

PROPUESTA METODOLÓGICA PARA EL ESTUDIO GLOBAL DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LAS MEZCLAS BITUMINOSAS EN FRÍO

Breixo Gómez Meijide
Universidade da Coruña
breixo.gomez.meijide@udc.es

Ignacio Pérez Pérez
Universidade da Coruña
iperez@udc.es

Ana Rodríguez Pasandín
Universidade da Coruña
arodriguezpa@udc.es

Sabas Corraliza Tejeda
Director Técnico en ECOASFALT
scorraliza@ecoasfalt.es

RESUMEN

A pesar de haber sido empleadas durante décadas, el comportamiento mecánico de las mezclas bituminosas en frío no ha sido estudiado en la misma medida que el de las mezclas en caliente. Prueba de ello es la falta de desarrollo de Normas de ensayos específicos para las mismas, lo que lleva a muchos investigadores a emplear procedimientos más propios de mezclas en caliente, aun cuando no son adecuados para el estudio de las mezclas en frío. En la presente investigación se propone una nueva metodología que permite estudiar propiedades mecánicas como la resistencia a compresión simple, la resistencia a tracción indirecta y el módulo resiliente, no solo de un modo independiente, sino también de una forma global, relacionando las propiedades entre sí. La aplicabilidad y consistencia del método propuesto es discutida y se muestra un ejemplo de aplicación, del que se pueden obtener nuevas conclusiones sobre las mezclas en frío.

1 INTRODUCCIÓN

Las mezclas bituminosas en frío han sido (y siguen siendo) consideradas inferiores a las mezclas en caliente debido a características, como su alto contenido de huecos, baja resistencia en etapas tempranas de maduración o largos periodos de curado, a veces necesarios, hasta alcanzar desarrollar todo su potencial (Thanaya et al., 2009).

Sin embargo, las mezclas en frío presentan también numerosas características particulares que las hacen más adecuadas que las mezclas en caliente en determinados usos y aplicaciones. Así, por ejemplo, su producción supone ahorros energéticos, son más respetuosas con el medio ambiente y mejoran las condiciones de seguridad y salud de los operarios. Desde el punto de vista mecánico, son más flexibles, lo que les permite adaptarse sin fisurar a las deformaciones de las explanadas, sobre todo cuando éstas son de baja calidad (caso habitual, por ejemplo, en carreteras rurales de medio/bajo tráfico).

Además, en los últimos años se han desarrollado en gran medida las técnicas en frío, obteniéndose emulsiones y mezclas de altas prestaciones. Como resultado, en las últimas décadas, no ha dejado de crecer su producción a nivel mundial, alcanzándose valores de 1,5 millones de toneladas anuales en Francia o 2 millones en Turquía (EAPA, 2012).

Sin embargo, la investigación y desarrollo de las mezclas en frío sigue por detrás de la de las mezclas en caliente y prueba de ello es, por ejemplo que la mayor parte de las escasas normas de ensayos específicas para este tipo de mezclas no han apenas evolucionado en décadas. Por otro lado, existen ensayos de gran popularidad hoy en día que ni siquiera cuentan con una versión adaptada, por lo que diversos investigadores aplican a menudo procedimientos propios de mezclas en caliente que no necesariamente son aptos para mezclas en frío (tipo de mezclado, compactación, etc.).

Ejemplos de todo esto son las antiguas Normas NLT-161 (compresión simple) y NLT-162 (inmersión-compresión, de algún modo descendiente del ensayo francés Duriez, NF P98-251) que aún a día de hoy siguen siendo de referencia en los Pliegos de la ATEB. Entre otras características, la compactación de las probetas se realiza, según estas Normas, mediante compactación estática, mucho más adecuada para las

mezclas en frío que otros métodos, como el martillo Marshall o el compactador vibratorio.

En esta investigación, se propone un método de fabricación de probetas de mezclas en frío basado en las Normas NLT y que permite obtener probetas para diferentes ensayos con idénticas propiedades intrínsecas (como huecos, contenido remanente de humedad, densidad, etc.), sin importar, por ejemplo, su altura. De esta forma, pudieron ser correlacionadas diferentes propiedades de las mezclas de una forma global, estando seguros que los resultados de cada ensayo no fueron influenciados por una diferente preparación de las muestras.

El método fue probado en mezclas con dos tipos muy diferentes de árido para comprobar su aplicabilidad en caso general.

2 MATERIALES EMPLEADOS

Para comprobar la aplicabilidad universal del método se utilizaron dos tipos muy diferentes de áridos: Por un lado, se contó con una Corneana, árido 100% natural y de tipo silíceo y de uso común proveniente de una cantera en Astariz (Ourense) con el que se fabricarían las mezclas de control. Por otro lado, el árido 100% reciclado de RCD cuya composición se resumen en la Tabla 1. Las propiedades de ambos áridos se resumen en la Tabla 2. Como se puede apreciar, los áridos reciclados destacan por una baja resistencia a la fragmentación (alto coeficiente de Los Angeles) e índice de lajas pero, fundamentalmente, por su baja densidad y altísima absorción.

