



UNIVERSITAT POLITÈCNICA
DE CATALUNYA
BARCELONATECH

Efecto de las condiciones de fabricación en las propiedades de las mezclas bituminosas recicladas

Domingo Pérez Madrigal

ADVERTIMENT La consulta d'aquesta tesi queda condicionada a l'acceptació de les següents condicions d'ús: La difusió d'aquesta tesi per mitjà del repositori institucional UPCommons (<http://upcommons.upc.edu/tesis>) i el repositori cooperatiu TDX (<http://www.tdx.cat/>) ha estat autoritzada pels titulars dels drets de propietat intel·lectual **únicament per a usos privats** emmarcats en activitats d'investigació i docència. No s'autoritza la seva reproducció amb finalitats de lucre ni la seva difusió i posada a disposició des d'un lloc aliè al servei UPCommons o TDX. No s'autoritza la presentació del seu contingut en una finestra o marc aliè a UPCommons (*framing*). Aquesta reserva de drets afecta tant al resum de presentació de la tesi com als seus continguts. En la utilització o cita de parts de la tesi és obligat indicar el nom de la persona autora.

ADVERTENCIA La consulta de esta tesis queda condicionada a la aceptación de las siguientes condiciones de uso: La difusión de esta tesis por medio del repositorio institucional UPCommons (<http://upcommons.upc.edu/tesis>) y el repositorio cooperativo TDR (<http://www.tdx.cat/?locale-attribute=es>) ha sido autorizada por los titulares de los derechos de propiedad intelectual **únicamente para usos privados enmarcados** en actividades de investigación y docencia. No se autoriza su reproducción con finalidades de lucro ni su difusión y puesta a disposición desde un sitio ajeno al servicio UPCommons. No se autoriza la presentación de su contenido en una ventana o marco ajeno a UPCommons (*framing*). Esta reserva de derechos afecta tanto al resumen de presentación de la tesis como a sus contenidos. En la utilización o cita de partes de la tesis es obligado indicar el nombre de la persona autora.

WARNING On having consulted this thesis you're accepting the following use conditions: Spreading this thesis by the institutional repository UPCommons (<http://upcommons.upc.edu/tesis>) and the cooperative repository TDX (<http://www.tdx.cat/?locale-attribute=en>) has been authorized by the titular of the intellectual property rights **only for private uses** placed in investigation and teaching activities. Reproduction with lucrative aims is not authorized neither its spreading nor availability from a site foreign to the UPCommons service. Introducing its content in a window or frame foreign to the UPCommons service is not authorized (*framing*). These rights affect to the presentation summary of the thesis as well as to its contents. In the using or citation of parts of the thesis it's obliged to indicate the name of the author.



**UNIVERSITAT POLITÈCNICA
DE CATALUNYA
BARCELONATECH**

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL

**Programa de Doctorado en
Ingeniería e Infraestructura del Transporte**

TESIS DOCTORAL

**EFFECTO DE LAS CONDICIONES DE FABRICACIÓN
EN LAS PROPIEDADES DE LAS MEZCLAS
BITUMINOSAS RECICLADAS**

Autor:

Domingo Pérez Madrigal

Para la obtención del:

**GRADO DE DOCTOR EN INGENIERÍA POR LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA
DE CATALUÑA CON MENCIÓN DE DOCTORADO INTERNACIONAL**

Directores de tesis:

Dra. Adriana Martínez Reguero

Dr. Ramón Botella Nieto

Barcelona, España

2018.

AGRADECIMIENTOS

Quiero dar las gracias a mi padre el Ing. Domingo Pérez Verdejo por brindarme su apoyo económico y psicológico para concluir los estudios doctorales. Además, por el apoyo incondicional cuando más lo necesité y por celebrar conmigo nuestros triunfos. Sin duda eres mi modelo a seguir como profesionalista en el área de la ingeniería civil y en el área de la mecánica de suelos y pavimentos. No hay palabras para agradecer todo lo que has hecho por mí.

A mi directora de tesis la Dra. Adriana H. Martínez Reguero, por el valioso tiempo invertido y el interés constante en el avance de esta investigación. Muchas gracias por ser la mejor directora de tesis en todos los sentidos, es usted un modelo a seguir tanto personal, como profesionalmente.

A mi director de tesis y amigo el Dr. Ramón Botella Nieto por darme la oportunidad de trabajar en conjunto y por enseñarme muchas cosas teóricas en esta tesis doctoral. Gracias por ayudarme en todos los aspectos.

Al Dr. Rodrigo Miró Recasens por la enorme cantidad de conocimientos que me ha transmitido a lo largo de ésta tesis y por sus acertadas recomendaciones, correcciones y sugerencias. Puedo considerarlo como un director de tesis más.

Al Dr. Félix E. Pérez Jiménez por el interés que ha mostrado en todo momento a la hora de resolver dudas, además por aportar temas interesantes en el desarrollo de esta investigación.

Al Dr. Nicholas Thom y Dr. Gordon Airey por haberme atendido, guiado y supervisado durante toda mi estancia doctoral internacional en el Nottingham Transportation Engineering Centre (NTEC).

Al Dr. Andrew Braham por el interés de transmitirme sus conocimientos y por haber ayudado en muchos aspectos de este trabajo. Siempre me estas enseñando cosas nuevas sobre los pavimentos.

A José Amorós y Jordi Martín por su ayuda en la ejecución y gestión de los numerosos ensayos realizados en el laboratorio de caminos de la UPC.

A mis amigos Omar O. Franco Arias, Andrea Iannone, Rares Cimpeanu por su compañía y por su sincera amistad a lo largo de mi estancia en Barcelona, España.

A mis hermanos y a mi familia por estar siempre conmigo en las buenas y en las malas.

RESUMEN

La utilización del material bituminoso fresado del pavimento (conocido como RAP) en la fabricación de mezclas bituminosas recicladas va creciendo día a día debido a los beneficios económicos y ambientales que conlleva esta técnica de conservación de carreteras. Sin embargo, existe cierta preocupación sobre las propiedades resultantes de la mezcla reciclada debido al efecto de las condiciones de fabricación de las mismas.

Los principales factores que podrían afectar el grado de mezclado entre los ligantes asfálticos envejecidos y vírgenes son: la temperatura de producción, el tiempo de mezclado, la temperatura final de la mezcla, el origen del RAP, las propiedades del RAP y el uso de aditivos como rejuvenecedores para mejorar el grado de mezclado.

Por ello, esta tesis pretende analizar el efecto de las condiciones de fabricación sobre las propiedades volumétricas y mecánicas de las mezclas bituminosas con RAP. Este objetivo se persiguió estableciendo dos etapas de investigación. En la primera etapa las condiciones de fabricación de probetas han consistido en variar la temperatura del árido de aportación y del RAP, así como variar el tiempo de mezclado. También se ha analizado en el efecto del agente rejuvenecedor sobre las mezclas bituminosas recicladas con 60% de RAP. La segunda etapa consistió básicamente en cambiar las características de la primera etapa, por ejemplo, cambiar el origen del RAP, extender el tiempo de mezclado, así como utilizar distintos materiales de aportación y equipos de laboratorio. La primera etapa fue llevada a cabo en la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC) y la segunda etapa (estancia corta) se desarrolló en la Universidad de Nottingham. Se ha desarrollado un programa experimental que incluye ensayos para evaluar las propiedades en mezclas recicladas tales como: contenido de huecos, módulo de rigidez, tracción indirecta y el ensayo Fénix. Se hace hincapié en el uso del ensayo Fénix desarrollado en la UPC, puesto que ha demostrado ser un método práctico y eficiente para caracterizar el comportamiento a fisuración de las mezclas bituminosas a diferentes temperaturas.

También se ha incluido un método de ensayo para analizar la influencia del mástico del RAP, el UCL (método Universal de Caracterización de Ligantes) desarrollado también en la UPC y que ha confirmado en diferentes estudios que puede dar información complementaria del efecto del contenido y la temperatura del mástico sobre las propiedades mecánicas de una mezcla bituminosa reciclada.

Se ha podido concluir que las mezclas recicladas pueden alcanzar un desempeño similar al de las mezclas convencionales, siempre y cuando se tenga el tratamiento adecuado en el diseño y en el proceso de fabricación. Al precalentar el RAP se consigue difundir de mejor manera el ligante de aportación y también se logra movilizar una mayor cantidad del betún del RAP. Extender el tiempo de mezclado provoca que las aglomeraciones del RAP comiencen a separarse y por ende se logra movilizar una mayor cantidad de betún. La incorporación de un aditivo rejuvenecedor produce un efecto positivo en las propiedades de las mezclas recicladas puesto que éste consigue restaurar las propiedades del betún envejecido. No obstante, en la mayoría de los casos, es suficiente aplicar una u otra condición para mejorar las propiedades, pero en algunos casos aplicar todas las condiciones simultáneamente se produce un efecto sinérgico en las propiedades de las mezclas induciendo un efecto positivo en el comportamiento de las mezclas recicladas.

ABSTRACT

The use of bituminous material milled from the pavement (known as Reclaimed Asphalt Pavement, or RAP) in the manufacture of recycled bituminous mixtures is growing day by day due to the economic and environmental benefits that this technique of road maintenance entails. However, there is some concern about the resulting properties of the recycled mixture considering the manufacturing conditions. One concern is the blending of the asphalt binder from the RAP (the aged asphalt binder) with the virgin asphalt binder.

The main factors that could affect the degree of mixing between the aged and virgin asphalt binders are: the production temperature, mixing time, final temperature of the mixture, origin of the RAP, the properties of the RAP, and the use of additives as rejuvenators to enhance the degree of mixing.

Therefore, this thesis aims to analyze the effect of manufacturing conditions on the volumetric and mechanical properties of recycled bituminous mixtures. This objective was pursued by establishing two stages of research. In the first stage, the conditions for manufacturing test samples consisted in varying the temperature of the aggregate and RAP, as well as varying the mixing time. The effect of the rejuvenating agent on recycled bituminous mixtures with 60% RAP was also analyzed. The second stage consisted of changing specific characteristics from the first stage, for example, changing the origin of the RAP, extending the mixing time, as well as using different materials and laboratory equipment. The first stage was carried out at the Polytechnic University of Catalonia (UPC) and the second stage (short stay) was held at the University of Nottingham. An experimental program was developed that includes tests to evaluate the properties in recycled mixtures, such as: void content, tensile strength, stiffness modulus, and Fenix test. Emphasis was placed on the use of the Fenix test developed at UPC, since it has proven to be a practical and efficient method to characterize the cracking behavior of bituminous mixtures at different temperatures.

A test method has also been included to analyze the influence of the RAP mastic, the UCL (Universal Binder Characterization Method) developed at UPC and that has confirmed in different studies that it can give complementary information about the effect of the content and the temperature of the mastic on the mechanical properties of a recycled bituminous mixture.

It has been possible to conclude that recycled mixtures can achieve a performance similar to that of conventional mixtures, provided that the appropriate treatment is taken into account in the design and manufacturing process. By preheating the RAP, it is possible to more effectively spread the rejuvenating agent which will mobilize a greater quantity of the RAP asphalt binder. Extending mixing time causes the RAP agglomerations to begin to separate and, therefore, a greater amount of bitumen is mobilized. The incorporation of a rejuvenating additive produces a positive effect on the properties of the recycled mixtures since it manages to restore the properties of the aged bitumen. However, in most cases, it is sufficient to apply any condition (preheating of RAP, increasing the mixing time, overheating aggregates or the use of the rejuvenators) to improve the properties, but in some cases to apply all the conditions simultaneously a synergistic effect is produced in the properties of the mixtures, inducing a positive effect on the behavior of the recycled mixtures.

ÍNDICE GENERAL

1. Introducción	19
1.1 Planteamiento del problema.....	19
1.2 Objetivos.....	21
2. Estado del arte	23
2.1 Introducción.....	23
2.2 El reciclado de pavimentos asfálticos.....	27
2.2.1 Reciclado en frío.....	29
2.2.2 Reciclado en caliente en planta.....	35
2.2.2.1 Tipos de plantas de mezclas recicladas en caliente.....	36
2.2.3 Problemática general que se tiene en la elaboración y puesta en obra de una mezcla bituminosa reciclada.....	43
2.2.4. Buenas prácticas para el manejo del RAP.....	46
2.2.4.1 Fresado y proceso del RAP.....	46
2.2.4.2 Acopio del RAP.....	47
2.2.4.3 Control de calidad y análisis de la variabilidad del RAP.....	48
2.3 Propiedades de las mezclas bituminosas recicladas.....	49
2.3.1 Resistencia a la acción del agua.....	50
2.3.2 Resistencia a la deformación permanente.....	54
2.3.3 Rigidez.....	56
2.3.4 Resistencia a la fisuración.....	59
2.3.4.1 Energía de fractura.....	59
2.3.4.2 Ensayos para evaluar la energía de fractura en mezclas bituminosas con RAP.....	62
2.3.4.3 Importancia del ensayo Fénix.....	64
2.4. Variables que afectan a las propiedades de las mezclas recicladas.....	67
2.4.1 Variables relacionadas con el ligante bituminoso.....	68
2.4.1.1 Envejecimiento de materiales bituminosos.....	68
2.4.1.2 Parámetros de evaluación y efectos del envejecimiento del betún y las mezclas.....	70
2.4.2 Mecanismos de mezclado entre los componentes de la mezcla reciclada.....	71

2.4.2.1 Mezclado mecánico.....	71
2.4.2.2 Temperatura y tiempo de mezclado.....	73
2.4.2.3 Grado de mezclado entre los componentes de una mezcla bituminosa reciclada.....	76
2.4.3 Agentes rejuvenecedores.....	79
2.4.3.1 Proceso de difusión de agentes rejuvenecedores sobre el RAP.....	80
3. Metodología	83
3.1 Plan de Trabajo.....	83
3.2 Investigación sobre el efecto del tiempo y temperatura de mezclado en mezclas bituminosas recicladas en caliente.....	85
3.2.1 Descripción de los ensayos empleados	92
3.2.1.1 Compactación.....	92
3.2.1.2 Contenido de huecos de aire.....	93
3.2.1.3 Módulo de rigidez.....	94
3.2.1.4 Resistencia a tracción indirecta.....	95
3.2.1.5 Ensayo Fénix	98
3.3 Análisis del efecto de los rejuvenecedores en las mezclas bituminosas recicladas.....	106
3.4 Estudio de la suposición de grado de mezclado del betún contenido en el RAP.....	108
3.5 Investigación sobre la influencia del contenido y la temperatura del mástico del RAP en las propiedades de las mezclas bituminosas recicladas mediante el Método UCL.....	117
4. Análisis de resultados	
4.1 Investigación sobre el efecto del tiempo y temperatura de mezclado en mezclas bituminosas recicladas en caliente.....	124
4.1.1 Primera etapa (UPC).....	124
4.1.1.1 Contenido de huecos.....	124
4.1.1.2 Módulo de Rigidez.....	130
4.1.1.3 Resistencia a Tracción Indirecta.....	133
4.1.1.4 Ensayo Fénix.....	142
4.1.2 Segunda etapa (Universidad de Nottingham).....	154
4.1.2.1 Contenido de huecos.....	154
4.1.2.2 Módulo de Rigidez.....	158

4.1.2.3 Resistencia a Tracción Indirecta.....	160
4.1.2.4 Ensayo Fénix.....	163
4.2 Efecto de rejuvenecedores en mezclas bituminosas recicladas	171
4.2.1 Contenido de huecos.....	171
4.2.2 Módulo de Rigidez.....	172
4.2.3 Resistencia a Tracción Indirecta.....	173
4.2.4 Ensayo Fénix.....	175
4.3 Estudio de la suposición de grado de mezclado del betún contenido en el RAP.....	178
4.3.1 Contenido de huecos.....	178
4.3.2 Módulo de Rigidez.....	179
4.3.3 Ensayo Fénix.....	180
4.4 Investigación sobre de la influencia del contenido y la temperatura del mástico del RAP en las propiedades de las mezclas bituminosas recicladas mediante el Método UCL.....	183
5. Conclusiones.....	188
5. Conclusions.....	195
6. Líneas futuras de investigación.....	202
Referencias Bibliográficas	203
ANEXOS	
A. Características del betún 70/100.....	230
B. Características del aditivo rejuvenecedor SYLVAROAD RP 1000.....	231

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig.1.1 Posibles escenarios del mezclado de una mezcla bituminosa reciclada (Zhao et al., 2016).....	20
Fig.2.1 Emisiones (kg CO ₂) y energía (MJ) generadas por tonelada de producción (Zaumanis et al., 2014).....	25
Fig.2.2 Costos relacionados con los materiales del reciclado de mezclas en caliente (West et al., 2013) ...	27
Fig.2.3. Evolución del IRI para la técnica tradicional (rosa) y el reciclado en frío (negro) (Fuente: Alkins et al, 2008)	30
Fig.2.4. Planta de reciclado en frío (Wirtgen Group Technologies, 2010)	31
Fig. 2.5 Equipo para llevar a cabo el reciclado de frío con emulsión (CEPSA2008).....	34
Fig.2.6. Central discontinua sin calentamiento RAP (Comité Technique AIPCR C7/8 – " Recyclage Des Chaussées, 2007).	37
Fig.2.7. Central discontinua con calentamiento simultáneo de RAP (Comité Technique AIPCR C7/8 – " Recyclage Des Chaussées", 2007).....	38
Fig. 2.8 Planta discontinua con doble tambor secador para precalentamiento del RAP (ASTEC 1998).....	38
Fig. 2.9 Planta discontinua con doble tambor secador para calentamiento del RAP, (Fuente: www.pabasa.com, 2004).....	39
Fig. 2.10. Central continua con tambor secador-mezclador (Comité Technique AIPCR C7/8 – " Recyclage DesChaussées"2007).....	40
Fig.2.11. Planta continua con tambor secador-mezclador Double Barrel (Fuente: ASTEC www.astecinc.com ,2002).....	40
Fig. 2.12. Planta de asfalto con capacidad de procesar 100% de RAP ubicada en la ciudad de Nueva York, Estados Unidos (Fuente: Zaumanis et al. 2014).....	42
Fig. 2.13 Planta de asfalto para mezclas recicladas con 100% de RAP "BAB Belag AG RAH 100" (a) y sección transversal del tambor de calentamiento (b) (Fuente: Ammann Industries, 2011).	43
Fig. 2.14 El proceso irreversible de envejecimiento del betún (Hansen and Newcomb 2011).	45
Fig.2.15 Fraccionado del RAP en distintos tamaños (West et al., 2013)	47
Fig. 2.16 Acopio del RAP bajo techo (Brock y Richmond, 2007)	48
Fig. 2.17 Técnica del "Back-Drugging" y muestreo del RAP para ser caracterizado (Instituto del Asfalto de los Estados Unidos, 2014).....	49
Fig. 2.18. Penetración del agua en las mezclas asfálticas (Kringos, et al., 2008).....	51
Fig.2.19. Separación del árido de la mezcla debido a fallo cohesivo vs. fallo adhesivo (Kringos, et al., 2008).	51
Fig. 2.20 Diferentes tipos de caucho para su uso en mezclas recicladas (Xiao and Amirkhanian,2009).	53

Fig. 2.21 Roderas (deformaciones permanentes) por fallas en la mezcla asfáltica (Garnica P., et al. 2002).	54
Fig.2.22 Formación de roderas provocada por la difusión insuficiente del rejuvenecedor (Mogawer et al., 2012).	56
Fig.2.23 Dispositivo para medir el módulo de rigidez por compresión diametral (Cooper Technologies, 2017).	57
Fig. 2.24. Pavimento con 100% de RAP en la calle 75 de Nueva York, Woodhaven en construcción en 2001 y puesta en servicio en 2012 (Zaumanis et al., 2014).	58
Fig. 2.25 Fractura en pavimento asfáltico (Fuente: Yutave Ingeniería, 2011).	60
Fig. 2.26 Diferentes modos de carga en los componentes agrietados: (a) de modo puro I, (b) el modo puro II, y (c) el modo mixto I / II (Fuente: Fernández L., 2002).	61
Fig. 2.27 Forma esquemática de obtención de la energía de fractura (Pérez-Jiménez, F. et al., 2010).	61
Fig. 2.28. Tensiones de tracción del ensayo Fénix. (Pérez-Jiménez F. et al., 2010).	65
Fig. 2.29. Esquema del ensayo Semi Circular Bending (SCB). (Singh, et al., 2017).	66
Fig.2.30. Gráfica que muestra el efecto del envejecimiento en la vida útil de los pavimentos asfálticos (Abu Al-Rub, et al., 2013).	69
Fig.2.31 Espectrogramas para caracterizar el betún antes y después de ser envejecido tanto en laboratorio como en campo (Mohammad, et al.,2006).	70
Fig. 2.32: Mezcla con homogeneidad ideal (Harnby et al., 2001).	72
Fig. 2.33: Mezcla con partículas de “atracción propia “(self-loving) (Harnby et al., 2001).	73
Fig.2.34: Relación entre la temperatura final de la mezcla bituminosa y el cambio en el punto del reblandecimiento del betún (Read y Whiteoak, 2003).	74
Fig. 2.35 Imágenes infrarrojas del mezclado entre áridos vírgenes sobrecalentados y RAP, aumentando el tiempo de mezclado (0,60,120,180,240 y 300 segundos) (Zhang et al., 2015).	76
Fig. 2.36: Esquematización de una partícula de RAP dividida en capas (Huang et al., 2005).	77
Fig.2.37: Espectro obtenido después de diferentes periodos de tiempo (10, 50, 100, 500, y 925 minutos) (Karlsson y Isacson, 2003a).	78
Fig. 2.38: Esquema de funcionamiento de Reómetro de corte dinámico (Fuente: Elaboración propia, 2010).	79
Fig. 2.39 Esquema descriptivo del proceso de difusión del agente rejuvenecedor en la película del betún contenido en el RAP (Fuente: Carpenter y Wolosick, 1980; Noureldin y Wood, 1987).	81
Fig. 2.40 Partícula de RAP al momento que se está difundiendo un agente rejuvenecedor en la película del betún del RAP (Fuente : Zaumanis et al., 2014).	81
Fig. 3.1 Resumen del plan de trabajo de los estudios experimentales (Elaboración propia ,2017).	84
Fig. 3.2 Proceso de extracción del betún del RAP (Elaboración Propia, 2015).	86
Fig.3.3 Curvas granulométricas de los áridos de las mezclas estudiadas (Propia, 2015).	87

Fig. 3.4 Áridos de aportación de origen calizo (Propia, 2017).....	88
Fig. 3.5 Mezcladora mecánica de la Universidad Politécnica de Cataluña (Elaboración propia,2017).....	90
Fig. 3.6. Diagrama de flujo del plan experimental (1ª etapa) llevada a cabo en la Universidad Politécnica de Cataluña.....	91
Fig.3.7 Compactador de impactos de la Universidad Politécnica de Cataluña (Elaboración propia, 2017).	93
Fig. 3.8 Forma del impulso de carga. (Norma UNE-EN 12697:26).....	94
Fig. 3.9 . Dispositivo para ensayo de tracción indirecta (Norma UNE-EN 12697:23).....	96
Fig. 3.10 Conjunto de probetas compactadas para ser ensayadas a tracción indirecta (elaboración propia, 2016).....	97
Fig. 3.11 Espécimen sometido al Ensayo Fénix (Pérez-Jiménez, F. et al., 2010).....	99
Fig. 3.12 Curva carga-desplazamiento obtenida (Pérez-Jiménez, F. et al., 2010).....	99
Fig.3.13 Curvas granulométricas de las mezclas estudiadas (Elaboración propia, 2017).....	102
Fig. 3.14 Mezcladora mecánica de la Universidad de Nottingham (Elaboración propia 2017).....	104
Fig. 3.15. Diagrama de flujo del plan experimental (2ª etapa) realizada en la Universidad de Nottingham.....	105
Fig. 3.16 Rejuvenecedor SYLVAROAD™ RP1000 de Arizona BV y aplicación de este sobre el RAP (Elaboración propia, 2017).....	107
Fig. 3.17 Extracción del Betún del RAP (Elaboración propia, 2015).....	110
Fig. 3.18 Distribución de los tamaños de los áridos del RAP (Elaboración propia, 2017).....	111
Fig. 3.19 Granulometría de los áridos del RAP y de aportación para simular la supuesto grado de mezclado nulo en este estudio (Elaboración propia, 2017).....	112
Fig. 3.20 Granulometría de los áridos del RAP y de aportación para simular el grado de mezclado total en este estudio (Elaboración propia, 2017).....	116
Fig.3.21 Aspecto de la fracción fina del RAP 0.63-0.063 mm (Elaboración propia, 2016).....	118
Fig. 3.22 Máquina para el desgaste de los Ángeles y probetas (Elaboración propia, 2017).....	121
Fig. 3.23 Curva granulométrica de los áridos de las probetas ensayadas al Cántabro (Elaboración propia, 2017).....	122
Fig.4.1 Contenido de huecos de las series con 20% de RAP y 75 golpes.....	126
Fig.4.2 Contenido de huecos de las series con 20% de RAP y 50 golpes.....	126
Fig.4.3 Contenido de Huecos de las series con 40% de RAP y 75 golpes.....	127
Fig.4.4 Contenido de Huecos de las series con 40% de RAP y 50 golpes.....	127
Fig.4.5 Contenido de Huecos de las series con 60% de RAP y 75 golpes.....	127
Fig.4.6 Contenido de Huecos de las series con 60% de RAP y 50 golpes.....	128
Fig.4.7 Influencia de la temperatura y tiempo de mezclado en el contenido de huecos.....	130
Fig.4.8 Módulo de Rigidez (MPa) para un contenido de 20% de RAP.....	131
Fig.4.9 Módulo de Rigidez (MPa) para un 40% de RAP.....	131

