

# Control sobre el producto y el coste de la falta de calidad en la ejecución de mezclas asfálticas

Ing. Rodrigo Miró Recasens  
Universidad Politécnica de Cataluña  
España

## Resumen

La determinación de la resistencia a tracción indirecta en las mezclas bituminosas es un parámetro mecánico que puede resultar una herramienta sumamente útil para evaluar la calidad del proceso constructivo de la capa asfáltica. Es importante evitar la disminución de esta resistencia, pues incidirá en el comportamiento en servicio del pavimento.

En el Laboratorio de Caminos de la Universidad Politécnica de Cataluña se ha estudiado la posibilidad de implementación del ensayo de tracción indirecta en el control de ejecución de capas asfálticas.

En forma complementaria a este trabajo se han determinado los módulos resilientes de los testigos y se han correlacionado con las resistencias a tracción indirecta. Mediante el empleo de los métodos analíticos se ha analizado la influencia de las pérdidas de resistencia y módulo en el comportamiento del pavimento.

A medida que desciende la resistencia a tracción indirecta de las mezclas bituminosas y consecuentemente, su módulo resiliente, el número de ciclos de vida en la estructura decrece en forma considerable.

En este artículo se exponen los resultados obtenidos de la vida del pavimento y del espesor equivalente, calculados bajo determinadas hipótesis, considerando la disminución de la resistencia a tracción indirecta.

## Introducción

El proceso de dosificación de una mezcla asfáltica en caliente debe satisfacer una serie

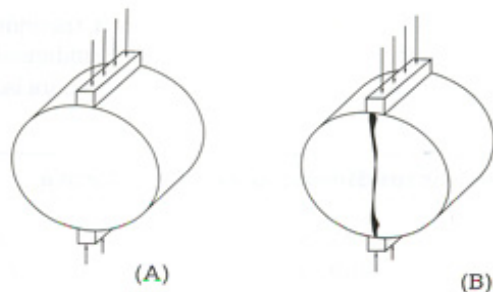
de requisitos que garanticen el buen funcionamiento de la capa una vez puesta en servicio. Para ello se emplea el procedimiento Marshall que se aplica en probetas elaboradas con la mezcla asfáltica y que luego se utiliza como método de control cuando se verifica la calidad de la mezcla fabricada en la planta.

Pero en la etapa final de la ejecución, es decir cuando la mezcla ha sido colocada y compactada, sólo se controla que la capa cumpla los requisitos de espesor y densidad. De este modo, es posible que algún proceso constructivo posterior a la fabricación (transporte, extendido y compactación) haya podido afectar a la mezcla y modificar su calidad, sin ser detectado.

En la Universidad Politécnica de Cataluña se ha desarrollado un proyecto de investigación basado en la aplicación del Ensayo de Tracción Indirecta a 5°C en testigos extraídos del pavimento, con el fin de obtener un parámetro de resistencia a tracción de la capa asfáltica y que resulte útil para comparar la calidad obtenida con la pretendida.

El ensayo de tracción indirecta consiste en deformar por compresión diametral a una probeta cilíndrica situada horizontalmente entre los platos de una prensa. Esta configuración de carga desarrolla una tensión de tracción uniforme en el centro de la probeta, que causa la falla de la misma por fractura a lo largo del plano vertical, como se observa en la figura 1. El valor obtenido es la resistencia máxima a rotura y es considerado como un indicador de la cohesión de la mezcla. En España este ensayo está normalizado según NLT-346/90.

Para evaluar la sensibilidad del ensayo se elaboraron mezclas del tipo denso, semidenso y



**Figura 1: Ensayo de tracción indirecta**  
(a): Configuración de carga y (b): Rotura de la probeta

grueso, de acuerdo a las pautas del pliego de Prescripciones Técnicas Generales español, y se estudió la variación de resistencia con respecto a variables de composición y elaboración de la mezcla, así como de ejecución del ensayo. De este modo se ha podido confirmar que el ensayo permite detectar una modificación en la composición y ejecución de una mezcla, en algunos casos con mayor sensibilidad que la compactación, con la que se podría obtener mayor precisión al evaluar la calidad con que se ha construido una capa asfáltica.