El tipo de mezcla elegido fue una grava-emulsión GE1 (según clasificación en los Pliegos Técnicos de la ATEB) por su gran versatilidad y características mecánicas que las hacen aptas para capas de bases y subbases en carreteras con categorías de tráfico pesado T3 o superior. Debido a que los RCD se fragmentan más fácilmente, fue necesario ceñir la granulometría al huso inferior en la zona de los finos, puesto que tal y como se comprobó por medio de extracciones de betún, tras el mezclado y la compactación, los finos tendían a incrementarse desplazando la curva fuera del huso superior (Figura 1).

La emulsión empleada fue de tipo ECL-2d, catiónica con un 60% de betún residual con grado de penetración de 100.

Tabla 1. Composición del árido reciclado (en % de peso seco)

Material	% en árido grueso (12/24 mm)	% en árido medio (6/12 mm)
Hormigón convencional y mortero	70%	55%
Áridos naturales sin mortero	25%	40%
Cerámicos	3.7%	4.1%
Hormigón con fibras metálicas	1.121%	< 0.001%
Hormigón con fibras textiles	0.146%	0.042%
Yeso y escayola	0.103%	0.012%
Otros (metal, papel, plástico, cristal)	<0.1%	<0.1%

Tabla 2. Características de los áridos reciclados y naturales

Propiedad	Árido reciclado	Árido natural
Índice de lajas (UNE EN 933-3)	4.5%	19.8%
Partículas trituradas (UNE EN 933-5)	89%	94%
Equivalente de arena (UNE EN 933-8)	77	78
Coefficiente de Los Angeles (UNE EN 1097-2)	38	14
Densidad aparente (UNE EN 1097-6)	2.64 t/m ³	2.78 t/m ³
Densidad seca (UNE EN 1097-6)	2.23 t/m ³	2.74 t/m ³
Densidad saturada SS (UNE EN 1097-6)	2.39 t/m ³	2.75 t/m ³
Absorción (UNE EN 1097-6)	7.0%	0.5%

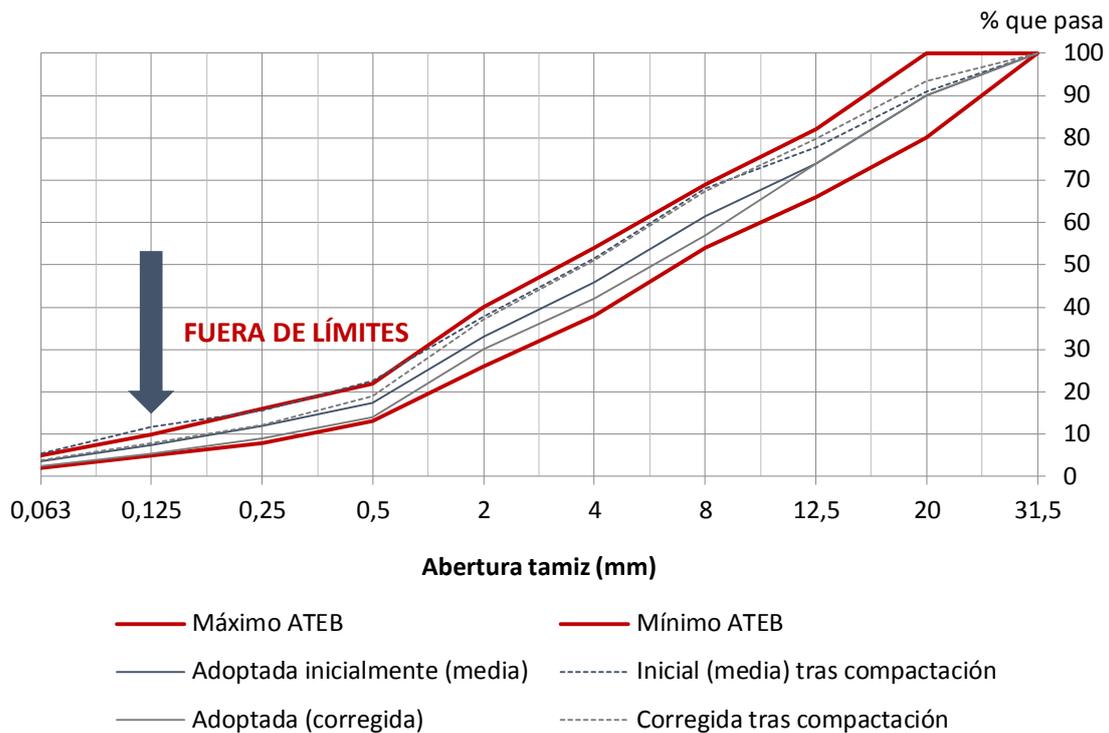


Figura 1. Evolución de las curvas granulométricas inicial y corregida tras la compactación

