

## **VERIFICACIÓN DE LAS DEFORMACIONES ESPECÍFICAS DE UNA MEZCLA ASFÁLTICA POR MEDIO DEL RADIO DE CURVATURA**

*Jorge M. Lockhart y Félix J. Lilli*

CONSULBAIRES Ingenieros Consultores S.A., Cátedra de Caminos, Universidad Nacional de La Plata

### **Resumen**

Para predecir la vida de un pavimento a la fatiga por fisuramiento es necesario calcular la deformación máxima a la tracción en la parte inferior de la capa asfáltica ( $\epsilon_t$ ), ya que el número de repeticiones de carga que origina la fatiga depende de su valor, habiéndose demostrado que a una dada deformación por tracción existe un número de repeticiones de carga por debajo de la cual no se produce la falla.

La teoría elástica de Burminster ha demostrado corresponder ajustadamente con los resultados medidos experimentalmente. Aplicada a sistemas bicapas es suficientemente aproximada en los casos prácticos y el número de variables se reduce considerablemente.

Basándose en la teoría de las vigas sometida a flexión, en la que las deformaciones por tracción son directamente proporcionales a la curvatura, se trata de utilizar este último parámetro como factor de cálculo y/o verificación de las deformaciones específicas.

En el presente trabajo se justifica la utilización del radio de curvatura  $R_c$  y de la relación  $D/R_c$  entre deflexión y radio de curvatura, medidos mediante ensayos en obras en servicio. Se presenta un procedimiento sencillo para la evaluación de los pavimentos y se preparan gráficos para analizar e interpretar deflexiones y radios de curvatura en función de los espesores de las capas asfálticas. Para el caso de refuerzos se presentan también ábacos para distintas temperaturas de servicio, radios de curvatura mínimos, relaciones modulares entre carpeta y base y número de repeticiones de carga.

### **Abstract**

In order to predict the cracking fatigue's life of a pavement it is required to calculate the maximum tensile strain at the bottom of the asphalt layer ( $\epsilon_t$ ), since the number of load repetitions for fatigue depends on the value of the tensile strain. It has been proved that to a certain tensile strain corresponds a number of load repetitions under which there is no pavement failure.

Experimental results have demonstrated the validity of Burminster's elastic theory and when applied to two layer systems it is well enough approximated for all practical cases and therefore the number of variables is considerably reduced.

Based on the flexure of beams theory, where tensile strains are directly proportional to curvature, this last parameter is use for the design and/or verification of strains.

In the present work justification is given for the use of the radius of curvature  $R_c$  and the ratio  $D/R_c$  between deflection and radius of curvature measured through test in works under use. A simple procedure for the evaluation of pavements is presented and graphs are prepared for the analysis and interpretation of deflections and radii of curvature in function of the asphaltic layer thickness. For the case of reinforcements graphs are presented for different service temperatures, minimum radii of curvature, modular ratios between the asphalt layer and the base and the number of load repetitions.

## 1. Introducción

La falla de fatiga de los pavimentos flexibles por la acción repetida de las cargas depende fundamentalmente de la deformación específica por tracción de la capa asfáltica.

Porter, en la presentación de su método de diseño en el año 1942 (1), plantea que las fallas de un pavimento dependen, entre otros factores, del radio de curvatura y de la deflexión, estableciendo una curva de fatiga que sigue una ley lineal decreciente entre las deflexiones y el logaritmo del número de repeticiones de carga; para el radio de curvatura no fija valores cuantitativos límites.

Estos conceptos han sido estudiados por distintos investigadores y adoptados por los criterios de diseño más modernos entre otros por el método Shell 1963, el nuevo método Shell 1978, el Método del Asphalt Institute de 1982, etc.

Con las verificaciones prácticas realizadas, tanto en laboratorio como en los caminos experimentales, se han establecido curvas de fatiga para las deformaciones específicas por tracción de la mezcla asfáltica como también para la de compresión sobre la subrasante, que son las dos situaciones críticas que gobiernan las condiciones de diseño.

Huang (2) y otros verifican que la deformación específica  $\epsilon_r$  por tracción de la capa asfáltica depende fundamentalmente

del espesor asfáltico  $h_1$  y de su módulo  $E_1$  y en menor grado de la relación modular  $E_1/E_2$ , siempre que ésta tenga un «valor razonable». Además el módulo  $E_3$  de la subrasante tiene una menor influencia en  $\epsilon_r$ .

Para el caso del diseño de espesores de refuerzo de pavimentos, el criterio más generalizado hasta el presente está basado en las medidas de deflexión Benkelman. La deflexión Benkelman depende fundamentalmente de las condiciones de deformación de la subrasante, y en menor grado de la deformabilidad de la capa asfáltica. En cambio la deformación de la capa asfáltica bajo la acción de las cargas que produce tracción en su cara inferior, y que origina las fallas por fatiga de la misma es inversamente proporcional al radio ( $R_c$ ) en el punto de máxima curvatura, en correspondencia con el eje de aplicación de la carga.

Se demuestra la influencia relativa de las relaciones modulares en base a cálculos teóricos hechos utilizando las tablas de Jones (4) y los Abacos Alize III (5) para bicapas, del laboratorio Central de Ponts et Chaussées de Francia y se justifica la utilización de estos últimos para el cálculo de las deformaciones específicas  $\epsilon_r$ .

En el presente trabajo se propone la utilización del radio de curvatura  $R_c$  y de la relación  $D/R_c$  entre deflexión y curvatura, medidos mediante ensayos en obras en servicio. Se presenta un procedimiento sencillo para la evaluación de los pavimentos y se preparan gráficos para analizar e in-

interpretar deflexiones y radios de curvatura en función de los espesores de las capas asfálticas; para el caso de refuerzos se presentan también ábacos para distintas temperaturas de servicio, radios de curvatura mínimos, relaciones modulares entre carpeta y base y número de repeticiones de carga.

Se comprueba su aplicabilidad y se sugiere la necesidad de incorporar esta medida de verificación en la fijación de los espesores de refuerzo, en forma complementaria a los obtenidos con la fórmula de Ruiz. (3)

## 2. Consideraciones teóricas

Si bien las mezclas asfálticas son materiales viscoelásticos su comportamiento resulta prácticamente elástico cuando los tiempos de aplicación de las cargas del tránsito son cortos y las temperaturas no son excesivas.

La teoría de la elasticidad fue utilizada por Burminster para el desarrollo del sistema y resuelto numéricamente para dos capas. las soluciones fueron tabuladas por Acum y Fox para un sistema de tres capas, en función de las relaciones modulares de las mismas y de sus espesores relativos. Esta tabulación fue ampliada por Jones (4) para un rango más amplio de relaciones modulares y espesores. El Laboratorio Central de Ponts et Chaussées ha resuelto para un sistema de hasta seis capas (modelo ALIZE III) y se ha presentado en forma de simples ábacos para un sistema bicapa.