También se aplicó el ensayo de tracción indirecta a testigos extraídos de numerosas obras de la Comunidad Catalana durante un período superior a dos años, estudiando nuevamente mezclas del tipo denso, semidenso y grueso, y correlacionando las resistencias a tracción con el porcentaje de compactación alcanzado. Al graficar los resultados obtenidos para cada muestra se observó una distribución lineal y las pendientes de las rectas calculadas por regresión arrojaron tendencias paralelas en algunos casos.

Como consecuencia del análisis de los resultados obtenidos ha surgido una propuesta de control de calidad adicional, basado en la recomendación de valores mínimos a exigir en la resistencia a tracción indirecta de los testigos, de acuerdo al tipo de mezcla, y en un factor de calidad que relaciona la resistencia media de las probetas con la de los testigos, de tal forma que se pueda cuantificar la diferencia de resistencia media de las probetas con la de los testigos, de tal forma que se pueda cuantificar la diferencia de resistencia ante ambos. El factor de calidad se determina según la expresión:

$$FC = [R_p - (100 - \%C) \cdot b] - R \quad (\text{ecuación 1})$$

Donde:

FC: factor de calidad

$R_p$ : resistencia media de las probetas.

C: porcentaje de compactación admisible.

b: pendiente de la correlación obtenida para los testigos entre la resistencia a tracción indirecta y la compactación.

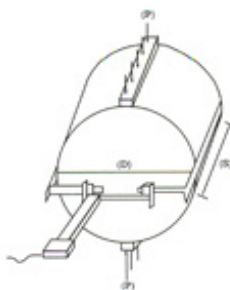
R: resistencia media de los testigos.

El primer término del segundo miembro de la ecuación 1 representa la resistencia teórica de los testigos, considerando el menor grado de compactación admitido en el pliego de la obra. Se ha propuesto establecer un valor máximo para la diferencia entre estas dos resistencias, sugerido en  $4 \text{ kg/cm}^2$ .

El Factor de Calidad, FC, es un indicador directo de la eficiencia de todo el proceso constructivo; cuanto menor sea FC, mayor será la calidad y más semejanza existirá entre el producto final y la mezcla proyectada en laboratorio.

También se ha complementado este análisis mediante la determinación del módulo resiliente, ensayando los testigos extraídos de la capa ejecutada a compresión diametral de modo dinámico, por el procedimiento descrito en la NLT 360/91, figura 2. Luego se han correlacionado con su resistencia a rotura, con el objeto de estudiar el efecto de la disminución de la calidad en la vida del pavimento.

Mediante el empleo de métodos analíticos utilizados en el dimensionamiento de



**Figura 2: Ensayo de compresión diametral y montaje del aparato de medición.** (D: diámetro, s: espesor y P: carga)

pavimentos y de la correlación entre módulo y resistencia, se ha evaluado el efecto de una ejecución deficiente sobre la vida del pavimento. Se han calculado también los esfuerzos necesarios para recuperar esa vida en cada caso estudiado.

## Valores medios de resistencia a tracción indirecta

Para las obras analizadas, se reproducen a continuación los resultados promedios obtenidos de resistencia a tracción indirecta, según el ensayo NLT-346/90, en las figuras 3, 4 y 5.

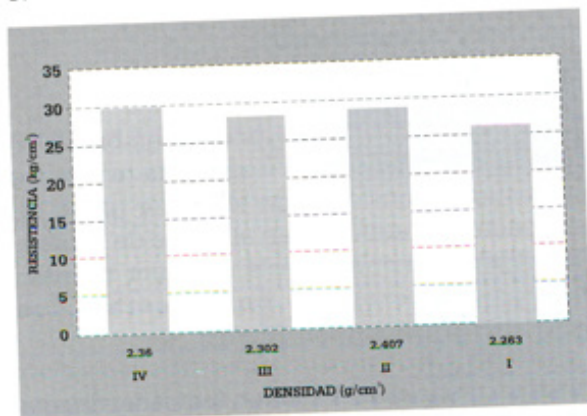


Figura 3: Valores medios de resistencia a tracción indirecta, mezclas densas D-20

