

Valoración de la eficacia de los riegos de adherencia. Análisis de los datos de ensayo de corte según la NORMA NLT-382.08 en diversas emulsiones

Julio del Pozo Velasco,
juliodelpozo@telefonica.net

En este trabajo se aborda el tema del comportamiento mecánico de la unión de las capas del firme. Usualmente se supone que las capas realizadas con mezcla bituminosa están perfectamente adheridas, y si se trata de capas de mezcla bituminosa con otras con conglomerantes hidráulicos, se aconseja suponerlas semi adheridas. En ambos casos se utilizan emulsiones de distinta naturaleza y dotaciones, y con una puesta en obra no siempre cuidadosa.

El grado de adherencia de las capas tiene importancia en cuanto que modifica la distribución de tensiones y deformaciones, y por lo tanto la resistencia a la fatiga y durabilidad del firme. No parece fácil que las capas estén perfectamente adheridas, en cuanto que la estructura mineral de ambas sufre una discontinuidad en la interfase que queda sometida a las fuerzas de adhesión producidas por los riegos de adherencia y por el rozamiento.

Se trata de establecer una relación entre los resultados del ensayo de corte en laboratorio a través de la norma NLT-382/08, y el parámetro de adherencia entre capas del cálculo elástico multicapa usado habitualmente en el cálculo de las secciones de firme.

Palabras Clave: Emulsiones, Adherencia entre capas, Distribución cortante, Fatiga, Ensayo corte, Rigidez corte.

This paper addresses the subject of the mechanical behavior of the union between pavement layers. It is usually assumed that the layers made with bituminous mixture are perfectly adhered, and in the case of layers of bituminous mixture with others containing hydraulic conglomerates, it is advised to consider them semi-adhered. In both cases, emulsions of different nature and endowments are used, and not always following a careful implementation.

The degree of layer adherence is important as it modifies the distribution of stresses and deformations, and therefore the fatigue resistance and durability of the pavement. It does not seem easy for the layers to be perfectly adhered, considering that the mineral structure of both suffers a discontinuity at the interface which is subjected to adhesive forces generated by the adhesion risks and friction.

The objective is to establish a relationship between the results of the laboratory shear test according to the NLT-382/08 standard, and the adhesion parameter between layers of the multilayer elastic calculation, commonly used in the calculation of pavement sections.

Keywords: Tack Coat, Bond Strength, Distribution Shear Strength, Fatigue, Interface bond strength test.

Valoración de la eficacia de los riegos de adherencia. Análisis de los datos de ensayo de corte según la NORMA NLT-382.08 en diversas emulsiones

1. INTRODUCCIÓN

La unión de las capas del firme se realiza mediante los llamados riegos de adherencia, los cuales tienen encomendada una misión de la máxima importancia, pues pretenden conseguir que el paquete de firme funcione de una forma monolítica. Sin embargo, es frecuente que no se le preste la debida atención en la ejecución de las obras de pavimentación. A menudo el material o la dotación no son adecuados, el soporte no está suficientemente limpio, el reparto superficial no es homogéneo, o es arrastrado por el tráfico de obra.

El riego se suele hacer mediante emulsiones bituminosas con diversa composición y dotación. Se trata en este estudio, de encontrar métodos de valorar el grado de eficacia de los riegos, utilizando diversos tipos de emulsiones como son las usuales de betún, las modificadas con polímeros y las termoadherentes. Su capacidad de unión de las capas de mezcla bituminosa se valora mediante un coeficiente variable entre 0, capas perfectamente adheridas, y 1, capas despegadas.

Esta capacidad de unión va a incidir en la distribución tenso-deformacional de todas las capas del firme, disminuyendo su durabilidad a fatiga y provocando deformaciones y arroyamientos en el caso de la capa de rodadura.

2. ENSAYOS REALIZADOS

Las emulsiones estudiadas han sido de tres tipos: una emulsión modificada, MODIF; una emulsión standard de referencia, STAND; y una emulsión termoadherente, TERM. Se han fabricado probetas y se han sometido a esfuerzo cortante según la norma NLT-382/08, con las siguientes combinaciones temperatura-velocidad de deformación (VEL).

1.- T=20°C: VEL= 2 mm/min; 50.8 mm/min y 100 mm/min.

2.- VEL= 50.8 mm/min: T= 5°C; T= 20°C y T= 40°C.

Las emulsiones tienen un contenido de betún del 60%.

Para disminuir el número de probetas a ensayar se han tanteado diversas dotaciones de las tres emulsiones sometiéndolas al ensayo de corte a 20°C y 2 mm/min

de velocidad de deformación. Los resultados han sido los siguientes:

DOTACIÓN RESIDUAL, gr/m ²	TENSIÓN CORTANTE MÁXIMA, MPa		
	MODIF	STAND	TERM
200,00	1,35	1,33	1,36
350,00	1,45	1,46	1,34
500,00	1,24	1,16	1,33

Tabla 1

Se ha optado por una dotación de referencia en todos los casos de 350 gr/m² de betún residual.

Las curvas de tensión deformación obtenidas en el ensayo se han tratado según la figura adjunta, identificando la parte elástica y aislando la parte inicial de acoplamiento de las probetas y los sensores del aparato. Si la pendiente de subida no era suficientemente uniforme, se la ha determinado mediante la tangente asociada a la mitad superior de la curva hasta el nivel del valor máximo de la tensión.