Primeramente se verificará cuantitativamente que las deformaciones específicas de las capas asfálticas dependen fundamentalmente del módulo  $E_1$  y del espesor  $h_1$ , y en menor grado de la relación modular. Para demostrar esto se han calculado los valores de  $\epsilon_r$  para la interfase 1, es decir la correspondiente a la separación entre la capa asfáltica y la granular, utilizando las Tablas de Jones (4) para el sistema de tres capas y los Abacos ALIZE III (5), para un sistema de dos capas. Los resultados obtenidos son los que figuran en la TABLA 1.

Los valores para los módulos  $E_1, E_2, E_3$  y espesores  $h_1$  y  $h_2$  se han elegido en forma tal que se puedan aplicar las tablas de Jones sin interpolación. En el primer grupo el espesor  $h_2 = 107,8$  cm adoptado hace que el sistema se convierta en un bicapa al desaparecer el efecto de la subrasante por el elevado espesor  $h_2$  el segundo grupo de valores, con un  $h_2 = 13,5$  cm equivale a espesores normales constructivos.

En la tabla se observa que los valores  $\epsilon_r$  calculados con las tablas de Jones y los ábacos ALIZE III, son del mismo orden, principalmente para relaciones modulares  $E_1 / E_2$  menores de 100, lo que demuestra la validez de aplicar los ábacos para el cálculo de  $\epsilon_r$ , de muy simple interpolación.

En cambio no sucede lo mismo cuando se calculan los valores de la deflexión total, en la cual tienen importancia fundamental los módulos de las capas inferiores y de la subrasante. En el caso de utilizar los ábacos ALIZE III, para el cálculo de las

TABLA 1

TABLAS DE JONES						ABACOS ALIZE III			
$E_1$	$E_2$	$E_3$	$h_1$	$h_2$	$\epsilon_r$	$E_1/E_2$	$H_1$	$H_1/a$	$\epsilon_r$
50.000	250	125	13.5	107.8	$1.69 \times 10^{-4}$	200	13.5	1.25	$2.64 \times 10^{-4}$
50.000	500	250	13.5	107.8	$1.31 \times 10^{-4}$	100	13.5	1.25	$2.20 \times 10^{-4}$
50.000	2.500	1.250	13.5	107.8	$1.01 \times 10^{-4}$	20	13.5	1.25	$1.25 \times 10^{-4}$
25.000	250	125	6.7	13.5	$1.68 \times 10^{-3}$	100	6.7	0.63	$1.01 \times 10^{-3}$
25.000	1.250	675	6.7	13.5	$1.59 \times 10^{-4}$	20	6.7	0.63	$1.20 \times 10^{-4}$
25.000	5.000	2.500	6.7	13.5	$1.67 \times 10^{-4}$	5	6.7	0.63	$1.35 \times 10^{-4}$

deflexiones es necesario desarrollar un módulo "equivalente" utilizando las relaciones de Odemark, de Palmer y Barber, o de Ivanov, generalizadas a n capas con las que se llega a una buena aproximación entre los valores de deflexiones medidos y calculados. Resumiendo, para el cálculo de la deformación específica  $\epsilon_r$  de la capa asfáltica, se obtiene suficiente aproximación con la utilización de los Abacos Alize III, considerando el espesor de la capa superior  $h_1$  y los módulos  $E_1$  y  $E_2$ .

### 3. Deformación específica $\epsilon_r$ en la cara interior de la capa asfáltica

De acuerdo con la teoría de la elasticidad la deformación específica de una barra o placa elástica es (FIGURA 1):

Tal como se mencionó anteriormente, es válida la utilización de los Abacos ALIZE III para el cálculo del radio de curvatura  $R_c$  y de la deformación específica de la fibra inferior de la capa asfáltica ( $\epsilon_r$ ).

En la TABLA 2, se adjuntan los valores de  $\epsilon_r$  y  $R_c$  calculados con los ábacos y el valor de los coeficientes  $C_1$  y  $C_2$ . El coeficiente  $C_2$  permite corregir el  $R_c$  para distintas temperaturas del aire ponderadas

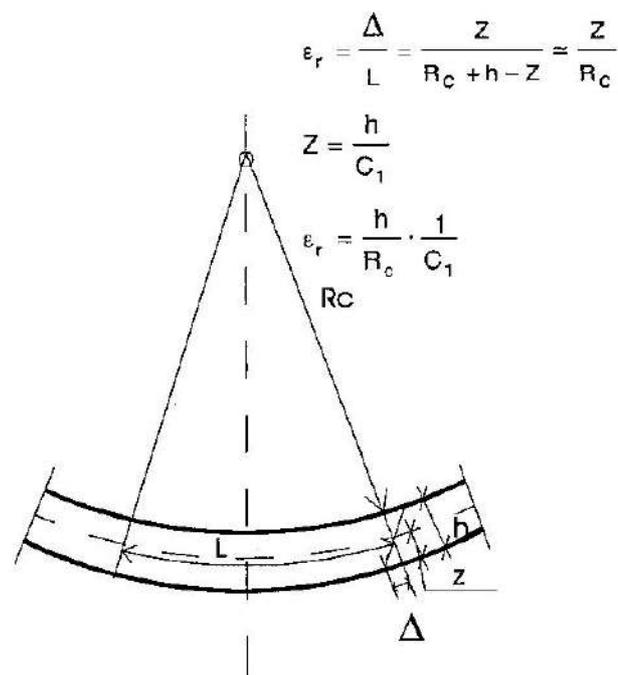


Figura 1

(WMAAT), tema que se analiza en el punto 6.

En la FIGURA 2 se han graficado los valores  $C_1$  y  $C_2$  en función del espesor  $h$ , para distintas relaciones modulares y temperaturas del aire.

El módulo  $E_1 = 13.000 \text{ kg/cm}^2$ , con que se hicieron los cálculos es el que corresponde a una mezcla tipo concreto asfáltico, para una temperatura de mezcla de  $20^\circ\text{C}$  (que es la temperatura para la cual se corrigen las deflexiones Benkelman), y un tiempo de aplicación de la carta de 0,15 seg (que corresponde a una velocidad de aproximadamente 5 km/h del camión en el momento del ensayo). Con estos valores se obtuvo el Stiffness del asfalto del ábaco de van der Poel y el correspondiente a la mezcla del nomograma correspondiente (6).

Los cálculos se han realizado para tres relaciones modulares  $E_1 / E_2 = 3; 5$  y  $10$ , con lo cual se abarca todo el ámbito de los valores de los tramos en que se disponían datos experimentales.

Para este estudio se ha utilizado la información facilitada por la Dirección Nacional de Vialidad, con medidas de deflexión, radio de curvatura, materiales con las características de las distintas capas obtenidas de calicatas realizadas en 92 tramos de la Red Pavimentada en oportunidad del estudio de un método racional de refuerzo de pavimentos.

