

INTERFASES BITUMINOSAS MEJORADAS PARA INCREMENTAR LA DURABILIDAD DE LOS FIRMES: TENSIONES MÁXIMAS, TIEMPO DE CARGA Y VELOCIDAD DE CIZALLA

JORGE ORTIZ RIPOLL

Ingeniero de Caminos
jortiz@arno.es

XAVIER CRISÉN GRAU

Ingeniero Técnico de Obras Públicas

JULIA GIRALT LLADANOSA

Técnico de Laboratorio

FRANCISCO HERAS BALLESTERO

Ingeniero de Caminos

BENITO ARNÓ E HIJOS

www.arno.es

INTERFASES BITUMINOSAS MEJORADAS PARA INCREMENTAR LA DURABILIDAD DE LOS FIRMES: TENSIONES MÁXIMAS, TIEMPO DE CARGA Y VELOCIDAD DE CIZALLA

RESUMEN

Las interfaces bituminosas son planos de debilidad cuyo comportamiento afecta a la durabilidad del conjunto del firme: además de presentar una resistencia máxima a cortante inferior a la que se tiene en el seno de las propias capas de mezcla bituminosa, también es menor su rigidez a cortante. Esta última propiedad, y su dependencia de las características del riego de adherencia, está siendo objeto de estudio en el marco del proyecto de investigación SUPERBIT.

Es bien sabido que el despegue de las capas bituminosas que constituyen un firme da lugar a redistribuciones de tensiones que pueden conducir a solicitaciones muy superiores a las de cálculo, acelerando la fisuración y agotamiento por fatiga de las capas despegadas. Sin embargo, incluso antes de que se produzca cualquier despegue, el estado tensional del firme está afectado por la rigidez de la interfase. A causa de su naturaleza visco-elástica, la rigidez de la interfase depende de los tiempos de carga y de la velocidad a que se ejerce la cizalla de la interfase y, por ello, debe medirse en condiciones que simulen con la mejor aproximación las que realmente se dan en los firmes.

En la presente comunicación se presentan los resultados de los cálculos realizados para efectuar esta aproximación, así como los obtenidos con ensayos de corte sobre testigos extraídos de un tramo experimental. Con el proyecto de investigación SUPERBIT se pretenden desarrollar nuevas soluciones para

obtener riegos de adherencia más efectivos desde el punto de vista de la durabilidad de los firmes, también mientras las capas permanecen adheridas, que aseguren la integridad de la película de ligante residual, y la ausencia de cualquier tipo de contaminación en la obra o en su entorno.

1. INTRODUCCIÓN

La elección de los sistemas de adherencia más efectivos requiere establecer criterios tanto en relación con los procedimientos de ensayo como en cuanto a los valores de las tensiones de cálculo. Con el proyecto de investigación SUPERBIT, en cuyo marco se desarrollan los presentes estudios, se pretenden obtener interfases de elevada resistencia máxima a cortante y más rígidas que las interfases convencionales, con objeto de mejorar el estado tensional del conjunto del firme. Además, con la colaboración de la UPC se está poniendo a punto un ensayo de fatiga a cortante que debe servir para prevenir que las nuevas interfases más rígidas puedan comprometer su propia durabilidad.

Para caracterizar interfases reales, cuya respuesta es intermedia entre las correspondientes a las interfases ideales completamente adheridas o totalmente despegadas habitualmente consideradas en los cálculos, se ha recurrido al modelo de Uzan et al. (1978) quienes propusieron describir su comportamiento mediante la ecuación constitutiva de Goodman:

$$\tau = K\Delta u$$

INTERFACES BITUMINOSAS MEJORADAS PARA INCREMENTAR LA DURABILIDAD DE LOS FIRMES: TENSIONES MÁXIMAS, TIEMPO DE CARGA Y VELOCIDAD DE CIZALLA

donde

- τ es la tensión de corte en la interfase
- Δu el desplazamiento horizontal relativo entre los bordes de la interfase
- K un coeficiente que denominaron *Módulo de reacción horizontal de la interfase*

Es sencillo comprobar que K puede interpretarse como un parámetro derivado del módulo de elasticidad transversal (G) de una interfase de espesor finito (h), mediante la ecuación que relaciona la tensión cortante (τ) y la deformación a cortante (γ) en un material elástico, puesto que:

$$\tau = G\gamma = G \frac{\Delta u}{h}$$

y, por tanto

$$K = \frac{\tau}{\Delta u} = \frac{G}{h}$$

lo que permite entender K como cociente entre el módulo de elasticidad transversal y el espesor de la interfase, con dimensiones de tensión por longitud o FL^{-3} .

El valor de K puede obtenerse experimentalmente mediante ensayos de corte como los previstos en la norma NLT-382 puesto que, por definición, es la pendiente de la recta tensión-desplazamiento en un gráfico como el representado en la figura 1, que corresponde al modelo propuesto por Romanoschi (1999).

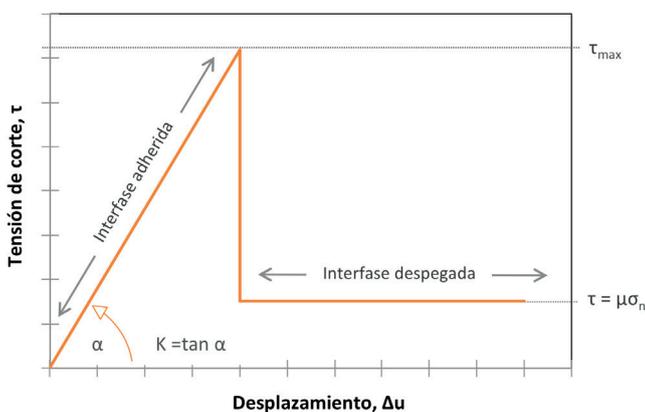


Figura 1. Modelo constitutivo de Romanoschi, (1999).

La aproximación empírica al valor de K , sin embargo, es algo más compleja de lo que puede deducirse del modelo indicado: en ensayos reales la pendiente de la curva tensión-desplazamiento varía con la tensión lo que obliga a elegir el nivel de carga al que se debe medir la tangente (figura 2).