Fig.4.10 Módulo de Rigidez para un 60% de RAP.....	131
Fig.4.11 Influencia de la temperatura y tiempo de mezclado en el módulo de rigidez de las mezclas con 40% de RAP.....	133
Fig.4.12: Ejemplo de ensayo a tracción indirecta para 3 probetas sin RAP.....	134
Fig. 4.13: Ejemplo de ensayo a tracción indirecta para 3 probetas con 20% RAP.....	134
Fig. 4.14: Ejemplo de ensayo a tracción indirecta para 3 probetas con 40% RAP.....	135
Fig. 4.15: Ejemplo de ensayo a tracción indirecta para 3 probetas con 60% RAP.....	135
Fig. 4.16 Resistencia a tracción indirecta de las series con un 20% de RAP a 15°C.....	137
Fig. 4.17 Resistencia a tracción indirecta de las series con un 40% de RAP a 15°C.....	138
Fig. 4.18 Resistencia a tracción indirecta de las series con un 60% de RAP a 15°C.....	138
Fig.4.19 Resistencia conservada en todas las mezclas estudiadas en esta etapa.....	140
Fig. 4.20 Influencia de la temperatura y tiempo de mezclado en la resistencia conservada de mezclas recicladas con 60% de RAP.....	141
Fig. 4.21. Ejemplo de curvas obtenidas del ensayo Fénix a diferentes temperaturas.....	142
Fig.4.22 Índice de rigidez a tracción de las mezclas con 20% de RAP.....	143
Fig. 4.23 Índice de rigidez a tracción de las mezclas con 40% de RAP.....	143
Fig. 4.24 Índice de rigidez a tracción de las mezclas con 60% de RAP.....	144
Fig. 4.25 Influencia de la temperatura y tiempo de mezclado en el IRT de mezclas recicladas con 60% de RAP y a 20°C.....	146
Fig. 4.26 Energía disipada GD de las mezclas con 20% RAP.....	148
Fig.4.27 Energía disipada GD de las mezclas con 40% RAP.....	149
Fig.4.28 Energía disipada GD de las mezclas con 60% RAP.....	149
Fig. 4.29 Influencia de la temperatura y tiempo de mezclado en el GD de mezclas recicladas con 40% de RAP y temperatura de ensayo de 20°C.....	150
Fig. 4.30 d 0.5 mm de las mezclas con 20% de RAP.....	152
Fig. 4.31 d 0.5 mm de las mezclas con 40% de RAP.....	153
Fig. 4.32 d 0.5 mm de las mezclas con 60% de RAP.....	153
Fig.4.33 Efecto del tiempo y temperatura en el d0.5 con 40% de RAP y temperatura de ensayo a 20°C.....	154
Fig.4.34 Contenido de Huecos de las series con 60% de RAP y 75 golpes.....	156
Fig.4.35 Contenido de Huecos de las series con 60% de RAP y 50 golpes.....	156
Fig.4.36 Efecto del tiempo y temperatura en el contenido de huecos.....	157
Fig.4.37 Módulo de Rigidez con un 60% de RAP.....	159
Fig.4.38 Efecto del tiempo y temperatura en el módulo de rigidez.....	160
Fig. 4.39 Resistencia a tracción indirecta en seco y tras inmersión de las series con 60% de RAP a 15°C.....	161
Fig.4.40. Resistencia conservada de las series analizadas.....	162
Fig.4.41. Influencia del tiempo y temperatura en la resistencia conservada.....	163
Fig. 4.42 Gráfica del IRT de las mezclas ensayadas a 20°C y 5°C.....	165

Fig. 4.43 Influencia del tiempo y temperatura en el IRT a 20°C.....	166
Fig. 4.44 Energía disipada de las mezclas analizadas.....	167
Fig. 4.45 Influencia del tiempo y temperatura en la energía disipada a 20°C.....	168
Fig. 4.46 Desplazamiento al 50% de la carga máx. post pico, d 0.5 mm de las mezclas con 60% de RAP.....	169
Fig. 4.47 Influencia del tiempo y temperatura en desplazamiento al 50% de la carga máx. post pico, d 0.5 mm a 20°C.....	170
Fig.4.48 Contenido de huecos (%) y desviación estándar de las mezclas estudiadas.....	171
Fig.4.49 Módulo de rigidez y barras de error de las mezclas analizadas.....	173
Fig. 4.50 Resistencia a tracción indirecta de las series analizadas a 15°C.....	174
Fig. 4.51 Resistencia conservada de las series analizadas.....	174
Fig. 4.52 Índice de rigidez a tracción y barras de error de las mezclas analizadas.....	176
Fig. 4.53 Energía disipada y barras de error de las mezclas analizadas.....	176
Fig. 4.54 Desplazamiento al 50% de la carga máxima en la zona post-pico y barras de error de las mezclas analizadas.....	177
Fig.4.55 Contenido de huecos de las series con diferentes condiciones de grado de mezclado.....	178
Fig.4.56 Módulo de Rigidez de las mezclas con suposición de grado de mezclado.....	179
Fig. 4.57 Índice de rigidez a tracción de las mezclas con simulación de grado de mezclado.....	181
Fig. 4.58 Energía disipada de las mezclas con simulación de grado de mezclado.....	182
Fig. 4.59 Desplazamiento al 50% de la carga máx. post pico, d 0.5 mm de las mezclas con simulación de grado de mezclado.....	182
Fig.4.60 Contenido de Huecos (%) para 50 golpes de las series con diferentes características.....	184
Fig.4.61 Curvas de estado para las probetas fabricadas con un 20% de RAP sin rejuvenecedor y ensayadas al Cántabro mediante el método UCL a diferentes temperaturas.....	185
Fig. 4.62 Curvas de estado para las probetas fabricadas con un 10 y 20% de rejuvenecedor. ensayadas al Cántabro mediante el método UCL a diferentes temperaturas.....	186

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Costo relacionado con los materiales (West et al., 2013).....	26
Tabla 2.2 Ensayos desarrollados para obtener las propiedades de fractura en las mezclas bituminosas (Valdés, 2011)	63
Tabla 3.1 Distribución del tamaño de los áridos de aportación y del RAP.....	87
Tabla 3.2. Características de los betunes utilizados.....	89
Tabla 3.3 Condiciones de tiempo y temperatura de las mezclas de referencia y mezclas recicladas para cada porcentaje de RAP.....	89
Tabla 3.4 Distribución del tamaño de los áridos de aportación y del RAP.....	102
Tabla 3.5. Características de los betunes empleados en la segunda etapa.....	103
Tabla 3.6 Condiciones de tiempo y temperatura de las mezclas de referencia y mezclas recicladas con 60% de RAP.....	103
Tabla 3.7. Características de las mezclas estudiadas.....	108
Tabla 3.8 Granulometría del árido del RAP antes y después de la extracción del ligante.....	111
Tabla 3.9. Características de las mezclas usadas en el estudio anterior (primera etapa).....	113
Tabla 3.10. Porcentajes de betún total utilizados en el escenario de roca inerte.....	113
Tabla 3.11. Penetración y punto de reblandecimiento de la mezcla de los betunes del RAP y aportación.....	114
Tabla 3.12 Características de los betunes empleados para la suposición del grado de mezclado total.....	115
Tabla.3.13 Características de las series de probetas para el estudio de la suposición de grado de mezclado total.....	117
Tabla 3.14 Promedio de los porcentajes de los materiales después de varias extracciones.....	119
Tabla 3.15 Características de los ligantes bituminosos empleados en este estudio.....	119
Tabla 3.16 Granulometría de los áridos para formar las probetas para el método UCL.....	122
Tabla.3.17 Series de probetas fabricadas para el estudio del mástico mediante el método UCL.....	123
Tabla 4.1 Valores medios del contenido de huecos para la mezcla de referencia y mezcla reciclada con un 20% de RAP.....	125
Tabla 4.2 Valores medios del contenido de huecos para la mezcla reciclada con un 40% de RAP.....	125
Tabla 4.3 Valores medios del contenido de huecos para la mezcla reciclada con un 60% de RAP..	125
Tabla 4.4 Valores medios de los Módulos de rigidez para las diferentes mezclas estudiadas.....	130
Tabla 3.3 Condiciones de tiempo y temperatura de las mezclas de referencia y mezclas recicladas para cada porcentaje de RAP.....	132
Tabla 4.5 Valores medios de las resistencias a tracciones indirectas en seco para las diferentes mezclas estudiadas.....	136

Tabla 4.6 Valores medios de las resistencias a tracciones indirectas en húmedo para las diferentes mezclas estudiadas.....	136
Tabla 4.7 Índice de rigidez a tracción de las mezclas con 20% de RAP.....	144
Tabla 4.8 Índice de rigidez a tracción de las mezclas con 40% de RAP.....	145
Tabla 4.9 Índice de rigidez a tracción de las mezclas con 60% de RAP.....	145
Tabla 4.10 Energía disipada a tracción de las mezclas con 20% de RAP.....	147
Tabla 4.11 Energía disipada a tracción de las mezclas con 40% de RAP.....	147
Tabla 4.12 Energía disipada a tracción de las mezclas con 60% de RAP.....	148
Tabla 4.13 Desplazamiento al 50% de la carga máx. post pico, d 0.5 mm de las mezclas con 20% de RAP.....	151
Tabla 4.14 Desplazamiento al 50% de la carga máx. post pico, d 0.5 mm de las mezclas con 40% de RAP.....	152
Tabla 4.15 Desplazamiento al 50% de la carga máx. post pico, d 0.5 mm de las mezclas con 60% de RAP.....	152
Tabla 3.6 Condiciones de tiempo y temperatura de las mezclas de referencia y mezclas recicladas con 60% de RAP.....	155
Tabla 4.16 Valores medios del contenido de huecos para la mezcla de referencia y mezcla reciclada con un 60% de RAP.....	155
Tabla 4.17 Valores medios de los módulos de rigidez para las diferentes mezclas estudiadas.....	158
Tabla 4.18 Valores medios de la resistencia a tracción indirecta para las diferentes mezclas estudiadas.....	160
Tabla 3.6 Condiciones de tiempo y temperatura de las mezclas de referencia y mezclas recicladas con 60% de RAP.....	164
Tabla 4.19 Valores medios del IRT de las mezclas estudiadas.....	164
Tabla 4.20. Energía disipada a tracción de las mezclas con 60% de RAP.....	167
Tabla 4.21 Desplazamiento al 50% de la carga máx. post pico, d 0.5 mm de las mezclas con 60% de RAP.....	169
Tabla 4.22 Valores medios del contenido de huecos para las mezclas estudiadas.....	171
Tabla 4.23 Valores medios de los módulos de rigidez para las diferentes mezclas estudiadas.....	172
Tabla 4.24 Valores medios de la resistencia a tracción indirecta para las diferentes mezclas.....	173
Tabla 4.25 Parámetros Fénix a 20°C de las mezclas con 60% de RAP con rejuvenecedor.....	175
Tabla 4.26 Valores medios del contenido de huecos de las mezclas analizadas.....	178
Tabla 4.27 Valores medios del Módulo de rigidez de las mezclas analizadas.....	179
Tabla 4.28 Índice de rigidez a tracción de las mezclas con simulación de grado de mezclado.....	180
Tabla 4.29 Energía disipada de las mezclas con simulación de grado de mezclado.....	180
Tabla 4.30 Desplazamiento al 50% de la carga máx. post pico, d 0.5 mm de las mezclas con simulación de grado de mezclado.....	181

Tabla 4.31 Valores medios del contenido de huecos de las mezclas.....	183
Tabla 4.32 Resultados medios de las series de probetas con 20% de RAP con rejuvenecedor mediante el método UCL a diferentes temperaturas de ensayo.....	185
Tabla 4.33 Resultados medios de las series de probetas con 20% de RAP con rejuvenecedor mediante el método UCL a diferentes temperaturas de ensayo.....	186

1. Introducción

1.1 Planteamiento del problema

En las últimas décadas, el ahorro de energía y la preservación del medio ambiente han adquirido una trascendencia enorme para tratar de reducir el cambio climático. En las carreteras, la consecución de este objetivo se persigue con el uso creciente del RAP (del inglés “reclaimed asphalt pavement” que significa “material bituminoso a reciclar”) en las capas del firme. A pesar de las indiscutibles ventajas de esta técnica en la conservación de carreteras, existen cuestiones por resolver con respecto a la calidad del producto final obtenido y su comparación con la de una mezcla bituminosa convencional.

Es frecuente el empleo de mezclas recicladas con un contenido de RAP variable entre 10% y el 30% en la construcción y rehabilitación de firmes. Algunos investigadores afirman que incluso el 100% del uso de RAP es factible (Lo Presti et al., 2016; Zaumanis, et al., 2014). Sin embargo, en general, la proporción del RAP que se usa en la elaboración de nuevas capas del pavimento sigue siendo más baja de lo que podría ser técnicamente, siendo la capa de rodadura las más exigente debido al alto desempeño que se requiere en parámetros tales como la resistencia al agrietamiento y la resistencia al deslizamiento (West et al., 2016).

Las limitaciones para usar grandes porcentajes de RAP en una capa de rodadura derivan de 3 aspectos: las propiedades del betún envejecido del RAP (que pueden provocar fallas por agrietamiento), el grado de mezclado que se da por la difusión entre el betún virgen rejuvenecedor y el betún contenido en el RAP y las propiedades de los áridos del RAP, especialmente el contenido de finos (Howard et al., 2009; Zaumanis y Mallick, 2015).

En la práctica profesional, cuando el RAP es mezclado para formar una nueva mezcla reciclada, generalmente se asume que el ligante contenido en el RAP es completamente mezclado con el nuevo betún virgen. Varias investigaciones han demostrado que esta aseveración es incorrecta (Fig. 1.1) (Bennert y Martin, 2010; Huang et al., 2005; Zhao et al., 2016).

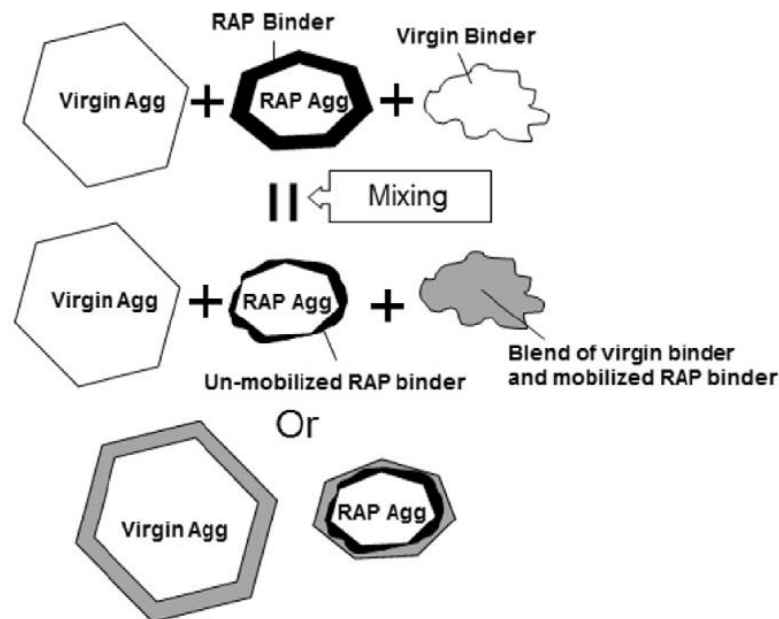


Fig.1.1 Posibles escenarios del mezclado de una mezcla bituminosa reciclada (Zhao et al., 2016).

Entre las cuestiones más usualmente discutidas, se destacan: el porcentaje máximo de material fresado que se puede añadir, la calidad obtenida de la mezcla reciclada y la interacción entre el ligante nuevo y el viejo. La utilización de un material que ha sufrido un envejecimiento previo supone un aspecto difícil de cuantificar en la etapa de diseño de la mezcla reciclada, especialmente cuando se desconoce el efecto que ha causado este proceso en el betún.

Un efecto combinado entre la temperatura, la radiación solar, la humedad y el aire que produce una oxidación del ligante de la mezcla asfáltica a través del tiempo, implica un aumento de rigidez de la mezcla, y, por ende, un aumento de fragilidad de ésta, haciéndola más susceptible a fallos por fisuración. Por lo que se requiere

contar con procedimientos que traten de simular los mecanismos de fisuración a través de ensayos experimentales.

Actualmente en España y México no existe un ensayo normalizado que simule los mecanismos de fisuración. Por lo que se propone utilizar el ensayo Fénix (desarrollado en la UPC) en esta investigación ya que ha demostrado ser un método práctico y eficaz para caracterizar el comportamiento a la fisuración de mezclas asfálticas recicladas, considerando variables como el tipo y el contenido de ligante, y la temperatura de ensayo. Además, otra ventaja de este ensayo es que se puede utilizar en los testigos de una obra y en un amplio rango de temperaturas. Asimismo, permite estudiar el comportamiento en zona de post-pico de la curva carga-desplazamiento para evaluar la tenacidad de la mezcla.

Es por todas estas ventajas con respecto a los ensayos clásicos de fisuración por lo que el ensayo Fénix en colaboración con otros ensayos (Determinación de huecos, Módulo de rigidez, Tracción indirecta, DSR, FTIR, Método UCL) se muestran adecuados para conocer el efecto de las condiciones de fabricación en las propiedades de las mezclas bituminosa recicladas.

1.2 Objetivos

La motivación principal de este trabajo de investigación es la incertidumbre que existe en la actualidad durante el proceso de producción de las mezclas recicladas en central. Por eso hay cierta preocupación referente a las propiedades de la mezcla resultante debido al efecto de las condiciones de fabricación de las mismas. Es por ello que el objetivo de esta tesis doctoral es evaluar el efecto de las condiciones de fabricación en las propiedades de una mezcla bituminosa reciclada con diferentes porcentajes de RAP, variando la temperatura de los áridos de aportación y la del RAP, así como también variando el tiempo de mezclado. Para las mezclas recicladas con el mayor contenido de RAP se evaluará también el efecto del agente rejuvenecedor.

Se pretende reproducir en laboratorio las condiciones reales de fabricación en planta. Se estudiará el efecto de las condiciones de fabricación mediante el análisis de las propiedades volumétricas y mecánicas.

El estudio de estas propiedades se llevará a cabo por medio de los siguientes parámetros:

- La evaluación de las características volumétricas mediante la determinación del contenido de huecos.
- El estudio de las propiedades mecánicas mediante la resistencia a tracción indirecta y el módulo de rigidez.
- El análisis de la sensibilidad al agua (utilización de ensayos a tracción indirecta por vía seca y húmeda).
- La evaluación de la resistencia a la fisuración a través del ensayo Fénix.

También se realizará un estudio de la influencia del mástico del RAP en las propiedades mecánicas de las mezclas recicladas a través del método UCL, desarrollado en esta universidad.

A partir de los resultados obtenidos y su posterior análisis en conjunto se elaborará una propuesta de criterios y recomendaciones para el diseño, producción y control de calidad de mezclas bituminosas recicladas. De esta manera se aportará un conocimiento más profundo sobre las variables que influyen en el proceso de fabricación de una mezcla reciclada. Esto permitirá analizar la influencia de cada uno de estos parámetros, así como de su efecto combinado en el desempeño de la mezcla reciclada.

2. Estado del arte

2.1 Introducción

Históricamente, las rehabilitaciones estructurales se llevan a cabo mediante un refuerzo o recrecimiento del firme. Es una técnica que consiste en extender sobre el firme antiguo una o varias capas de materiales nuevos con espesor suficiente para producir un aumento significativo de la capacidad estructural.

En ocasiones, el recrecimiento presenta el inconveniente de que los deterioros de las capas antiguas son de tal magnitud que acaban reflejándose en superficie en poco tiempo, salvo que se recurra a espesores muy importantes de refuerzo. Por esa razón puede resultar conveniente fresar una o varias capas del firme, para a continuación reponer el espesor eliminado, antes de proceder a un recrecimiento que lógicamente será de menor espesor que si no se hubiera fresado.

Al reciclar las capas bituminosas se aprovecha el ligante que contienen y se logra disminuir el consumo de betún. Se reducen también los volúmenes de vertido, que en algunos países es una práctica casi imposible, debido a la falta de espacio y a las fuertes regulaciones relacionadas con el medioambiente. Estas ventajas han hecho que el reciclado se haya convertido en una alternativa de gran interés, cada vez más utilizada en conservación y rehabilitación de firmes de carreteras. (Gambatese, 2005; Damp, 2007; Cross, 2011).

El empleo de reciclado (RAP) en la fabricación de mezclas bituminosas es una solución muy sostenible que presenta beneficios desde el punto de vista ambiental y económico. A continuación, se presentará con detalle investigaciones donde se demuestran estos beneficios.

Beneficios ambientales

La mayoría de los estudios del ciclo de vida indican claramente que el uso de mezclas recicladas con alto contenido de RAP reduce las emisiones y el uso de energía (Lee et al., 2012; Aurangzeb et al., 2014).

Para las mezclas en caliente, los dos principales procesos que son responsables de las emisiones de gases de efecto invernadero y el uso excesivo de energía son la producción de ligantes y la producción de mezclas en planta (Chappat y Bilal, 2003; Huang et al., 2009). El uso del RAP reduce el consumo de betún y, por lo tanto, disminuye proporcionalmente el efecto nocivo ambiental. Por ejemplo, Vidal et al. (2013) demostraron que incluso aplicando una tasa del RAP relativamente baja del 15%, los beneficios ambientales del reciclado son mayores que los logrados mediante la aplicación de tecnologías como las mezclas semicalientes (del inglés Warm Mix Asphalt), lo que resulta en una disminución de la temperatura de 30-35 °C, en comparación con una mezcla caliente (del inglés Hot Mix Asphalt).

Un panorama donde se use el 100% RAP es necesario para cubrir los efectos ambientales durante todo el ciclo de vida de una carretera, incluida la producción de materiales constituyentes, fase de producción de la mezcla, construcción, mantenimiento y soluciones al final de la vida útil. La durabilidad del pavimento es la mayor incógnita en tales estimaciones y puede tener un gran impacto en las conclusiones de los efectos del ciclo de vida en comparación con el pavimento convencional (Aurangzeb et al., 2014).

Waymen et al. (2012) sugieren que la reducción de la vida del pavimento de 20 a 14 años aumentaría el potencial de calentamiento global en un 13%. Lee et al. (2012) concluyeron que la aplicación del 30% de RAP en una mezcla reciclada requiere solo 84% de energía y emite solo el 80% de CO₂ en comparación con la producción de una mezcla con materiales vírgenes.

Waymen et al., (2012) y la experiencia práctica reportada por los productores de mezcla reciclada con 100% de RAP (Ammann, 2013), afirmaron que el uso de energía es independiente al contenido de RAP en las operaciones de producción y pavimentación de las mezclas recicladas. Las empresas que desarrollan nuevas tecnologías sobre la producción del RAP, también afirman que las emisiones son similares a las plantas asfálticas tradicionales (RAP Technologies, 2013; RAP Process, Machinery, 2013; Volker Wessels, 2013).

Los resultados del cálculo en la figura 2.1 demuestran que al producir una mezcla bituminosa a partir de material 100% recuperado, se pueden ahorrar hasta 18 kg de CO₂ equivalente y 20% de energía por tonelada de mezcla pavimentada.

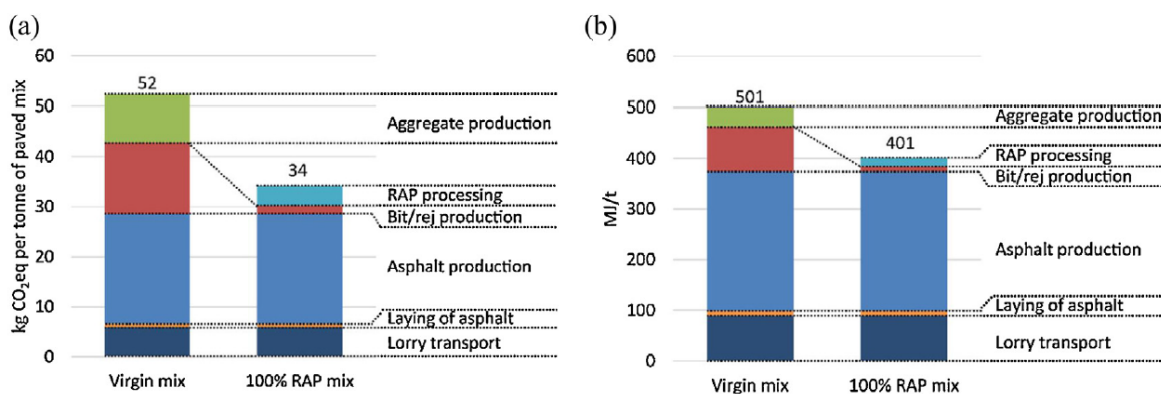


Fig.2.1 Emisiones(kg CO₂) y energía (MJ) generadas por tonelada de producción (Zaumanis et al., 2014).

