

MODELIZACIÓN NUMÉRICA EN 3D DE MATERIALES RECICLADOS EN FRÍO IN SITU CON EMULSIÓN BITUMINOSA EN CARRETERAS DE BAJO TRÁFICO DE LA REPÚBLICA SUDAFRICANA

Ignacio Pérez (iperez@udc.es);
Universidade da Coruña

Luis Medina (lmedina@udc.es)
Universidade da Coruña

Miguel Ángel del Val (miguel.delval@upm.es)
Universidad Politécnica de Madrid

Ana R. Pasandín (arodriguezpa@udc.es)
Universidade da Coruña

RESUMEN

En esta comunicación se hace una modelización numérica de secciones de firme recicladas “in situ” con emulsión asfáltica. Se analizan firmes constituidos por un 25 % de material bituminoso fresado (Reclaimed Asphalt Pavement, RAP) y un 75 % de áridos naturales (capa granular), tanto con un 1 % de cemento como sin él. Se modeliza el comportamiento resiliente y permanente de estos materiales. Se calcula las respuestas del firme bajo una carga de ruedas gemelas, con cuatro tipos de explanadas de diversas características. Se obtiene la ley de variación del módulo resiliente para las cuatro explanadas y para los dos materiales reciclados (con cemento y sin cemento). Se analiza finalmente la deformación permanente de estos materiales reciclados.

1. INTRODUCCIÓN

Con el fin de rehabilitar los firmes de carreteras una de las actuaciones más efectivas es la realización de reciclados in situ con emulsión asfáltica. Durante los últimos años la investigación sobre estos materiales ha estado dirigida preferentemente hacia la caracterización, formulación y puesta en obra. En estos campos se han hecho significativos progresos. Sin embargo, se ha avanzado relativamente poco en el conocimiento del comportamiento mecánico de estos materiales con el fin de mejorar el diseño estructural de las soluciones de rehabilitación. La mayoría de los métodos analíticos de diseño estructural no tienen en cuenta las verdaderas características mecánicas de estos materiales reciclados in situ con emulsión asfáltica.

El objetivo de este artículo es realizar un análisis estructural mediante un software en diferencias finitas en 3D de una capa reciclada en frío con emulsión bituminosa. En

este sentido se tendrá en cuenta el comportamiento elástico no lineal tanto de la capa de base reciclada como de la explanada. Por último, se analizarán los mecanismos de fallo en este tipo de materiales reciclados de cara a su empleo en caminos de bajo tráfico.

2. MODELO DE ANÁLISIS DEL FIRME

2.1 Configuración del modelo 3D en diferencias finitas

Se ha adoptado una configuración de carga de eje simple de 90 kN con ruedas gemelas (DT). En cada rueda se aplica una carga circular uniforme de 0,7 MPa con un radio de 101,15 mm y una distancia entre centros de los círculos igual a 343 mm.

Se ha tomado como referencia un firme típico de las carreteras sudafricanas de bajo tráfico. Consta de una capa de mezcla bituminosa en caliente de 40 mm de espesor sobre un material reciclado en frío con emulsión de 200 mm de espesor que se apoya directamente sobre la explanada. Para poder contrastar y comparar los resultados se modeliza también una segunda sección en la que el espesor de la capa de mezcla en caliente pasa a ser de 80 mm.

El análisis del estado tensional generado en el firme, ocasionado por la aplicación en su superficie de la carga indicada, se ha llevado a cabo con la versión 3.10 del programa FLAC3D (**F**ast **L**agrangian **A**nalysis of **C**ontinua in **3** **D**imensions). Este es un programa tridimensional que emplea un esquema explícito de diferencias finitas y que permite simular el comportamiento elastoplástico de los materiales. En este programa los materiales son representados por elementos poliédricos que forman una malla tridimensional que se ajusta a la forma del objeto modelado; cada elemento se comporta de acuerdo a una ley tensión-deformación preestablecida (lineal o no lineal) que representa la respuesta a las cargas aplicadas con las condiciones de contorno que se establezcan. Los materiales pueden también deformarse plásticamente.