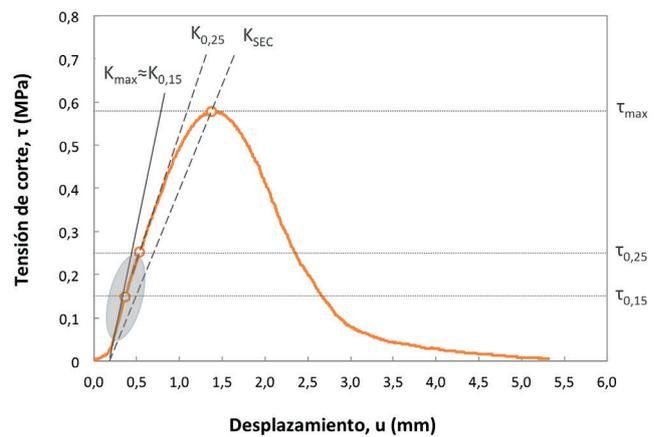


Figura 2. Curva tensión-desplazamiento en el ensayo de corte simple NLT-382.

Por otra parte, la naturaleza viscoelástica de la interfase le confiere una respuesta tenso-deformativa que depende de la temperatura y del tiempo de carga (o de la velocidad de cizalla, en un ensayo de fluencia como NLT-382). Por tanto, para obtener aproximaciones realistas tanto a los valores de τ_{max} (resistencia máxima a cortante) como de K (módulo de reacción horizontal) es preciso simular adecuadamente los tiempos de carga propios de las acciones del tráfico.

También interesa determinar el valor de las sollicitaciones reales para conocer cuál es la resistencia máxima necesaria y para establecer las sollicitaciones que han de utilizarse en ensayos dinámicos de fatiga. Por último, importa correlacionar los resultados de ensayos monotónicos, como el ensayo de corte NLT-382, con los obtenidos de ensayos dinámicos. Una correlación así facilitaría notablemente valorar la calidad del sistema de adherencia, además de en función de su resistencia máxima, según su durabilidad y sus efectos sobre la distribución de tensiones en el conjunto del firme.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

De acuerdo con la exposición anterior, las actividades que constituyen esta fase del proyecto de investigación SUPERBIT se han dirigido a los siguientes objetivos:

1. Cálculo de las máximas tensiones de corte a que puede hallarse sometida la primera interfase bituminosa de un firme bajo las acciones del tráfico y estimación de las tensiones de corte de cálculo en la determinación de su vida a fatiga a cortante.
2. Cálculo de los desplazamientos relativos entre las superficies unidas por el riego de adherencia y de los tiempos de carga correspondientes para determinar las velocidades de desplazamiento más adecuadas en ensayos de corte monotónicos como NLT-382, o las frecuencias y niveles de sollicitación en ensayos dinámicos.
3. Obtención de la resistencia máxima a cortante y del módulo de reacción horizontal en ensayos de laboratorio realizados sobre testigos, bajo condiciones deducidas de los anteriores cálculos; revisión de las hipótesis utilizadas en los cálculos y adopción de eventuales ajustes para completar la aproximación empírica.

Los cálculos realizados se han referido a un sistema multicapa elástico, que posee la configuración y propiedades siguientes:

- Está compuesto por capas horizontales de espesor uniforme, asentadas sobre un macizo semi-infinito,
- El material de cada capa, que se extienden indefinidamente en dirección horizontal, es homogéneo e isótropo,
- Todos materiales son elásticos, con una relación tensión-deformación lineal, cuya respuesta depende de su módulo de Young y de su coeficiente de Poisson, y del módulo de reacción horizontal de las interfaces.

Se ha recurrido al conocido programa de cálculo analítico de firmes BISAR (Schell, 1998), que ofrece

la posibilidad de caracterizar la respuesta de uniones entre capas parcialmente adheridas por medio del parámetro AK, o capacitancia elástica a cortante (*shear spring compliance*), definida como

$$AK = \frac{\Delta u}{\tau}$$

AK es el inverso del módulo de reacción horizontal K y, por tanto, BISAR es particularmente útil para distinguir los efectos de distintas interfases según los valores de K obtenidos en ensayos de corte.

Para simular la presión ejercida por una rueda de un eje tridem, se han utilizado 50 cargas circulares uniformemente distribuidas situadas según han sido representadas en la figura 1 (derecha). A la izquierda de la misma figura 1 puede verse la impronta de un neumático 385/65R/22,5 cargado con 49 kN, obtenida por los autores. La carga cuasi-rectangular de cálculo tiene, muy aproximadamente, la misma superficie total (58.425 mm²) y la misma superficie de contacto (un 77% de la superficie total) que un neumático real, superficies a las que corresponden presiones de contacto de 0,84 y 1,09 MPa, respectivamente.

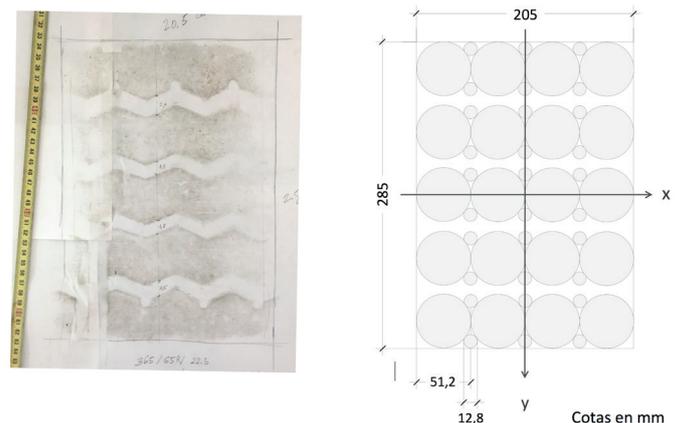


Figura 3. Impronta de un neumático de un eje tridem cargado con 49 kN (izquierda) y cargas circulares utilizadas en BISAR (derecha). El eje x señala el sentido de avance.

