

Control de ejecución de las mezclas bituminosas mediante el ensayo de tracción indirecta. Experiencias en España y Argentina.

RESUMEN

El control de calidad de elaboración de una mezcla asfáltica en caliente, tanto en Argentina como en España, se realiza evaluando la composición de la mezcla y los parámetros obtenidos según el procedimiento Marshall. Una vez colocada y compactada la mezcla, el control consiste en la extracción de testigos de los que se determina su espesor y su densidad. Con esta metodología no se consideran los parámetros mecánicos de la capa asfáltica una vez ejecutada.

Por esta razón, en el Laboratorio de Caminos de la Universidad Politécnica de Cataluña se ha desarrollado un proyecto de investigación basado en la aplicación del ensayo de tracción indirecta en testigos extraídos del pavimento. De las condiciones obtenidas ha surgido un criterio de aceptación de la mezcla bituminosa que permite evaluar su calidad mecánica y no sólo su compacidad.

Actualmente se está realizando un estudio en el Laboratorio de Pavimentos e Ingeniería Vial de la Universidad Nacional de La Plata en forma conjunta con el Área Vías de Comunicación de la Universidad Nacional del Comahue, tendiente a evaluar la posible implementación de este método en Argentina.

En esta comunicación se describen la mencionada propuesta y un análisis de los resultados obtenidos en ambos países.

INTRODUCCION

La mezcla bituminosa es el material que constituye las capas asfálticas del firme, está compuesta por una combinación de áridos y de un ligante que, en función de la granulometría de los áridos y del porcentaje de betún puede tener propiedades muy diferentes y contrapuestas. La rigidez, tenacidad, resistencia a la fatiga, resistencia a las deformaciones plásticas, resistencia a la acción del agua, son propiedades que debe presentar en mayor o menor grado una mezcla asfáltica y que dependen de la dosificación y características de los materiales empleados.

Sin embargo, el control de la calidad del producto suele establecerse sistemáticamente sobre la resistencia a las deformaciones plásticas (estabilidad Marshall), olvidando otras propiedades que pueden resultar más significativas para el comportamiento del material en relación con el tipo de solicitaciones a que va a estar sometido.

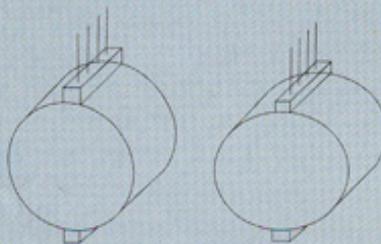
Además, el control sobre la calidad de la mezcla se realiza sobre el material fabricado en planta, no sobre el producto una vez extendido y compactado en el firme. Durante el proceso de transporte, extendido y ejecución pueden producirse fallos y deterioros, como escurrimiento de ligante, segregación del árido grueso, trituración del material mineral, etc., que pueden influir en la calidad del producto final y que no se consideran, ni se detectan.

El control sobre el producto final se reduce normalmente al control de su compacidad. Suele exigirse que la mezcla colocada alcance una densidad del 98 al 100% del valor de referencia, determinado en probetas fabricadas con la mezcla utilizada. El control de la calidad queda así depositado sobre:

- La compacidad de la mezcla, determinada mediante la realización de ensayo de extracción.
- Estabilidad y contenido de huecos de la mezcla, verificado mediante la realización del ensayo Marshall sobre el producto fabricado en planta.
- Compacidad conseguida en la ejecución, mediante la extracción de testigos, comparando su densidad con la Marshall patrón.

Cualquier variación en la composición y calidad de los materiales que no afecte a las características Marshall de la mezcla fabricada o que no rebaje la densidad final de los testigos no será puesta de manifiesto en todo el proceso de control. Sin embargo, la experiencia está poniendo de manifiesto que las mezclas colocadas presentan otros problemas, como baja cohesión, escasa flexibilidad, bajo módulo, poca estabilidad, etc., que no son detectados y que, por lo tanto, debería ampliarse el control sobre el producto final.

Además, en el caso de emplear únicamente el control de densidades sobre el producto final, queda la incógnita, a la hora de tomar la decisión de aceptar o rechazar la capa, de cual es su resistencia mecánica. Evaluar mediante algún tipo de ensayo esta propiedad permitiría estudiar el comportamiento del firme y de la capa construida y analizar la posibilidad de su aceptación, penalización o rechazo.