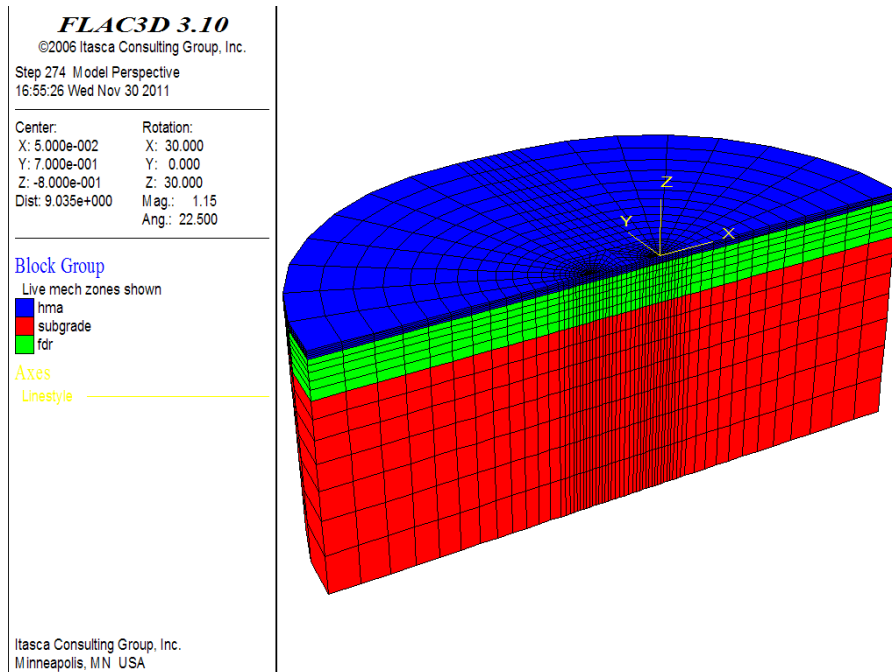


Figura 1. Malla tridimensional con espesor de mezcla en caliente de 40 mm y ruedas gemelas. En la Figura 1 se muestra la malla de diferencias finitas y el sistema de ejes cartesianos que se han empleado en este trabajo para el caso de carga con ruedas gemelas. La malla está formada por 2500 elementos y 2900 nodos. Debido a las condiciones de simetría del problema (en geometría y cargas), únicamente se estudia un cuarto del problema real (con la precaución de imponer las adecuadas condiciones de contorno en los planos de simetría).

El contacto entre las capas es de adherencia total (igualdad de deformaciones horizontales). El proceso que se ha reproducido con este modelo numérico consta de dos fases. En la primera se obtiene el estado de tensiones existente antes de aplicar las cargas del tráfico; una vez alcanzado el estado de equilibrio mecánico para las densidades y condiciones de contorno consideradas se ponen a cero todos los movimientos del modelo. En la segunda fase se aplica la carga.

2.2 Caracterización de los materiales

Mezcla bituminosa en caliente

La capa de mezcla bituminosa en caliente se caracteriza por los siguientes parámetros: densidad aparente $\gamma_{\text{sat}} = 24 \text{ kN/m}^3$ y coeficiente de empuje al reposo $K_0 = 0,6$. Se asume además un comportamiento elástico lineal con un módulo de elasticidad $E = 5000 \text{ MPa}$ y un coeficiente de Poisson $\nu = 0,44$.

Material reciclado en frío con emulsión bituminosa

En este trabajo se supone que el reciclado en frío se lleva a cabo en un firme que originalmente tiene un espesor pequeño de material bituminoso y un gran espesor de base granular, de forma que en el material reciclado entra a formar parte solamente un 25 % de RAP. Además, se tienen en cuenta dos situaciones en lo que a

constitución del material reciclado se refiere: a) 25 % de RAP + 75 % de áridos naturales (R0); b) 25 % de RAP + 75 % de áridos naturales + 1 % de cemento (R1). Ambas capas de material reciclado en frío quedan caracterizadas por los siguientes parámetros: $\gamma_{sat} = 22 \text{ kN/m}^3$, $K_0 = 0,6$ y $\nu = 0,35$. Se asume un comportamiento elástico no lineal; en este sentido, se emplea el modelo K- Θ con el fin de obtener el módulo resiliente (M_r) de cada uno de estos materiales:

$$M_r = k_1 \theta^{k_2} \quad [1]$$

siendo $\theta = \sigma_1 + 2\sigma_3$, donde σ_1 es el esfuerzo principal mayor y σ_3 el esfuerzo principal menor; finalmente k_1 y k_2 son coeficientes obtenidos mediante ensayos triaxiales dinámicos.

En la Tabla 1 puede observarse que para el material R0 el valor del parámetro k_1 es igual a 130 MPa, mientras que en el material R1 (más rígido) dicho parámetro es igual a 150 MPa; el parámetro k_2 es muy parecido en los dos materiales. También en la Tabla 1 se proporcionan la cohesión (c) y el ángulo de rozamiento interno (ϕ); estos dos parámetros determinan la resistencia al esfuerzo cortante y, por ende, la resistencia a la deformación permanente (DP). Puede observarse que, con respecto al material R0, al añadir un 1% de cemento al material R1 se produce un incremento de c y una disminución de ϕ .

Tabla 1. Valores de los parámetros característicos del material reciclado

Reciclado	Modelo M_r - Θ (25°C, 2 Hz)		Mohr-Coulomb (25°C)	
	k_1	k_2	c (MPa)	ϕ (°)
R0	130	0,30	0,152	38,4
R1	150	0,33	0,387	29,7

Explanada

Se considera un suelo de partículas finas con $\gamma_{sat} = 20 \text{ kN/m}^3$, $K_0 = 0,6$ y $\nu = 0,45$. En este caso se utiliza un modelo elástico de comportamiento bilineal en el que M_r disminuye con el incremento de σ_d :

$$\begin{aligned} M_r &= k_1 + k_3(k_2 - \sigma_d) & \sigma_d \leq k_2 \\ M_r &= k_1 - k_4(\sigma_d - k_2) & \sigma_d \geq k_2 \end{aligned} \quad [2]$$

siendo k_1 , k_2 , k_3 , k_4 coeficientes obtenidos a partir de ensayos triaxiales dinámicos. El valor de M_r en el punto donde k_2 es igual a σ_d (punto de quiebra de la curva bilineal) es un buen indicador del comportamiento resiliente del material de la explanada.

En la Tabla 2 figuran los valores de los coeficientes para cuatro tipos de suelos de diferente resistencia: S (Strong), M (Medium), W (Weak) y VW (Very Weak). Puede observarse que la explanada más rígida (S) tiene un M_r característico de 85,1 MPa, mientras que la explanada más débil (VW) tiene un M_r de solamente 6,9 MPa.