3 METODOLOGÍA

3.1 Problemática encontrada

A lo largo de la presente investigación se planteó como objetivo el poder correlacionar los resultados de diferentes ensayos, dilucidando si existe algún tipo de relación entre las diferentes propiedades estudiadas. Sin embargo, mientras que para el ensayo de sensibilidad al agua (inmersión-compresión) se requieren, según las Normas NLT-161 y NLT-162, probetas de 101,6 mm de diámetro y 101,6 mm de altura, para la realización de otros ensayos como el de resistencia a la tracción indirecta, módulo resiliente y deformación permanente, es necesaria la obtención de probetas menores, con el fin de satisfacer las indicaciones de las correspondientes Normas. Para homogeneizar el proceso de fabricación de las probetas se buscó una altura apta para todos los ensayos, la cual debería, por ejemplo, estar comprendida entre 35 y 75 mm (según UNE-EN 12697-23) y entre 30 y 75 mm (UNE-EN 12697-26), proponiéndose la de 50 mm.

Tomando como referencia las probetas elaboradas según las Normas NLT (contenido de huecos, densidad, etc.) y manteniendo el método de compactación de la

prensa estática se elaboraron probetas cilíndricas de 101,6 mm de diámetro y 50 mm de altura mediante diferentes combinaciones de cantidad de material y carga de compactación, hasta que se cumpliesen los siguientes 3 criterios:

- La granulometría de las probetas no debe modificarse, bajo las cargas de compactación, de modo que se salga fuera de los husos granulométricos. Si esto ocurriese, se consideraría que la energía de compactación es excesiva para la cantidad de material compactada.
- La deformación unitaria que sufre el material, entre la precarga de compactación y la carga máxima, debe ser similar a la de las probetas de inmersión-compresión. Si se acorta demasiado se entenderá que la carga máxima de compactación resultó excesiva mientras que si la deformación es inferior habría que tantear con mayores cargas.
- Las densidades y huecos deben resultar similares a los de las probetas de inmersión-compresión. De este modo, se asegurará que el ordenamiento interno de las probetas es similar, esperándose comportamientos análogos.

Desafortunadamente se pudo comprobar que aunque la desviación de las curvas granulométricas tras la compactación era similar para las diferentes energías de compactación, no era posible conseguir una solución que cumpliera todos los criterios a la vez. De este modo, se comprobó que la carga de compactación debería llegar hasta los 21 MPa para igualar la densidad y porcentaje de huecos de las probetas de inmersión-compresión pero la deformación unitaria apreciada para este nivel tensional resultó ser demasiado alta, no debiendo pasar de 13 MPa.

3.2 Método propuesto

Como solución, se planteó fabricar probetas de 101,6 mm de altura según las Normas NLT-161 y NLT-162 y a partir de éstas, obtener las de 50 mm mediante un corte por el plano medio (Figura 2).

Esta solución no solo consigue que las nuevas probetas tengan las mismas propiedades que las de inmersión compresión (contenido de huecos, granulometría

tras compactación, humedad residual, etc.) sino que además, son idénticas entre ellas. Esto supone un beneficio extra, al poder ser ensayadas de diferentes formas (una de ellas mediante el ensayo de tracción indirecta y la otra mediante el ensayo de módulo resiliente), pudiendo establecerse una relación clara y directa entre ambos comportamientos y para cada probeta. De este modo, se podrá asegurar que las posibles analogías o las posibles anomalías observables al intentar relacionar diferentes propiedades mecánicas no se deben, en ningún caso, a diferencias entre probetas ensayadas puesto que literalmente son idénticas.

En definitiva, para cada contenido de agua y betún, se fabricarían 15 probetas de 101,6 mm de diámetro por 101,6 mm de altura, de las cuales 5 se ensayarían a compresión sin acondicionamiento, 5 a compresión tras acondicionamiento y 5 se cortarían produciendo 5 pares de probetas gemelas, de las cuales cada una se destinaría para el ensayo de tracción indirecta y módulo resiliente respectivamente.