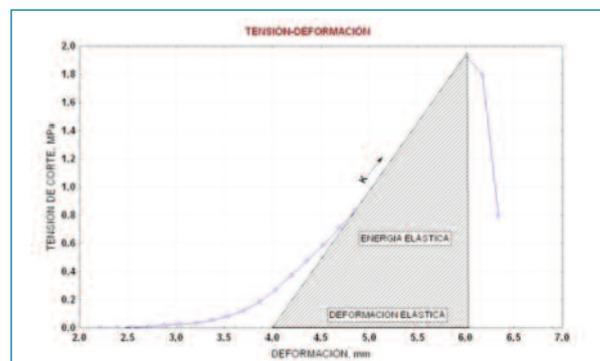


Figura 1

Se han obtenido los siguientes parámetros:

T, MPa, tensión máxima equivalente al límite elástico.

DESP, mm, desplazamiento en el área elástica, asimilable a ductilidad elástica.

K, MPa/mm, asimilable a la elasticidad de la emulsión.

AREA, MPa*mm, área de la zona elástica, asimilable a la tenacidad de la zona elástica.

El resultado de los ensayos ha sido el siguiente:

NUM	T, MPa	VEL, mm/min	EMUL	K MPa/mm	DES, mm	AREA, MPa*mm
1	0,65	2	MODF	MODF	1,55	0,5
2	0,58	2	MODF	MODF	1,36	0,4
3	0,51	2	MODF	0,32	1,6	0,41
4	1,31	51	MODF	0,65	2	1,31
5	1,42	51	MODF	0,71	2	1,42
6	1,57	51	MODF	0,75	2,1	1,65
7	1,65	100	MODF	0,97	1,7	1,4
8	1,5	100	MODF	0,79	1,9	1,42
1	0,34	2	STAND	0,21	1,65	0,28
2	0,54	2	STAND	0,23	2,32	0,63
3	0,57	2	STAND	0,29	1,95	0,55
4	1,23	51	STAND	0,67	1,85	1,14
5	1,18	51	STAND	0,76	1,55	0,92
6	1,23	51	STAND	0,65	1,9	1,17
7	1,3	100	STAND	0,62	2,1	1,36
8	1,68	100	STAND	0,93	1,8	1,51
9	1,6	100	STAND	0,8	2	1,6
1	0,68	2	TERM	0,36	1,9	0,64
2	0,86	2	TERM	0,49	1,75	0,76
3	0,68	2	TERM	0,31	2,2	0,75
4	1,48	51	TERM	0,8	1,85	1,37
5	1,58	51	TERM	0,69	2,3	1,82
6	1,62	51	TERM	0,9	1,8	1,45
7	1,52	100	TERM	0,74	2,05	1,56
8	1,78	100	TERM	0,99	1,8	1,6
9	1,75	100	TERM	0,7	2,5	2,19

Tabla 2

3. ANÁLISIS DE LOS DATOS

Las características descriptivas de las poblaciones, son las siguientes:

Al objeto de conocer las diferencias que pudiera haber entre las distintas poblaciones que constituyen los resultados de los ensayos, se realiza un análisis de varianza

de las variables medidas, y calculadas, T, K, D y AREA, respecto de la velocidad de deformación (VEL), del tipo de emulsión (EMUL), y de ambos. Los resultados son los siguientes:

Valoración de la eficacia de los riegos de adherencia. Análisis de los datos de ensayo de corte según la NORMA NLT-382.08 en diversas emulsiones

VEL, mm/min EMUL	2-Way Tables of Descriptive Statistics (RES TOT DAT 1.sta) N=26 (No missing data in dep. var. list)											
	T*, MPa Means	T*, MPa N	T*, MPa Std.Dev.	K* MPa/mm Means	K* MPa/mm N	K* MPa/mm Std.Dev.	DESP, mm Means	DESP, mm N	DESP, mm Std.Dev.	AREA* MPa*mm Means	AREA* MPa*mm N	AREA* MPa*mm Std.Dev.
2	0,6014	9	0,1437	0,3396	9	0,0944	1,8089	9	0,3129	0,5463	9	0,1639
MODIF	0,5809	3	0,0711	0,3889	3	0,0617	1,5033	3	0,1266	0,4360	3	0,0594
STAND	0,4831	3	0,1252	0,2435	3	0,0435	1,9733	3	0,3356	0,4875	3	0,1839
TERM	0,7401	3	0,1068	0,3863	3	0,0959	1,9500	3	0,2291	0,7154	3	0,0616
51	1,4030	9	0,1677	0,7308	9	0,0814	1,9278	9	0,2093	1,3610	9	0,2706
MODIF	1,4336	3	0,1313	0,7043	3	0,0471	2,0333	3	0,0577	1,4594	3	0,1734
STAND	1,2170	3	0,0285	0,6933	3	0,0618	1,7667	3	0,1893	1,0768	3	0,1387
TERM	1,5583	3	0,0701	0,7947	3	0,1057	1,9833	3	0,2754	1,5463	3	0,2371
100	1,5953	8	0,1570	0,8166	8	0,1339	1,9813	8	0,2506	1,5795	8	0,2630
MODIF	1,5707	2	0,1058	0,8776	2	0,1277	1,8000	2	0,1414	1,4099	2	0,0159
STAND	1,5254	3	0,2028	0,7835	3	0,1584	1,9667	3	0,1528	1,4910	3	0,1229
TERM	1,6816	3	0,1430	0,8091	3	0,1551	2,117	3	0,3547	1,7810	3	0,3543
All Groups	1,1847	26	0,4649	0,6218	26	0,2347	1,9031	26	0,2614	1,1462	26	0,5076

Tabla 3

Respecto del tipo de emulsión (EMUL):