Tabla 2. Valores de los parámetros característicos de la explanada

Suelo de la explanada	k_1 (kPa)	k_2 (kPa)	k_3	k_4
S (Strong)	85100			
M (Medium)	53000	42,8	1110	178
W (Weak)	20800			
VW (Very Weak)	6900			

2.3 Modelos de comportamiento

Para estudiar la acumulación de deformación permanente se utilizará el modelo exponencial doble que predice las tres fases de la DP unitaria acumulada (ε_p) frente al número de ciclos de carga (N):

$$\varepsilon_p = A \left(\frac{N}{1000} \right)^B + C \left(e^{\frac{D \cdot N}{1000}} - 1 \right) \quad [3]$$

$$A = a_1 (SR)^{a_2}; B = b_1 (SR)^{b_2}; C = c_1 (SR)^{c_2}; D = d_1 (SR)^{d_2}$$

donde a_1 , a_2 , b_1 , b_2 , c_1 , c_2 , d_1 y d_2 son coeficientes.

En la Tabla 3 se pueden observar los valores de estos ocho parámetros para los materiales R0 y R1.

Tabla 3. Coeficientes del modelo de deformación permanente (25 °C, 2 Hz)

Reciclado	a_1	a_2	b_1	b_2	c_1	c_2	d_1	d_2
R0	0.92	1.45	0.66	1.47	1.9×10^{-7}	-12.14	7.9×10^0	8.72
R1	2.53	2.39	2.31	2.47	4.9×10^2	18.09	3.3×10^1	7.81

En la ecuación [3] SR es el denominado Stress Ratio, que se expresa como el cociente entre σ_d y la tensión desviadora de fallo ($\sigma_{d,f}$) en una línea de Mohr-Coulomb:

$$SR = \frac{\sigma_d}{\sigma_{d,f}} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_3 \left[\tan^2 \left(45^\circ + \frac{\phi}{2} \right) - 1 \right] + 2c \tan \left(45^\circ + \frac{\phi}{2} \right)} \quad [4]$$

siendo σ_1 y σ_3 los esfuerzos principales mayor y menor, respectivamente, en ensayos triaxiales estáticos. Por su parte SR es un parámetro crítico que define el comportamiento a la DP de los materiales reciclados en frío con emulsión: a medida que crece el valor de SR, aumenta el valor de ε_p . En este sentido es muy importante localizar la posición crítica del SR en la capa de material. Para ello se deben calcular mediante la ecuación [4] los SR en diferentes puntos de la capa de material reciclado. Se toma como posición crítica el punto donde se obtiene un SR máximo. Dicho valor se utiliza en la ecuación [3] para estimar la deformación unitaria permanente acumulada.

Finalmente, para comprobar la resistencia a la fatiga de las capas de reciclado en frío se utilizará la expresión:

$$N_f = a \mu \varepsilon_r^{-n} \quad [5]$$

siendo N_f es el número de ciclos de carga aplicados hasta alcanzar el fallo por fatiga; $\mu \varepsilon_r$ es la deformación unitaria a tracción en micrómetros producida en la fibra inferior de la capa reciclada; a y n son coeficientes experimentales obtenidos mediante ensayos de fatiga. En la Tabla 4 se pueden observar los coeficientes experimentales de la ley de fatiga correspondientes a los materiales R0 y R1.

Tabla 4. Coeficientes de la ley de fatiga del material reciclado (5 °C, 2 Hz)

Reciclado en frío con emulsión	a	n
R0	$5,01 \times 10^{13}$	3,48
R1	$1,99 \times 10^{20}$	6,10

5. SITUACIONES ANALIZADAS

En este trabajo se analiza dos situaciones, correspondientes cada una de ellas a las secciones de firme descritas en el apartado 2. En la primera situación la capa de mezcla bituminosa tiene un espesor de 40 mm (P1); en la segunda el espesor es de 80 mm (P2). En ambos casos el espesor de material reciclado es de 200 mm. Además, en ambas situaciones se consideran la configuración de carga descrita en el apartado 2 (eje simple rueda gemela DT), los materiales reciclados R0 y R1 y los cinco tipos de explanada. Esto se hace así con el fin de investigar la respuesta no lineal de estos materiales, haciendo hincapié en el mecanismo de falla por baja resistencia a la DP.

4. VARIACIÓN DEL MÓDULO RESILIENTE

4.1 Módulo resiliente de la explanada

En la Figura 2 está representada la variación del M_r de los suelos de las explanadas S (Strong) y VW (Very Weak) en las secciones P1-RO, P1-R1, P2-RO y P2-R1. En primer lugar puede observarse que en ambos tipos de explanada el valor de M_r aumenta con la profundidad a medida que disminuye el esfuerzo. En segundo lugar, se puede observar que los módulos resilientes de la explanada muy débil (VW) van de 5 MPa (en la fibra superior de la explanada) a 30 MPa (en la fibra inferior de la explanada), mientras que los de la explanada resistente (Strong) varían entre 80 MPa (en la fibra superior de la explanada) y 110 MPa (en la fibra inferior de la explanada).

