



Trabajo completo correspondiente al artículo:

## Propiedades de las mezclas bituminosas en frío con áridos reciclados de residuos de construcción y demolición

Autores: Breixo Gómez-Meijide e Ignacio Pérez.

Publicado en el número especial de la revista *Carreteras*:

---

"Premio Internacional a la Innovación en Carreteras  
*Juan Antonio Fernández del Campo*". VI Edición 2015-2016

---

Nº 214, julio – agosto 2017

Tesis Doctoral  
(**VERSIÓN REDUCIDA**)

**APLICACIÓN SOSTENIBLE DE RESIDUOS DE  
CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN COMO ÁRIDO  
RECICLADO DE MEZCLAS BITUMINOSAS EN FRÍO**

## ÍNDICE GENERAL

<b>1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>5</b>
1.1. ANTECEDENTES Y PLANTEAMIENTO GENERAL DEL PROBLEMA .....	5
1.2. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN .....	9
<b>2. MATERIALES Y METODOLOGÍA.....</b>	<b>11</b>
2.1. PLAN GENERAL DE TRABAJO .....	11
2.2. MATERIALES EMPLEADOS .....	13
2.3. FABRICACIÓN DE LAS PROBETAS .....	14
2.4. ENSAYOS PARA LA DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES VOLUMÉTRICAS .....	16
2.5. ENSAYOS PARA EL ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO VISCO-ELASTO-PLÁSTICO .....	16
2.5.1. <i>Ensayo de inmersión-compresión</i> .....	16
2.5.2. <i>Ensayo de tracción indirecta</i> .....	17
2.5.3. <i>Módulo resiliente</i> .....	17
2.5.4. <i>Módulo dinámico</i> .....	18
2.5.5. <i>Ensayo uniaxial de resistencia a la deformación permanente</i> .....	19
2.6. ENSAYOS PARA EL ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO ELÁSTICO NO LINEAL .....	20
2.6.1. <i>Ensayo triaxial dinámico de rigidez</i> .....	20
2.6.2. <i>Ensayo triaxial de compresión. Envolvente de Mohr-Coulomb</i> .....	22
2.6.3. <i>Ensayo triaxial de resistencia a la deformación permanente</i> .....	23
<b>3. RESULTADOS .....</b>	<b>24</b>
3.1. INMERSIÓN-COMPRESIÓN .....	24
3.1. RESISTENCIA A TRACCIÓN INDIRECTA .....	26
3.2. RIGIDEZ SEGÚN EL MÓDULO RESILIENTE A TRACCIÓN INDIRECTA (ITSM) .....	27
3.3. RIGIDEZ SEGÚN EL MÓDULO DINÁMICO $ E^* $ .....	30
3.4. ENSAYO UNIAXIAL DE RESISTENCIA A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE .....	33
3.5. ENSAYO TRIAXIAL DE RIGIDEZ .....	35
3.6. ENSAYO TRIAXIAL DE COMPRESIÓN. ENVOLVENTE DE MOHR-COULOMB .....	37
3.7. ENSAYO TRIAXIAL DE RESISTENCIA A LA DEFORMACIÓN PERMANENTE .....	39
<b>4. CONCLUSIONES .....</b>	<b>42</b>
<b>5. REFERENCIAS .....</b>	<b>43</b>

# 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1. Antecedentes y planteamiento general del problema

El término desarrollo sostenible fue definido por primera vez en el documento conocido como Informe Brundtland en 1987 (ONU, 1987). Esta definición, fruto de los trabajos de la Comisión Mundial de Medio Ambiente y Desarrollo de las Naciones Unidas, fue asumida en el Principio 3 de la Declaración de Río (ONU, 1992) como: *Satisfacer las necesidades de las generaciones presentes sin comprometer las posibilidades de las del futuro para atender sus propias necesidades.*

El desarrollo sostenible no es un concepto exclusivamente ambiental sino que se cimienta sobre tres pilares independientes que se refuerzan mutuamente: el desarrollo económico, el desarrollo social y la protección del medio ambiente (ONU, 2005). En definitiva, se trata de mejorar toda aquella tecnología que permite satisfacer las necesidades de la sociedad (alimentación, vivienda, trabajo, etc.) pero de modo que el ritmo al que la actividad humana afecta al medio ambiente sea menor que su capacidad de recuperación.

En el marco de la ingeniería civil, se pueden identificar dos grandes problemas que comprometen el desarrollo sostenible:

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 cuya única alternativa hasta hace pocas décadas (y que todavía sigue siendo una práctica habitual en ciertas zonas y países) es la de su deposición en vertederos. Estos vertederos, sobre todo cuando no están controlados y regulados, suponen un gran impacto ambiental en la zona, habitualmente situada en bosques y zonas poco habitadas.

En las últimas décadas la construcción no ha dejado de crecer de forma exponencial a nivel global, y con ella la producción de RCD, si bien es cierto que la actual crisis económica ha frenado dicha tendencia en países como España. Los datos de producción de Residuos de Construcción y Demolición (RCD) varían entre distintos autores y publicaciones como el Plan Nacional Integrado de Residuos 2008-2015 del Ministerio de Medio Ambiente, Medio Rural y Marino (PNIR, 2009) indican que es imposible estimar de forma exacta la producción de RCD en nuestro país, aunque las cifras suelen situarse entre los 30 y 40 millones de toneladas anuales. Estas cantidades llegaron a poner a España como 5º país europeo en producción de RCD (del Río, 2010) 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.

Debido a la gran masa y volumen de estos residuos, su vertido en vertederos supone una serie de grandes daños al medio ambiente, 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.

El segundo problema que se plantea, es la existente necesidad de áridos o materiales granulares durante las obras de construcción de nuevas instalaciones. Estos áridos provienen de depósitos sedimentarios, o de modo más habitual de la explotación de una o varias canteras. Al igual que en el caso anterior, estas operaciones suponen la generación de ruido, polvo, vibraciones, deforestación y ocupación de suelo. Además, una vez agotados los recursos naturales, 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. Por ello, y en el marco del desarrollo sostenible, se hace primordial el buscar nuevas fuentes que no impliquen la explotación de más recursos naturales.

Una solución a ambos problemas, consistente en el reciclaje de los RCD como áridos para la construcción de nuevas estructuras e infraestructuras, fue considerada ya desde la antigüedad. No obstante, no fue probablemente hasta los tiempos de la Segunda Guerra Mundial, cuando la idea empezó a concebirse como un concepto de producción a gran escala, motivado evidentemente por la destrucción y por la gran escasez y coste de los materiales básicos de construcción que imperaba en la dañada Europa de aquel entonces. Ejemplos de ello, fueron países como Francia y Alemania que destinaron grandes cantidades de escombros a la reconstrucción de sus redes de transporte (Lund, 1996).

Los avances de la tecnología y la ingeniería de las últimas décadas, han permitido que en la actualidad el uso de RCD esté cobrando el mayor auge de su historia y prueba de ello es la creciente investigación que se está realizando hoy en día por parte de diversos autores pertenecientes a instituciones y centros tecnológicos de todo el mundo.

La gestión de los RCD se encuentra cada vez más regulada desde el punto de vista administrativo (por ejemplo con la implantación del Real Decreto 105/2008, de 1 de Febrero, por el que se regula la producción y gestión de los residuos de construcción y demolición, o la Ley 10/2008 de la Comunidad Autónoma de Galicia, de 3 de Noviembre, de residuos de Galicia). No obstante, no existen a día de hoy datos fiables de la cantidad de RCD que en realidad se reciclan. En España, el Gremio Español de Entidades de Reciclaje de Residuos de Demolición estableció dicha cantidad en un 40%, aunque según los datos de la Asociación Nacional de Gestores de RCD (GERD, 2010) baja al 15%. Por su parte, los datos del Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas indican que más del 80% de los RCD son llevados a vertedero (CEDEX, 2010) y según el PNIR solamente los RCD que se llevan a

vertederos incontrolados suponen ya el 50% de la producción de RCD. Fuentes de la Comisión Europea (DG ENV, 2011) sitúan a España, con una tasa de reciclaje de los RCD del 14% (considerablemente inferior al 46% medio de la Unión Europea) solamente por delante de Italia, Portugal, Grecia, Suecia, Malta, Rumanía y Eslovaquia, pese a ser, según la misma fuente, el 6º país de Europa que más residuos de este tipo produce (Calvo et al., 2014).

Según el PNIR, en 2012 deberían de reciclarse el 25% de los RCD y aplicar otras formas de valorización a un 15% adicional, subiendo dichas cifras a un 35% y 20% respectivamente para el año 2015. La Directiva Marco de Residuos (Unión Europea, 2008) va más allá estableciendo como límite el año 2020 para que al menos un 70% de la fracción no peligrosa de los RCD (excepto las tierras y piedras) se emplee en alguna de las posibles formas de valorización.

En los últimos años se han investigado las posibles aplicaciones de residuos como materias primas en ingeniería civil. Por ejemplo, son muy conocidas ya las mezclas bituminosas en caliente con polvo de neumático (FHWA 1997; Maupin y Payne, 1997; West et al., 1998; Hossain et al., 1999; Texas DOT, 2000; Tahmoressi, 2001; Airey et al., 2002; Hicks, 2002; Airey et al., 2003; Azizian et al., 2003; Bertollo et al., 2004; Lisi et al., 2004; Palit et al., 2004; Zborowski et al., 2004; Nunez et al., 2005; Reyes et al., 2005; Selim et al., 2005; Tortum et al., 2005; Khalid y Artamendi, 2006) y con escorias de alto horno (Bagampadde et al., 1999; Khan y Wahhab, 1998; Oregon DOT, 2000; Airey et al., 2004; Ellis et al. 2004; Pasetto y Baldo, 2011).

Por su parte, el procesado de los RCD puede llevar a la obtención de diferentes tipologías de árido reciclado, como los de hormigón, vidrio o cristal, plástico, materiales cerámicos, materiales asfálticos, etc. Sus distintas propiedades como árido (Tam et al., 2008; Mulder et al., 2007) 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 (Bennert et al., 2000; Arm, 2001; Poon y Chan, 2006; Vegas et al., 2008; Melbouci, 2009; Alaejos Gutiérrez y Calvo Calzada, 2010; Disfani et al., 2011; Jiménez et al., 2011; Vegas et al., 2011; Arulrajah et al., 2013; Arulrajah et al., 2014a; Arulrajah et al., 2014b; Jayakody et al., 2014), como árido en hormigones (Li, 2008; Gómez-Soberón, 2002; González-Fonteboa y Martínez-Abella., 2007; Ouchagour, 2007; Rahal, 2007; González-Fonteboa y Martínez-Abella., 2008; González-Fonteboa et al., 2009; Breccolotti y Materazzi, 2010; Gokce et al., 2011; Limbachiya et al., 2012; Behera et al., 2014; Pepe et al., 2014), o como materiales tratados con conglomerantes hidráulicos (Hansen, 1992; Cross et al., 1996; Yeo y Sharp, 1997; Rakshvir y Barai, 2006).

También se han realizado numerosas investigaciones sobre mezclas bituminosas en caliente con áridos reciclados de vidrio (CWC, 1996; FHWA, 1997; Maupin, 1997; Maupin,

1998; Su y Chen, 2002; Airey et al., 2004), con plásticos (FHWA, 1997; Zoorob y Suparma, 2000; Justo y Veeraragavan, 2002; Ergun et al., 2005; Qadir y Imam, 2005) y sobre todo con áridos reciclados de tipo hormigón (Huang et al., 2002; Zaharieva et al., 2003; Shen y Du, 2005; Paravithana y Mohajerani, 2006; Al Nageim y Güreer, 2007; Pérez et al., 2007; Won et al., 2007; Kong et al., 2010; Mills-Beale y You, 2010; Pérez et al., 2010; Chen et al., 2011; Rubio et al., 2011; Wu et al., 2011; Pérez et al., 2012; Bhusal y Wem, 2013; Rafi et al., 2014; Pasandín y Pérez, 2015).

En el caso de las mezclas bituminosas en frío con áridos reciclados, existen muchas menos investigaciones y sobre todo se centran en residuos con propiedades puzolánicas, como las cenizas volantes (Thanaya, 2003; Thanaya et al., 2009; Al Nageim et al., 2012; Al-Busaltan et al. 2012a).

Pese a todo este desarrollo ya realizado, el uso de áridos reciclados de RCD en materiales de ingeniería civil, sigue teniendo que enfrentarse hoy en día a numerosos retos. Por un lado, suele ser complicado que cumplan las exigencias técnicas de los áridos naturales utilizados hasta el momento, lo que suele implicar procesos de demolición selectiva, retirada de materiales de menor calidad (como papeles, plásticos, etc.) y pretratamientos que elevan su precio de forma considerable. Además, las plantas de gestión de este tipo de residuos son aún escasas, lo que provoca que no siempre sea fácil encontrar un suministrador cerca de la obra debiendo afrontar el sobre coste de transportes a largas distancias. Aunque algunos autores (Pasandín, 2013) indican que estas cuestiones provocan que el árido reciclado sea más caro que el árido natural, existen algunas otras publicaciones que contradicen esta tendencia (CEDEX, 2010) y lo cierto es que durante el desarrollo de la presente tesis doctoral, algunos gestores de residuos indicaron que a menudo regalaban el árido reciclado sin coste alguno, puesto que por ley están obligados a tratar este tipo de residuos sin que todavía exista una demanda capaz de dar salida a las stock que tienen almacenado y que no puede ser llevado a vertedero.

Al margen de cuestiones económicas, otro gran problema que se presenta es su falta de homogeneidad. En obras de gran envergadura que necesitan suministros durante largos periodos de tiempo, las empresas gestoras podrían tener que recurrir a diferentes fuentes (construcciones o demoliciones) lo que sin duda influirá en la composición y propiedades del producto. Lo mismo ocurre cuando una única empresa gestora no es capaz de suministrar las cantidades requeridas por la obra, bien por su limitada capacidad de procesado de áridos reciclados (cosa que también podría suceder en una cantera de áridos naturales) o bien porque no existen suficientes fuentes de RCD en un determinado momento. En este caso, también habría que recurrir a distintos proveedores, cada uno de ellos con un material de diversas características.

En definitiva, todavía queda un largo, pero necesario, camino por delante en el desarrollo de los RCD como árido reciclado en materiales de ingeniería civil, al final del cual, todos los residuos que se producen en la construcción y demolición de estructuras e infraestructuras se reciclarán y reutilizarán en la construcción de otras nuevas, ayudando a limitar la excesiva explotación de residuos naturales tan presente a día de hoy. Este camino pasa por el estudio y comprensión del comportamiento de estos áridos en diferentes aplicaciones, por el desarrollo de tecnologías que mejoren su calidad, por la redacción de normas y especificaciones que regulen sus usos, por la adopción de medidas que eliminen los vertederos ilegales y que graven la explotación de canteras naturales haciendo que los precios sean competitivos, por la proliferación de entidades gestoras de residuos y en definitiva, por un arraigado interés en los RCD como materias primas.

El cambio climático es ya una realidad y en las manos de la sociedad se encuentra la responsabilidad de desarrollar las herramientas necesarias para lograr un desarrollo más sostenible.

## **1.2. Objetivos de la investigación**

El tipo de mezcla bituminosa más estudiado y empleado hoy en día son las mezclas bituminosas en caliente, cuya realización implica el calentamiento a elevadas temperaturas (alrededor de los 170°C) tanto de los áridos como del betún que las conforman. Desde el punto de vista económico y ecológico, esto supone grandes costes monetarios, emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmosfera, consumo de combustibles, necesidades de grandes equipos difíciles de transportar e instalar y peores condiciones ambientales y de seguridad y salud para los trabajadores y la población local.

Por el contrario, las mezclas en frío se realizan mezclando a temperatura ambiente los áridos con emulsión bituminosa y agua, lo que permite eliminar del proceso de fabricación una de las fases que según los Análisis de Ciclo de Vida (LCA), más impacto ambiental producen: el calentamiento de los materiales (Ruiz et al., 2014). En definitiva, se reduce el coste, así como los problemas anteriormente citados. Es por ello que décadas atrás habían sido muy populares en el ámbito de la ingeniería de carreteras, quizá con más relevancia en momentos clave como la crisis energética de los años 70.

No obstante, es innegable que las mezclas en caliente presentan en general mejores propiedades mecánicas además de no requerir de un periodo de maduración para alcanzar sus prestaciones de servicio. Esto unido a recientes épocas de bonanza económica produjo que la mayoría de proyectos de construcción e investigación se basaran en éstas, incluso para aplicaciones en las que el uso de mezclas en frío sería mucho más lógico.

Por ejemplo, las mezclas en frío son en general más flexibles (o menos rígidas) que las mezclas en caliente, lo que llega a suponer una ventaja cuando la explanada de la carretera es de baja calidad amoldándose a sus deformaciones sin llegar a fisurar (caso bastante habitual en las abundantes carreteras de medio y bajo tráfico). Además son almacenables pudiendo ser transportadas desde plantas de fabricación lejanas sin peligro de que endurezcan y no sirvan para su colocación y compactación una vez llegadas a la obra.

Todo ello, junto con los avances en las emulsiones bituminosas desarrollados en los últimos años y las actuales políticas de lucha contra el cambio climático (como el Protocolo de Kioto, en vigor desde 2005), han contribuido a que su uso vuelva a estar, cada día, más extendido a nivel mundial y que muchos investigadores las retomen como objeto de sus estudios (Miró et al., 2000; Pérez et al., 2003; Pérez et al., 2004; Thanaya, 2003; Kuhn et al., 2005; Oruc et al., 2007; Thanaya, 2006; Chávez- Valencia et al., 2007; Khalid y Monney, 2009; Ozsahin y Oruc, 2008; Thanaya et al., 2009; Thanaya, 2010; Al Nageim et al., 2012; Al-Busaltan et al. 2012a y 2012b; Al-Hdabi et al., 2013; Al-Hdabi et al., 2014a y 2014b; Ferrotti et al., 2014; Guo et al., 2014; Fang et al., 2015).

Ante este panorama, y con la intención de hallar una nueva aplicación de los RCD como áridos reciclados en el ámbito de la ingeniería civil, arranca en 2011 el Proyecto BIA2010-17751 “Aplicación sostenible de residuos de construcción y demolición en ingeniería civil: capas bituminosas en frío en firmes flexibles de medio/bajo tráfico”, financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación con una Ayuda asociada al proyecto para la Formación de Personal Investigador (FPI) BES-2011-044377. Fruto de los trabajos realizados por el autor en dicho proyecto, se obtuvo la presente tesis doctoral, cuyo objetivo fundamental es la aplicación sostenible de los RCD como áridos reciclados de un tipo de mezcla bituminosa que, de por sí, ya es más sostenible que las mezclas bituminosas en caliente: las mezclas en frío.