Se han considerado tres hipótesis de carga: la correspondiente a una fuerza vertical total de la magnitud indicada (V=49 kN), y dos combinaciones de fuerza vertical y horizontal, obtenidas con

INTERFASES BITUMINOSAS MEJORADAS PARA INCREMENTAR LA DURABILIDAD DE LOS FIRMES: TENSIONES MÁXIMAS, TIEMPO DE CARGA Y VELOCIDAD DE CIZALLA

la misma fuerza vertical más fuerzas horizontales iguales al 55% y al 27,5% de la primera (V=49 kN, H=27 kN y V=49 kN, H=13,5 kN).

En la Tabla 1 se describe la sección de firme estudiada: es la denominada T121 en la Instrucción de carreteras 6.1 IC a la que se ha superpuesto una capa de refuerzo de espesor variable. Este espesor, junto con el módulo de elasticidad de la propia capa, el módulo de reacción horizontal de la interfase y las hipótesis de carga indicadas, completan las variables objeto de análisis.

Tabla 1. Definición del firme analizado.

CAPA	ESPESOR	MÓDULO	C. POISSON	UNIÓN AL SOPORTE
Refuerzo	Variable	Variable	0,33	Variable
Rodadura existente	5 cm	6.000 MPa	0,33	Completa
Intermedia	10 cm	6.000 MPa	0,35	Completa
Base bituminosa	15 cm	5.000 MPa	0,35	Completa
Subbase granular	25 cm	360 MPa	0,35	Completa
Explanada	Indefinido	120 MPa	0,35	-

Finalmente, se han ensayado testigos extraídos de un tramo experimental construido en abril de 2018, mediante el dispositivo A previsto en la Norma NLT-382, a velocidades de cizalla de 2,5, 50 y 200 mm/min para obtener sus resistencias máximas a cortante y sus módulos de reacción horizontal bajo esas tres distintas sollicitaciones.

3. RESULTADOS

3.1. Resultados de los cálculos

En el caso concreto de una capa de 6 cm de espesor, con un módulo de 6.000 MPa y para $K=25 \text{ MPa/mm}$, las tensiones de corte σ_{zx} en la primera interfase varían como indican las curvas representadas en la figura 4, según la carga sea solamente vertical (V=49 kN) o exista además una componente horizontal ($H_x=0,55V$). Las máximas tensiones de corte aparecen bajo el centro de los bordes delantero y trasero de la huella en el primer caso y en el centro del borde delantero en el segundo. Modificando las hipótesis de carga puede comprobarse que solo bajo las capas de

rodadura de menor espesor (comprendidos entre 2 y 3 cm) y en presencia de la máxima carga horizontal, el punto sometido a la mayor tensión cortante se retrasa unos 5 cm para situarse en una posición intermedia entre el centro y el borde delantero.

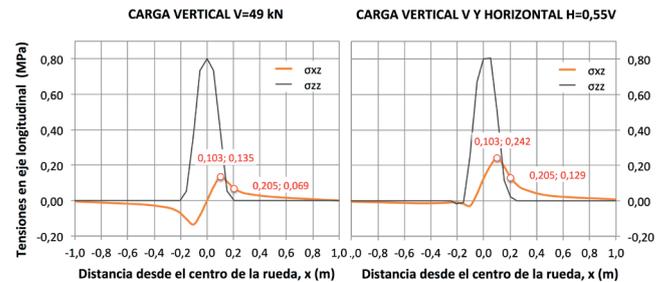


Figura 4. Tensiones en la interfase bajo el centro de la huella y según eje longitudinal.

También se observa que las tensiones normales desaparecen en zonas donde aún se dan elevadas tensiones de corte (superiores al 50% de las tensiones máximas), dando lugar a otro punto crítico. De nuevo puede comprobarse que su posición apenas depende de las condiciones de carga y del espesor de capa, y que se sitúa muy próximo a $x=0,205 \text{ m}$.

Los pulsos de tensión σ_{zx} , deformación ϵ_{zx} y desplazamiento u_x adoptan la misma forma. En la figura 5 se ha representado la variación del desplazamiento relativo entre los bordes de la interfase, bajo el centro de la rodada, al paso de un eje tridem circulando a 80 km/h.

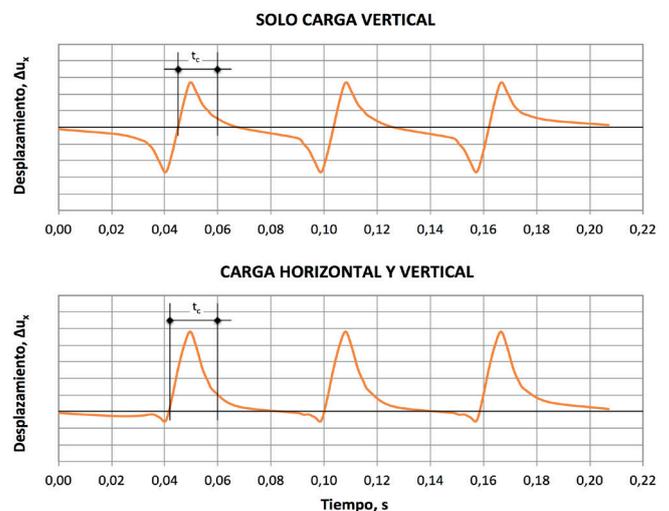


Figura 5. Variación del desplazamiento relativo Δu_x con el tiempo ($v=80 \text{ km/h}$).

El tiempo durante el cual se produce la mayor parte del desplazamiento puede tomarse como tiempo de carga: es de 0,015 segundos cuando la carga es solo vertical y algo superior, ($t_c=0,018$ s) en presencia de cargas horizontales. Ambos son independientes de la magnitud de las cargas y de las características del firme, con la salvedad citada de los espesores más reducidos y, sin duda, para interfases más profundas. Conocido el tiempo de carga, es inmediato obtener la velocidad de cizalla que, como el desplazamiento horizontal relativo entre los bordes de la interfase (Δu_x) sí depende de la magnitud de las cargas vertical y horizontal, del espesor, módulo de Young y coeficiente de Poisson de las capas del firme, y del módulo de reacción horizontal de la interfase.