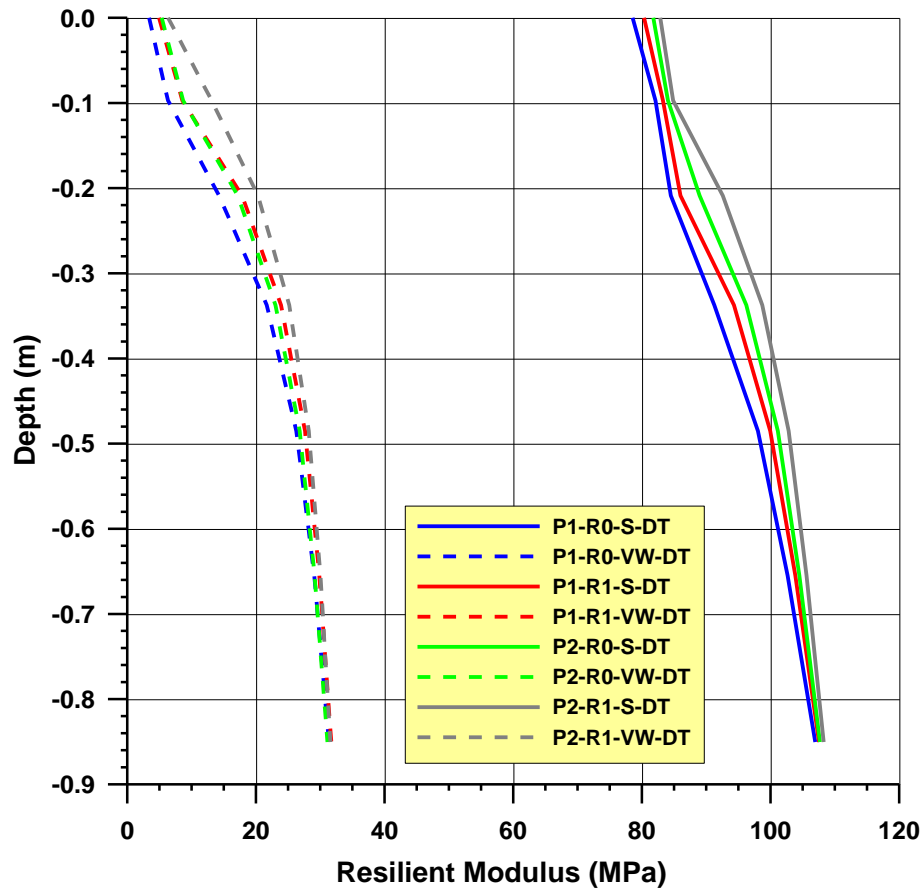


Figura. 2. Módulo resiliente en la explanada (explanada S and VW, DT).

4.2 Módulo resiliente de la capa de material reciclado

En la Figura 3 está representada la variación del M_r de la capa de material reciclado para los dos tipos de suelos S (Strong) y VW (Very Weak), en las secciones P1-RO, P1-R1, P2-RO y P2-R1. Contrariamente al caso anterior puede observarse que a medida que aumenta la profundidad de la capa de material reciclado en frío disminuye el M_r . La sección de firme P1-R1-S es la que tiene unos valores más elevados del M_r , que van, aproximadamente, de 700 MPa (en la fibra inferior de la capa) a 1300 MPa (en la fibra superior de la capa). La sección con valores menores es la P2-R0-VW. Estos valores varían, aproximadamente, entre 450 MPa (fibra inferior) y 700 MPa (fibra superior). Como es lógico, los valores del M_r son mayores en las secciones con capa de material reciclado en frío del tipo R1 (con el 1% de cemento) y explanada S (Strong). Finalmente, a igualdad de las otras condiciones, el M_r de la capa de material reciclado es mayor cuando el espesor de mezcla bituminosa es igual a 40 mm (P1).

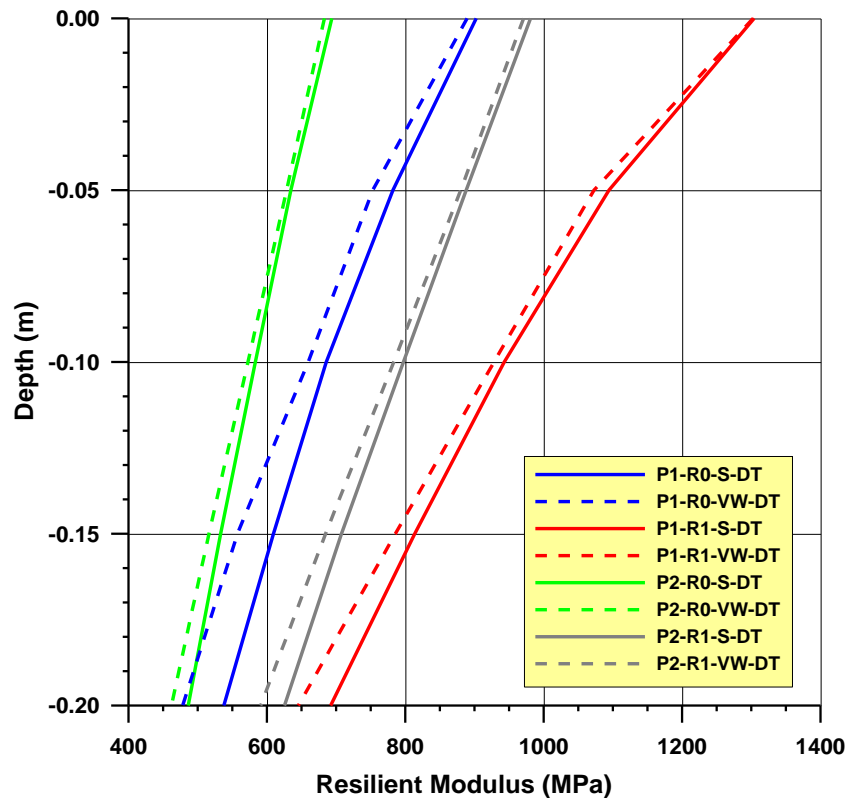


Figura. 3. Módulo resiliente en el material reciclado (explanada S and VW, DT).

