

**PROPIEDADES DE LAS MEZCLAS BITUMINOSAS EN FRÍO CON ÁRIDOS RECICLADOS DE RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN**

*PROPERTIES OF COLD ASPHALT MIXTURES CONTAINING RECYCLED AGGREGATES FROM CONSTRUCTION AND DEMOLITION WASTE*

**Breixo Gómez-Meijide<sup>a</sup>, Ignacio Pérez<sup>b</sup>**

<sup>a</sup> Nottingham Transportation Engineering Centre (NTEC). University of Nottingham. University Park. NG7 2RD Nottingham (United Kingdom). breixo.gomez.meijide@nottingham.ac.uk T: +44 (0)115 951 3900

<sup>b</sup> ETS Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos. Universidade da Coruña. Campus de Elviña s/n. 15071. A Coruña. iperez@udc.es T: +34 981167000

**Título resumido:**

Mezclas bituminosas en frío con RCD

**Resumen**

En la presente investigación se estudió el empleo de los Residuos de Construcción y Demolición (RCD) como áridos reciclados de mezclas bituminosas en frío. Mezclas bituminosas en frío, tipo grava-emulsión, con el 100% de árido reciclado y de control, con el 100% de árido natural, fueron ensayadas para obtener sus propiedades volumétricas, además de los parámetros propios de su comportamiento visco-elasto-plástico (resistencia a tracción indirecta, módulo resiliente a tracción indirecta, módulo dinámico, resistencia a la deformación permanente) y elástico no lineal (por medio de ensayos triaxiales como el de módulo resiliente y resistencia a la deformación permanente). Los resultados muestran que los RCD no solo son aptos para el uso general en carreteras de medio/bajo tráfico sino que incluso mejoran algunas propiedades de las mezclas en comparación con las fabricadas con áridos naturales.

**Abstract**

In this investigation, the use of Construction and Demolition Waste (CDW) as aggregates in cold asphalt mixtures was studied. Cold asphalt mixtures, grave-emulsion type, with 100% of recycled aggregates and control mixes, with 100% of natural aggregates, were tested in order to obtain their volumetric properties, as well as the parameters of their visco-elasto-plastic behavior (indirect tensile strength, indirect tensile stiffness modulus, dynamic modulus and resistance to permanent deformation) and non-linear elastic behavior (by means of triaxial tests, such as resilient modulus and resistance to permanent deformation). The results show that CDW are not only suitable for general use in medium/low traffic roads, but also they improve some properties of cold asphalt mixes, compared with those made just with natural aggregates.

**Palabras clave:** Mezclas bituminosas en frío; residuos de construcción y demolición; reciclaje; propiedades mecánicas; carreteras de medio y bajo tráfico

## 1. Introducción

El término desarrollo sostenible fue definido por primera vez en el documento conocido como Informe Brundtland en 1987 [I] como “*Satisfacer las necesidades de las generaciones presentes sin comprometer las posibilidades de las del futuro para atender sus propias necesidades*”. En el marco de la ingeniería civil, se pueden identificar dos grandes problemas que comprometen su consecución:

Por un lado, la producción de enormes masas de residuos cada vez que se procede a la demolición de una estructura existente o a la construcción de una nueva. Su deposición en vertederos genera una serie de impactos ambientales, como impacto visual y paisajístico, ruido, polvo, vibraciones, contaminación de suelos y acuíferos, deforestación y ocupación de suelo no aprovechable para la biodiversidad o para un uso social. Según el Plan Nacional Integrado de Residuos 2008-2015 del Ministerio de Medio Ambiente, Medio Rural y Marino [II] es imposible estimar de forma exacta la producción de Residuos de Construcción y Demolición (RCD) en España, aunque las cifras suelen situarse entre 30 y 40 millones de toneladas anuales. Estas cantidades llegaron a poner a España como 5º país europeo en producción de RCD [III] si bien seguía lejos de otros como EEUU en donde la producción llegó a estar estimada entre 610 y 780 millones de toneladas anuales en el año 2002.

El segundo problema es la existente necesidad de áridos o materiales granulares durante las obras de construcción de nuevas infraestructuras. Estos áridos provienen de depósitos sedimentarios, o de modo más habitual de la explotación de una o varias canteras naturales. Además del impacto ambiental generado durante su explotación, una vez agotados sus recursos, las canteras suelen convertirse en zonas abandonadas cuyo estado natural puede tardar décadas en ser recuperado. La necesidad de áridos puede ser enorme cuando las obras en cuestión son de gran envergadura, aspecto que suele ser común en las obras de tipo lineal, como las de construcción de carreteras.

Una posible solución a ambos problemas, surge del reciclaje de los RCD y su utilización como áridos para la construcción de nuevas estructuras e infraestructuras. Aunque esta idea se lleva desarrollando en países como Francia y Alemania desde la Segunda Guerra Mundial [IV], en España los datos indican que más del 80% de los RCD son todavía llevados a vertedero [V], de los cuales la mitad acaban en vertederos incontrolados [II]. Esta tendencia choca con las expectativas de la Directiva Marco de Residuos [VI] que establece para el año 2020 que al menos un 70% de la fracción no peligrosa de los RCD (excluyendo tierras y piedras) se emplee en alguna de las posibles formas de valorización.

En los últimos años, el número de investigaciones sobre las posibles aplicaciones de residuos como materias primas en ingeniería civil no ha parado de crecer [VII, VIII]. Por ejemplo, se encuentran bastante desarrolladas ya las mezclas bituminosas en caliente con polvo de neumático [IX], así como con escorias de alto horno [X]. En cuanto a los RCD, sus distintas propiedades como árido [XI, XII] así como sus aplicaciones en materiales de ingeniería civil también han sido estudiadas en los últimos

años, por ejemplo, como materiales sueltos en sub-bases de carreteras y terraplenes [XIII, XIV], como árido en hormigones [XV], o como materiales tratados con conglomerantes hidráulicos [XVI, XIV].

También se han realizado numerosas investigaciones sobre mezclas bituminosas en caliente con áridos reciclados de vidrio [XVII], con plásticos [XVIII] y sobre todo con áridos reciclados de tipo hormigón [XIX, XX, XXI].

Pese a que las anteriores investigaciones han producido, en general, resultados satisfactorios y a que las mezclas bituminosas en frío presentan numerosas ventajas desde un punto de vista económico y ambiental (sobre todo comparadas con pavimentos hechos de hormigón o mezcla en caliente), existen en la bibliografía muchas menos investigaciones sobre su empleo con materiales reciclados, centrándose la mayoría en residuos con propiedades puzolánicas, como las cenizas volantes [XXII, XXIII].

El objetivo principal de la presente investigación es estudiar cómo afecta el uso de áridos reciclados procedentes de RCD al diseño y comportamiento de las mezclas bituminosas en frío. Además, se estudiará si el empleo de un árido tan absorbente puede llegar a mejorar el comportamiento de éstas en etapas tempranas de curado.

## **2. Materiales y métodos**

### **2.1 Materiales y fabricación de las probetas**

Para el desarrollo de la presente investigación se emplearon dos tipos de áridos: Por un lado, 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 resume en la Tabla 1. Las propiedades de ambos áridos se muestran en la Tabla 2. La emulsión empleada fue de tipo ECL-2d (C60B5 GE según la nueva clasificación), catiónica con un 60% de betún residual con grado de penetración de 100. 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. Cabe destacar que ensayos preliminares de extracción de ligante sobre probetas compactadas y re-tamizado del árido, mostraron que debido a la baja resistencia al pulimento de los RCD, éstos tendían a incrementar sensiblemente el contenido de partículas finas tras las operaciones de mezclado y compactación. Por esta razón, su uso podría ser desaconsejable en capas donde puedan sufrir una elevada abrasión, como en capas de rodadura.

