

# Interfases bituminosas mejoradas para la durabilidad de los firmes: Tensiones máximas, tiempo de carga y velocidad de cizalla

Jorge Ortiz Ripoll,  
jortiz@arno.es  
Xavier Crisén Grau,

Julia Giralt Lladanosa

BENITO ARNÓ E HIJOS,  
www.arno.es

Las interfases 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 sollicitaciones 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 viscoelástica, 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.

**Palabras Clave:** Riego de adherencia, interfases bituminosas, pegada, despegada, resistencia, rigidez, tensión cortante, velocidad de cizalla.

Bituminous interfaces are planes of weakness whose behaviour affects the durability of the whole of the firm: in addition to presenting a maximum shear resistance lower than that found within the layers of bituminous mixture, its shear stiffness is also lower. This latter property, and its dependence on the characteristics of the tack coat, is being studied in the framework of the SUPERBIT research project.

It is well known that the debonding take-off of the bituminous layers that constitute a firm results in redistributions of stresses that can lead to sollicitations far superior to those of calculation, accelerating the fatigue cracking failure of the debonded layers. However, even before any debonding occurs, the pavement stress is affected by the rigidity of the interface. Because of its visco-elastic nature, the rigidity of the interface depends on the loading times and the shear speed and, therefore, must be measured under conditions that simulate with the best approximation those that really take place in the firm.

# Interfases bituminosas mejoradas para la durabilidad de los firmes: Tensiones máximas, tiempo de carga y velocidad de cizalla

This article presents the results of the calculations made trying to do this approximation, and results obtained with shear tests of cores from a full-scale field experiment. The SUPERBIT research project aims to develop new solutions to obtain more effective tack coats from the perspective of the pavement durability, also while the layers remain adhered, ensuring the integrity of the residual binder film, and the absence of any type of contamination around the work site.

**Keywords:** Tack coat, bituminous interfaces, bonded, debonded, strength, rigidity, shear stress, shear speed.

## 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 comporta-

$$\tau = K \Delta u$$

miento mediante la ecuación constitutiva de Goodman :

donde:

$\tau$  es la tensión de corte en la interfase

$\Delta u$  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 ( $\tau$ ) y la deformación a cortante ( $\gamma$ ) 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).

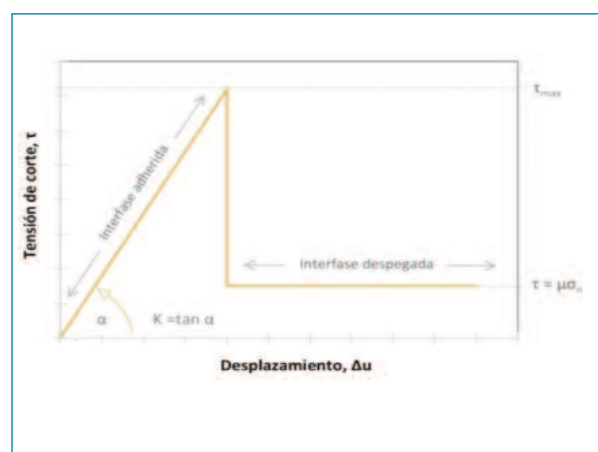


Figura 1. Modelo constitutivo de Romanoschi, (1999).

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).

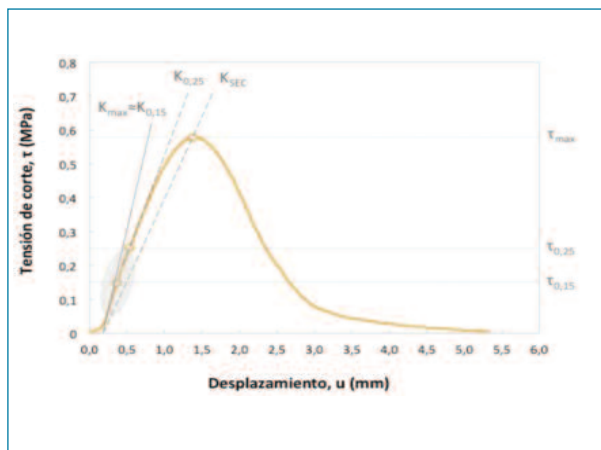


Figura 2. Curva tensión-desplazamiento en el ensayo de corte simple NLT-382

Por otra parte, la naturaleza viscoelástica de la interfase le confiere una respuesta tenso-deformacional 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  $\tau_{max}$  (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. Estimación de la eventual contribución de las tensiones térmicas a las máximas tensiones de corte calculadas.

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 interfases.

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

## Interfases bituminosas mejoradas para la durabilidad de los firmes: Tensiones máximas, tiempo de carga y velocidad de cizalla

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 mm<sup>2</sup>) 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.

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.