5. DEFORMACIÓN PERMANENTE EN LA CAPA DE RECICLADO EN FRÍO CON EMULSIÓN

5.1 Stress Ratios

En la Figura 4 se puede observar la distribución de SR en la capa de material reciclado en frío para el caso de los pavimentos P1 y P2, la explanada resistente (S) y ruedas gemelas (DT). En el caso del pavimento P1 se deduce, por un lado, que en el material R0 (Figura 4a) se presentan el SR máximo ($8,075 \times 10^{-1}$) en la fibra inferior de la capa reciclada y ligeramente hacia la izquierda de la rueda y, por otro lado, los SR mínimos ($5,778 \times 10^{-4}$) se producen en una zona situada entre las ruedas gemelas y a una distancia (según la dirección radial) suficientemente alejada del centro. Por el contrario, en el material R1 (Figura 4b) el SR máximo ($3,164 \times 10^{-1}$) se produce en la fibra superior de la capa justamente debajo de una de las ruedas, mientras que el SR mínimo ($2,318 \times 10^{-4}$) se produce a una distancia (en la dirección radial) lo suficientemente alejada del centro de esa rueda.

En el caso de pavimento P2 y con el material R0 (Figura 4c) los SR máximos ($4,466 \times 10^{-4}$) se originan tanto en la fibra inferior como en la superior de la capa, mientras que en el material R1 (Figura 4d) se producen solamente en la fibra inferior. En ambos materiales los SR mínimos ($1,543 \times 10^{-3}$ y $8,804 \times 10^{-4}$, respectivamente) se producen a una distancia radial del centro de las ruedas. En ningún caso los puntos críticos están situados en la distancia media entre las ruedas. Además, en ambos pavimentos

los SR en el material R1 son menores que en el R0. Por encima de un valor de SR de 0,40 o 0,50 se producen altas deformaciones permanentes en el material reciclado.

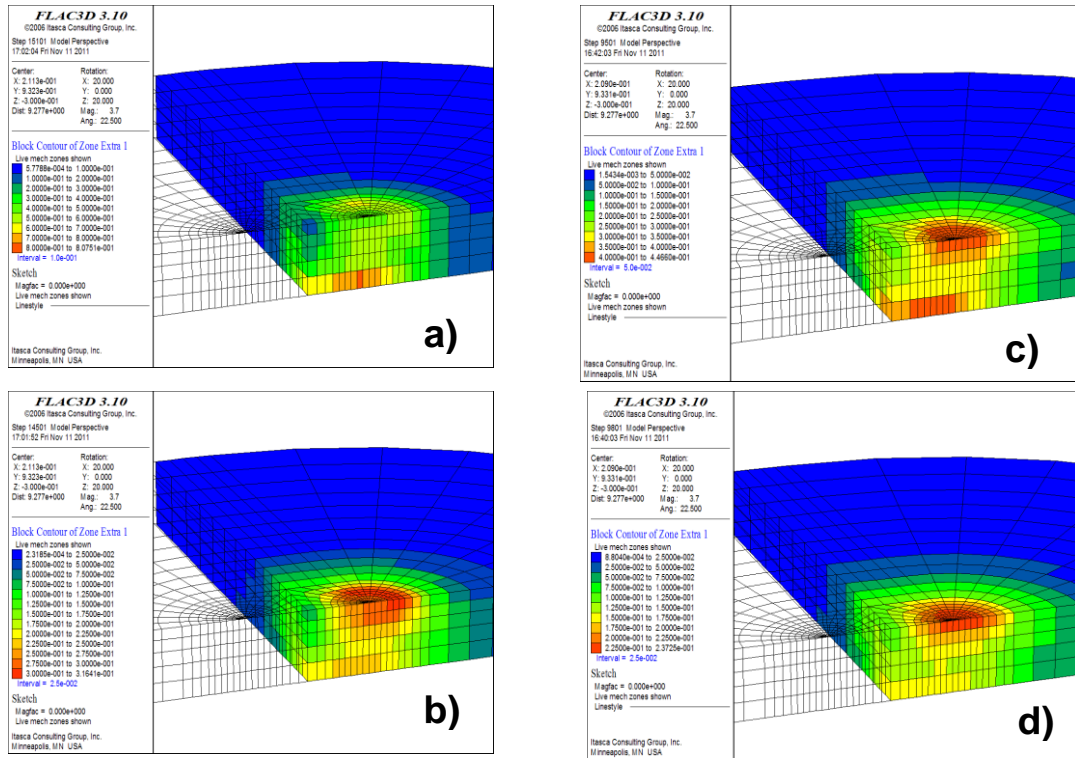


Figura 4. SR en el material reciclado: a) P1-R0-S-DT; b) P1-R1-S-DT; c) P2-R0-S-DT; d) P2-R1-S-DT.

5.2. Deformación permanente

Para estimar la deformación permanente acumulada en la capa de material reciclado en frío con emulsión en función del SR obtenido en el apartado 5.1 se utilizó la ecuación [3]. En la Figura 5 están representadas las curvas de la DP acumulada para los cuatro casos diferentes mencionados anteriormente. Las curvas P1-RO y P1-R1 representan la DP para el pavimento P1 y los materiales R0 y R1, respectivamente, mientras que las curvas P2-R0 y P2-R1 representan las correspondientes al pavimento P2 y los materiales R0 y R1, respectivamente. Se aprecia que la menor DP se produce en la curva P2-R1 correspondiente al espesor de mezcla en caliente de 80 mm y material reciclado con 1 % de cemento. En cambio, la mayor DP se presenta para la curva P1-R0 del pavimento con espesor de mezcla de 40 mm, y material reciclado sin cemento.