En la presente investigación, se fabricaron todas las probetas según lo establecido en las Normas NLT-161 y NLT-162, de uso habitual en mezclas en frío. La compactación se realizó por medio de prensa estática con un esfuerzo máximo de 21 MPa aplicado durante 2 min, obteniéndose así probetas cilíndricas de 101,6 mm de diámetro y 101,6 mm de altura. Este tipo de probetas pudo ser utilizado directamente para el ensayo de inmersión-compresión (NLT-162). Sin embargo, para los

ensayos de tracción indirecta (UNE-EN 12697-23), módulo resiliente (UNE-EN 12697-26) y deformación permanente (BSi DD 226:1996) las probetas fueron cortadas por el plano medio obteniendo dos probetas gemelas de 50 mm cada una. Por su parte, para los ensayos triaxiales de compresión dinámica, las probetas de 200 mm de alto se obtuvieron mediante el apilamiento de dos probetas. De este modo, todas las probetas fueron fabricadas del mismo modo, contando con las mismas propiedades intrínsecas, independientemente de sus dimensiones.

## **2.2 Ensayos realizados**

La presente investigación se enfocó en el estudio de tres aspectos fundamentales del comportamiento de las mezclas bituminosas en frío:

a) Propiedades volumétricas como densidad máxima y aparente, contenido de huecos y contenido de agua fueron estudiadas mediante los procedimientos específicos descritos por el Asphalt Institute para mezclas bituminosas en frío [XXIV].

b) El comportamiento visco-elasto-plástico, típico de mezclas bituminosas en caliente y que en mezclas en frío se produce de forma más acentuada cuando éstas se encuentran en etapas avanzadas de curado, fue estudiado por medio de ensayos como el ensayo de inmersión-compresión (NLT-162), tracción indirecta (UNE-EN 12697-23), módulo resiliente a tracción indirecta (UNE-EN 12697-26) (Figura 1-a), módulo dinámico (Norma AASHTO TP 62-07) y ensayo uniaxial de deformación permanente (BSi DD 226:1996) (Figura 1-b). Para la realización de estos ensayos, las probetas fueron sometidas previamente a un curado acelerado de 3 días en estufa ventilada a 50°C, de acuerdo con lo establecido en los Pliegos de la ATEB para grava-emulsiones.

c) El comportamiento elástico no lineal, típico de materiales granulares sin ligante y más acentuado en mezclas en frío cuando éstas se encuentran en etapas tempranas de curado, fue estudiado mediante ensayos triaxiales (Figura 1-c), como el ensayo triaxial dinámico de rigidez (UNE-EN 13286-7), el ensayo triaxial de compresión para la obtención de la envolvente de Mohr-Coulomb o el ensayo triaxial de deformación permanente (UNE-EN 13286-7, Artículo 8). En este caso, las probetas fueron ensayadas sin haber sido aplicado ningún tipo de curado acelerado previo.

## **3. Resultados**

### **3.1 Propiedades volumétricas**

En primer lugar, se puede ver en la Tabla 3 como la elevada absorción del árido reciclado produce que el contenido de agua remanente en las probetas tras su compactación sea significativamente mayor que cuando se emplea árido natural. Este contenido tiende a disminuir ligeramente al aumentar el contenido de betún, posiblemente debido al efecto impermeabilizante que éste produce al recubrir los poros superficiales del árido. Sin embargo, el contenido de agua después de la compactación prácticamente no depende del contenido de agua añadido durante el mezclado. Además, tras el curado en estufa, el contenido de agua en probetas con árido natural es prácticamente 0 (valores

observados entre 0.1% y 0.6%) mientras que con árido reciclado permanece entre un 2.1% y un 3.5%, mostrando que éste tipo de mezclas son más difíciles de secar. Durante estos ensayos, también se ha detectado que la gran absorción del árido reciclado tiende a provocar la prematura rotura de la emulsión durante el mezclado y compactación, a no ser que se trabaje con elevados contenidos iniciales de agua. Así, aunque el contenido remanente tras dichas operaciones es mucho menor, se verá en sucesivas secciones sobre propiedades mecánicas, que los contenidos iniciales óptimos resultarán sensiblemente mayores cuando se trabaje con árido reciclado.

En cuanto al resto de propiedades volumétricas, cabe destacar que en general, los huecos en árido mineral (VMA), huecos rellenos de aire y agua ( $V_{aw}$ ) y rellenos solo de aire ( $V_a$ ) son significativamente mayores al emplear árido reciclado, a la vez que se reduce el peso específico aparente. Mientras que VMA tiende a crecer ligeramente al aumentar el contenido de betún,  $V_{aw}$  y  $V_a$  tiende a descender más pronunciadamente al aumentar sobre todo el contenido de betún. Aun así, el contenido de huecos de aire en mezclas con árido reciclado nunca llega a ser menor del 10%, llegando a ser en algunas ocasiones superior al 20%. Aunque estos valores podrían parecer excesivos, se puede observar que si a los resultados de huecos en espacio intergranular (VMA), se le restan los rellenos de agua y aire ( $V_{aw}$ ), el contenido de huecos rellenos de betún es sencillamente similar para ambos tipos de árido y con valores habituales en mezclas bituminosas en caliente (entre 4%-10%). Si además se tiene en cuenta que el árido reciclado tiene una densidad seca 19% menor y una absorción 14 veces mayor, se deduce que los elevados valores de huecos rellenos de aire son simplemente debidos a la elevada porosidad interna del árido y no a un mayor contenido de huecos en el espacio intergranular, lo que podría indicar una deficiente compactación de la mezcla. Finalmente, se debe mencionar que el peso específico de mezclas con árido natural alcanza un máximo para el contenido de betún del 4% mientras que el de las mezclas con árido reciclado sigue creciendo, debido al mayor número de huecos que pueden seguir siendo rellenos de ligante.

### **3.2 Comportamiento visco-elasto-plástico**

Los resultados del ensayo de inmersión-compresión (Figura 2) muestran que todos los valores obtenidos para árido reciclado superan los límites de resistencia seca (1,2 MPa), resistencia húmeda (1,0 MPa) y resistencia conservada (60%) de la Asociación Técnica de Emulsiones Bituminosas (ATEB) para tráfico T3 y T4, así como el 50% genérico que establecía el antigua PG-3 para todo tipo de tráfico. Tanto la resistencia seca como la húmeda resultó mayor para mezclas con RCD. De hecho, la resistencia húmeda con un 100% de árido reciclado (máximo de 3197,7 kPa) resultó 282,8 kPa mayor que la resistencia seca con un 100% de árido natural (máximo obtenido 2914,9 kPa), obteniéndose una clara mejoría al emplear RCD. Como contrapartida, se debe destacar que los contenidos de agua y betún óptimos para obtener estos valores de resistencia, son también mayores para mezclas con RCD.

El ensayo de tracción indirecta arrojó conclusiones similares, siendo la resistencia máxima un 13% superior cuando el árido empleado es de RCD (Figura 3). No obstante, mientras que el contenido

óptimo de betún con árido natural es de un 4%, con árido reciclado es del 6%. Además, mientras que los resultados tienden a empeorar con árido natural cuando se incrementa la cantidad de agua en mezcla, con árido reciclado mejoran, obteniéndose un contenido inicial óptimo del 27% (se debe recordar que esta cantidad se refiere a antes de compactar, puesto que después la cantidad remanente se sitúa entre un 8% y un 9%). Los resultados obtenidos con árido reciclado, son también superiores a los publicados por otros autores para mezclas en frío con áridos convencionales, en algunos casos incluso pese a la adición de cemento [XXV-XXVII].