Así mismo, se han planteado los siguientes objetivos parciales:

1. Elaborar un estado del arte sobre la utilización de áridos reciclados procedentes de RCD en mezclas bituminosas en frío. Debido a la escasa presencia de publicaciones sobre este tema, será útil también información sobre investigaciones afines, como las mezclas en caliente con RCD, las mezclas en frío con áridos convencionales y las mezclas en frío con áridos reciclados diferentes a los RCD. Dichas investigaciones guiarán el camino a seguir a la hora realizar los ensayos de laboratorio, tomar decisiones y establecer comparativas entre los resultados aquí hallados y los obtenidos por otros autores.

2. Determinar las propiedades de los áridos reciclados de RCD empleados para la realización de la presente investigación, y compararlos con los áridos naturales de las muestras de control.
3. Desarrollar un método que permita fabricar probetas con idénticas propiedades (contenido de huecos, densidad, degradación de la granulometría, contenido de humedad residual, etc.) sin importar sus dimensiones y ensayo para el que fueron concebidas, para poder establecer diversas relaciones entre las propiedades estudiadas determinando en qué medida unas influyen sobre las otras
4. Determinar las propiedades de las mezclas bituminosas en frío con áridos reciclados y compararlas con las propiedades obtenidas con mezclas de control (árido 100% natural), así como con los resultados publicados por otros autores.
5. A la vista de los resultados, establecer criterios de diseño, recomendaciones y limitaciones a la hora de emplear mezclas bituminosas en frío con RCD en aplicaciones prácticas.

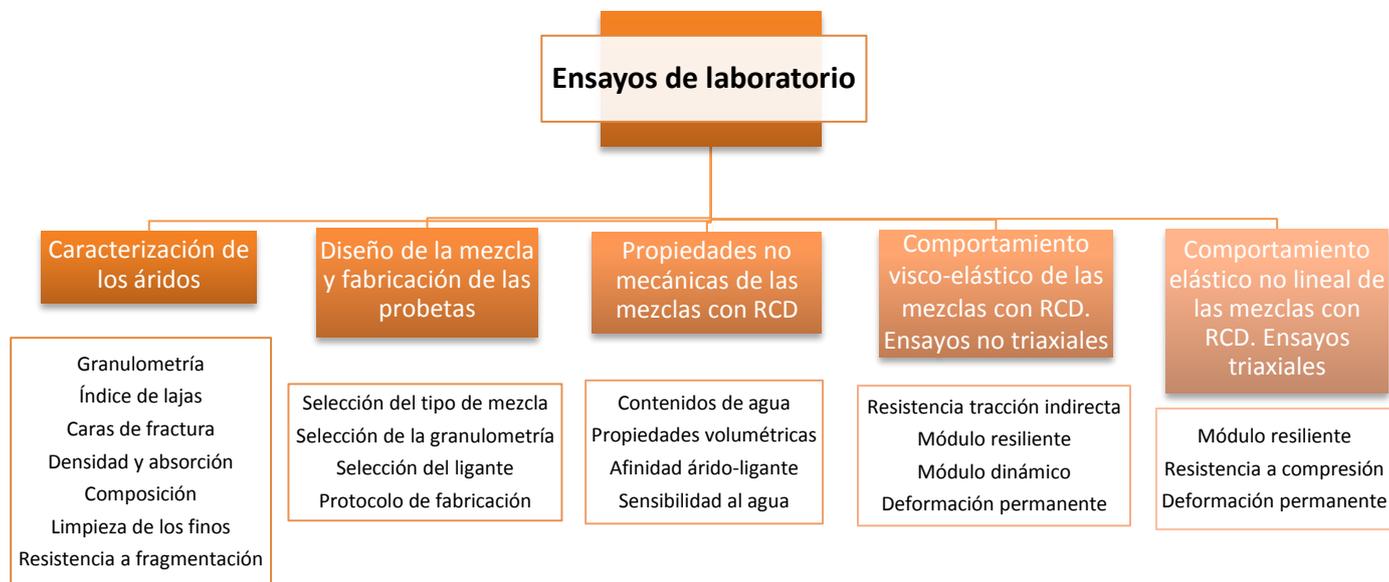
## **2. MATERIALES Y METODOLOGÍA**

### **2.1. Plan general de trabajo**

Tras realizar la caracterización de los materiales empleados, se realizaron en primer lugar los ensayos de las propiedades no mecánicas de las mezclas en frío con RCD, como el contenido de agua tras la compactación, contenido de agua tras el curado, densidad, afinidad entre áridos y ligante o sensibilidad al agua. A continuación, se ensayaron las propiedades mecánicas, teniendo en cuenta que las mezclas realizadas con emulsión bituminosa combinan características de los materiales granulares, que muestran un comportamiento elástico no lineal (dependencia del nivel de esfuerzo) y de las mezclas en caliente, con comportamiento visco-elasto-plástico (dependencia de la temperatura y de la velocidad y frecuencia de aplicación de las cargas). De este modo, las mezclas en frío no se comportan ni como los primeros ni como los segundos, sino como un material que comparte características de ambos a la vez. Además, y aunque toda su vida van a compartir estas características, en las etapas tempranas de maduración es cuando las mezclas en frío acentúan su comportamiento elástico no lineal (asemejándose al de un material granular), mientras que en la segunda fase es cuando se acentúan más sus características visco-elasto-plásticas (más propias de las mezclas bituminosas en caliente). Con el fin de estudiar este doble comportamiento de las mezclas en frío, los ensayos de propiedades mecánicas se agruparon en dos categorías:

- a) Por un lado, se analizó el comportamiento visco-elasto-plástico, propio de las mezclas en caliente y que se acentúa en las mezclas en frío tras avanzados tiempos de maduración, lo cual se simuló sometiendo las probetas a un curado acelerado de 3 días a 50°C en estufa ventilada. Ante la falta de Normas específicas para las mezclas en frío, la mayor parte de las propiedades mecánicas se analizaron siguiendo Normas de ensayo para mezclas bituminosas en caliente, como la resistencia a tracción indirecta, módulo resiliente a tracción indirecta (ITSM), módulo dinámico o deformación permanente mediante ensayo uniaxial.
- b) Por otro lado, se estudió el comportamiento elástico no lineal, recurriendo a Normas propias de materiales granulares sin ligante. Como este comportamiento está presente en toda la vida de las mezclas en frío pero se ve acentuado en las etapas tempranas de maduración, se repitieron los ensayos sobre probetas curadas y sin curar. Así, se realizaron ensayos como el de módulo resiliente, compresión estática y deformación permanente, todos ellos bajo condiciones de sollicitación triaxial.

Todos los ensayos realizados fueron fielmente reproducidos en mezclas con un 100% de árido reciclado y en mezclas de control fabricadas exclusivamente con árido natural. Con ello, se pudo determinar claramente en qué manera los RCD afectan a las propiedades de las mezclas en frío. Finalmente, los resultados fueron comparados también con los de otros autores, así como con requerimientos establecidos en estándares y normativas.



**Figura 2.1 Plan general de trabajo**

## 2.2. Materiales empleados

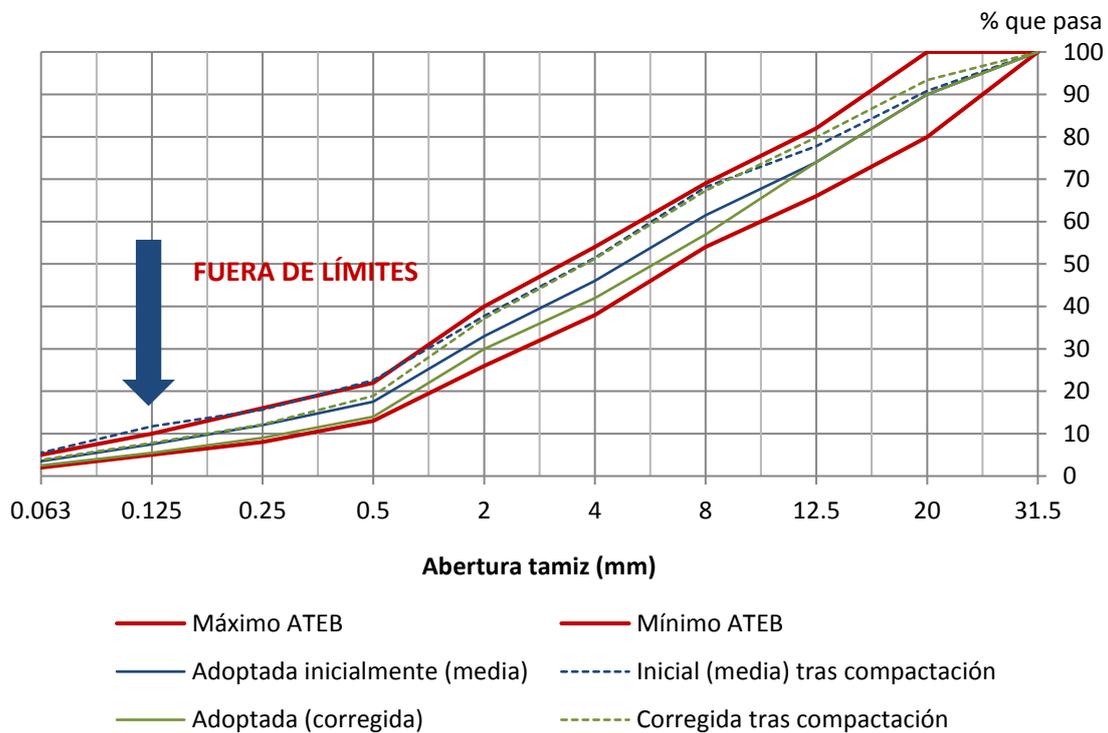
Para el desarrollo de la presente investigación se emplearon dos tipos de áridos: Por un lado, se contó con una Corneana, árido 100% natural y de tipo silíceo y de uso común proveniente de una cantera en Astariz (Ourense) con el que se fabricarían las mezclas de control. Por otro lado, el árido 100% reciclado de RCD cuya composición se resume en la Tabla 2.1. Las propiedades de ambos áridos se resumen en la Tabla 2.2. La emulsión empleada fue de tipo ECL-2d, 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. 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 2.2).

**Tabla 2.1 Composición del árido reciclado (en % de peso seco)**

Material	% en árido grueso	% en árido medio
	(12/24 mm)	(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 2.2 Características de los áridos reciclados y naturales**

Propiedad	Árido	Árido
	reciclado	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
Coeficiente 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%



**Figura 2.2 Granulometría empleada durante la presente investigación**

### 2.3. Fabricación de las probetas

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. Con ello, se obtuvieron probetas cilíndricas de 101,6 mm de diámetro y 101,6 mm de altura con las que se realizaría el ensayo de inmersión-compresión (NLT-162). Para los ensayos de tracción indirecta (UNE-EN 12697-23) y módulo resiliente (UNE-EN 12697-26) se fabricaron del mismo modo para luego aplicar un corte por el plano medio y obtener dos probetas gemelas de 50 mm cada una (cada una de ellas destinada a un ensayo diferente). Este procedimiento permitió obtener probetas con idénticas propiedades intrínsecas sin importar el tamaño o el ensayo para el que fueron concebidas (Figura 2.3).

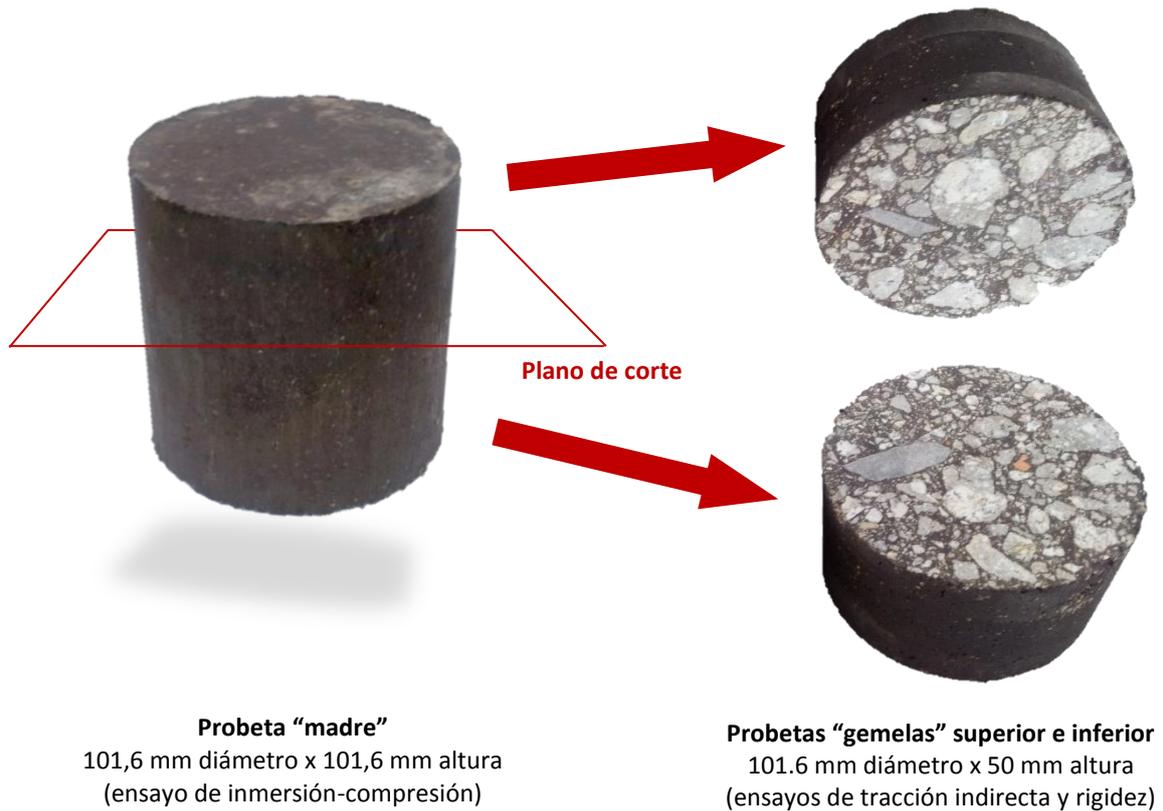
La compactación se realizó por medio de prensa estática con un esfuerzo máximo de 21 MPa aplicado durante 2 min. Las probetas fueron sometidas a un proceso de curado acelerado de 3 días en estufa ventilada a 50°C, de acuerdo con lo establecido en los Pliegos de la ATEB para grava-emulsiones.

Se comprobó también que la cantidad de agua remanente en el interior de las probetas tras la compactación y el curado, apenas depende del contenido inicial aportado en el mezclado (Tabla 2.3). Aun así, fue necesario llegar a contenidos (iniciales) muy elevados hasta conseguir hallar el contenido óptimo para algunas propiedades (de hasta el 36% con RCD).

Así, aunque las figuras y tablas estén referenciadas al contenido inicial, se deberá tener en cuenta que el contenido remanente es mucho menor, lo que indica que estas grandes cantidades de agua inicial son simplemente necesarias para evitar la prematura rotura de la emulsión al ser mezclada con un árido tan absorbente como los RCD.

**Tabla 2.3 Contenidos de agua (en % peso árido seco) remanentes en las probetas tras su curado en estufa, en función de los contenidos de agua y betún aportados en la amasada**

100% Árido Reciclado						100% Árido Natural			
% betún	Agua total en amasado (% peso árido seco)					% betún	Agua total en amasado (% peso árido seco)		
	9%	12%	15%	18%	21%		6%	9%	12%
2%	2,1%	2,2%	2,2%	2,1%	2,1%	2%	0,1%	0,1%	0,2%
3%	2,3%	2,4%	2,5%	2,5%	2,4%	3%	0,1%	0,2%	0,1%
4%	2,5%	2,9%	2,8%	2,9%	2,8%	4%	0,2%	0,2%	0,3%
5%	3,2%	3,2%	3,1%	2,8%	3,2%	5%	0,6%	0,6%	0,3%
6%	3,5%	3,4%	3,2%	3,5%	3,5%	-	-	-	-



**Figura 2.3 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)**

## 2.4. Ensayos para la determinación de propiedades volumétricas

Se ha realizado un análisis volumétrico con el fin de determinar el contenido de huecos en las mezclas estudiadas. Los parámetros analizados fueron los huecos en árido mineral o VMA (Voids in Mineral Aggregate) los cuales incluyen todos los huecos rellenos de aire, betún o agua; huecos rellenos de agua o  $V_{aw}$  y huecos rellenos de aire o  $V_a$ ; así como la densidad aparente, que se pueden obtener mediante el uso de las fórmulas propuestas por el Asphalt Institute (Asphalt Institute, 1997):

$$G = \frac{D}{F - E} \quad [\text{Ec. 2-1}]$$

$$VMA (\%) = \left[ \left( \frac{100 + A + K}{G} - \frac{100}{C} \right) \div \left( \frac{100 + A + K}{G} \right) \right] \times 100 \quad [\text{Ec. 2-2}]$$

$$V_{aw} (\%) = \left[ \left( \frac{100 + A + K}{G} - \frac{100}{C} - \frac{A}{B} \right) \div \left( \frac{100 + A + K}{G} \right) \right] \times 100 \quad [\text{Ec. 2-3}]$$

$$V_a (\%) = V_{aw} - \left[ \left( \frac{K \times 100}{L} \right) \div \left( \frac{100 + A + K}{G} \right) \right] \quad [\text{Ec. 2-4}]$$

Donde  $G$  es el peso específico aparente;  $D$  es la masa de la probeta al aire (g);  $E$  es la masa de la probeta sumergida en agua (g);  $F$  es la masa de la probeta saturada con superficie seca (g);  $A$  es el betún residual como porcentaje sobre masa de árido seco;  $B$  es el peso específico del betún;  $L$  es el peso específico del agua y  $K$  es el contenido de agua en el momento del ensayo (%) que puede ser calculada, a su vez, del siguiente modo:

$$K (\%) = \frac{\text{masa de agua (g)}}{\text{masa de mezcla seca (g)}} \times (100 + A) \quad [\text{Ec. 2-5}]$$

## 2.5. Ensayos para el análisis del comportamiento visco-elasto-plástico

### 2.5.1. Ensayo de inmersión-compresión

Siguiendo lo establecido en la Norma NLT-162, se realizó una serie de ensayos de inmersión-compresión, tanto para el árido reciclado como para el árido natural, sobre grupos de 10 probetas (5 acondicionadas en cámara climática más 5 acondicionadas en baño de agua a 49°C durante 4 días) de modo que cada grupo contuviese una combinación diferente de porcentajes de agua y betún para así determinar unos valores óptimos. Las probetas, tras el acondicionamiento fueron sometidas a una compresión axial hasta rotura obteniéndose un valor medio de resistencia a compresión para cada grupo de 5 probetas. Finalmente, el índice de resistencia conservada fue hallado mediante el cociente de las resistencias de ambos grupos:

$$IRC (\%) = \frac{R_2}{R_1} \cdot 100$$

Siendo  $R_2$  la resistencia a compresión del grupo acondicionado en baño de agua y  $R_1$  la del grupo acondicionado al aire.