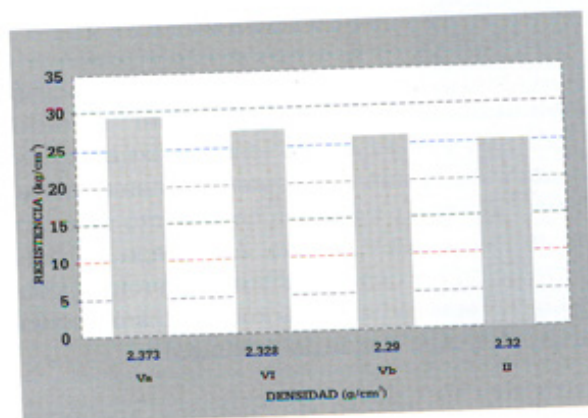


Figura 4: Valores medios de resistencia a tracción indirecta, mezclas semi-densas S-12

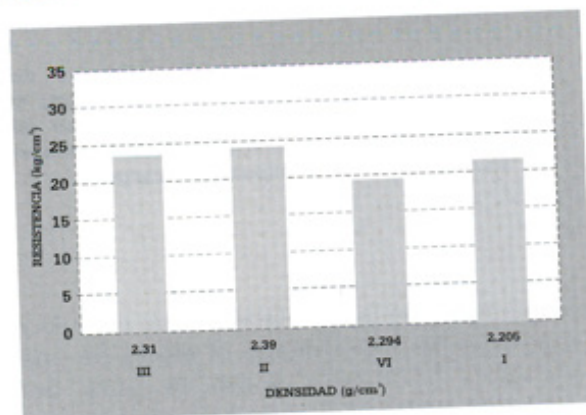


Figura 5: Valores medios de resistencia a tracción indirecta, mezclas gruesas G-20

Como se puede ver, la resistencia a tracción indirecta en las mezclas densas y semidensas varía entre 25 y 30 kg/cm², mientras que para las gruesas es de 20 a 25 kg/cm².

## Valores medios de módulo resiliente

Experimentalmente se ha determinado el módulo resiliente de las mezclas utilizadas en la ejecución de las distintas obras estudiadas. Para ello, se han extraído testigos de los distintos tramos y se han ensayado a compresión diametral. Se han graficado los valores medios obtenidos para mezclas densas, semidensas y gruesas, tal como se observa en las figuras 6 y 7.

En general, el módulo oscila entre 50.000 y 70.000 kg/cm² para el caso de las mezclas densas y semidensas, mientras que para las mezclas gruesas este valor descende a un rango entre 45.000 y 60.000 kg/cm².

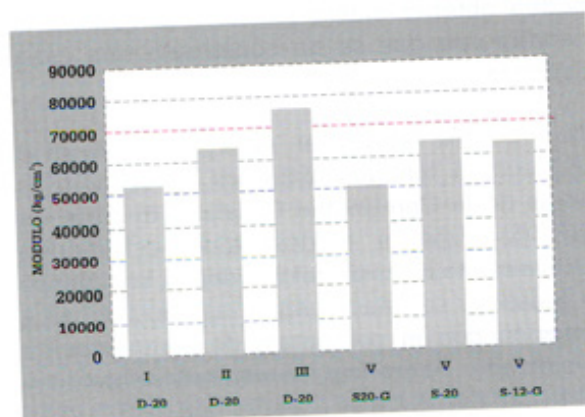


Figura 6: Valores medios del módulo resiliente, mezclas densas y semidensas

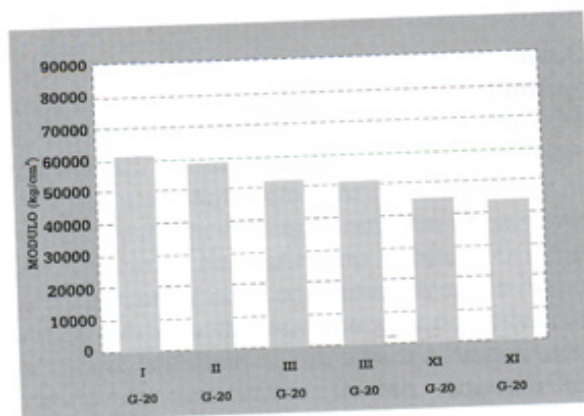


Figura 7: Valores medios del módulo resiliente instantáneo, mezclas gruesas

## Correlación entre ambos parámetros

Se han graficado los valores medios de módulo resiliente y de resistencia a tracción indirecta de cada tipo de mezcla y con cada tamaño máximo, verificando que a mayor resistencia se tendrá mayor módulo y obteniéndose una regresión lineal sobre la nube de puntos, tal como se observa en la figura 8.