Los resultados de rigidez, tanto medidos a través del módulo de rigidez a tracción indirecta (ITSM) como módulo dinámico, medidos a diferentes frecuencias y temperaturas produjeron a grandes rasgos idénticas conclusiones. Gracias al principio de superposición tiempo-temperatura, se pudo modelar la doble dependencia que el módulo dinámico experimenta con respecto a la temperatura y frecuencia de las cargas [XXVIII]. Así, las curvas obtenidas a diferentes temperaturas pueden ser transformadas en una única curva maestra del tipo:

$$\log|E^*| = \delta + \frac{\alpha}{1 + e^{\beta + \gamma(\log t_r)}} \quad (1)$$

A través de un factor de transformación de las frecuencias, ampliamente conocido como shift factor:

$$a(T) = \frac{t}{t_r} \quad (2)$$

La Figura 4 muestra las curvas maestras obtenidas para mezclas con árido reciclado y natural al variar el contenido de betún y de agua. A la vista de éstas, se aprecian en primer lugar claras diferencias cuando lo que varía es el contenido de betún pero diferencias muy suaves cuando lo que varía es el contenido de agua. Para mezclas con árido reciclado, a bajas temperaturas (parte derecha de las curvas maestras), se aprecia un contenido óptimo de betún del 7% mientras que para temperaturas altas (parte izquierda) el contenido óptimo es del 5% bajando a medida que aumenta dicho contenido. Para el caso de las mezclas con árido natural se aprecia un claro contenido óptimo de betún del 4% para todo el rango de frecuencias y temperaturas ensayado, de modo que contenidos mayores y menores dan resultados de rigidez inferiores. En el caso del agua, también se aprecia como el contenido mínimo ensayado (3%) es el óptimo y el hecho de añadir cada vez más agua a la mezcla produce que cada vez la rigidez sea menor. Además, en comparación con las mezclas de árido natural, las mezclas con árido reciclado son menos rígidas a bajas temperaturas y más rígidas a altas temperaturas por lo que son más resistentes a la fractura frágil a bajas temperaturas a la vez que a la aparición de deformaciones permanentes a altas temperaturas.

En el ensayo de resistencia a la deformación permanente, se analizó la deformación total acumulada al cabo de 5.000 ciclos de carga ( $\epsilon_{5000}$ ), así como la pendiente de la recta tangente a la curva de deformación – ciclos de carga. Los resultados (Figura 5) muestran valores de  $\epsilon_{5000}$  muy similares

entre ambos tipos de mezcla para los mismos contenidos de agua y betún, mientras que para contenidos suficientemente altos (mayores de un 15% de agua y 5% de betún) los resultados con árido reciclado vuelven a ser nuevamente mejores. Además, la pendiente de la recta tangente es en general menor cuando se usa árido reciclado, lo que indica que las deformaciones evolucionan de una forma más lenta a medida que aumentan los ciclos de carga.

### 3.3 Comportamiento elástico no lineal

El comportamiento elástico no lineal (comportamiento resiliente) pudo ser definido, en primer lugar, en base a los resultados del ensayo triaxial dinámico que se muestran en la Figura 6. A los resultados obtenidos para una serie de diferentes combinaciones de tensiones axiales ( $\sigma_1$ ) y de confinamiento ( $\sigma_3$ ), se ajustó el modelo de Hicks (también conocido como modelo K- $\theta$ ) que establece una simple relación entre la suma de tensiones principales ( $\theta = \sigma_1 + 2\sigma_3$ ) y el módulo resiliente, en función de unas constantes propias del material,  $k_1$  y  $k_2$ :

$$M_r = k_1 \cdot \theta^{k_2} \quad (3)$$

Los resultados muestran que en general las rigideces son mayores cuando se emplea árido natural. Con el curado, las rigideces aumentan considerablemente a la vez que dispersa los resultados, haciendo más relevante el contenido de agua y betún (antes del curado, las mezclas se comportaron de manera prácticamente igual, independiente de dichos contenidos). Esto indica que cuando las probetas aún están frescas, la influencia del betún y el agua es prácticamente nula en el comportamiento mecánico y la resistencia de las cargas aplicadas se produce casi únicamente por la fricción interna del árido. Como el árido natural es de mayor calidad mecánica que el reciclado, las probetas también alcanzan rigideces mayores. Además, se aprecia cómo aumentos en el contenido de agua provocan reducciones en la rigidez, lo que es lógico en etapas tempranas de curado, mientras que nuevamente ocurre que el contenido óptimo de betún es mayor con árido reciclado que con árido natural (7% y 4% respectivamente).

La Figura 7 muestra el diagrama de Mohr obtenido del ensayo triaxial estático para el ejemplo de una mezcla fresca (sin curar) con árido reciclado, 9% de agua y 6% de betún. Como se puede apreciar, el diagrama representa la recta envolvente de todos los círculos de Mohr, cada uno de ellos correspondiente a un probeta ensayada con una presión de confinamiento  $\sigma_3$  diferente, de modo que ésta y la tensión principal máxima son los puntos de corte con el eje horizontal. Además, la cohesión (C) puede obtenerse como el punto de corte de la envolvente con el eje vertical y el ángulo de rozamiento interno ( $\phi$ ) se obtiene como el ángulo entre la misma y el eje horizontal. Aplicando el mismo principio a muestras curadas y a muestras de control con árido natural, 3% de agua y 4% de betún, curadas y sin curar, se obtienen los valores recogidos en la Tabla 5.

Como se puede apreciar, las probetas con árido reciclado tienen una menor cohesión que las probetas de árido natural justo después de su fabricación. Sin embargo, tras el curado en estufa, su cohesión sufre un fuerte crecimiento que las sitúa por encima de las de árido natural. En cuanto al

ángulo de rozamiento interno, se evidencia como es mayor en probetas con árido natural antes y después de haber aplicado el curado artificial. No obstante, todos los valores se sitúan en torno a 40° - 45°. La teoría de suelos establece que el plano de falla en el momento de rotura adquiere un ángulo con el plano sobre el que actúa el esfuerzo principal mayor de  $\theta=45^\circ+\varphi/2$ . Esto situaría los planos de falla entre los 66° y 68°, lo que concuerda con las observaciones experimentales, tal y como muestra la Figura 8.

Para la tensión de confinamiento  $\sigma_3=50\text{kPa}$ , la tensión principal de fallo ( $\sigma_{1,f}$ ) y la tensión desviadora de fallo ( $\sigma_{d,f}=\sigma_{1,f}-\sigma_3$ ) fueron obtenidas para mezclas con árido reciclado y natural, antes y después de ser sometidas a un curado de 3 días a 50°C (Tabla 6). Como se podía aventurar en base a lo ya explicado, dichas tensiones de fallo resultaron casi un 20% mayores para mezclas con árido natural que con árido reciclado, justo después de la fabricación de las probetas (probetas sin curar). Precisamente por ello, llama especialmente la atención que, tras idénticos procesos de curado, ambas alcancen resistencias realmente similares.