Los resultados de los cálculos realizados, para los valores extremos del módulo de reacción horizontal de la interfase $K=\infty$ (adherencia perfecta) y $K=0$ (capas completamente despegadas), y para tres valores intermedios $K=1$, $K=5$ y $K=25$ MPa/mm se muestran en la Tabla 2, en función del espesor del refuerzo. La Tabla 3 recoge la influencia del módulo de Young de esa misma capa, cuando se hace variar entre $E=2.000$ y $E=8.000$ MPa manteniéndose constante el espesor de 5 cm. Finalmente, la Tabla 4 se refiere a los efectos de ambos factores (espesor y módulo de la capa superpuesta) cuando la carga horizontal equivale a un 50% de la carga horizontal usada en los cálculos anteriores.

En las figuras 6 y 7 puede encontrarse una representación gráfica de los mismos resultados.

Tabla 2. Resultados para un refuerzo de espesor variable y módulo $E=6.000$ MPa

SOLO FUERZA VERTICAL F=49 kN						FUERZA VERTICAL F=49 kN y HORIZONTAL H=0,55F					
Cortante máximo MPa						Cortante máximo MPa					
t_{max}	K, MPa/mm					t_{max}	K, MPa/mm				
e, cm	K = ∞	K = 25	K = 5	K = 1	K = 0	e, cm	K = ∞	K = 25	K = 5	K = 1	K = 0
2	0,304	0,114	0,043	0,012	0,000	2	0,510	0,289	0,175	0,074	0,000
4	0,276	0,130	0,050	0,013	0,000	4	0,435	0,261	0,134	0,050	0,000
5	0,266	0,133	0,052	0,014	0,000	5	0,408	0,248	0,123	0,045	0,000
6	0,256	0,133	0,052	0,014	0,000	6	0,383	0,235	0,115	0,040	0,000
8	0,234	0,129	0,052	0,014	0,000	8	0,335	0,193	0,099	0,034	0,000

Desplazamiento relativo máximo, μm						Desplazamiento relativo máximo, μm					
Δu	K, MPa/mm					Δu	K, MPa/mm				
e, cm	K = ∞	K = 25	K = 5	K = 1	K = 0	e, cm	K = ∞	K = 25	K = 5	K = 1	K = 0
2	0,00	4,54	8,60	11,93	15,16	2	0,00	11,56	35,02	74,72	242,44
4	0,00	5,21	9,96	13,48	16,30	4	0,00	10,44	26,69	50,05	145,64
5	0,00	5,32	10,30	13,92	16,67	5	0,00	9,92	24,66	44,61	115,39
6	0,00	5,31	10,45	14,17	16,89	6	0,00	9,38	22,91	40,45	100,19
8	0,00	5,14	10,33	14,15	16,85	8	0,00	7,73	19,90	34,21	79,86

Velocidad de cizalla, mm/min para 80 km/h						Velocidad de cizalla, mm/min					
v	K, MPa/mm					v	K, MPa/mm				
e, cm	K = ∞	K = 25	K = 5	K = 1	K = 0	e, cm	K = ∞	K = 25	K = 5	K = 1	K = 0
2	-	18	34	48	61	2	-	39	117	249	808
4	-	21	40	54	65	4	-	35	89	167	485
5	-	21	41	56	67	5	-	33	82	149	385
6	-	21	42	57	68	6	-	31	76	135	334
8	-	21	41	57	67	8	-	26	66	114	266

Tabla 3. Resultados de los cálculos para una capa de refuerzo de diferentes módulos de Young y un espesor de 5 cm.

SOLO FUERZA VERTICAL F=49 kN						FUERZA VERTICAL F=49 kN y HORIZONTAL H=0,55F					
Cortante máximo MPa						Cortante máximo MPa					
t_{max}	K, MPa/mm					t_{max}	K, MPa/mm				
M, GPa	K = ∞	K = 25	K = 5	K = 1	K = 0	M, GPa	K = ∞	K = 25	K = 5	K = 1	K = 0
2	0,246	0,149	0,068	0,020	0,000	2	0,431	0,318	0,193	0,084	0,000
4	0,260	0,139	0,056	0,016	0,000	4	0,420	0,275	0,147	0,056	0,000
6	0,266	0,133	0,052	0,014	0,000	6	0,408	0,248	0,123	0,045	0,000
8	0,268	0,129	0,049	0,013	0,000	8	0,395	0,229	0,109	0,038	0,000
10	0,268	0,126	0,047	0,012	0,000	10	0,384	0,214	0,098	0,033	0,000

Desplazamiento relativo máximo, μm						Desplazamiento relativo máximo, μm					
Δu	K, MPa/mm					Δu	K, MPa/mm				
M, GPa	K = ∞	K = 25	K = 5	K = 1	K = 0	M, GPa	K = ∞	K = 25	K = 5	K = 1	K = 0
2	0,00	5,95	13,65	20,11	25,48	2	0,00	12,70	38,51	84,04	326,25
4	0,00	5,56	11,25	15,57	18,96	4	0,00	10,99	29,31	56,41	168,24
6	0,00	5,32	10,30	13,92	16,67	6	0,00	9,92	24,66	44,61	115,39
8	0,00	5,16	9,75	13,03	15,45	8	0,00	9,15	21,73	37,78	88,87
10	0,00	5,04	9,38	12,45	14,66	10	0,00	8,57	19,68	33,25	72,93

Velocidad de cizalla, mm/min para 80 km/h						Velocidad de cizalla, para 80 km/hmm/min					
v	K, MPa/mm					v	K, MPa/mm				
M, GPa	K = ∞	K = 25	K = 5	K = 1	K = 0	M, GPa	K = ∞	K = 25	K = 5	K = 1	K = 0
2	-	24	55	80	102	2	-	42	128	280	1087
4	-	22	45	62	76	4	-	37	98	188	561
6	-	21	41	56	67	6	-	33	82	149	385
8	-	21	39	52	62	8	-	31	72	126	296
10	-	20	38	50	59	10	-	29	66	111	243

Tabla 4. Resultados de los cálculos para una capa de refuerzo de diferentes módulos de Young y un espesor de 5 cm.