### 2.5.2. Ensayo de tracción indirecta

Siguiendo las indicaciones y recomendaciones de la Norma UNE-EN 12697-23 las probetas de 50 mm de altura fueron llevadas a una temperatura de 25°C tras lo cual rotas por medio de una carga diametral con un ratio de deformación constante de  $50 \pm 2$  mm/min. Finalmente, la resistencia a tracción indirecta fue determinada mediante la siguiente expresión:

$$ITS = \frac{2 P}{\pi D H}$$

Donde  $ITS$  es la resistencia a tracción indirecta (GPa),  $P$  es la carga máxima alcanzada en el ensayo (kN),  $D$  es el diámetro de la probeta (mm) y  $H$  es la altura de la probeta (mm).

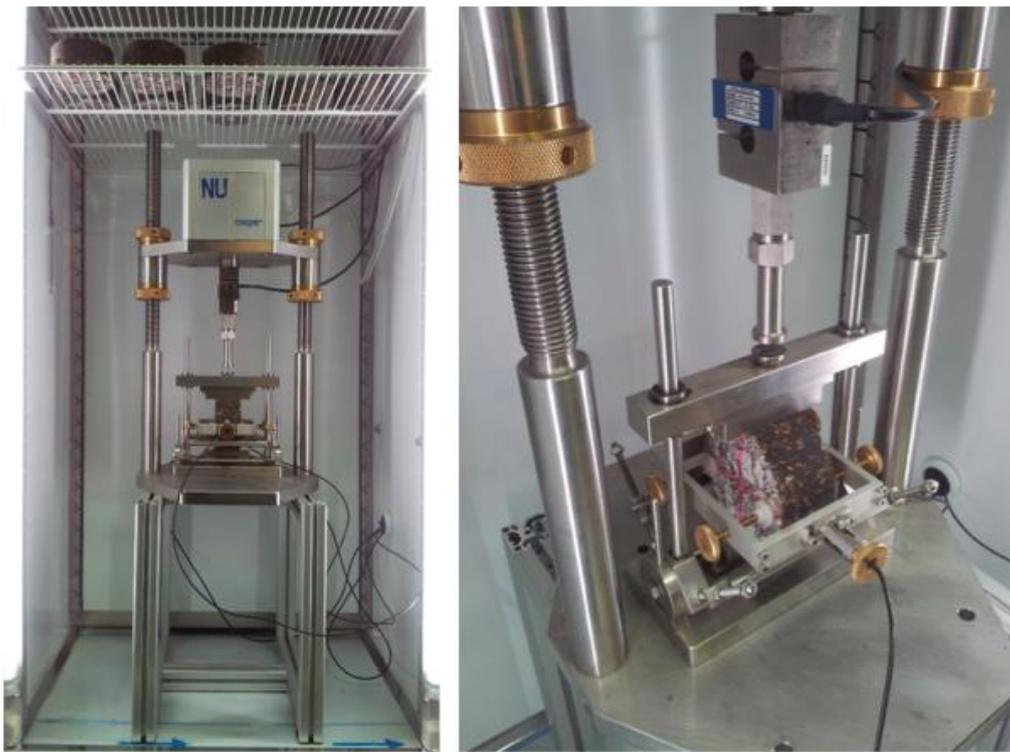
### 2.5.3. Módulo resiliente

El módulo resiliente se determinó siguiendo la Norma UNE-EN 12697-26 en su modalidad de ensayo de tracción indirecta sobre probetas cilíndricas (Figura 2.4). En este caso, se ensayaron las parejas de las probetas ensayadas a tracción indirecta y cada una de ellas, a 2°C, 10°C y 20°C (según la rutina habitual especificada en la Norma). La temperatura de 2°C fue elegida frente a la alternativa de 0°C para evitar la posible congelación del agua alojada en el interior de las probetas, lo cual produciría un comportamiento sensiblemente diferente al comportamiento visco-elastoplástico que se deseaba estudiar.

Tras 10 pulsos de acondicionamiento, las probetas fueron sometidas a 5 ciclos dinámicos de carga diametral con una duración total de 3 s por ciclo, de los cuales 124 ms se corresponden con el aumento de la carga y el resto con un periodo de recuperación de deformaciones visco-elásticas. El módulo de rigidez a tracción indirecta (ITSM) para cada pulso de carga, fue calculado según la siguiente expresión:

$$S_m = \frac{F (\vartheta + 0,27)}{z \cdot h}$$

Donde  $S_m$  es el módulo de rigidez (MPa),  $F$  representa el valor máximo de la carga cíclica aplicada (N),  $z$  es la amplitud de la deformación horizontal obtenida durante el ciclo de carga (mm),  $h$  es el espesor medio de la probeta (mm) y  $\vartheta$  es el coeficiente de Poisson (asumido como 0,35). El valor final para cada probeta se halló como la media de los 5 pulsos.



**Figura 2.4 Ensayo dinámico de rigidez según Norma UNE-EN 12697-26**

#### **2.5.4. Módulo dinámico**

El módulo dinámico  $|E^*|$  se determinó mediante una adaptación de la Norma AASHTO TP 62-07, la cual implica la aplicación de cargas dinámicas axiales sobre probetas cilíndricas de 100 mm de diámetro y 150 mm de altura a diferentes frecuencias y temperaturas. Para poder correlacionar los resultados con los del módulo ITSM, se aplicaron las cargas y temperaturas descritas en la mencionada Norma, pero en lugar de ser aplicadas axialmente, fueron aplicadas, al igual que en el ensayo del ITSM, diametralmente. Las probetas fueron sometidas a una primera secuencia de acondicionamiento (200 ciclos a 25 Hz) para luego seguir con las demás secuencias (25Hz, 10Hz, 5Hz, 1Hz, 0,5Hz y 0,1Hz). Dado que el ensayo es no destructivo, las mismas secuencias fueron repetidas sobre las mismas probetas a las temperaturas de 2°C, 20°C y 40°C. Se procedió siempre de frecuencias mayores a menores y de temperaturas menores a mayores con el fin de mantener las probetas en el mejor estado posible durante todo el ensayo.

La carga aplicada consistió en una onda sinusoidal con una amplitud tal que permitiese mantener las deformaciones entre 50  $\mu\epsilon$  y 150  $\mu\epsilon$ . Así, para las temperaturas de 2°C y 20°C, la onda sinusoidal de carga tuvo una amplitud de 0,7 kN (unos 60 kPa) con un valor mínimo de contacto de 0,1 kN mientras que para la temperatura de 40°C se redujo todavía más a 0,3 kN (unos 25 kPa) de amplitud y 0,07 kN de carga mínima de contacto. Finalmente, el Módulo Dinámico  $|ITE^*|$  se calculó mediante la expresión:

$$|ITE^*| = \sqrt{\left(\frac{\sigma_0 \cdot \cos \beta_t}{\varepsilon_0}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_0 \cdot \sin \beta_\varepsilon}{\varepsilon_0}\right)^2} = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \quad [\text{Ec. 2-6}]$$

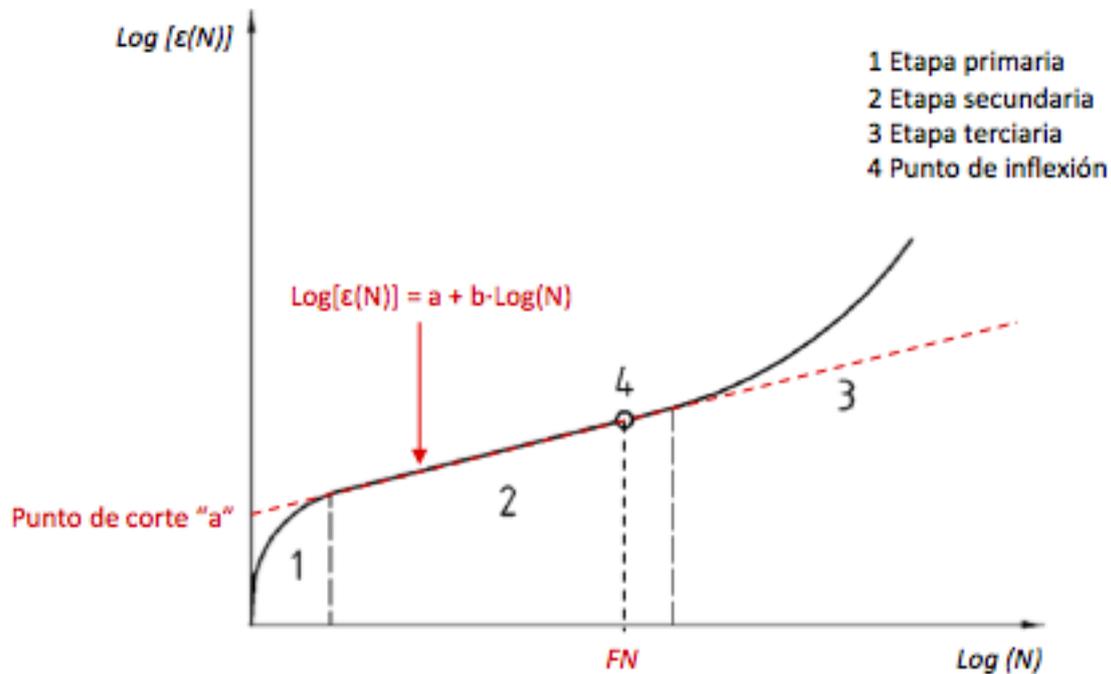
Donde  $\sigma_0$  y  $\varepsilon_0$  son la amplitud de los ciclos de tensión y deformación diametral respectivamente, es decir, diferencia entre los valores máximo y mínimo de un determinado ciclo.  $\beta_t$  y  $\beta_\varepsilon$  son los ángulos de fase de las cargas cíclicas de tensión y deformación, retrasados uno con respecto al otro un ángulo  $\phi$  debido al carácter visco-elástico de las mezclas estudiadas.

### 2.5.5. Ensayo uniaxial de resistencia a la deformación permanente

El ensayo se realizó según la Norma BSi DD 226:1996 (Figura 2.5). Las caras de las probetas fueron lubricadas mediante la aplicación de una capa de grasa de silicona junto con otra de polvo de grafito para así reducir la fricción entre éstas y los platos de carga. Los especímenes fueron llevados a la temperatura de ensayo de 30°C y sometidos a una precarga de acondicionamiento de 10 kPa durante 600 s  $\pm$  6 s. A continuación, el ensayo se realizó a temperatura constante en cámara climática, mediante la aplicación de una carga dinámica de 100 kPa  $\pm$  2 kPa, consistiendo cada ciclo en 1 s de carga seguido de 1 s de reposo con carga nula. Los ensayos se detuvieron una vez transcurridos 5000 ciclos de carga. Los parámetros analizados fueron la deformación permanente tras el acondicionamiento ( $\varepsilon_0$ ), la deformación permanente al final del ensayo ( $\varepsilon_{5000}$ ), la pendiente de la curva de deformación con el número de ciclos de carga ( $b$ ) y el punto de corte de la recta tangente con el eje vertical ( $a$ ) (Figura 2.6).



**Figura 2.5 Disposición del ensayo de deformación permanente según Norma BSi DD 226**



**Figura 2.6 Curva típica de deformación axial permanente en función del número de ciclos de carga (a partir de Norma UNE-EN 12697-25)**

## 2.6. Ensayos para el estudio del comportamiento elástico no lineal

### 2.6.1. Ensayo triaxial dinámico de rigidez

La rigidez de las mezclas bituminosas con áridos reciclados fue estudiada también mediante ensayos dinámicos con confinamiento triaxial, siguiendo para ello la Norma UNE-EN 13286-7, propia de mezclas de árido sin ligante (Figura 2.7). Para la realización del ensayo, se procedió en primer lugar a un acondicionamiento con un esfuerzo de confinamiento,  $\sigma_3$ , de 70 kPa y una onda cíclica de carga axial desviadora  $\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3$ , cuyo valor máximo es de 340 kPa y valor mínimo de 5 kPa (seleccionado en lugar de 0 kPa para mantener el contacto entre probeta y actuador en todo momento). El acondicionamiento se interrumpe si el régimen de deformación axial permanente comienza a ser menor de  $10^{-7}$  por ciclo y si el régimen de variación del coeficiente de elasticidad comienza a ser menor de 5 kPa por ciclo. De no ser así, el acondicionamiento se extenderá hasta los 20.000 ciclos.

Una vez concluye el acondicionamiento y que por tanto se puede considerar que la probeta ha entrado en un régimen de deformación resiliente, se procede al ensayo con la sucesión de un total de 29 secuencias con diferentes combinaciones de esfuerzos desviadores

( $\sigma_d$ ) y de confinamiento ( $\sigma_3$ ). En cada secuencia, se aplican 100 ciclos de carga axial manteniendo estable la presión de confinamiento al nivel fijado en la correspondiente secuencia y se hace la media de los resultados registrados en los últimos 10 ciclos para posteriormente pasar a la siguiente secuencia con una nueva combinación de esfuerzos. En la Figura 2.8 se muestra la trayectoria de tensiones ( $\sigma_d$  y  $\sigma_3$ ) a aplicar en cada una de las secuencias junto con la suma de tensiones principales en el instante del ciclo de mayor esfuerzo desviador  $\theta$ :

$$\theta = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 = \sigma_1 + 2\sigma_3 \quad [\text{Ec. 2-7}]$$

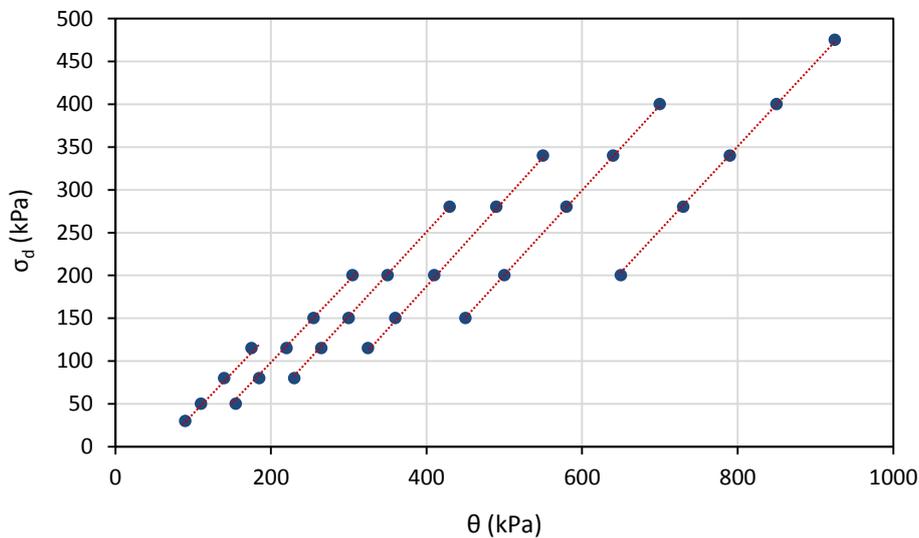
Siendo  $\sigma_3$  constante para cada secuencia, el módulo resiliente es calculado mediante la expresión:

$$E_r = \frac{\sigma_1^r}{\varepsilon_1^r} \quad [\text{Ec. 2-8}]$$

Siendo  $\sigma_1^r$  y  $\varepsilon_1^r$  las amplitudes de las ondas de esfuerzo y deformación axial registradas en un determinado ciclo. Como se ha mencionado anteriormente, el valor asignado a cada secuencia será calculado como la media de los hallados en los últimos 10 ciclos de la misma.



**Figura 2.7 Ensayo dinámico de rigidez con confinamiento triaxial según Norma UNE-EN 13286-7**



**Figura 2.8 Trayectorias de tensiones empleadas según la Norma UNE-EN 13286-7**

### 2.6.2. Ensayo triaxial de compresión. Envolvente de Mohr-Coulomb

El objetivo de este ensayo es determinar la tensión desviadora a la que colapsan las probetas ( $\sigma_{d,f}$ ) bajo diferentes tensiones de confinamiento ( $\sigma_3$ ) para poder realizar, a continuación, el ensayo de deformación permanente con diferentes valores de Stress Ratio (SR):

$$SR = \frac{\sigma_{d,a}}{\sigma_{d,f}} \quad [Ec. 2-9]$$

Donde,  $\sigma_{d,a}$  es el esfuerzo desviador aplicado para un determinado ensayo y  $\sigma_{d,f}$  es el esfuerzo desviador de fallo para la presión de confinamiento a la que se realice el ensayo. Los ensayos se realizaron además sobre probetas recién fabricadas, sin ningún tipo de curado artificial, así como con probetas idénticas tras haberlas sometido a un curado acelerado de 3 días en estufa a 50°C, con el fin de comparar cómo influye este tipo de curado, aplicado en los demás capítulos de la presente tesis. Para cada contenido de agua/betún y tipo de árido estudiado se fabricó una serie de probetas iguales, sometiendo cada una de ellas a una presión de confinamiento ( $\sigma_3$ ) diferente (25 kPa, 50 kPa, 100 kPa y 200 kPa). Tras ser alcanzado el nivel de confinamiento deseado, se aplicó una rampa de carga con control de deformación constante al 2,6% por minuto (es decir 5,3 mm/min para el tamaño de probeta en cuestión) hasta alcanzar el fallo de cada una de ellas. A diferencia del ensayo de rigidez, como en este caso las probetas son sometidas a grandes deformaciones y en algunos casos incluso llegan a su colapso, no se introdujo ningún tipo de dispositivo de medición de las deformaciones radiales o perimetrales.

Las tensiones máxima principal y máxima desviadora que resiste la probeta en el momento de colapso son precisamente  $\sigma_{1,f}$  y  $\sigma_{d,f}$  (siendo  $\sigma_{1,f} = \sigma_{d,f} + \sigma_3$ ). Ambas tensiones de fallo dependen linealmente de la presión de confinamiento  $\sigma_3$ . Por tanto, la relación entre la tensión máxima principal  $\sigma_{1,f}$  y la presión de confinamiento  $\sigma_3$  puede ser descrita como (Ebels, 2008):

$$\sigma_{1,f} = A \cdot \sigma_3 + B \quad [\text{Ec. 2-10}]$$

Donde:

$$A = \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \quad [\text{Ec. 2-11}]$$

$$B = \frac{2C \cdot \cos \varphi}{1 - \sin \varphi} \quad [\text{Ec. 2-12}]$$

Siendo la cohesión (C) y el ángulo de rozamiento interno ( $\varphi$ ) los parámetros de comportamiento a cortante propios del material. El criterio de fallo a cortante de Coulomb es definido como sigue (Lambe y Whitman, 1991):

$$\tau_{ff} = \tan \varphi \cdot \sigma_{ff} + C \quad [\text{Ec. 2-13}]$$

Donde  $\tau_{ff}$  y  $\sigma_{ff}$  son las tensiones tangencial y normal respectivamente sobre el plano de falla en el momento en el que se produce la rotura del material.

### 2.6.3. Ensayo triaxial de resistencia a la deformación permanente

Si bien existe una amplia variabilidad a la hora de realizar los ensayos triaxiales por diferentes autores (nivel de esfuerzo axial, confinamiento, frecuencia de las cargas, número de ciclos de carga, etc.), para el presente estudio se optó por ajustarse a lo establecido en la Norma UNE-EN 13286-7, Artículo 8, propia de mezclas de árido sin ligante.