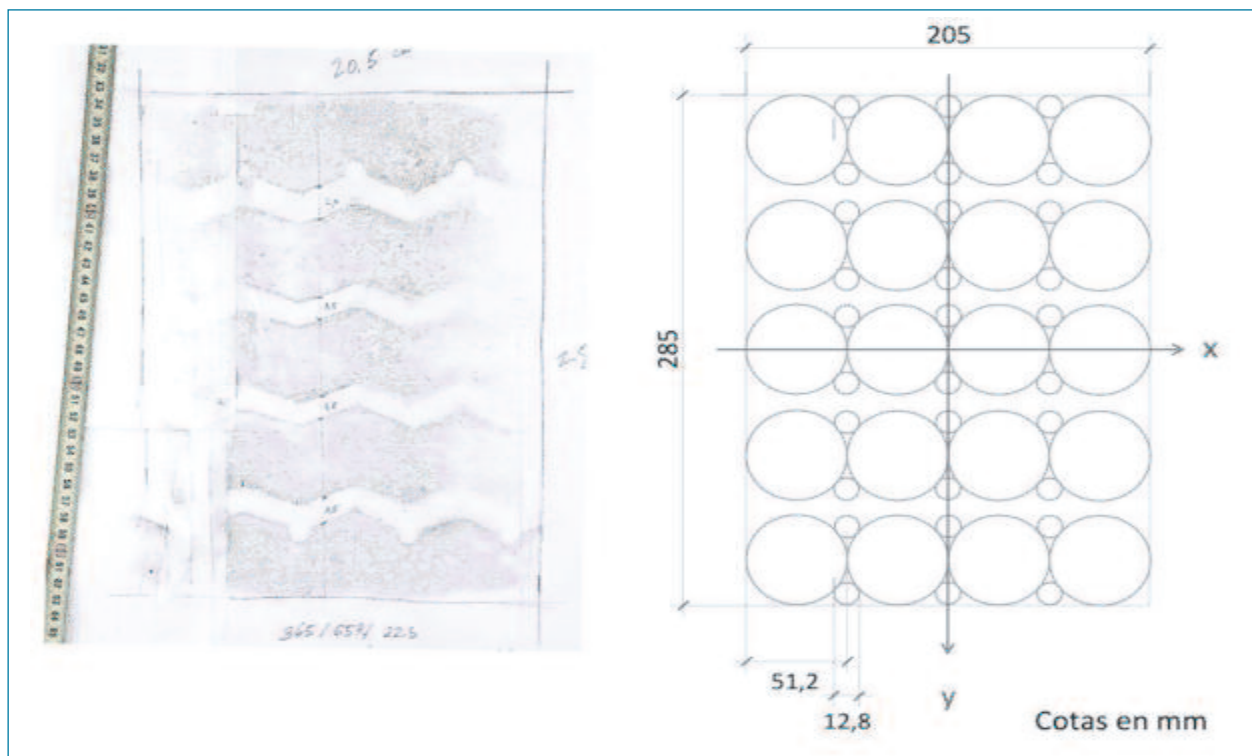


Figura 3. Impronta de un neumático de un eje tridem cargado con 49 kN (izquierda) y cargas circulares utilizadas en BISAR (derecha). El eje x señala el sentido de avance.

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 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).

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, 100 y 200 mm/min para obtener sus resistencias máximas a cortante y sus módulos de reacción horizontal bajo esas tres distintas sollicitaciones.

Tabla 1. Definición del firme analizado

CAPA	ESPESOR	MÓDULO aso	C. POISSON	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	-

### 3. RESULTADOS

#### 3.1 Resultados de los cálculos

##### 3.1.1 Tensiones debidas a las cargas del tráfico

En el caso concreto de una capa de 6 cm de espesor, con un módulo de 6.000 MPa y para  $K=25$  MPa/mm, las tensiones de corte  $\bar{\sigma}_{zx}$  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 ( $Hx=0,55V$ ). 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.

Suponiendo un respuesta predominantemente elástica y prescindiendo de efectos dinámicos, los pulsos de tensión  $\bar{\sigma}_{zx}$ , deformación  $\epsilon_{zx}$  y desplazamiento  $u_x$  adoptan la misma forma.

Así, la variación del desplazamiento relativo entre los bordes de la interfase en un punto situado bajo el centro de la rodada, al paso de un eje tridem circulando a 80 km/h, resultaría ser la representada en la figura 5.

El tiempo durante el cual se produce la mayor parte del desplazamiento puede tomarse como tiempo de carga ( $t_c$ ). A la velocidad de 80 km/h vale  $t_c=0,01$  s, aproximadamente bajo ambas hipótesis de carga. Este tiempo es independiente 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 ( $\Delta u_x$ ) 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

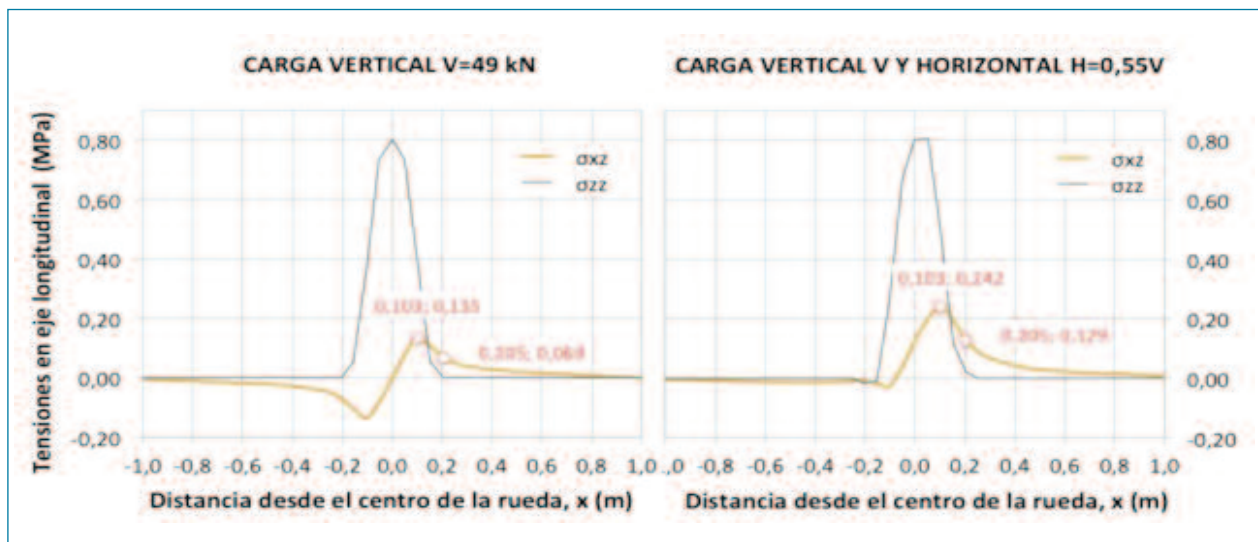


Figura 4. Tensiones en la interfase bajo el centro de la huella y según eje longitudinal

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  $x=0,205$  m.

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



## Interfases bituminosas mejoradas para la durabilidad de los firmes: Tensiones máximas, tiempo de carga y velocidad de cizalla

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.