La Figura 9 recoge finalmente las curvas de deformación permanente obtenidas mediante una tensión de confinamiento ( $\sigma_3$ ) constante y cargas desviadoras cíclicas. Cada curva se obtuvo, además, variando el stress ratio (SR), es decir el porcentaje de tensión desviadora aplicada ( $\sigma_{d,a}$ ) con respecto a la tensión desviadora de rotura ( $\sigma_{d,f}$ ) anteriormente obtenido:

$$SR = \frac{\sigma_{d,a}}{\sigma_{d,f}} \quad (4)$$

En primer lugar puede apreciarse que el Stress Ratio crítico, también conocido en la bibliografía como *Shakedown Limit* [XXIX], valor que supone la frontera entre las cargas que producen el fallo del material antes de los 80.000 ciclos que dura el ensayo y las que solamente producen una estabilización sin llegar a la rotura, es diferente para cada una de las mezclas. Dicha barrera se sitúa en torno a los valores obtenidos por [XXX]: el 50% en el caso de mezclas con árido reciclado sin curado pero baja al 40% cuando se aplica curado. Dal Ben y Jenkins [XXVI] obtuvieron lo mismo para un Stress Ratio crítico de 42,5% en reciclados de firme en frío con espuma de betún y tras un curado de 3 días a temperaturas de 30°C y 40°C. Para las mezclas con árido natural, sin curado llegan a alcanzar un 40% pero para ese mismo Stress Ratio se produce el fallo cuando las mezclas fueron curadas (quedando la barrera en el 30%). Aun así, debe de tenerse en cuenta que aunque en términos porcentuales las mezclas tienden a resistir menos, cuando se aplica un proceso de curado, aguantan más carga en términos absolutos. Así, las mezclas con árido reciclado con curado resistieron hasta 812 kPa mientras que sin curado no pasaron de 595 kPa. Por su parte, las mezclas con árido natural resistieron respectivamente 611 kPa y 569 kPa. Aunque estos resultados ya tienen más lógica, es importante destacar que, en ambos casos, las mezclas con árido reciclado resistieron más que las de natural, no solo desde el punto de vista porcentual del Stress Ratio sino que también en términos absolutos de carga.

En general, las curvas potenciales obtenidas para mezclas con árido reciclado suelen situarse por debajo de las de árido natural y a su vez, las obtenidas sin curado por debajo de las obtenidas con curado. Por tanto, nuevamente se concluye que no solo el curado ayuda a reducir las deformaciones permanentes, sino que también lo hace el hecho de incorporar el árido reciclado a las mezclas, lo que indudablemente constituye una ventaja más.

### **3.4 Contenidos óptimos de agua y betún**

Por lo visto anteriormente, se puede concluir que las mezclas con árido natural se comportan de forma óptima con unos contenidos de agua y betún del 3% y 4% respectivamente. Sin embargo, para las mezclas con árido reciclado, estos contenidos varían dependiendo de las propiedades a tener en cuenta. En general, el contenido óptimo de agua, desde un punto de vista objetivo, alcanza valores cercanos al 30%. Sin embargo, estos contenidos no son prácticos a la hora de la puesta en obra, además de no suponer una gran diferencia con respecto a los resultados obtenidos con un 9% (contenidos menores del 9% no permiten el correcto mezclado). Por ello, se propondría este valor. En cuanto al contenido de betún, el óptimo suele encontrarse entre un 6% y un 7%. Los resultados obtenidos con estos contenidos, son mejores que los obtenidos con árido natural en lo referente a propiedades como la resistencia a compresión simple, tracción indirecta, rigidez (más rígida a altas temperaturas y más flexible a bajas temperaturas) y resistencia a la deformación permanente. Bajando el contenido de betún a un 5%, tienden a salir mejor los ensayos uniaxiales aunque peor los triaxiales y mejoran también propiedades como la resistencia a la acción del agua y rigidez a 20°C. Por ello, podría ser una buena solución en climas húmedos y templados, siempre y cuando se le deje alcanzar un mínimo nivel de maduración.

El hecho de necesitar un mayor contenido de betún supone para las mezclas con RCD una desventaja ecológica y económica. Sin embargo, como se ha explicado, también son menos densas, por lo que para una misma longitud unitaria de carretera se necesita una menor cantidad (en masa) de mezcla. Realizando los cálculos pertinentes, se llega a la conclusión de que con grava-emulsiones con RCD y un contenido de betún del 6% se necesita un 20,2% más de cantidad de betún, mientras que para grava-emulsiones con un contenido del 5%, el aporte extra de ligante se reduce a un 1,1%.

## **4. Conclusiones**

En general, los resultados mostraron que los áridos reciclados de RCD pueden ser utilizados en mezclas bituminosas en frío sin producir un detrimento significativo de sus propiedades e incluso mejorando algunas de ellas. Así, las principales conclusiones son:

1. Debido a su baja resistencia al pulimento, el uso de RCD es especialmente recomendable en capas de base y subbase, más protegidas de la abrasión producida por el tráfico rodado. Además, también se recomienda partir de granulometrías con bajos contenidos de finos, puesto que estos tienden a aumentar durante las operaciones de mezclado y compactación.

2. Propiedades como la resistencia a compresión, resistencia a tracción indirecta, rigidez, estabilidad ante cambios de temperatura y resistencia a la deformación permanente, fueron incluso mejoradas al incorporar el árido reciclado, aunque para ello el contenido de betún residual debe permanecer por encima del 4%.
3. Por el contrario, las mezclas con árido reciclado mostraron un peor comportamiento durante etapas tempranas de curado.
4. Las mezclas con árido reciclado mostraron contenidos óptimos de betún superiores a las mezclas de control, llegando a alcanzar valores en torno a un 6%-7% (en masa de árido seco), frente al 4% de las mezclas de control.
5. A pesar de la conclusión anterior, se debe tener en cuenta que las mezclas con árido reciclado son menos densas, por lo que se necesita menos masa para cubrir una misma longitud de carretera. Por ello, el aporte extra de betún que realmente supone la construcción de una determinada carretera se sitúa entre un 1,1% y un 20,2%.
6. Debido a su gran porosidad y absorción, el árido reciclado tiende a producir la prematura rotura de la emulsión, lo cual puede llegar a suceder durante el mezclado y compactación. Para evitarlo, se recomienda emplear emulsiones de rotura lenta, así como aumentar el contenido inicial de agua.

Finalmente se recomienda elaborar documentos técnicos que, basados en trabajos como los de la presente investigación, permitan la utilización de los RCD como árido reciclado de mezclas bituminosas en frío bajo unos criterios mínimos de seguridad y funcionalidad.

### **Agradecimientos**

La presente investigación ha sido financiada por el Ministerio de Ciencia e Innovación por medio del Proyecto BIA2010-17751, asociado a una Ayuda para la Formación de Personal Investigador (FPI) BES-2011-044377 y dos Ayudas para la realización de estancias breves en la Nanyang Technological University de Singapur (EEBB-I-13-06126) y el Nottingham Transportation Engineering Centre de Nottingham, Reino Unido (EEBB-I-14-07956). Finalmente, los áridos reciclados fueron generosamente donados por el Grupo GESTAN y la emulsión bituminosa por la empresa ECOASFALT, S.A. sin coste alguno.

### **Referencias bibliográficas**

- [I] ONU (Organización de las Naciones Unidas) – Comisión Brundtland (1987). *Informe de la Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo: Nuestro Futuro Común*. Disponible en la web: <http://www.un-documents.net/wced-ocf.htm>. Última visita Febrero 2015.
- [II] PNIR (2009). *Resolución de 20 de enero de 2009, de la Secretaria de Estado de Cambio Climático, por la que se publica el Acuerdo del Consejo de Ministros por el que se aprueba el Plan Nacional Integrado de Residuos (PNIR) para el periodo 2008–2015*. BOE, No 49, 19893–20016. Ministerio de Medio Ambiente, Medio Rural y Marino. Madrid, España