En las curvas se distingue una zona en la que la relación entre el logaritmo de $\epsilon_p(\%)$ y el logaritmo de N es lineal. En todas ellas existe un punto a partir del cual la

deformación permanente crece exponencialmente, lo que indica que el material entraría en la zona de flujo terciario. En la curva P2-R1 dicho punto se alcanza con 1×10^7 ciclos y 0,15% de DP; en la curva P1-R1 se alcanza por su parte con 1×10^6 ciclos y 0,3% de DP; en la curva P2-R0 se llega con 1×10^5 ciclos y un 5 % de DP; finalmente, en la curva P1-R0 el punto corresponde a 1×10^4 ciclos y 2,5% de DP.

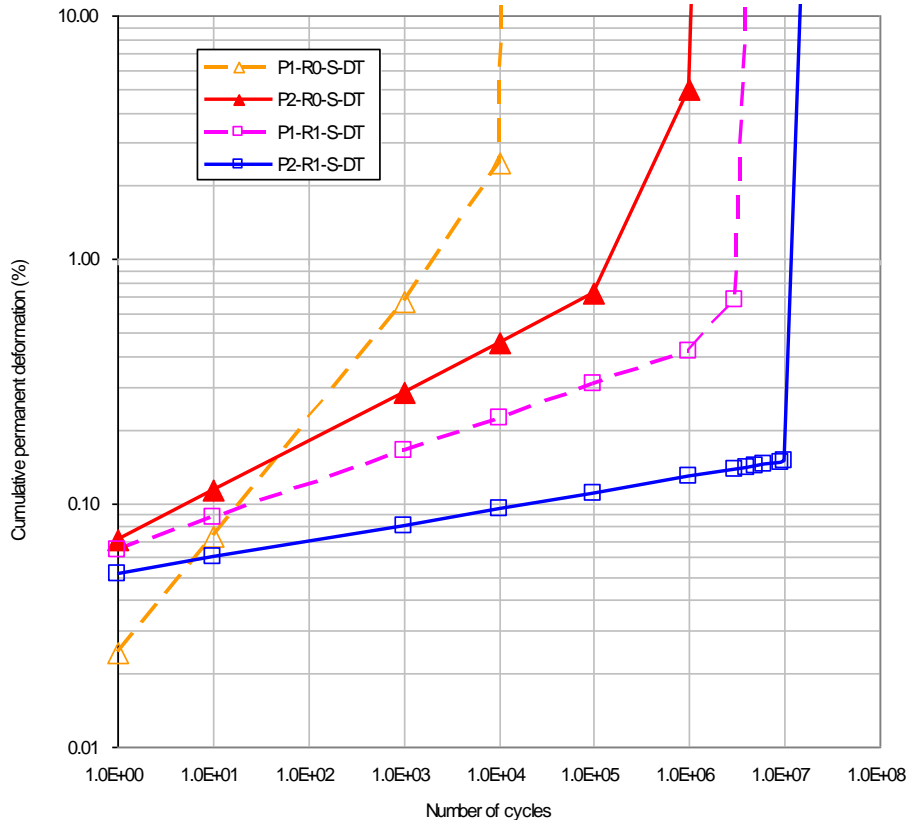


Figura 5. DP acumulada en la capa de reciclado (explanada resistente)

En Sudáfrica suele adoptarse como criterio de fallo, en caminos de bajo tráfico, una profundidad de rodera de 20 mm en la superficie del pavimento. También se suele considerar que el 80 % de la DP producida en la totalidad del firme se origina solamente en la capa de base reciclada y el restante 20 % en la capa de mezcla y en la explanada. Así, se tendría como límite una DP máxima de 16 mm en la capa de base reciclada de 200 mm de espesor, lo que supone en ella una ϵ_p del 8%. Este criterio se aplica en Sudáfrica para carreteras con un número equivalente de ejes estándar (ESAL) de hasta 1×10^6 ejes.

En la Tabla 5 están reflejados, para una ϵ_p del 8 % (rodera de 16 mm de profundidad), los números de ciclos de carga que soporta la capa reciclada. Así, la sección P2-R1 es la que soporta más ciclos antes de alcanzar el fallo, mientras que la sección P1-R0 es la que soporta menos ciclos: las secciones con material R1 tienen una mayor resistencia a la deformación permanente que las secciones con material R0; por otro lado, el incremento del espesor de la capa de mezcla bituminosa de 40 a 80 mm

produce, obviamente, una mejora de las condiciones de la capa reciclada frente a la deformación permanente.

Tabla 5. Número de ciclos hasta el fallo por deformación permanente (N_{DP}) y fatiga (N_f).

Sección	Reciclado		Mezcla en caliente
	N_{DP}	N_f	N_f
P1-R0	$1,0 \times 10^4$	$5,4 \times 10^6$	$1,6 \times 10^6$
P1-R1	$5,0 \times 10^6$	$3,0 \times 10^7$	$7,7 \times 10^6$
P2-R0	$1,0 \times 10^6$	$4,0 \times 10^7$	$3,1 \times 10^6$
P2-R1	$1,5 \times 10^7$	$1,8 \times 10^8$	$7,4 \times 10^6$