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 hipó-

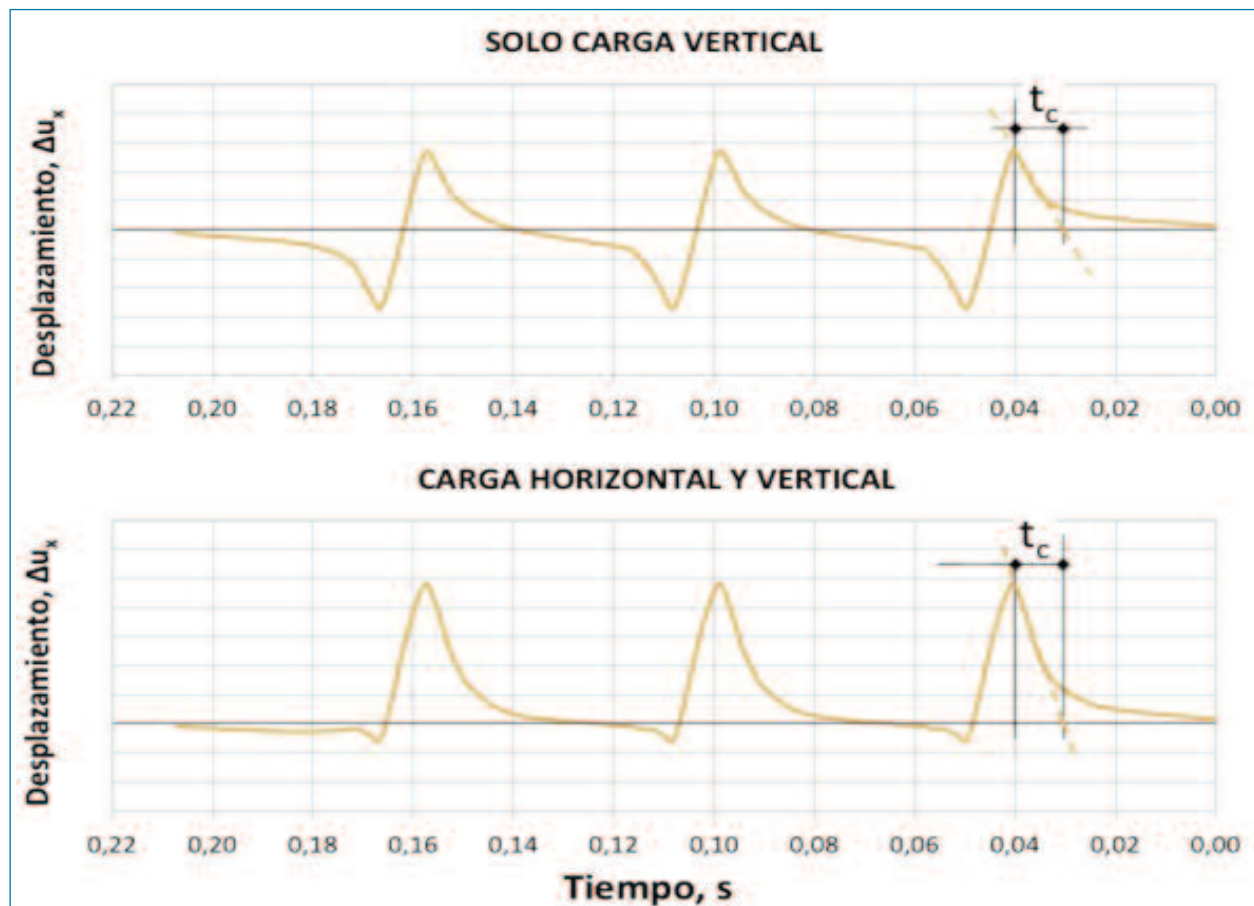


Figura 5. Variación del desplazamiento relativo  $\Delta u_x$  con el tiempo ( $v=80$  km/h)

En las figuras 6 y 7 puede encontrarse una representación gráfica de los mismos resultados, y de los correspondientes a la hipótesis de carga intermedia ( $H=0,55V/2$ ). 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.

tesis de carga indicadas. La figura 8 es una representación gráfica de dos de esas hipótesis de carga.

### 3.1.2 Tensiones térmicas

Las interfases bituminosas también pueden hallarse sometidas a tensiones térmicas, al menos en determinadas circunstancias. Por ejemplo, si existen dilataciones o retracciones diferenciales entre las capas que las limitan. En el presente epígrafe se ha tratado de hacer una estimación del posible alcance de este tipo de tensiones de corte, que en su caso, deberían sumarse a las tensiones de cálculo correspondientes a las acciones del tráfico.

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					
<b>Cortante máximo MPa</b>						<b>Cortante máximo MPa</b>					
$\tau_{max}$	K, MPa/mm					$\tau_{max}$	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
<b>Desplazamiento relativo máximo, <math>\mu\text{m}</math></b>						<b>Desplazamiento relativo máximo, <math>\mu\text{m}</math></b>					
$\Delta u$	K, MPa/mm					$\Delta u$	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	0,000	4,54	8,60	11,93	15,16	2	0,000	11,56	35,02	74,72	242,44
4	0,000	5,21	9,96	13,48	16,30	4	0,000	10,44	26,69	50,05	145,64
5	0,000	5,32	10,30	13,92	16,67	5	0,000	9,92	24,66	44,61	115,39
6	0,000	5,31	10,45	14,17	16,89	6	0,000	9,38	22,91	40,45	100,19
8	0,000	5,14	10,33	14,15	16,85	8	0,000	7,73	19,90	34,21	79,86
<b>Velocidad de cizalla, mm/min para 80 km/h</b>						<b>Velocidad de cizalla, mm/min</b>					
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	-	27	52	72	91	2	-	69	210	448	1455
4	-	31	60	81	98	4	-	63	160	300	874
5	-	32	62	84	100	5	-	59	148	268	692
6	-	32	63	85	101	6	-	56	137	243	601
8	-	31	62	85	101	8	-	46	119	205	479