- [III] Del Rio M, Izquierdo P, Salto I, Cruz JS (2010). *La regulación jurídica de los residuos de construcción demolición (RCD) en España. El caso de la Comunidad de Madrid*. Informes de la Construcción 62(517), 81-86
- [IV] Lund HF (1996). *The McGraw-Hill recycling handbook*. McGraw-Hill Inc. New York, USA
- [V] CEDEX (Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas) (2010). *Catálogo de residuos. Ministerio de Fomento y Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino*. Disponible en la web: <http://www.cedexmateriales.vsf.es/view/default.aspx>. Última visita Febrero 2015.
- [VI] Unión Europea (2008). Directiva 2008/98/CE del parlamento europeo y del Consejo de 19 de Noviembre de 2008 sobre residuos y por la que se derogan determinadas Directivas
- [VII] Ruiz, A. (2001). Experiencia en España con la utilización de residuos y materiales secundarios en carreteras. Carreteras nº 118, pp. 8-25.
- [VIII] Sampedro, A. (2013). Empleo de residuos en carreteras. Panorámica actual. Carreteras nº 187, pp. 8-17.
- [IX] LoPresti D (2013). *Recycled Tyre Rubber Modified Bitumens for road asphalt mixtures: A literature review*. Construction and Building Materials. 49, 863-881
- [X] Pasetto M, Baldo N (2011). *Mix design and performance analysis of asphalt concretes with electric arc furnace slag*. Construction and Building Materials 25, 3458-3468
- [XI] Tam VWY (2008a). *Economic comparison of concrete recycling: a case study approach*. Resources, Conservation and Recycling 52(5), 821–828
- [XII] Mulder E, de Jong TPR, Feenstra L (2007). *Closed Cycle Construction: An integrated process for the separation and reuse of C&D waste*. Waste Management 27, 1408-1415
- [XIII] Arulrajah A, Piratheepan J, Disfani MM, Bo MW (2013). *Geotechnical and geoenvironmental properties of recycled construction and demolition materials in pavement subbase Applications*. Journal of Materials in Civil Engineering 25, 1077-1088
- [XIV] Salas, M., Cembrero, P., Jiménez, N. (2013). Empleo de áridos reciclados de RCD's. Normativa técnica andaluza y certificación de materiales. Carreteras nº 187, pp. 79-94.
- [XV] Pepe M, Toledo Filho RD, Koenders EAB, Martinelli E (2014). *Alternative processing procedures for recycled aggregates in structural concrete*. Construction and Building Materials 69, 124-132
- [XVI] Rakshvir S, Barai SV (2006) *Studies on recycled aggregates-bases concrete*. Waste Management and Research 24(3), 225-233
- [XVII] Airey GD, Collop AC, Thom NH (2004). *Mechanical performance of asphalt mixtures incorporating slag and glass secondary aggregates*. Proceedings of the Eighth Conference on Asphalt Pavements for Southern Africa. South Africa: Sun City
- [XVIII] Ergun M, Iyınam S, Iyınam AF (2005). *Flexural behavior of waste plastic added asphalt concrete mixture*. Proceedings of the International Symposium on Pavement Recycling. Sao Paulo, Brazil
- [XIX] Pérez I, Pasandín AR, Medina L (2012). *Hot mix asphalt using C&D waste as coarse aggregates*. Materials and Design 36, 849-846
- [XX] Rafi MM, Qadir A, Ali S, Siddiqui SH (2014). *Performance of Hot Mix Asphalt Mixtures Made of Recycled Aggregates*. Journal of Testing and Evaluation 42(2)

- [XXI] Pasandín AR, Pérez I (2015). Overview of bituminous mixtures made with recycled concrete aggregates. *Construction and Building Materials* 74, 151-161
- [XXII] 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
- [XXIII] Al Nageim H, Al-Busaltan AF, Atherton W, Sharples G (2012). *A comparative study for improving the mechanical properties of cold bituminous emulsion mixtures with cement and waste materials*. *Construction and Building Materials* 36, 743-748
- [XXIV] Asphalt Institute (1997). *Asphalt Cold Mix Manual. Manual Series No. 14 (MS.14)*. Third edition. USA
- [XXV] Dondi G, Tataranni P, Pettinari M, Sangiorgi C, Simone A, Vignali V (2014). *Crumb Rubber in cold recycled bituminous mixes: Comparison between traditional crumb rubber and cryogenic crumb rubber*. *Construction and Building Materials* 68, 370-375
- [XXVI] Dal Ben M, Jenkins KJ (2014). *Performance of cold recycling materials with foamed bitumen and increasing percentage of reclaimed asphalt pavement*. *Road Materials and Pavement Design* 15(2), 348-371
- [XXVII] Iwanski M, Chomicz-Kowalska A (2013). *Laboratory study on mechanical parameters of foamed bitumen mixtures in the cold recycling technology*. *Procedia Engineering* 57, 433-442
- [XXVIII] Witczak MW, Bari J (2004). Development of a master curve (E\*) database for lime modified asphaltic mixtures. Arizona State University Research Project. 29 pp.
- [XXIX] Werkmeister S (2003). *Permanent deformation behavior of unbound granular materials in pavement constructions*. Doctoral Dissertation, Technischen Universität Dresden
- [XXX] Ebels LJ (2008). *Characterisation of material properties and behavior of cold bituminous mixtures for road pavements*. Doctoral Dissertation. Stellenbosch University. South Africa

## TABLAS

**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 <sup>3</sup>	2.78 t/m <sup>3</sup>
Densidad seca (UNE EN 1097-6)	2.23 t/m <sup>3</sup>	2.74 t/m <sup>3</sup>
Densidad saturada SS (UNE EN 1097-6)	2.39 t/m <sup>3</sup>	2.75 t/m <sup>3</sup>
Absorción (UNE EN 1097-6)	7.0%	0.5%

**Tabla 3. Contenidos de agua (en % peso árido seco) remanentes en las probetas tras su compactación, en función de los contenidos de agua y betún aportados en el mezclado**

% betún	100% Árido Reciclado					% betún	100% Árido Natural		
	Agua total en amasado (% peso árido seco)						Agua total en amasado (% peso árido seco)		
	9%	12%	15%	18%	21%		6%	9%	12%
2%	9,6%	9,6%	9,7%	9,3%	9,1%	2%	3,4%	3,5%	3,6%

<b>3%</b>	9,5%	9,5%	9,5%	9,3%	8,8%	<b>3%</b>	2,2%	2,5%	2,5%
<b>4%</b>	9,0%	9,0%	9,0%	8,7%	8,6%	<b>4%</b>	1,5%	1,8%	1,8%
<b>5%</b>	8,6%	8,4%	8,3%	8,1%	8,4%	<b>5%</b>	1,3%	1,5%	1,6%
<b>6%</b>	8,2%	8,0%	7,9%	7,8%	7,9%	-	-	-	-

**Tabla 4. Contenido de huecos y densidad de mezclas con árido reciclado y árido natural según su contenido de agua y betún**

% betún	100% Árido Reciclado					% betún	100% Árido Natural		
	Agua total en amasada (% peso árido seco)						Agua total en amasada (% peso árido seco)		
	9%	12%	15%	18%	21%		6%	9%	12%
<b>VMA (Huecos en árido mineral)</b>									
<b>2%</b>	28,7%	28,6%	28,5%	28,1%	28,3%	<b>2%</b>	17,4%	17,5%	17,5%
<b>3%</b>	29,0%	28,6%	28,3%	28,3%	28,7%	<b>3%</b>	18,2%	17,6%	17,3%
<b>4%</b>	29,4%	28,6%	28,5%	28,7%	28,8%	<b>4%</b>	17,1%	17,5%	17,1%
<b>5%</b>	29,7%	29,4%	29,0%	28,9%	29,0%	<b>5%</b>	18,0%	18,6%	18,0%
<b>6%</b>	29,9%	29,9%	30,0%	29,8%	29,8%	-	-	-	-
<b>V<sub>aw</sub> (Huecos rellenos de aire y agua)</b>									
<b>2%</b>	24,6%	25,0%	24,5%	24,2%	23,2%	<b>2%</b>	12,9%	13,1%	13,0%
<b>3%</b>	23,3%	23,3%	22,8%	22,9%	22,8%	<b>3%</b>	11,5%	10,9%	10,6%
<b>4%</b>	22,4%	21,5%	21,4%	21,5%	21,8%	<b>4%</b>	8,2%	8,5%	8,2%
<b>5%</b>	21,2%	20,3%	20,1%	19,9%	19,9%	<b>5%</b>	7,0%	7,6%	6,9%
<b>6%</b>	19,4%	19,2%	19,2%	19,2%	19,2%	-	-	-	-
<b>V<sub>a</sub> (Huecos rellenos de aire)</b>									
<b>2%</b>	21,1%	20,7%	19,8%	18,1%	17,5%	<b>2%</b>	12,5%	12,8%	12,6%
<b>3%</b>	18,8%	18,4%	17,7%	17,1%	16,7%	<b>3%</b>	11,3%	10,6%	10,3%
<b>4%</b>	16,9%	16,1%	16,0%	16,2%	16,3%	<b>4%</b>	7,7%	8,0%	7,5%
<b>5%</b>	14,9%	14,3%	14,2%	14,6%	14,9%	<b>5%</b>	5,6%	6,3%	6,2%
<b>6%</b>	12,2%	12,9%	13,2%	12,5%	12,1%	-	-	-	-
<b>Peso específico aparente</b>									
<b>2%</b>	1,925	1,920	1,922	1,932	1,937	<b>2%</b>	2,344	2,346	2,345
<b>3%</b>	1,941	1,938	1,938	1,940	1,944	<b>3%</b>	2,361	2,359	2,366
<b>4%</b>	1,947	1,951	1,957	1,958	1,954	<b>4%</b>	2,401	2,390	2,400
<b>5%</b>	1,952	1,959	1,968	1,970	1,967	<b>5%</b>	2,391	2,378	2,391
<b>6%</b>	1,958	1,965	1,967	1,972	1,973	-	-	-	-