FUERZA VERTICAL F=49 kN y HORIZONTAL H=0,55F/2						FUERZA VERTICAL F=49 kN y HORIZONTAL H=0,55F/2					
Cortante máximo MPa						Cortante máximo MPa					
t_{max}	K, MPa/mm					t_{max}	K, MPa/mm				
e, cm	K = ∞	K = 25	K = 5	K = 1	K = 0	e, cm	K = ∞	K = 25	K = 5	K = 1	K = 0
2	0,407	0,201	0,109	0,043	0,000	2	0,338	0,233	0,130	0,052	0,000
4	0,355	0,196	0,092	0,032	0,000	4	0,340	0,207	0,101	0,036	0,000
5	0,337	0,191	0,087	0,029	0,000	6	0,337	0,191	0,087	0,029	0,000
6	0,319	0,184	0,083	0,027	0,000	8	0,332	0,179	0,079	0,025	0,000
8	0,285	0,161	0,076	0,024	0,000	10	0,326	0,170	0,073	0,023	0,000

Desplazamiento relativo máximo, μm						Desplazamiento relativo máximo, μm					
Δu	K, MPa/mm					Δu	K, MPa/mm				
e, cm	K = ∞	K = 25	K = 5	K = 1	K = 0	M, GPa	K = ∞	K = 25	K = 5	K = 1	K = 0
2	0,00	8,05	21,81	43,32	128,80	2	0,00	9,32	26,08	52,08	175,86
4	0,00	7,82	18,32	31,77	80,97	4	0,00	8,27	20,28	35,99	93,60
5	0,00	7,62	17,48	29,27	66,03	6	0,00	7,62	17,48	29,27	66,03
6	0,00	7,35	16,68	27,31	58,54	8	0,00	7,16	15,74	25,41	52,16
8	0,00	6,44	15,11	24,18	48,35	10	0,00	6,80	14,53	22,85	43,80

Velocidad de cizalla, mm/min						Velocidad de cizalla, mm/min					
v	K, MPa/mm					v	K, MPa/mm				
e, cm	K = ∞	K = 25	K = 5	K = 1	K = 0	M, GPa	K = ∞	K = 25	K = 5	K = 1	K = 0
2	-	27	73	144	429	2	-	31	87	174	586
4	-	26	61	106	270	4	-	28	68	120	312
5	-	25	58	98	220	6	-	25	58	98	220
6	-	24	56	91	195	8	-	24	52	85	174
8	-	21	50	81	161	10	-	23	48	76	146

INTERFASAS BITUMINOSAS MEJORADAS PARA INCREMENTAR LA DURABILIDAD DE LOS FIRMES: TENSIONES MÁXIMAS, TIEMPO DE CARGA Y VELOCIDAD DE CIZALLA

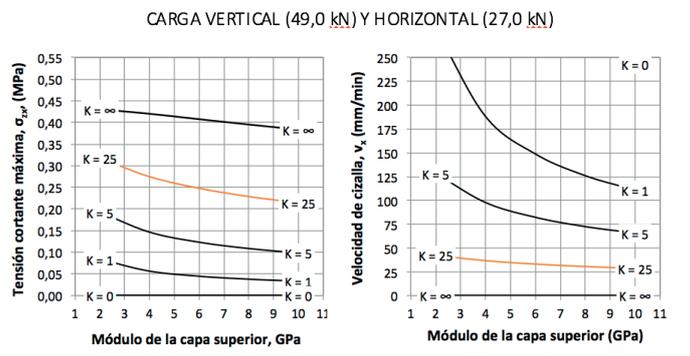
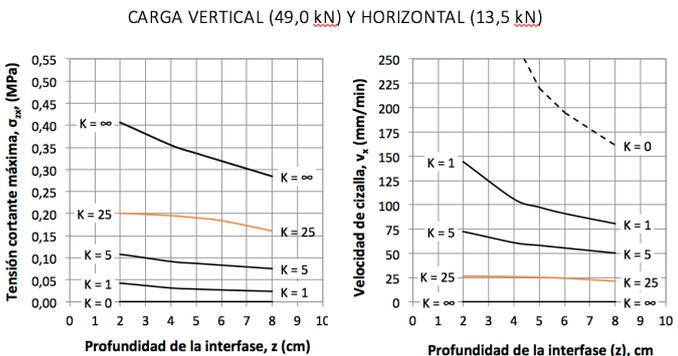
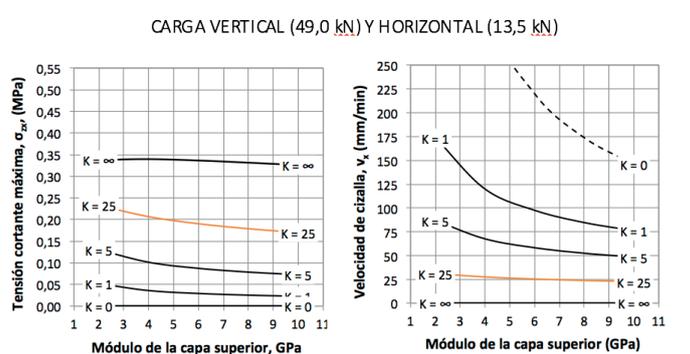
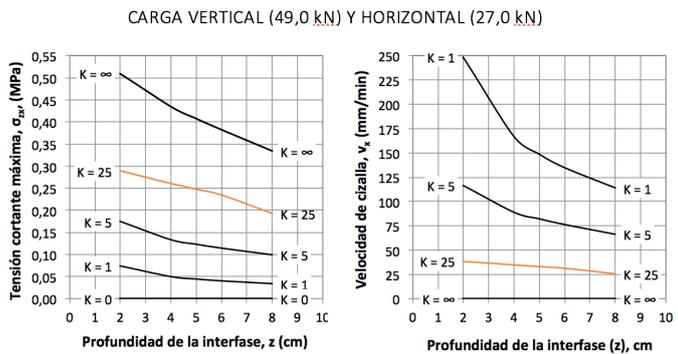
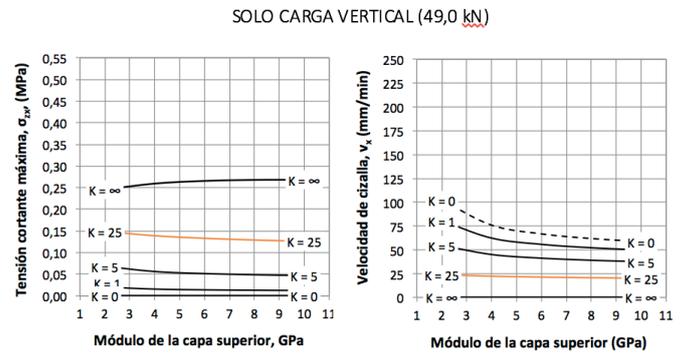
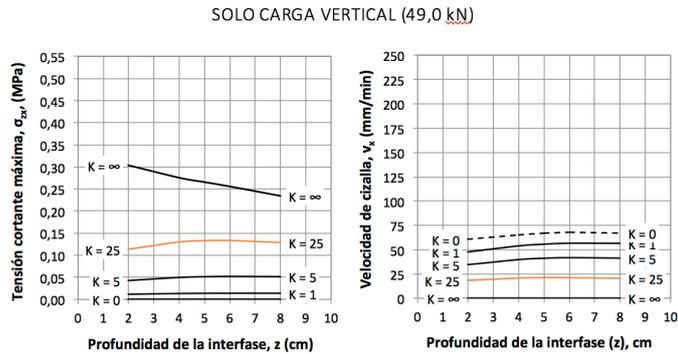