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					
<b>Cortante máximo MPa</b>						<b>Cortante máximo MPa</b>					
$\tau_{max}$	K, MPa/mm					$\tau_{max}$	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
<b>Desplazamiento relativo máximo, <math>\mu\text{m}</math></b>						<b>Desplazamiento relativo máximo, <math>\mu\text{m}</math></b>					
$\Delta u$	K, MPa/mm					$\Delta u$	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
<b>Velocidad de cizalla, mm/min para 80 km/h</b>						<b>Velocidad de cizalla, para 80 km/hmm/min</b>					
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	-	36	82	121	153	2	-	76	231	504	1957
4	-	33	68	93	114	4	-	66	176	338	1009
6	-	32	62	84	100	6	-	59	148	268	692
8	-	31	58	78	93	8	-	55	130	227	533
10	-	30	56	75	88	10	-	51	118	200	438

La aparición de tensiones térmicas es más probable en tiempo frío y cuando se produzcan bruscas caídas de temperatura. Con temperaturas cálidas, incluso moderadamente frías, los prolongados tiempos de carga asociados a las solicita-

ciones de tipo térmico y la naturaleza visco-elástica de los materiales bituminosos permiten que se produzcan las deformaciones impuestas por los cambios de temperatura sin apenas modificar el estado tensional de las capas del firme. En gene-

## Interfases bituminosas mejoradas para la durabilidad de los firmes: Tensiones máximas, tiempo de carga y velocidad de cizalla

ral, se considera que puede prescindirse de valorar la presencia de tensiones térmicas cuando la temperatura de las capas bituminosas es superior a 6° C (Pszczola, 2012).

En la figura 6 se ha representado la geometría utilizada en los cálculos. Se ha supuesto que las dos capas bituminosas que limitan la interfase en estudio se comportan como losas de longitud l y que en un cierto tiempo t (tiempo de carga) su tempe-

Tabla 4. Resultados de los cálculos para una capa de refuerzo de diferentes espesores y módulos de Young cuando V=49 kN y H=0,55/2 V

FUERZA VERTICAL F=49 kN y HORIZONTAL H=0,55F/2						FUERZA VERTICAL F=49 kN y HORIZONTAL H=0,55F/2					
<b>Cortante máximo Mpa</b>						<b>Cortante máximo Mpa</b>					
$\tau_{max}$	K, MPa/mm					$\tau_{max}$	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	0,407	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
<b>Desplazamiento relativo máximo, <math>u_{max}</math> <math>\mu</math>m</b>						<b>Desplazamiento relativo máximo, <math>\mu</math>m</b>					
$\Delta u$	K, MPa/mm					$\Delta u$	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	0,000	8,053	21,810	43,324	128,798	2	0,00	9,32	26,08	52,08	175,86
4	0,000	7,820	18,324	31,769	80,969	4	0,00	8,27	20,28	35,99	93,60
5	0,000	7,619	17,476	29,267	66,029	6	0,00	7,62	17,48	29,27	66,03
6	0,000	7,348	16,679	27,310	58,538	8	0,00	7,16	15,74	25,41	52,16
8	0,000	6,437	15,114	24,178	48,354	10	0,00	6,80	14,53	22,85	43,80
<b>Velocidad de cizalla, mm/min</b>						<b>Velocidad de cizalla, mm/min</b>					
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	-	48	131	260	773	2	-	56	87	174	586
4	-	47	110	191	486	4	-	50	68	120	312
5	-	46	105	176	396	6	-	46	58	98	220
6	-	44	100	164	351	8	-	43	52	85	174
8	-	39	91	145	290	10	-	41	48	76	146

De acuerdo con los modelos de respuesta utilizados en el presente estudio, el valor de las tensiones de corte en las interfases bituminosas es proporcional al desplazamiento relativo entre los bordes de la interfase:

$$\tau = K\Delta u$$

y, en consecuencia, pueden calcularse conociendo las dilataciones diferenciales entre el borde superior de la capa subyacente y el inferior de la capa superpuesta. Las mayores tensiones de corte en la interfase, como las tensiones normales en el seno de las capas del firme, aparecerán con las temperaturas más bajas y las variaciones súbitas de temperatura, puesto que el valor de módulo de reacción horizontal (K) aumenta cuando lo hace la velocidad de carga y se reduce la temperatura de la interfase.

ratura media varía de T0 a T1 (capa superior) y de T0 a T2 (capa inferior). Los dos bordes libres están constituidos por sendas fisuras virtuales, y allí es donde se producen los corrimiento máximos. Las deformaciones longitudinales pueden obtenerse mediante la expresión

$$\varepsilon = \alpha\Delta T$$

donde  $\alpha$  es el coeficiente de contracción térmica, que para las mezclas bituminosas habituales suele adoptar valores comprendidos entre 2,0 y 2,5  $\times 10^{-5}$  °C<sup>-1</sup> (Pszczola, 2012; Islam, 2015).