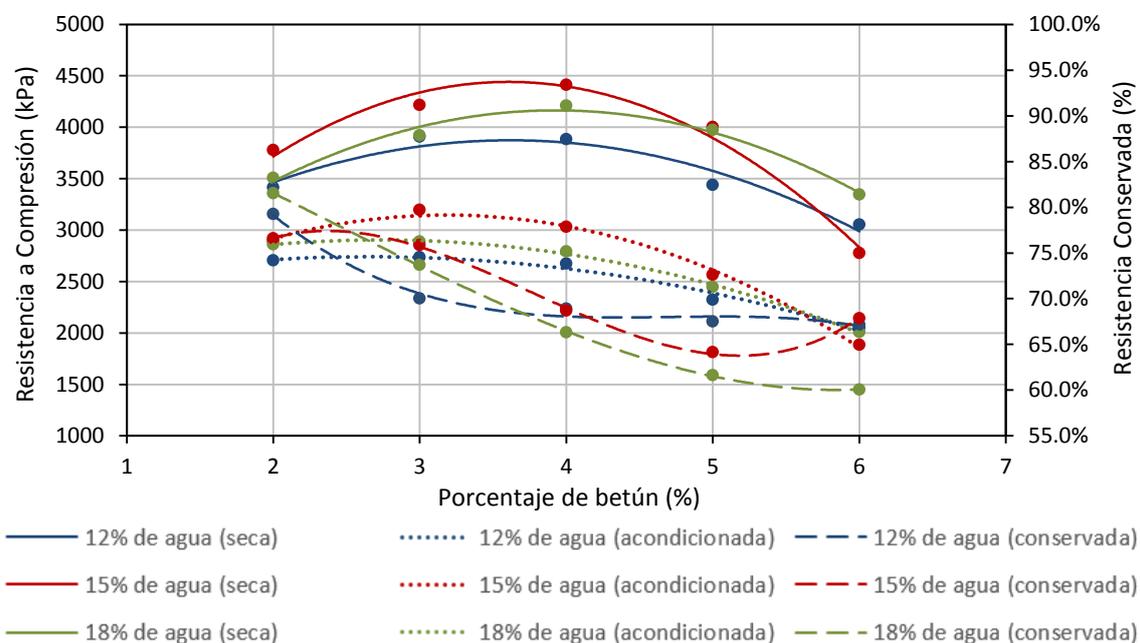
Según el Artículo 8 de la Norma UNE-EN 13286-7, los ensayos se comenzaron aplicando los esfuerzos iniciales  $\sigma_3 = 20$  kPa y  $\sigma_d = 5$  kPa (esta última para asegurar un valor mínimo de contacto entre actuador y probeta). A continuación se aplicaron 80.000 ciclos registrando las lecturas de 10 ciclos consecutivos una vez alcanzados los 1 a 20, 50, 100, 200, 400, 1000, 2500, 5000, 7500, 10000, 12500, 15000, 20000, 30000, 40000, 50000, 60000, 70000 y 80000 ciclos.

El confinamiento se mantuvo constante en 50 kPa mientras que la tensión desviadora ( $\sigma_d$ ) sobre el eje axial, se fue variando en diferentes ensayos, como distintos porcentajes de la tensión desviadora de fallo ( $\sigma_{d,f}$ ). Las tensiones de fallo fueron determinadas para cada mezcla por medio del ensayo estático de compresión triaxial descrito en el apartado anterior.

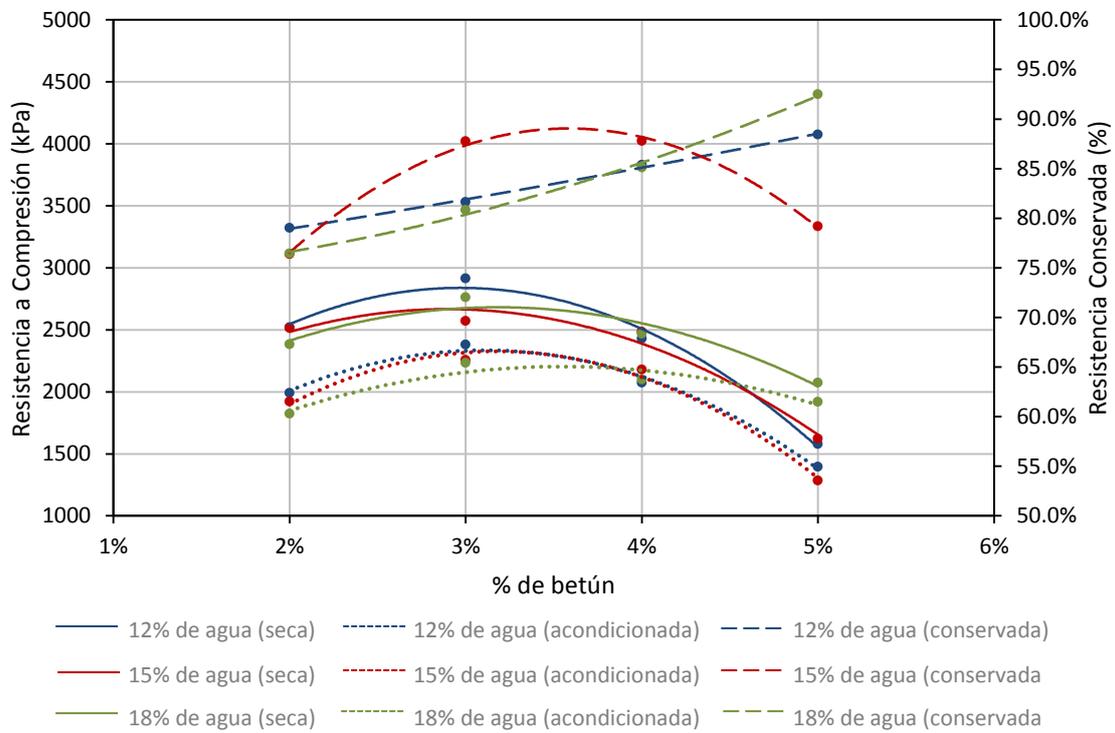
### 3. RESULTADOS

#### 3.1. Inmersión-compresión

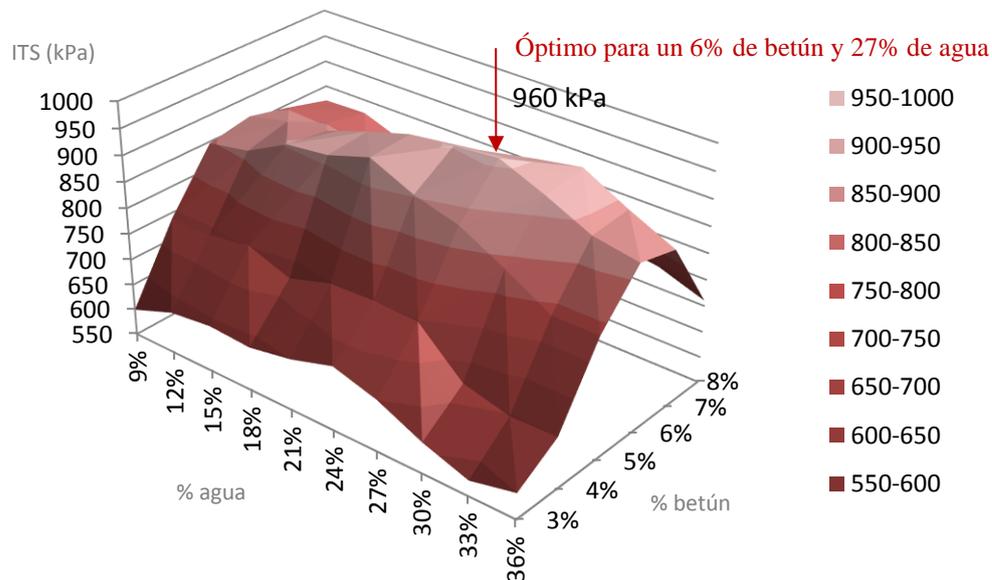
En primer lugar, y tal como se puede ver en la Figura 3.1, todos los valores obtenidos para muestras con árido reciclado superan los límites mínimos de resistencia seca (1,2 MPa), resistencia húmeda (1,0 Mpa) y resistencia conservada (60%) de la Asociación Técnica de Emulsiones Bituminosas (ATEB) para tráficos T3 y T4, así como el 50% genérico que establecía el antigua PG-3 para todo tipo de tráfico. Comparando estos resultados con los obtenidos para una mezcla con un 100% de árido natural (Figura 3.2) se aprecia en primer lugar como tanto las resistencias sin acondicionamiento (secas) como con acondicionamiento (húmedas) son sensiblemente mayores para el caso del 100% de árido reciclado (óptimos un 51,3% y 34,4% mayores respectivamente con árido reciclado). Sin embargo, debido a que la resistencia húmeda no se incrementa tanto como la seca, los porcentajes de resistencia conservada disminuyen, aunque se debe tener en cuenta que la resistencia tras acondicionamiento con un 100% de árido reciclado (3197,7 kPa) sigue siendo 282,8 kPa mayor que la resistencia sin acondicionamiento con un 100% de árido natural (2914,9 kPa) de lo que se concluye que, pese a que el agua afecte más a las mezclas, el resultado sigue siendo todavía considerablemente mejor con el árido reciclado.



**Figura 3.1 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**



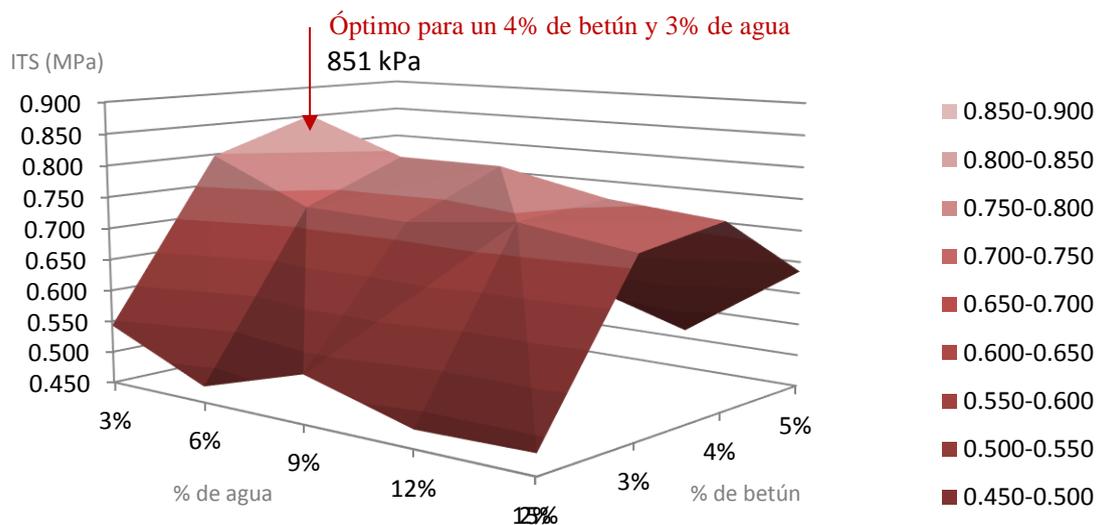
**Figura 3.2 Resistencia a compresión simple (sin y tras acondicionamiento) según % de betún y agua para un 100% de árido natural**



**Figura 3.3 Resistencia a tracción indirecta (en kPa) según contenidos de agua y betún en mezcla (porcentajes referidos a masa de árido seco) para un 100% de árido reciclado**

### 3.1. Resistencia a tracción indirecta

En primer lugar, como se puede observar en la Figura 3.3, es evidente que la resistencia a tracción indirecta es mucho más dependiente del contenido de betún que del contenido de agua. Por ello, las líneas de igual resistencia tienden a ser paralelas según la variación de agua y parabólicas según la variación de betún. De este modo, se pudo comprobar que el contenido óptimo de betún es de un 6% aunque ha sido necesario llegar a contenidos de agua mucho más elevados para conseguir determinar un óptimo de agua. Esto es debido a que el árido reciclado, tal y como ya se ha expuesto, podría producir la ruptura de la emulsión creando grumos de betún, ya incluso desde el mezclado inicial en amasadora. Así, sería necesaria una cantidad de agua más elevada que consiguiese mantener el betún emulsificado hasta producirse la correcta envuelta del árido y su compactación. Cuando se comparan los resultados con los de las mezclas de control obtenidos para un 100% de árido natural se extrae que, en primer lugar, las resistencias a tracción indirecta son mayores para el 100% de árido reciclado que para el 100% de árido natural (máxima con reciclado un 13% superior) obteniéndose un efecto beneficioso mediante el uso del reciclado. No obstante, los óptimos se dan para contenidos mayores de ligante y agua.



**Figura 3.4 Resistencia a tracción indirecta (en MPa) según contenidos de agua y betún en mezcla (porcentajes referidos a masa de árido seco) para un 100% de árido natural**

Los resultados también son mejores que los obtenidos por autores como Dondi et al. (2014) para reciclados de firmes en frío con emulsión, cuyos valores rondaban los 500 MPa para mezclas con árido natural y 400 MPa y 350 MPa con adiciones de residuos de neumáticos; y que los de Yan et al. (2014), que aún sin la adición de polvo de neumático, resultaron en torno a los 600 kPa para muestras con RAP y con un 1,5% de cemento. También son sensiblemente mayores que los de Kim et al. (2011) para reciclados de firmes con emulsión y con betún (valores en torno a 50-150 kPa), aunque las condiciones de curado en

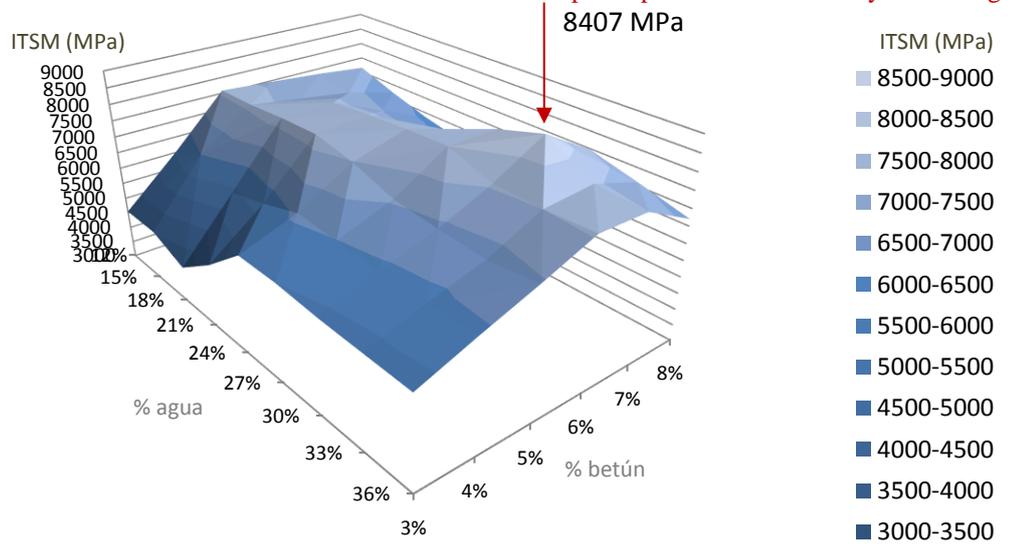
este caso son totalmente diferentes; y los de Iwanski y Chomicz-Kowalska (2013), que obtuvieron valores con reciclados en frío con espuma de betún superiores a los 900 kPa solamente con mezclas ricas en ligante y adiciones de cemento Portland de un 2,5%. También son mayores que los de Dal Ben y Jenkins (2014), que alcanzaron su máxima resistencia a 25°C con la mezcla de un 50% de RAP y 50% de árido natural, pero quedándose igualmente en unos 500 kPa.

### **3.2. Rigidez según el módulo resiliente a tracción indirecta (ITSM)**

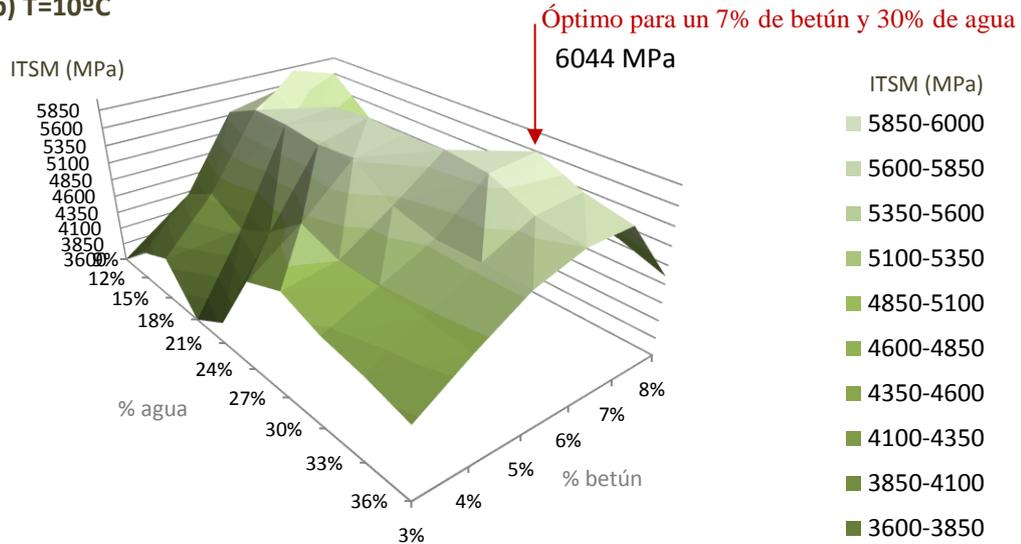
En las Figuras 3.5 y 3.6 se muestran los resultados de rigidez obtenidos para mezclas con árido reciclado y árido natural respectivamente a diferentes temperaturas. Las rigideces observadas son superiores a los valores publicados por Thanaya (2007) en mezclas bituminosas en frío con árido natural (3378 MPa), incluso cuando éste añadía un 1% de cemento de fraguado rápido y aplicaba dos ciclos de compactación fuerte (2x120 revoluciones en compactador giratorio, lo cual según el autor es equivalente a 2x75 golpes de martillo Marshall en cada cara de la probeta) a las probetas. Otros autores como Oruc (2007) y Ozsahin y Oruc (2008) analizaron la rigidez a 25°C de las mezclas en frío con contenidos de betún de 4,2%, 5,2% y 6,2% tras diferentes tiempos de curado. Con un curado de 120 días, solamente superaron los 4024 MPa añadiendo a estas mezclas cantidades de cemento de un 1%, 2% y 3% respectivamente y aún con 360 días de curado fue necesario añadir un 1%, 1% y 3% de cemento respectivamente. Al Nageim et al. (2012) Y Al-Busaltan (2012b) solamente obtuvieron módulos resilientes a 20°C superiores a los 4024 MPa con largos tiempo de curado y con la adición de un 5,50% de cemento Portland convencional o un 4,13% de cenizas volantes. Al-Hdabi et al. (2014a) solamente superó este valor con porcentajes de cemento del 6% o con un 4% de cenizas volantes y curados superiores a 28 días tras curado artificial inicial.