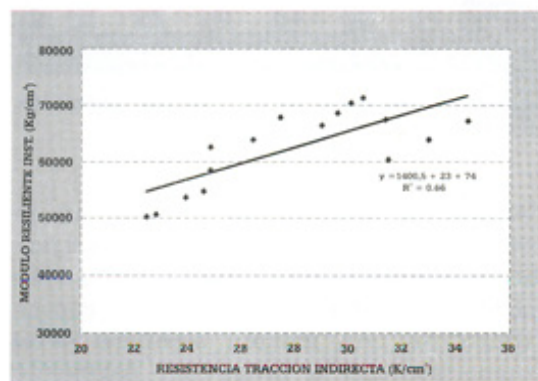


Figura 8: Correlación entre módulo y resistencia a tracción indirecta

Del promedio de todas las mezclas estudiadas se ha obtenido la siguiente ecuación de regresión:

$$M_r = 1412 * R_u + 23069 \quad (\text{ecuación 2})$$

Donde:

- $M_r$ : módulo resiliente, en  $\text{kg/cm}^2$ .  
 $R_u$ : resistencia a tracción indirecta, en  $\text{kg/cm}^2$ .

## Análisis de la vida del pavimento

Para estudiar en qué medida afectaba en la vida del pavimento esta disminución de resistencia a tracción indirecta, se adoptó una sección típica del Catálogo español de la Instrucción de Carreteras, y luego se calcularon los ciclos de carga equivalentes que el espesor de capa bituminosa soportaría al disminuir su módulo. A partir de esta nueva vida del pavimento se calculó el espesor equivalente suponiendo que no se hubiese producido tal disminución de módulo.

### A. Hipótesis de cálculo

Para la evaluación del efecto producido por la disminución del módulo en la capa bituminosa, se han planteado dos hipótesis de cálculo:

#### Hipótesis 1:

Al disminuir la resistencia a tracción indirecta de la capa disminuye su módulo, pero mantiene su ley de fatiga. En este caso se ha determinado la reducción de la vida del pavimento por efecto del menor módulo de la mezcla y el espesor equivalente de capa, que para el caso de una construcción correcta, soportaría el mismo número de aplicaciones de carga.

#### Hipótesis 2:

Se ha propuesto que el comportamiento a fatiga de la mezcla bituminosa está dado, al igual que para los materiales tratados con cemento, por la relación  $\sigma_r/\sigma_u$ , donde:

$\sigma_r$ : tensión a que está sometida la mezcla en el pavimento.

$\sigma_u$ : tensión de rotura de la mezcla a tracción indirecta.

Al disminuir la calidad de la mezcla aumenta la relación  $\sigma_r/\sigma_u$ . Para evaluar esta situación, se ha calculado el espesor del pavimento equivalente para una mezcla que estuviese bien ejecutada, es decir, sin disminuir su módulo, y que tuviese esa misma relación de tensiones.

### B. Sección estudiada

Se ha adoptado la sección 132 de la Instrucción de Carreteras 6.1 y 6.2 (1990), correspondiente a un tráfico T1, sobre una explanada E3, con las siguientes características:

|               |                                                            |
|---------------|------------------------------------------------------------|
| Tráfico T1:   | intensidad media diaria entre 800 y 2000 vehículos pesados |
| Explanada E3: | CBR mayor o igual a 20                                     |
| Espesores:    | Capa bituminosa: 25 cm                                     |
|               | Capa granular: 25 cm                                       |

Módulos considerados:

Capa bituminosa: el módulo de la capa asfáltica está relacionado con su resistencia según la

| Caso N° | R.T.I.(k/cm <sup>2</sup> ) | Módulo(k/cm <sup>2</sup> ) |
|---------|----------------------------|----------------------------|
| 1       | 40                         | 79545                      |
| 2       | 35                         | 72486                      |
| 3       | 30                         | 65426                      |
| 4       | 25                         | 58367                      |
| 5       | 20                         | 51307                      |
| 6       | 15                         | 44248                      |

Tabla 1: Valores de módulo resiliente correlacionados con la resistencia a tracción

ecuación 2, habiéndose empleado los valores de la tabla 1.

Capa granular: 5000 kg/cm<sup>2</sup>  
 Explanada: 2000 kg/cm<sup>2</sup>

Módulo de Poisson:  
 Capa bituminosa: 0.35  
 Capa granular: 0.30  
 Explanada: 0.40

Adherencia entre capas:  
 Entre capa bituminosa y capa granular: adherencia  
 Entre capa granular y explanada: No adherencia

#### C. Análisis bajo hipótesis 1

Aplicando un programa de cálculo comercial, para resolver el modelo de comportamiento mecanicista basado en las hipótesis de Burmister - materiales elásticos en un macizo multicapa - se ha determinado la variación de la deformación tangencial que se produce en la base de la capa asfáltica para un eje tipo de 13 toneladas al disminuir su módulo.

A partir de estos datos y empleando la ley de fatiga de la ecuación 3, se ha calculado la vida de fatiga del pavimento en función de la resistencia y del módulo conseguido en su compactación, como se puede observar en la figura 9.

$$et = 3.98L \cdot N^{-0.24} \quad (\text{ecuación 3})$$

Luego, utilizando el mismo procedimiento, se ha calculado el espesor equivalente de la capa, suponiendo que la mezcla se hubiese ejecutado en óptimas condiciones, es decir con el mayor valor de módulo, para la vida de fatiga determinada en cada caso. La diferencia de estos espesores comparado con los 25 cm de proyecto representa, bajo esta hipótesis de

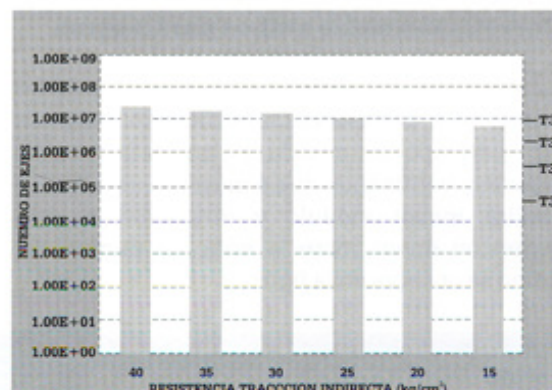


Figura 9: Variación de la vida del pavimento. Hipótesis 1

cálculo, la pérdida de calidad en la construcción, tal como se aprecia en la figura 10. De acuerdo con esta hipótesis, la pérdida de módulo y resistencia de la mezcla supone reducir de una manera significativa el comportamiento a fatiga del pavimento construido.

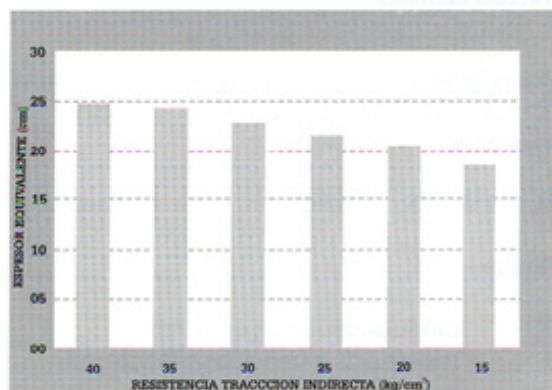


Figura 10: Espesor de capa equivalente a la mezcla patrón. Hipótesis 1

#### D. Análisis bajo hipótesis 2

Se ha iniciado el cálculo partiendo de la relación de tensiones entre  $\sigma/\sigma_c$ , obtenida para la sección adoptada. Luego se ha determinado el espesor equivalente de la capa, disminuyendo el módulo, como si se hubiera construido en óptimas condiciones (resistencia a rotura de 40 kg/cm<sup>2</sup>) y encontrándose sometida, por tanto, a la misma relación de tensiones. Figuras 11 y 12.