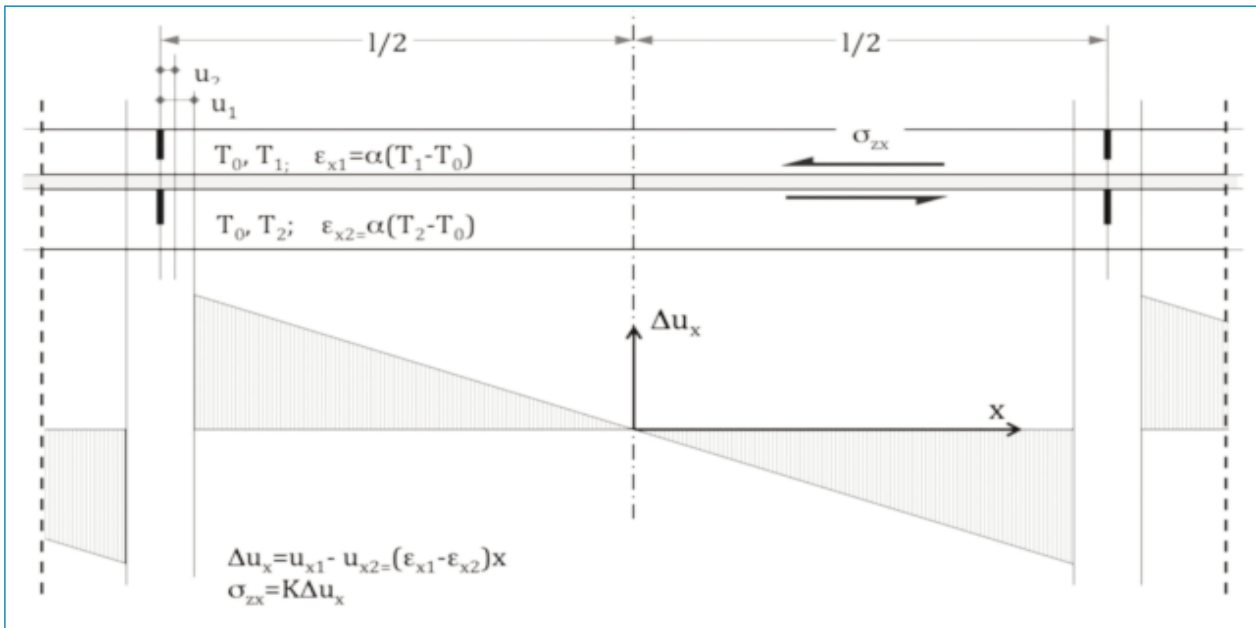


Figura 6. Tensiones de corte  $\sigma_{zx}$  de origen térmico en la interfase bituminosa

Suponiendo que cada capa sufre la contracción o dilatación térmica correspondiente a la variación de su temperatura media y que sus bordes se mantienen sensiblemente verticales, las máximas tensiones de corte longitudinales en la interfase pueden calcularse mediante la expresión:

$$\sigma_{zx} = \frac{1}{2} K \alpha (T_2 - T_1) l$$

El tiempo de carga asociado a la sollicitación de la interfase depende de la velocidad ( $V_T$ ) a la que varía la diferencia de temperaturas entre las dos capas bituminosas ( $T_2 - T_1$ ):

$$t = \frac{T_2 - T_1}{V_T}$$

y, junto con la temperatura de la interfase, determina el valor del módulo de reacción horizontal de la interfase ( $K$ ) que, según han mostrado diversos estudios (Diakhaté, 2007; Kim et al, 2013), satisface el principio de superposición tiempo-temperatura.

- El coeficiente de contracción o dilatación térmica de las capas bituminosas es de  $2,25 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ .
- La temperatura inicial de las dos capas bituminosas ( $T_0$ ) es de  $-5 \text{ } ^\circ\text{C}$

- La diferencia máxima entre las temperaturas de las dos capas bituminosas ( $T_2 - T_1$ ) es de  $2 \text{ } ^\circ\text{C}$ .
- La velocidad ( $V_T$ ) a la que se alcanza la diferencia de temperaturas indicadas es de  $5 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{hora}$ . El tiempo de carga ( $t$ ) es, pues, de 24 minutos.
- El módulo de reacción horizontal de la interfase ( $K$ ) varía con la temperatura y el tiempo de carga como la resistencia máxima a cortante y de acuerdo con las predicciones de Canestrari et al. (2013). A las temperaturas y tiempos de carga considerados su valor es similar al que se obtiene a  $20 \text{ } ^\circ\text{C}$  y  $1,25 \text{ mm}/\text{min}$  y, por tanto, cabe que se halle comprendido entre  $0,5$  y  $1 \text{ MPa}/\text{mm}$ .
- La longitud de las losas virtuales puede variar entre  $6$  y  $9 \text{ m}$ , es decir, según las distancias típicas de la aparición de la fisuración térmica a bajas temperaturas (Marasteanu et al., 2004).

En relación con las hipótesis establecidas cabe señalar que la relativa al tiempo de carga puede darse solo en situaciones excepcionales ya que la temperatura de los pavimentos bituminosos suele variar a velocidades más reducidas. La hipótesis relacionada con la verticalidad de los bordes libres de las capas durante sus movimientos de dilatación o contracción también debe valorarse como la opción más desfavorable: alternatively, es posible que las capas bituminosas se comporten como si estuvieran compuestas por láminas horizontales, deformándose cada una de ellas según su respectiva temperatura

## Interfases bituminosas mejoradas para la durabilidad de los firmes: Tensiones máximas, tiempo de carga y velocidad de cizalla

(variando con la distancia a la superficie). En consecuencia, los resultados obtenidos son, en todo caso, umbrales superiores

de las máximas tensiones cortantes de origen térmico a que pueden hallarse sometidas las interfases bituminosas y antes