Estos resultados también pueden ser comparados con los obtenidos para otros materiales similares como los reciclados en frío con emulsión bituminosa. Así, Ma et al. (2012) consiguieron un módulo resiliente a 25°C de 1450 MPa tras 90 días de curado y con la aportación de un 6% de cemento a la mezcla. Por su parte, a 20°C, Dondi et al. (2014) obtuvieron módulos en torno a los 5500 MPa con áridos naturales y bajando sobre los 4500 MPa cuando se añadían residuos de neumáticos a las mezclas. Kim et al. (2011) estudiaron la rigidez de los reciclados con emulsión y con espuma de betún, registrando valores crecientes con el tiempo de curado y siempre mayores para la espuma de betún (entre 1500 kPa y 4200 kPa) que para la emulsión (entre 1000 kPa y 3000 kPa). Por tanto, podría decirse que los resultados son mejores que los de Ma et al. (2012) y Kim et al. (2011) (aunque el curado empleado por estos últimos era muy diferente por lo que los resultados no son directamente comparables) pero sin llegar a los niveles de Dondi et al. (2014), en torno a los 5000 MPa, quizá más propios de mezclas en caliente. Por ello, los resultados son suficientemente altos a la vez que se sigue conservando cierta flexibilidad, muy beneficiosa en caminos de medio/bajo tráfico en los que las explanadas no suelen aportar elevadas capacidades portantes.

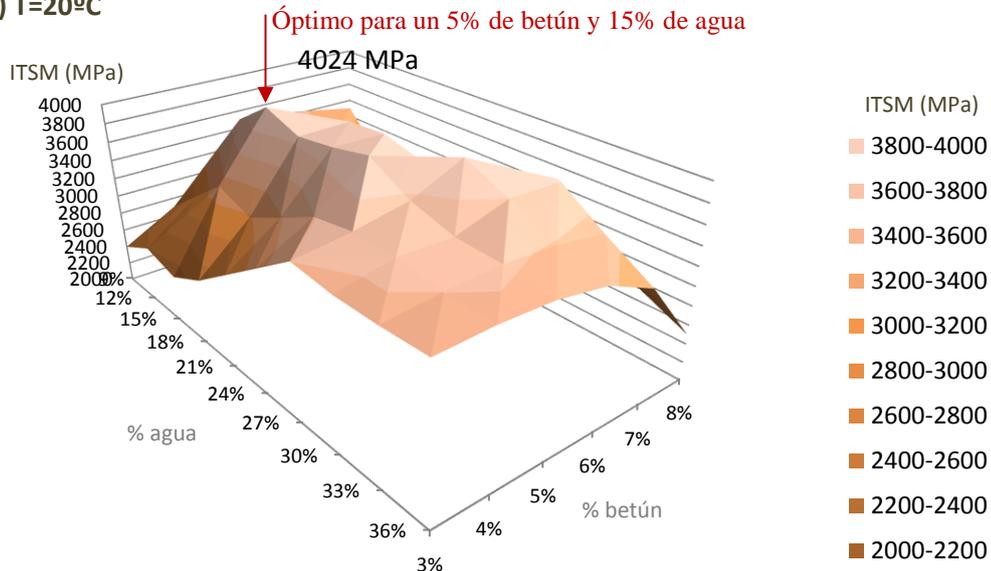
a) T=2°C



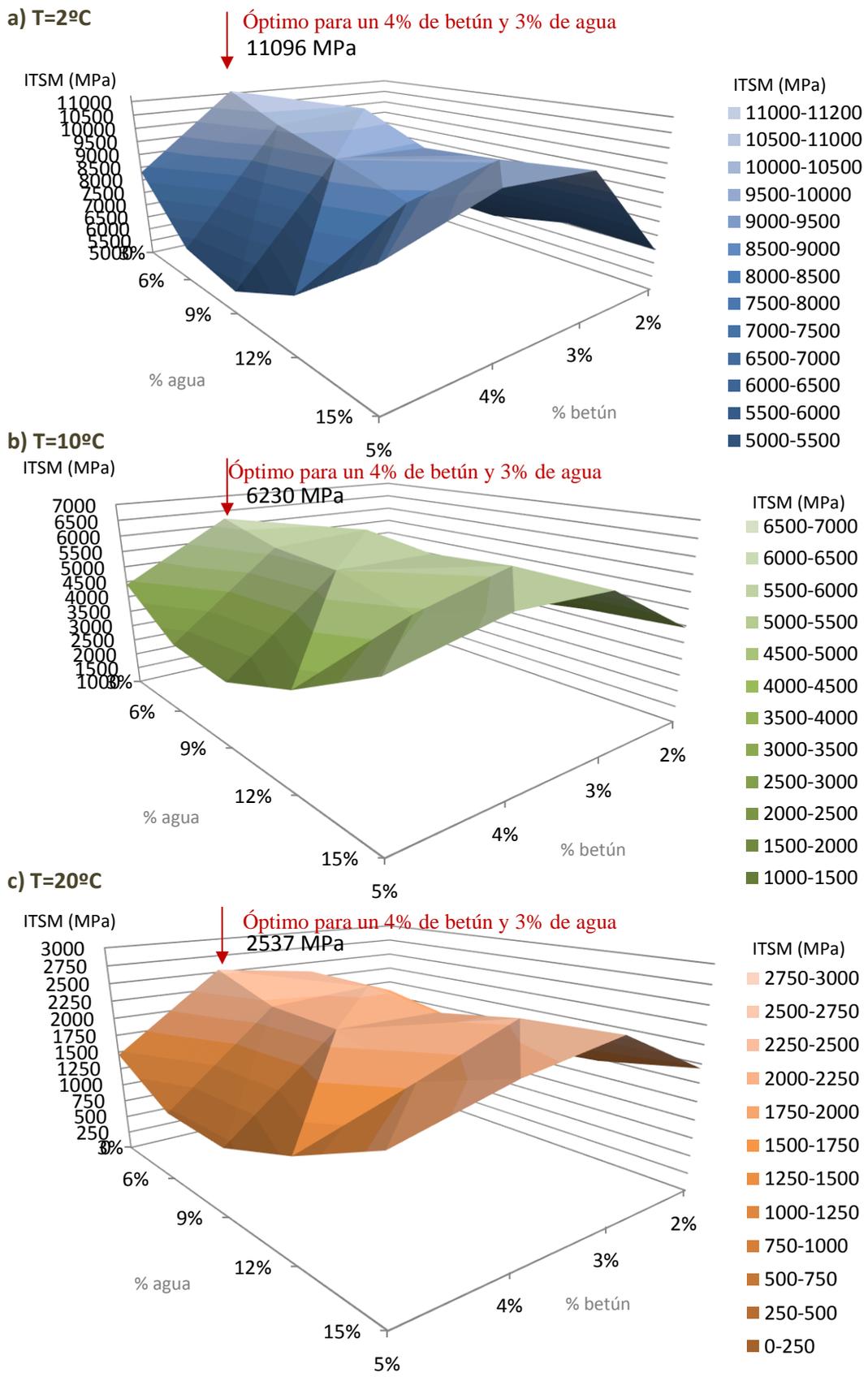
b) T=10°C



c) T=20°C



**Figura 3.5 Módulo resiliente (en MPa) según contenidos de agua y betún en mezcla (porcentajes referidos a masa de árido seco) para un 100% de árido reciclado a 2°C, 10°C y 20°C (de arriba a abajo)**



**Figura 3.6 Módulo resiliente (en MPa) según contenidos de agua y betún en mezcla (porcentajes referidos a masa de árido seco) para un 100% de árido natural a 2°C, 10°C y 20°C (de arriba a abajo)**

Comparando con los resultados obtenidos para un 100% de árido natural se aprecia como el contenido óptimo de betún es considerablemente inferior (4% frente al anterior 7%) así como el de agua, que en este caso se da para el mínimo posible que permite el propio contenido de agua de la emulsión (frente al 30% anterior). Además la temperatura afecta mucho más a éste que a las mezclas con un 100% de árido reciclado, siendo el módulo máximo a 20°C, 1487 MPa menor mientras que a 2°C es 2689 MPa mayor. De hecho, las pérdidas de rigidez por pasar de 2°C a 20°C llegan a ser superiores al 80% del valor inicial, evidenciándose así una enorme dependencia de la temperatura, no manifestada en las mezclas con el 100% del árido reciclado.

### 3.3. Rigidez según el Módulo dinámico $|E^*|$

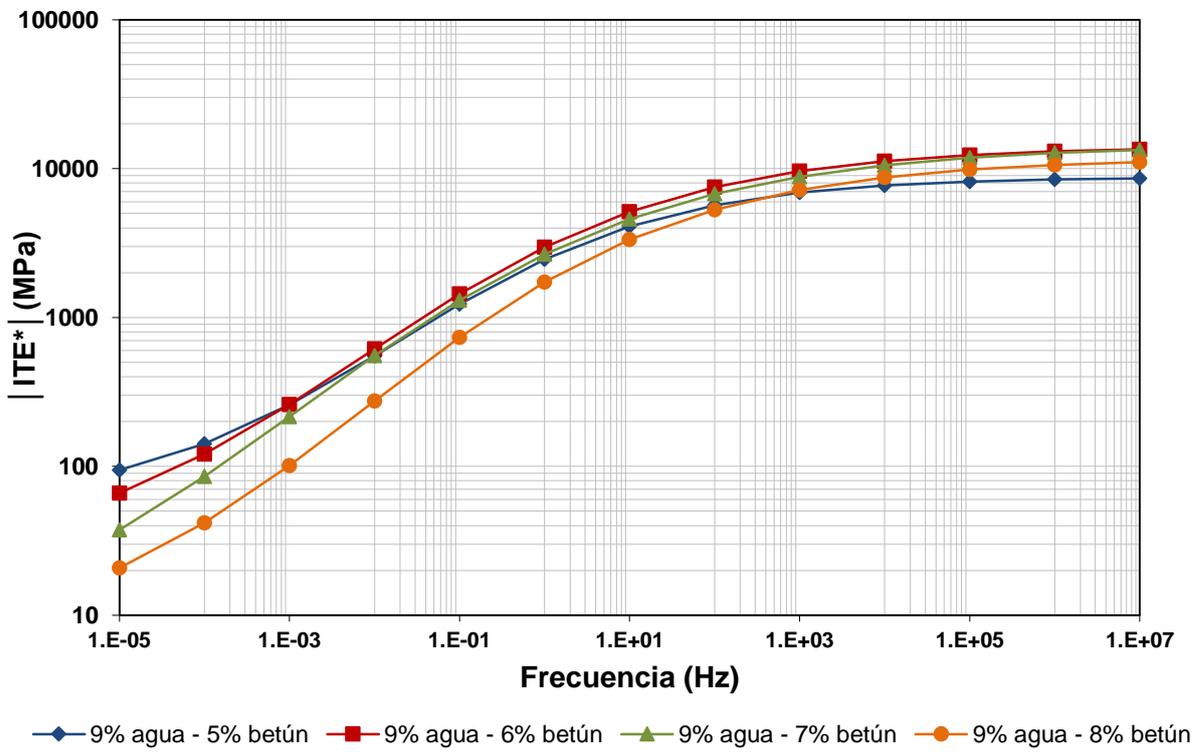
Gracias al principio de superposición tiempo-temperatura, se puede modelar la doble dependencia que el módulo dinámico experimenta con respecto a la temperatura y frecuencia de las cargas (Witczak y Bari, 2004). Así, las curvas obtenidas a diferentes temperaturas pueden ser transformadas en una única curva maestra del tipo:

$$\log|E^*| = \delta + \frac{\alpha}{1 + e^{\beta + \gamma(\log t_r)}} \quad [\text{Ec. 3-1}]$$

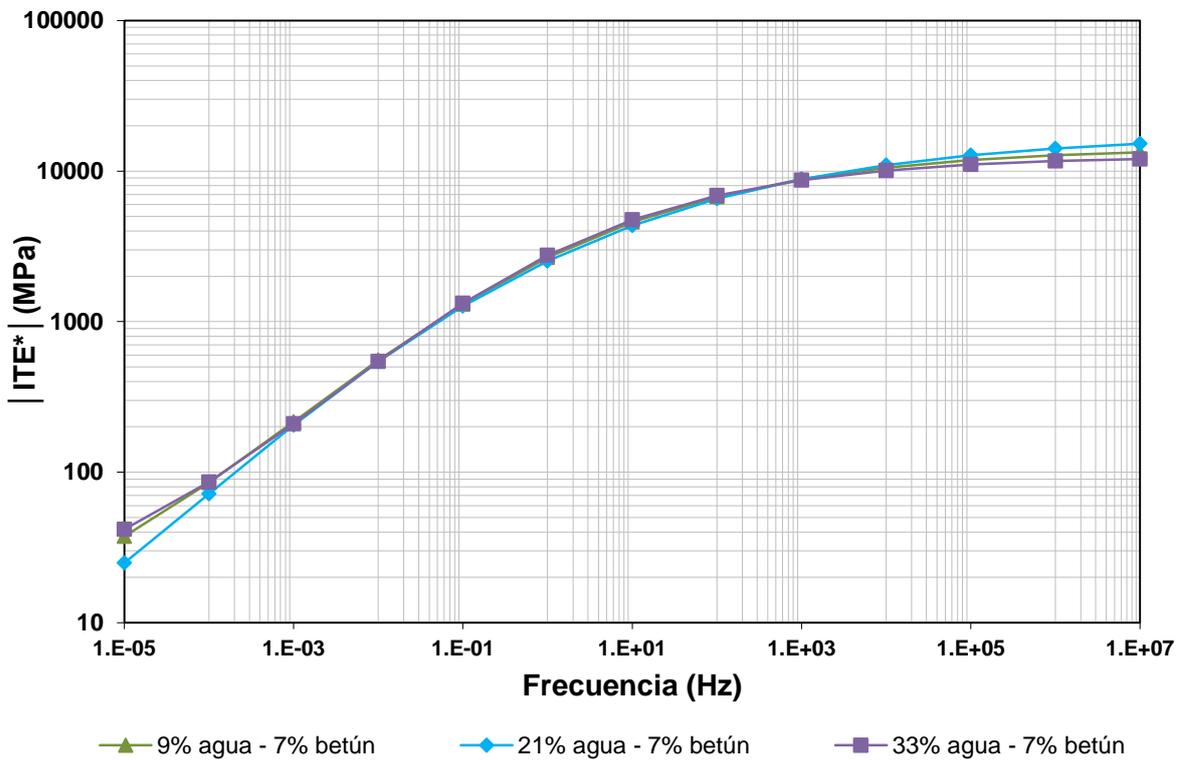
a través de un factor de transformación de las frecuencias, ampliamente conocido como shift factor:

$$a(T) = \frac{t}{t_r} \quad [\text{Ec. 3-2}]$$

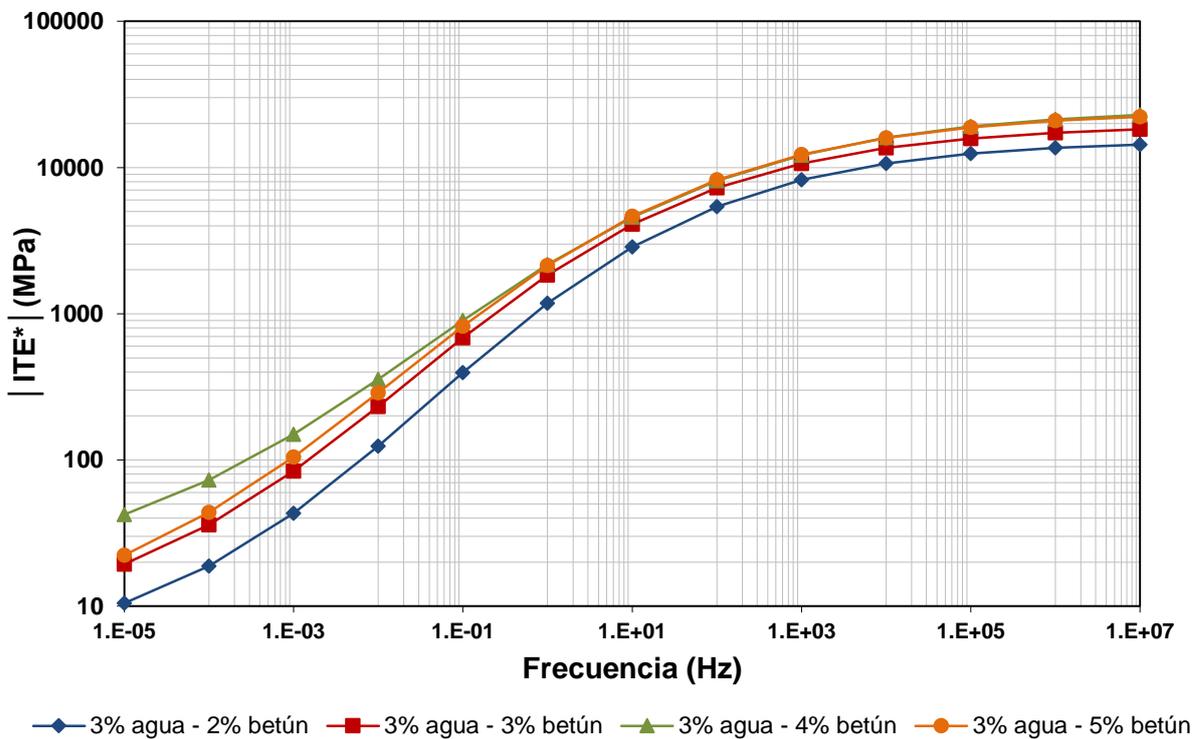
A la vista de las curvas maestras obtenidas para probetas con un 100% de árido reciclado (Figuras 3.7 y 3.8), se aprecian en primer lugar claras diferencias cuando lo que varía es el contenido de betún pero diferencias muy suaves cuando lo que varía es el contenido de agua, lo cual coincide con lo que ya se había concluido en el apartado anterior. Además, 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 (coincide nuevamente con lo observado en el ensayo del ITSM). Para el caso de las mezclas con árido natural (Figuras 3.9 y 3.10) se aprecia como las diferencias entre curvas son mayores al variar sobre todo el contenido de agua. Además, 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, las mezclas con árido reciclado, las mezclas con árido natural son más rígidas a bajas temperaturas y más blandas a altas temperaturas por lo que son más sensibles a la fractura frágil a bajas temperaturas a la vez que a la aparición de deformaciones permanentes a altas temperaturas. Además, las mezclas con árido natural son más sensibles a cambios en la dosificación, por lo que las mezclas con árido reciclado serían más estables para una producción de planta a gran escala. Todo ello, coincide con lo observado en los ensayos de ITSM.