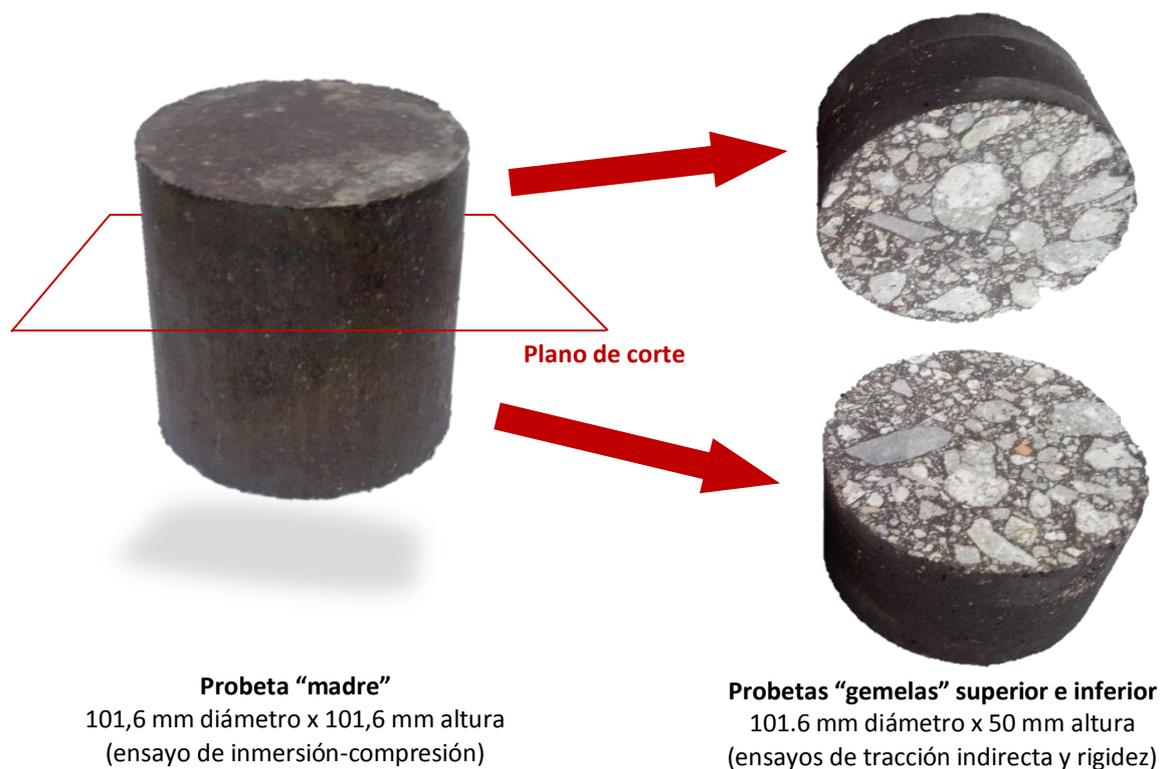


Figura 2. Esquema del proceso de obtención de dos probetas "gemelas" de 50 mm de altura a partir de una misma probeta "madre" de 101,6 mm. Las tres probetas tienen exactamente las mismas propiedades intrínsecas (densidad, huecos, humedad, etc)

3.3 Evaluación del método propuesto

Para comprobar la fiabilidad del método, se sometió el mismo a una serie de análisis estadísticos. En primer lugar, se representaron en el mismo diagrama (Figura 3) todas las parejas de valores ITS-ITSM obtenidas con pares de probetas “gemelas” procedentes de diferentes probetas “madre” (distintos contenidos de agua y betún pero todas con un 100% de árido reciclado) y diferenciando las parejas en las que la mitad “gemela” superior de la probeta “madre” fue destinada al ensayo de ITSM y la inferior al de ITS (■) de las parejas en las que se realizaron los ensayos de modo opuesto (◆).

Debe tenerse en cuenta que como los puntos rojos y azules pertenecen a conjuntos complementarios, si la mitad superior de las probetas madre fuese más rígida y resistente que la inferior, los puntos azules sufrirían un corrimiento hacia arriba a la izquierda y los rojos hacia abajo a la derecha duplicándose y evidenciándose así un efecto de separación de ambas nubes de puntos aproximadamente en la dirección de una perpendicular trazada sobre las líneas de tendencia representadas. Si la mitad inferior fuese más resistente y rígida que la superior, los corrimientos se darían en sentidos opuestos a los descritos anteriormente. Como se puede apreciar, ambas nubes de puntos prácticamente se superponen a la perfección así como sus líneas de tendencia lo que evidencia que ambas mitades “gemelas” son idénticas y que por tanto, el método propuesto para obtenerlas no afecta a sus propiedades.

