tomado como base la serie de las probetas con 100% de carbonato de calcio (Coef.=1,0).

Estos correctivos deben considerarse como estimativos pues, si bien manifiestan la importancia de los vacíos en la resistencia a la fisuración, fueron obtenidos de probetas sin filler.

Tabla 2. Coeficientes de corrección por vacíos

Vacíos	Sin envejecer		Envejecimiento 7 días		Correspondencia de los vacíos con la serie:
	RT	$d_{0,5Pm}$	RT	$d_{0,5Pm}$	
25,9	1	0,84	1,22	0,68	100% cal
25,3	1	0,87	1,17	0,74	25% CaCO ₃ + 75% cal
24,9	1	0,89	1,15	0,76	50% CaCO ₃ + 50% cal
24,7	1	0,90	1,13	0,78	75% CaCO ₃ + 25% cal
22,9 (ref.)	1	1	1	1	100% CaCO ₃
29,0	1	0,76	1,45	0,52	Sin filler

Estos coeficientes inducen a modificar el análisis acerca de los resultados de la Tabla 1.

En la Figura 7 se observa que, en las probetas sin envejecer, el incremento de las proporciones de cal en desmedro del filler calizo provocaría una reducción de RT, atribuible a que los volúmenes totales de filler disminuyen y el mástico resulta menos espeso. Pero se registra un incremento apreciable de RT para las mezclas con proporciones crecientes de cal sometidas a envejecimiento a 7 días en horno, lo que indicaría que, debido a la merma en la cantidad total de filler, el “efecto barrera” se torna menos

relevante, resistiendo menos al envejecimiento por esta causa y sin llegar a compensarse con las propiedades químicas anti-envejecimiento de la cal.

En las mezclas sin filler, aun con los resultados corregidos por vacíos, siempre las resistencias son menores que en las mezclas fillerizadas, para cualquier combinación de temperaturas y edades de envejecimiento consideradas en este trabajo.

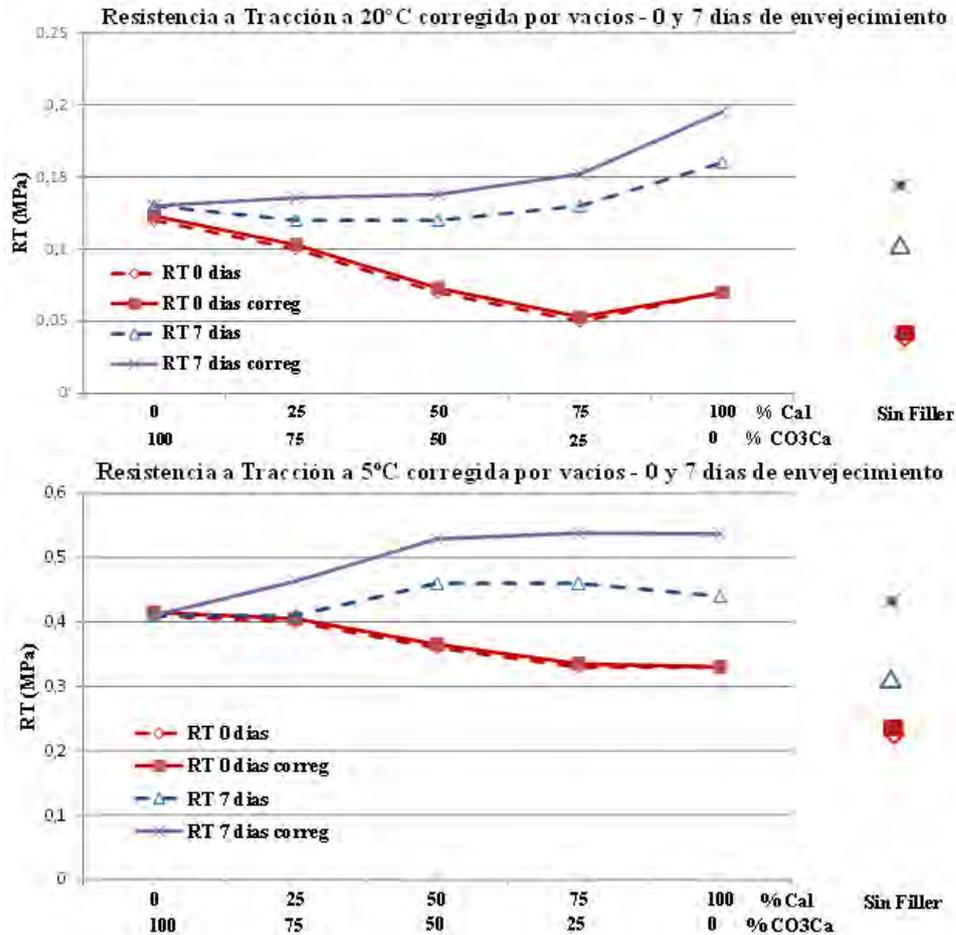


Figura 7. Resultados de Resistencia a Tracción corregidos por vacíos, 0 y 7 días de envejecimiento