### 4. Determinación de la deformación específica $\epsilon_r$ en base al radio de curvatura $R_c$

Según lo visto anteriormente, puede obtenerse la deformación específica  $\epsilon_r$  en la capa asfáltica, conociendo el radio de curvatura  $R_c$ . Para la medición del  $R_c$  se ha utilizado el método de la doble Regla de Benkelman propuesto por Ruiz en su Manual (3). Este método no es excluyente pudiéndose utilizar cualquier otro, con la salvedad que se deben hacer las correcciones correspondientes por temperatura y velocidad de aplicación de la carga, conocer el espesor  $h_1$  de la capa asfáltica y estimar una relación modular entre la carpeta y la base.

h a	h cm	E <sub>1</sub>	E <sub>2</sub>	E <sub>1</sub> E <sub>2</sub>	R E <sub>2</sub>	R <sub>c</sub> = Rx1,2	ε <sub>r</sub> × E <sub>2</sub>	ε <sub>corr</sub> = 0,849 × ε <sub>r</sub>	h <sub>1</sub> R <sub>c</sub>	C <sub>1</sub>	WMAAT 20°C				WMAAT 12°C				WMAAT 4°C			
											E <sub>1</sub>	E <sub>2</sub>	R <sub>1R</sub> E <sub>2</sub>	R <sub>2R</sub> E <sub>2</sub>	E <sub>1</sub>	E <sub>2</sub>	R <sub>1R</sub> E <sub>2</sub>	R <sub>2R</sub> E <sub>2</sub>	E <sub>1</sub>	E <sub>2</sub>	R <sub>1R</sub> E <sub>2</sub>	R <sub>2R</sub> E <sub>2</sub>
0,4	4,3	13000	4300	3	0,0295	130	0,57	1,12x10 <sup>-4</sup>	3,31x10 <sup>-4</sup>	2,95	10,000	2,31	0,029	0,913	32,000	7,38	0,051	1,051	76,000	17,54	0,035	1,186
0,8	8,6				0,035	155	0,90	1,76x10 <sup>-4</sup>	5,56x10 <sup>-4</sup>	3,16			0,033	0,943			0,048	1,371			0,070	2,000
1,2	12,9				0,046	203	0,80	1,57x10 <sup>-4</sup>	6,38x10 <sup>-4</sup>	4,06			0,040	0,880			0,075	1,630			0,123	2,674
1,6	17,2				0,056	248	0,67	1,31x10 <sup>-4</sup>	6,95x10 <sup>-4</sup>	5,30			0,048	0,857			0,100	1,786			0,184	3,286
2,0	21,6				0,065	287	0,53	1,04x10 <sup>-4</sup>	7,51x10 <sup>-4</sup>	7,22			0,055	0,846			0,124	1,908			0,240	3,692
2,4	25,9				0,068	300	0,44	0,86x10 <sup>-4</sup>	8,63x10 <sup>-4</sup>	10,03			0,051	0,823			0,149	2,191			0,310	4,559
0,4	4,3	13000	2600	5	0,03	80	0,74	2,42x10 <sup>-4</sup>	5,37x10 <sup>-4</sup>	2,22	10,000	3,85	0,029	0,965	32,000	12,31	0,033	1,100	76,000	29,23	0,039	1,300
0,8	8,6				0,041	109	0,88	2,87x10 <sup>-4</sup>	7,89x10 <sup>-4</sup>	2,75			0,038	0,927			0,059	1,439			0,093	2,268
1,2	12,9				0,061	162	0,70	2,29x10 <sup>-4</sup>	7,96x10 <sup>-4</sup>	3,47			0,052	0,852			0,100	1,639			0,173	2,836
1,6	17,2				0,079	210	0,57	1,86x10 <sup>-4</sup>	8,19x10 <sup>-4</sup>	4,40			0,066	0,835			0,145	1,835			0,270	3,418
2,0	21,6				0,095	252	0,45	1,47x10 <sup>-4</sup>	8,57x10 <sup>-4</sup>	5,83			0,078	0,821			0,190	2,000			0,370	3,895
2,4	25,9				0,107	284	0,36	1,17x10 <sup>-4</sup>	9,12x10 <sup>-4</sup>	7,79			0,081	0,757			0,230	2,150			0,480	4,486
0,4	4,3	13000	1300	10	0,032	42	0,80	5,22x10 <sup>-4</sup>	1,02x10 <sup>-4</sup>	1,95	10,000	7,69	0,031	0,968	32,000	24,62	0,037	1,156	76,000	58,46	0,048	1,520
0,8	8,6				0,053	70	0,71	4,64x10 <sup>-4</sup>	1,23x10 <sup>-4</sup>	2,65			0,048	0,905			0,084	1,585			0,135	2,547
1,2	12,9				0,09	119	0,55	3,59x10 <sup>-4</sup>	1,08x10 <sup>-4</sup>	3,01			0,078	0,866			0,151	1,678			0,275	3,055
1,6	17,2				0,12	159	0,42	2,74x10 <sup>-4</sup>	1,08x10 <sup>-4</sup>	3,94			0,102	0,850			0,237	1,975			0,450	3,750
2,0	21,6				0,16	212	0,32	2,09x10 <sup>-4</sup>	1,02x10 <sup>-4</sup>	4,88			0,128	0,800			0,320	2,000			0,640	4,000
2,4	25,9				0,19	252	0,26	1,70x10 <sup>-4</sup>	1,03x10 <sup>-4</sup>	6,04			0,158	0,798			0,402	2,116			0,860	4,526

Para la estimación del módulo E2, de la capa no cementada se utilizó el valor aproximado propuesto por el método Shell 1963,  $E2 = 100 \times \text{CBR}$ , y se verificó, cuando se disponía de información, por medio de la expresión:

$$E2 = 0,20 \cdot h_2^{0,45} \cdot E3 \text{ (h2 en mm)}$$

Establecida por el método en su versión el año 1977, entre ambos valores se adopta el menor.

Para valorar experimentalmente la deformación específica por tracción  $\epsilon_r$  se propone medir el radio de curvatura y el espesor de la capa asfáltica, y estimar el valor del módulo de la base E2, por medio de un CBR a la densidad y humedad de

servicio (en el caso de materiales no cementados).

En consecuencia se cumplirá:

$$\epsilon_r \text{ medido} = \frac{h1}{Rc} \cdot \frac{1}{C1}$$

C1 = coeficiente obtenido del ábaco de la FIGURA 2, función del espesor h1 y de la relación modular.

Comparando estos valores de  $\epsilon_r$  obtenidos por cálculo en función del Rc medido con los  $\epsilon_r$  teóricos, se puede ver en la FIGURA 3 que existe una correspondencia aceptable entre ambos valores teniendo en cuenta las naturales heterogeneidades de los tramos experimentados, lo que permite dar como válido el procedimiento propuesto.