A(a)

B(b)

Figura 1. Determinación de la resistencia a tracción indirecta
(a) Configuración de carga
(b) Rotura de la probeta

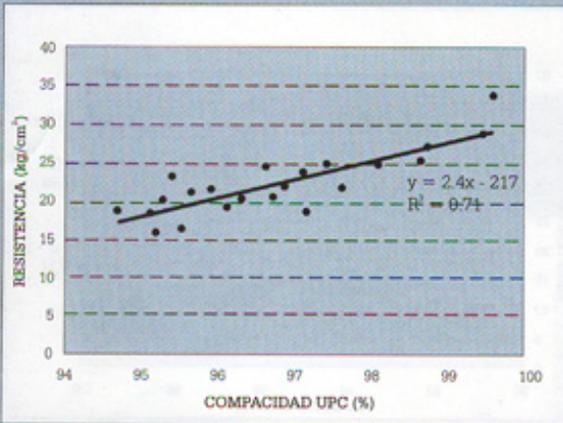


Figura 2. Variación de la resistencia a tracción indirecta con el porcentaje de compactación obtenido

Es por ello que el Laboratorio de Caminos de la Universidad de Cataluña ha querido estudiar un procedimiento de control basado en la determinación de la resistencia a tracción de la mezcla colocada, ensayando los testigos extraídos de la capa ejecutada por el procedimiento descrito en la NLT 346-90, para la determinación de su resistencia a tracción indirecta a 5°C. La elección de este procedimiento se debe a que los ensayos pueden realizarse directamente sobre los testigos extraídos del firme para el control de densidades, no siendo necesaria ninguna actuación suplementaria sobre él.

Para la determinación de la resistencia a tracción de la mezcla, se ensayan los testigos a compresión diametral, Figura No 1, aplicando una carga estática a una velocidad constante de deformación de 50.8 mm/min a una temperatura de 5°C. En la rotura de estos testigos se obtiene una curva tensión-deformación, cuya área representa la energía de rotura del material, que está relacionada con el comportamiento de la mezcla a fatiga.

A la temperatura de 5°C a que se realiza el ensayo, la mezcla se comporta como un material rígido, y su resistencia máxima de rotura está relacionada con la compactación de la mezcla, con la dureza de los áridos y con el porcentaje y calidad del mástico empleado, factores todos ellos que determinan la calidad de la mezcla y la de su ejecución.

Los objetivos del proyecto de investigación desarrollado en el Laboratorio de Caminos fueron:

- Analizar la sensibilidad del ensayo con respecto a la variación de la calidad y cantidad de los componentes de la mezcla.
- Evaluar la relación entre la resistencia a tracción indirecta y la compactación obtenida en testigos extraídos de diferentes obras.
- Proponer, a partir del análisis de los resultados obtenidos, un criterio de aceptación de mezcla colocada, así como umbrales mínimos para la resistencia a tracción indirecta de las mezclas de tipo denso, semidenso y grueso del Pliego de Prescripciones Técnicas Generales Español (PG-3-75)

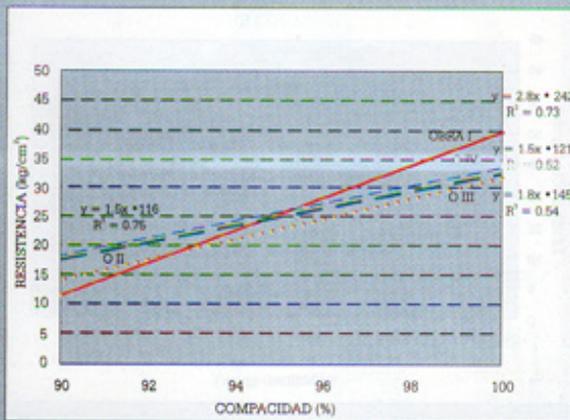


Figura 3. Correlación entre resistencia y compactación, mezclas densas D-20

RESULTADOS OBTENIDOS EN ESPAÑA

Para alcanzar el primer objetivo se elaboraron mezclas del tipo denso, semidenso y grueso, de acuerdo a las pautas del PG-3 y se estudió la variación de resistencia con respecto a las siguientes variables:

- Variables de composición de la mezcla:
 Contenido de asfalto, tipo de asfalto (convencional), naturaleza del agregado, granulometría del agregado, tamaño máximo del agregado.