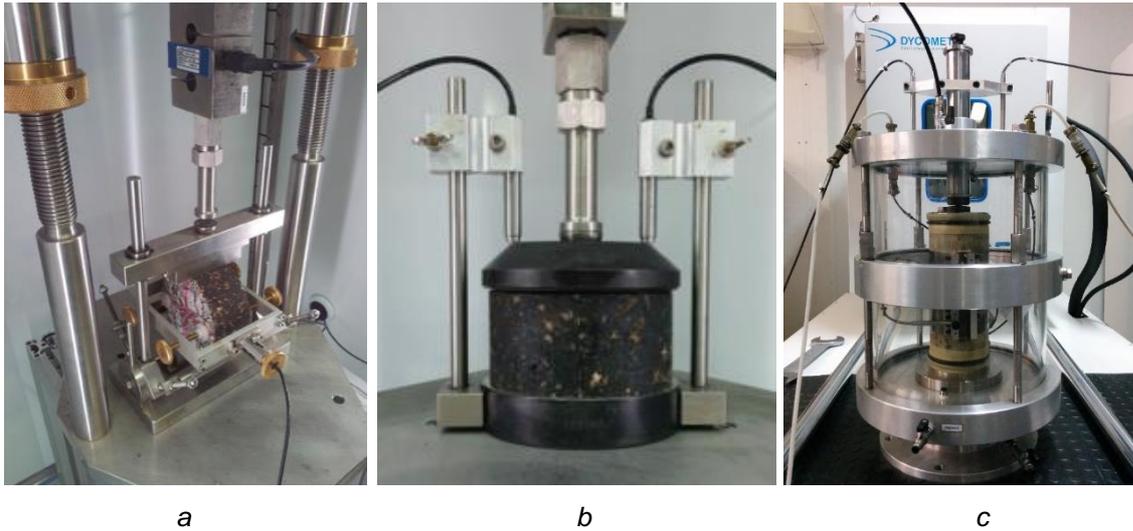
**Tabla 5. Parámetros del comportamiento a cortante de las mezclas estudiadas**

Árido	Contenido (agua - betún)	Curado	C (kPa)	$\phi$ (°)	R <sup>2</sup>
Reciclado	9% - 6%	No	219,25	42,1	0,997
		3 días a 50°C	388,71	43,5	0,939
Natural	3% - 4%	No	257,67	43,6	0,973
		3 días a 50°C	370,68	45,1	0,981

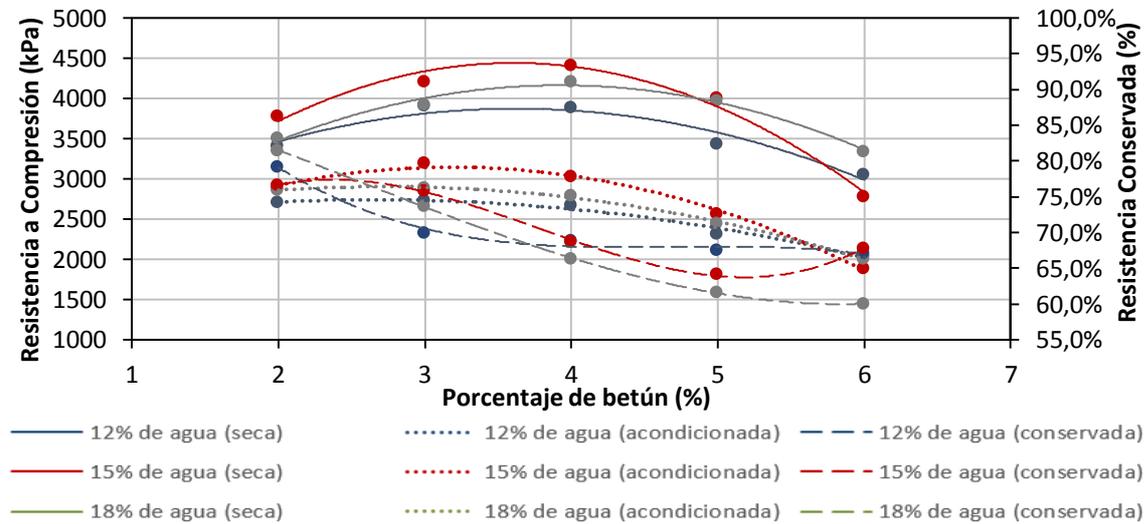
**Tabla 6 Tensiones principales de rotura para una presión de confinamiento  $\sigma_3 = 50$  kPa**

Mezcla	$\sigma_{1,f}$ (kPa)	$\sigma_{d,f}$ (kPa)	$\sigma_3$ (kPa)
Reciclado - 0 días de curado	1240	1190	50
Reciclado - 3 días de curado	2081	2031	50
Natural - 0 días de curado	1473	1423	50
Natural - 3 días de curado	2086	2036	50

**FIGURAS**



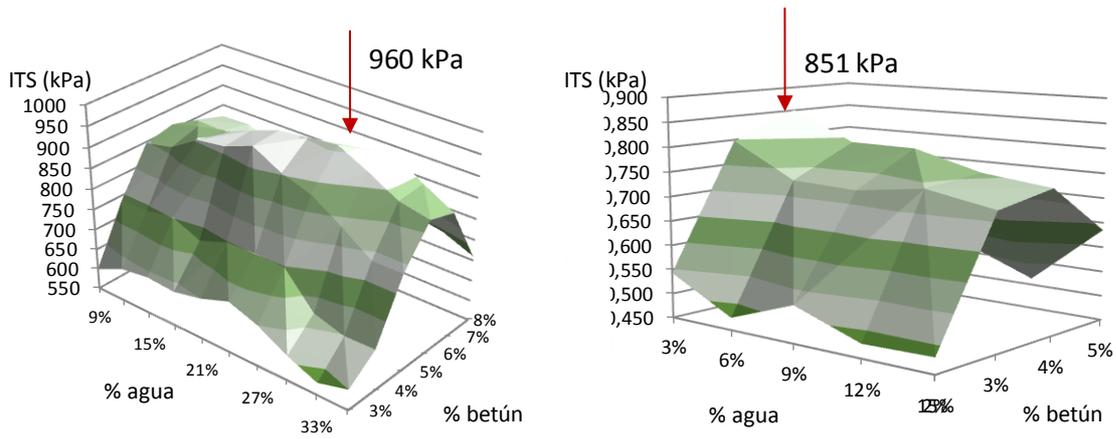
**Figura 1. De izquierda a derecha, ensayo de módulo resiliente a tracción indirecta, ensayo uniaxial de deformación permanente y ensayo triaxial de compresión dinámica**