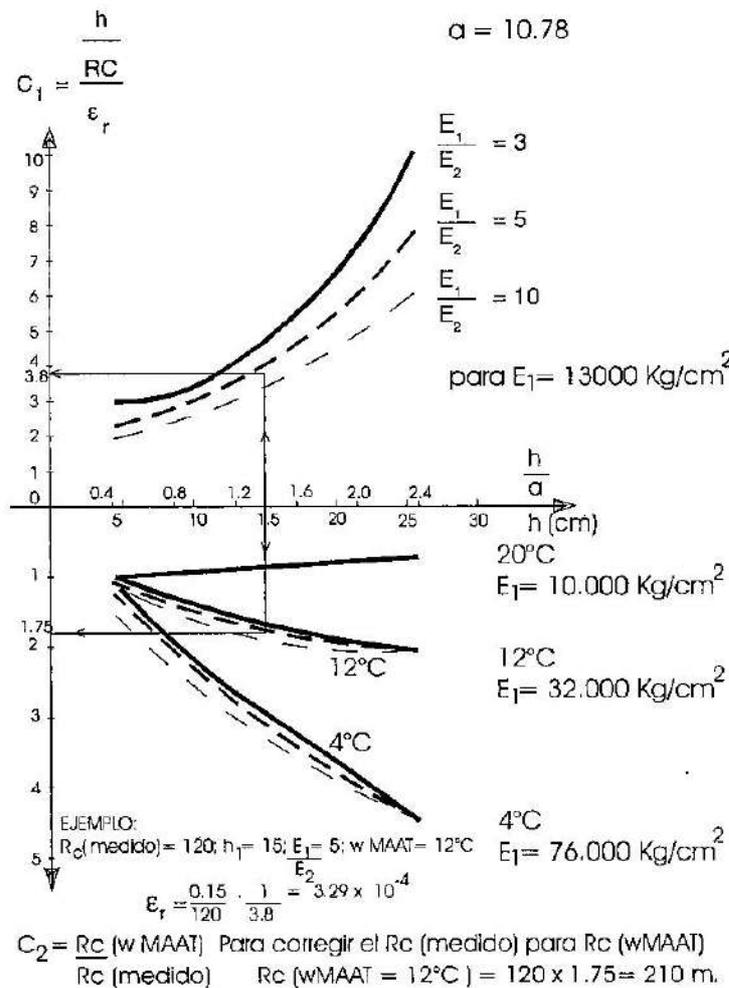


Figura 2

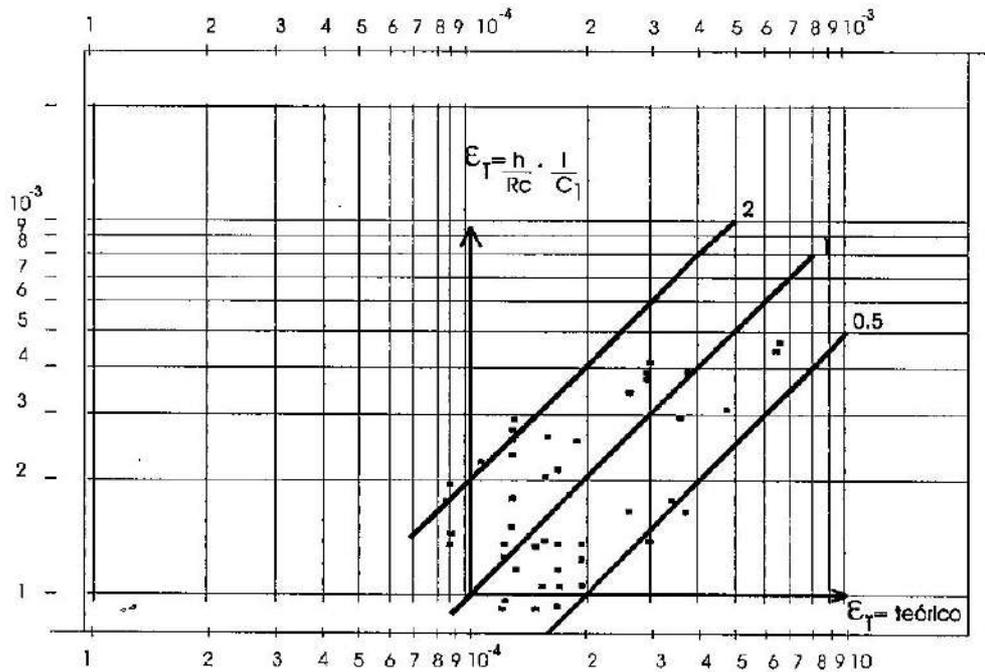


Figura 3

**5. Deformación específica  $\epsilon_T$  obtenida en base a las medidas del Rc y de la deflexión D**

Ha sido frecuente utilizar el producto  $Rc \cdot D$ , para tener en cuenta las condiciones estructurales de un pavimento. Como se señala en el Manual (Ruiz) (3), el valor del  $Rc \cdot D$ , tiene una constante cuando se trata de estructuras granulares con un gradiente de los módulos decrecientes con la profundidad y con un revestimiento asfáltico del orden de los 5 cm como máximo. En estos casos existe un valor por debajo del cual los comportamientos son satisfactorios, y donde un aumento del Rc va acompañado por una reducción de la deflexión D.

En pavimentos que no cumplen con estas condiciones, para un valor determinado del producto  $Rc \cdot D$ , se tiene un comportamiento muy distinto si el Rc es pequeño y la deflexión grande, respecto de un Rc grande y una deflexión pequeña. En el primer caso se tienen estructuras que van a fallar por deformación excesiva de la

subrasante (alto valor de la deflexión), o por fatiga de la capa asfáltica (reducido valor del Rc), según cual de las situaciones sea la predominante. En el caso inverso se tendrá un pavimento con un comportamiento satisfactorio tanto desde el punto de vista de la fatiga de la mezcla asfáltica como de la deformación de la subrasante.

En consecuencia el comportamiento debe ser mejor a medida que el Rc aumenta y que la deflexión D disminuye. En la Figura 4 se han considerado estas dos situaciones, y en base a las mismas puede escribirse:

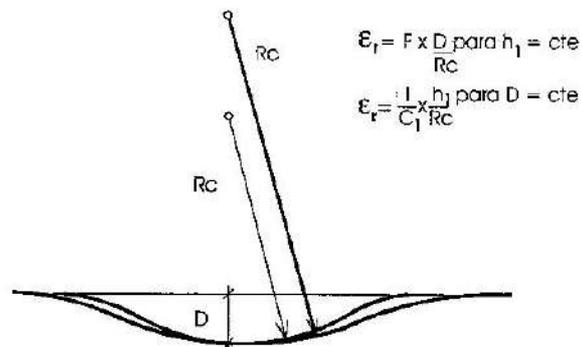


Figura 4

$$\varepsilon_r = F \times \frac{D}{R_c}$$

Para un espesor  $h_1$  constante y

$$\varepsilon_r = \frac{1}{C_1} \cdot \frac{h_1}{R_c}$$

Para un valor de  $D$  constante (ya deducida anteriormente)

Multiplicando estas dos expresiones se tiene:

$$\varepsilon_r^2 = \frac{F}{C_1} \cdot \frac{D \cdot h_1}{R_c^2}$$

con lo que:

$$\varepsilon_r = K \cdot \frac{\sqrt{h_1 \cdot D}}{R_c}$$

siendo:

$$K = \sqrt{\frac{F}{C_1}}$$

Los coeficientes  $F$  y  $C_1$  dependen de los módulos  $E_1$  y  $E_2$ , y del espesor de la capa asfáltica  $h_1$ . Utilizando nuevamente los ábacos ALIZE III, se ha hecho el cálculo de los diferentes coeficientes, los que figuran para distintas relaciones modulares y diferentes espesores.