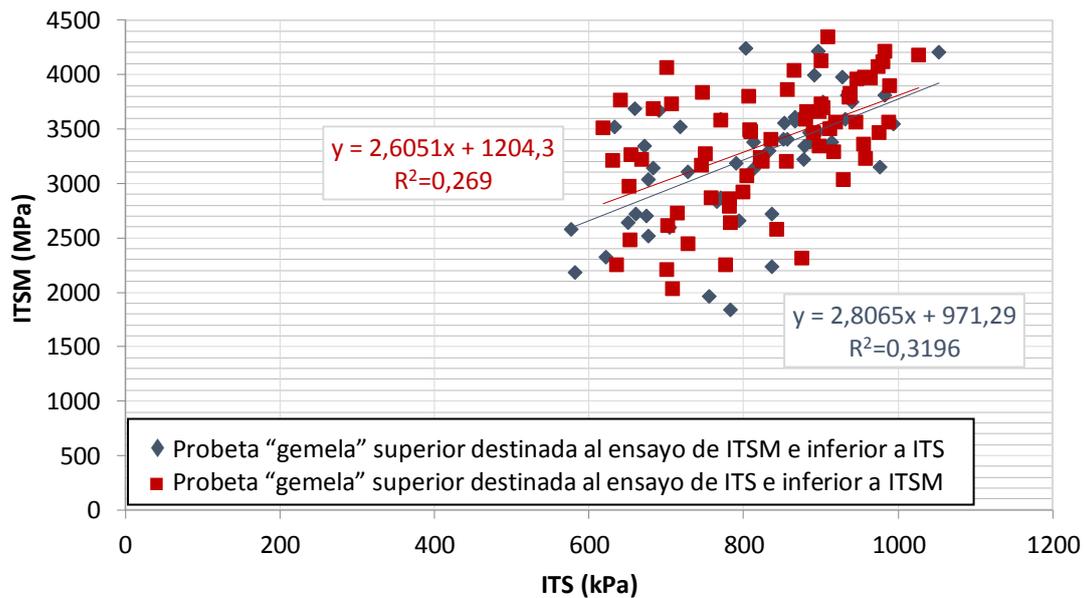


Figura 3. Relación entre resistencia a tracción indirecta (ITS) y rigidez (ITSM) dependiendo de si la mitad empleada para el ensayo de rigidez era superior (◆) o inferior (■)

(■) (quedando su pareja para el ensayo de tracción indirecta) para un 100% de árido natural

Con el fin de asumir esta hipótesis tan crítica, se ha realizado el correspondiente contraste estadístico de hipótesis. Para ello, se ha definido una nueva variable como producto de los valores ITS e ITSM obtenidos cada uno con la respectiva mitad “gemela” de la misma probeta “madre”. Así, en el contraste de hipótesis se ha asumido como hipótesis nula (H_0) que la variable $ITS*ITSM$ (medida en MPa^2) no depende de si la mitad “gemela” superior de la probeta madre fue destinada al ensayo de tracción indirecta y la inferior al de rigidez o viceversa.

Los valores medios de ambos grupos fueron $2824,5 MPa^2$ y $2636,5 MPa^2$ que a simple vista parecen bastante similares. Asumiendo igualdad de varianzas una vez hecho el correspondiente test de Levene ($F = 0,13$ con significancia de $0,909 > 0,05$) se obtuvo un estadístico t de Student de $1,373$ con una significancia de $0,172 > 0,05$. Por tanto, la hipótesis nula H_0 no debe ser rechazada y se puede concluir que con un nivel de confianza del 95% la variable $ITS*ITSM$ no depende de cuál de las mitades ha sido destinada al ensayo de tracción indirecta y cuál al de rigidez y que por lo tanto, ambas son idénticas desde un punto de vista estadístico.