Beneficios económicos

West et al (2013) en su informe 752 del NCHRP, realizaron un cálculo con el objetivo de analizar los costos relacionados con los materiales de producción de mezclas recicladas con un alto contenido de RAP. Los costos que se usaron para el cálculo se ilustran en la tabla 2.1. Estos gastos pueden variar dependiendo de la tecnología en uso y la ubicación del contratista. Por ejemplo, las grandes áreas metropolitanas a menudo tienen un excedente de RAP proveniente de las calles de la ciudad y los contratistas a menudo pagarán por su acopio, por lo tanto, se incluye

el concepto de "transporte y vertido de RAP". Por otro lado, las áreas rurales pueden tener escasez de RAP y los productores de mezclas bituminosas deberán comprarlo. Las pruebas de laboratorio para evaluar las propiedades del RAP representan otro gasto adicional. West et al., (2013), argumentaron que el contenido de betún y la granulometría del RAP deben comprobarse cada 900 toneladas y el peso específico cada 2700 toneladas. Se propuso que la frecuencia del ensayo relacionado con el desempeño de la mezcla era igual a la clasificación del desempeño del RAP (una vez cada 4500 t). Los gastos en pruebas de laboratorio (incluidas las roderas y el agrietamiento a baja temperatura) considerando las frecuencias establecidas fueron de 1.48 USD por tonelada de mezcla. Los gastos operacionales que probablemente se mantendrán constantes (por ejemplo, salarios de personal, renta) no se incluyeron en el cálculo. Los costos relacionados con los materiales deben justificarse con un diseño de mezcla para realizar un cálculo del ahorro por unidad de mezcla producida. Para los cálculos se utilizó un contenido de árido del 94.3% y un contenido de ligante del 5.7% (ligante del RAP 5.1% + agente rejuvenecedor 0.6%). La figura 2.2 resume los resultados del cálculo de los costos relacionados con el material por tonelada de mezcla producida que varían de 0% a 100% el contenido de RAP. Dependiendo de la situación del mercado con disponibilidad de RAP, los costos por tonelada de una mezcla con 100% de RAP se reducirían entre un 50 y 70% en comparación con la mezcla de referencia.

Tabla 2.1. Costo relacionado con los materiales (West et al., 2013)

Concepto de gasto	Costo (Dólares USD)
Árido	\$19.80/t
Betún	\$704.00/t
Agente rejuvenecedor	\$1.30/l
Compra de RAP	\$11.00/t
Transporte y vertido del RAP	\$5.50/t
Procesamiento del RAP	\$3.30/t
Combustible	\$3.47/t
Control de polución	\$2.75/t @100%RAP

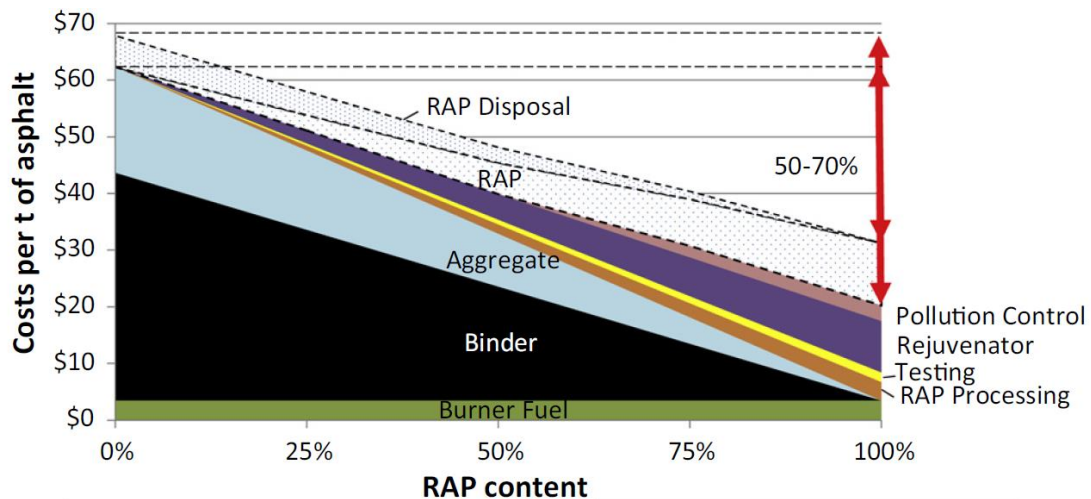


Fig.2.2 Costos relacionados con los materiales del reciclado de mezclas en caliente (West et al., 2013).

Estos resultados de cálculo son consistentes con las estimaciones de productores de mezclas recicladas con RAP al 100%:

- La empresa Ammann demuestra más del 40% de ahorro en los gastos relacionados con el material para la producción de mezcla RAP al 100% en comparación con la mezcla RAP al 0% (Ammann, 2013).
- I. Otero, un representante de "BAB Belag", que posee la planta Ammann 100% RAP en Suiza, indica un ahorro de aproximadamente USD 11 por tonelada por cada 10% de aumento en el contenido RAP.
- El Sistema Smart PAVE (RAP Process Machinery, 2013) reporta un ahorro de por lo menos un 30% de los costos relacionados con la producción en comparación con mezcla bituminosa en caliente producida principalmente con áridos vírgenes.

2.2. El reciclado de pavimentos asfálticos

El reciclado de pavimentos asfálticos es una técnica de conservación de carreteras que consiste en la reutilización de los materiales procedentes de los firmes que han estado en servicio: materiales deteriorados que han perdido en gran parte sus

propiedades iniciales o materiales aún en condiciones de servir cuyas características se desea mejorar. (PG-4, 2001). Es una técnica relativamente antigua que en los últimos años ha experimentado un fuerte impulso. El reciclado de los pavimentos asfálticos presenta una respuesta adecuada al reto que representa la creciente escasez de áridos y la dificultad cada vez mayor de enviar a un vertedero los residuos que se pueden reutilizar (Ruiz Rubio, 2000).

Desde el punto de vista constructivo, el proceso de reciclado de pavimentos asfálticos consiste en la disgregación del material, su mezcla con ligantes y/o agua, y su posterior extensión y compactación. El tratamiento de los materiales reciclados puede hacerse en el mismo firme del que proceden ("in situ"), o transportarse a una central de fabricación para, después de su tratamiento, emplearse en el mismo tramo de carretera o en diferente localización (CEDEX, 2015).

Pueden establecerse varias clasificaciones del reciclado de materiales de firmes de carreteras con pavimento asfáltico: según el lugar en que se lleve a cabo el reciclado (in situ o en planta), según la temperatura a la que se realice (en caliente, semicalientes, templadas o en frío), según el material que se recicle (materiales bituminosos, materiales tratados con cemento, capas granulares), según el ligante empleado (sin ligante; con ligante bituminoso: betún o emulsión; con conglomerante hidráulico: cemento o cal; mixto: generalmente, emulsión y cal o cemento), y según se recicle con o sin adición de materiales nuevos (Karlsson, et al. 2007).

Según la European Asphalt Pavement Association (EAPA) dentro de la cual se encuentra la Asociación Española de Fabricantes de Mezclas Asfálticas (ASEFMA), recoge cada año las estadísticas correspondientes al reciclado de pavimentos en España y estas reportan el uso tanto con bajas como con altas tasas de material fresado de capas asfálticas (incluso superiores al 50%), aunque lo más habitual es incorporar porcentajes entre el 10% y el 30%. Además, en estas estadísticas de la EAPA se asevera que los tipos de técnica que más se ponen en práctica son el

reciclado en caliente, semicaliente y en frío por lo que en los próximos capítulos de esta tesis se describirán con detalle.

2.2.1 Reciclado en frío

La creciente sensibilización social acerca de la necesidad de preservar el medio ambiente ha hecho que la legislación sea hoy mucho más proteccionista que en el pasado. Se suma a esto que las canteras de provisión de áridos han bajado su potencia, lo cual dificulta la obtención de materias primas adecuadas, aumentando su costo y el de su transporte hasta la obra, ya que casi siempre se producen en lugares distantes a éstas. De igual manera, hay mucha dificultad para encontrar un vertedero para los materiales fresados o retirados del pavimento.

En términos generales, un reciclado en frío tiene las ventajas de ahorrar energía y no degradar los ligantes asfálticos durante el proceso de fabricación (al no tener que calentarlos); además, son procedimientos de bajo costo comparados con los reciclados en caliente. En ese sentido, el reciclado en frío es un procedimiento capaz de hacer frente a los problemas de costos y cierres traumáticos de las vías en rehabilitación (Nosetti, 2009).

Desde el punto de vista medioambiental, existen varios estudios donde se destacan los resultados del ahorro del uso de áridos y en una menor emisión de gases contaminantes. Alkins et al, (2008) estudiaron que esta técnica permite consumir un 62% menos de áridos que las técnicas convencionales de rehabilitación y reduce en un 52% las emisiones de CO₂, en un 54% las de NO_x y en un 61% las de SO₂. Además, desde el punto de vista económico de estos beneficios, según su estudio esta técnica cuesta un 42% menos que las tradicionales, en términos de coste inicial y el comportamiento a largo plazo es similar en ambos casos, aunque se puntualiza que la vida de servicio es algo inferior en el caso del reciclado en frío (15 años en frío frente a 18 años con la técnica tradicional) de la regularidad inicial es menor que cuando se usan las técnicas tradicionales (figura 2.3).

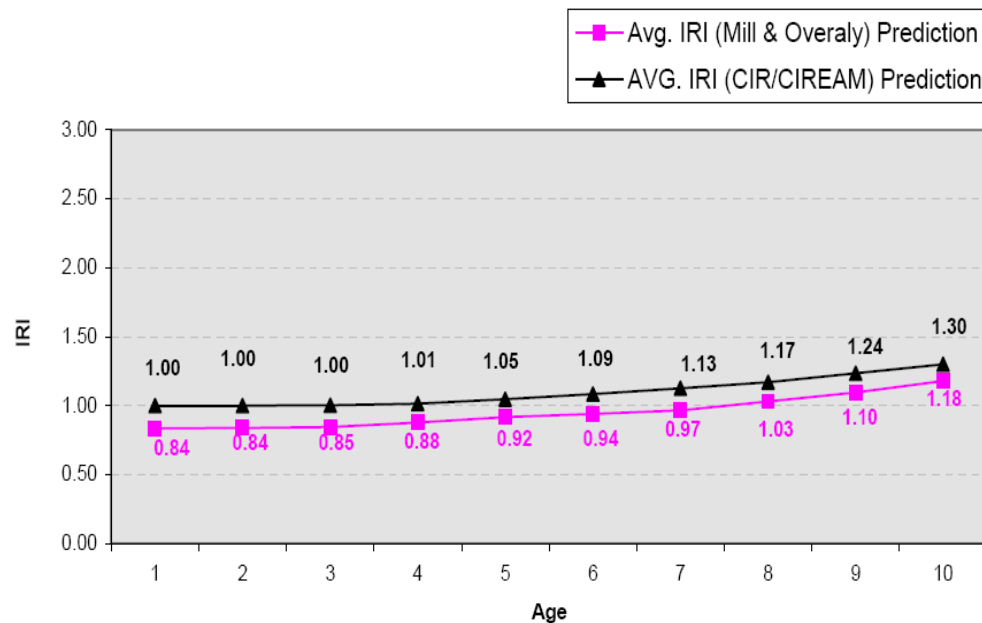


Fig.2.3. Evolución del IRI para la técnica tradicional (rosa) y el reciclado en frío (negro)
(Fuente: Alkins et al, 2008).

Reciclado en planta en frío

Si bien es cierto que es una técnica menos frecuente que el reciclado en frío “in situ”, puede resultar la más apropiada en determinadas circunstancias. Dependiendo de las necesidades o condiciones técnicas, se pueden emplear en la nueva mezcla ligantes tipo emulsión bituminosa, espuma de betún o cemento. No obstante, aunque la mayor parte de las plantas de mezclado existentes en el mercado admiten cualquier tipo de ligante, la emulsión bituminosa es la más empleada en estos casos. Normalmente este tipo de mezclas recicladas se usan en capas de base, pero también pueden ser utilizadas en capas intermedias o de rodadura en carreteras secundarias (PG-4, 2001).

La técnica del reciclado en planta en frío consiste en fabricar una mezcla bituminosa a partir del material fresado de un firme (RAP) trasladado a una planta de fabricación continua y utilizando como ligante emulsión o espuma de betún, con eventual adición de cal o cemento y áridos correctores de granulometría. Se obtiene

un producto similar a la grava emulsión. Esta forma de reciclado está muy cerca de la técnica in situ en lo que a condiciones de materiales se refiere, formulación de la mezcla, condiciones de utilización y puesta en obra. La diferencia esencial está ligada al acopio intermedio que sufren los materiales fresados y al lugar donde se elabora la mezcla. En la figura 2.4 se observa una planta de reciclado en frío.



Fig.2.4. Planta de reciclado en frío (Wirtgen Group Technologies, 2010).

Como ventajas en comparación con los reciclados in situ, (Wirtgen Group Technologies, 2010), el reciclado en planta se destaca por:

- Un mayor control de los materiales para la fabricación de la mezcla. El RAP puede tratarse mediante machaqueo y sustitución de áridos en caso de existir material con características no deseables.
- Calidad de la mezcla. Se pueden realizar ajustes en la planta para variar tiempos de mezclado, mejorando la calidad de la mezcla.
- La mezcla resultante se puede almacenar y utilizar cuando sea requerida, considerando siempre los tiempos de almacenaje, especialmente cuando la mezcla incluya cemento en su composición.

Reciclado in situ en frío con emulsión

El reciclado in situ en frío con emulsión bituminosa es una técnica cuyo objetivo fundamental es la transformación de un firme degradado en una estructura homogénea y adaptada al tráfico que va a soportar. Se realiza con equipos específicos multifunción que fresan el material, lo mezclan con agua y emulsión y lo extienden, realizándose todo este proceso a temperatura ambiente. Se aprovecha el 100% del material, por lo que presenta numerosas ventajas al disminuir transportes de material a la planta para su tratamiento y posterior transporte del material nuevo reciclado a su lugar de origen. Al ser una técnica en frío, supone un ahorro energético ya que no precisa de calentamiento de materiales.

Las mezclas recicladas in situ con emulsión bituminosa presentan características muy apropiadas para ser utilizadas en capas de base, aunque sus características difieren de las mezclas bituminosas en caliente convencionales, ya que su módulo es más bajo que el de éstas, pero su rotura es más dúctil, permitiendo el movimiento de las fisuras existentes bajo el firme y su consiguiente absorción. Aunque se puede conseguir una buena cohesión de la mezcla utilizando la emulsión apropiada, la cohesión final depende de la densidad conseguida durante la compactación. Es decir, cuanto mayor sea ésta, mayor resulta ser el módulo de la mezcla y su cohesión; si bien no es fácil porque se trata de mezclas difíciles de compactar (Nosetti A., 2009).

Las ventajas de la técnica de reciclado de firmes in situ en frío con emulsión bituminosa han sido señaladas por otros autores (Sebaaly et al., 2004). Se pueden destacar como ventajas de esta técnica:

- Minimiza el impacto ambiental en la zona de influencia de la obra. Se reutilizan los materiales existentes del firme antiguo, sin necesidad de explotar nuevos yacimientos, ni de realizar nuevos vertidos.

- Reducción del nivel de ruido. Al reutilizar los materiales existentes en la carretera y suprimir la necesidad de aportar mezclas nuevas, se produce una reducción de transporte considerable, con la consiguiente reducción de ruido en la zona de influencia de la obra.
- Reducción de las emisiones de gases contaminantes a la atmósfera. La reducción de los transportes en obra y la eliminación del calentamiento de materiales, se traduce en una importante disminución de la emisión de gases contaminantes.
- Reducción de la perturbación al tráfico durante la construcción. Con una sola máquina, y en una sola pasada, se ejecuta el fresado del firme deteriorado, la mezcla con el ligante, y el extendido de la mezcla final. De esta forma se reducen las molestias y daños causados al arcén de la vía, por el peso y tránsito de la maquinaria de obra.

Además de estas ventajas, algunos estudios (Morian et al., 2005; Bemanian et al., 2006) han analizado los costos de distintas técnicas de conservación de carreteras y han puesto de manifiesto ventajas económicas que presentan los reciclados in situ en frío: No se necesitan áridos de aportación por lo que no existe su respectivo costo de su extracción, trituración y clasificación; no es necesario instalar una central de fabricación, ni realizar el transporte (gasóleo, aceites, desgaste de vehículos); se reduce el tiempo de construcción y el de afección al tráfico. En la figura 2.5 se muestra el funcionamiento de un equipo para llevar a cabo el reciclado de frío con emulsión.



Fig. 2.5 Equipo para llevar a cabo el reciclado de frío con emulsión (CEPSA, 2008).

En España el diseño de este tipo de mezcla reciclada se lleva a cabo de acuerdo en el artículo 20 referente a “Reciclado in situ con emulsión en capas bituminosas” que se encuentra en el Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Conservación de Carreteras (PG-4).

Inconvenientes de las mezclas recicladas en frío

A pesar de todas las ventajas descritas anteriormente existen también ciertas desventajas, por ejemplo: no existe en el diseño de mezclas recicladas en frío una metodología que pueda hacer comparativos los resultados de distintos países e incluso de distintas regiones de un mismo país. Existe cierta coincidencia en el estudio previo de los materiales, pero en lo que respecta a la compactación de las probetas en laboratorio y a la evaluación de las propiedades de las mezclas, la variedad de métodos de evaluación y diseño es importante. No ocurre lo mismo en el caso de las mezclas en caliente, pues si bien existen distintos métodos de diseño, el método Marshall ha tenido una preeminencia sobre el resto. Ello permitió que las investigaciones, los resultados y las experiencias puedan compartirse y compararse entre ellos, sacar conclusiones y producir avances en el área.

Los métodos de diseño de reciclado en frío son variados: algunos de ellos producen en laboratorio una subcompactación y otros una sobrecompactación. Este “desajuste” podría compensarse con la mayor o menor exigencia en el resto de los

parámetros de diseño, pero sin tener en cuenta que los resultados podrían ser poco representativos de los resultados obtenidos tras la puesta en servicio de la mezcla. Sería ideal conseguir que la densificación de las mezclas en laboratorio sea representativa de la conseguida en obra, y de esta manera, contar con parámetros volumétricos y mecánicos más realistas en la etapa de diseño (Martínez et al., 2007).

La falta de una normativa estándar de diseño de mezclas recicladas en frío, unida al hecho de que muchas administraciones son conocedoras del ahorro económico que supone esta técnica, ha hecho que éstas hayan definido su propia metodología de diseño o sus propias recomendaciones para poder fabricar y utilizar este tipo de mezclas con ciertas garantías. Según datos del Instituto Mexicano de Transporte (2014), en el caso de México, aún no existe un método de diseño normalizado para el reciclado en frío con ligante bituminoso, por lo que se tiene que hacer esfuerzos para tratar de adoptar un método de diseño creado para las condiciones de tráfico y clima existentes.

2.2.2 Reciclado en caliente en planta

Se trata de la técnica más común en Europa. En la mayoría de los países, estas mezclas bituminosas recicladas son técnicamente equivalentes a las convencionales, pudiéndose aplicar en todo tipo de capas y categorías de tráfico. En general, las mezclas que contienen RAP deben cumplir los mismos requerimientos que si las mezclas no los incluyeran. La cantidad de material reciclado en la mezcla depende tanto del diseño como de la producción de la mezcla.

El proceso de reciclado de pavimentos asfálticos en planta en caliente consiste básicamente, en retirar las capas bituminosas de los firmes envejecidos mediante el fresado o demolición, para transportar dicho material a una central de fabricación en la que es acopiado, caracterizado y eventualmente procesado, hasta cumplir con ciertas condiciones de tamaño, humedad etc. A continuación, es mezclado en

caliente con áridos vírgenes, betún nuevo y/o agente rejuvenecedor, para obtener una mezcla bituminosa compuesta en parte por material reciclado, que es colocada y compactada en obra como si se tratara de una mezcla convencional (Proyecto DIREC-MAT, 2011).

Los reciclados en planta en caliente se pueden fabricar en plantas de mezclas asfálticas convencionales adaptadas (Decker, 1997). En función del ajuste e intervención que se realice en la planta se pueden introducir porcentajes de RAP que varían desde un 10% en los casos más básicos hasta un 80% cuando se utilizan técnicas más sofisticadas para modificar las plantas y se realiza una mayor inversión. En estos casos, con altas tasas de reciclado, algunos autores han analizado el comportamiento de estas mezclas obteniendo buenos resultados con porcentajes de RAP de hasta 60% (Valdés et al., 2011; Celauro et al., 2010). Incluso existen diferentes estudios donde distintos investigadores afirman que aún el 100% del uso de RAP es posible con resultados satisfactorios. (Lo Presti et al. 2016; Zaumanis et al. 2014).

2.2.2.1 Tipos de plantas de mezclas recicladas en caliente

De acuerdo con la empresa estadounidense fabricante de plantas de asfalto ASTEC (1998), las plantas discontinuas y las plantas continuas de tambor-secador-mezclador, son las indicadas para preparar mezclas de alta calidad utilizando RAP siempre y cuando se tomen ciertas precauciones para evitar problemas relacionados con el uso del RAP.

Existen varios tipos de plantas, pero para fines de esta investigación nos enfocaremos en las más usadas hoy en día. A continuación, se describen brevemente y de forma general los principales tipos de plantas:

1) *Planta discontinua sin tambor secador independiente en la cual el RAP se agrega a temperatura ambiente.*

El RAP es añadido directamente en la unidad de pesado junto con los áridos vírgenes sobrecalentados (que podrían alcanzar hasta los 275°C), en lugar de ser calentado también en el secador (Figura 2.6). Debido al contenido de humedad del RAP, se forma una gran cantidad de vapor que debe ser evacuado por el sistema de extracción de polvo y la chimenea central. En estos casos, la temperatura máxima se limita con el fin de impedir que se dañe alguna parte de la central. Normalmente, mediante el uso de este tipo de central, se pueden llegar a incorporar en las mezclas recicladas un porcentaje de un 15% o como máximo 20% de RAP, según el contenido de humedad (Proyecto DIRECT-MAT 2011).

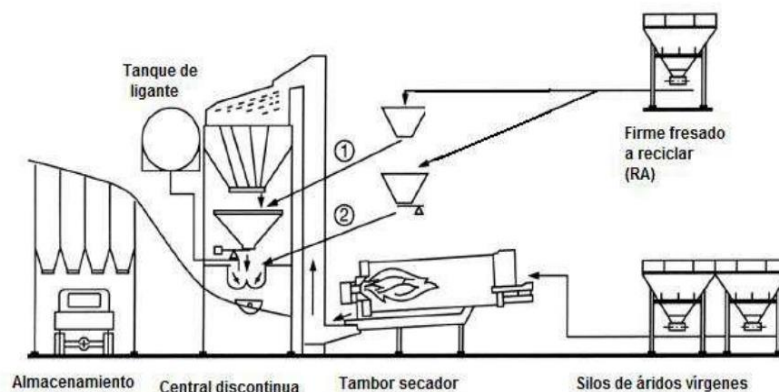


Fig.2.6 Central discontinua sin calentamiento RAP (Comité Technique AIPCR C7/8 – "Recyclage Des Chaussées, 2007).

2) *Planta discontinua sin tambor secador independiente en la cual el RAP se precalienta simultáneamente.*

El RAP se calienta de forma simultánea con el árido nuevo en un solo tambor secador, provisto de un sistema especial para las adiciones. El RAP es añadido, bien a la mitad del tambor secador, o bien en el extremo donde se encuentra la llama calorífica (flujo inverso). Si el RAP se introduce en el extremo de la llama, el material se mezcla con el árido virgen cerca del final del secador, de manera que el tiempo para el calentamiento es bastante

breve. Aplicando el sistema de flujo inverso es posible introducir en las mezclas recicladas niveles del 40% de áridos fresados reutilizados (figura 2.7).