En la Figura 8 se ven los resultados de desplazamiento al 50% de P_{máx.} post-pico, d_{0,5Pm}

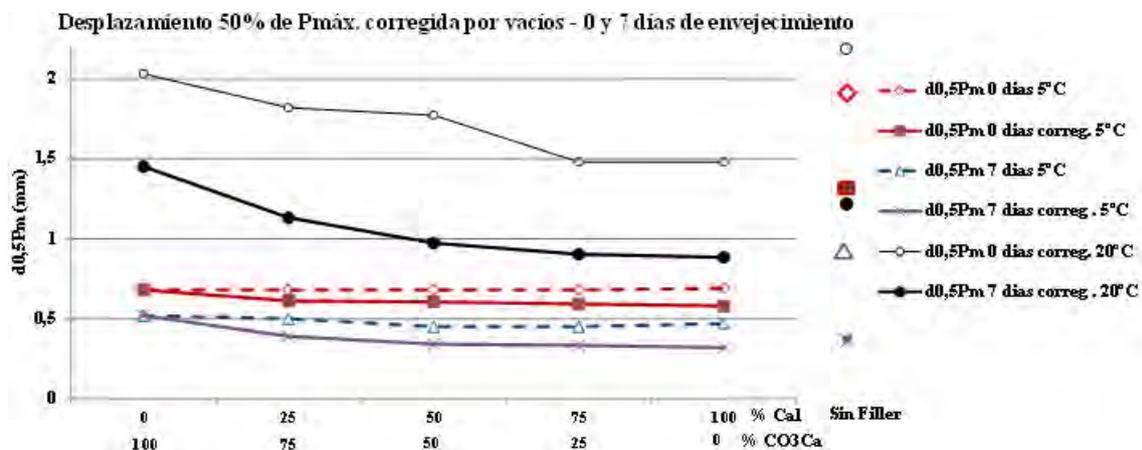


Figura 8. Resultados de d_{0,5Pm}, corregidos por vacíos

En las mezclas con filler, los desplazamientos son discretamente inferiores con porcentajes crecientes de cal, siendo moderada la injerencia de la corrección por vacíos. El envejecimiento favorece la rigidización por endurecimiento, disminuyendo las deformaciones.

Estas experiencias ratifican que la incorporación de filleres cálcicos incide integralmente en los mecanismos de rigidización y de protección al envejecimiento en las mezclas asfálticas, estableciéndose una suerte de competencia debido a que un mástico “rico” se espesa y tiende a rigidizarse, pero su resistencia al envejecimiento genera consecuencias contrapuestas. El mástico presenta un flujo viscoelástico hasta su “concentración crítica”. Las mezclas de este trabajo deberían comportarse reológicamente igual si se las evalúa composicionalmente, pues todas están fillerizadas al máximo ($C_v/C_s=1$), pero cobra importancia el “factor envejecimiento”, incluso en las probetas “a 0 días” pues su fabricación origina un envejecimiento de corto plazo [17]. La clave para comprender el envejecimiento del ligante sería la evaluación de sus grupos funcionales (cetonas, ácido carboxílico, anhídrido dicarboxílico, sulfóxidos) [9], compuestos que desarrollan fuerzas intermoleculares que incrementan su viscosidad; al respecto, además de los efectos de captación de catalizadores de la oxidación y de moléculas polares que envejecen al asfalto e incrementan su viscosidad, mencionados en el apartado 1, los filleres cálcicos contribuyen con un tercer factor, el “efecto obstáculo”, por el cual más cantidad de polvo resultaría beneficiosa para la resistencia al envejecimiento [18]; en este sentido, si bien el filler calizo es menos “activo” que la cal, su mayor cuantía en estas experiencias compensaría su desempeño, pues las mezclas con carbonato cálcico tienen una relación filler/betún de 1,15 y las mezclas con cal de 0,33.