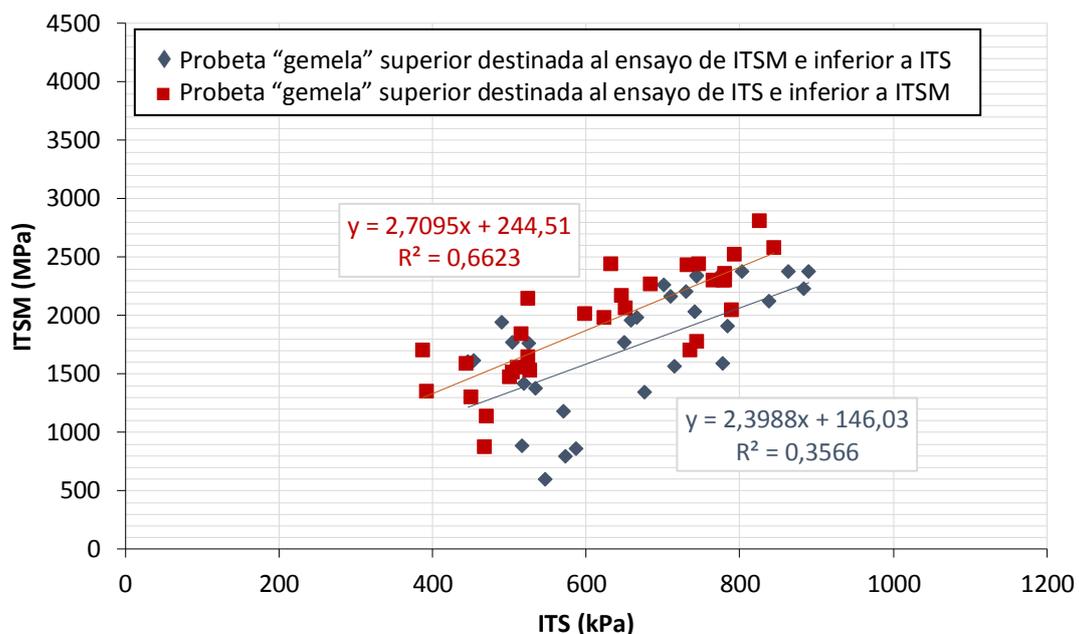


Figura 4. Relación entre resistencia a tracción indirecta (ITS) y rigidez (ITSM) dependiendo de si la mitad empleada para el ensayo de rigidez era superior (♦) o inferior (■) (quedando su pareja para el ensayo de tracción indirecta) para un 100% de árido natural

Para ver la aplicabilidad del método en diferentes tipos de materiales, se repitió el estudio con probetas de mezclas bituminosas con un 100% de árido natural (Figura 4). En este caso, los valores medios resultaron de 1263,6 MPa² y 1.209,6 MPa² respectivamente. De nuevo, asumiendo igualdad de varianzas tras el test de Levene ($F = 2,4 \times 10^{-4}$ con significancia de 0,988 > 0,05) se encontró un estadístico t de Student de 0,404 con una significancia de 0,688 > 0,05. Por tanto, de nuevo, con un nivel de confianza del 95%, se puede concluir que la mitad “gemela” superior de las probetas “madre” es idéntica a la mitad “gemela” inferior. Sin embargo, sí se debe mencionar que en este caso, se aprecia una cierta separación entre las líneas de tendencia lo que hace intuir que ambas mitades ya no son tan idénticas como en el caso del árido reciclado. Se cree, por tanto, que debido a la alta absorción y porosidad del árido reciclado, éste ayuda a evitar segregaciones entre árido y betún, provocando que el árido permaneciese en el fondo del molde mientras en la parte superior se formase una película rica en árido fino, agua y betún. El árido reciclado ayuda a mantener el ligante unido al árido y las mezclas salen más homogéneas.

En resumen, el método de obtención de probetas pequeñas a partir de la misma probeta mayor ha resultado ser suficientemente estable, ampliamente aplicable a muy diversos tipos de materiales y como consecuencia, las probetas obtenidas para los ensayos de inmersión-compresión, tracción indirecta y rigidez cuentan con idénticas propiedades intrínsecas, lo cual permitirá correlacionar de una forma fiable los resultados de los diferentes test.

4 RELACIÓN ENTRE LAS PROPIEDADES ESTUDIADAS

Como ejemplo de aplicación práctica del método propuesto, se establecen a continuación las relaciones entre la resistencia a compresión simple, resistencia a tracción indirecta y módulo resiliente de las probetas obtenidas con idénticas propiedades intrínsecas.

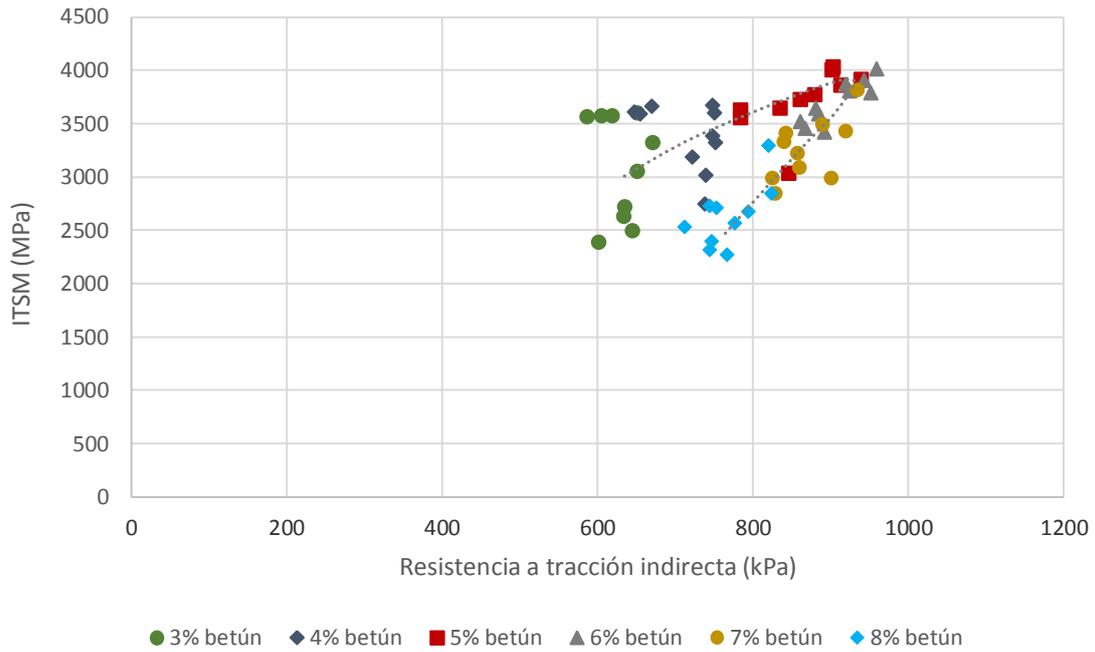


Figura 5. Relación entre resistencia a tracción indirecta (ITS) y rigidez (ITSM) para un 100% de árido reciclado y distinguiendo según contenidos de betún