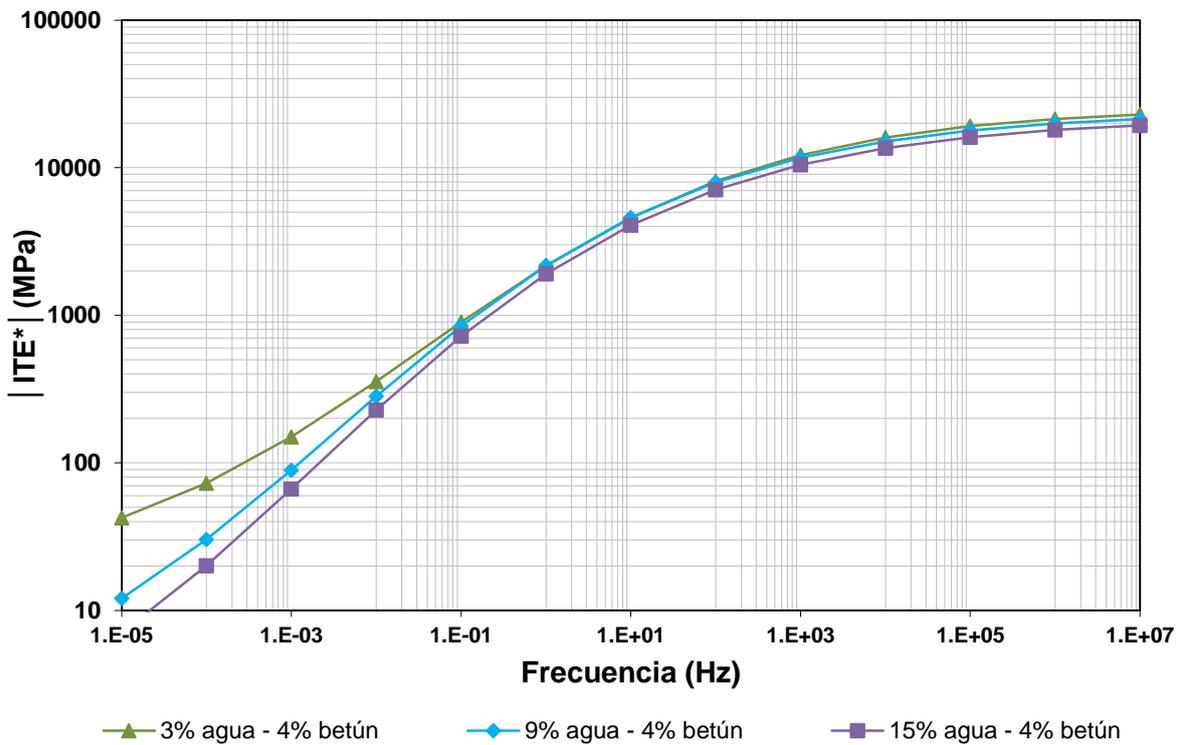
**Figura 3.7** Curvas maestras obtenidas a tracción indirecta dinámica para probetas con 100% de árido reciclado, 9% de agua y diferentes contenidos de betún



**Figura 3.8** Curvas maestras obtenidas a tracción indirecta dinámica para probetas con 100% de árido natural, 7% de betún y diferentes contenidos de agua



**Figura 3.9** Curvas maestras obtenidas a tracción indirecta dinámica para probetas con 100% de árido natural, 3% de agua y diferentes contenidos de betún



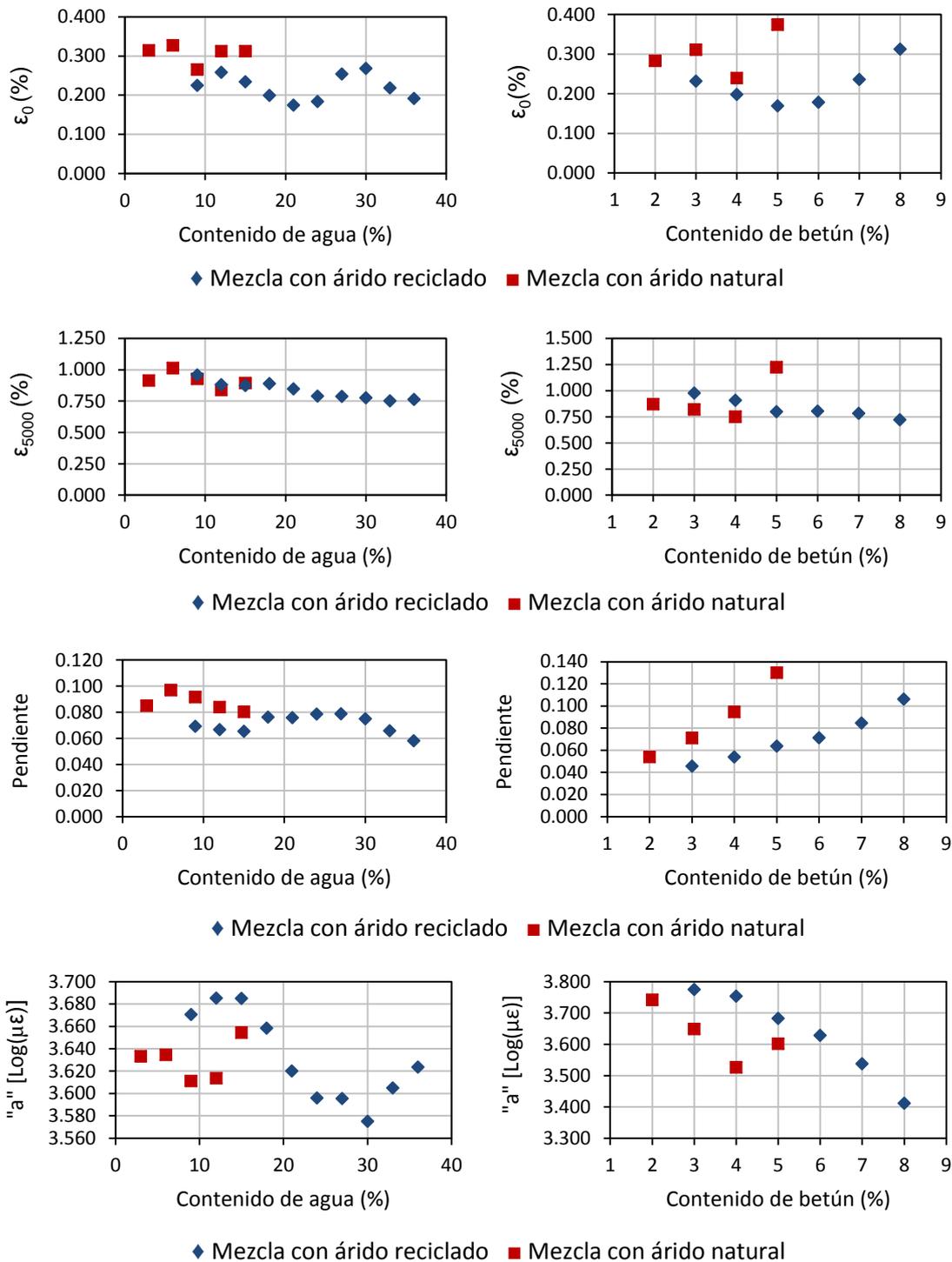
**Figura 3.10** Curvas maestras obtenidas a tracción indirecta dinámica para probetas con 100% de árido natural, 4% de betún y diferentes contenidos de agua

### 3.4. Ensayo uniaxial de resistencia a la deformación permanente

Los valores tenidos en cuenta para el presente análisis ( $\varepsilon_0$ ,  $\varepsilon_{5000}$ ,  $b$  y  $a$ ) se muestran, tanto en función del contenido de agua (izquierda) como del contenido de betún (derecha) en la tabla resumen 3.11. En primer lugar, se aprecia que la deformación permanente tras el acondicionamiento ( $\varepsilon_0$ ) tiende a marcar un valor mínimo para los contenidos óptimos de betún del 5% para las mezclas con árido reciclado y 4% para las mezclas con árido natural. No obstante, con la variación del contenido de agua, la deformación permanente inicial parece variar en forma de onda con valores pico y valle que se suceden. Aun así, parece evidente es que existe un valor mínimo para los contenidos de agua del 21% en mezclas con árido reciclado y 9% en mezclas con árido natural. Es importante destacar que en términos generales, las deformaciones son mayores para mezclas con árido natural, aún para iguales contenidos de agua y betún, lo que indica que la incorporación de árido reciclado a las mezclas aporta un efecto beneficioso en su resistencia a deformaciones permanentes.

En cuanto a los resultados de  $\varepsilon_{5000}$  al contrario que en los parámetros anteriores, las tendencias para mezclas con ambos tipos de árido parecen ser ligeramente diferentes. Así, las deformaciones permanentes al final del ensayo con mezclas con árido reciclado tienden a decrecer cuanto mayor es el contenido de agua, así como también el contenido de betún. Las mezclas con árido natural, también lo hacen con el contenido de agua pero muestran un marcado valor mínimo para el contenido de betún del 4%. Esto podría indicar que si se dispusiese de mezclas con árido reciclado con mayores contenidos de betún, quizá podría ser observada una tendencia similar, pero con las muestras disponibles solo fue observable la rama decreciente. En términos generales, las deformaciones en el ciclo 5000 tienden a igualarse con ambos tipos de árido, y cuando los contenidos de agua y betún son suficientemente elevados, las mezclas con árido reciclado pueden llegar a ser incluso mejores. Por ello, la incorporación de árido reciclado no supone, tampoco en este caso, ningún tipo de perjuicio.

En general, el contenido de agua no parece influir de una forma clara y notoria en las pendientes a las curvas de deformación en la etapa secundaria, si bien se intuyen pequeños valores máximos en torno al contenido del 24% en mezclas con árido reciclado y 6% en mezclas con árido natural. Sin embargo, con el contenido de betún la tendencia es siempre creciente aproximándose a una curva de tipo exponencial. Así, en este caso sería aconsejable dosificar con valores bajos tanto de agua como de betún. Al margen de lo anterior, es importante destacar que en general, las pendientes obtenidas con mezclas con árido reciclado son menores que las obtenidas con árido natural para cualquier contenido de agua y betún, lo que puede entenderse como un efecto beneficioso.



**Figura 3.11 Deformación permanente tras el acondicionamiento ( $\epsilon_0$ ), deformación permanente tras 5000 ciclos ( $\epsilon_{5000}$ ), pendiente de recta tangente en etapa secundaria y punto de corte "a" según el contenido de agua y betún para mezclas con 100% de árido reciclado y natural**

Para el caso de ambas mezclas se aprecia claramente como el valor "a" disminuye a medida que aumenta el contenido de agua hasta alcanzar un valor mínimo, a partir del cual, los resultados crecen nuevamente. Los contenidos óptimos para los que se obtiene el mínimo valor "a" son el 30% y el 9% para el árido reciclado y natural respectivamente. Nuevamente, el

contenido óptimo de agua en la amasada resulta mucho mayor para el caso de las mezclas de árido reciclado debido a la gran absorción del mismo. Debe de tenerse en cuenta que las tendencias de la pendiente estudiada anteriormente y el parámetro “a” son prácticamente inversas. Esto es lógico si se tiene en cuenta que pendientes elevadas provocan que el punto de corte con el eje vertical sea inferior, sobre todo si la recta con mayor pendiente no está a su vez más elevada que la otra. Como se observó anteriormente, las deformaciones registradas en el ciclo 5000 (perteneciente a la etapa secundaria) son similares para ambos tipos de mezcla (misma elevación de las rectas tangentes) por lo que en este caso el parámetro “a” se vuelve claramente dependiente de la pendiente. Como muestra de ello, apréciase que las tendencias con la variación de betún son inversas (a mayor pendiente menor “a”) con excepción del 5% de betún en mezclas con árido natural. En este caso, la deformación en la etapa secundaria es tan elevada que aun teniendo una mayor pendiente corta el eje en un punto más elevado (mayor “a”).

En definitiva, la variación en los contenidos de betún evidencia una marcada tendencia decreciente. Mientras que para el árido natural parece haber un mínimo en el contenido del 4% de betún, por falta de muestras no se ha podido determinar si para el árido reciclado, con contenidos todavía mayores los resultados crecerían nuevamente.

Al margen de esto, puede apreciarse como en general el parámetro “a” tiende a ser mayor para el caso de las mezclas con árido reciclado para contenidos bajos de agua y betún mientras que con contenidos suficientemente altos, llega a ser considerablemente menor. Como ocurría con otras propiedades estudiadas, para mantener el mismo nivel de deformación con árido reciclado es necesario aumentar ambos contenidos.

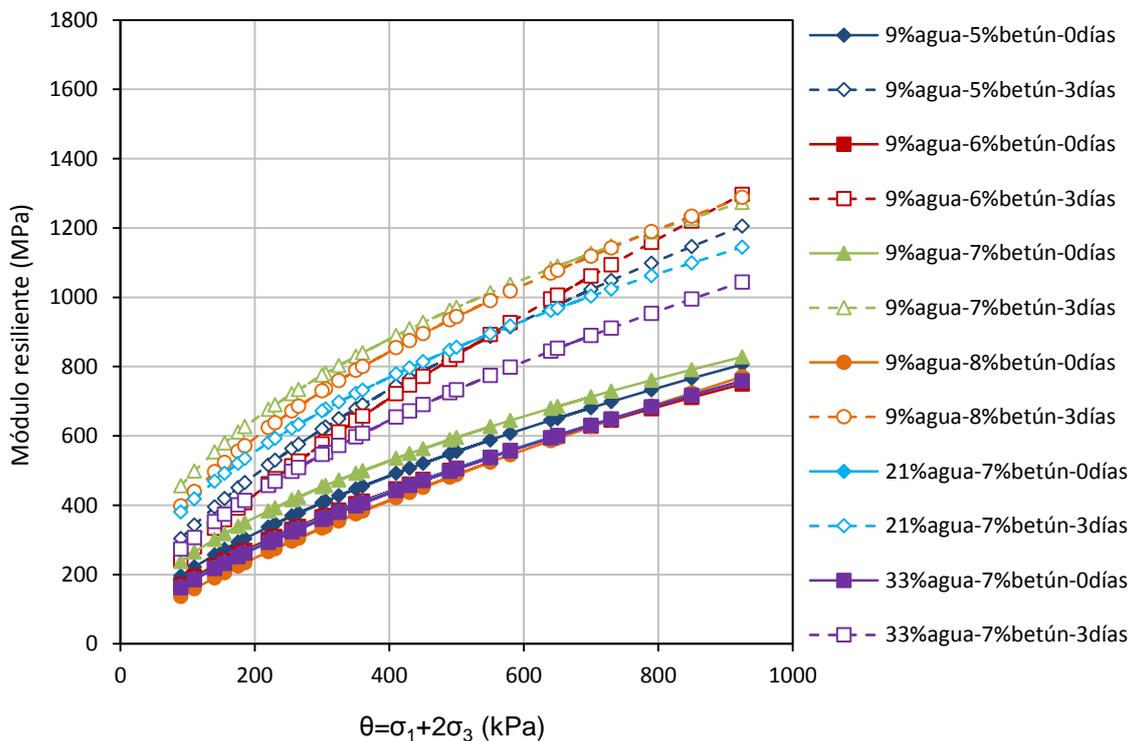
### **3.5. Ensayo triaxial de rigidez**

Las Figuras 3.12 y 3.13 muestran los resultados de rigidez para mezclas con árido reciclado y árido natural respectivamente y tanto para mezclas curadas como sin curar. Tal y como se puede apreciar, en este caso son las mezclas elaboradas con árido natural tienden a mostrar rigideces más elevadas que las hechas con árido reciclado. Por ejemplo, cuando no se aplica ningún tipo de curado a las probetas, los módulos de las mezclas con árido reciclado van desde aproximadamente los 200 MPa (con cargas bajas) hasta los 800 MPa (con cargas altas). Sin embargo, la rigidez de las mezclas con árido natural, aunque también empieza sobre los 200 MPa con cargas bajas, llegan en torno a los 1000 MPa con cargas altas. Análogamente, la rigidez de las mezclas con árido natural sometidas a un curado de 3 días en estufa es unos 200-300 MPa mayor que las de árido reciclado para cualquier nivel tensional.

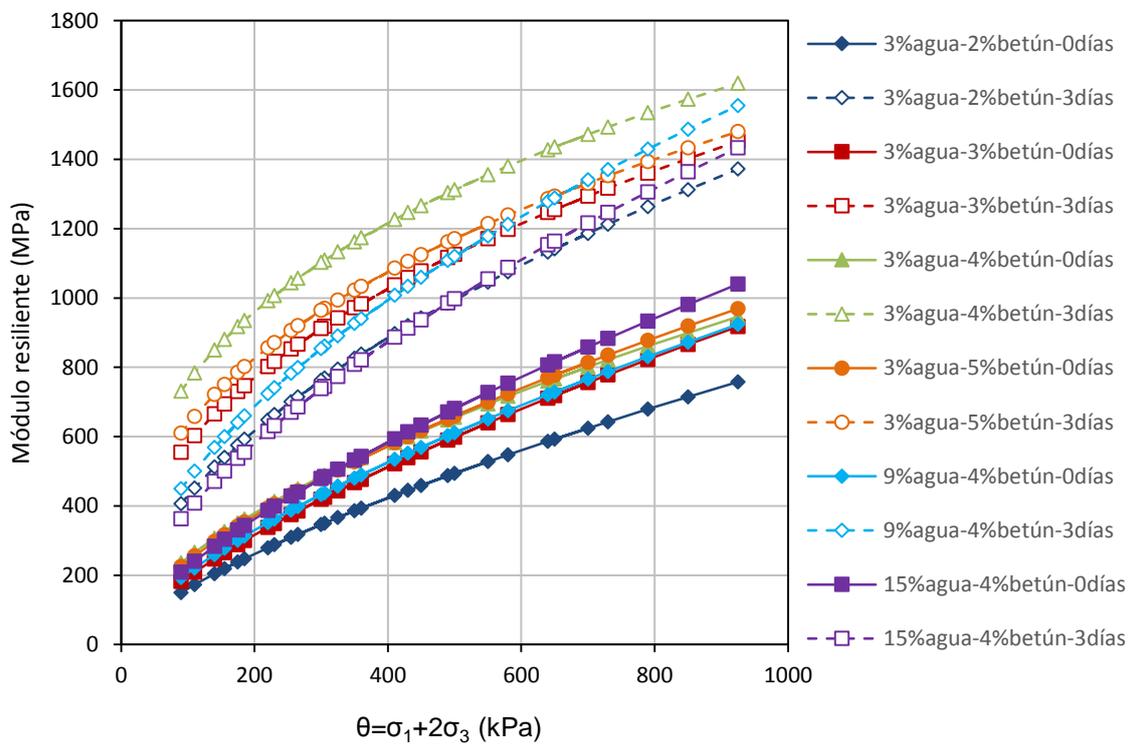
En ambas gráficas se puede apreciar también como, con el tiempo de curado, las curvas tienden a dispersarse. Así, las obtenidas con probetas sin curar están más juntas, no

existiendo prácticamente diferencias entre mezclas con diferentes contenidos de agua y betún aunque como se ha mencionado, sí entre las realizadas con uno u otro tipo de árido. 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.