Figura 6. Tensión máxima (σ_{xz}) y velocidad de carga según el espesor del refuerzo

Figura 7. Tensión máxima (σ_{xz}), velocidad de carga y módulo de la capa de refuerzo

Se supone que la hipótesis con solo carga vertical tiene interés desde el punto de vista del fallo por fatiga a cortante de la interfase. La existencia adicional de una carga horizontal equivalente a 0,55 veces la carga vertical da cuenta de las tensiones máximas que pueden aparecer muy ocasionalmente; por último, la combinación de carga vertical y carga horizontal más moderada (50% de la anterior) podría corresponder también a fallos por fatiga a cortante en aquellas zonas donde los esfuerzos transversales (de aceleración, frenado o en trayectorias curvas) sean de aparición frecuente.

Por último, se han calculado las tensiones de corte en $x=0,205$ m, donde aparecen en combinación con tensiones normales nulas o muy bajas. En la Tabla 5 se muestran los resultados obtenidos para módulos de reacción horizontal de la primera interfase K=25 y K=5 MPa/mm, con una capa de refuerzo cuyo módulo de Young es $E=6.000$ MPa y bajo las hipótesis de carga indicadas. La figura 8 es una representación gráfica de dos de esas hipótesis de carga.

Tabla 4. Resultados de los cálculos para una capa de refuerzo de diferentes módulos de Young y un espesor de 5 cm.

SOLO CARGA VERTICAL V=49 kN				CARGA VERTICAL y HORIZONTAL H=0,55V				CARGA VERTICAL y HORIZONTAL H=0,55V/2			
Tensión de corte en x=0,205 m (MPa)				Tensión de corte en x=0,205 m (MPa)				Tensión de corte en x=0,205 m (MPa)			
e, cm	K=25	K=5	K=1	e, cm	K=25	K=5	K=1	e, cm	K=25	K=5	K=1
2	0,022	0,031	0,009	2	0,075	0,080	0,047	2	0,049	0,056	0,028
4	0,051	0,031	0,011	4	0,108	0,080	0,037	4	0,080	0,055	0,024
6	0,068	0,038	0,013	6	0,125	0,079	0,033	6	0,097	0,059	0,023
8	0,080	0,042	0,014	8	0,135	0,079	0,030	8	0,107	0,061	0,022

Tensión normal concomitante, MPa				Tensión normal concomitante, MPa				Tensión normal concomitante, MPa			
e, cm	K=25	K=5	K=1	e, cm	K=25	K=5	K=1	e, cm	K=25	K=5	K=1
2	-0,001	0,000	-0,001	2	0,005	0,002	0,000	2	0,002	0,001	-0,001
4	-0,003	-0,008	-0,009	4	0,005	-0,004	-0,007	4	0,001	-0,006	-0,008
6	0,002	-0,004	-0,004	6	0,021	0,012	0,010	6	0,012	0,004	0,003
8	0,018	0,016	0,036	8	0,049	0,045	0,046	8	0,033	0,031	0,041

$$\tau_{vx} = \tau_{v1} \cdot \left(\frac{v_x}{v_1}\right)^{0,22}$$

donde τ_{vx} y τ_{v1} son medidas a las velocidades v_x y v_1 , respectivamente y según la cual las resistencias a cortante a 50 y 200 mm/min equivalen a 1,93 veces y 2,62 veces, respectivamente las obtenidas a 2,5 mm/min.

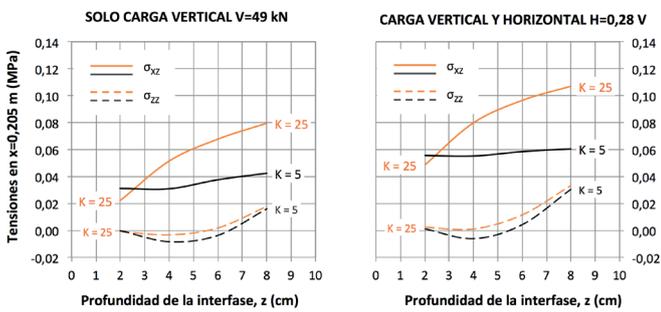


Figura 8. Tensión de corte y normales en x=0,205.