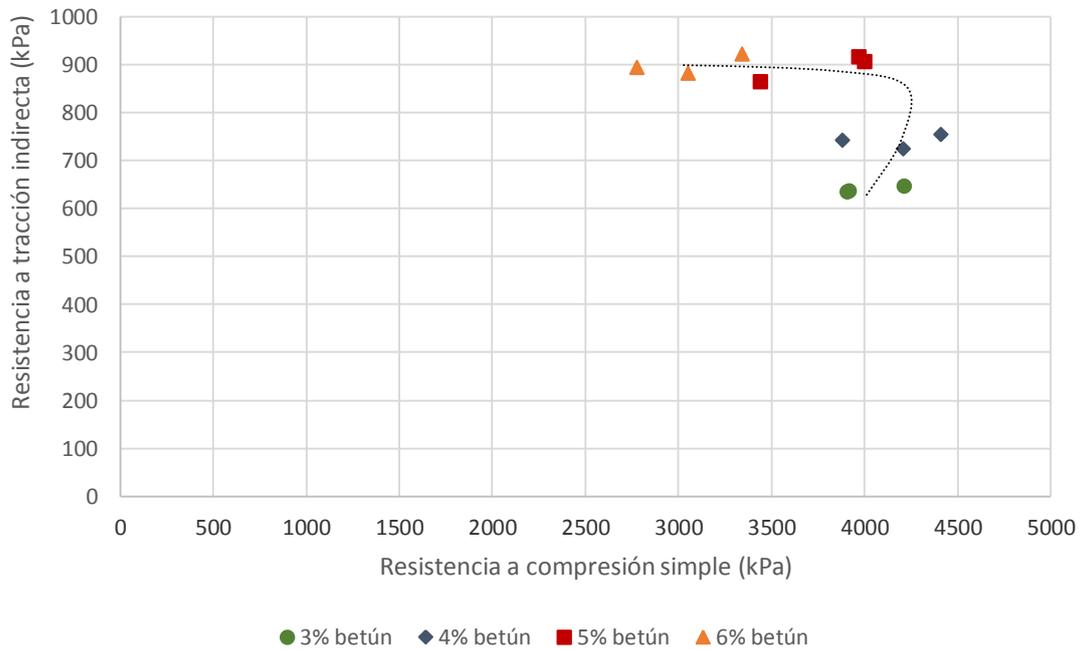


Figura 6. Relación entre resistencia a compresión simple y a tracción indirecta para un 100% de árido reciclado y distinguiendo según contenidos de betún

En la Figura 5 se representa gráficamente la relación entre resistencia a tracción indirecta y módulo resiliente para probetas con un 100% de árido reciclado. Al diferenciar los puntos según el contenido de betún (Figura 5) se puede apreciar un

crecimiento y posterior decrecimiento de ambas propiedades según aumenta el contenido de betún en la mezcla. Por ello, en un principio el aumento de betún mejora la mezcla dotándola de mayor rigidez y resistencia a la tracción indirecta pero una vez alcanzado el óptimo de betún (ente el 5% y 6%) ambas propiedades vuelven a caer, y siendo la rigidez la que lo hace de forma más acentuada. Por ejemplo, se diferencia como los contenidos del 4% y 8% de betún tienen resistencias a tracción indirecta similares pero rigideces considerablemente diferentes.

Cuando se relaciona la resistencia a compresión simple con la resistencia a tracción indirecta , se observa que si tratadas de forma individual se observaba que el contenido óptimo de betún era del 3% para la resistencia a compresión y del 5% para la rigidez, tratadas de forma conjunta se podría deducir que el contenido óptimo se sitúa entre un 4% y 5%.

Paralelamente al caso anterior, ahora es la resistencia a compresión la propiedad que cae más rápido que la resistencia a tracción. De hecho, se intuye que excesos a la hora de dosificar el betún podría suponer serios detrimentos de la resistencia a compresión.

Cuando se relaciona la resistencia a compresión con la rigidez, la tendencia se hace mucho más evidente (Figura 7), alcanzándose el óptimo entre los contenidos del 4% y 5%, siendo la resistencia a compresión la propiedad que más rápidamente desciende con los excesos de betún.