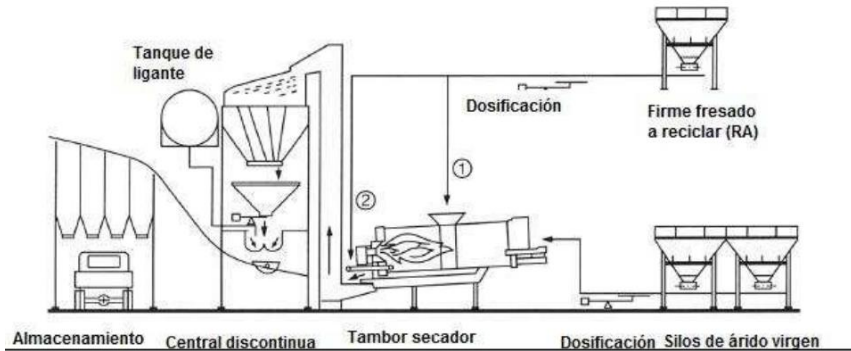


Fig.2.7. Central discontinua con calentamiento simultáneo de RAP (Comité Technique AIPCR C7/8 – "Recyclage Des Chaussées", 2007).

3) Centrales discontinuas con tambor secador independiente o doble tambor

El tambor secador adicional tiene su propio dispositivo para secar el material fresado y calentarlo hasta los 130°C. Así el material fresado (RAP), una vez calentado, se transporta hasta la amasadora donde se adiciona el árido virgen ligeramente sobrecalentado, de forma que la temperatura final sea de unos 160°C. (figura 2.8) Añadiendo el RAP seco y precalentado, la cantidad máxima a incorporar a la mezcla puede ser de entre un 50% a un 80% (según diferentes experiencias), siempre y cuando se pueda garantizar que el material fresado es de buena calidad (Proyecto DIRECT-MAT, 2011).

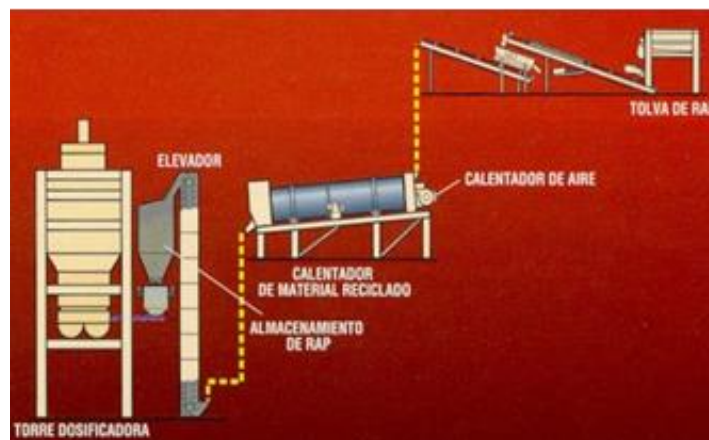


Fig. 2.8 Planta discontinua con doble tambor secador para precalentamiento del RAP (ASTECC, 1998).

Actualmente esta planta de doble tambor es utilizada principalmente en Europa, y aunque comparativamente con los sistemas anteriores es un sistema muy caro, tiene la ventaja de que se pueden utilizar mayores proporciones de RAP que las otras plantas discontinuas (figura 2.9).



Fig. 2.9 Planta discontinua con doble tambor secador para calentamiento del RAP, (Fuente: www.pabasa.com, 2004).

4) Plantas continuas de tambor secador-mezclador

De acuerdo con ASTEC (2002), existen básicamente cinco tipos de plantas de tambor secador-mezclador, capaces de manipular RAP, aunque cada fabricante diferente presenta variaciones de cada uno de estos tipos.

Nos enfocaremos a hablar de la planta que tiene mayores ventajas con respecto a las demás y esta es conocida como planta con doble tambor o *Double Barrel*: En general, el RAP se añade en el centro del tambor, lejos de la influencia de la llama del secador, para impedir que se queme el betún que lleva incorporado (Figura 2.10). En este tipo de centrales, la cantidad máxima de árido fresado a utilizar en la mezcla es del 50%, sin contaminar la atmósfera con emisiones dañinas (ASTEC 2002).

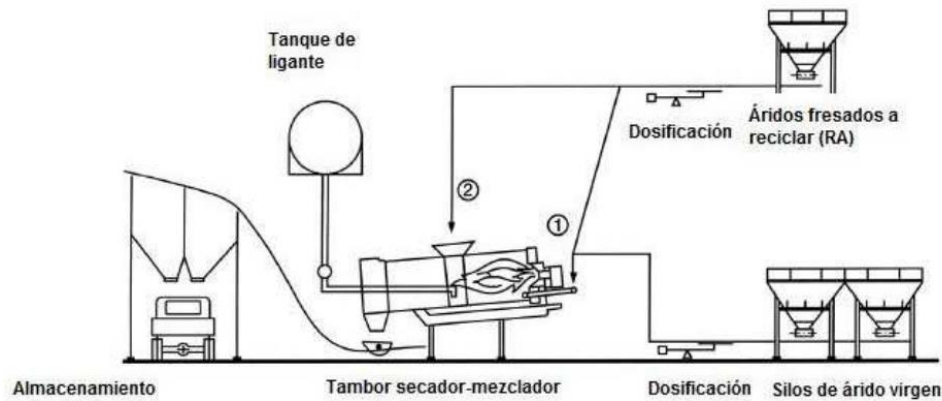


Fig. 2.10. Central continua con tambor secador-mezclador (Comité Technique AIPCR C7/8 – "Recyclage Des Chaussées", 2007).

Este mezclador de gran tamaño da tiempo suficiente para que se funda completamente el RAP después de haberse mezclado con el material virgen sobrecalentado. El tiempo de mezcla es lo suficientemente prolongado como para obtener una mezcla muy homogénea antes de que se inyecte el ligante nuevo en la mezcla, y hay tiempo suficiente para que los materiales combinados se enfríen a la temperatura normal de mezcla, después de haber añadido el RAP.



Fig.2.11. Planta continua con tambor secador-mezclador Double Barrel (Fuente: ASTEC www.astecinc.com, 2002).

5) Plantas adaptadas para procesar el 100% de RAP

En la actualidad existen plantas asfálticas adaptadas donde es posible procesar el 100 % de RAP para fabricar mezclas asfálticas recicladas en caliente. Existe una gran cantidad de este tipo de plantas alrededor del mundo, pero se describirán 2 de las más conocidas a continuación:

ALL-RAP

El proceso All-RAP Plant de la empresa estadounidense RAP Technologies (2013), usa componentes convencionales de una planta de asfalto para mezcla en caliente y cuenta con un sistema avanzado de filtración para humos azules (Fig. 2.12). Hay poca necesidad de recolección de polvo porque este queda atrapado por el betún del RAP. En cambio, el humo azul generado por el contacto directo del RAP con la llama, debe eliminarse antes de liberar los gases de combustión a la atmósfera. RAP Technologies emplea un sistema de filtración de etapas múltiples (Fig.2.12 a) para cumplir con las normas locales de calidad del aire.

Las tolvas de alimentación en frío separan el RAP por fracciones finas y gruesas, después se miden volumétricamente cada una de estas fracciones en transportadores que entregan el RAP dividido al tambor de calentamiento. Debido a las diferencias en la proporción de masa térmica y área de superficie, las fracciones RAP finas requieren menos tiempo para alcanzar la temperatura final de mezcla que las fracciones gruesas. Por lo tanto, la parte gruesa del RAP se introduce en el tambor al principio, mientras que la fracción fina del RAP se introduce en el punto medio de la secadora. La temperatura de descarga de la mezcla es de alrededor de 150°C.

El tipo y la dosis del agente rejuvenecedor se eligen en función de resultados de la prueba de penetración en el betún. Los aditivos (rejuvenecedores) se rocían en el RAP caliente en el canal de descarga de la secadora como se muestra en la figura 2.12b. Mecánicamente se mezcla con el betún del RAP durante el transporte

mediante una cinta transportadora. La difusión continúa durante el acopio, el transporte y extendido de la mezcla bituminosa reciclada.

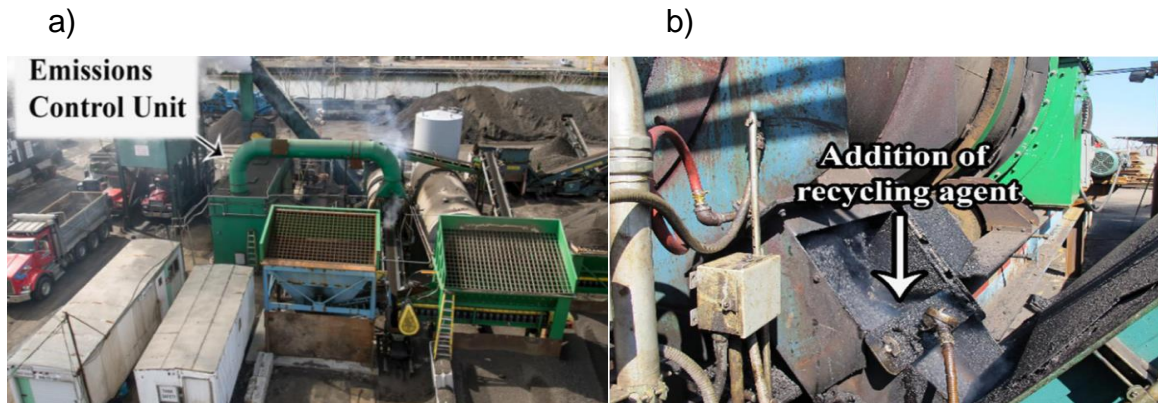


Fig. 2.12. Planta de asfalto con capacidad de procesar 100% de RAP ubicada en la ciudad de Nueva York, Estados Unidos (Fuente: Zaumanis et al., 2014).

Ammann RAH 100 plant

El sistema de calentamiento indirecto "RAH 100" se combina con la planta Ammann "Uniglobe 200" ubicada en Birmensdorf, Suiza. La planta tiene tres contenedores de acopio en frío para almacenar diferentes fracciones de RAP. Los contenedores están ubicados bajo tierra, por lo que RAP no está expuesto a la intemperie. El material se dosifica y se traslada mediante una cinta transportadora a los elevadores de cangilones que entregan el RAP frío para que se caliente en el tambor.

El tambor se instala en la parte superior de la torre para garantizar el manejo del RAP caliente por medio de la gravedad, como se ilustra en la figura 2.13 a. Se usa un secador de contra flujo con un tambor de dos fases. El material se calienta y se seca cuando el tambor gira, mientras que la cámara de combustión se queda estática como se muestra en la figura 2.13b. El RAP se calienta con aire caliente y se descarga antes de entrar en contacto con la llama reduciendo así las emisiones y limitando el envejecimiento del betún del RAP. La temperatura de descarga de la mezcla reciclada oscila entre 165°C y 180°C. El sistema de recirculación de aire mejora la eficiencia de secado en comparación con los sistemas convencionales en

un 10%, asegura un bajo contenido de oxígeno para reducir aún más el envejecimiento y reduce las emisiones (Ammann, 2011). Después de la descarga, la gravedad se encarga de transportar el material al silo de acopio en caliente que tiene una capacidad de 28 toneladas. Más adelante el RAP es depositado en la tolva del peso de capacidad 3 toneladas. El rejuvenecedor y el betún virgen (si es necesario) se agrega a la mezcladora para que sea mezclado con el RAP durante 30-40 segundos.

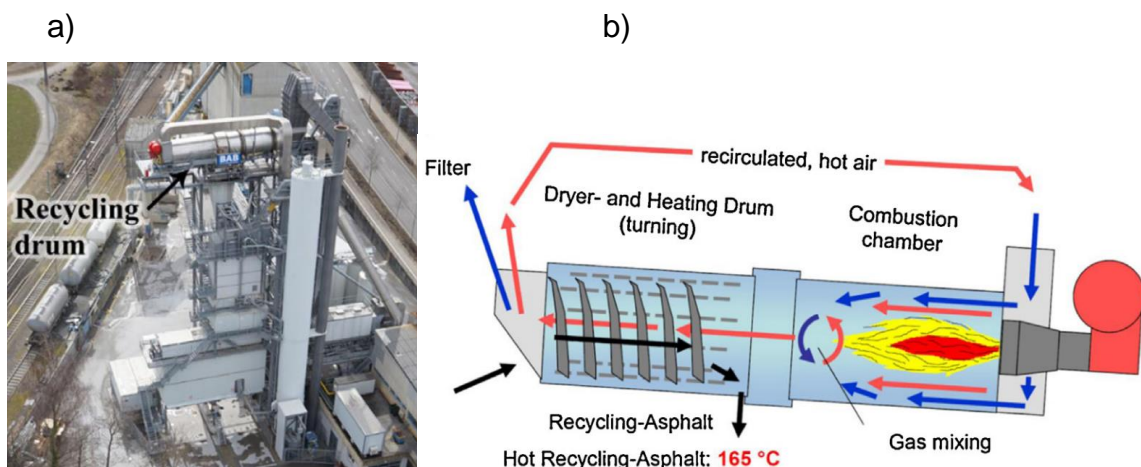


Fig. 2.13 Planta de asfalto para mezclas recicladas con 100% de RAP “BAB Belag AG RAH 100” (a) y sección transversal del tambor de calentamiento (b) (Fuente: Ammann Industries, 2011).

2.2.3 Problemática general que se tiene en la elaboración y puesta en obra de una mezcla bituminosa reciclada

Para asegurar una buena consecución de las condiciones de elaboración de una mezcla reciclada, es conveniente vigilar la ejecución del proceso de fabricación y puesta en obra de éste tipo de mezclas. En términos generales, las principales dificultades que se tienen al momento de la elaborar una mezcla asfáltica reciclada son (Sebaaly et al., 2004):

- No todos los materiales son susceptibles de ser reciclados de forma efectiva y económica. Cualquier operación de reciclado, al igual que cualquier otra

técnica de conservación, requiere un estudio previo de las características de los materiales.

- No es recomendable reciclar pavimentos que contengan geotextiles anti fisuras, cuando éstos se encuentren dentro del espesor del material a reciclar, porque su disgregación es complicada, y aparecerán trozos de geotextil en la superficie que se desprenderán muy fácilmente y el aspecto de la mezcla será deficiente y poco funcional.
- En el caso de los reciclados en frio, la puesta en obra depende de la climatología. No es recomendable ejecutar obras de reciclado con emulsión en los meses de invierno, con bajas temperaturas, ni en los periodos lluviosos.
- Además, hay que prestar especial atención a la compactación, pues el material fresado y tratado con una emulsión es de muy difícil compactación por su elevada angulosidad y áspera textura.

Como se puede apreciar a la hora de decidir sobre la fabricación de una mezcla bituminosa reciclada es importante tener en cuenta una serie de factores económicos, ambientales y climáticos además de estudiar en cada caso en particular las propiedades de los materiales para cada obra en específico.

Caso particular de la elaboración de mezclas bituminosas recicladas en caliente

La problemática más importante que se presenta a nivel de planta es que muchas veces no se tiene el suficiente cuidado en la temperatura a la que se calienta el RAP, por lo que la excesiva temperatura causa humos azules perjudiciales al medio ambiente y sobre todo produce un envejecimiento todavía más al betún contenido en el RAP (Kandhal y Mallick 1997, Hansen y Newcomb 2011). El envejecimiento del betún asfáltico es un proceso irreversible de alteración físico-química del ligante, que tiene lugar, principalmente durante la fabricación de la mezcla (pérdida de

volátiles y oxidación química) (fig. 2.14). Todos ellos producen cambios en el betún, provocando un incremento de su viscosidad y una pérdida de cohesión, aumentando la fragilidad a la mezcla y consecuentemente, su tendencia a la fisuración (Glover, et al., 2005).

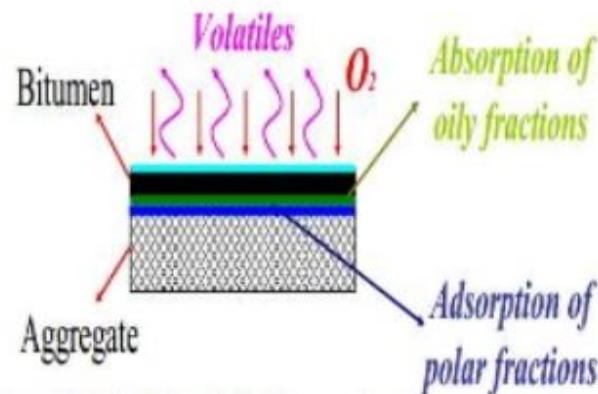


Fig. 2.14 El proceso irreversible de envejecimiento del betún (Hansen and Newcomb, 2011).

Para el transporte, la puesta en obra y compactación de las mezclas recicladas en caliente en planta, se utilizan los mismos procedimientos y equipos que se emplean cuando se trata de mezclas convencionales. La única diferencia que se ha señalado en alguna ocasión, es que, para porcentajes muy elevados de RAP, las mezclas recicladas pueden ser menos trabajables que las convencionales (Artamendi et al., 2009, Mogawer et al., 2012). El uso de betunes más blandos (Mogawer et al., 2012) rejuvenecedores (Zaumanis, 2014) y aditivos (Tao y Mallick, 2009) ha demostrado ser efectivo para mejorar el aspecto de la trabajabilidad de las mezclas asfálticas recicladas. Otro factor que puede ser importante es la posible heterogeneidad de estas mezclas recicladas, por lo que es importante extremar los controles durante todo el proceso para asegurar la calidad final de las capas de firme construidas con estas mezclas.

La incorporación del material fresado presenta dos problemas adicionales respecto a la fabricación de mezclas convencionales. En primer lugar, su formulación, ¿qué tipo de dosificación de áridos y de betún debemos emplear con el material fresado para fabricar una mezcla convencional? ¿Se puede fabricar cualquier tipo de mezcla? .Para saber qué mezclas podemos fabricar debemos analizar cómo es el

proceso de fabricación y qué posibilidades nos ofrecen las distintas plantas disponibles en el mercado (Perez-Jiménez, 2006; Miró et al., 2011).

2.2.4. Buenas prácticas para manejo del RAP

La buena integración de todas las operaciones de suministro de RAP, incluidas las operaciones de fresado, procesamiento, acopio y control de calidad, beneficiaría en gran medida la calidad del producto final. Las mejores prácticas del manejo de RAP se analizan a continuación.

2.2.4.1 Fresado y proceso del RAP

El pavimento asfáltico se puede fresar en profundidad parcial o total. En los pavimentos donde las diferentes capas tienen áridos o betunes de diversas calidades debe eliminarse mediante fresado parcial, para luego permitir el uso del RAP en capas superiores (Arnold et al., 2012; Kerkhof, 2012). La selección de la fresadora, la profundidad del fresado y la velocidad del fresado influirán en la calidad del RAP (Kerkhof, 2012) Se debe prestar especial atención para minimizar el contenido de los finos. Un contenido demasiado alto de finos puede restringir significativamente el diseño de la mezcla con RAP al no cumplir con la granulometría, relación de filler-betún, huecos de aire y huecos del árido mineral (Newcomb et al., 2007; McDaniel et al., 2002; Copeland, 2011). Se tiene que evitar velocidad lenta de avance o la rotación rápida del tambor ya que se generarán más finos indeseables. Los diseñadores del "Sistema SmartPave" indican que generalmente el RAP fresado con cabezales de corte de fresado hacia arriba se mantiene dentro del 10% de la granulometría original (RAP Process Machinery, 2013).

Cuando se trabaje con altos porcentajes de RAP se requerirá el proceso de este en varias fracciones (fig. 2.15). El cribado del material proporciona flexibilidad al diseñador de la mezcla para poder garantizar la distribución del tamaño de partícula necesaria y dar control sobre el contenido de betún y finos (Hansen and Copeland,

2013; Al-Qadi et al., 2012; West et al., 2013; Brock y Richmond, 2007). Sin embargo, debe evitarse el triturado para reducir la generación de contenido de finos que normalmente ya está presente en la operación de fresado (West, 2011).

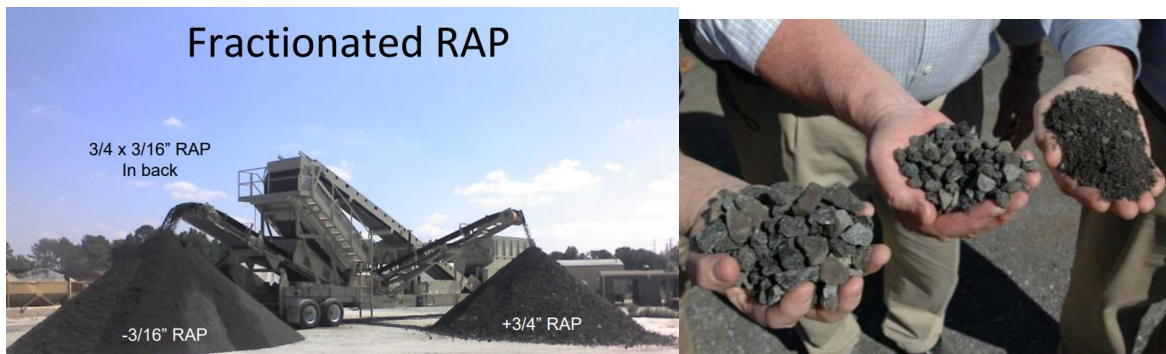


Fig.2.15 Fraccionado del RAP en distintos tamaños (West et al., 2013).

2.2.4.2 Acopio del RAP

Los acopios de RAP se deben tratar como cualquier acopio de árido virgen para evitar la contaminación y la separación de diferentes materiales (Brock y Richmond, 2007). Los residuos como los de hormigón, no debe combinarse con el RAP (Brock y Richmond, 2007). Si el RAP proviene de diferentes fuentes se almacena en el mismo acopio, puede ser mezclado para aumentar la homogeneidad antes de ser procesado (West, 2011).

El contenido de humedad del RAP es un factor importante que puede limitar el contenido máximo de RAP. Causará mayores costos de secado y calentamiento, reducirá la tasa de producción de la planta (E-MAK, 2013) y aumentarán las emisiones en un 10% por cada 1% de aumento de humedad (Prowell et al., 2012). El contenido de humedad puede reducirse mediante las siguientes acciones, del orden de mayor a menor efectividad (Zaumanis y Mallick, 2014; Zhou et al., 2010):

- Acopios de RAP cubiertos bajo un techo (fig.2.16).
- Uso de un área de acopio pavimentada e inclinada para favorecer el drenaje.
- Uso de acopios cónicos altos.

- Trituración y cribado de RAP en pequeñas porciones el día de su uso (West et al., 2013; Brock y Richmond, 2007).



Fig. 2.16 Acopio del RAP bajo techo (Brock y Richmond, 2007).

2.2.4.3 Control de calidad y análisis de la variabilidad del RAP

Los estudios realizados en los años ochenta y noventa concluyeron que el RAP exhibe variabilidad en su composición (Kallas, 1984, Solaimanian y Tahmoressi, 1996). Sin embargo, los hallazgos recientes muestran que la consistencia del RAP a partir de un solo proyecto es en su mayoría uniforme incluso sin fraccionamiento y además el RAP es generalmente más estable que los áridos vírgenes (West, 2008; Estakhri et al., 1999). El RAP debe estar bien caracterizado para el diseño de la mezcla y el control de calidad. Se recomienda que el material debe ser muestreado desde múltiples ubicaciones alrededor del acopio del RAP mediante el uso de la técnica de “back-dragging” (figura 2.17) para determinar sus propiedades y variabilidad (West et al., 2013). Mientras que para los pequeños contenidos de RAP puede ser suficiente determinar solo el contenido del betún y la granulometría, para las mezclas con alto contenido de RAP se deben determinar además las propiedades requeridas para el betún extraído del mismo (Newcomb et al., 2007).



Fig. 2.17 Técnica del “Back-Drugging” y muestreo del RAP para ser caracterizado (Instituto del Asfalto de los Estados Unidos, 2014).

Además de todas estas recomendaciones descritas anteriormente, también se puede consultar guías para tratar de evitar las dificultades en la elaboración de mezclas asfálticas recicladas.

2.3. Propiedades de las mezclas bituminosas recicladas

Dentro de las características que definen la calidad de una estructura de pavimento, se encuentran las propiedades mecánicas, que son muy importantes, porque ayudan a determinar parámetros definitivos para el dimensionamiento de la estructura de pavimento en su diseño y conservación (Instituto de Ingeniería UNAM, 1999).

En esta tesis, algunos ensayos se ejecutan para la caracterización de mezclas bituminosas convencionales. Se hace más extensa la investigación en el caso de

la resistencia a la fisuración, ya que se ha demostrado en la práctica profesional, que este es el principal deterioro en los firmes construidos con mezclas asfálticas recicladas. A continuación, se describen estas propiedades haciendo especial hincapié en su aplicación en las mezclas bituminosas recicladas.

2.3.1 Resistencia a la acción del agua

La humedad ha sido reconocida desde hace mucho tiempo por contribuir seriamente a la degradación prematura de los pavimentos asfálticos (Sengoz y Agar, 2007; Araújo et al., 2011). Se han realizado muchos estudios para obtener, describir y medir la susceptibilidad a la humedad de las mezclas asfálticas. La mayoría de ellos realizan una medida comparativa del daño por humedad, ya sea a través de la observación visual de los datos de campo o laboratorio, o por medio de ensayos mecánicos, que permiten obtener diferentes tipos de parámetros. El daño por humedad se manifiesta generalmente por una pérdida de cohesión en la mezcla y/o por la pérdida de adhesión entre el betún y los áridos (Airey, 2003).