En las Figuras 5 y 6 se grafican los valores  $F$  y  $K$ , en función de distintas relaciones modulares y espesores  $h_1$  de la base. El módulo  $E_1 = 13.000 \text{ kg/cm}^2$ , se ha tomado constante por corresponder a las condiciones del ensayo Benkelman, tal como se mencionó anteriormente.

Para un caso práctico, en base a los valores de deflexión  $D$  y radio de curvatura  $R_c$ , medidos con regla de Benkelman y el espesor  $h_1$  de la carpeta asfáltica, se pueden calcular las deformaciones específicas y en base a las mismas y al tránsito soportado hasta el momento de la evaluación se puede hacer una estimación de la vida remanente del pavimento.

## 6. Verificación de los valores de $\varepsilon_r$ con el comportamiento en servicio del pavimento

De los tramos estudiados por la Dirección Nacional de Vialidad, se han elegido los de buen comportamiento, aceptando con tales los que presentan menos del 50% de fisuras Clase I o menos del 30% de fisuras Clase II, criterio aceptado por el AASHTO para sus estudios de performance y utilizado por diversos organismos.

Para los tramos elegidos se han determinado las deformaciones específicas por tracción en la cara inferior, en base a los radios de curvatura y espesores de pavimento medidos.

En la Figura 7 se han representado las deformaciones específicas de la capa asfáltica con respecto al número  $N$  de repeticiones de ejes equivalentes de 18.000 lb (ESAL), obtenidos del estudio de Charmichael y Hudson (7) mencionado anteriormente, pudiéndose verificar que los mismos por debajo de la línea de fatiga adoptada por el método Shell 1978 (buen comportamiento). La línea de fatiga se ha obtenido de la CHART M - 3 (8), mezcla F1, para módulo  $E_1 = 13.000 \text{ kg/cm}^2$ , que corresponde a una temperatura de la mezcla de  $20^\circ\text{C}$  y a un tiempo de aplicación de carga de 0,15 seg, que es la temperatura y tiempo de aplicación de carga de ensayo Benkelman.

Como las deformaciones Benkelman se miden a la temperatura del pavimento y luego se corrigen para una temperatura de mezcla de  $20^\circ\text{C}$ , según Norma de VN para obtener el valor verdadero a la temperatura y tiempo de aplicación de la carga en servicio, se deben corregir los valores del  $R_c$  para llevarlos a estas condiciones. Esta corrección se realiza multiplicando el  $R_c$  medido y corregido por temperatura por un coeficiente que tiene en cuenta el módulo  $E_1$  en esas condiciones:

$$R_c (\text{WAAT } ^\circ\text{C}) = C_2 \times R_c$$

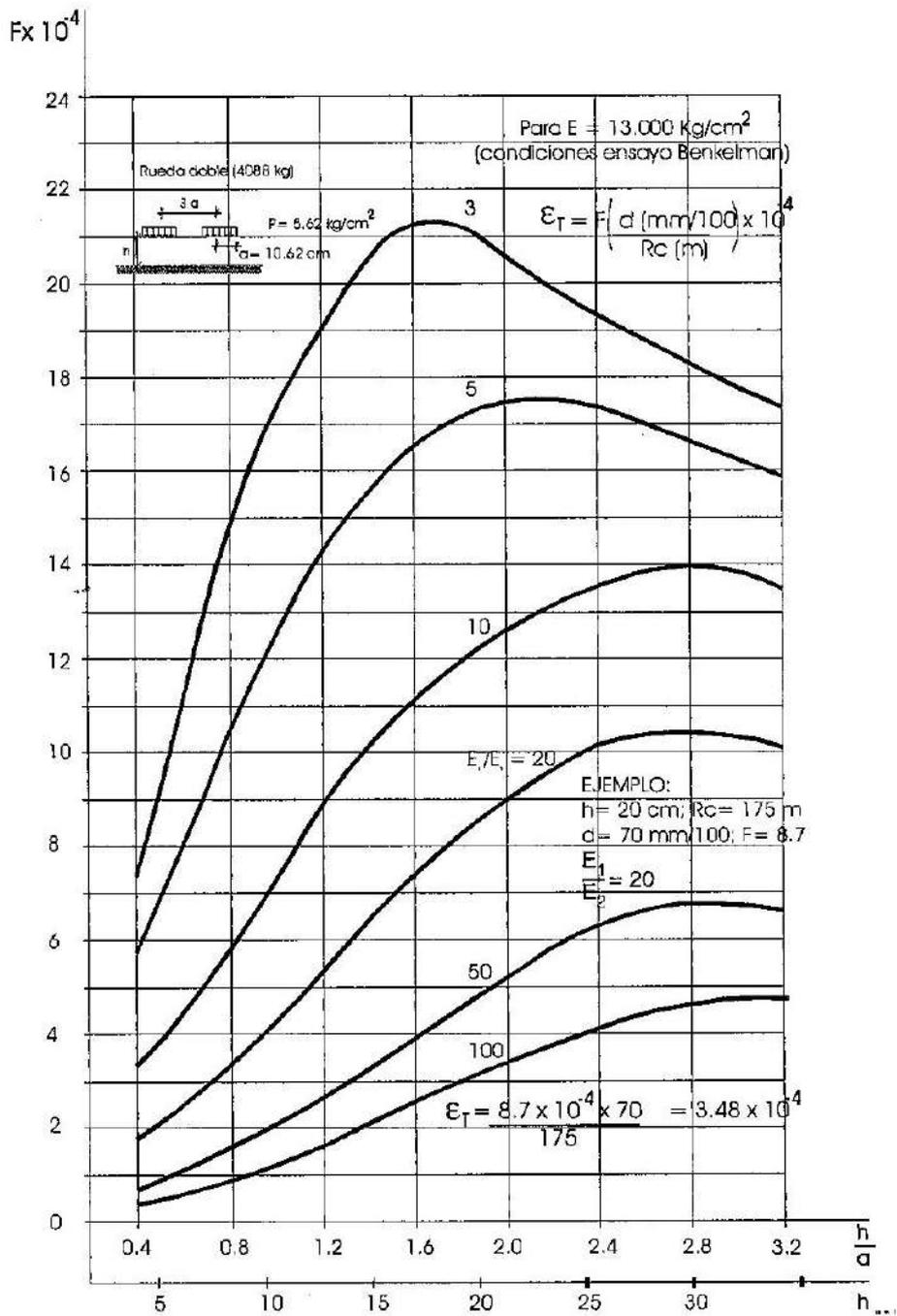


GRAFICO PARA EL CALCULO DE  $\epsilon_T$  EN BASE  
 AL COEFICIENTE DEFLEXION / CURVATURA  
 (ABACO PROPUESTO)