En la figura 13 se ha representado el número de aplicaciones que soportarían estas secciones,

determinadas con la ley de fatiga antes mencionada.

$$\frac{\sigma_t}{\sigma_r} = \frac{\sigma_{\text{tracción}}}{40 \text{ kg/cm}^2} \quad (\text{ecuación 4})$$

Aplicando esta segunda hipótesis de cálculo, la incidencia de la pérdida de calidad es aún mayor. Si la resistencia de la mezcla se reduce en un 50% (que en este caso sería de 20 kg/cm<sup>2</sup>), el pavimento construido no alcanzaría a

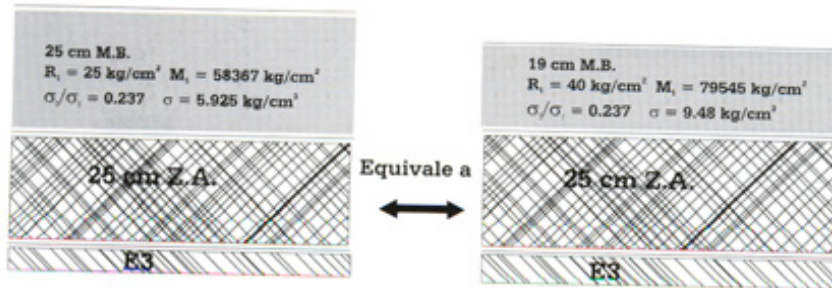


Figura 11: Disminución de módulo y espesor equivalente manteniendo la relación de tensiones

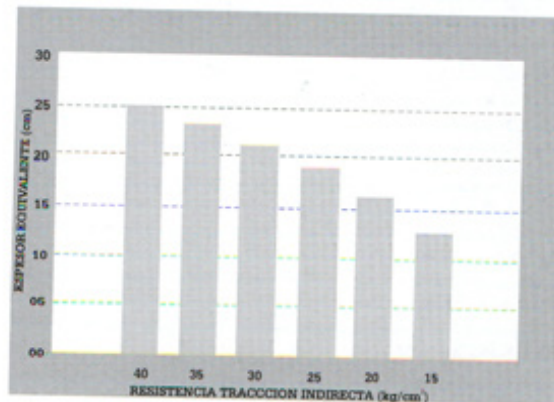


Figura 12: Espesor de capa equivalente a la mezcla patrón. Hipótesis 2

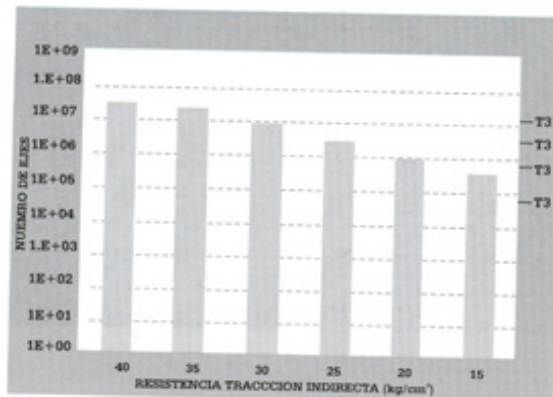


Figura 13: Variación de la vida del pavimento. Hipótesis 2

soportar ni el tráfico correspondiente a la categoría de proyecto T2 (entre 200 y 800 vehículos pesados diarios). La reducción de espesores es muy significativa.

## Cálculo de Refuerzos

Si se quisiera mantener el comportamiento de la mezcla de proyecto, habría que calcular el espesor de capa necesario, considerando las distintas condiciones de ejecución que han provocado la disminución del módulo. Los resultados de espesores calculados para esta situación se pueden observar en las figuras 14 y 15 para cada hipótesis respectivamente.