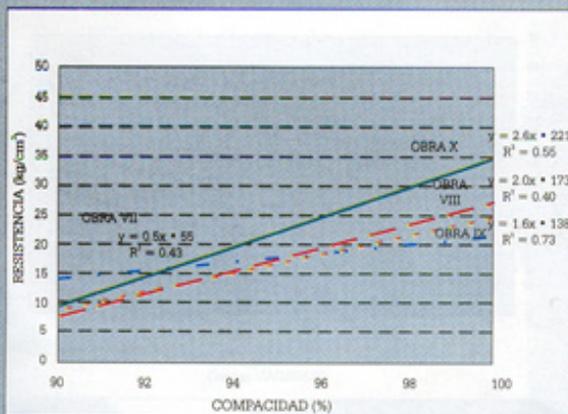


Figura 4. Correlación entre resistencia y compactación, mezclas semidensas S-12



• Variables de elaboración de la mezcla:

Temperatura y energía de compactación, altura de la probeta, temperatura del molde.

• Variables de ejecución del ensayo:

Temperatura del ensayo, velocidad de aplicación de la carga, inmersión de probetas en agua.

De esta etapa se ha confirmado 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 lo que se podría obtener mayor precisión al evaluar la calidad de una capa ejecutada.

Con respecto a las tareas desarrolladas para el segundo objetivo, se aplicó el ensayo de tracción indirecta a testigos extraídos de diferentes pavimentos flexibles de la región de Cataluña, durante un período superior a dos años, evaluando también mezclas del tipo denso, semidenso y grueso, elaboradas con ligantes convencionales, 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, mientras que las pendientes de las rectas calculadas por regresión mostraban tendencias paralelas en algunos casos.

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 entre ambos. Figura No 2. El factor de calidad se determina según la expresión:

$$FC = [R_p - (100 - \%C) * b] - R_t \quad \text{ec. 1}$$

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_t: resistencia media de los testigos

La expresión dentro del corchete representa la resistencia teórica de los testigos, considerando el menor grado de compactación admitido en el pliego de la obra. 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 se tendrá entre el producto final y la mezcla proyectada en laboratorio.

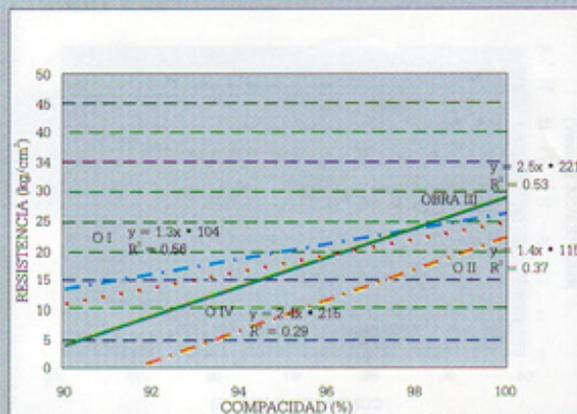


Figura 5. Correlación entre resistencia y compactación, mezclas gruesas G-20.

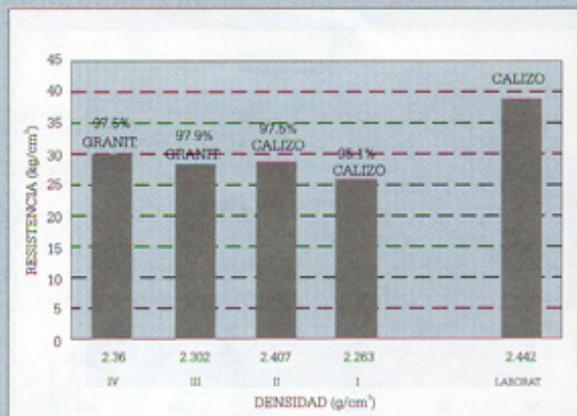


Figura 6. Valores medios de resistencia, densidad y compactación, mezclas D-20.