Variable	Analysis of Variance (RES TOT DAT 1.sta) Marked effects are significant at $p < ,05000$							
	SS Effect	df Effect	MS Effect	SS Error	df Error	MS Error	F	p
T*, MPa	0,3000	2	0,1500	5,1026	23	0,2219	0,6762	0,5184
K* MPa/mm	0,0371	2	0,0185	1,3403	23	0,0583	0,3182	0,7306
DESP, mm	0,2448	2	0,1224	1,4629	23	0,0636	1,9244	0,1687
AREA* MPa*mm	0,5667	2	0,2834	5,8742	23	0,2554	1,1095	0,3467

Tabla 4

Respecto de la velocidad de deformación, (VEL):

Variable	Analysis of Variance (RES TOT DAT 1.sta) Marked effects are significant at $p < ,05000$							
	SS Effect	df Effect	MS Effect	SS Error	df Error	MS Error	F	p
T*, MPa	4,8400	2	2,4200	0,5626	23	0,0245	98,926	0,0000
K* MPa/mm	1,1276	2	0,5638	0,2498	23	0,0109	51,903	0,0000
DESP, mm	0,1342	2	0,0671	1,5735	23	0,0684	0,981	0,3901
AREA* MPa*mm	5,1560	2	2,5780	1,2849	23	0,0559	46,146	0,0000

Tabla 5

Respecto a EMUL y VEL:

Variable	Analysis of Variance (RES TOT DAT 1.sta) Marked effects are significant at $p < .05000$							
	SS Effect	df Effect	MS Effect	SS Error	df Error	MS Error	F	P
T*, MPa	5,1580	8	0,6448	0,2446	17	0,0144	44,815	0,0000
K* MPa/mm	1,1986	8	0,1498	0,1788	17	0,0105	14,245	0,0000
DESP, mm	0,7971	8	0,0996	0,9107	17	0,0536	1,860	0,1343
AREA* MPa*mm	5,8661	8	0,7333	0,5748	17	0,0338	21,686	0,0000

Tabla 6

Respecto de la emulsión, EMUL, el conjunto de las variables analizadas, forman una población indistinguible unas de las otras. En cambio, respecto de la velocidad de deformación, VEL, las poblaciones de T, K y AREA, son diferentes estadísticamente, es decir, distintos valores de VEL generan poblaciones diferentes de las variables T, K y AREA. No así para el desplazamiento, DESP.

Para la combinación de EMUL y VEL, se repite lo mismo, igualmente con la excepción del desplazamiento. El valor de F disminuye en los tres casos respecto a los resultados de solo VEL, lo que indica que la EMUL rebaja el reconocimiento de la desigualdad de las poblaciones T, K y AREA, aunque los valores son aceptables.

Es decir, los valores de T, y por lo tanto de K, y AREA, solo son sensibles a la velocidad de deformación VEL.

La tensión máxima T es inferior en la emulsión standard en todos los casos, si bien tiende a igualarse para velocidades altas. Esta tendencia de valores de T desde

2 mm/min a 100 mm/min, hace que las extrapolaciones a valores altos de VEL sean más altas que las otras dos emulsiones.

Es interesante ver la relación que hay entre la tensión máxima, T, y el desplazamiento asociado DESP. La poca diferencia entre la recta de regresión y la $K=T/2$, permite suponer valores cercanos a 2 mm como el valor más aproximado de desplazamiento para cualquier valor de T.

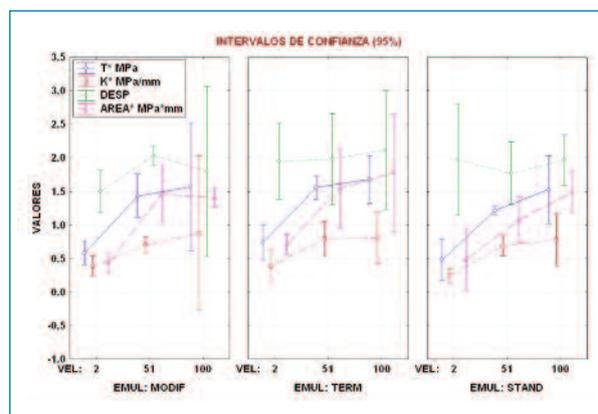


Figura 3

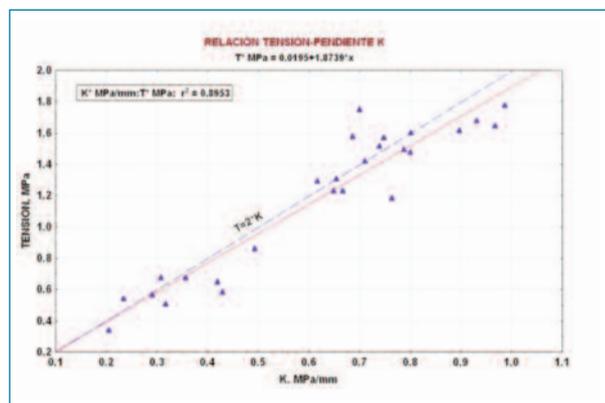


Figura 2

Los intervalos de confianza de las medias son muy amplios debido a los pocos datos por caso de que se dispone (3), y en algún caso, con 100 mm/min (2). Esto, más las propias dispersiones de los ensayos hace complicado extraer conclusiones nítidas. Se pone de manifiesto que los valores del desplazamiento DESP no tienen tendencia al crecimiento ni con la velocidad de deformación, ni con el tipo de emulsión y fluctúan con una media alrededor de 2 mm, como ya se ha visto.