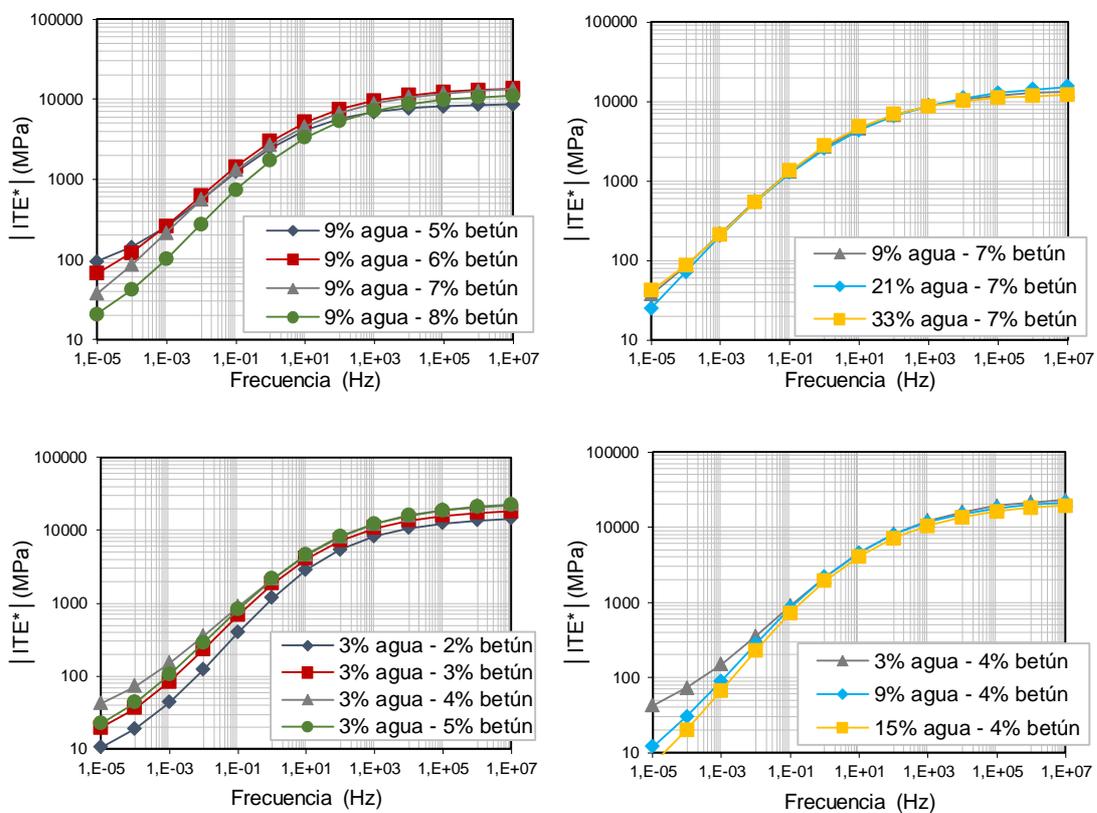
**Figura 2. Resistencia a compresión simple (sin y con acondicionamiento en baño de agua) y resistencias conservadas según % de betún y agua para un 100% de árido reciclado**

Óptimo para un 6% de betún y 27% de agua

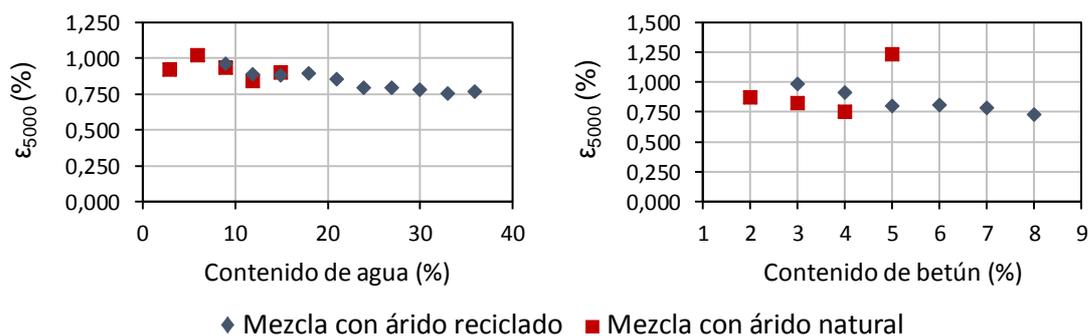
Óptimo para un 4% de betún y 3% de agua

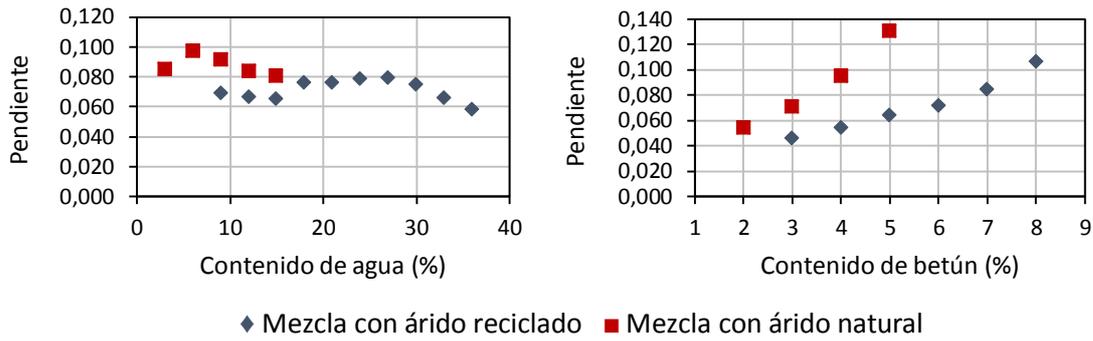


**Figura 3. Resistencia a tracción indirecta según los contenidos de agua y betún para mezclas con árido reciclado (izquierda) y natural (derecha)**