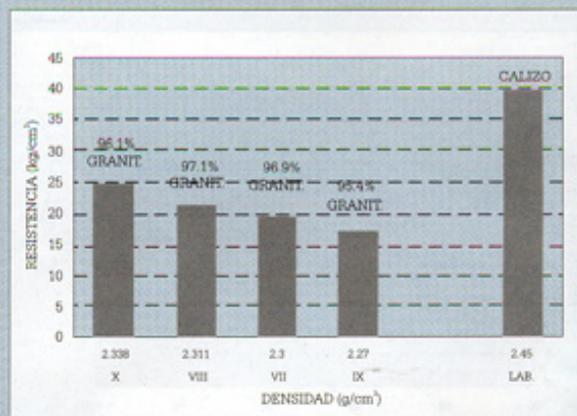


Figura 7. Valores medios de resistencia, densidad y compactación, mezclas S-12.

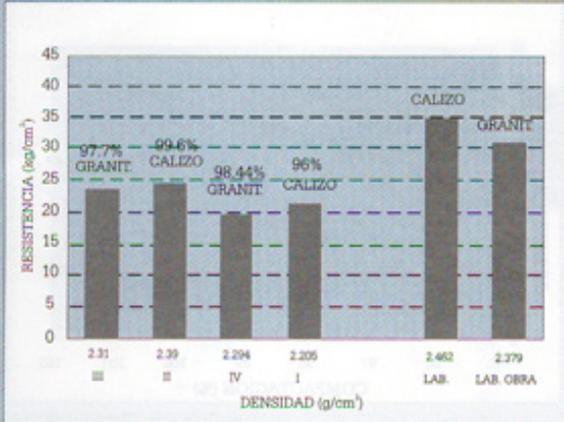


Figura 8. Valores medios de resistencia, densidad y compactación, mezclas G-20.

Relación entre la resistencia y la compactación

Se exponen a continuación algunos de los resultados obtenidos al correlacionar los dos parámetros estudiados, en las figuras No 3, 4 y 5, correspondientes a mezclas densas D-20, semidensas S-12 y gruesas G-20 respectivamente.

Se puede observar que, para las mezclas densas las pendientes oscilan entre 1.5 y 2.8, con un error típico máximo de 3 kg/cm². Las mezclas S-12 presentan mayor variación en este parámetro, desde 0.8 hasta 2.6. Precisamente fueron estas las mezclas que presentaron inconvenientes durante la etapa del control de calidad por no alcanzar las densidades especificadas. El error cometido en la estimación de valores es del mismo orden que en el caso de las mezclas densas.

Para las mezclas gruesas se observan pendientes entre 1.3 y 2.5, con un error un poco mayor que los casos anteriores. Para todas las mezclas estudiadas se han calculado sus

MEZCLA	OBRA	Resist. Promedio (kg/cm ²)	Compact. Media (%)	Densidad Media (g/cm ³)	Densidad Marshall (g/cm ³)	Nº testigos	Error Típico (kg/cm ²)	Desvío Standard (kg/cm ²)	Costo de Variación
D-20	I	25,9	95,1	2,263	2,38	8	2,61	4,59	0,18
D-20	II	28,7	97,5	2,407	2,47	11	1,79	3,37	0,12
D-20	III	28,3	97,9	2,302	2,35	17	3,11	4,43	0,16
D-20	IV	29,8	97,5	2,36	2,42	54	2,96	4,22	0,14
S-12 G	VII	19,4	96,9	2,37	2,37	24	2,14	2,78	0,14
S-12 G	VIII	21,6	97,1	2,38	2,38	7	2,93	3,46	0,16
S-12 G	IX	17,1	95,4	2,38	2,38	8	1,82	3,27	0,19
S-12 G	X	24,8	96,1	2,43	2,43	18	3,33	4,82	0,19
G-20	I	21,2	96,0	2,30	2,30	25	1,87	2,75	0,13
G-20	II	24,1	99,6	2,40	2,40	22	2,51	3,07	0,13
G-20	III	23,4	97,78	2,36	2,36	7	1,44	3,18	0,14
G-20	IV	19,2	98,4	2,33	2,33	30	4,12	4,8	0,25

Tabla 1. Valores medios y estadística descriptiva de las mezclas D-20, S-12 y G-20.