Tras aplicar el tiempo de curado, las curvas se dispersan haciendo posible diferenciar qué contenidos son más o menos favorables. Para las mezclas con árido reciclado, la mezcla con un 9% de agua y 7% de betún alcanza las mayores rigideces (aunque de modo muy similar a la de 9% de agua y 8% de betún). La mezcla con 9% de agua y 6% de betún es menos rígida con cargas bajas aunque llega a ser la más rígida con cargas altas. Este comportamiento podría ser interesante en calzadas de medio y bajo tráfico con explanadas de baja calidad, amoldándose a grandes deformaciones cuando las cargas son bajas (cargas usuales en este tipo de carreteras) pero aportando una buena capacidad portante en esporádicas cargas altas que podrían dañar el firme. Con la variación del contenido de agua, se aprecia como la rigidez tiende a bajar a medida que aumenta el contenido de agua, lo cual es totalmente lógico en etapas tempranas de curado.



**Figura 3.12 Representación del modelo K- $\theta$  de Hicks para mezclas con árido reciclado y diferentes contenidos de agua, betún y tiempos de curado**



**Figura 3.13 Representación del modelo  $K-\theta$  de Hicks para mezclas con árido natural y diferentes contenidos de agua, betún y tiempos de curado**

Por su lado, en las mezclas con árido natural, llama especialmente la atención la mezcla con un 3% de agua y 4% de betún. Esta mezcla ya era la que mayores módulos producía en los anteriores ensayos de rigidez (ITSM y módulo dinámico) y nuevamente vuelve a reafirmarse como la mezcla con mayor módulo resiliente. Con la variación del contenido de agua, también se aprecia como a medida que éste aumenta, el módulo resiliente disminuye.

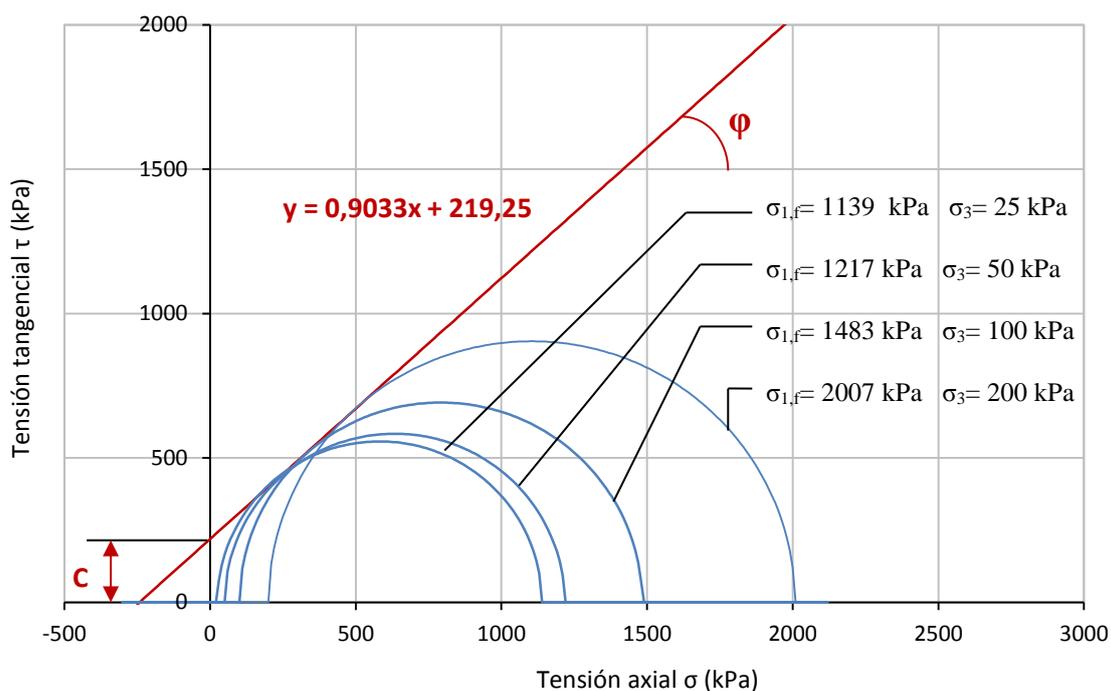
### 3.6. Ensayo triaxial de compresión. Envolvente de Mohr-Coulomb

El diagrama de Mohr representa una recta envolvente de todos los círculos de Mohr, tal y como se muestra en la Figura 3.14 para el ejemplo de mezclas con árido reciclado, 9% de agua y 6% de betún y sin curado. Como se puede apreciar, cada círculo se corresponde con una probeta ensayada con una presión de confinamiento  $\sigma_3$  de modo que ésta y la tensión principal máxima son los puntos de corte con el eje horizontal. Además, la cohesión ( $C$ ) es el punto de corte de la envolvente con el eje vertical y  $\phi$  es 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 3.1.

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  $40^\circ - 45^\circ$ . 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  $\theta=45^\circ+\phi/2$ . Esto situaría los planos de falla entre los  $66^\circ$  y  $68^\circ$ , lo que concuerda con las observaciones experimentales, tal y como muestra la Figura 3.15.

Finalmente, las tensiones de fallo fueron obtenidas, tal y como se recoge en la Tabla 3.2. Como se podía aventurar en base a lo ya explicado, las tensiones de fallo para mezclas con árido natural son casi un 20% mayores que con árido reciclado justo después de la fabricación de las probetas. Precisamente por ello, llama especialmente la atención que tras idénticos procesos de curado, ambas alcancen resistencias realmente similares.



**Figura 3.14** Diagrama de Mohr obtenido para probetas de árido reciclado sin curado y tras ser ensayadas con 4  $\sigma_3$  diferentes

**Tabla 3.1** Parámetros del comportamiento a cortante de las mezclas estudiadas

Árido	Contenido (agua - betún)	Curado	C (kPa)	$\phi$ ( $^\circ$ )	$R^2$
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



*Figura 3.15 Ejemplos de probetas rotas tras ensayo triaxial de deformación permanente*

**Tabla 3.2 Tensiones principales de rotura para una presión de confinamiento  $\sigma_3 = 50$  kPa**

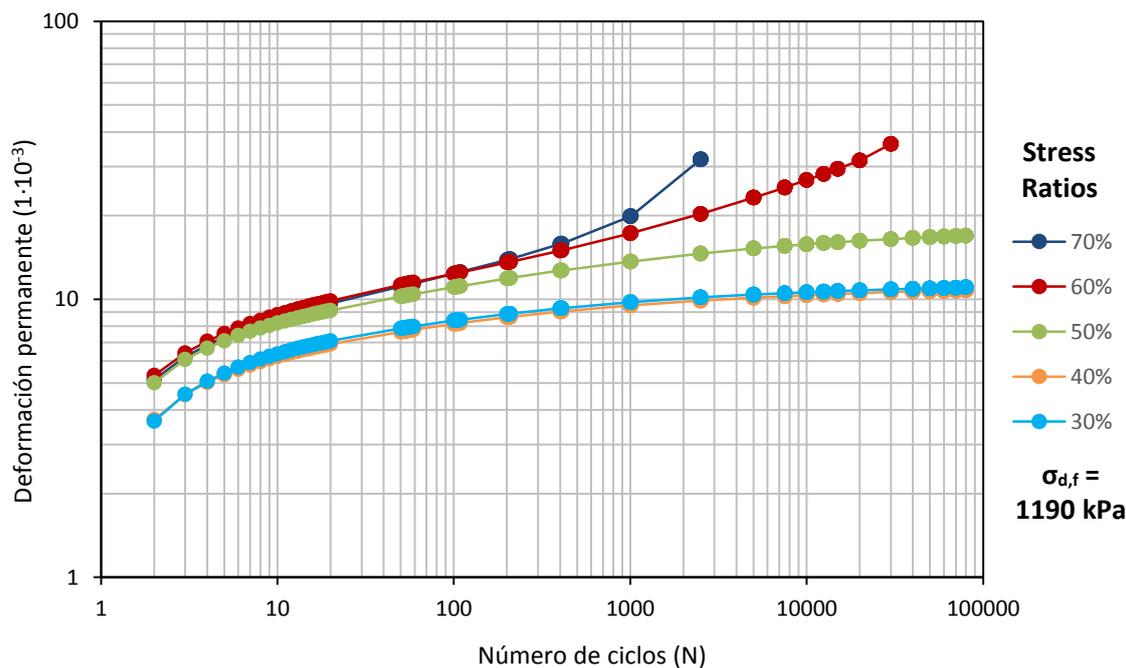
Mezcla	$\sigma_{1,f}$ (kPa)	$\sigma_{d,f}$ (kPa)	$\sigma_3$ (kPa)
Reciclado - 0 días de curado	1240	1190	50
Reciclado - 3 días de curado	2081	2031	50
Natural - 0 días de curado	1473	1423	50
Natural - 3 días de curado	2086	2036	50

### 3.7. Ensayo triaxial de resistencia a la deformación permanente

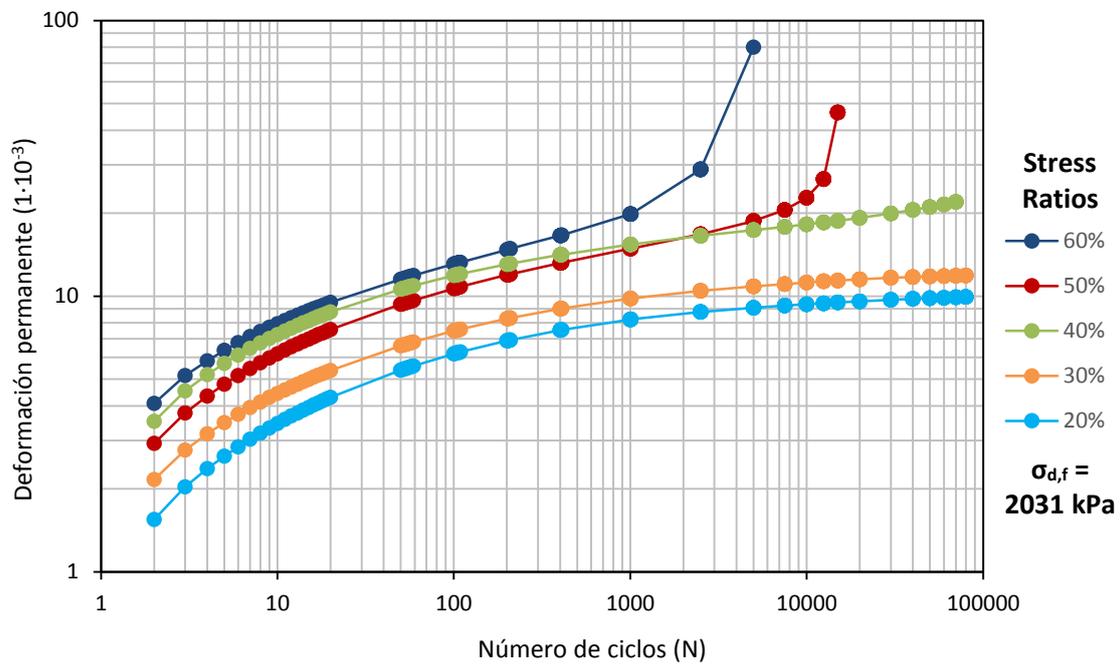
Las Figuras 3.16 a 3.19 recogen las curvas de deformación permanente obtenidas variando el stress ratio, es decir el porcentaje de carga desviadora de rotura (Tabla 3.2). En primer lugar puede apreciarse que el Stress Ratio crítico, también conocido en la bibliografía como *Shakedown limit* (Werkmeister, 2003), 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 Ebels (2008): el 50% en el caso de mezclas con árido reciclado sin curado pero baja al 40% cuando se aplica curado. Dal Ben y Jenkins (2014) 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.

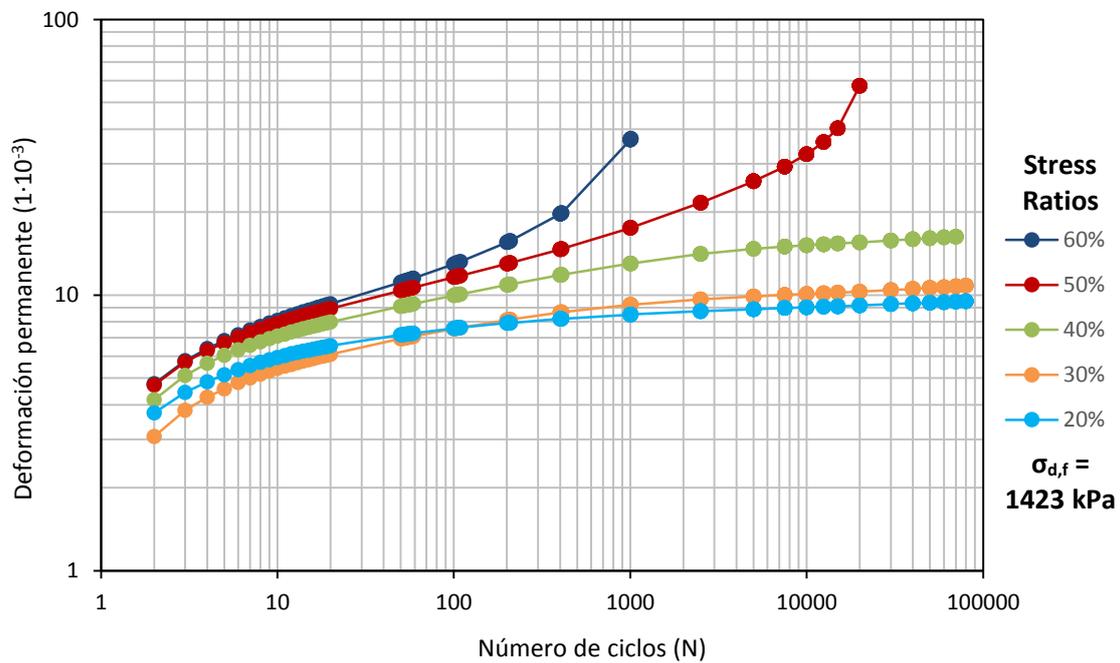
En términos generales, las curvas potenciales obtenidas para mezclas con árido reciclado suelen situarse por debajo de las de árido natural y a su vez, las obtenidas sin curado por debajo de las obtenidas con curado. Por tanto, nuevamente se concluye que no solo el curado ayuda a reducir las deformaciones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



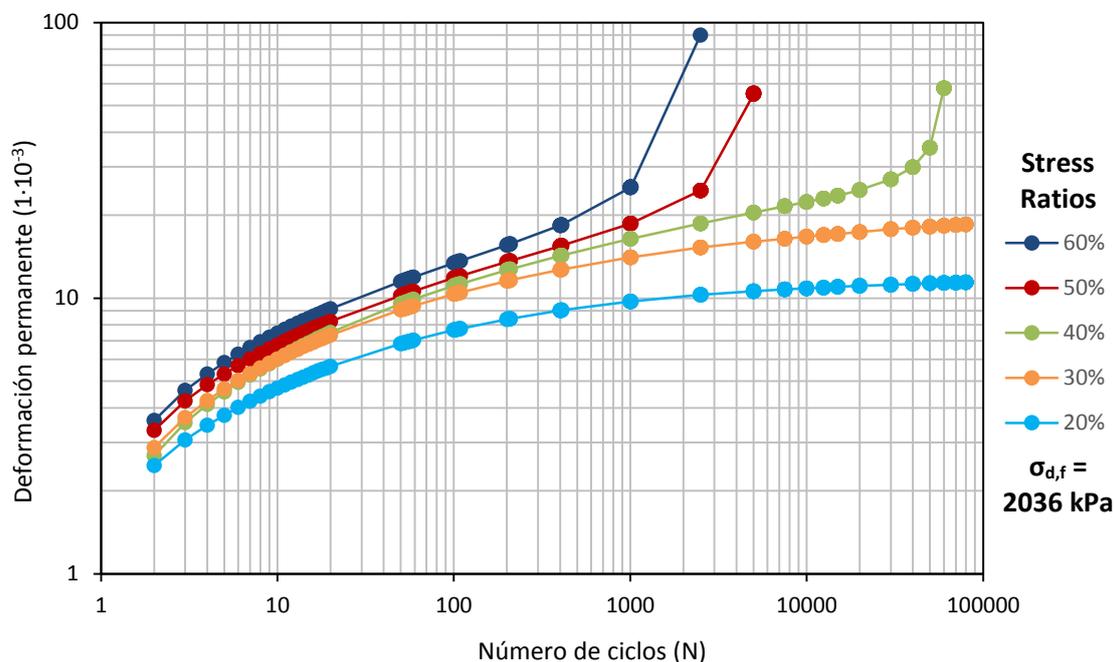
**Figura 3.16** Curvas de deformación permanente para mezclas de árido reciclado (9% de agua y 6% de betún) sin ser sometidas a curado



**Figura 3.17** Curvas de deformación permanente para mezclas de árido reciclado (9% de agua y 6% de betún) tras 3 días de curado a 50°C



**Figura 3.18** Curvas de deformación permanente para mezclas de árido natural (3% de agua y 4% de betún) sin ser sometidas a curado



**Figura 3.19** Curvas de deformación permanente para mezclas de árido natural (3% de agua y 4% de betún) tras 3 días de curado a 50°C

#### 4. CONCLUSIONES

Los resultados mostraron que los áridos reciclados de RCD pueden ser utilizados en mezclas bituminosas en frío, siendo especialmente recomendable su utilización en carreteras de medio/bajo tráfico, carreteras con explanadas de baja calidad en las que se prevén grandes deformaciones y en capas de base, siendo desaconsejable su uso en capas de rodadura, debido a la baja resistencia al pulimento de este tipo de árido. Los resultados también arrojaron las siguientes conclusiones:

1. Aunque parámetros, como el coeficiente de Los Angeles y la afinidad árido-betún resultaron pobres, las propiedades mecánicas de las mezclas con RCD resultaron satisfactorias.
2. La sustitución del 100% del árido natural por RCD fue posible sin producir ningún tipo de detrimento a las propiedades de las mezclas en frío.
3. 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%.

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%.
5. Las mayores debilidades encontradas fueron un peor comportamiento en etapas tempranas de maduración y que en general requieren mayores contenidos de agua y betún.
6. Los métodos de diseño tradicionales (como los basados en el ensayo Proctor) no son válidos para las mezclas con RCD puesto que tienden a infradimensionar el contenido óptimo de agua.

A la vista de los resultados, para el uso de RCD como árido de mezclas bituminosas en frío, se recomienda: (1) Realizar una exhaustiva caracterización del árido reciclado debido a su heterogeneidad; (2) Seleccionar granulometrías con bajos contenidos en finos puesto que estos tienden a aumentar durante el mezclado y compactación; (3) Usar emulsiones bituminosas catiónicas de rotura lenta; (4) Aplicar una alta energía de compactación para drenar la mayor cantidad posible de agua intersticial; (5) Dejar curar la mezcla durante el máximo tiempo posible antes de abrir la carretera al tráfico rodado; (6) Incrementar el número de muestras de laboratorio debido a una mayor heterogeneidad de los resultados. Finalmente se recomienda elaborar documentos técnicos que, basados en trabajos como los de la presente tesis, permitan la utilización de los RCD como árido reciclado de mezclas bituminosas en frío bajo unos criterios mínimos de seguridad y funcionalidad.