Los mecanismos de daño por humedad en mezclas asfálticas se inician cuando el agua alcanza el interior de la estructura del material y culminan con las diversas manifestaciones de este deterioro.

Existen tres modos principales de flujo de agua al interior de las mezclas asfálticas en un pavimento (Caro, et al., 2008; Hunter y Ksaibati, 2002; Breakah, et al., 2009), que dependen de las condiciones ambientales y de la estructura de los huecos en la mezcla: permeabilidad, ascensión capilar y difusión (figura 2.18).

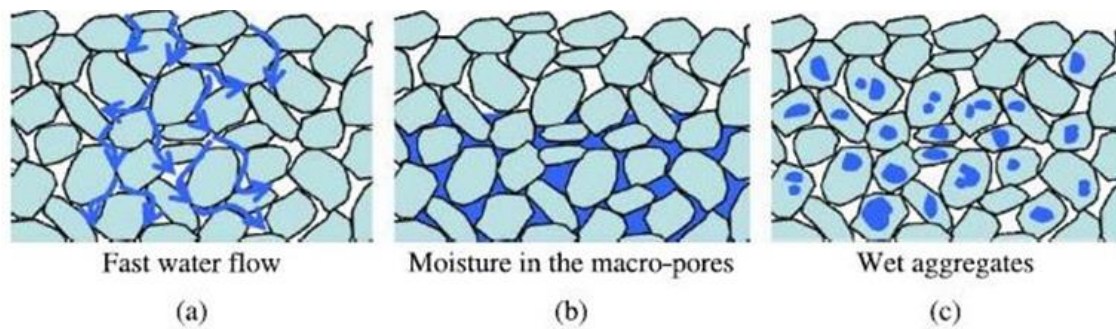


Fig. 2.18. Penetración del agua en las mezclas asfálticas (Kringos, et al., 2008).

La manifestación más común del deterioro causado por la presencia del agua en el interior de una mezcla se conoce como *stripping* o pérdida del recubrimiento del betún de la superficie de los áridos. El segundo tipo de manifestación más común consiste en el desprendimiento progresivo de los áridos de la superficie de la mezcla causado por el paso de los vehículos sobre el material asfáltico (conocido como *raveling*) (Lytton, 2002). Estos dos tipos de manifestaciones de daño tienen en común la pérdida de las propiedades de adhesión en la interfase árido-ligante. El desprendimiento de los áridos de un pavimento asfáltico puede mostrar o bien un marcado patrón de fallo cohesivo o un notable patrón de fallo adhesivo, o una combinación de los mismos, (figura 2.19).

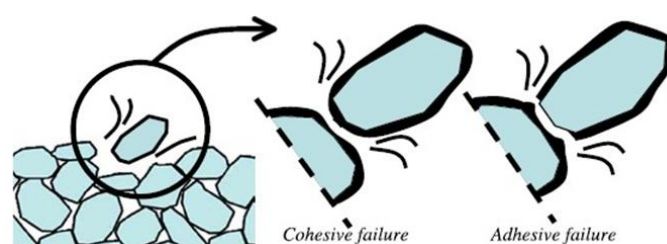


Fig.2.19. Separación del árido de la mezcla debido a fallo cohesivo vs. fallo adhesivo (Kringos, et al., 2008).

Investigaciones trascendentes sobre la resistencia a la acción del agua aplicada a mezclas bituminosas recicladas

Como los áridos de RAP ya están cubiertos con asfalto, hay menos posibilidades de penetración de agua en las partículas. Por lo tanto, generalmente se espera que las mezclas con un gran porcentaje de RAP tengan una menor susceptibilidad a la humedad en comparación con la mezcla asfáltica convencional (Mogawer et al., 2012; Karlsson e Isacsson, 2006; Tran et al., 2012).

Sin embargo, existen estudios donde se analiza la acción del agua en el comportamiento de las mezclas recicladas y se concluye que entre más RAP se tenga en la mezcla, se tendrá una mayor susceptibilidad a la humedad. Por ejemplo, Alarcón (2003) analiza el comportamiento de resistencia a la acción del agua de diferentes tipos (granulometrías) de mezclas bituminosas recicladas utilizadas habitualmente en España, incorporando en su composición diferentes porcentajes de RAP (0%, 30%, 50% y 80%), variando el contenido y tipo de ligante de aportación, empleando ensayos de tracción indirecta tanto en seco, como en inmersión en agua. Su conclusión principal fue que las mezclas recicladas con porcentajes de RAP entre 20 y 30% obtienen resistencias conservadas similares a la de una mezcla convencional, pero con porcentajes altos de RAP (80%), disminuye drásticamente su resistencia a la acción del agua hasta en un 70%, comparada con una mezcla convencional.

En muchas partes del mundo, las administraciones de carreteras están utilizando caucho proveniente de las llantas para ahorrar recursos, proteger el medio ambiente y mejorar la vida del pavimento de asfalto (figura. 2.20). Recientemente algunos estudios han intentado diseñar mezclas bituminosas recicladas con caucho y RAP. En este sentido (Xiao y Amirkhanian, 2009; Pérez y Pasandín, 2017) investigaron la susceptibilidad a la humedad de mezclas recicladas con caucho y con RAP. Las pruebas realizadas incluyeron la determinación de la viscosidad del ligante y el análisis de la resistencia a la tracción indirecta (ITS). Se evaluaron varias mezclas que contenían diferentes tipos de caucho, dos fuentes diferentes de RAP

y diversos porcentajes de caucho y RAP. Los resultados indicaron que, en general, el aumentar el contenido de RAP era beneficioso para mejorar los valores de ITS y reducir la susceptibilidad a la humedad de la mezcla. Sin embargo, la adición de caucho tenía un efecto ligeramente negativo. Quedando en evidencia la complejidad del comportamiento de estas mezclas en la que intervienen varios residuos.



Fig. 2.20 Diferentes tipos de caucho para su uso en mezclas recicladas (Xiao and Amirkhanian,2009).

Otro desarrollo reciente es el de las mezclas recicladas a baja temperatura. Estas mezclas se desarrollaron con objeto de reducir el consumo de combustible y las emisiones de gases de efecto invernadero. En este sentido, analizando el efecto de la temperatura en el proceso de fabricación de las mezclas recicladas, Singh et al., (2017) estudiaron el efecto del daño por humedad en mezclas bituminosas recicladas, calientes y semicalientes (HMA y WMA), con diferentes contenidos de RAP (0%,10%,20%,30% y 40%), utilizaron un aditivo tipo cera para las mezclas semicalientes con una tasa del 2 % del peso del betún. El daño inducido por humedad fue evaluado mediante la resistencia conservada (TSR) de la relación entre la resistencia a tracción indirecta en seco y en húmedo. Una de las principales conclusiones fue que el valor TSR de las mezclas calientes era mayor en comparación con las mezclas semicalientes para todos los porcentajes RAP, demostrando que las mezclas semicalientes son más propensas al daño por humedad en comparación con las mezclas calientes. Este comportamiento de las

mezclas recicladas semicalientes posiblemente se vio afectado por el tipo y cantidad de aditivo que se utilizó en investigación.

2.3.2 Resistencia a la deformación permanente

En firmes, las deformaciones permanentes son canales que se forman a lo largo de la trayectoria longitudinal de circulación de los vehículos, exactamente en las huellas por donde ruedan los neumáticos sobre el pavimento. Representan la acumulación de pequeñas deformaciones sin recuperación, producidas por aplicaciones de carga provenientes del mismo rodado de los vehículos sobre la superficie del pavimento y es uno de los tipos de deterioro que más preocupa dentro del estudio del comportamiento de las mezclas asfálticas (Pérez-Jiménez et al., 2003).

La deformación plástica permanente se caracteriza por una sección transversal del pavimento que no se encuentra en la posición original de diseño, se llama permanente porque representa una acumulación de pequeñas cantidades de deformación irrecuperable que ocurre cada vez que se le aplica la carga. El tipo de deterioro que más se manifiesta con este tipo de deformación es la formación de roderas (Figura 2.21). El comportamiento de las mezclas asfálticas frente a la formación de roderas está íntimamente relacionado con el tipo de ligante asfáltico, la composición granulométrica y calidad de los áridos y aditivos (en ciertos casos) empleados en la fabricación de la mezcla (Garnica et al., 2002).

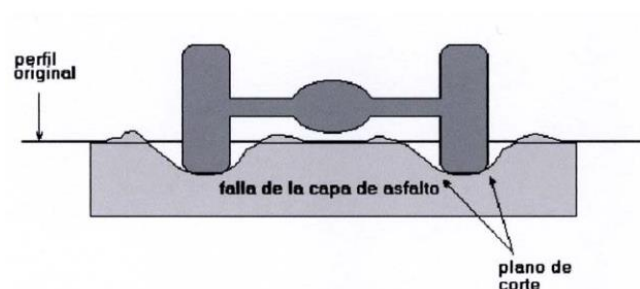


Fig. 2.21 Roderas (deformaciones permanentes) por fallas en la mezcla asfáltica (Garnica P., et al., 2002).

La acumulación de deformaciones permanentes en una capa de rodadura puede ser causada por una reducción volumétrica del material que compone la mezcla asfáltica y por las deformaciones debidas a los esfuerzos cortantes que transmiten las cargas del tráfico.

Según el manual de pavimentos para mezclas en caliente del Departamento de Transporte y la Administración de Carreteras de los Estados Unidos (FHWA, 1997), una las causas principales de deformación permanente de los pavimentos asfálticos es la baja viscosidad del betún contenido en la mezcla.

Investigaciones trascendentes sobre la deformación permanente aplicada a mezclas bituminosas recicladas

Múltiples estudios han demostrado que la resistencia a las deformaciones plásticas probablemente sea muy buena para las mezclas con altas tasas de RAP debido a la presencia de betún envejecido (McDaniel et al., 2000; Silva et al., 2012; Karlsson e Isacsson, 2006). Sin embargo, los aditivos como los rejuvenecedores son dirigidos a la reducción de la rigidez de la mezcla y puede causar un aumento en las deformaciones plásticas si se usa de manera inapropiada. Es por ello que 2 inconvenientes importantes deben ser tomados en cuenta para evitar la formación de deformaciones plásticas:

- Una excesiva dosis del agente rejuvenecedor podría excederse en el reblandecimiento de la mezcla bituminosa reciclada.
- Difusión insuficiente del agente rejuvenecedor en la película de betún antes de abrir al tráfico (figura 2.22). que podría formar una capa de rodadura blanda (Shah et al., 2007; Mogawer et al., 2012) y conducir a una mayor dinámica del desarrollo de deformaciones permanentes en etapas tempranas de la vida del pavimento (Potter y Mercer, 1997).



Fig.2.22 Formación de roderas provocada por la difusión insuficiente del rejuvenecedor (Mogawer et al., 2012).

2.3.3 Rigidez

La rigidez de las mezclas asfálticas es utilizada para el análisis de la respuesta del pavimento a la carga vehicular. Aunque los ensayos de fatiga y de deformación plástica pueden ser utilizados para medir la rigidez bajo condiciones similares a aquellas experimentadas por las mezclas de pavimentos en servicio, no hay garantía de que estas pruebas sea el mejor sistema para medir (correlacionando) el módulo de rigidez.

Uno de los parámetros que más influencia tiene en el módulo de rigidez es la temperatura. Si la temperatura disminuye, la rigidez de una mezcla bituminosa será, con toda lógica, más elevada, ya que, con una temperatura más baja el material se rigidiza. Además de la temperatura, otros parámetros que también influyen son: la penetración del ligante, la forma y tamaño de los áridos (Del Rio et al., 2011).

La rigidez se puede determinar mediante ensayos dinámicos de flexión (con 2, 3 y 4 puntos de apoyo), compresión diametral (fig.2.23) (tracción indirecta) y tracción directa.



Fig.2.23 Dispositivo para medir el módulo de rigidez por compresión diametral (Cooper Technologies, 2017).

Estudios trascendentes sobre la rigidez aplicada a mezclas bituminosas recicladas

West et al., (2013) evaluaron el desempeño de mezclas recicladas con 55% de RAP por medio del módulo dinámico medido a diferentes temperaturas y frecuencias, y demostraron un aumento de rigidez excesivo en un 25-60% en comparación con las mezclas sin RAP. Estas son algunas de las razones principales del rechazo de las administraciones de carreteras para permitir un contenido de RAP muy alto (Mogawer et al., 2012; Willis et al., 2012).

Existen también investigaciones de mezclas bituminosas recicladas puestas en obra en el año 2011 con un 100% de RAP. Un caso muy importante es el estudio de Mallick et al. (2010) donde se presentaron resultados de una mezcla reciclada puesta en obra con una aplicación de 100% RAP en la capa de rodadura en un tramo de la calle 75 en la ciudad de Nueva York (EUA). La mezcla era de tipo densa con tamaño máximo nominal de 12.5 mm, fabricada con una planta de asfalto “All-RAP Plant” descrita en la Sección 2.2.2.1 de esta tesis doctoral. Se aplicó sobre la mezcla un agente rejuvenecedor. Los resultados de control de calidad en la obra demostraron similares contenidos de huecos entre las mezclas rejuvenecidas y las

mezclas de referencia. Se evaluó el módulo de rigidez de la mezcla rejuvenecida y este valor fue ligeramente inferior que la de la mezcla de referencia. En verano de 2012 los autores realizaron una inspección visual de inspección del tramo estudiado y observaron que no hay diferencias en el desempeño del pavimento en comparación con secciones de control de mezclas sin RAP tal y como se observa en la (Fig. 2.24).

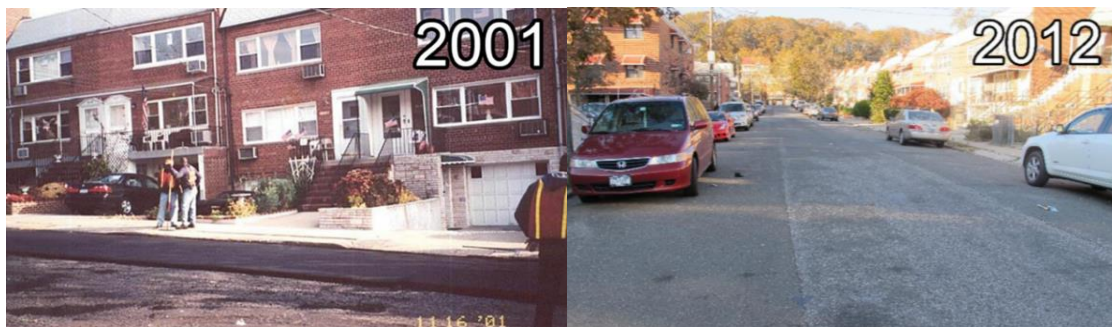


Fig. 2.24. Pavimento con 100% de RAP en la calle 75 de Nueva York, Woodhaven en construcción en 2001 y puesta en servicio en 2012(Zaumanis et al., 2014).

En otros estudios se estudian los efectos de los procedimientos de mezclado y los diferentes tamaños de RAP en la variabilidad de la rigidez de mezclas bituminosas recicladas en caliente. Nguyen (2013) empleó el método de mezclado que simula el mecanismo de la mayoría de las plantas de asfalto. Este mecanismo consiste en que el RAP a temperatura ambiente se mezcla con áridos vírgenes sobrecalentados a 215°C. La proporción de RAP en la mezcla reciclada fue del 40%. Se usaron dos tamaños de RAP, 20 y 40 mm y el módulo de rigidez se evaluó mediante el ensayo de tracción indirecta por compresión diametral. Su principal conclusión fue que los resultados de módulo de rigidez variaban con la orientación de la probeta expresando indirectamente la heterogeneidad de la mezcla reciclada, por lo tanto, la variación en los valores de rigidez medidas en diferentes direcciones será sustancial para una mezcla heterogénea y menor en el caso donde la mezcla reciclada es homogénea.

2.3.4 Resistencia a la fisuración

Los fallos por fisuración de las capas asfálticas pueden ser un indicativo de deficiencias en la estructura del pavimento, sea por un diseño inadecuado, o debido a falta en la calidad de los materiales y defectos constructivos, o por una combinación de estos factores.

Los mecanismos de fisuración se pueden analizar desde el punto de vista de la respuesta mecánica de la mezcla frente a la aplicación de una carga a velocidad constante y monótonica o frente a la repetición de cargas cíclicas muy inferiores a las de la resistencia máxima. Al primer enfoque se le denomina fractura de la mezcla y, al segundo enfoque, fatiga de la mezcla.

En el caso de las mezclas asfálticas recicladas, estudiar el fenómeno de fisuración es importante porque es una de las causas más frecuentes de deterioro. El comportamiento de las mezclas asfálticas recicladas a fisuración, debido a sus características reológicas, es complejo de analizar, ya que depende de factores que hacen que este material se comporte de manera completamente diferente frente a las sollicitaciones producidas por el medio ambiente y el tráfico, las cuales se manifiestan mediante variaciones térmicas y diferentes tipologías y velocidades de aplicación de las cargas (Brown et al., 2001; Roberts et al., 1996; McGennis et al., 1994).

2.3.4.1 Energía de fractura

Un método para explicar el fenómeno de fisuración en las mezclas bituminosas es mediante la fractura mecánica de los materiales. Mediante este método se estudia el proceso por el cual la mezcla bituminosa sufre deformaciones en estado de tracción uniaxial bajo cargas cuasi estáticas y monótonicas, llegando a su fallo como consecuencia del desarrollo e interconexión entre micro fisuras.

La fractura se define como la separación de un sólido bajo tracción en dos o más piezas (figura 2.25). A bajas temperaturas es uno de los principales modos de fallo y de degradación de recubrimientos asfálticos en las regiones frías. En la mayoría de los países con climas más fríos, gran cantidad de dinero que se gasta anualmente para reparación de revestimientos de caminos y carreteras.



Fig. 2.25 Fractura en pavimento asfáltico (Fuente: Yutave Ingeniería, 2011).

Las tensiones térmicas y cargas de tránsito son dos factores fundamentales para la iniciación y propagación de grietas en el pavimento asfáltico. Por consiguiente, los tres tipos de agrietamiento son: (I) agrietamiento térmico (debido a la tensión térmica inducida en una capa asfáltica, o los cambios de temperatura estacionales), (II) agrietamiento por fatiga (debido a una carga cíclica inducida por los vehículos en movimiento) y (III) la reflexión de grietas (propagación de grietas existentes en las capas inferiores del pavimento asfáltico debido a la carga de tráfico), (Braham A. et al., 2010).

Las variaciones en la temperatura pueden introducir tensiones térmicas de tracción en la capa asfálticas y por lo tanto el pavimento podría ser sometido a modo I (apertura de grieta). Sin embargo, la carga de tránsito puede introducir diferentes combinaciones de tensiones y deformaciones en función de la ubicación de las ruedas del vehículo, produciéndose así el modo mixto(I/II) (Akbulut H. et al., 2004). La figura 2.26 muestra esquemáticamente las deformaciones de una grieta del modo I, modo II y modo mixto I/II.

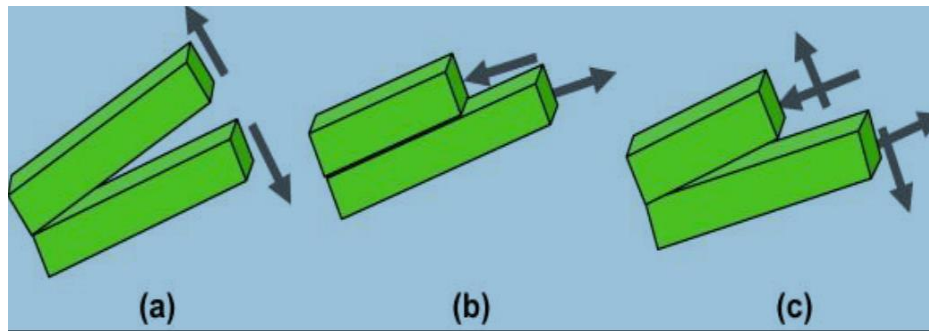


Fig. 2.26 Diferentes modos de carga en los componentes agrietados: (a) de modo puro I, (b) el modo puro II, y (c) el modo mixto I / II (Fuente: Fernández L., 2002).

La energía de fractura se entiende como un parámetro propio del material y fundamental para analizar el comportamiento de una mezcla bituminosa durante el proceso de fractura o fisuración. Al realizar el ensayo de fisuración, se obtiene una curva carga-desplazamiento en la que se observa que, cuando se aplica una carga cuasi estática y monótonica, la oposición que ofrece el material a la tracción se incrementa para llegar a un límite superior conocido como resistencia máxima teórica a tracción del material, momento a partir del cual, la carga comienza a decrecer hasta llegar a cero. (figura 2.27). Durante la aplicación de la fuerza, se realiza un trabajo que se invierte en deformar al material hasta que se produce la separación de las partes y empieza a invertirse en energía de fractura.

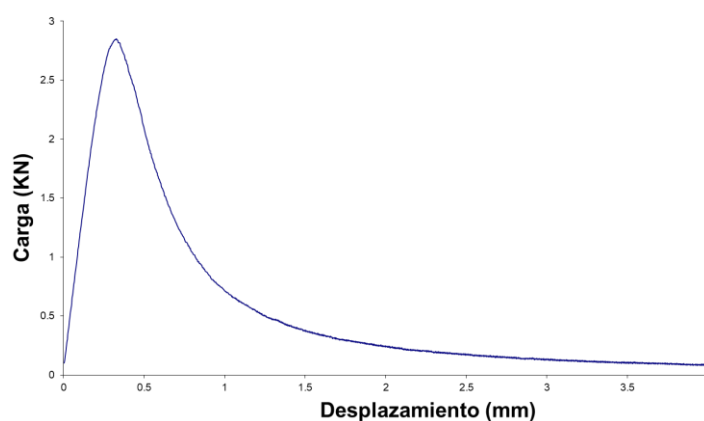


Fig. 2.27 Forma esquemática de obtención de la energía de fractura (Pérez-Jiménez, F. et al., 2010).

2.3.4.2 Ensayos para evaluar la energía de fractura en mezclas bituminosas con RAP

En el campo de las mezclas asfálticas se han desarrollado varias metodologías experimentales que permiten representar y obtener una mejor comprensión de los mecanismos de iniciación y propagación de grietas en pavimentos asfálticos, y se basan en representar específicamente el comportamiento a fractura de estos materiales. En los últimos años, con el desarrollo de la ciencia de la mecánica de fractura de los materiales cuasi-frágiles se han podido describir adecuadamente los mecanismos de fractura en las mezclas asfálticas.


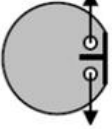
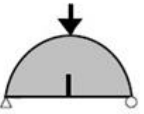
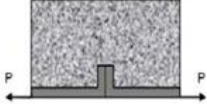


En este contexto, los ensayos a tracción son bastante utilizados en el campo de la ingeniería, especialmente el campo de la mecánica de fractura, debido a que éstos permiten determinar propiedades mecánicas de los materiales relacionadas con su resistencia y capacidad de deformación de las mezclas bituminosas recicladas.

Los ensayos monotónicos son bastante utilizados en el campo de la ingeniería, especialmente en el campo de la mecánica de la fractura, debido a que permiten determinar las propiedades mecánicas de los materiales relacionadas con su resistencia y capacidad de deformación.

En los últimos años han sido varios los investigadores que han estudiado los conceptos derivados de la mecánica de fractura aplicados a las mezclas asfálticas, entre los que se encuentran los estudios realizados por Wagoner en la Universidad de Illinois (2006), por Molenaar en la Universidad de Delft (2010) y por Koh en la Universidad de Florida, (2012). La finalidad de estos estudios ha sido investigar sobre las propiedades mecánicas de fractura de mezclas asfálticas mediante el desarrollo de nuevos ensayos que permiten obtener parámetros mecánicos que entreguen información para una mejor caracterización de la respuesta de las mezclas frente al proceso de fisuración bajo diferentes condiciones, ya sean climáticas, de materiales, de tipo y contenido de asfalto, entre otras variables. Algunos de los ensayos que permiten obtener los parámetros mecánicos que

aportan información para la caracterización de la respuesta de las mezclas bituminosas frente al proceso de fisuración se muestran en la tabla 2.2.

Tabla 2.2 Ensayos desarrollados para obtener las propiedades de fractura en las mezclas bituminosas (Valdés, 2011).