MEZCLA	Ruta	Resist. Promedio (kg/cm ²)	Compact. Media (%)	Densidad Media (g/cm ²)	Nº testigos	Error Típico (kg/cm ²)	Desvío Standard (kg/cm ²)	Coef de Variación
Carpeta (asf. modif)	A1	35,17	99,5	2,413	27	2,62	4,37	0,12
Carpeta (asf. modif)	A2	33,27	99,1	2,384	51	2,52	4,22	0,13
Carpeta (asf. Conv.)	B	29,27	98,9	2,359	26	1,64	2,88	0,10

Tabla 2. Valores medios y estadística descriptiva de las mezclas para carpeta, rutas A y B.



valores medios de resistencias y compacidades, comparándolos con aquellos obtenidos con las probetas elaboradas en el laboratorio, fabricadas con un 4.5% de betún convencional B-60/70 y agregados gruesos calizos o granificos, tal como se observa en las Figuras No 6, 7 y 8.

Esta información se puede apreciar en la Tabla No. 1 donde se presentan los datos de resistencia, compactación y densidad promedio, densidad Marshall para cada caso, el número de testigos extraídos, el error típico, el desvío estándar y el coeficiente de variación.

Propuesta de control de calidad

La aplicación del ensayo de tracción indirecta al control de calidad de testigos se extendió a mezclas con otros tamaños máximos también (D-12, S-20 y G-20), y del análisis de los resultados obtenidos se ha podido resumir lo siguiente:

Mezclas D-20: los valores de compactación obtenidos varían entre el 95.1 y el 97.9%. La resistencia tanto con áridos granificos como con áridos calizos es muy próxima a 30 kg/cm² para las compacidades más altas. La resistencia obtenida en laboratorio para un árido calizo es de 38 kg/cm² para el 100% de compactación.

Mezclas D-12: la compactación obtenida en obra con estas mezclas ha sido alrededor del 95% y una resistencia de 20 kg/cm². La resistencia obtenida en laboratorio supera los 35 kg/cm² tanto con árido granífico como con calizo, siendo incluso mayor que la alcanzada por la mezcla D-20.

Mezclas S-20: la compactación varía entre el 95 y el 98.6% siendo lo más frecuente superar el 97% cuando estas mezclas son colocadas en capas gruesas. La resistencia obtenida es ligeramente inferior a las obtenidas con las mezclas D-20 y varía entre 25 y 30 kg/cm². Las resistencias obtenidas en el laboratorio son similares a la obtenida para la mezcla D-20 con el agregado calizo, y supera los 30 kg/cm² con agregado granífico.

Mezclas S-12: la compactación conseguida en obra es más bien baja, estando comprendida normalmente entre el 95 y 97%. Sus resistencias son conformes con esta baja compactación, con un valor medio obtenido de 20 kg/cm². Por el contrario, la resistencia obtenida en el laboratorio es mucho más alta, 40 kg/cm², superando la de la mezcla S-20 fabricada con el mismo tipo de agregado.

Mezclas G-25: la compactación conseguida en obra es normalmente muy alta, superando el 99%. La resistencia también es alta, varían entre 25 y 30 kg/cm², de modo similar que las mezclas S-20 y D-20. Las resistencias de obra y laboratorio no pueden compararse directamente porque los porcentajes de ligante empleados en uno y otro caso son diferentes, alrededor del 3.8% para las capas ejecutadas en obra y del 4.5% en laboratorio.

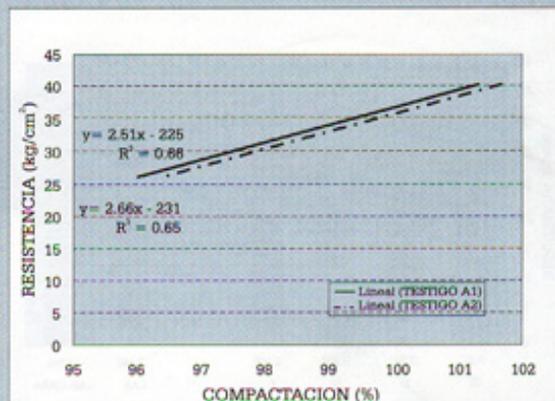


Figura 9: Correlación entre resistencia y compactación, mezclas para carpeta, ruta A.