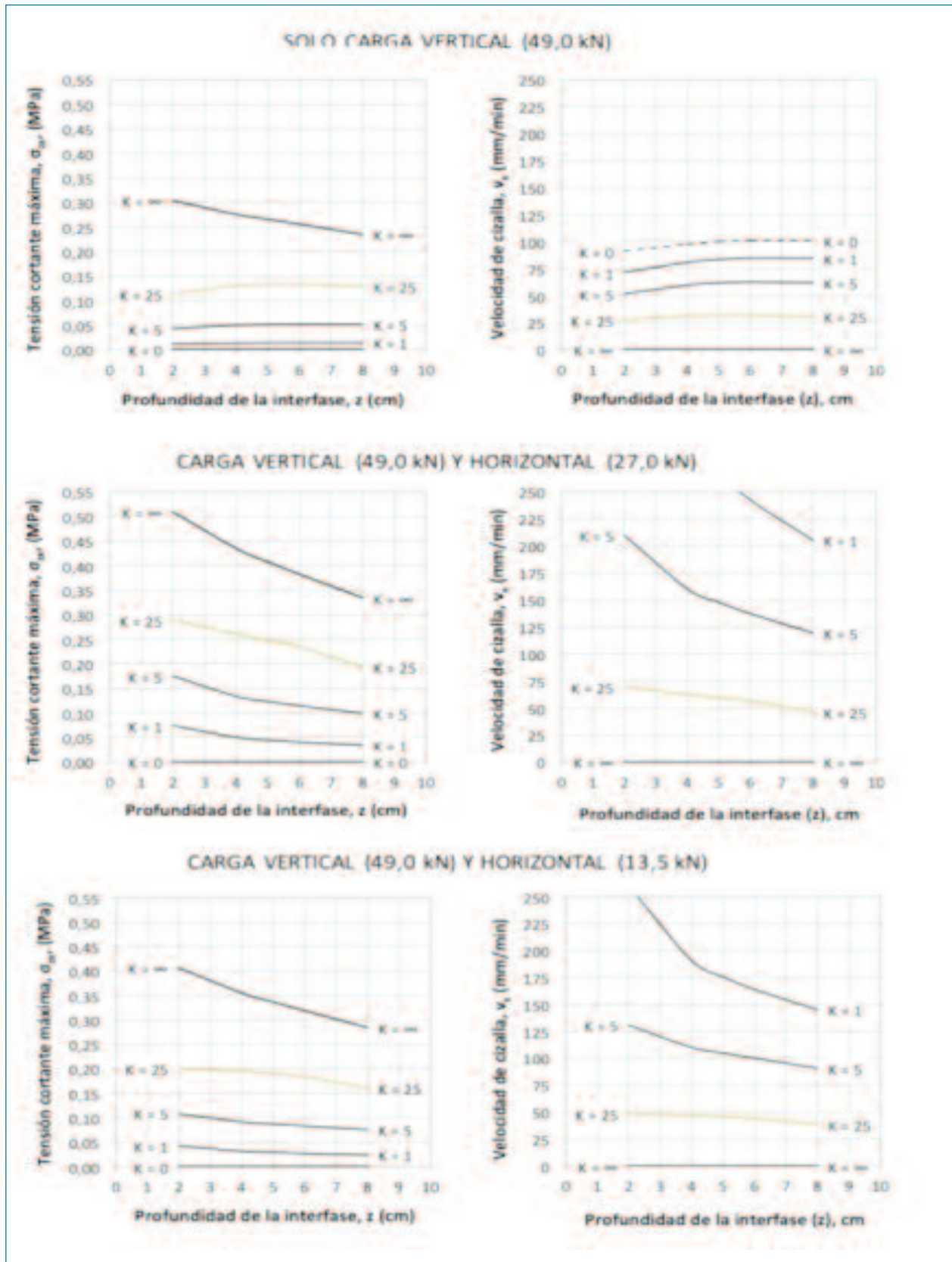


Figura 7. Tensión máxima ( $\sigma_{xy}$ ) y velocidad de carga ( $v_x$ ) según espesor del refuerzo

de que tengan efecto los fenómenos de relajación propios de los materiales viscoelásticos.

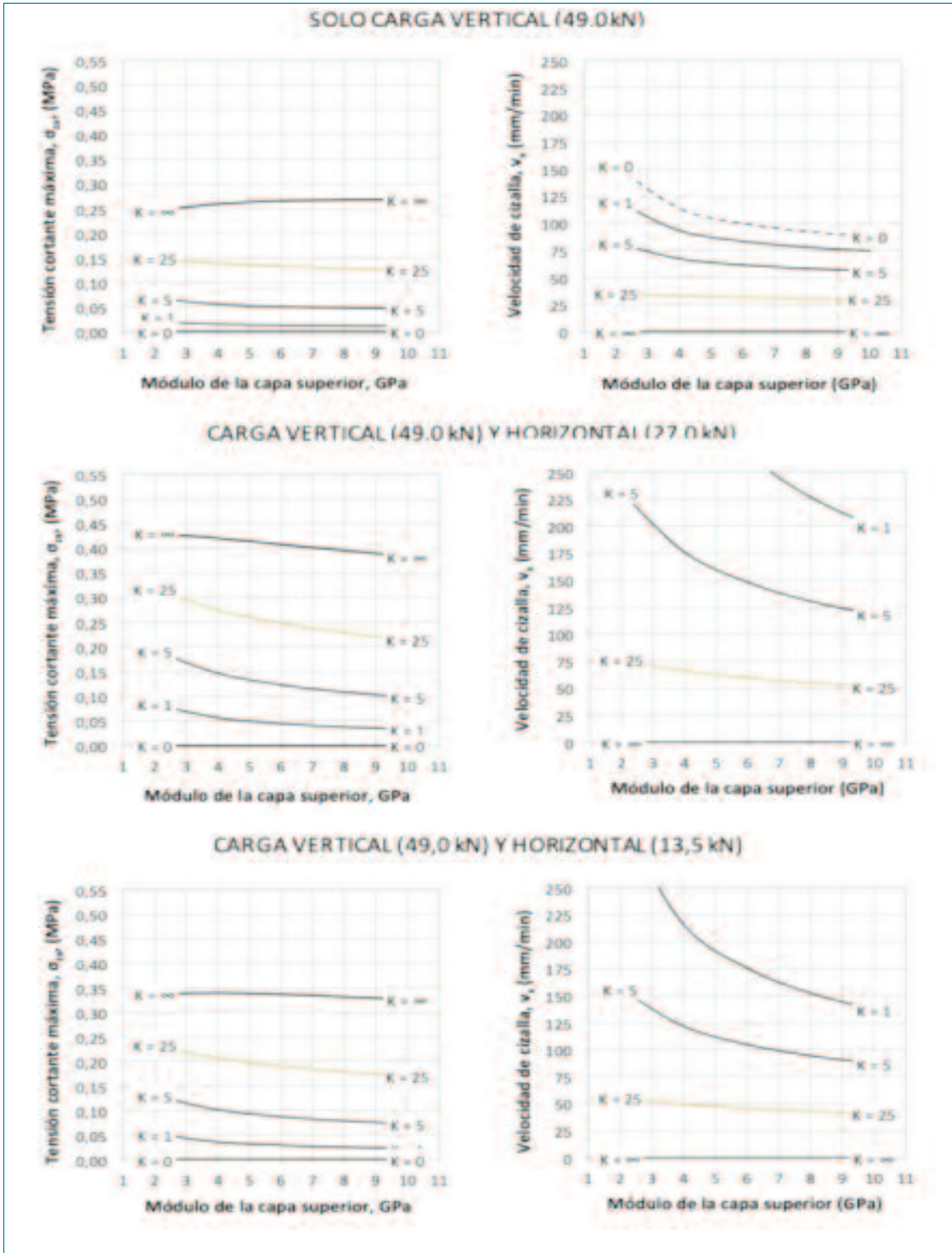


Figura 8. Tensión máxima ( $\sigma_{\text{max}}$ ), velocidad de carga y módulo de la capa de refuerzo