Valoración de la eficacia de los riegos de adherencia. Análisis de los datos de ensayo de corte según la NORMA NLT-382.08 en diversas emulsiones

4. RELACIÓN DE LA VELOCIDAD DE DEFORMACIÓN Y LA TENSIÓN NORMAL CON LA RIGIDEZ K

El ensayo de corte en laboratorio, no reproduce las condiciones de servicio reales del firme. Por una parte, el tipo de textura propio de las mezclas de que se trate, tendrá una influencia en la resistencia a cortante de la unión, pero atendiendo a la contribución de la capa de adherencia compuesta por las tres emulsiones analizadas, hay dos factores a tener en cuenta para que los resultados del ensayo se aproximen a la realidad.

Velocidad de deformación. En la realidad muy superior a la de laboratorio. El valor de T y por tanto de la K, también serán superiores.

Tensión normal. En la realidad existe una tensión normal, no considerada en el ensayo, y que puede aumentar también el valor de T y K. Dependerá de la distribución espacial de las dos tensiones, cortante y normal, y su grado de coincidencia, para tenerla o no en cuenta, como se verá más adelante.

Para valorar la variación de la pendiente K con la velocidad de deformación VEL de laboratorio, se han establecido correlaciones para cada tipo de emulsión, obteniendo los siguientes resultados:

MODIFICADA:	$K = 0.326054 * VEL^{0.208529}$	[1]
STANDARD:	$K = 0.21041 * VEL^{0.291371}$	[2]
TERMOADHERENTE:	$K = 0.352687 * VEL^{0.189958}$	[3]

Y gráficamente:

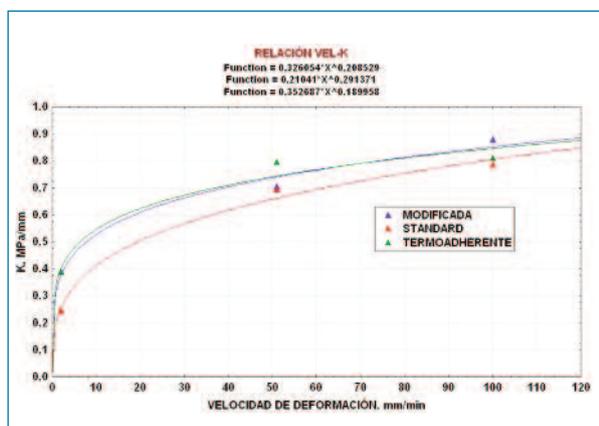


Figura 4

La K va creciendo con la velocidad de deformación, pero la que se produce con el paso de los vehículos está muy lejos de la conseguida en laboratorio. Si se supone una velocidad de 60 Km/h, extrapolando las fórmulas [1], [2], y [3]:

EMULSIÓN	VALOR K [1],[2] Y [3]	VALOR K MEDIO [1],[2] Y [3]
MODIF	5,81	7,79
STAND	11,78	
TERM	4,86	

Tabla 7

Observando cada emulsión, se pone de manifiesto que la STAND tiene valores bajos de K para 2 mm/min, y altos para 100 mm/min, lo que hace que la extrapolación a las velocidades altas, sea superior que las otras dos.

Las relaciones obtenidas con las 3 emulsiones, vendrían a ser equivalentes a la dada por Piber, Canestrari, Ferrotti et al, en RILEM Interlaboratory Test on Interlayer Bonding of Asphalt Pavements, 2009:

$$\tau_{vx} = \tau_{v1} \cdot \left(\frac{vx}{v1}\right)^{0.22}$$

Donde τ_{vx} es el cortante a una velocidad vx , $v1$ es la velocidad del ensayo, y τ_{v1} el cortante del ensayo. Por lo que se puede obtener el cortante τ_{vx} , para cada velocidad de deformación vx , y por lo tanto la K correspondiente.

Tomando las K medias de las 3 emulsiones para cada velocidad de deformación, y aplicando la fórmula [4], se obtiene:

VEL	K MED	[4]		VALOR K MEDIO [4]
		COEF VEL	COEF VEL	
2,00	0,34	29,77	10,11	10,36
50,80	0,73	14,61	10,68	
100,00	0,82	12,59	10,28	

Tabla 8

La expresión [4] es independiente del tipo de emulsión. No hay datos que especifiquen el tipo de emulsiones con el que se ha obtenido. El crecimiento de T ó de K solo depende de la relación de velocidades de carga de los vehículos respecto de la de laboratorio, mientras que en las [1], [2] y [3] depende de la velocidad de los vehículos, y del tipo de emulsión.

También hay que considerar que la rigidez medida en el laboratorio es debida al cortante puro, pero en la realidad, además de considerar la velocidad de deformación hay que añadir el efecto de la tensión normal, lo que también modifica sustancialmente el valor de K obtenido con el aparato de Leutner (NLT-382/08).

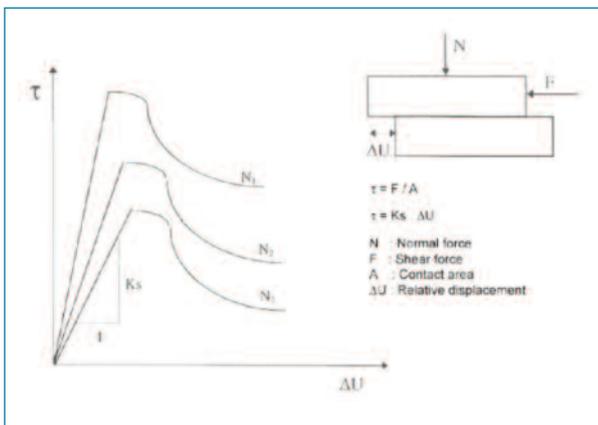


Figura 5. Variación de K con la tensión normal

Así, por ejemplo, se han obtenido las variaciones de esfuerzo cortante en función de la tensión normal, para varios tipos de mezclas obteniendo una pendiente de las rectas comprendida entre 33° y 55°, con una media de 42° (Asphalt Overlay Bond Strength. Greg White. Research Gate April 2015).