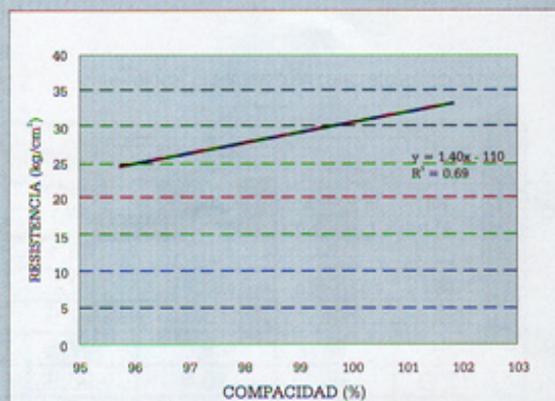


Figura 10: Correlación entre resistencia y compactación, mezclas para carpeta, ruta B.

Mezclas G-20: la compactación obtenida normalmente supera el 97%. La resistencia obtenida en obra es inferior a las mezclas S-20 y D-20, variando entre 20 y 25 kg/cm². Esta diferencia puede ser normal teniendo en cuenta el menor porcentaje de ligante empleado con estas mezclas. La resistencia obtenida en laboratorio para la mezcla G-20 fabricada con un 4.5% de betún es también, por su menor contenido en finos, ligeramente inferior a las conseguidas con las mezclas S-20 y D-20.

Comparando los distintos tipos de mezcla entre sí, se puede notar que las mezclas tipo D-12 y S-12 son las que mayores diferencias presentan entre la compactación y resistencias obtenidas en obra y en laboratorio. Estas mezclas han sido ejecutadas normalmente en capas delgadas y ponen en

evidencia el problema existente en la ejecución de estas capas, pues, mezclas muy trabajables y fáciles de compactar en laboratorio, presentan una menor compactación y resistencia una vez colocadas. Es probable que se haya producido una pérdida importante de temperatura debido al menor espesor de las mismas capas, y en consecuencia hayan disminuido su compactación y resistencia.

A partir de estos resultados se han propuesto unas resistencias mínimas a exigir a las mezclas de acuerdo con su tipo de granulometría.

Mezclas D-20 y S-20:	25 kg/cm ²
Mezclas D-12 y S-12:	20 kg/cm ² y deseable 25 Kg/cm ²
Mezclas G-25 y G-20:	20 kg/cm ²

Con respecto al factor de calidad, y de acuerdo a los valores obtenidos, la diferencia máxima que podría admitirse entre las dos resistencias en una obra bien realizada, considerando que la resistencia de los testigos puede ser un poco menor por su superficie irregular y la posibles dispersiones del ensayo, no debería superar los 3 o 4 Kg/cm².

RESULTADOS OBTENIDOS EN ARGENTINA

A partir de esta propuesta, el Laboratorio de Pavimentos e Ingeniería Vial de la Universidad Nacional de La Plata ha iniciado un proyecto de investigación tendiente a evaluar la posible implementación en Argentina de esta metodología de control adicional. El objetivo principal es conocer los valores de resistencia a tracción indirecta de las mezclas elaboradas en nuestro país, teniendo en cuenta tanto el efecto de los diferentes materiales como el de las técnicas constructivas locales. Esta iniciativa amplía el campo de investigación, incorporando al estudio mezclas elaboradas con asfaltos modificados.

Se exponen a continuación, los primeros resultados obtenidos, en dos rutas de la Provincia de Buenos Aires que han sido repavimentadas durante el pasado año. En una de ellas se ha empleado un asfalto modificado con polímeros.

Relación entre la resistencia y la compactación

Se han ensayado testigos de carpetas de concreto asfáltico (mezclas para capas de rodadura) de la ruta A, conteniendo un 5% de asfalto modificado B-65, y de la ruta B, con un 5.1% de asfalto convencional 70-100.

Aunque se observan dispersiones en los resultados, todos los grupos de muestras han correlacionado su resistencia a tracción indirecta con el porcentaje de compactación. Para el caso de la ruta A, se han comparado dos series distintas de testigos (A1 y A2), y de acuerdo al resumen de la Tabla 2 y la Figura No 9, se puede apreciar que los valores promedio de resistencia y compactación son semejantes, al igual que los demás parámetros estadísticos. Para el caso de la ruta B, también se observa una correlación, tal como lo indica la Figura 10 y la Tabla 2.