# Interfases bituminosas mejoradas para la durabilidad de los firmes: Tensiones máximas, tiempo de carga y velocidad de cizalla

Tabla 5. Tensiones de corte y normales en x=0,205 m

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)			
$\tau_{x205}$				$\tau_{max}$				$\tau_{max}$			
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			
$\sigma_{z205}$				$\sigma_{z205}$				$\sigma_{z205}$			
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

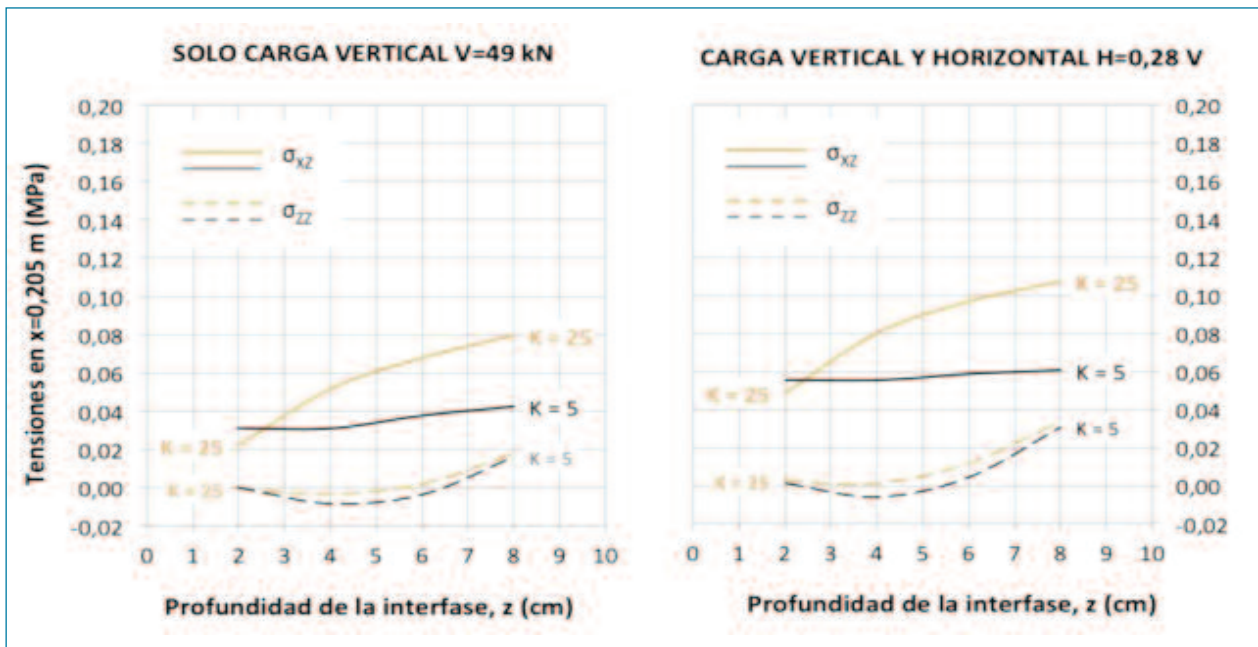


Figura 9. Tensión de corte y normales en x=0,205

Tabla 6. Tensiones cortantes de origen térmico en la interfase, bajo las hipótesis indicadas en 3.1.2

Longitud de las losas virtuales, m	6,00	6,00	9,00	9,00
Desplazamiento máximo, mm	0,14	0,14	0,20	0,20
Velocidad de deformación, 10 <sup>-3</sup> mm/min	5,83	5,83	8,33	8,33
Módulo de reacción horizontal, MPa/mm	0,50	1,00	0,50	1,00
Tensiones de corte máximas, MPa	0,07	0,14	0,10	0,20

## 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 10, obteniéndose resistencias máximas ( $\tau_{max}$ ) significativamente más elevadas, con desplazamientos hasta rotura ( $\Delta_{max}$ ) algo superiores y módulos de reacción horizontal (K) mayores.

En la Tabla 7 se han recopilado resultados de ensayos de



corte realizados a velocidades de 2,5 y 50 mm/min. La resistencia máxima ( $\tau_{max}$ ) 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 Canestrari et al. (2013):

donde  $\tau_{vx}$  y  $\tau_{v1}$  son medidas a las velocidades  $v_x$  y  $v_1$ , res-

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

pectivamente 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.

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 varia 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