Figura 5

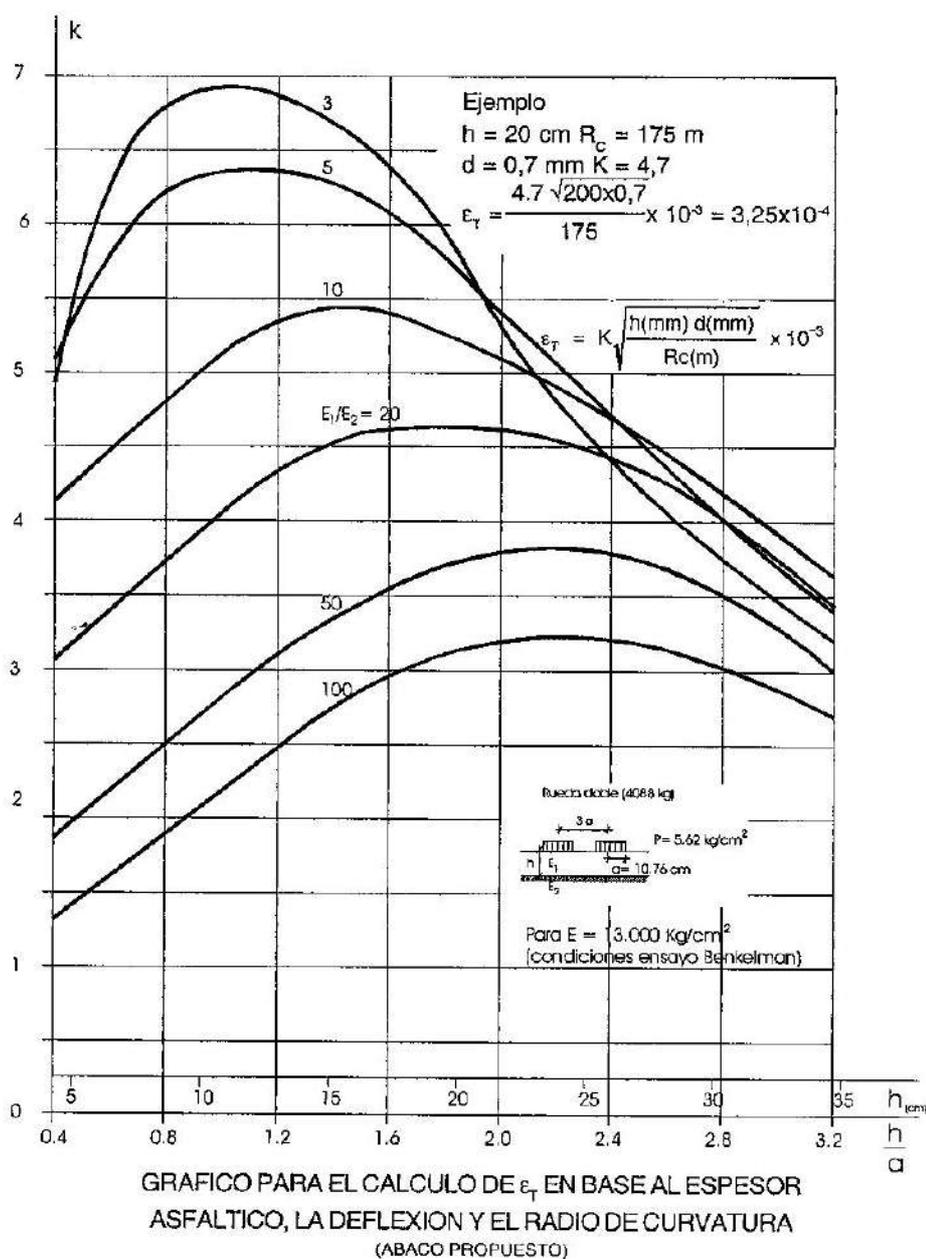


Figura 6

Este coeficiente C2 es función de la relación modular y del espesor de la capa asfáltica, y sus valores, calculados teóricamente, han sido volcados al ábaco de la Figura 2 para facilitar su aplicación práctica. Como se ve C2 es menor que la unidad cuando la temperatura es mayor que la del ensayo y mayor que la unidad en el caso contrario.

Cuando no se han hecho la corrección por temperatura de acuerdo a la norma de Vialidad Nacional, el radio de curvatura para las condiciones de servicio ( $R_c$  WMAAT °C), se puede calcular en base al radio de curvatura medio corregido por el coeficiente C3, cuyos valores han sido deducidos teóricamente y que se consignan en las tablas 3 y 4. El coeficiente se obtiene