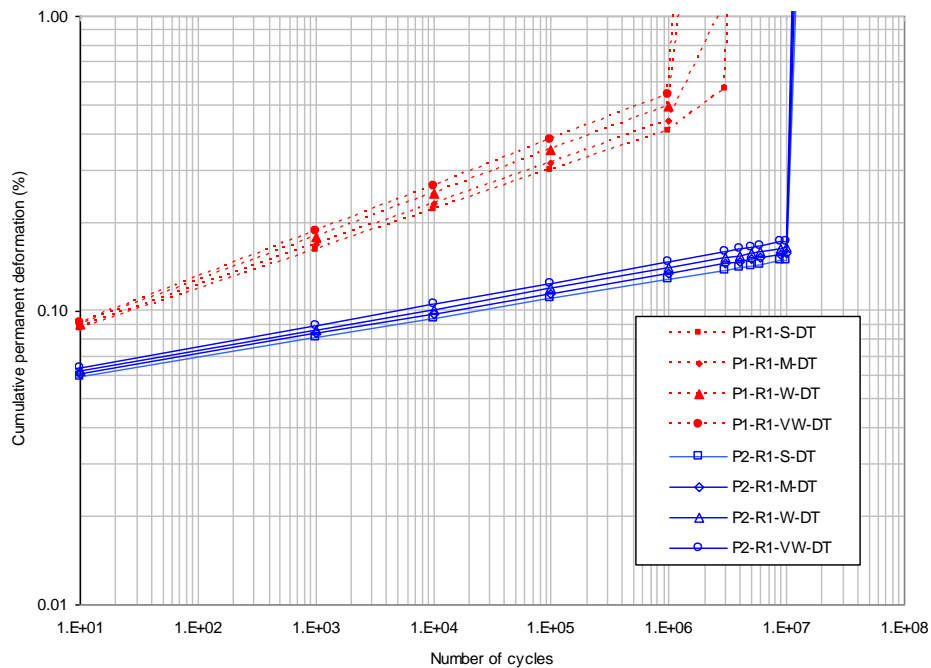


Figura 6. DP acumulada en la capa de reciclado en frío (material R1)

Por otro lado, en la Figura 6 están representadas las curvas de la DP en el caso de material R1 y ruedas gemelas. En ellas se individualizan los dos tipos de pavimentos P1 y P2 con los cuatro tipos de explanadas. Puede observarse que con el material R1 el hecho de tener diferentes tipos de explanada no afecta significativamente en la vida de servicio de la sección de firme; es decir, existen pocas diferencias entre las deformaciones permanentes producidas en las cuatro curvas correspondientes a los diferentes tipos de explanadas.

6. RESISTENCIA A LA FATIGA DEL MATERIAL RECICLADO

Para estimar la vida a fatiga de los dos tipos materiales reciclados se obtuvieron los cuatro valores de la deformación unitaria radial para los casos de rueda gemela y explanada más resistente y dichos valores se introdujeron en la ecuación [5]. En la Tabla 5 figuran los números de ciclos de carga hasta el fallo por fatiga de las cuatro

secciones analizadas. Como se ve la sección P1-R0 es la que tiene el peor comportamiento a la fatiga y, en cambio, la sección P2-R1 tiene el mejor comportamiento. Por otro lado, las secciones con material R1 se comportan mejor que las secciones con material R0. En tercer lugar, el incremento del espesor de la capa de mezcla bituminosa de 40 a 80 mm produce una mejora de la vida a fatiga de la capa reciclada. En todos los casos las secciones fallan antes por deformación permanente que por fatiga. Por tanto, se puede afirmar que, como parámetro de diseño, en este tipo de materiales reciclados en frío con emulsión la resistencia a la deformación permanente resulta más crítica que la resistencia a la fatiga.

7. RESISTENCIA A LA FATIGA DE LA MEZCLA BITUMINOSA EN CALIENTE

En la Figura 7 se puede observar la variación de la deformación radial en la fibra inferior de la capa de rodadura de mezcla bituminosa en función de su espesor (para los cuatro tipos de explanada). Existe un máximo de la deformación radial para un espesor de 50 mm con el material R0 y para 60 mm con el material R1. En las secciones con capa de base de material reciclado R1 las deformaciones radiales en la mezcla bituminosa son menores que en la sección con la capa de material reciclado R0.

Para comprobar si fallaría antes la mezcla en caliente por fatiga que el material reciclado por deformación permanente se empleará la ley de fatiga $N=1,1867 \times 10^{-8} \varepsilon^{-3,67}$. Las deformaciones radiales se toman de la Figura 7 para los espesores de 40 mm y 80 mm. En la Tabla 5 están reflejados los resultados de los ciclos de carga hasta el fallo por fatiga de la capa de mezcla en caliente. Puede comprobarse que en los cuatro casos las capas de mezclas en caliente se fatigarían antes que la capas de reciclado en frío. Finalmente, exceptuando en la sección P2-R1 (la sección con un mayor espesor de mezcla bituminosa y con la capa de reciclado R1 más rígida) el fallo se produciría antes por deformación permanente de las capas de reciclado en frío que por fatiga de las capas de mezclas bituminosas en caliente.