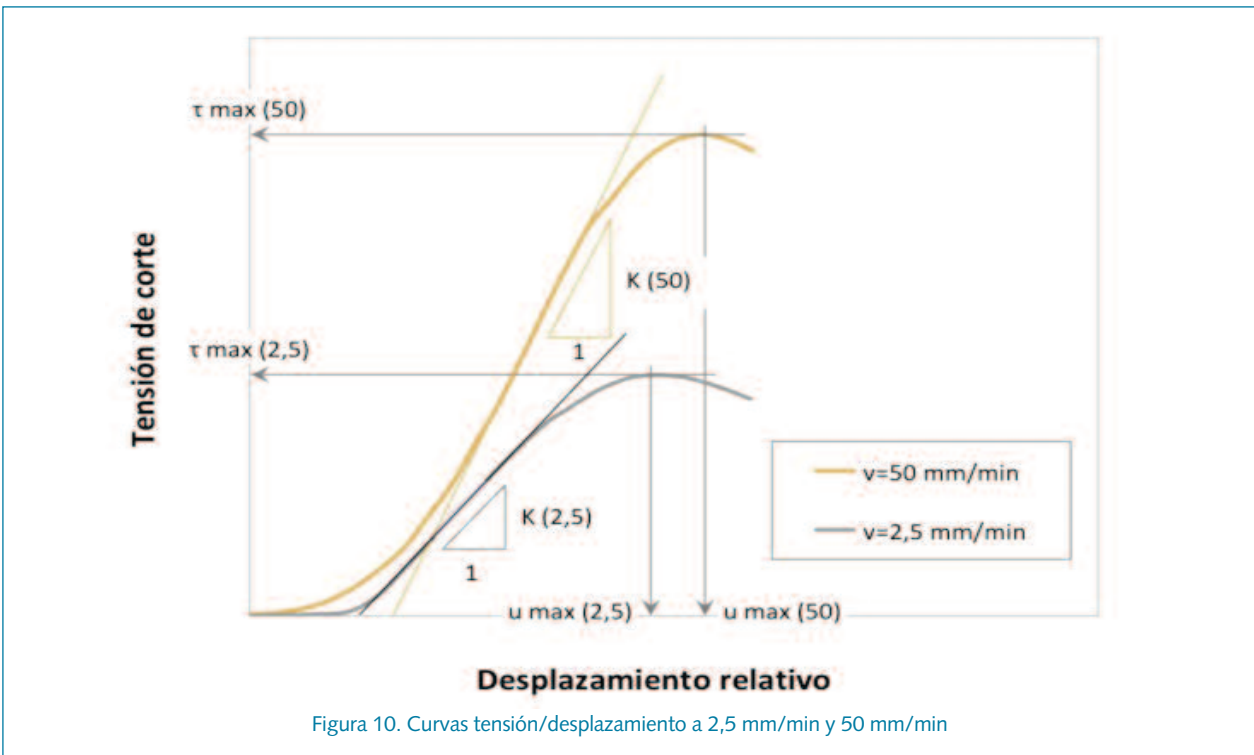


Tabla 7. Resultados de los ensayos de corte realizados a velocidades de desplazamiento de 2,5 mm/min (2,5) y 50 mm/min (50)

SERIE	$\tau_{max}$ (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 $\Delta \tau_{max}$ 50/2,5			Media $\Delta U_{max}$ 50/2,5			Media $\Delta K_{max}$ 50/2,5		
	1,80			0,97			1,34		

## Interfases bituminosas mejoradas para la durabilidad de los firmes: Tensiones máximas, tiempo de carga y velocidad de cizalla

mm/min.

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:

donde:

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

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

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

$\sigma_n$  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 más probables (comprendidos entre 1 y 25 MPa/mm) no alcanzan el va-

lor 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 0,55 MPa y probablemente inferior a 0,32 en casi cualquier circunstancia. 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.

Finalmente, para obtener las tensiones de corte correspondientes a los análisis a rotura bajo una única solicitación se han sumado a las tensiones de cálculo bajo correspondientes a las acciones del tráfico, las tensiones cortantes de origen térmico obtenidas bajo las hipótesis más desfavorables (0,2 MPa). La Tabla 8 es una recopilación de los niveles de solicitación calcu-

Tabla 8. Tensiones cortantes de cálculo, incluyendo las eventuales tensiones máximas de origen térmico ( $\Delta T$ ) en los análisis a rotura bajo solicitación única

$\tau_{cal}$	Hipótesis de carga	K	Análisis considerado
0,75 MPa	V=49 kN, H=0,55V, $\Delta T=2^{\circ}C$	$\infty$	Límite superior $\tau_{cal}$
0,52 MPa	V=49 kN, H=0,55V, $\Delta T=2^{\circ}C$	25 MPa/mm	Rotura (s única) con tensión normal
0,23 MPa	V=49 kN, H=0,28V	26 MPa/mm	Fatiga con tensión normal
0,14 MPa	V=49 kN, H=0,55V	27 MPa/mm	Rotura (s única) con tensión normal
0,14 MPa	V=49 kN, H=0	28 MPa/mm	Fatiga con tensión normal
0,11 MPa	V=49 kN, H=0,28V	29 MPa/mm	Fatiga sin tensión normal
0,08 MPa	V=49 kN, H=0	30 MPa/mm	Fatiga sin tensión normal

lados.

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

- [1] Canestrari, F., Ferrotti, G., Lu, X., Millien, A., Partl, M. N., Petit, C., Phelipot-Mardelé, 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.
- [2] Diakhaté, M.; Fatigue et comportement des couches d'accrochage dans les structures de chaussée. Sciences de l'ingénieur. Université de Limoges, 2007.
- [3] Islam, Md. Rashadul; Thermal fatigue damage of asphalt pavement. Dissertation submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy in Engineering. The University of New Mexico. Albuquerque, New Mexico. July 2015.
- [4] Kim, Y.; Tayebali, A.; Guddati, M.; Karshenas, A.; Cho, S-H.; Surface Layer Bond Stresses and Strength. Dept. of Civil Construction & Environmental Engineering. North Carolina State University. NCDOT Project 2013-04. FHWA/NC/2013-04. December 2015
- [5] Marasteanu, M.; Li, X.; Clyne, T.; Voller, V.; Timm, D.; Newcomb, D. Low Temperature Cracking of Asphalt Concrete Pavements. University of Minnesota. Department of Civil Engineering. 2004
- [6] 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 (ASEFMA). Madrid,
- [7] Pszczoła, M.; Judycki,.; Evaluation of thermal stresses in asphalt layers in comparison with TSRST test results. Gdansk University of Technology, Poland. Conference Paper in RILEM Bookseries • June 2012
- [8] Romanoschi, S. A. (1999): Characterization of Pavement Layer Interfaces. Louisiana State University Historical Dissertations and Theses. 7008. Louisiana, EEUU.
- [9] 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.
- [10] SCHELL (1998): BISAR 3.0 User Manual. Bitumen Business Group. London, GB.
- [11] 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.