4 Conclusiones

El “Ensayo Fénix” determina, mediante un procedimiento sencillo, parámetros representativos de los mecanismos responsables del desarrollo de fisuras en las mezclas bituminosas, permitiendo analizar la resistencia a la fisuración y considerar esta propiedad las etapas de diseño y de control. En este trabajo se empleó para estudiar el efecto de la adición de cal, de carbonato de calcio y de composiciones de estos materiales sobre la resistencia al envejecimiento y su incidencia en la resistencia a la fisuración.

Se fabricaron probetas con mezclas patrón UCL adicionando una concentración en volumen C_v de filler igual a su concentración crítica C_s en el mástico ($C_v/C_s=1$), ensayando a 20°C y 5°C, sin envejecer y con diferentes condiciones de envejecimiento. Las disímiles características de los filleres impuso incorporar distintas cantidades en peso, con contenidos de vacíos variables en las mezclas, lo que indujo a fijar coeficientes de corrección por vacíos. También se ensayaron mezclas sin filler.

Los ensayos revelan aspectos cuali-cuantitativos de la mayor rigidez de las mezclas a menor temperatura y a medida que envejecen y cómo se manifiesta el efecto de la adición de filleres.

Los resultados indican que la resistencia a tracción RT aumenta para menores temperaturas de ensayo y mayor envejecimiento. En los resultados sin corrección por vacíos, la progresiva substitución de filler calizo por cal causaría, en principio, una reducción de RT en las mezclas sin envejecer pues los volúmenes totales de filler disminuyen, rellenándose menos vacíos y empobreciéndose el espesamiento del mástico; pero apenas tendría incidencia en las mezclas envejecidas porque entraría en juego la competencia entre la mayor actividad química de la cal que propende a una incrementar la resistencia al envejecimiento y la disminución del “efecto barrera” por menor cantidad de partículas de polvo que tiende a acotarla. La corrección por vacíos es irrelevante en los resultados de las probetas sin envejecer, corroborándose los resultados antes mencionados, pero en las envejecidas el coeficiente corrector es significativo, produciéndose un aumento de RT para proporciones crecientes de cal, lo que revelaría una menor protección frente al envejecimiento por causa de la importante merma del volumen total de filler (y, por ende, del efecto físico obstructivo) que no llegaría finalmente a compensarse con las propiedades químicas anti-envejecimiento de la cal.

Al analizar la ductilidad de las mezclas, según los resultados sin corrección de $d_{0,5P_m}$, la adición creciente de cal provoca valores discretamente menores de este parámetro. Al aplicar los coeficientes, se ve que la injerencia de los vacíos es moderada, aminorando levemente los guarismos. Se destaca que el proceso de envejecimiento parece haber afectado de modo muy similar a todas las mezclas estudiadas (tendencias paralelas observadas en el análisis del parámetro $d_{0,5P_m}$). Por esta razón, el incremento de la

resistencia mostrado por las mezclas con cal envejecidas resultaría benéfico, considerando que el proceso de envejecimiento no afectaría la ductilidad en mayor medida que lo hace en las mezclas con filler calizo, en las que no se ha apreciado una ganancia de resistencia.

La evaluación de los parámetros donde intervienen cargas y deformaciones (IRT, GF) es compleja por la citada compulsa entre el espesamiento que rigidiza al mástico y la resistencia al envejecimiento que atenúa el endurecimiento, generada por la adición de filleres activos.

En las mezclas sin filler, las resistencias en general son menores que en las mezclas fillerizadas; por otra parte sus deformaciones, al aplicar los coeficientes correctivos por vacíos, son mayores que en las mezclas con filler en probetas sin envejecer, pero en las envejecidas este parámetro se equipara.

El carbonato cálcico, menos activo químicamente que la cal, logra equiparar su desempeño al poder adicionarse en mayor cantidad debido a su elevada concentración crítica, entrando en juego el “efecto obstáculo”, de índole física. En mezclas como las SMA, que necesitan proporciones elevadas de polvo por razones granulométricas, esta circunstancia cobra gran significación.

Cabe aclarar que la corrección por vacíos de los parámetros evaluados se ha hecho variando la granulometría de mezclas elaboradas sin filler. Se plantea como tarea a futuro comparar los resultados del ensayo Fénix obteniendo factores de corrección a partir de mezclas con los filleres estudiados.