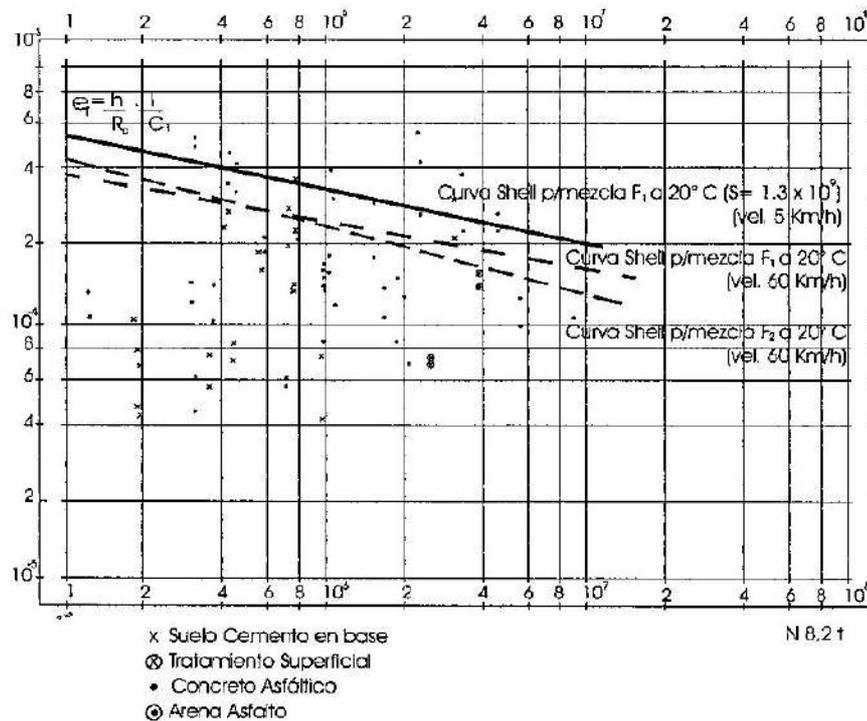


Figura 7

TABLA 3  
 COEFICIENTES  $C_2$  PARA CORREGIR EL  $R_c$  - MEDIDO  
 $S_1 - F_{1-100}$

T°C Ensayo	$E_2$ Kg/cm <sup>2</sup>	T°C - Diseño (WMAAT°C)											
		4°C h				12°C h				20°C h			
		5	10	15	20	5	10	15	20	5	10	15	20
5°	1000	1,24	1,29	1,35	1,40	0,83	0,77	0,71	0,70	0,65	0,41	0,34	0,28
	2000	1,14	1,27	1,37	1,40	0,88	0,79	0,74	0,70	0,74	0,44	0,35	0,29
	4000	1,14	1,25	1,33	1,39	0,94	0,79	0,75	0,73	0,86	0,50	0,37	0,32
	8000	1,06	1,24	1,28	1,35	0,97	0,86	0,77	0,75	0,91	0,60	0,40	0,33
10°	1000	1,49	1,74	1,95	2,15	1,00	1,04	1,02	1,07	0,78	0,56	0,49	0,43
	2000	1,30	1,64	1,91	2,10	1,00	1,02	1,03	1,05	0,84	0,58	0,46	0,45
	4000	1,21	1,63	1,84	2,00	1,00	1,03	1,03	1,04	0,91	0,65	0,52	0,46
	8000	1,13	1,51	1,75	1,93	1,03	1,05	1,05	1,07	0,97	0,73	0,54	0,47
15°	1000	1,81	2,53	3,09	3,68	1,25	1,52	1,62	1,84	0,95	0,81	0,77	0,75
	2000	1,45	2,36	2,99	3,48	1,12	1,47	1,61	1,74	0,94	0,84	0,77	0,74
	4000	1,33	2,19	2,81	3,28	1,10	1,39	1,58	1,71	1,00	0,88	0,79	0,74
	8000	1,17	1,88	2,56	3,00	1,07	1,30	1,54	1,67	1,00	0,91	0,80	0,73
20°	1000	1,86	2,70	3,44	4,12	1,25	1,62	1,80	2,06	0,97	0,86	0,86	0,85
	2000	1,50	2,55	3,33	4,00	1,16	1,59	1,79	2,00	0,97	0,90	0,86	0,85
	4000	1,33	2,25	2,91	3,54	1,11	1,42	1,64	1,85	1,00	0,90	0,82	0,83
	8000	1,17	2,00	2,78	3,29	1,07	1,39	1,68	1,83	1,00	0,97	0,86	0,80

Ejemplo:

Temperatura de ensayo Benkelman = 15°C

Temperatura de diseño (WMAAT) = 20°C

$h_1 = 10$  cm

$R_c$  medio = 150 m

$R_c$  (WMAAT = 20°C) = 0,65 x 150 = 98 m

**TABLA 4**  
**COEFICIENTES C<sub>3</sub> PARA CORREGIR EL R<sub>c</sub> - MEDIDO**  
**S<sub>1</sub> - F<sub>1-50</sub>**

T°C Ensayo Kg/cm²	T°C - Diseño (WMAAT°C)																
	4°C h				12°C h				20°C h				24°C h				
	5	10	15	20	5	10	15	20	5	10	15	20	5	10	15	20	
5°	1000	1,41	1,55	1,77	1,86	0,98	1,00	1,00	1,00	0,74	0,59	0,53	0,48	0,55	0,43	0,35	0,30
	2000	1,28	1,57	1,68	1,86	1,02	1,01	1,00	1,00	0,83	0,63	0,55	0,49	0,74	0,47	0,38	0,33
	4000	1,26	1,46	1,62	1,79	1,03	0,99	1,00	1,03	0,88	0,54	0,57	0,52	0,86	0,51	0,40	0,34
	8000	1,12	1,50	1,55	1,71	1,00	1,02	1,00	1,00	0,94	0,72	0,59	0,54	0,94	0,62	0,43	0,36
10°	1000	1,69	2,09	2,56	2,86	1,18	1,35	1,44	1,54	0,89	0,79	0,76	0,74	0,78	0,58	0,51	0,47
	2000	1,46	2,02	2,35	2,79	1,16	1,30	1,40	1,50	0,94	0,81	0,77	0,74	0,84	0,61	0,54	0,49
	4000	1,33	1,91	2,24	2,56	1,09	1,29	1,38	1,49	0,94	0,84	0,79	0,75	0,91	0,67	0,55	0,50
	8000	1,20	1,83	2,12	2,44	1,07	1,24	1,37	1,43	1,00	0,88	0,81	0,77	1,00	0,96	0,60	0,51
15°	1000	2,05	3,04	4,04	4,89	1,43	1,96	2,28	2,63	1,08	1,15	1,20	1,26	0,95	0,85	0,81	0,80
	2000	1,64	2,91	3,68	4,61	1,30	1,87	2,18	2,48	1,06	1,16	1,21	1,22	0,94	0,87	0,84	0,81
	4000	1,46	2,56	3,42	4,21	1,20	1,73	2,58	2,44	1,03	1,12	1,21	1,23	1,00	0,90	0,84	0,81
	8000	1,24	2,27	3,10	3,80	1,10	1,54	2,00	2,22	1,03	1,09	1,18	1,20	1,03	0,94	0,87	0,80
20°	1000	2,11	3,24	4,51	5,47	1,47	2,09	2,94	1,11	1,11	1,23	1,34	1,41	0,97	0,91	0,90	0,89
	2000	1,69	3,14	4,10	5,30	1,34	2,02	2,43	1,09	1,09	1,25	1,35	1,40	0,97	0,94	0,93	0,93
	4000	1,47	2,62	3,54	4,54	1,20	1,77	2,18	1,03	1,03	1,15	1,25	1,32	1,00	0,93	0,87	0,88
	8000	1,24	2,42	3,36	4,17	1,10	1,64	2,17	1,03	1,03	1,16	1,28	1,32	1,03	1,00	0,94	0,88

entrando con la temperatura de ensayo, la temperatura de diseño (WMAAT°C) y el espesor de la capa asfáltica.

$$R_c (\text{WMAAT } ^\circ\text{C}) = C_3 \times R_c (\text{medido}).$$

### 7. Cálculo de los espesores de refuerzo necesarios

La determinación del espesor de refuerzo necesario se ha hecho tomando las curvas de fatiga para una mezcla F1, tipo concreto asfáltico convencional, Chart M3, utilizadas por el nuevo método Shell (8), para el módulo correspondiente a la temperatura de servicio.

El cálculo se ha realizado para distintas relaciones modulares entre las capas de carpeta y base, dentro del ámbito donde es necesario la verificación de los espesores para cumplir con las condiciones de fatiga de la mezcla asfáltica.

En los ábacos de las Figuras 8 y 9 se han trazado además las curvas de

igual R<sub>c</sub>, lo que permite hacer una verificación rápida del estado de fatiga de la mezcla.

Los ábacos están preparados para obtener el espesor necesario en función de la temperatura de servicio (WMAAT, °C), el módulo determinado de la base y el número de repeticiones de cargas equivalentes de 18.000 lb/eje (N). Además en los mismos ábacos puede entrarse con el valor del R<sub>c</sub> medido y corregido por temperatura y obtener para las condiciones de temperatura, estado de la base, y número de repeticiones de carga, el espesor adicional de refuerzo necesario que satisfaga las condiciones de fatiga de la mezcla utilizada.