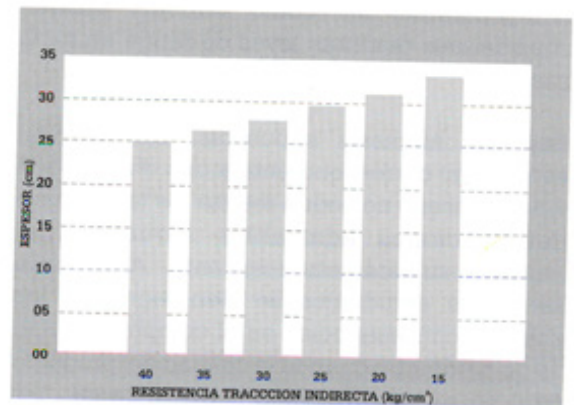


Figura 14: Espesor de refuerzo. Hipótesis 1

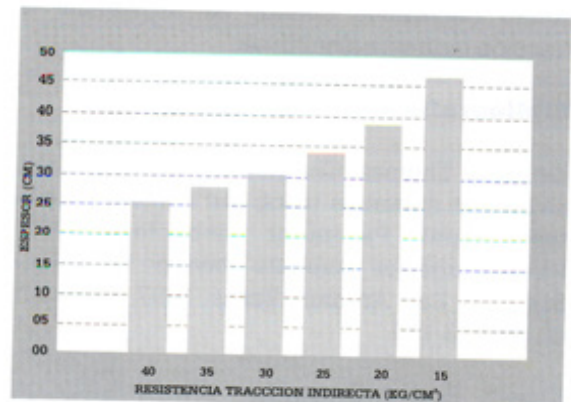


Figura 15: Espesor de refuerzo. Hipótesis 2

## Conclusiones

Se han podido correlacionar los valores de resistencia a tracción indirecta con los de módulo resiliente de testigos extraídos de numerosas obras y analizar el efecto de la pérdida de calidad en la ejecución de la capa

asfáltica, a partir de una disminución de la resistencia a tracción indirecta.

A modo de ejemplo, se ha descrito un caso sencillo, aunque también es posible analizar secciones estructurales haciendo una discriminación en la calidad de capa ligada, es decir, diferenciando la capa de rodadura, la intermedia y la de base, y planteando la posibilidad de ejecución deficiente en cualquiera de ellas, para determinar la situación más perjudicial en un caso real.

El análisis aquí planteado puede profundizarse al estudiar la variación de los parámetros obtenidos para cada tipo de mezcla en forma independiente, así como también pueden considerarse distintas leyes de fatiga en cada caso.

Bajo las hipótesis supuestas, una sección estructural correspondiente a una determinada vida de diseño no podría resistir las tensiones o deformaciones admisibles requeridas al reducirse su parámetro resistente. A través de los casos estudiados se han expuesto las posibles consecuencias en el comportamiento de un parámetro cuando la calidad del producto final no se ha controlado correctamente. Es posible evaluar el costo de la falta de calidad comparando los espesores de refuerzo que serían necesarios cuando la resistencia a tracción indirecta disminuye.

## Bibliografía

Kennedy, Thomas. Characterization of asphalt pavement materials using the indirect tensile test. Asphalt Pavement Technology 1997. Proceedings of Asphalt Paving Technical Sessions. San Antonio, Texas. 1997. Volumen 46, pp. 133-150.

Khosla, Paul y Omer, M. Characterization Research Record 1034. Transportation Research Board. National Research Council, Washington D.C. 1985, pp. 47-55.  
Normas españolas NLT - 346-90: Resistencia a compresión diametral (ensayo brasileño) de mezclas bituminosas.

Perez Jiménez Felix, Miro Rodrigo y Martínez Adriana. Empleo del ensayo de tracción indirecta para el control de calidad de la

ejecución de mezclas bituminosas. X Congreso Ibero-Latinoamericano del Asfalto. Asociación Española de la Carretera. Sevilla, España. 1999, pp. 869-878.

Read, John y Collop, Andrew. Practical fatigue characterization of bituminous paving mixtures. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists. Proceedings of the Technical Sessions, Salt Lake City, Utah. Volumen 66. The Association of Asphalt Paving Technologists. Ann Arbor. 1997, pp. 74 - 108.