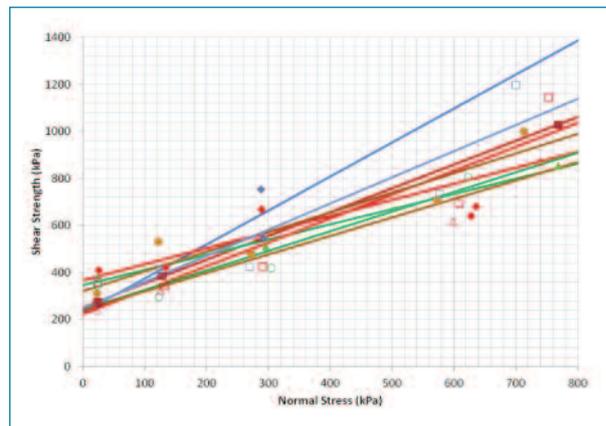


Figura 6

$$\tau_x = \tau_0 + \sigma_x * \tan 42^\circ$$

Y considerando las tensiones de inflado de un camión, 0.8 MPa, la tensión vertical en la interfase, en el caso de capas finas, es prácticamente la misma, con lo que al esfuerzo cortante del ensayo hay que sumarle $0.8 * \tan 42^\circ = 0.72$ MPa.

Ambas rigideces K, las obtenidas en laboratorio, una con velocidad máxima de 100 mm/min, y otra con 200 mm/min (Piber, Canestrari, Ferrotti), están lejos de las reales que se producen en las carreteras. Las relaciones [1], [2] y [3] obtenidas en este trabajo pueden ser una alternativa interesante a tener en cuenta. Aunque no se tiene información del tipo de emulsiones empleadas para establecer la función [4], coincide bien con la obtenida en este trabajo con la STANDARD [2].

5. DISTRIBUCIÓN DE LA TENSIÓN CORTANTE Y NORMAL

Para valorar la acción de la tensión normal sobre la tensión cortante en un firme real, en concreto para capas discontinuas de poco espesor, se estudia el caso del siguiente firme:

3 cm de mezcla discontinua fina. E=3000 MPa

5 cm de mezcla tipo AC16S. E=6000 MPa

10 cm de AC22S. E=6000 MPa

Explanada de módulo 360 MPa.

Capas perfectamente adheridas. Eje de 13 t con doble rueda y una presión de inflado de 0.8 MPa.

Se representa la variación de tensiones cortantes en

Valoración de la eficacia de los riegos de adherencia. Análisis de los datos de ensayo de corte según la NORMA NLT-382.08 en diversas emulsiones

el plano X-Y a lo largo del eje longitudinal que pasa por el centro de una rueda. El máximo cortante es de 0.14 MPa y se presenta cuando la tensión vertical o normal es casi nula, lo que hace dudar de considerar la tensión normal en los ensayos.

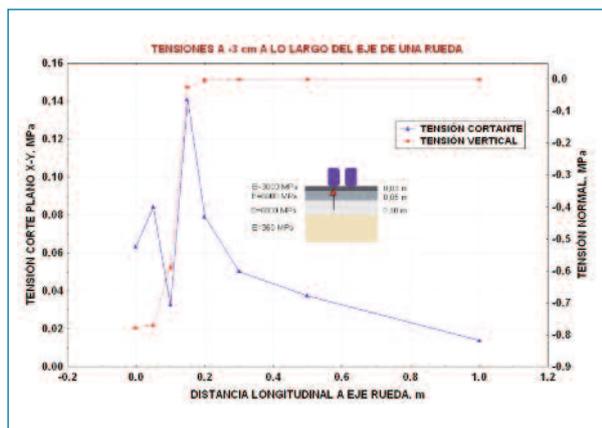


Figura 7

También se ha estudiado el caso de frenada con un coeficiente de rozamiento de 0.6. Aquí sí que hay una interacción entre las dos tensiones, la tensión de corte sube a 0.44 MPa y la vertical tiene una alta proporción de la presión de inflado.

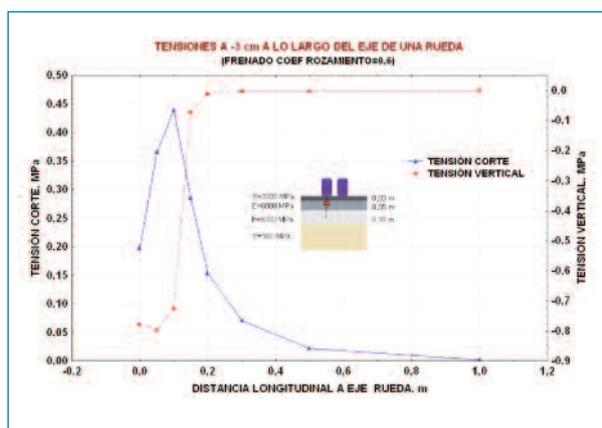


Figura 8

Habría que estudiar más secciones, y sobre todo en otras direcciones de la considerada, para conocer bien la distribución superficial de tensiones identificando las zonas más críticas. En este caso se desprende que solamente en las zonas de frenada habría que corregir el ensayo de corte puro con la componente normal. La aportación a la tensión máxima T sería de unos 0.7 MPa para el

ejemplo estudiado y en condiciones reales de servicio.