### 8. Conclusiones

Para el estudio de pavimentos en servicio con miras a su evaluación y posterior refuerzo estructural, si fuera necesario, ha sido norma en nuestro medio la determinación de las deflexiones Benkelman y

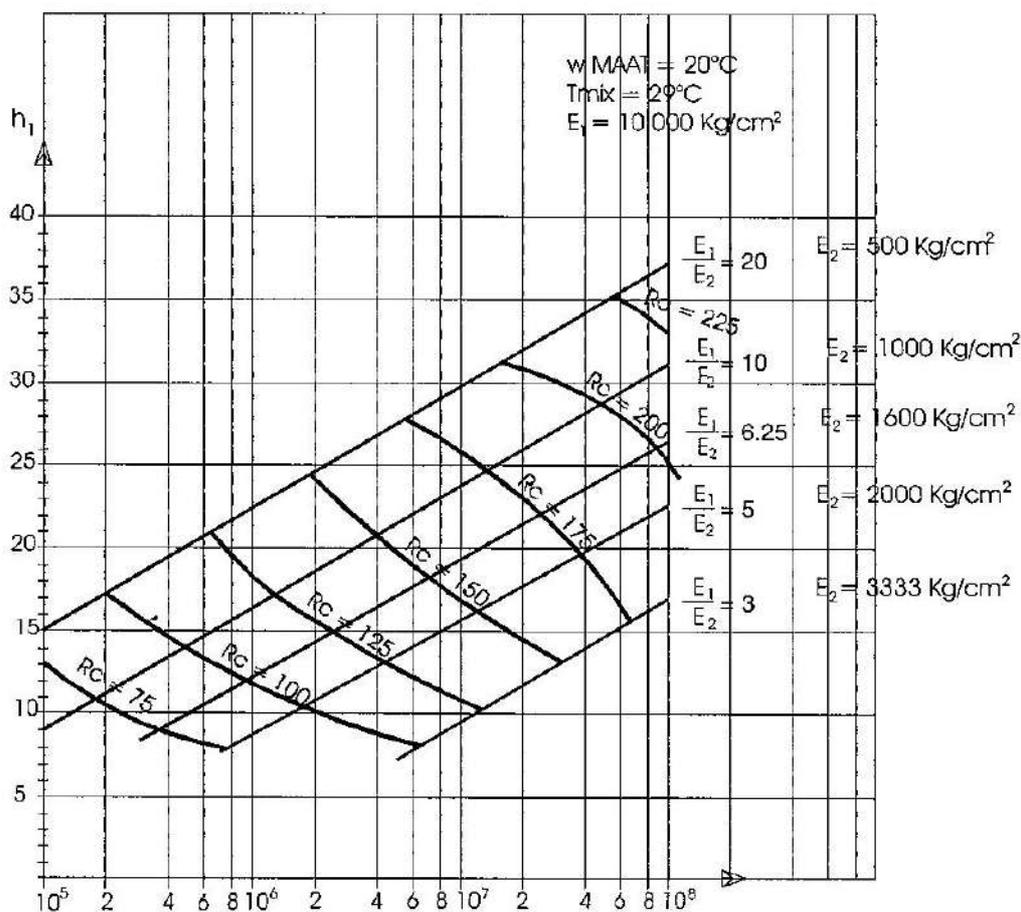


Fig. 8  $R_c$  y  $h_1$  mín. en función de  $N$  y  $\frac{E_1}{E_2}$  para  $w$  MAAT - 20°C

Ejemplo:  
 CBR base = 20%  
 $R_c = 120$  m.  
 $w$  MAAT = 20°C  
 $N_{(8,21)} = 4 \times 10^7$   
 $R_c(w \text{ MAAT} - 20^\circ\text{C}) = C_2 \times R_c = 0.85 \times 120 \text{ m} = 102 \text{ m}$

Del ábaco  
 Para  $R_c = 102$  y  $\frac{E_1}{E_2} = 5$   $h = 12$  cm  
 Para  $N_{(8,21)} = 4 \times 10^7$   $h = 20$  cm  
 Refuerzo Necesario 8 cm

Figura 8

más recientemente además, la medición del radio de curvatura.

Las deflexiones reflejan fundamentalmente las deformaciones en subrasante y la fórmula de Ruiz:

$$h = \frac{R}{0,434} \cdot \log \frac{D_0}{Dh}$$

permite obtener los espesores necesarios para reducir a límites admisibles los valores de deformación del pavimento.

Por otra parte la determinación del  $R_c$  da una medida de las condiciones de

deformación específica de la capa asfáltica y por ende de las condiciones de fatiga de la misma.

1. Para ponerse a cubierto de esta segunda situación, se han calculado los valores teóricos para distintas condiciones de temperatura de servicio, relaciones modulares de la carpeta asfáltica respecto de la base y número de repeticiones de carga. De este cálculo se han obtenido los espesores mínimos necesarios y los radios de curvatura mínimos.

2. En consecuencia, para el refuerzo de un pavimento se hace necesario veri-

$z$	: Distancia del eje neutro a la fibra más alejada
$R_c$	: Radio de curvatura de la superficie de la capa asfáltica
$\epsilon_r$	: Deformación específica por tracción de la capa asfáltica
$h$	: Espesor de refuerzo
$R$	: factor para el cálculo de los espesores de refuerzo que depende del material de refuerzo (Ruiz)
$D$	: Deflexión Benkelman
$D_o; D_h$	: Deflexiones Benkelman antes y después del refuerzo $h$
$S_{mix}$	: Módulo de rigidez (Stiffness) de la mezcla asfáltica
$S_{bit}$	: Módulo de rigidez (Stiffness) del asfalto
$C_1$	: Factor para el cálculo de la deformación específica en función del $R_c$ y $h$
$C_2$	: Factor para la corrección del $R_c$ , para llevarlo a las condiciones de servicio
$F$	: Factor para el cálculo de la deformación específica en función del $R_c$ y $D$
$K$	: Factor para el cálculo de la deformación específica en función del $R_c$ , $D$ y $h$

### Bibliografía

1. PORTER O.J.-Foundations for flexible pavements. Proceedings H.R.B. Año 1942.
2. HUANG Y.H.-Strain and curvature as factors for predicting pavement fatigue. Third International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements. University of Michigan. Año 1972.
3. RUIZ C.L.-Manual para el Proyecto de Obras de Mejoramiento de Pavimentos Flexibles - Cuarto Simposio de la Comisión Permanente del Asfalto. Año 1972.
4. JONES A. "Tables of Stresses in Three-Layer Elastic Systems" - H.R.B. Bulletin 342. Año 1962.
5. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées Abaques Bicouches ALIZE 3.
6. BONNAURE F., GEST G., TRAVOIS A., UGE P. - Proc. Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 12, Año 1977.
7. CHARMICHAEL R.F. and HUDSON W.R. - Development of an asphalt Concrete Distress Criteria using in service Pavements - Fifth international Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements - University of Michigan. Año 1982.
8. SHELL PAVEMENT DESIGN MANUAL - Asphalt pavements and overlays for road traffic. Año 1978.

*Manuscrito recibido en febrero de 1999.*