3.2. Resultados de los ensayos

De acuerdo con los resultados de los cálculos expuestos, que indican el interés de elevar la velocidad de desplazamiento habitualmente utilizada en el ensayo de corte simple, se han ensayado testigos extraídos del mismo tramo experimental descrito por Ortiz et al. (2018) a velocidades de 2,5 y 50 mm/min.

En general, las curvas tensión-desplazamiento varían como indica la figura 9, obteniéndose resistencias máximas (τ_{max}) significativamente más elevadas, con desplazamientos hasta rotura (u_{max}) algo superiores y módulos de reacción horizontal (K) mayores.

En la Tabla 6 se han recopilado resultados de ensayos de corte realizados a velocidades de 2,5 y 50 mm/min. La resistencia máxima (τ_{max}) varía entre 0,76 y 1,40 MPa a 2,5 mm/min y entre 1,45 y 2,55 a 50 mm/min. Los valores promedio de la resistencia máxima a cortante, en conjunto, satisfacen con buena aproximación la relación propuesta por Cañestrari et al. (2013):

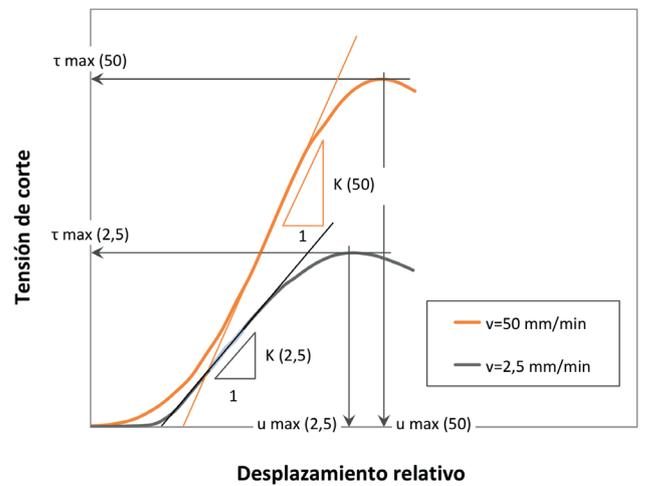


Figura 9. Curvas tensión/desplazamiento a 2,5 mm/min y 50 mm/min.

Tabla 6. Resultados de los ensayos de corte realizados a velocidades de desplazamiento de 2,5 mm/min (2,5) y 50 mm/min (50).

SERIE	τ_{max} (MPa)			U_{max} (mm)			K_{max} (Mpa/mm)		
	2,5	50	(50)/(2,5)	2,5	50	(50)/(2,5)	2,5	50	(50)/(2,5)
11	0,93	1,75	1,88	1,41	1,05	0,75	1,40	1,63	1,16
13	0,76	1,45	1,92	0,93	1,00	1,07	1,03	1,05	1,02
20	1,05	1,75	1,67	1,22	1,37	1,12	1,33	1,62	1,22
21	0,92	2,12	2,32	1,13	-	-	1,33	-	-
22	1,06	1,62	1,53	1,17	-	-	1,22	-	-
23	0,99	1,48	1,50	0,96	-	-	2,12	-	-
31	1,40	2,55	1,82	1,39	1,32	0,95	1,39	2,75	1,97
	Media (50) (2,5)			Media (50) (2,5)			Media (50) (2,5)		
	1,80			0,97			1,34		

Cuando se modifica la velocidad de corte, los desplazamientos correspondientes a la tensión máxima (u_{max}) se mantienen en valores próximos, lo que apunta que el módulo (de reacción horizontal) secante varía del mismo modo que la resistencia máxima a cortante. Sin embargo, la variación del módulo tangente (K_{max}), que es el parámetro de interés, parece ser distinta en función de la serie estudiada y varía entre 1,05 y 2,12 MPa/mm a 2,5 m/min y 1,05 y 2,75 MPa/mm a 50 mm/min.

INTERFASAS BITUMINOSAS MEJORADAS PARA INCREMENTAR LA DURABILIDAD DE LOS FIRMES: TENSIONES MÁXIMAS, TIEMPO DE CARGA Y VELOCIDAD DE CIZALLA

Para completar la aproximación empírica a los módulos de reacción horizontal que puedan encontrarse en interfases reales sometidas a la acción del tráfico falta valorar los efectos de las tensiones normales concomitantes que aparecen en los puntos más solicitados. En modelo de Romanoschi (Romanoschi, 1999) se postula que K es independiente de la tensión normal, sin embargo, Canestrari et al. (2013) encontraron que la resistencia máxima a cortante aumenta con la tensión normal de acuerdo con la expresión:

$$\tau_{\sigma n} = (1 + 0,38\sigma_n) \cdot \tau_{\sigma 0} + 0,74\sigma_n$$

donde

$\tau_{\sigma n}$ es la resistencia a cortante en presencia de una tensión normal σ_n (MPa)

$\tau_{\sigma 0}$ es la resistencia a cortante en ausencia de tensión normal (MPa)

σ_n es la tensión normal (MPa)

Sin embargo, y como sucede con la velocidad de cizalla, es poco probable que la eventual variación de K con la tensión normal pueda deducirse de la relación entre resistencias máximas a cortante. Estos efectos serán objeto de atención en próximas actividades del presente proyecto.

4. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Los resultados de los cálculos realizados con el programa BISAR, bajo las hipótesis descritas, indican que las tensiones de corte máxima causadas por una rueda de 49 kN, en ausencia de solicitaciones horizontales y para los valores de K esperados (en todo caso, comprendidos entre 1 y 25 MPa/mm) no alcanzan el valor 0,14 MPa siendo, probablemente inferiores a 0,10 para cualquier combinación de espesor y módulo de la capa de refuerzo. En esas condiciones, las máximas tensiones cortantes que aparecen en puntos donde no existen tensiones normales de compresión son inferiores a 0,08 MPa.