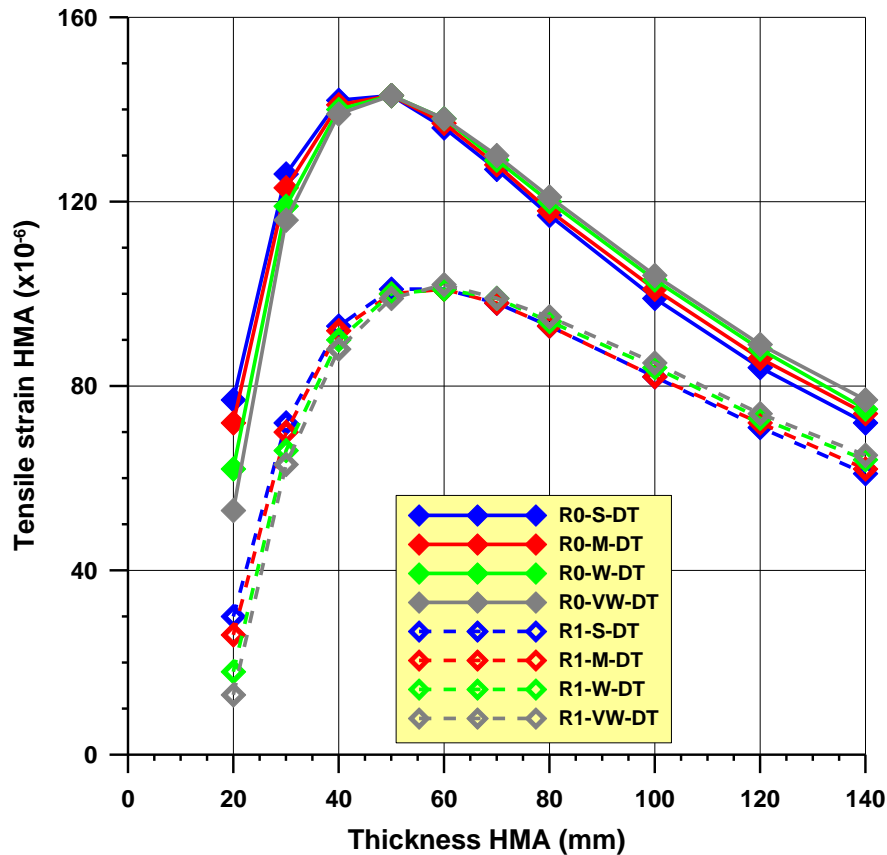


Figura 7. Deformación radial de la mezcla bituminosa en función de su espesor en secciones con reciclados R0 y R1.

8. CONCLUSIONES

- El módulo resiliente de la explanada aumenta con la profundidad, mientras que el módulo resiliente de la capa de base reciclada en frío disminuye.
- El módulo resiliente de la explanada es más elevado en un pavimento de mezcla bituminosa en caliente de 80 mm de espesor, mientras que el módulo resiliente de una capa de base reciclada en frío con emulsión es más elevado con un pavimento de 40 mm de espesor.
- En una capa de base reciclada en frío con emulsión de 200 mm de espesor y un 1 % de cemento la rigidez de la explanada no afecta significativamente a la resistencia a la deformación permanente de dicha capa.
- Con una explanada resistente (S), la capa de base reciclada de la sección P1-R0 es la que tiene el peor comportamiento a la fatiga y la sección P2-R1 exhibe, por el contrario, el mejor comportamiento.
- El fallo de las secciones de firme se puede atribuir en primer lugar a la deformación permanente acumulada en la capa de base reciclada en frío con emulsión bituminosa y, después, a la fatiga de la capa de mezcla bituminosa en caliente, excepto en la sección P2-R1. Por consiguiente, se puede establecer que en los reciclados en frío con emulsión bituminosa, la resistencia a la deformación

permanente es más crítica, como parámetro de diseño, que la resistencia a la fatiga.

- La sección con un pavimento de 40 mm de espesor y capa de base de 200 mm de espesor reciclada en frío con emulsión y un 1% de cemento sería adecuada para los criterios de fallo considerados en caminos de bajo tráfico en la República Sudafricana.

9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ebels, L. J. Characterisation of Material Properties and Behaviour of Cold Bituminous Mixtures for Road Pavements. PhD thesis. Stellenbosch University, South Africa. 2008.
- Jenkins, K. J., Yu, M. Cold-Recycling Techniques Using Bitumen Stabilization: Where is This Technology Going? In: Geotechnical Special Publication 191, Road Pavement Material Characterization and Rehabilitation. ASCE, páginas 191-200. 2009.
- Jenkins, K. J., Long, F. M., Ebels, L. J. Foamed bitumen mixes=shear performance International Journal of Pavement Engineering Vol. 8, páginas 85-98. 2007.
- Liebenberg, J. J. E., Visser, A. T. Stabilization and Structural Design of marginal Materials for Use in Low-Volume Roads. Transportation Research Record nº 1819, páginas 166-172. 2003.
- Liebenberg, J. J. E., Visser, A. T. Towards a mechanistic structural design procedure for emulsion-treated base layers. Journal of the South African Institution of Civil Engineering Vol 46, páginas 2-8. 2004.
- Ministerio de Fomento. Secciones de firme de la instrucción de carreteras 6.1-IC. Ediciones Liteam. 2002.
- Pérez, I., Medina, L., del Val, M.A. Mechanical properties and behaviour of in-situ materials which are stabilised with bitumen emulsion. Road Materials and Pavement Design Vol. 14, páginas 221-238. 2013.
<http://dx.doi.org/10.1080/14680629.2013.779301>.
- Pérez, I., Medina, L., del Val, M.A. Nonlinear elasto-plastic performance prediction of materials stabilized with bitumen emulsion in rural road pavements. Advances in Engineering Software Vol 91, páginas 69-79. 2016.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.advengsoft.2015.10.009>

Este artículo es en buena medida resultado de una de las actividades llevadas a cabo en el marco del Proyecto de investigación FÉNIX (Investigación estratégica en carreteras más seguras y sostenibles), que fue subvencionado por el programa CENIT 2007 del Centro para el Desarrollo Tecnológico e Industrial (CDTI) del Gobierno de España.