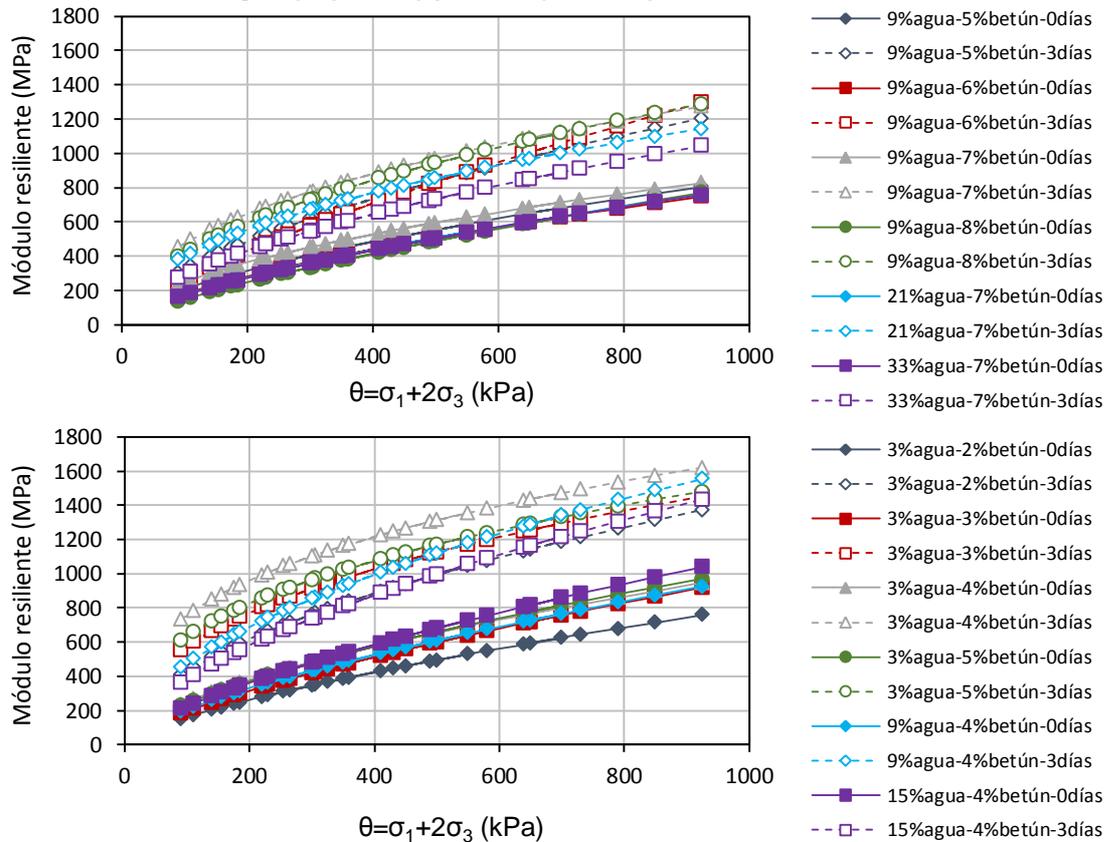


**Figura 4. Curvas maestras de módulo dinámico a tracción indirecta con respecto a frecuencia para mezclas con árido reciclado (arriba) y árido natural (abajo)**

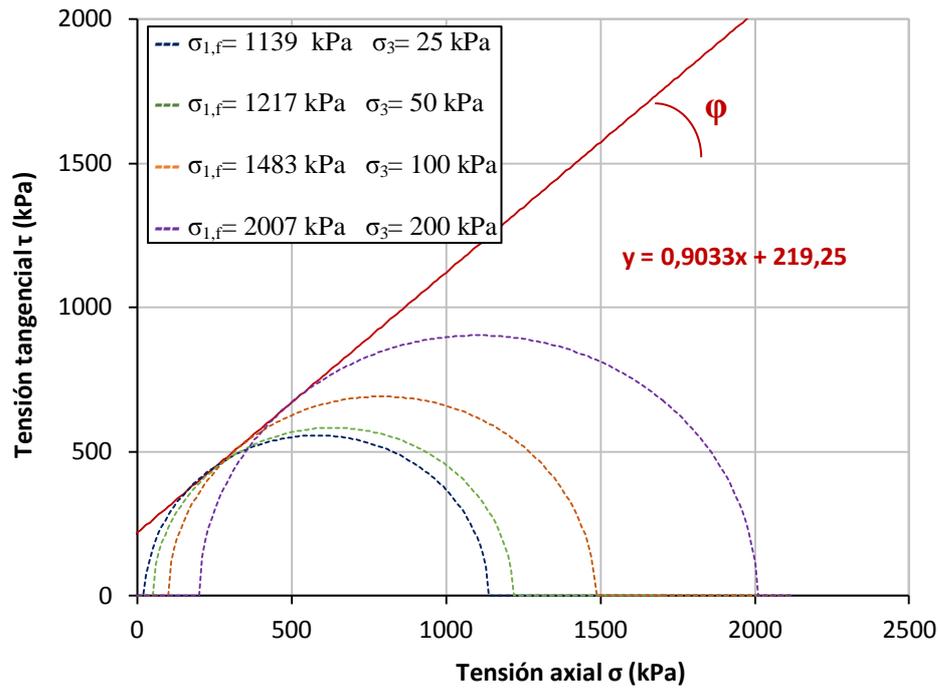




**Figura 5. Deformación permanente tras 5.000 ciclos de carga (arriba) y pendiente media de la recta tangente a la curva de deformación a lo largo de los ciclos de carga (abajo) dependiendo del contenido de agua (izquierda) y betún (derecha)**



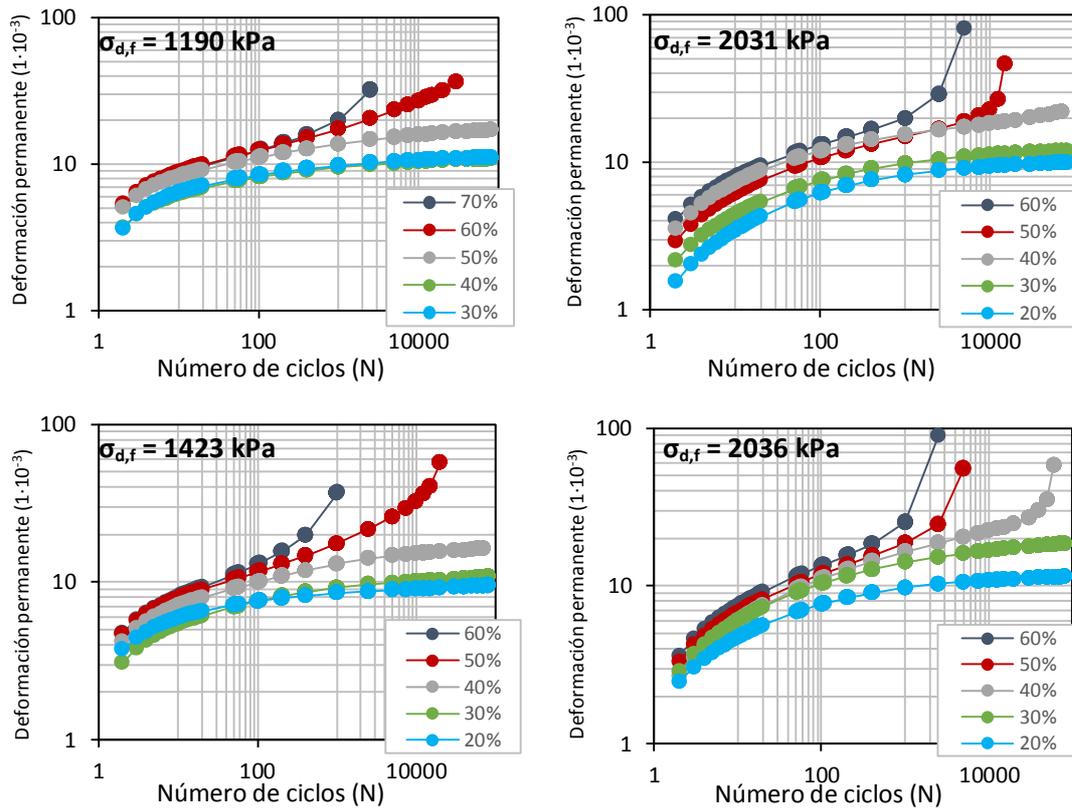
**Figura 6. Representación del modelo K-θ de Hicks para mezclas con árido reciclado (arriba) y natural (abajo) con diferentes contenidos de agua, betún y tiempos de curado**



**Figura 7. Diagrama de Mohr obtenido para probetas de árido reciclado sin curado y tras ser ensayadas con 4  $\sigma_3$  diferentes**



**Figura 8. Ejemplo de probeta rota tras ensayo triaxial de deformación permanente**



**Figura 9. Curvas de deformación permanente para mezclas de árido reciclado (arriba) y árido natural (abajo) sin ser sometidas a curado (izquierda) y tras 3 días de curado a 50°C (derecha). Cada curva se corresponde con un ensayo donde la tensión máxima es un porcentaje diferente de la tensión de rotura de ese material ( $\sigma_{d,f}$ )**