Tipo de ensayo	Ventajas	Limitaciones	Área de fractura (mm ²)
Single - edge notched beam SE(B) 	Simple configuración de carga Mayor área de fractura	Presenta dificultad en su aplicación a testigos	7500
Disk-shaped compact test DC(T) 	Mayor área de fractura Ensayo de fractura normalizado (ASTM D7313-07)	Complejidad en la elaboración de probetas y aplicación a testigos Desviación de la fisura Temperatura de ensayo	5500 e = 50 mm l = 110 mm
Semi-circular bending test SCB 	Fácil aplicación a probetas y testigos. Simple configuración de cargas Menor cantidad de muestras y testigos	Complejo estado tensional Lugar de aplicación de de la carga influye en la correcta propagación de la fisura	3750 e = 50 mm l = 75 mm
Barcelona Tracción Directa BTD 	Fácil elaboración de probetas	No aplicable a testigos Granulometría específica	3549 e = 35 mm l = 101,4 mm
Cataluña Tracción Directa CTD 	Estado tensional de tracción pura Fácil interpretación de los resultados	Menor área de fractura. Elaboración de las probetas y su aplicación a testigos Repetibilidad del ensayo	2000 e = 40 mm l = 50 mm
Dog-Bone Direct Tension Test, DBDT 	Concentración de tensiones localizadas en plano de falla Plano de falla conocido Fabricación a partir de probetas cilíndricas Aplicación a testigos	Equipos requeridos Dificultad de la fabricación de probetas	No se registran dimensiones exactas (fabricación a partir de probeta compactador giratorio $\phi=150$ mm) e= 1.5 pulg. Mezclas densas e= 2 pulg. Mezclas abiertas

2.3.4.3 Importancia del Ensayo Fénix

El Laboratorio de Caminos de la UPC ha desarrollado un ensayo de tracción directa denominado ensayo Fénix. El ensayo Fénix es un ensayo experimental, que consiste en determinar el esfuerzo necesario para fisurar una probeta semicilíndrica, aplicando un esfuerzo de tracción en su plano diametral (figura 2.28) (Miró et al., 2014; Pérez-Jiménez et al., 2010 y 2013).

El ensayo Fénix permite evaluar la tenacidad y energía disipada en la fractura de las mezclas bituminosas. Es un ensayo sencillo, que permite detectar el efecto que la composición y la naturaleza de los componentes de la mezcla tienen en su comportamiento, en especial sobre su módulo de rigidez, su energía disipada y su tenacidad. Por ello se ha tomado como base para el diseño de un nuevo procedimiento de dosificación en que se unen los parámetros volumétricos de la mezcla y su resistencia a la fisuración, así como también se ha tomado en cuenta para analizar propiedades como rigidez y ductilidad en mezclas asfálticas recicladas. (Pérez-Jiménez, F. et al., 2010)

El ensayo Fénix ha demostrado ser un método práctico y eficaz para caracterizar el comportamiento a la fisuración de mezclas asfálticas recicladas, considerando variables como el tipo y de contenido de ligante, y la temperatura de ensayo. Además, otra ventaja de este ensayo es que se puede utilizar en los testigos de una obra y en un amplio rango de temperaturas. Asimismo, permite estudiar el comportamiento en zona de post-pico de la curva carga-desplazamiento para evaluar la tenacidad de la mezcla.

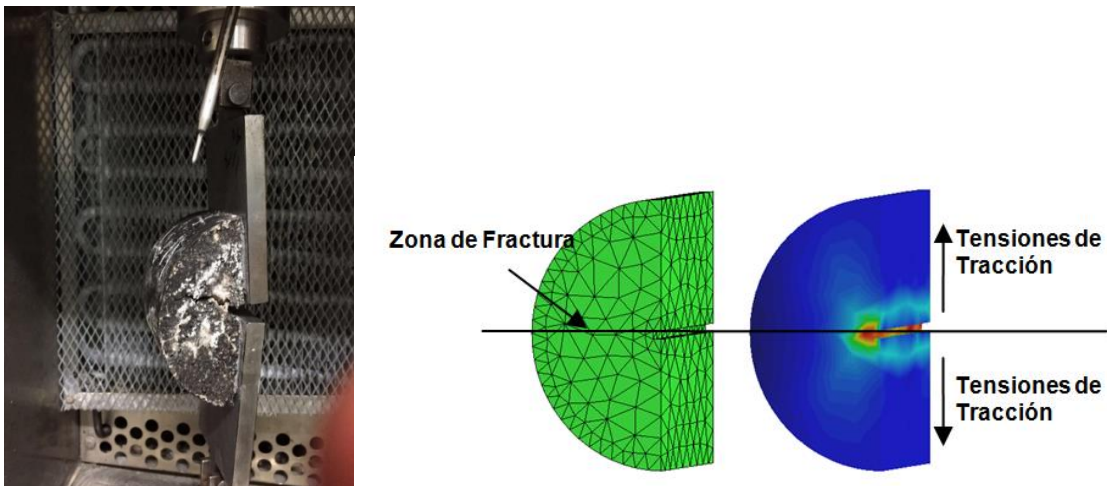


Fig. 2.28. Tensiones de tracción del ensayo Fénix. (Pérez-Jiménez F. et al., 2010).

Estudios trascendentes sobre la resistencia a fisuración aplicada a mezclas bituminosas recicladas.

Como se ha mencionado anteriormente, los deterioros en las mezclas con alto contenido de RAP se asocian principalmente con el betún envejecido. El betún del RAP es generalmente menos flexible por lo que aumenta la rigidez de la mezcla (Al-Qadi et al., 2012; West et al., 2013) y por lo tanto puede causar daño por fatiga (Daniel et al., 2010; Shah et al., 2007; West et al., 2011) y fragilidad a baja temperatura (West et al., 2011; Terrel et al., 1992).

Contrariamente a la percepción general, los estudios de Al-Qadi et al., (2012), Huang et al., (2004, 2005), Shu et al., (2008), McDaniel et al., (2012), así como Sargious y Mushule, (1991) han indicado el aumento de la vida útil de la fisuración por fatiga de las mezclas que contienen al menos un 40% de RAP en comparación a mezclas convencionales. Estos resultados pueden ser parcialmente explicados por la reducción de las tensiones de tracción en la mezcla debido a un aumento rigidez. Además, Huang et al., (2005) concluyeron que el ligante endurecido forma una micro capa rígida en la interfaz de RAP que reduce la concentración de esfuerzos y deformaciones dentro de la mezcla reciclada en caliente y por tanto podría mejorar la resistencia a la fisuración. Sin embargo, los autores predicen que

la finalización de la difusión de un agente rejuvenecedor probablemente podría neutralizar este efecto.

Por otro lado, algunos investigadores analizaron la resistencia a la energía de fractura en mezclas bituminosas recicladas, calientes y semicalientes (HMA y WMA) compactadas por el método Marshall, con diferentes contenidos de RAP (0%, 10%, 20%, 30% y 40%). La resistencia a la fractura de las mezclas HMA-RAP y WMA-RAP se evaluó mediante el ensayo Semi Circular Bending (SCB) (figura 2.29). Se demostró que la resistencia a la fractura aumenta con la adición de RAP. Tal tendencia en esta investigación se puede atribuir a la ausencia de tiempo de relajación en el protocolo de prueba SCB. Además, se observó que, en todas las mezclas recicladas estudiadas, las resistencias a la fractura de las mezclas calientes eran mejores en comparación con las mezclas semicalientes. (Singh et al., 2017).



Fig. 2.29. Esquema del ensayo Semi Circular Bending (SCB). (Singh, et al., 2017).

En el caso de España, Valdés et al. (2011) presenta un estudio experimental para caracterizar el comportamiento mecánico de mezclas bituminosas que contienen altas tasas de RAP. Se utilizaron dos mezclas semidensas de 12 y 20 mm de tamaño máximo de agregado y que contenían 40% y 60% de RAP, respectivamente (S-12 y S-20, de acuerdo con las especificaciones españolas), que se utilizaron para la rehabilitación de una sección de carretera. Primero, se analizó el efecto de la variabilidad del RAP en las mezclas recicladas. Luego, se estudiaron sus

propiedades mecánicas determinando el módulo de rigidez, la resistencia a la tracción indirecta y la resistencia a la fisuración por medio del ensayo Fénix. Dentro de las conclusiones más importantes, se destaca que el análisis del módulo de rigidez y la resistencia a la tracción indirecta en muestras de laboratorio tiene un comportamiento más cercano al de una mezcla de alto módulo y valores más altos que el de la mezcla convencional. Se pueden extraer conclusiones similares del Índice de Rigidez a Tracción IRT (Ensayo Fénix). Los contenidos de RAP más altos conducen a una mayor rigidez, como lo muestran los resultados de módulo de rigidez y de IRT.

También hay muchas investigaciones donde se promueve el uso de rejuvenecedores para mejorar el desempeño a la resistencia de fisuración de las mezclas bituminosas recicladas. Zaumanis et al., (2014) modificaron mezclas bituminosas recicladas en caliente con 100% de RAP con seis rejuvenecedores genéricos a una dosis de 12% del peso del betún y se analizaron las propiedades de la mezcla y el betún. Los resultados obtenidos arrojaron que cinco de los seis rejuvenecedores disminuyeron drásticamente la susceptibilidad a la fisuración a baja temperatura, incluso llegando a comportarse de manera similar a la mezcla de referencia.

Está claro que con todos los estudios que se han comentado y discutido, hay diversas variables que generan incertidumbre, por lo tanto, es necesario investigar más sobre la resistencia a fisuración en mezclas recicladas para obtener una mayor comprensión del efecto de esta propiedad en el comportamiento de las mezclas recicladas.

2.4 Variables que afectan a las propiedades de las mezclas recicladas

El uso de este material permite una economización de la energía de producción, materiales fósiles y los recursos financieros. Esto conlleva al deseo de aumentar los porcentajes de RAP añadidos en los nuevos pavimentos. No obstante, la

limitación para usar grandes porcentajes de RAP deriva de 3 aspectos: las propiedades del betún envejecido del RAP, los mecanismos de mezclado entre los componentes de una mezcla reciclada y la difusión de los agentes rejuvenecedores (Howard, Cooley, y Doyle, 2009; Newcomb, Brown, y Epps, 2007; Zaumanis y Mallick, 2015).

2.4.1 Variables relacionadas con el ligante bituminoso

2.4.1.1 Envejecimiento de materiales bituminosos

La rigidización debido al envejecimiento es una concentración de varios procesos durante la vida útil de las mezclas asfálticas (Tonial, 2001) y que se puede atribuir a envejecimiento químico y envejecimiento físico o endurecimiento estérico (Ramond y Such, 1990; Zhao, 2011). Es necesario considerar que los mecanismos de volatilización y oxidación son de carácter químico, mientras que el endurecimiento estérico corresponde a un reacomodamiento estructural y, por ende, de carácter físico.

Los cambios en las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas debidos a envejecimiento se inician durante la fabricación de éstas. Una vez compactadas, el oxígeno se difunde rápidamente en el interior de la mezcla, momento en el que aparecen reacciones químicas graduales entre el oxígeno y la interfaz árido-ligante. Este fenómeno, conocido como “envejecimiento oxidativo” (Lee y Huang, 1973; Lau, et al., 1992; Petersen, et al., 1993), es uno de los factores más importantes que contribuyen sustancialmente al endurecimiento y la fragilización de las mezclas, pudiendo afectar a su resistencia a la fisuración (Glover, et al., 2005) y su resistencia a la fatiga (Abu Al-Rub, et al., 2013).

Los procesos de endurecimiento por cambios en el comportamiento reológico y en la composición del betún pueden tener dos efectos, incrementar la capacidad de soporte de cargas y la resistencia a la deformación permanente del firme, produciendo un aumento en los valores de rigidez o reduciendo la flexibilidad del

firme, los cuales conducen a daños prematuros en los pavimentos produciéndose la formación de grietas con la posibilidad de fallo total (Farcas, 1996; Vallerga, 1981).

Para caracterizar el envejecimiento de los materiales bituminosos se suele usar el índice o grado de envejecimiento, *Ageing Index* (Wu, 2009):

$$Ageing Index = \frac{P_{Aged}}{P_{Unaged}}, \quad (2.1)$$

donde P_{Unaged} se refiere a alguna propiedad física (por ejemplo, viscosidad, punto de reblandecimiento del betún y/o rigidez de la mezcla asfáltica) medida sobre el material bituminoso no envejecido, y P_{Aged} sería la misma propiedad medida en la mezcla no envejecida, pero, esta vez, medida sobre los materiales después de haber sido envejecidos.

El efecto del envejecimiento de pavimentos combinado con las cargas del tráfico sobre el pavimento suele ir acompañado de la reducción de su vida útil, como se muestra esquemáticamente en la figura 2.30 (Abu Al-Rub, et al., 2013). El envejecimiento provoca que la mezcla asfáltica pierda su ductilidad, volviéndose más propensa a sufrir daños por fatiga y pérdida de su potencial de recuperación.

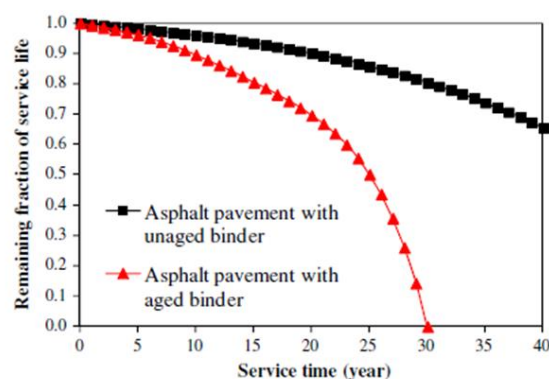


Fig.2.30. Gráfica que muestra el efecto del envejecimiento en la vida útil de los pavimentos asfálticos (Abu Al-Rub, et al., 2013).

2.4.1.2 Parámetros de evaluación y efectos del envejecimiento del betún y mezclas

Los parámetros más comúnmente empleados para evaluar el envejecimiento de los materiales bituminosos consisten en medidas de consistencia del betún, tales como penetración, viscosidad y ductilidad. Para las mezclas asfálticas existen diferentes métodos, por ejemplo, Pauls y Welborn (1952) usaron la resistencia a compresión. Kim, et al. (1986) establecieron una relación entre el módulo de rigidez a baja temperatura de la mezcla y el punto de fragilidad Fraass del betún, considerando estos como buenos indicadores para medir la tasa de envejecimiento entre mezclas asfálticas y betunes. Estos autores observaron cómo para valores altos del módulo, las mezclas envejecidas presentaron la vida a fatiga más larga.

Los cambios químicos durante el envejecimiento han sido estudiados por Toffour, et al., (1989) y Petersen (1993). La técnica de espectrometría de infrarrojos (FTIR) puede realizar una caracterización química del betún y evaluar el grado de envejecimiento a partir de la formación de carbonilos y sulfóxidos (Mohammad, et al., 2006). La figura 2.31 muestra un espectrograma en el cual se observa la absorbancia a lo largo de un número de onda. Este espectrograma sirve para caracterizar el betún antes y después de ser envejecido tanto en laboratorio como en campo.

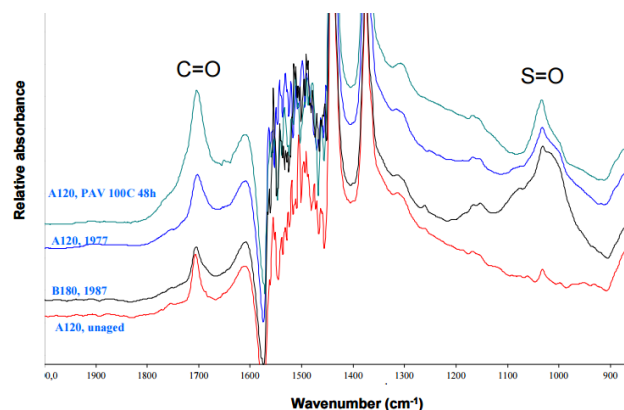


Fig.2.31 Espectrogramas para caracterizar el betún antes y después de ser envejecido tanto en laboratorio como en campo (Mohammad, et al., 2006).

2.4.2 Mecanismos de mezclado entre los componentes de la mezcla reciclada

El mecanismo de mezclado de una mezcla asfáltica reciclada es muy diferente con respecto al de una mezcla bituminosa convencional. Ambos tipos de mezclas bituminosas son finalmente, las combinaciones del mismo tipo de materiales, betún y árido. Sin embargo, la mezcla bituminosa convencional es una combinación de árido y betún virgen, mientras que, en una mezcla reciclada, el árido no es sólo árido virgen, sino también RAP que involucra una mezcla de betún envejecido y árido.

2.4.2.1 Mezclado Mecánico

Cuando el RAP se combina para formar una nueva mezcla reciclada, generalmente se asume que el betún contenido en el RAP se mezcla completamente con el nuevo betún virgen. Esta aseveración es crítica en consideración con el desempeño a largo plazo de la mezcla reciclada.

Hay muchos aspectos que los investigadores tienen que hacer frente en el ámbito de las mezclas asfálticas, por ejemplo, la mezcla de partículas sólidas, líquidos, gases y polvos cohesivos. En general, el objetivo de un procedimiento de mezclado es reducir la escala y la intensidad de la segregación, con el fin de hacer que la mezcla sea más homogénea (Harnby et al., 2001). Una mezcla con homogeneidad ideal se ilustra en la Figura 2.32, en la que se representa como sería una mezcla con condiciones ideales de mezclado.

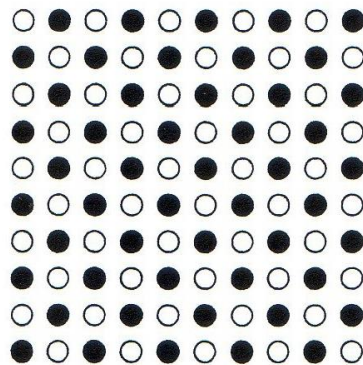


Fig. 2.32: Mezcla con homogeneidad ideal (Harnby et al., 2001).

Con el fin de obtener más homogeneidad en la mezcla, las fuerzas externas, por ejemplo, las fuerzas rotacionales durante el mezclado, y los efectos vibratorios, deben satisfacerse para romper cualquier lazo que existan entre las partículas y poder así reubicar estas partículas en la mezcla. De lo contrario, la segregación se producirá y causará efectos adversos en la calidad de la mezcla. Hay muchos factores que afectan al proceso de mezclado y que conducen a la segregación, por ejemplo, el tipo de partículas, las fuerzas intermoleculares, el tipo del mezclado del equipo empleado, y el tiempo de mezclado.

Ciertas fuerzas intermoleculares, como las de Van Der Waal y la electrostática, pueden causar la aglomeración de algunas partículas de RAP. En la Figura 2.33 se muestra una mezcla, donde las partículas se aglomeran de forma desordenada debido a la heterogeneidad de los componentes de la mezcla. Si las superficies de las partículas no son lisas, se reducirán las áreas de contacto y por lo tanto se reducen las fuerzas de enlace, provocando la segregación de la mezcla. Además, los diferentes tamaños de partículas también pueden causar la segregación ya que estas partículas tendrán diferentes velocidades de difusión entre el betún del RAP y el betún virgen durante el proceso de mezclado (Harnby et al., 2001).

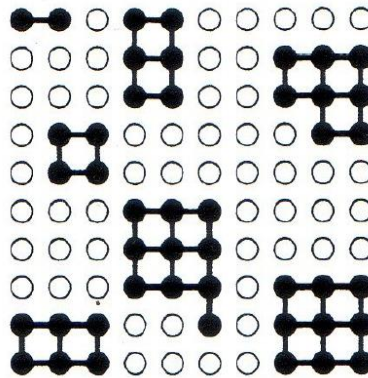


Fig. 2.33: Mezcla con partículas de “atracción propia “(self-loving) (Harnby et al., 2001).

2.4.2.2 Temperatura y tiempo de mezclado

Temperatura de mezclado

La temperatura final de una mezcla reciclada en caliente es significativa durante el proceso de compactación. Bajas temperaturas de compactación pueden ocasionar roderas y problemas de daño por humedad entre otros muchos tipos de deterioros. Diversas causas, por ejemplo, el contenido de humedad del RAP, la temperatura de precalentamiento del RAP, el contenido de RAP, el tipo de áridos y el betún virgen tienen gran influencia en la temperatura final de la mezcla reciclada (Bin Yu, et al., 2016).

El efecto de la temperatura de mezclado es de suma importancia ya que afecta directamente al envejecimiento del betún del RAP y al grado de mezclado ambos betunes. Es decir, que a mayor temperatura a la que el RAP es expuesto, mayor será el envejecimiento que este sufrirá, especialmente cuando se expone a más de 100°C (Bin Yu, et. al., 2016). Investigadores como Read y White (2003) argumentaron que la tasa de envejecimiento aumenta el doble por cada incremento de 10°C en la temperatura de la mezcla. La temperatura de la mezcla afecta de manera extrema las propiedades del betún. Un buen ejemplo para ilustrar este efecto se observa en la figura 2.34. en la que se puede apreciar el incremento del punto de reblandecimiento en función de la temperatura de la mezcla.

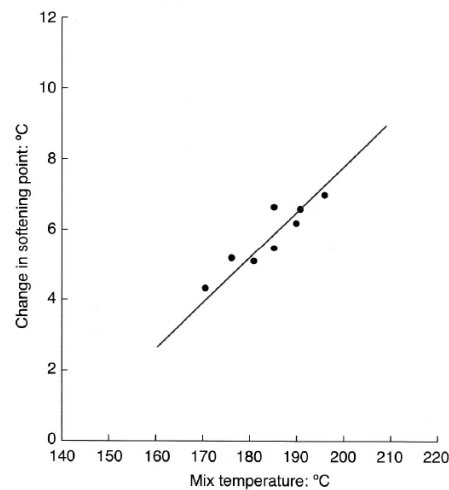


Fig.2.34: Relación entre la temperatura final de la mezcla bituminosa y el cambio en el punto del reblandecimiento del betún (Read y Whiteoak, 2003).

Un proceso comúnmente utilizado en la fabricación de una mezcla asfáltica reciclada es cuando se incorpora el RAP a temperatura ambiente y se mezcla con áridos vírgenes sobrecalentados, de manera que cuando entran en contacto con el RAP este último se seca (si es que contiene humedad) y se calienta por conducción. Esto evita la exposición del RAP directamente a las llamas del secador. La temperatura del sobrecalentamiento del árido de aportación depende de las características del RAP (% del RAP en la mezcla, % de humedad) y de la temperatura final de la mezcla que se pretende obtener.

Existen algunas recomendaciones para las temperaturas del sobrecalentamiento del árido virgen, un ejemplo de ello son las recomendaciones del Virginia Department of Transportation 1996, para alcanzar ciertas temperaturas finales de mezclado con un 50% de RAP.

También existen modelos numéricos lineales desarrollados a partir de resultados obtenidos en laboratorio que pueden predecir la temperatura final de una mezcla reciclada en caliente, con un nivel de confianza de 95% (Bin Yu et al., 2016).

$$\text{HMA Temp} = 7.80 + 0.62 \times \text{RAP Temp} + 0.43 \times \text{Agg Temp} - 0.47 \text{RAP Cont} \quad (2.2)$$

(Adj - R2 = 0.95).

Donde, HMA Temp: es la temperatura final de la mezcla; RAP Temp: es la temperatura del RAP; AggTemp: es la temperatura de los áridos vírgenes; RAPCont: es el contenido de RAP en porciento.

Tiempo de mezclado

Algunas variables, tales como la temperatura del agregado virgen, el porcentaje de RAP, el contenido de humedad en el RAP y el tiempo de mezclado, pueden tener un efecto significativo en el calentamiento de las partículas del RAP la posterior transferencia de ligante contenido en el mismo.

Cuando el RAP se incorpore a temperatura ambiente en la mezcla, el aumento del tiempo de mezclado favorece tanto el secado total del RAP, así como el calentamiento homogéneo entre los componentes de la mezcla, por lo que se traduce en una mayor calidad en el mezclado final de la mezcla (Howard et al. 2009).

Existen otros estudios de simulaciones numéricas donde demuestran que cuando el porcentaje de RAP en la mezcla aumenta, se necesita más tiempo de mezclado para alcanzar la difusión entre el ligante del RAP y el ligante nuevo. Además, se necesitan mayores tiempos de mezclado para alcanzar mejores transferencias de betún cuando existe una disminución del sobrecalentamiento de los áridos vírgenes (Zhang, Wen, and Hobbs, 2015). En la siguiente figura (2.35) se puede observar a través de las imágenes infrarrojas obtenidas, que si se incrementa el tiempo de mezclado las variaciones de temperatura al final de la mezcla son menores y por ende la mezcla es más homogénea en su composición.

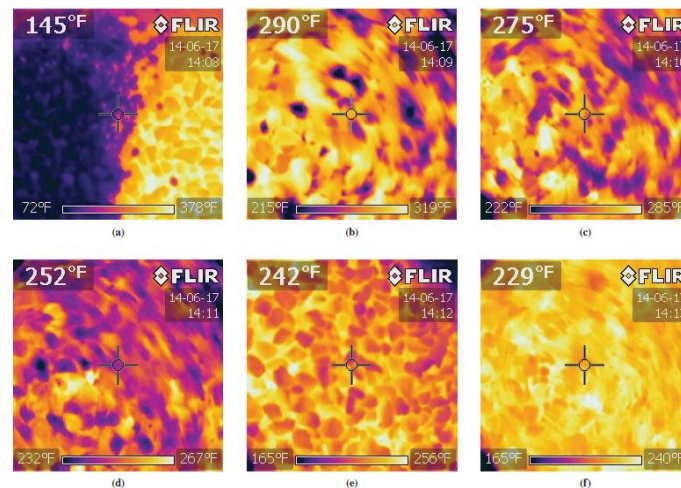


Fig. 2.35 Imágenes infrarrojas del mezclado entre áridos vírgenes sobrecalentados y RAP, aumentando el tiempo de mezclado (0,60,120,180, 240 y 300 segundos) (Zhang et al., 2015).