Como ejemplo de la distribución superficial de esfuerzos cortantes en la interfase de la rodadura, se adjunta el correspondiente al ejemplo de referencia donde se indica la situación de los esfuerzos al paso de un vehículo. En este gráfico tridimensional se puede apreciar dónde se producen los valores máximos de esfuerzo cortante.

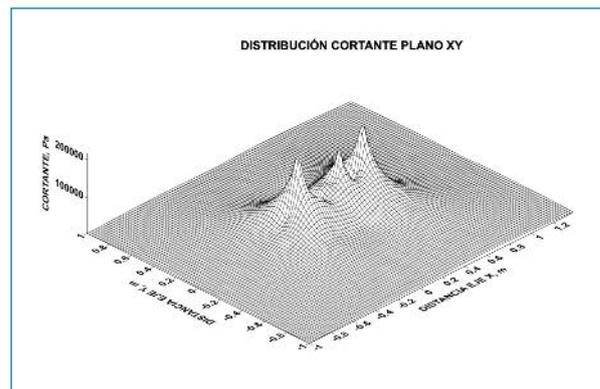


Figura 9

6. INFLUENCIA DE LA RIGIDEZ K EN LA ADHERENCIA DE LAS CAPAS Y FATIGA

Uno de los aspectos importantes de la obtención de la rigidez K en condiciones reales, es poder relacionarla con la adherencia entre las capas, y poder valorar la eficacia de cada una de ellas.

Para ello se utiliza el programa BISAR 3.0, el cual dispone de entradas para simular el distinto grado de adherencia entre capas.

Se considera que el deslizamiento relativo entre dos capas es linealmente proporcional al esfuerzo cortante, es decir, como un muelle de constante AK que represente la rigidez de la unión a cortante:

$$d = AK * T$$

Siendo:

d = desplazamiento relativo

T = tensión cortante

AK = constante del muelle

Como $K=T/d$, en términos del programa BISAR 3.0, se define $AK=1/K$. Y la medida de la adherencia entre

las capas, como:

$$\alpha = \frac{AK}{AK + \frac{1+\nu}{E} * a}$$

Siendo,

AK = Inversa de K, m³/N

a = Radio de la carga, m

E = Módulo de las capas sobre la interfase, Pa

ν = Coeficiente Poisson

α = Parámetro de fricción ($\alpha = 0$, capas pegadas; $\alpha = 1$ capas despegadas)

Con lo que, tomando el mismo firme como referencia, la relación de K con el parámetro de rozamiento y con la fatiga, es:

AK, m ³ /N	DEF, mstrains	EJES	PARAM FRICC	K, MPa/mm	PER REL FAT
1,000E-12	117	3241464	0,00	1000,00	1,00
1,000E-11	118	3064218	0,13	100,00	0,95
1,000E-10	126	2460043	0,56	10,00	0,76
1,000E-9	134	1945405	0,93	1,00	0,60
1,000E-8	136	1842436	1,00	0,10	0,57

Tabla 9

Por lo que, a efectos prácticos, los valores de K entre 1 y 100, es decir AK de 1E-9 a 1E-11, pueden representar capas despegadas y pegadas, respectivamente. Con este criterio, la fatiga puede bajar hasta el 60% con capas despegadas, y en el límite hasta el 57% si las capas están totalmente despegadas.

Y gráficamente para el firme de referencia:

Con los valores obtenidos en laboratorio y extrapolados a velocidades reales con distintos criterios, se obtienen valores de K comprendidos entre 5 MPa/mm y 11 MPa/mm. Esto significa valores de parámetros de fricción de 0.54 a 0.67, es decir, capas parcialmente pegadas, y una fatiga del 72% al 77% respecto de la obtenida con capas pegadas, si en la fórmula [5] se considera el módulo 6000 MPa. Si se considera el módulo 3000 MPa, los parámetros de fricción estarían entre 0.4 y 0.57, es decir mejora la adherencia con la disminu-

ción del módulo.

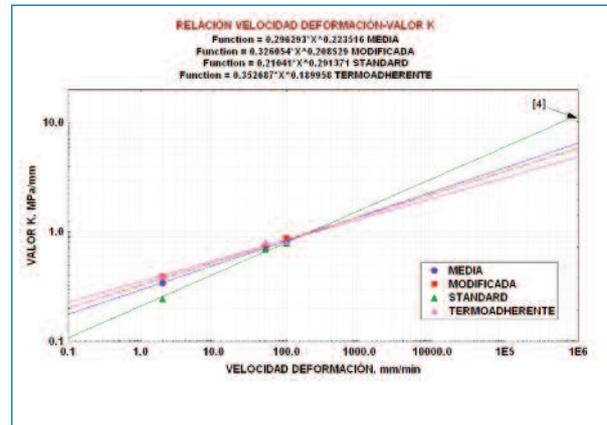


Figura 10

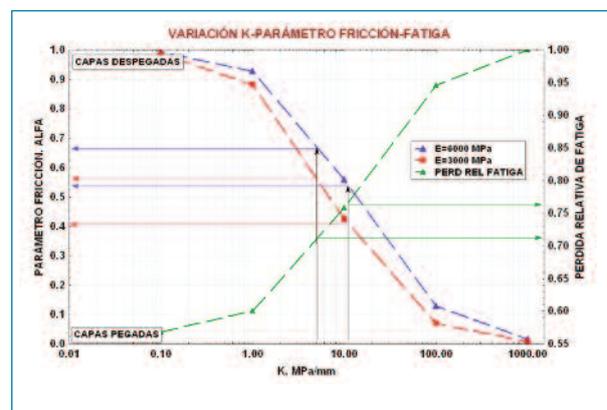


Figura 11

Por lo cual, a tenor de los valores de cortante obtenidos en el análisis multicapa del ejemplo, habría que recalculer el estado tenso-deformacional con esta hipótesis de adherencia de capas, si bien, en base a los