Análisis de los resultados obtenidos.

Para los testigos de la ruta A, los resultados han sido similares en los dos tramos estudiados, y todos los valores de resistencia oscilan entre 22.8 y 42.2 kg/cm², con porcentajes de compactación entre 96 y 101.7%. De acuerdo a las tendencias obtenidas, la resistencia a tracción indirecta de los testigos para el 100% de compactación es de aproximadamente 35 kg/cm².

Para los testigos de la ruta B, todos los valores de resistencia a tracción indirecta oscilaron entre 22.7 y 34.9 kg/cm², con porcentajes de compactación entre 65.7 y 101.8%. Para el 100% la resistencia es de aproximadamente 30 kg/cm².

Si se comparan ambas rutas, se puede observar que los valores mínimos de resistencia a tracción indirecta son semejantes, mientras que en la ruta A, donde la mezcla se ha elaborado con un asfalto modificado, se han conseguido mayores pendientes en las rectas de regresión.

También se ha analizado el efecto del espesor de los testigos extraídos, pues se detectó un rango de compactación óptima, entre 4 y 5 cm. Para valores mayores o menores, las resistencias disminuían un 10% aproximadamente. Nuevamente se manifiesta la posibilidad de que una capa más delgada se enfríe con mayor rapidez y su cohesión disminuya, mientras que una capa demasiado gruesa pueda resultar más difícil de compactar.

CONCLUSIONES

Los ensayos realizados en el Laboratorio de Caminos de la Universidad Politécnica de Cataluña han puesto de manifiesto una serie de resultados que avalan y posibilitan claramente la aplicación del ensayo de tracción indirecta en el control de la ejecución de las mezclas bituminosas, habiendo incluso permitido recomendar unos umbrales mínimos de calidad a conseguir en cada una de las mezclas estudiadas y establecer un factor de calidad en función de la diferencia entre la resistencia de la mezcla fabricada y la conseguida tras su extensión y compactación en obra.



Con respecto a las experiencias obtenidas en el Laboratorio de Pavimentos e Ingeniería Vial de la Universidad Nacional de La Plata, es importante comentar que estos resultados aún corresponden a una etapa inicial del proyecto, de puesta a punto de la metodología propuesta y entrenamiento del personal técnico designado para la realización de las actividades de rutina. En el desarrollo de este proyecto, estará incluido un seguimiento periódico de las obras seleccionadas y en cada una de ellas se llevarán a cabo las siguientes tareas:

- Extracción de muestras de la planta asfáltica para moldear probetas y ejecutar los ensayos de caracterización de la mezcla, incluido el ensayo de tracción indirecta.
- Extracción de testigos de la capa de concreto asfáltico compactada para la determinación de su densidad y rotura de los mismos mediante el ensayo a tracción indirecta.
- Correlación entre los valores de resistencia a tracción indirecta con los porcentajes de compactación conseguidos en obra.
- Comparación entre los valores de resistencia a tracción indirecta de probetas y testigos para cada sección de ruta estudiada.

Se considera que, luego de un período de dos a tres años, donde se haya reunido la información necesaria, se podría redactar una propuesta de especificación técnica, que represente un aporte significativo para el control de calidad de los pavimentos elaborados con mezclas bituminosas.

BIBLIOGRAFIA

1. 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.
2. Martínez Adriana, Bianchetto Hugo, Nosetti Adrián y Daguerre Lisandro. Control de calidad de mezclas bituminosas mediante el ensayo de tracción indirecta. Un ejemplo de aplicación. XXXI Reunión del Asfalto 2000. Comisión Permanente del Asfalto. Córdoba, Argentina. 13 de noviembre de 2000.

3. MOPU (Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo de España), Dirección General de Carreteras. Recomendaciones sobre mezclas bituminosas en caliente. Circular No. 299/89T. Madrid, España. 23 de febrero de 1989.

4. Normas españolas NLT-346/90: Resistencia a compresión diametral (ensayo brasileño) de mezclas bituminosas.

5. Pérez Jiménez Félix, Miró 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.