2.4.2.3 Grado de mezclado entre los componentes de una mezcla bituminosa reciclada

El comportamiento de las mezclas bituminosas recicladas no sólo se ve afectado por la calidad del mezclado mecánico, sino también la interacción entre el RAP y materiales vírgenes. El mezclado mecánico sólo admite el hecho de que ligante virgen pueda recubrir las partículas del RAP. Sin embargo, los requerimientos del proceso de reciclado tienen como objetivo que el ligante virgen pueda interactuar con el betún del RAP con el fin de reducir su viscosidad y recuperar sus propiedades previstas.

Como ya se ha mencionado anteriormente en esta tesis, en el proceso de fabricación de una mezcla bituminosa reciclada, el RAP se mezcla junto con los áridos vírgenes y un ligante nuevo. Se espera que, durante el corto tiempo de mezclado, el asfalto envejecido reduzca su viscosidad para después mezclarse con el betún virgen y moverse para que los áridos vírgenes y áridos del RAP queden recubiertos por un espesor de película homogénea. Al mismo tiempo, se requiere una suficiente difusión del ligante añadido para restaurar las propiedades del ligante envejecido (Zaumanis y Mallick 2013).

El grado de mezclado entre el RAP y el ligante y los áridos nuevos ha sido estudiado por algunos investigadores, como Huang et al. (2005), quienes analizaron la envuelta (mezcla entre el betún nuevo y el betún envejecido) obtenida en la mezcla reciclada, subdividiéndola en capas mediante una destilación realizada en varias etapas y encontraron que las capas exteriores eran mucho más blandas que las interiores, poniendo en evidencia que la combinación de ambos betunes no era homogénea ni completa. En la figura 2.36 se muestra esquemáticamente la separación entre estas capas.

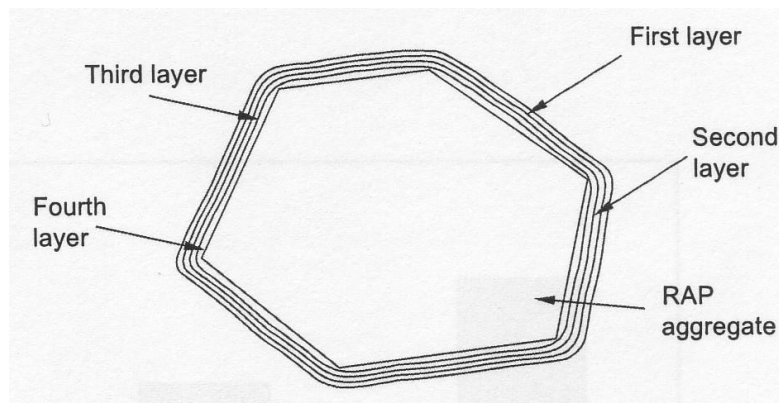


Fig. 2.36: Esquemización de una partícula de RAP dividida en capas (Huang et al., 2005).

Al Qadi et al. (2009) también analizaron un amplio rango de mezclas recicladas que incluían diferentes contenidos de RAP (0, 20 y 40%), utilizando una serie de ensayos entre los que se destacaban ensayos de módulo dinámico en un barrido de frecuencias, y ensayos de fractura (SCB y DCT) a bajas temperaturas, con objeto de evaluar la cantidad de ligante “activo” (working binder) en el RAP, debido a los efectos de absorción selectiva que sufría el betún en los áridos. En cuanto a los ensayos de fractura, estos demostraron que la presencia de RAP redujo la energía de fractura de las mezclas y, por tanto, la resistencia a la fisuración a bajas temperaturas.

Karlsson e Isacsson (2003) también llevaron a cabo un estudio para examinar la difusión del betún virgen. El mecanismo de difusión se investigó mediante la medición de las variaciones en la capacidad de absorción de energía del betún

durante un período de tiempo necesario para obtener y almacenar un espectro infrarrojo mediante la técnica de espectroscopia infrarroja FTIR-ATR (Fourier Transform Infrared Spectroscopy by Attenuated Total Reflectance). La figura 2.37 es un ejemplo de un espectrograma obtenido a lo largo de diferentes periodos de tiempos, en el que se muestra las diferencias de absorbancias en diferentes longitudes de onda.

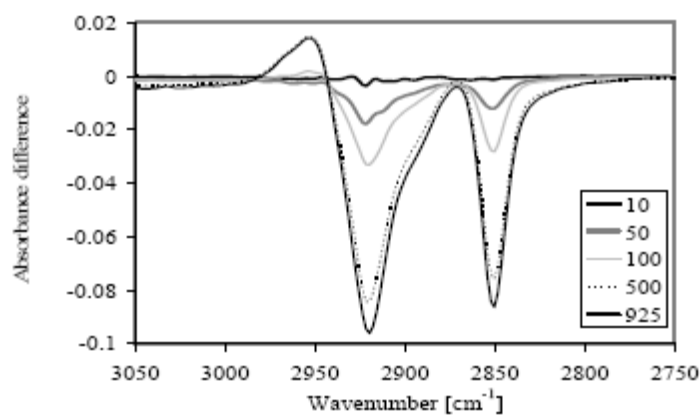


Fig.2.37: Espectro obtenido después de diferentes periodos de tiempo (10, 50, 100, 500, y 925 minutos) (Karlsson y Isacson, 2003a).

El actual método de diseño para una mezcla estándar conocido como Superpave (AASHTO M 323) establece que para un contenido de más de 25 % de RAP se debe de seguir el método desarrollado bajo el proyecto NCHRP 9-12 para evaluar el grado de mezclado y sugiere el uso de diagramas de mezclado para determinar la cantidad de RAP puede ser añadido usando un betún dado o cuál es el tipo de ligante a utilizar para el contenido de RAP deseado (McDaniel y Anderson 2001). En uno de los ensayos implica la evaluación de varios parámetros, como, por ejemplo, la rigidez del betún G^* a través del reómetro de corte dinámico, antes y después de haber pasado por el horno de la película delgada (*Rolling Thin Film Oven Test*). Estos ensayos se hacen en el ligante envejecido recuperado y el ligante virgen. Sin embargo, la desventaja de este método es que se asume un mezclado

total entre el betún del RAP y el betún virgen y como ha sido demostrado por varios estudios no siempre es posible (Huang et al. 2005, Bennert y Dongre 2010).

Bonaquist (2007) ha propuesto una metodología para evaluar el grado de mezclado entre ambos betunes mediante la comparación entre los resultados de los ensayos del betún y de la mezcla. El ligante es extraído de la mezcla simulando el 100% de la mezcla entre el betún del RAP y el virgen. Se determina el módulo de corte dinámico (G^*) mediante el uso de un reómetro (figura 2.38) y este valor se aplica en el modelo de Hirsch para así estimar el modulo complejo E^* de la mezcla (Christensen et al. 2003). Los valores estimados de E^* se comparan con el E^* medido y si existe una alta correlación entre de los datos obtenidos significa que hay un buen grado de mezclado.

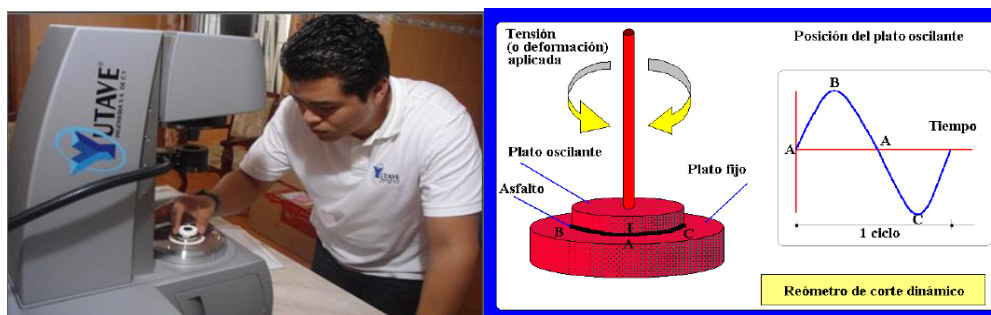


Fig. 2.38: Esquema de funcionamiento de Reómetro de corte dinámico (Fuente: Elaboración propia, 2010).

2.4.3 Agentes rejuvenecedores

El uso exitoso de los agentes rejuvenecedores debería revertir el proceso de envejecimiento del ligante del RAP, restaurar las propiedades del ligante para poder usarlo en otro período de servicio y hacer que el betún del RAP esté realmente "disponible" para la mezcla. Es necesario seleccionar cuidadosamente el agente rejuvenecedor para proporcionar las propiedades necesarias a corto y largo plazo, de la siguiente manera (Zaumanis y Mallick, 2014):

- Corto plazo. Los agentes rejuvenecedores deberían permitir la producción de una mezcla con alto contenido de RAP difundándose rápidamente en el betún del RAP y movilizándolo el asfalto envejecido para producir mezclas donde la envuelta sea uniforme. El agente rejuvenecedor debe ablandar el ligante para producir una mezcla trabajable que pueda ser fácilmente pavimentada (extendida) y compactada a la densidad requerida sin el riesgo de producir emisiones dañinas. La mayor parte del proceso de difusión debe completarse antes de que se permita el tráfico para evitar la reducción de la fricción y una mayor susceptibilidad a las roderas.

- A largo plazo. Los agentes rejuvenecedores deben reconstituir las propiedades químicas y físicas del ligante envejecido y mantener la estabilidad durante otro período de servicio. La reología del ligante tiene que ser modificada para reducir la fatiga y el potencial de agrietamiento a baja temperatura sin reblandecer demasiado el ligante para evitar problemas de formación de roderas en el pavimento. Además, se debe proporcionar suficiente adhesión y cohesión en la mezcla para evitar daños por humedad y desprendimientos.

2.4.3.1 Proceso de difusión de agentes rejuvenecedores sobre el RAP

La velocidad de difusión del agente rejuvenecedor en el ligante endurecido del RAP depende de las propiedades del betún del RAP y del agente rejuvenecedor. Esta velocidad aumenta cuanto más elevada sea la temperatura durante la mezcla, el acopio, el transporte y la compactación (Kuang et al., 2011; Zaumanis y Mallick, 2013; Karlsson e Isacsson, 2003). La difusión puede continuar durante la vida útil hasta que se alcanza el equilibrio (Huang et al., 2005; Tran et al., 2012; Carpenter y Wolosick, 1980). Puede suceder que parte del betún del RAP no se puede activar y se mantiene como "Black rock" (roca inerte) (Huang et al., 2005; Shirodkar et al., 2011; Zaumanis y Mallick, 2014).

Karlsson e Isacsson (2003) argumentaron que la velocidad de difusión se rige solo por la viscosidad de la fase de los maltenos del ligante sin la intervención de todos los componentes del betún. El proceso de difusión del agente de rejuvenecedor en

la película de ligante del RAP se ilustra en la Fig. 2.39 y 2.40 como lo describen Carpenter y Wolosick (1980).

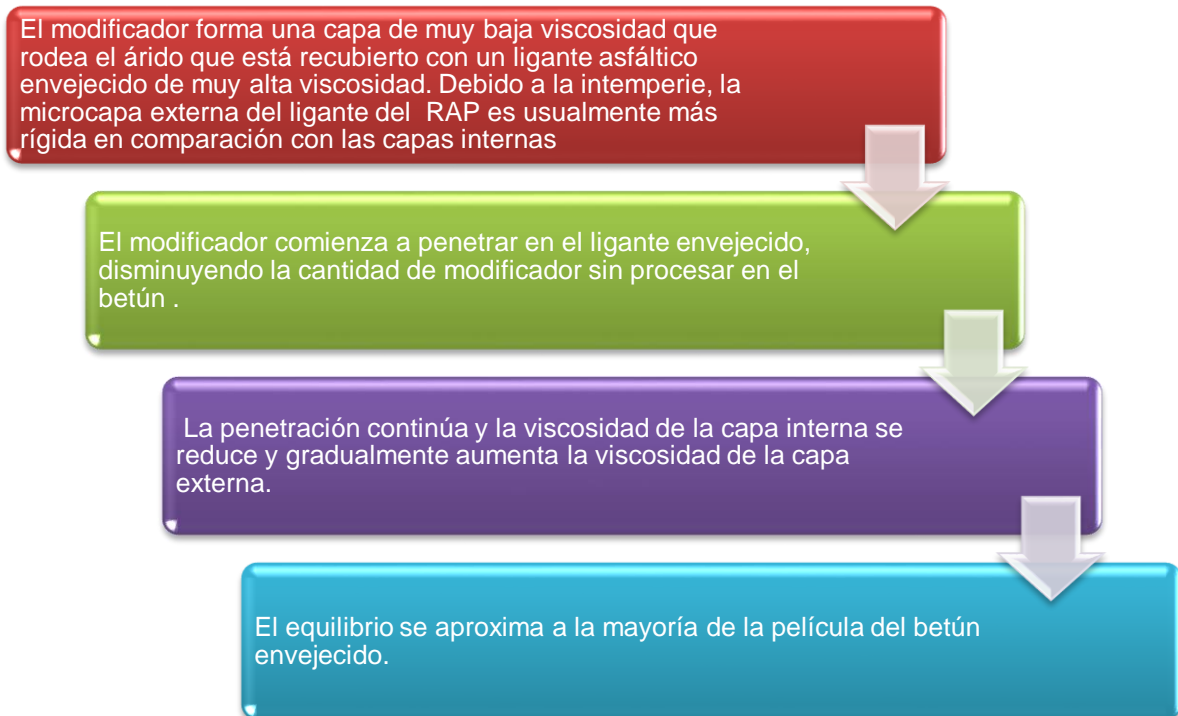


Fig. 2.39 Esquema descriptivo del proceso de difusión del agente rejuvenecedor en la película del betún contenido en el RAP (Fuente: Carpenter y Wolosick, 1980; Noureldin y Wood, 1987).

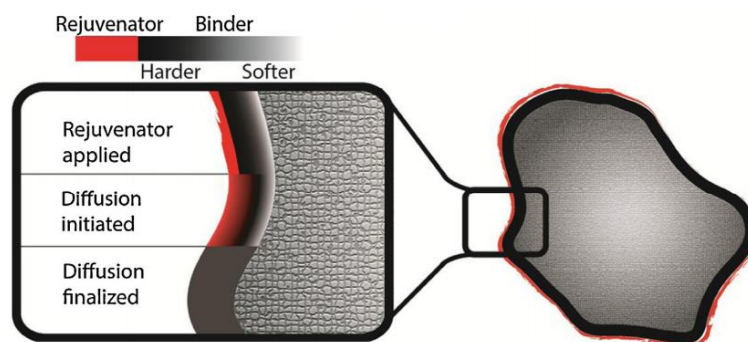


Fig. 2.40 Partícula de RAP al momento que se está difundiendo un agente rejuvenecedor en la película del betún del RAP (Fuente: Zaumanis et al. 2014).

Tenemos que garantizar la buena difusión del agente rejuvenecedor en la mezcla bituminosa reciclada porque de lo contrario puede afectar significativamente el rendimiento de la mezcla algunas de las investigaciones han concluido:

- Se asume, que cuando se elabora el diseño de la mezcla, la activación del betún contenido en el RAP es completa, mientras que el betún realmente se comporta parcialmente como "Black Rock ", por lo que tendrá un déficit de betún (Al-Qadi et al., 2007; Shirodkar et al., 2011), que puede conducir al agrietamiento y fallas por desprendimiento del pavimento.

- Alternativamente, suponer que el RAP se comporta completamente como "Black Rock", cuando en realidad el ligante del RAP realmente contribuye al desempeño de la mezcla. Esta aseveración podría ser incorrecta y conducirá a una mezcla blanda debido al alto contenido de betún (Howard et al., 2009; Al-Qadi et al., 2007). En consecuencia, esto puede causar deformaciones plásticas del pavimento.

-La difusión incompleta puede causar problemas en la predicción del comportamiento del pavimento en el laboratorio, especialmente para las propiedades a largo plazo, como la fatiga (Carpenter y Wolosick, 1980).

3. Metodología

Existen diversos ensayos para caracterizar las mezclas que constituyen las capas bituminosas convencionales de una estructura de pavimento flexible. En esta tesis doctoral, algunos de ellos serán aplicados a mezclas recicladas en caliente. Se seleccionarán aquellos ensayos que representan mejor las solicitaciones a las que se ve sometido el firme y que sean suficientes para caracterizar el material.

3.1 Plan de Trabajo

Durante el desarrollo de este trabajo se realizarán una serie de ensayos que permitirán evaluar el efecto de las condiciones de fabricación en las propiedades de las mezclas recicladas.

A continuación, se presenta la figura 3.1 que resume de una forma sencilla las diferentes fases experimentales de los trabajos que se han desarrollado en esta tesis y los ensayos de laboratorio que han sido utilizados para cada una de ellas.

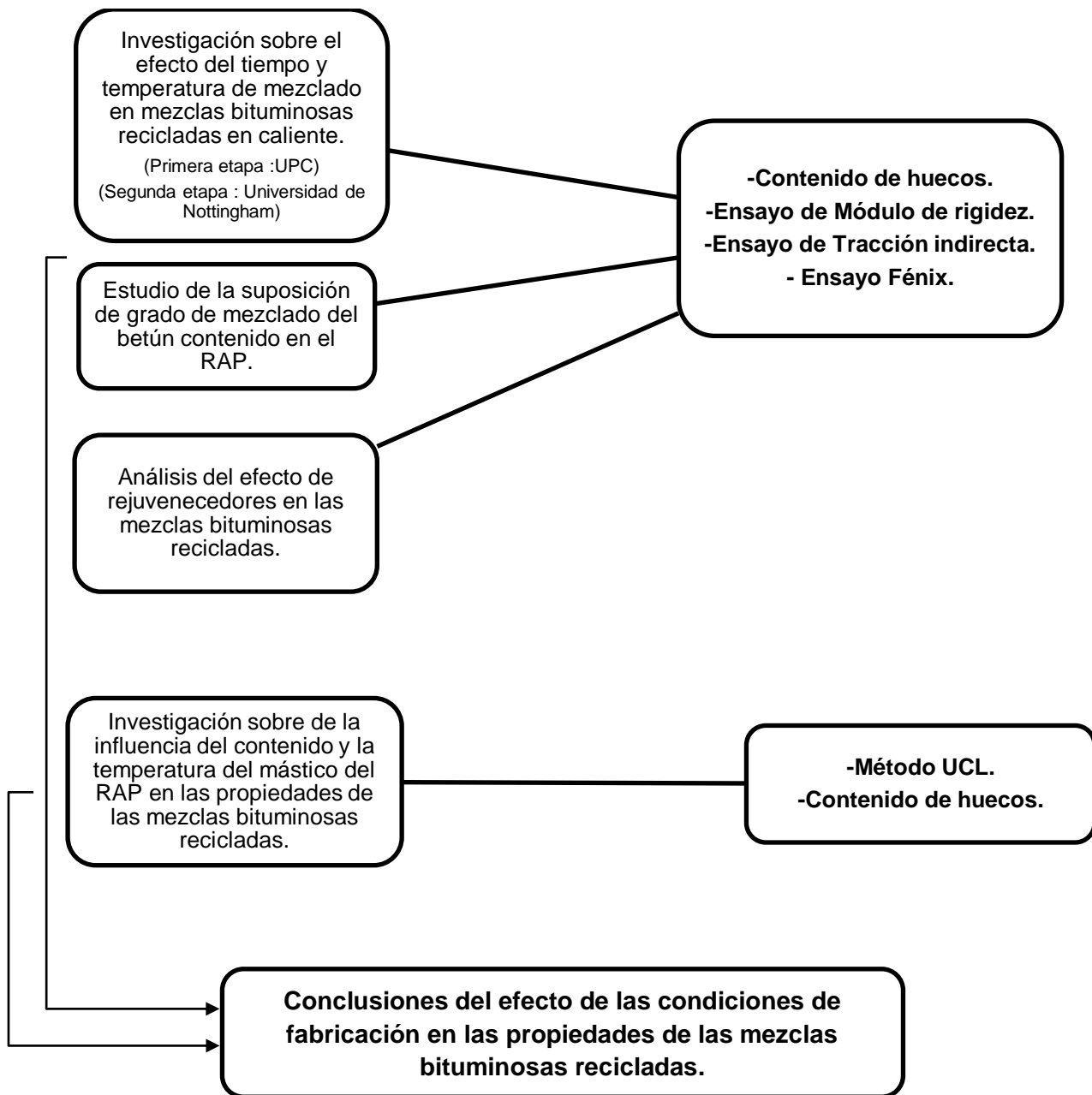


Fig. 3.1 Resumen del plan de trabajo de los estudios experimentales (Elaboración propia, 2017).

3.2 Investigación sobre el efecto del tiempo y temperatura de mezclado en mezclas bituminosas recicladas en caliente

Se han establecido 2 etapas de investigación en el que se estudiarán diferentes tiempos y temperaturas de mezclado, así como distintos materiales y equipos de laboratorio. La primera etapa fue llevada a cabo en la Universidad Politécnica de Cataluña y la segunda etapa se desarrolló en la Universidad de Nottingham.

Primera etapa

Materiales y métodos

La primera etapa se desarrolla en la Universidad Politécnica de Cataluña con especificaciones y métodos usados en España. Según el Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3) en su Artículo 542 parte 3 establece que, para la designación de las mezclas bituminosas, según la nomenclatura establecida en la norma UNE-EN 13108-1, se complementará con información sobre el tipo de granulometría que corresponda a la mezcla, con el fin de poder diferenciar mezclas con el mismo tamaño máximo de árido, pero con husos granulométricos diferentes.

Para ello, a la designación establecida en la norma UNE-EN 13108-1 se añadirá la letra D, S o G después de la indicación del tipo de ligante, según se trate de una mezcla densa, semidensa o gruesa, respectivamente.

El tipo de mezcla bituminosa que se utilizó para este estudio fue una mezcla tipo AC22S. Lo que quiere decir que todas las mezclas bituminosas (referencia y recicladas) tendrán un tamaño máximo nominal de 22mm, y una granulometría tipo semidensa. En una etapa preliminar se procedió a definir la granulometría de la mezcla de referencia por tanteos con el objeto de obtener un porcentaje de huecos del orden del 4 %.

El RAP procedía del fresado de una capa de rodadura de una vía urbana de la ciudad de Barcelona. Este material se tamizó en 3 fracciones con el objeto de obtener una muestra representativa y posteriormente se realizó la extracción del betún, para obtener el contenido de betún y su respectiva granulometría de acuerdo a la norma UNE-EN 933-1. La extracción del betún contenido en el RAP fue llevada a cabo según la norma EN 12697-01 Anexo B (B.1.5 Método con extractor centrífugo). Este paso es esencial para poder calcular la granulometría de los áridos de aportación y así obtener la curva de la granulometría objetiva. La corrección de la granulometría del RAP consistió en añadir una proporción de áridos vírgenes de tamaño grueso con objeto de reproducir la granulometría fijada de la mezcla de referencia (figura 3.2) Por lo que se mantuvo constante la granulometría de todas las mezclas recicladas con 20, 40 y 60 % de RAP.



Fig. 3.2 Proceso de extracción del betún del RAP (Elaboración Propia, 2015).

Se presenta un resumen de la distribución del tamaño de los áridos en la tabla 3.1. También se muestra la curva granulométrica de las mezclas estudiadas y de los áridos recuperados del RAP en la figura 3.3.

Tabla 3.1 Distribución del tamaño de los áridos de aportación y del RAP.