Valoración de la eficacia de los riegos de adherencia. Análisis de los datos de ensayo de corte según la NORMA NLT-382.08 en diversas emulsiones

valores de cortante obtenidos para el plano X-Y, se puede concluir que las capas trabajan en régimen elástico, pero parcialmente pegadas. Esto significa que, si los materiales mantienen sus características iniciales, la adherencia entre capas no debería sufrir una degradación en el tiempo, pero sí una afectación al estado tenso-deformacional del conjunto del firme.

7. ISÓCRONAS A VARIAS TEMPERATURAS

Este trabajo se ha completado con ensayos sobre el mismo tipo de probetas, a una temperatura de 5°C, 20°C y 40°C, y una velocidad de deformación de 50.8 mm/min.

TEMP °C	K, MPa/mm		
	MODIF	STAND	TERM
5	1,49	1,42	1,19
20	0,78	0,85	0,98
40	0,31	0,33	0,35

Tabla 10

Inicialmente se han obtenido los valores de K para T=20°C y 2 mm/min, 50.8 mm/min y 100 mm/min, ahora se dispone de K a T=5°C; T=20°C y T=40°C y 50.8 mm/min. Aplicando la misma relación media entre los valores de K de 5°C, 20°C y 40°C a 50.8 mm/min, al resto de velocidades, 2 mm/min y 100 mm/min, y aplicando el principio de superposición frecuencia-temperatura, en este caso velocidad de deformación-temperatura, se obtiene un factor de desplazamiento, log(aT), respecto de T=20°C, de -1.7 para 40°C, y 1.3 para 5°C (ver Figura 13).

La variación de log(aT) con la temperatura se puede considerar lineal en el rango de estudio, con lo que se podría extrapolar a otras temperaturas. Si, a pesar de todo, se utiliza la relación de Williams-Landel-Ferry a los desplazamientos obtenidos, -1.7 a T=40°C, y 1.3 a 5°C.

$$\log a_T = -\frac{C_1(T - T_0)}{C_2 + (T - T_0)}$$

Siendo T₀ la temperatura de referencia (T=20°C), se obtiene, una C₁=161 y C₂=1875, con lo que la relación log(aT)-T es lineal en un amplio rango de temperaturas.

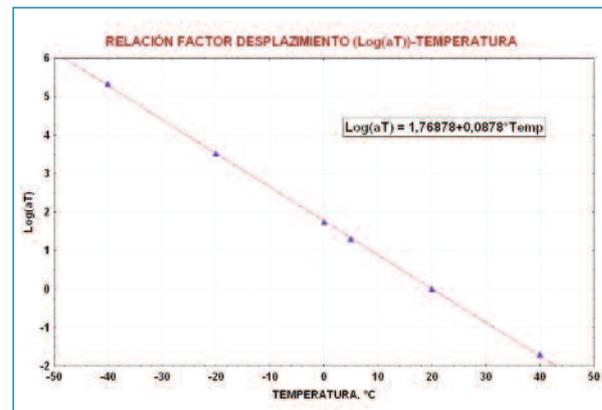


Figura 12

Una vez establecida esta relación, se puede conocer la temperatura y velocidad de deformación necesaria en laboratorio para cualquier condición de tránsito real.

Por ejemplo, a una velocidad real de 60 Km/h ≈ 1.000.000 mm/min y T=20°C; para reproducirlo en laboratorio a velocidad de 100 mm/min: log(aT)=log(1.000.000/100)=4.

La temperatura de laboratorio será: (4-1.7685)/-0.0878=-25.4°C. Según relación en Figura 12.

Es decir, si se quiere reproducir la K de respuesta de un firme a un paso de un vehículo a 60 km/hora y 20°C, en laboratorio con una velocidad de corte de 100 mm/min, la temperatura tendría que ser de -25.4°C.

Si la velocidad de laboratorio es de 50.8 mm/min: log(aT)=log(1.000.000/50.8)=4.29

La temperatura de laboratorio será: (4.29-1.7685)/-0.0878=-28.7°C

Finalmente, si la velocidad de deformación es de 2 mm/min: log(aT)=log(1.000.000/2)=5.70

La temperatura de laboratorio será: (5.70-1.7685)/-0.0878=-44.8°C

Igualmente, para simular una velocidad de 100.000 mm/min y T=20°C, con velocidad de laboratorio de 100 mm/min, la temperatura de laboratorio sería de T=-14°C.

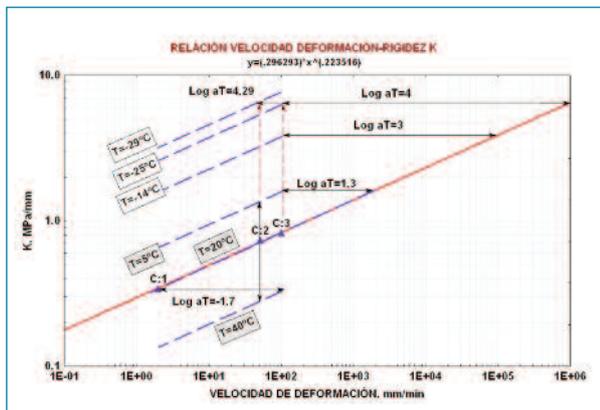


Figura 13

La Figura 13 muestra la transformación gráfica que igualmente se puede hacer para obtener el valor de K correspondiente a 20°C y 1.000.000 mm/min, y que obtiene los mismos resultados que de forma analítica. Sería necesario hacer el ensayo de corte a -25°C, y una velocidad de deformación de 100 mm/min, o bien a -29°C y 50.8 mm/min. Para que estos valores de K sean confirmados habría que comprobar, en el entorno de estudio, la linealidad de la extrapolación (K-VEL), y por lo tanto del factor de desplazamiento, $\log(aT)$ -Temperatura, para lo que habría que hacer el ensayo de corte a las tres velocidades y a temperaturas lo más bajas posible. Queda pendiente para un trabajo futuro