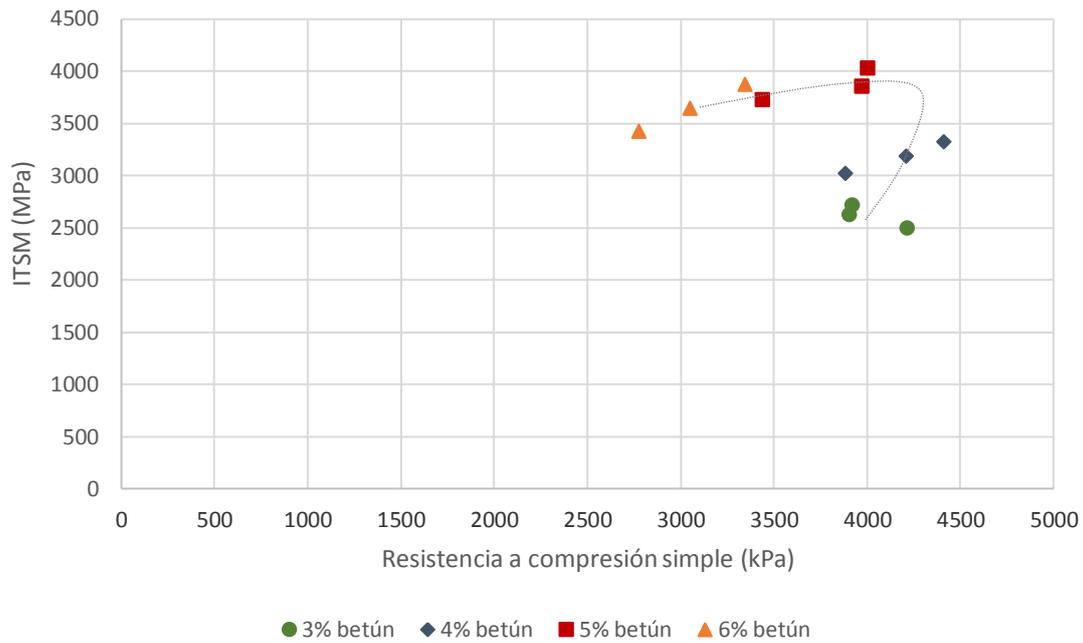


Figura 7 Relación entre resistencia a compresión simple y rigidez (ITSM) para un 100% de árido reciclado y distinguiendo según contenidos de betún

5 CONCLUSIONES

En la presente investigación se propone un nuevo protocolo para un análisis más global de las propiedades mecánicas de las mezclas bituminosas en frío, empleando probetas con idénticas propiedades intrínsecas, puesto que todas ellas fueron fabricadas del mismo modo y algunas incluso proceden de la misma probeta madre. Así pues, la correlación entre propiedades no depende de la altura de las probetas o del ensayo para el que fueron concebidas.

Se demostró estadísticamente que el método es consistente y aplicable a diferentes tipos de mezcla, fácilmente reproducible y no afecta a los resultados.

Como ejemplo de aplicación, se relacionaron las propiedades de resistencia a compresión simple, resistencia a tracción indirecta y módulo resiliente de una serie de mezclas con diferentes contenidos de agua y betún, obteniéndose conclusiones diferentes a si se analizasen por separado.

Las 3 propiedades muestran un valor pico a partir del cual vuelven a bajar a medida que aumenta el contenido de betún. De modo general, para mezclas con árido reciclado de RCD, dicho contenido se situó en torno al 5,5%.

Además, se comprobó que no todas las propiedades son igualmente sensibles a los cambios en el contenido de betún. La resistencia a tracción indirecta es la propiedad que menos se ve afectada mientras que la resistencia a compresión es la que más.

El método también permitió evaluar posibles diferencias entre la mitad superior e inferior de las probetas fabricadas según las Normas NLT. Como conclusión, se ha obtenido que los áridos más absorbentes, como los procedentes de RCD, ayudaron a reducir dichas diferencias, produciendo mezclas más homogéneas y menos susceptibles a sufrir segregaciones de los materiales.

AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren agradecer la financiación recibida por proyecto BIA2010-17751 y la Ayuda FPI (Ref. BES-2011-044377) del Ministerio de Economía y Competitividad, así como la donación de los áridos reciclados por parte del Grupo GESTÁN y de la emulsión bituminosa por parte de ECOASFALT.

REFERENCIAS

- .- ATEB (Asociación Técnica de Emulsiones Bituminosas). Grava-emulsión. Monografía
- .- ATEB (Asociación Técnica de Emulsiones Bituminosas). Grava-emulsión. Pliego Técnico
- .- European Asphalt Pavement Association (EAPA). Asphalt in figures. EAPA; 2012
- .- Thanaya INA, Zoorob SE, Forth JP (2009). A laboratory study on cold-mix, cold lay emulsion mixtures. Proceedings of the Institution of Civil Engineers. Transport 162, 47-55