## 5. REFERENCIAS

- [1] 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
- [2] Airey GD, Rahman M, Collop A (2003). *Absorption of bitumen into crumb rubber using the basket drainage method*. International Journal of Pavement Engineering 4, 105-119
- [3] Airey GD, Singleton TM, Collop AC (2002). *Properties of polymer modified bitumen after rubber-bitumen interaction*. Journal of Materials in Civil Engineering 14, 244-354
- [4] 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

- [5] Al-Busaltan S, Al Naheim H, Atherton W, Sharples G (2012). *Green bituminous asphalt relevant for highway and airfield pavement*. Construction and Building Materials 31, 243-250
- [6] Al-Busaltan S, Al Naheim H, Atherton W, Sharples G (2012). *Mechanical properties of an upgrading cold-mix asphalt using waste materials*. Journal of Materials in Civil Engineering 24, 1484-1491
- [7] Al-Hdabi A, Al Nageim H, Ruddock F, Seton L (2013). *A novel Cold Rolled Asphalt mixtures for heavy trafficked surface course*. Construction and Building Materials 49, 598-603
- [8] Al-Hdabi A, Al Nageim H, Ruddock F, Seton L (2014). *Laboratory studies to investigate the properties of novel cold-rolled asphalt containing cement and waste bottom ash*. Road Materials and Pavement Design 15(1), 78-89
- [9] Al-Hdabi A, Al Nageim H, Seton L (2014). *Performance of gap graded cold asphalt containing cement treated filler*. Construction and Building Materials 69, 362-369
- [10] Alaejos Gutiérrez P, Calvo Calzada B (2010). *Construcción sostenible. Primeras experiencias en España*. Publicación Cátedra Mariano López Navarro-Universidad de Zaragoza. ISBN 978-84-936583-6-6
- [11] Arm M (2001). *Self-cementing properties of crushed demolished concrete in unbound layers: results from triaxial tests and field tests*. Waste management 21, 235-239
- [12] Arulrajah A, Ali MMY, Disfani MM, Horpibulsuk S (2014a). *Recycled-glass blends in pavement base/subbase applications: laboratory and field evaluation*. Journal of Materials in Civil Engineering 26, 1-12
- [13] Arulrajah A, Disfani MM, Horpibulsuk S, Suksiripattanapong C, Prongmanee N (2014b). *Physical properties and shear strength responses of recycled construction and demolition materials in unbound pavement base/subbase applications*. Construction and Building Materials 58, 245-257
- [14] 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
- [15] Asphalt Institute (1995). *Superpave level 1 mix design. Superpave series no. 2 (SP-2)*, USA
- [16] ATEB (Asociación Técnica de Emulsiones Bituminosas) (b). *Grava-emulsión*. Pliego Técnico
- [17] Azizian MF, Nelson PO, Thayumanavan P, Williamson KJ (2003). *Environmental impacts of highway construction and repair materials on surface and ground waters: case study: crumb rubber asphalt concrete*. Waste Manage 23, 719–728
- [18] Behera M, Bhattacharyya SK, Minocha AK, Deoliya R, Maiti S (2014). *Recycled aggregate from C&D waste & its use in concrete – A breakthrough towards sustainability in construction sector: A review*. Construction and Building Materials 68, 501-516
- [19] Bennert T, Papp Jr WJ, Mather A, Gucunski N (2000). *Utilization of construction and delolition debris under traffic-type loading base and subbase applications*. Transportation Research Record 1714, 33-39
- [20] Bertollo SM, Bernucci LB, Fernandes JL (2004). *Mechanical properties of asphalt mixtures using recycled tire rubber produced in Brazil—a laboratory evaluation*. Proceedings of the TRB Annual Meeting. Washington DC, USA

- [21] Bhusal S, Wen H (2013). *Evaluating recycled concrete aggregate as hot mix asphalt aggregate*. *Advances in Civil Engineering Materials* 2(1), 262-265
- [22] Breccolotti M, Materazzi AL (2010). *Structural reliability of eccentrically-loaded sections in RC columns made of recycled aggregate concrete*. *Engineering Structures* 32, 3704-3712
- [23] Calvo N, Varela-Candamio L, Novo-Corti I (2014). *A dynamic model for construction and demolition (C&D) waste management in Spain: driving policies based on economic incentives and tax penalties*. *Sustainability* 6, 416-435
- [24] 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.
- [25] Chávez-Valencia LE, Alonso E, Manzano A, Pérez J, Contreras ME, Signoret C (2007). *Improving the compressive strengths of cold-mix asphalt using asphalt emulsion modified by polyvinyl acetate*. *Construction and Building Materials* 21 583-589
- [26] Chen MZ, Lin JT, Wu SP. (2011). *Potential of recycled fine aggregates powder as filler in asphalt mixture*. *Construction and Building Materials* 25, 3909-3914
- [27] Cross SA, Abou-Zeid MN, Wojerkowski JB, Fager GA (1996). *Long-term performance of recycled Portland cement concrete pavement*. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 1525, 115-123
- [28] CWC (1996). *Best practice in glass recycling-recycled glass in asphalt*. Clean Washington Centre. USA
- [29] 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
- [30] 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
- [31] Disfani MM, Arulrajah A, Bo MW, Hankour R (2011). *Recycled crushed glass in road work applications*. *Waste Management*. 31, 2341-2351
- [32] 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
- [33] Ebels LJ (2008). *Characterisation of material properties and behavior of cold bituminous mixtures for road pavements*. Doctoral Dissertation. Stellenbosh University. South Africa
- [34] Ellis C, Zhao B, Barnes J, Jones N (2004). *Properties of GGBS-Bitumen Emulsion Systems with Recycled Aggregates*. *Road Materials and Pavement Design* 5, 373-383
- [35] 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
- [36] Fang X, García A, Winnefeld F, Partl MN, Lura P (2015). *Impact of rapid-hardening cements on mechanical properties of cement bitumen emulsion asphalt*. *Materials and Structures*

- [37] Ferrotti G, Pasquini E, Canestrari F (2014). *Experimental characterization of high-performance fiber-reinforced cold mix asphalt mixtures*. Construction and Building Materials 57, 117-125
- [38] FHWA (Federal Highway Administration) (1997). *User guidelines for waste and by-product materials in pavement construction*. USA
- [39] GERD (Asociación Española de Gestores de Residuos de Construcción y Demolición) (2010). *Control de los Residuos de Construcción y Demolición, RCD, en los Ayuntamientos*. GERD. Madrid, España
- [40] Gokce A, Nagataki S, Saeki T, Hisada M (2011). *Identification of frost-susceptible recycled concrete aggregates for durability of concrete*. Construction and Building Materials 25, 2426-2431
- [41] Gómez-Soberón JMV (2002). *Porosity of recycled concrete with substitution of recycled concrete aggregate. An experimental study*. Cement and Concrete Research 32, 1301-1311
- [42] González-Fonteboa B, Martínez-Abella F (2007). *Shear strength of recycled concrete beams*. Construction and Building Materials 21, 887-893
- [43] González-Fonteboa B, Martínez-Abella F (2008). *Concretes with aggregates from demolition waste and silica fume. Materials and mechanical properties*. Building Environment 43, 429-437
- [44] González-Fonteboa B, Martínez-Abella F, Martínez-Lage I, Eiras-López J (2009). *Structural shear behaviour of recycled concrete with silica fume*. Construction and Building Materials 23, 3406-3410
- [45] Guo M, Tan Y, Zhou S (2014). *Multiscale test research on interfacial adhesion property of cold mix asphalt*. Construction and Building Materials 68, 769-776
- [46] Hansen TC (1992). *Recycling of demolished concrete and masonry*. Report of Technical Committee 37-Drc Demolition and Reuse of Concrete (RILEM Report No 6), Spoon E&FN, UK
- [47] Hicks RG (2002). *Asphalt rubber design and construction guidelines – volume 1 – design guidelines*. Northern California Rubberized Asphalt Concrete Technology Center (NCRACTC) and California Integrated Waste Management Board (CIWMB). Sacramento, California, USA
- [48] Hossain M, Swartz S, Hoque E (1999). *Fracture and tensile characteristics of asphalt-rubber concrete*. Journal of Materials in Civil Engineering 11, 287–294
- [49] Huang WL, Lin DH, Chang NB, Lin KS (2002). *Recycling of construction and demolition waste via a mechanical sorting process*. Resources, Conservation & Recycling 37, 23-37
- [50] 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
- [51] Jayakody S, Gallage C, Kumar A (2014). *Assessment of recycled concrete aggregates as a pavement material*. Geomechanics and Engineering 6(3), 235-248
- [52] Jiménez JR, Agrela F, Ayuso J, López M (2011). *A comparative study of recycled aggregates from concrete and mixed debris as material for unbound road sub-base*. Materiales de Construcción 61, 289-302

- [53] Justo CEG, Veeraragavan A (2002). *Utilisation of waste plastic bags in bituminous mix for improved performance of roads*. India: Centre for Transportation Engineering, Bangalore University
- [54] Khalid HA, Artamendi I (2006). *Post-consumer tyre rubber as a performance-enhancing additive in asphalt*. *Asphalt Professional* 16, 11-16
- [55] Khalid HA, Monney OK (2009). *Moisture damage potential of cold asphalt*. *International Journal of Pavement Engineering* 10(5), 311-318
- [56] Khan MI, Wahhab HIA-A (1998). *Improving slurry seal performance in eastern Saudi Arabia using steel slag*. *Construction and Building Materials* 12, 195–201
- [57] Kim O-K, Bell CA, Hicks RG (1985). *The effect of moisture on the performance of asphalt mixtures*. *American Society for Testing and Materials* 899, 51-72
- [58] Kuhn EA, Papagiannakis AT, Loge FJ (2005). *Preliminary of the impact of cold mix asphalt concretes on air and water quality*. *Environmental Contamination and Toxicology* 74, 501-508
- [59] Li X (2008). *Recycling and reuse of waste concrete in China. Part I. Material Behaviour of recycled aggregate concrete*. *Resources, Conservation and Recycling* 53, 36-44
- [60] Limbachiya M, Meddah MS, Ouchagour Y (2012). *Use of recycled concrete aggregate in fly-ash concrete*. *Construction and Building Materials* 27, 439-449
- [61] Lisi RD, Park JK, Stier JC (2004). *Mitigating nutrient leaching with a sub-surface drainage layer of granulated tires*. *Waste Manage* 24, 831–839
- [62] Lund HF (1996). *The McGraw-Hill recycling handbook*. McGraw-Hill Inc. New York, USA
- [63] Ma SB, Wang LJ and Zhang GQ (2012). *Laboratory study on cold-mixtures for asphalt pavement*. *Applied Mechanics and Materials* 178-181, 1361-1364
- [64] Maupin GW (1997). *Final report – glasphalt test sections in Virginia*. Virginia Transportation Research Council. USA
- [65] Maupin GW (1998). *Effect of glass concentration on stripping of glasphalt*. Virginia Transportation research Council. USA
- [66] Melbouci B (2009). *Compaction and shearing behavior study of recycled aggregates*. *Construction and Building Materials* 23, 2723-2730
- [67] Miró R, Pérez FE, Castillo S (2000). *Mixed recycling with emulsion and cement of asphalt pavements. Design procedure and improvements achieved*. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions* 33, 324-330
- [68] 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
- [69] 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.
- [70] ONU (Organización de las Naciones Unidas) (1992). *Declaración de Río sobre Medio Ambiente y Desarrollo*. Disponible en la web: [http://www.un.org/esa/dsd/agenda21\\_spanish/res\\_riodecl.shtml](http://www.un.org/esa/dsd/agenda21_spanish/res_riodecl.shtml). Última visita Febrero 2015.

- [71] ONU (Organización de las Naciones Unidas) (2005). Documento Final de la Cumbre Mundial 2005. Disponible en la web: [http://www.un.org/spanish/summit2005/fact\\_sheet.html](http://www.un.org/spanish/summit2005/fact_sheet.html). Última visita Febrero 2015.
- [72] Oregon DOT (2000). *Steel slag in hot mix asphalt concrete*. Final report. Oregon Department of Transportation. Salem, Oregon, USA
- [73] Oruc S, Celik F, Akpınar MV. (2007). *Effect of cement on emulsified asphalt mixtures*. Journal of Materials Engineering and Performance 16(5) 578-583
- [74] Ouchagour Y (2007). *Sustainability of recycled concrete aggregate for use in binary cement concrete*. Doctoral Dissertation, Kingston University London, UK
- [75] Ozsahin TS, Oruc S (2008). *Neural network model for resilient modulus of emulsified asphalt mixtures*. Construction and Building Materials 22, 1436-1445
- [76] Palit SK, Reddy KS, Pandey BB (2004). *Laboratory evaluation of crumb rubber modified asphalt mixes*. Journal of Materials in Civil Engineering 16, 45–53
- [77] Paravithana S, Mohajerani A (2006). *Effects of recycled concrete aggregates on properties of asphalt concrete*. Resources Conservation & Recycling 48, 1-12
- [78] Pasandín AR, Pérez I (2013). *Laboratory evaluation of hot-mix asphalt containing construction and demolition waste*. Construction and Building Materials 43, 497-505
- [79] Pasandín AR, Pérez I (2015). Overview of bituminous mixtures made with recycled concrete aggregates. Construction and Building Materials 74, 151-161
- [80] 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
- [81] 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
- [82] Pérez I, Gallego J, Toledano M, Taibo J (2010). *Asphalt mixtures with construction and demolition debris*. Proceedings of the Institution of Civil Engineers. Transport 163, 165-174
- [83] Pérez F, Miró R, Martínez C (2003). *Proyecto PARAMIX. Investigación sobre reciclado de pavimentos*. Carreteras 4(130), 77-85
- [84] Pérez F, Miró R, Martínez C, Fernández M, Soto JA (2004). *Mix designs and performance of cold pavement recycling with emulsion in the PARAMIX-PROJECT*. Proceedings of the 3<sup>rd</sup> Eurasphalt and Eurobitume Congress. Vienna, Austria
- [85] Pérez I, Pasandín AR, Medina L (2012). *Hot mix asphalt using C&D waste as coarse aggregates*. Materials and Design 36, 849-846
- [86] 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
- [87] Poon CS, Chan D (2006). *Feasible use of recycled concrete aggregates and crushed clay brick as unbound road sub-base*. Construction and Building Materials 20, 578-585

- [88] Qadir A, Imam M (2005). *Use of recycled plastic waste aggregate as a partial substitution material in pavement structure*. Proceedings of the International Symposium on Pavement Recycling
- [89] 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)
- [90] Rahal K (2007). *Mechanical properties of concrete with recycled coarse aggregate*. Building Environment 42, 407-415
- [91] Rakshvir S, Barai SV (2006) *Studies on recycled aggregates-bases concrete*. Waste Management and Research 24(3), 225-233
- [92] Reyes F, Reyes O, Figueroa AS (2005). *Study of the rutting in asphalt mixtures by addition of plastic waste*. Proceedings of the International Symposium on Pavement Recycling. 11 pp. Sao Paulo, Brazil
- [93] Ruiz MP, Acevedo P, Puello J (2014). *Evaluation of the Environmental Impact of a Dense Graded Hot Mix Asphalt (HMA)*. Chemical Engineering Transactions 36, 229-234
- [94] Selim AA, Muniandy R, Abdelrahman M (2005). *Potential use of ground tyre rubber in stone matrix asphalt (SMA)—a laboratory evaluation*. Proceedings of the 2005 International Symposium on Pavement Recycling. Sao Paulo, Brazil
- [95] Shen DH, Du JC (2005). *Application of gray relational analysis to evaluate HMA with reclaimed building materials*. Journal of Materials in Civil Engineering 17(4), 400-406
- [96] Su N, Chen JS (2002). *Engineering properties of asphalt concrete made with recycled glass*. Resources, Conservation and Recycling 35, 259-274
- [97] Tahmoressi M (2001). *Evaluation of asphalt rubber pavements in texas*. PaveTex Engineering and Testing, Inc. USA
- [98] Tam VWY (2008a). *Economic comparison of concrete recycling: a case study approach*. Resources, Conservation and Recycling 52(5), 821–828
- [99] Texas DOT (2000). *A comprehensive laboratory and field study of high-cure crumb rubber modified asphalt materials*. Texas Transportation Institute. Texas, USA
- [100] Thanaya INA (2003). *Improving the performance of cold bituminous emulsion mixtures incorporating waste materials*. Doctoral Dissertation, The University of Leeds. UK
- [101] Thanaya INA (2006). *Prevention of early life failure on cold bituminous emulsion mixtures*. Forum Teknik 30(1)
- [102] Thanaya INA (2010). *Utilization of sustainable materials in cold asphalt emulsion mixture for lightly trafficked road*. The 6<sup>th</sup> International Student Conference at Ibaraki University ISCIU6. Japan
- [103] 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
- [104] Tortum A, Celik C, Aydin AC (2005). *Determination of the optimum conditions for tyre rubber in asphalt concrete*. Building and Environment 40, 1492–1504
- [105] 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

- [106] Vegas I, Ibáñez JA, San José JT, Urzelati A (2008) *Construction demolition wastes, Waelz slag and MSWI bottom ash: A comparative technical analysis as material for road construction*. Waste Management 28(3), 565-574
- [107] Werkmeister S (2003). *Permanent deformation behavior of unbound granular materials in pavement constructions*. Doctoral Dissertation, Technischen Universität Dresden
- [108] West RC, Page GC, Veilleux J (1998). *Effect of tyre rubber grinding method on asphalt-rubber binder characteristics*. Proceedings of the TRB Annual Meeting. Washington DC, USA
- [109] Wu S, Zhu J, Zhong J, Wang D (2011). *Experimental investigation on related properties of asphalt mastic containing recycled red brick powder*. Construction and Building Materials 25, 2883-2887
- [110] Yeo REY, Sharp KG (1997). *Recycled crushed concrete stabilized with cementitious binder, in investigation into the use of recycled crushed concrete for road base use*. Report prepared by VicRoads et Al. for EcoRecycle Victoria, Australia
- [111] Zaharieva R, Buyle-Bodin F, Skoczylas F, Wirquin E (2003). *Assessment of the surface permeation properties of recycled aggregate concrete*. Cement and Concrete Composites 25, 223-232
- [112] Zborowski A, Sotil A, Kaloush K, Way G (2004). *Materials characteristics of asphalt rubber mixtures*. Proceedings of the TRB Annual Meeting. Washington DC, USA
- [113] Zoorob SE, Suparma LB (2000). *Laboratory design and investigation of the properties of continuously graded asphaltic concrete containing recycled plastics aggregates replacement (plastiphalt)*. Cement and Concrete Composites 22, 233-422