Es normal que los valores de K estén entre un mínimo y un máximo, con lo que las curvas isocronas serían en S ó sigmoideas, y este paralelismo se mantendría solo en un determinado rango de velocidades, con lo que, en el caso de no mantenerse la linealidad o el paralelismo a estas temperaturas, los valores de K serían inferiores en las velocidades altas.

8. CONCLUSIÓN

Se ha estudiado el comportamiento de tres tipos de emulsiones: MODIFICADA; STANDARD, Y TERMOADHERENTE, respecto del ensayo de corte de la norma NLT-382/08. Las conclusiones son las siguientes:

La emulsión STANDARD tiene valores de tensión máxima, T, y pendiente del tramo elástico K, inferiores a las otras dos, aunque tiende a igualarse para valores crecientes de la velocidad de deformación. Este factor hace que la extrapolación a valores altos la favorezca.

Los valores de K, en la MODIFICADA, son ligeramente más altos y con un crecimiento más regular respecto de la velocidad de deformación.

Se ha estudiado la relación que hay entre los valores de K obtenida en los ensayos de laboratorio, y la utilizada en la adherencia mecánica entre capas en el cálculo estructural de los sistemas multicapa.

Se han estimado los valores de K para las velocidades reales en carreteras, con resultados distintos para cada una de las emulsiones, y se han comparado con la obtenida por Piber, Canestrari y Ferrotti. En conjunto, para velocidades de 60 km/h ($\approx 1.000.000$ mm/min) se han obtenido valores entre 5 MPa/mm y 11 MPa/mm.

En base a este rango de valores, y según el criterio expresado en el programa multicapa elástico BISAR 3.0, se deduce que el parámetro de fricción está comprendido entre 0.54 y 0.67, lo que supone que las capas están parcialmente adheridas.

Se ha calculado el estado tenso-deformacional de un firme concreto, y se ha visto el impacto que tienen diversos valores del parámetro de fricción en la vida del firme, resultando que, en este caso, la fatiga se atenúa al 72% a 77% respecto de la obtenida con capas perfectamente adheridas.

Se han estudiado los valores de esfuerzo cortante y tensión normal en el plano X-Y a lo largo del eje longitudinal que pasa por el centro de una de las doble ruedas y en la base de la capa de superficie del firme de referencia. Se deduce que, en el paso de un vehículo, el valor del cortante alto coincide con valores bajos de la tensión normal, con lo que no sería necesaria la incorporación de la tensión normal en el ensayo de corte.

Solamente en caso de frenado, ambas tensiones, la cortante y la normal, coinciden en el espacio, con lo que aumenta considerablemente el cortante en el plano XY, y sería necesario introducir la tensión normal con el consiguiente aumento de los valores de K.

Como resumen, y por los resultados obtenidos, se puede deducir que la interfase de la capa superior trabaja en el campo elástico, pero con capas parcialmente adheridas, por lo que salvo los cambios que puedan sufrir los materiales en el tiempo, el problema de la adherencia se centra básicamente en la disminución de la resistencia a la fatiga.

Valoración de la eficacia de los riegos de adherencia. Análisis de los datos de ensayo de corte según la NORMA NLT-382.08 en diversas emulsiones

Aplicando el principio de superposición frecuencia-temperatura, se deduce que para reproducir las condiciones similares a las de servicio, habría que hacer el ensayo de corte a una temperatura aproximada de -25°C , y velocidad de carga de 100 mm/min, o a -29°C y 50.8 mm/min.

9. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Tashman, L., Masad, E., D'Angelo, J., Bukowski, J., [1] Time-temperature superposition principle for interlayer shear strength of bituminous pavements Andrea Graziani Francesco Canestrani and alt. 2017. Road Materials and Pavements Design.
- [2] Fatigue performance of interface bonding between asphalt pavements layers using four-point shear test set.up. Ali Rahman and alt. 2019. International Journal of Fatigue.
- [3] Interlayer Bond Evaluation in flexible Pavements Structures Using a Nondestructive Testing Method. E.V.Uglova, A.N.Tytaturian.2016. Elsevier editions.
- [4] Tack Coat Optimization for HMA Overlays. Accelerated Pavement Test Report. Al-Cadi and alt. 2009. Illinis Center Of Transportation
- [5] State-of-the-Art review of interface bond testing devices for pavements layers: toward la standardization procedure. Ali Rahman end alt. 2016. Journal of Adhesion Science and Technology.
- [6] Evaluation of Bond Between Bituminous Pavement Layers. Thesis Master of Technology of Civil Engineering. Bidyut Bicach Sutradhar. 2012.
- [7] The Influence of Bonding between Layers on Pavement Performance, a case study of Malaysian Road.Zulkifili and Sutanto.2018.
- [8] Effect on Interlayer Bonding quality of Asphalt Layers in Pavement Performance.Jaskula and Dawid. IOP Publishing. 2017