5 Referencias

- [1] Asphalt Institute (2019). *Glossary of Terms*. Recuperado el 19 de abril de 2019 de: <http://www.asphaltinstitute.org/engineering/glossary-of-terms/>.
- [2] Pérez-Jiménez, F., Miró R., Martínez, A., Botella, R. (2013). *Analysis of the mechanical behaviour of bituminous mixtures at low temperatures*. Construction and Building Materials, Volume 46, pp, 193-102,
- [3] Miró R., Pérez-Jiménez, F., Martínez, A., Botella, R. (2016). *Criterios de diseño para diferentes tipos de mezclas bituminosas basados en el Ensayo Fénix*. XI Jornada Nacional de ASEFMA, Madrid, España.
- [4] Pérez-Jiménez, F., Valdés Vidal, G., Miró Recasens, R., Martínez Reguero, A., Botella Nieto, R. (2010). *Fenix Test Development of a New Test Procedure for Evaluating Cracking Resistance in Bituminous Mixtures*. Transportation Research Record, Issue Number 2181, ISSN: 0361-1981, Washington D.C., EEUU.
- [5] Pérez-Jiménez, F., Valdés Vidal, G., Muñoz, M., Miró, R., Martínez, A., Botella, R., Amorós, J. (2014). *Criterios y especificaciones para el uso del Ensayo Fénix en el diseño de mezclas bituminosas tipo AC*. IX Jornada Nacional de ASEFMA, Madrid, España.
- [6] Pérez-Jiménez, F., Miro, R. (1993). *Characterization procedure of asphalt binders with the Cantabro test. UCL Method*. 5th Eurobitume Congress. Volume IA. Stockholm.
- [7] Ruiz, C. (1960). *Concentración crítica de filler, su origen y significado en la dosificación de mezclas abiertas*. Dirección de Vialidad Provincia de Buenos Aires, Argentina, Publicación N°11.
- [8] Bianchetto, H. (2005). *Criterios de diseño de mezclas bituminosas para pavimentos tendentes a optimizar su resistencia al envejecimiento. Influencia del tipo de ligante y del relleno mineral*. Tesis Doctoral, Universitat Politècnica de Catalunya, España.
- [9] Plancher, H.; Green, E.; Petersen, J.C. (1976). *Reduction of oxidative hardening of asphalt by treatment with hydrated lime. A mechanistic study*. Association of Asphalt Paving Technologists. Vol. 45.
- [10] Li, X., Braham, A., Marasteanu, M., Buttlar, W., Williams, R. (2008). *Effect of Factors Affecting Fracture Energy of Asphalt Concrete at Low Temperature*. Road Materials and Pavement Design, Vol. 9, pp. 397–416.
- [11] Jung, C. (1963). *Símbolos de transformación*. Ed. Paidós, 4ª reimpresión 1998, Barcelona, España.
- [12] Valdés Vidal, G. (2012). *Evaluación del proceso de fisuración en las mezclas bituminosas mediante el desarrollo de un nuevo ensayo experimental: ensayo Fénix*. Tesis doctoral, Universitat Politècnica de Catalunya-BarcelonaTech, España.
- [13] Miró R., Martínez, A., Pérez-Jiménez, F., Bianchetto, H. (2005). *Effect of Filler on Aging Potential of Asphalt Mixture*. Transportation Research Record, Journal of the Transportation Research Board. Issue Number 1901, Transportation Research Board ISSN: 0361-1981, Washington D.C., EE.UU.
- [14] Bianchetto, H. (2016). *Especificaciones técnicas sobre la incorporación de cal en las mezclas asfálticas para capas superiores: análisis crítico y propuesta*. XVII Congreso de Vialidad y Tránsito, Córdoba, Argentina.
- [15] Dirección Nacional de Vialidad de Argentina. (2017). *Pliego de Especificaciones Técnicas Generales para concretos asfálticos en caliente y semicaliente del tipo densos*. Disponible en <https://www.argentina.gob.ar/transporte/vialidad-nacional/licitaciones/pliegos-de-especificaciones-tecnicas>.
- [16] Kumar, A.; Goetz, W. (1977). *Asphalt hardening as affected by film thickness, voids and permeability in asphaltic mixtures*. Association of Asphalt Paving Technologists, Vol 46, pp. 571-606.

[17] Bianchetto, H., Asurmendi, A. (2007). *Influencia de la temperatura de elaboración y del contenido de cal en la resistencia al envejecimiento de mezclas densas convencionales: un caso real*. 14º Congreso Ibero Latinoamericano del Asfalto, La Habana, Cuba.

[18] Gubler, R.; Liu, Y.; Anderson, D.; Partl, M. (1999). *Investigation of the system filler and asphalt binders by rheological means*. Association of Asphalt Paving Technologists. Vol. 68, pp. 284-302.

Los autores agradecen a Nerea Puig Catalá su colaboración en la ejecución de los ensayos realizados.