En presencia de una fuerza horizontal equivalente a 0,55 veces la carga vertical, la tensión de corte máxima es siempre inferior a 0,32 MPa. Sin embargo, desde el punto de vista de la vida a fatiga a cortante de

una interfase parece más adecuado considerar tensiones de corte inferiores a 0,23 MPa, correspondientes a solicitaciones horizontales menos extremas. Las máximas tensiones cortantes que aparecen en puntos donde no existen tensiones normales de compresión significativas son inferiores a 0,14 MPa y a 0,11 MPa si la solicitación horizontal es la mitad de la adoptada como solicitación máxima de cálculo. De nuevo, este nivel de tensión parece más apropiado para evaluar la vida a fatiga a cortante de una interfase.

Por otra parte, los cálculos muestran que en los ensayos de corte simple interesa utilizar velocidades de deformación próximas a 50 mm/min, tanto para medir la resistencia máxima a cortante de una interfase bituminosa como para obtener el valor de su módulo de reacción horizontal. Ha podido verificarse que, de acuerdo con la predicción de Canestrari et al. (2013), ensayando testigos a velocidades de deformación de 50 mm/min se obtienen resistencias máximas a cortante que, aproximadamente, duplican las obtenidas a 2,5 mm/min.

La Tabla 7 es una recopilación de los niveles de solicitación calculados. Contiene, además, la estimación de las proporciones máximas que estos niveles de carga suponen respecto a la resistencia última a cortante, dependiendo de si ésta se mide a 2,5 mm/min, a 50 mm/min, o si se tienen en cuenta la contribución de las tensiones normales propuesta por Canestrari et al. (2013). En la estimación presentada se ha supuesto una resistencia a cortante de 0,6 MPa, medida de acuerdo con la norma NLT-382, considerada equivalente a 1,16 MPa a la velocidad de cizalla de 50 mm/min y a 2,10 MPa en presencia de una tensión normal concomitante de 0,80 MPa.

Tabla 7. Tensiones cortantes de cálculo absolutas y relativas a la resistencia máxima.

HIPÓTESIS DE CARGA	ANÁLISIS	τ_{cal} (MPa)	$\tau_{cal} / \tau_{max} (1)$	$\tau_{cal} / \tau_{max} (2)$	$\tau_{cal} / \tau_{max} (3)$	$\tau_{cal} / \tau_{max} (4)$
V=49 kN	Fatiga con tensión normal	0,14	0,23	0,12	0,10	0,07
V=49 kN	Fatiga sin tensión normal	0,08	0,13	0,07	0,13	0,07
V=49 kN; H=0,55 V	Rotura con tensión normal	0,32	0,53	0,28	0,23	0,15
V=49 kN; H=0,55 V	Rotura sin tensión normal	0,14	0,23	0,12	0,23	0,12
V=49 kN; H=0,28 V	Fatiga con tensión normal	0,23	0,38	0,20	0,17	0,11
V=49 kN; H=0,28 V	Fatiga sin tensión normal	0,11	0,18	0,09	0,18	0,09

- Resistencia a cortante $\tau_{max} (1) = 0,60$ MPa
- Resistencia a cortante $\tau_{max} (2) = 1,16$ MPa
- Resistencia a cortante $\tau_{max} (3) = 1,37$ MPa
- Resistencia a cortante $\tau_{max} (4) = 2,10$ MPa
- Tensión normal $\sigma_{iz} = 0,80$ MPa

Además de verificar la influencia de la velocidad de desplazamiento en la resistencia a cortante se ha comprobado que las interfases reales presentan, efectivamente, módulos de reacción horizontal comprendidos entre 1 y 25 MPa/mm (ensayadas en ausencia de tensión normal alguna), más probablemente entre 1 y 5 MPa si se trata de interfases obtenidas con riegos de adherencia convencionales.

Los análisis realizados también ponen de manifiesto el interés de obtener interfases con módulos de reacción horizontal comprendidos entre 5 y 25 MPa, objetivo que se considera al alcance del proyecto de investigación SUPERBIT, si bien todavía es prematuro cuantificar el alcance de las mejoras posibles.

5. AGRADECIMIENTOS

ARNÓ ha iniciado un proyecto de investigación denominado SUPERBIT (Tratamientos para obtener SUPERiores propiedades y eficiencias de los riegos BITuminosos mejorando la durabilidad de los firmes) que ha sido incluido en el programa de ayudas 2017 del CDTI (Centro para el Desarrollo Industrial y Tecnológico). El presente estudio constituye una de las actividades desarrolladas en ese marco. Los autores, en nombre de ARNÓ y en el suyo propio, desean agradecer el importante respaldo recibido por parte de este Centro perteneciente al Ministerio de Economía y Competitividad.

6. REFERENCIAS

- **Canestrari, F., Ferrotti, G., Lu, X., Millien, A., Partl, M. N., Petit, C., Phelipot-Mardel, A., Piber, H y Raab, Ch. (2013):** *Mechanical Testing of Interlayer Bonding in Asphalt Pavements*. STAR 206 ATB. Advances in Interlaboratory Testing and Evaluation of Bituminous Materials. París, 2013.
- **Ortiz Ripoll, J.; Crisén, X.; Lesueur, D.; Ruiz, F.;** *Sistemas de protección y mejora de los riegos de adherencia*. XIII Jornada Nacional de la Asociación Española de Fabricantes de Mezclas Asfálticas (AEFMA). Madrid,
- **Romanoschi, S. A. (1999):** *Characterization of Pavement Layer Interfaces*. Louisiana State University Historical Dissertations and Theses. 7008. Louisiana, EEUU.
- **Romanoschi, S. A. y Metcalf, J. B. (2001):** *Effects of Interface Condition and Horizontal Wheel Loads on the Life of Flexible Pavement Structures*. Transportation Research Record 1778 -123. Paper No. 01-2079. Washington, EEUU.
- **SCHELL (1998):** *BISAR 3.0 User Manual*. Bitumen Business Group. London, GB.
- **Uzan, J., Livneh, M. y Eshed, Y. (1978):** *Investigation of adhesion properties between asphaltic-concrete layers*. Proceedings of Asphalt Paving Technologists (AAPT). Technical Sessions, vol. 47, 495-521. Lino Lakes, MN, EEUU.