Abertura de los tamices Norma UNE-EN 933-2 (mm)	Huso granulométrico AC22S (%)	Distribución de tamaños de áridos objetivo (%)	Granulometría del RAP antes de la extracción (%)	Granulometría del RAP después de la extracción (%)
22	90-100	100	100	100
16	70-88	84	95	99
8	50-66	62	80	87
2	24-38	27	42	55
0.500	11-21	13	16	28
0.250	7-15	10	9	19
0.063	3-7	5	2	8

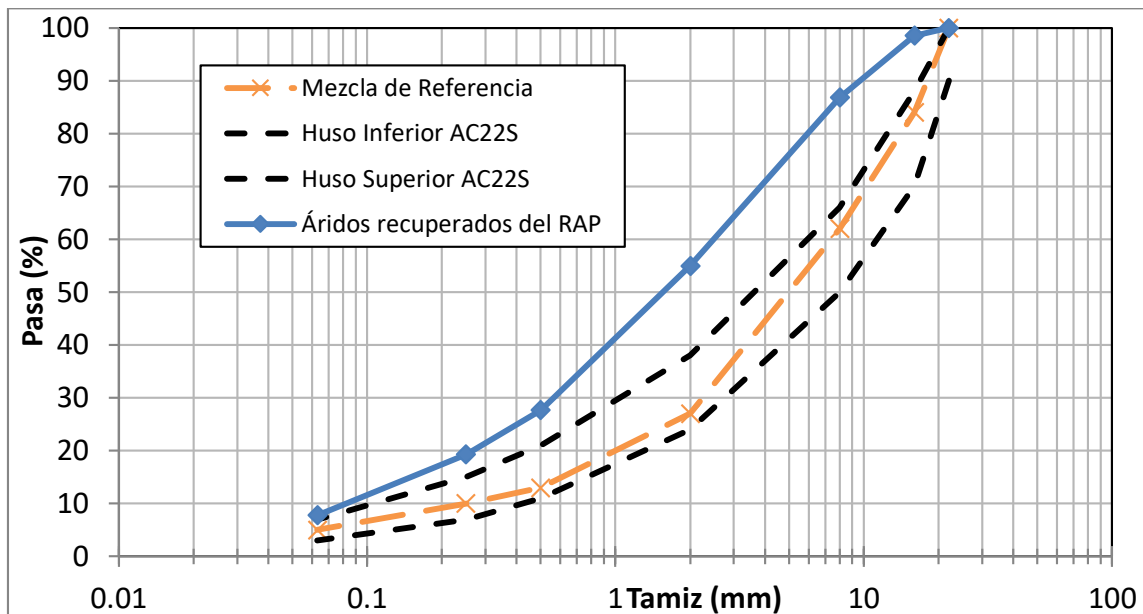


Fig.3.3 Curvas granulométricas de los áridos de las mezclas estudiadas (Propia, 2015).

Los áridos de aportación proceden de la cantera Foj en la región de Vallirana en las cercanías de la ciudad de Barcelona. Estos áridos son de naturaleza caliza, y se obtienen de la trituración de piedra de cantera o grava natural y están exentos de la presencia de grumos de arcilla, material vegetal, limos u otros materiales extraños. En la figura 3.4 se muestra una imagen los áridos de aportación utilizados.



Fig. 3.4 Áridos de aportación de origen calizo (Propia, 2017).

La mezcla bituminosa de referencia fue elaborada con un betún convencional 50/70 cuya granulometría se ha ajustado con objeto de obtener un contenido de huecos del 4%, con un contenido de betún del 4.25% sobre mezcla.

Las mezclas recicladas con un 20%, 40% y 60% de RAP se han fabricado con un betún de aportación más blando, 70/100 para compensar el alto grado de envejecimiento que presentaba el material a reciclar.

La empresa CEPSA fue la encargada de determinar el punto de penetración y el punto de reblandecimiento anillo y bola mediante las normas EN 1426 y EN 1427 respectivamente, cuyos resultados se recogen en el Anexo A. La tabla 3.2 recoge las características de todos los ligantes usados en este estudio.

El porcentaje de betún contenido en el RAP resultó de 3.5%, y además este betún presentaba un alto grado de envejecimiento debido a su baja penetración y elevado punto de reblandecimiento anillo y bola tal como se aprecia en la tabla 3.2. El porcentaje de betún total de todas las mezclas recicladas fue de 4.25% y a partir de estos 2 valores se calculó el porcentaje de ligante de aportación para cada mezcla reciclada.

Tabla 3.2. Características de los betunes utilizados.

Propiedad	Norma UNE EN	Unidad	Betún Mezcla de referencia	Betún Mezclas recicladas	
			50/70	70/100	Recuperado del RAP
Penetración	1426	0,1 mm	61	84	7
Punto de reblandecimiento AyB	1427	°C	50,9	47,2	87

Por otra parte, se presenta en la tabla 3.3, las condiciones de tiempo y mezclado, en la que se indican las temperaturas a las que se van a calentar el RAP y los áridos, así como los tiempos de mezclado establecidos para cada serie. Para esta etapa se elaboraron un total de 16 series de 12 probetas cada una. Específicamente se fabricó una serie de referencia sin RAP y para cada uno de los porcentajes de RAP que se utilizaron (**20%, 40% y 60%**) se fabricaron 5 series variando 3 parámetros: temperatura de áridos de aportación, temperatura del RAP o tiempo de mezclado.

Tabla 3.3 Condiciones de tiempo y temperatura de las mezclas de referencia y mezclas recicladas para cada porcentaje de RAP.

Mezcla	Temperatura Áridos (°C)	Temperatura RAP (°C)	Tiempo mezclado (min)	Temperatura del betún (°C)
Referencia	160	-	2.0	155
Serie 1	160	110	2.5	155
Serie 2	160	20	2.5	155
Serie 3	160	20	3.5	155
Serie 4	200	20	2.5	155
Serie 5	200	20	3.5	155

Se pretende en esta etapa, reproducir en el laboratorio, las condiciones similares de fabricación en planta. Existen 2 principales procesos de fabricación, el primero de estos procesos (serie 1) es la planta adaptada con dos tambores, donde el primer tambor se encarga de calentar el árido virgen en este caso será a 160°C y

un segundo tambor el RAP se precalienta a una cierta temperatura para ser mezclado en este otro caso será a 110°C.

El segundo de estos procesos de fabricación que se intenta reproducir en la serie 2, 3, 4 y 5, es la planta adaptada con un solo tambor que se encarga de calentar solo los áridos de aportación, vertiendo por separado el RAP a temperatura ambiente (20°C). Para compensar la falta precalentamiento del RAP se ha decidido o bien sobrecalentar los áridos de aportación a 200°C o aumentar el tiempo de mezclado (de 2.5 minutos a 3.5 minutos). Se han elegido estas temperaturas y estos tiempos de mezclado de acuerdo a la experiencia que se tiene en la fabricación en planta de mezclas asfálticas recicladas en España.

Se fabricaron series de 12 probetas y las propiedades evaluadas fueron: el contenido de huecos de aire, el módulo de rigidez a 20°C, la resistencia a tracción indirecta en seco y en húmedo a 15°C, de acuerdo con las normas UNE-EN 12697-8, UNE-EN 12697-26, UNE-EN 12697-12, respectivamente, y la resistencia a la fisuración mediante el empleo del ensayo Fénix a 20 ,5 y -5 °C. Todas las probetas se han elaborado de acuerdo con la compactación por medio de impactos (UNE-EN 12697-30) con 75 golpes por cara, excepto aquellas que se utilizarán para evaluar la sensibilidad al agua, que se han compactado con 50 golpes.

Para mantener las mismas condiciones de mezclado se ha decidido implementar una mezcladora mecánica y así conservar la energía de mezclado constante para cada probeta, tal y como se muestra en la figura 3.5.



Fig. 3.5 Mezcladora mecánica de la Universidad Politécnica de Cataluña (Elaboración propia, 2017).

En la figura 3.6 se presenta el diagrama de flujo del plan experimental que se va a llevar a cabo en esta primera etapa de esta investigación.

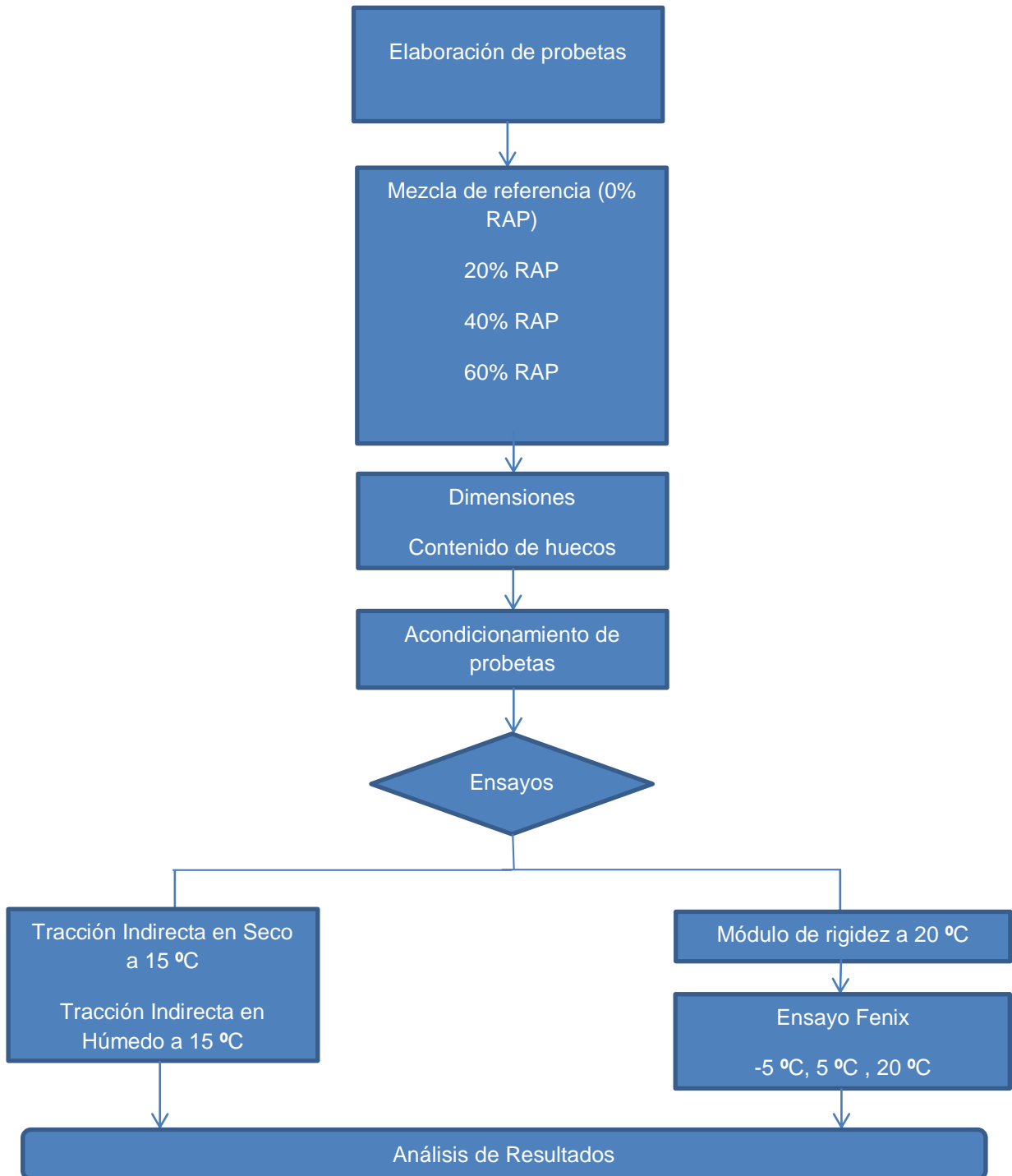


Fig. 3.6. Diagrama de flujo del plan experimental (1ª etapa) llevada a cabo en la Universidad Politécnica de Cataluña.

3.2.1 Descripción de ensayos empleados

A continuación, se describen los métodos de ensayo que se emplearán durante el desarrollo de esta tesis doctoral detallando las características de cada uno de los ensayos empleados.

3.2.1.1 Compactación

El primer paso de este trabajo es definir un procedimiento de compactación de las probetas que nos permita reproducir en el laboratorio la mezcla bituminosa reciclada en las similares condiciones que tras ser ejecutado en obra. Hemos decidido la compactación por medio de impactos debido a su facilidad y su simplicidad al momento de ejecutar este procedimiento, además este tipo de compactación es el más utilizado en España porque está especificado en el PG-3 para las mezclas convencionales y para las propiedades que se van a evaluar a continuación.

La compactación por impactos se recoge en la norma UNE-EN 12697-30: "Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 30: Preparación de la muestra mediante compactación de impactos". Esta norma se aplica a mezclas bituminosas (tanto fabricadas en laboratorio como obtenidas mediante toma de muestras a pie de obra) en las que la granulometría del árido no sea mayor de 22.4 mm a mezcla se compacta por medio de un peso deslizante que se deja caer desde una altura establecida, un número determinado de veces, dentro de un periodo de tiempo especificado, sobre la parte superior de la probeta de mezcla bituminosa, colocada sobre el pedestal de compactación. En la figura 3.7 se muestra un esquema del equipo.



Fig.3.7 Compactador de impactos de la Universidad Politécnica de Cataluña (Elaboración propia, 2017).

3.2.1.2 Contenido de huecos

Una vez fabricadas las probetas, se determinará el contenido de huecos, para la cual se seguirá el procedimiento descrito en la norma UNE-EN 12697-8, con el fin de analizar la influencia en estas propiedades volumétricas. El contenido de huecos se calculará con la siguiente ecuación (3.1).

$$V_m = \frac{\rho_m - \rho_b}{\rho_m} \times 100\% (v/v) \quad , \quad (3.1)$$

donde, V_m : contenido de huecos de aire de la mezcla, expresado como un porcentaje con una aproximación del 0.1 % (v/v); ρ_m : densidad máxima de la mezcla, expresada en kilogramos por metro cúbico (kg/m^3); ρ_b : densidad aparente de la probeta, expresada en kilogramos por metro cúbico (kg/m^3).

3.2.1.3 Módulo de rigidez

Para la obtención del valor del módulo de rigidez se utilizarán las probetas fabricadas en el laboratorio mediante el procedimiento de compactación definido anteriormente. Esto con el fin de que las probetas tengan un porcentaje de compactación similar al alcanzado en la obra para que sea representativo.

La norma UNE-EN 12697-26, en el Anexo C, (AENOR, 2006a) muestra el procedimiento a seguir para realizar este ensayo, en el que se caracteriza la rigidez de mezclas bituminosas mediante el ensayo de tracción indirecta aplicado a probetas compactadas bajo la acción de una carga sinusoidal. Este método será el que se utilice para la determinación de módulos de rigidez y se realizará a una temperatura de 20°C. Se utilizará un actuador que pueda aplicar una carga a lo largo del diámetro vertical de la probeta a través de las pletinas de carga. La carga tendrá forma de medio seno, y se aplicarán impulsos de carga repetidos que se alternarán con periodos de descanso, como se indica en la figura 3.8.

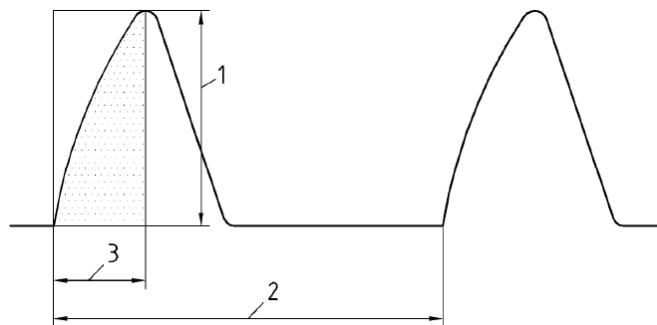


Fig. 3.8 Forma del impulso de carga. (Norma UNE-EN 12697:26).

Donde, 1. carga máxima; 2. periodo de repetición de los impulsos; 3. tiempo de subida. Se aplicarán 10 impulsos de acondicionamiento para permitir que el equipo se ajuste a la magnitud de la carga y a su duración, para obtener la deformación horizontal diametral y el tiempo de carga especificados. Se aplicarán otros 5 impulsos más para determinar el factor de superficie de carga, y, por último, se

aplicarán los 5 impulsos definitivos con los que se calculará el módulo de rigidez mediante la siguiente ecuación (3.2):

$$S_m = \frac{F \times (v + 0.27)}{(z \times h)} \quad (3.2)$$

donde, S_m : módulo de rigidez medido, expresado en Mega Pascales (MPa); F : valor máximo de la carga aplicada, expresado en Newton (N); z : amplitud de la deformación horizontal obtenida durante el ciclo de carga, medida en milímetros (mm); h : espesor medio de la probeta, medido en milímetros (mm); v : coeficiente de Poisson.

La obtención del módulo de rigidez se realiza mediante un ensayo no destructivo, por lo que un mismo espécimen utilizado para determinar el módulo podría ser ensayado de nuevo para la determinación de otro parámetro distinto. Es importante mencionar que el valor de la carga máxima se debe de ajustar para alcanzar una deformación horizontal transitoria máxima de referencia del 0.005% en el diámetro de la probeta.

3.2.1.4 Resistencia a tracción indirecta

La resistencia a la tracción indirecta, es un parámetro que tiene relación directa con el comportamiento de la capa de un firme, ya que va a dar información sobre la cohesión-adhesión en la mezcla. Sirve de base para la realización de muchos ensayos de caracterización de las mezclas bituminosas.

La determinación de la resistencia a tracción indirecta se va a realizar mediante el ensayo descrito en la UNE-EN 12697-23. El principio del método para la determinación de la resistencia a tracción indirecta consiste en imponer una deformación por compresión diametral a una probeta cilíndrica situada horizontalmente entre los platos de una prensa, de forma que los esfuerzos aplicados al espécimen estén sobre dos generatrices opuestas.

Para poder cargar la probeta a compresión en un plano diametral vertical, se requiere un dispositivo de sujeción de la probeta a través del cual se materialice dicho plano de carga. Este dispositivo, se presenta en la figura 3.9. La parte superior del bastidor de ensayo debe estar guiada para asegurar un desplazamiento paralelo de las bandas de carga. Como parte de este dispositivo y en contacto directo con dos generatrices diametralmente opuestas de la probeta, se colocan dos bandas de carga para evitar la rotura local de la probeta.

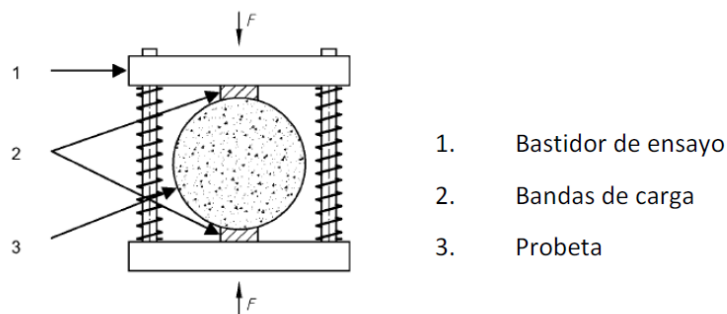


Fig. 3.9. Dispositivo para ensayo de tracción indirecta (Norma UNE-EN 12697:23).

Esta configuración de carga provoca un esfuerzo de tracción relativamente uniforme en todo el diámetro del plano de carga vertical, y esta tracción es la que agota la probeta y hace que rompa en el plano diametral. La resistencia a la tracción indirecta es el esfuerzo de tracción máximo calculado en función de la carga máxima aplicada cuando se produce la rotura de la probeta y se calcula mediante la ecuación 3.3:

$$RTI = \frac{2 * P}{\pi * d * h} \quad , \quad (3.3)$$

donde, *RTI*: resistencia a la tracción indirecta (MPa); *P*: carga máxima aplicada (N); *h*: altura de la probeta (mm); *d*: diámetro de la probeta (mm).

El equipo a emplear para la realización de estos ensayos puede ser una prensa de compresión mecánica o hidráulica, que pueda proporcionar durante la aplicación

de la carga una velocidad uniforme de desplazamiento del sistema de carga de 50 (+-) 2 mm/min.

El ensayo de sensibilidad al agua, mostrado en la norma UNE-EN 12697-12 “Determinación de la sensibilidad al agua de probetas de mezclas bituminosas”, se basa en el ensayo de tracción indirecta para medir la susceptibilidad de una mezcla bituminosa a la acción del agua. Compara el valor de la resistencia de un grupo de probetas acondicionadas al aire con el valor de la resistencia obtenida en un segundo grupo de probetas acondicionadas en agua.

Una vez que se tenga un conjunto de 6 probetas compactadas mediante el procedimiento de impactos a 50 golpes, se divide en dos subconjuntos del mismo número de probetas equivalentes que se acondicionaran de la misma manera tal y como se muestra en la figura 3.10. Un subconjunto se mantendrá en seco al aire a 20°C, mientras el otro, se satura y se mantiene sumergido en un baño de agua a 40°C de temperatura durante 72 horas. Después de este acondicionamiento, se colocan las probetas a temperatura de ensayo en cámara de aire con termostato controlado las probetas secas, y mediante inmersión en baño de agua a temperatura de ensayo las probetas húmedas.



Fig. 3.10 Conjunto de probetas compactadas para ser ensayadas a tracción indirecta (elaboración propia, 2016).

Se determina la resistencia a la tracción indirecta de ambos subconjuntos de acuerdo con lo establecido en la norma UNE-EN 12697-23 a una temperatura de

15°C. A continuación, se determina la relación entre la resistencia a tracción indirecta del subconjunto acondicionado en agua y la resistencia a la tracción indirecta del subconjunto acondicionado en seco, y se expresa como un porcentaje, ecuación (3.4).

$$ITSR = 100 \times \frac{ITS_w}{ITS_d}, \quad (3.4)$$

donde, *ITRS*: razón de la resistencia conservada en porcentaje (%); *ITS_w*: resistencia a la tracción indirecta vía húmeda (MPa); *ITS_d*: resistencia a la tracción indirecta vía seca (MPa).

3.2.1.5 Ensayo Fénix

El procedimiento del ensayo Fénix consiste en someter media probeta cilíndrica con una fisura inducida de 6 mm de longitud, fabricada mediante el procedimiento de compactación por impactos, o bien, mediante el compactador giratorio, a un esfuerzo de tracción con una velocidad de desplazamiento constante (1 mm/min) a una temperatura. Además de los procedimientos de compactación en laboratorio, también se puede aplicar a testigos extraídos en obra. Una vez preparada la probeta con la fisura inducida, se fijan unas placas de acero a las dos secciones de la cara plana, separadas por la entalladura. Estas, a su vez, son fijadas a los soportes de la prensa, permitiendo un movimiento de rotación respecto a las fijaciones, tal cual se ilustra en la figura 3.11.



Fig. 3.11 Espécimen sometido al Ensayo Fénix (Pérez-Jiménez, F. et al., 2010).

Durante la ejecución del ensayo se van registrando mediante un equipo de adquisición de datos las cargas generadas, en función del desplazamiento y se obtiene una curva carga-deformación tal y como se muestra en la figura 3.12.

A partir de la curva de esfuerzos resultante del ensayo se han definido distintos parámetros que se han relacionado con las características mecánicas y resistentes de la mezcla:

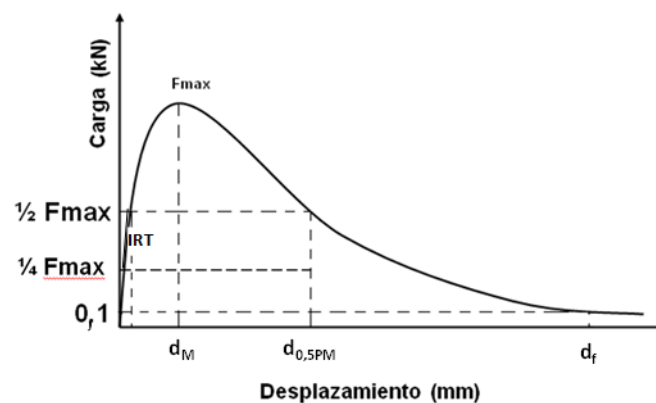


Fig. 3.12 Curva carga-desplazamiento obtenida (Pérez-Jiménez, F. et al., 2010).

Índice de rigidez a tracción: es la pendiente de la curva carga-desplazamiento entre el 25 y el 50% de la carga máxima.

$$IRT = \frac{F_{50} - F_{25}}{(d_{50} - d_{25})}, \quad (3.5)$$

donde, IRT es el índice de rigidez a tracción, en kN/mm; F_{50} es el valor correspondiente al 50% de la carga máxima, en kN; F_{25} es el valor del 25% de la carga máxima, en kN; d_{50} es el desplazamiento en el 50% de la carga máxima, en mm; y d_{25} es el desplazamiento en el 25% de la carga máxima, en mm.

Energía total de rotura (disipada): está representada por la integral del área bajo la curva de carga-desplazamiento, dividida por la superficie de fractura.

$$G_D = \frac{\int_0^{df} F(x).dx}{S}, \quad (3.6)$$

donde, G_D es la energía disipada, en J/m²; F es la fuerza en función del desplazamiento, en N; x es el desplazamiento, en m; S es la superficie de fractura, en m² y este se calcula como producto del espesor de la probeta por la diferencia entre el radio de la probeta y la profundidad de la ranura; y df es el desplazamiento final del ensayo, cuando la carga alcanza 0.1 kN, en mm.

Índice de tenacidad: es el producto del área de la curva post-pico por el desplazamiento realizado por la prensa hasta reducir la carga al 50% de la máxima.

$$IT = \frac{\int_{d_M}^{d_{0,5PM}} F(x).dx}{S} * (d_{0,5PM} - d_M), \quad (3.7)$$

donde IT es el índice de tenacidad, en (J/m²).mm; F es la fuerza aplicada en función del desplazamiento, en N; S es la superficie de fractura, en m²; d_M es el desplazamiento correspondiente a la F_{max} , en m; y $d_{0,5PM}$ es el desplazamiento en la parte descendente correspondiente al 0,5 de la F_{max} , en mm.

Desplazamiento correspondiente al 50% de la carga máxima en la zona post-pico: este parámetro, que se ha definido en el párrafo anterior y que es alternativo al IT , también puede valorar la ductilidad y tenacidad de la mezcla.

Segunda etapa

Una vez concluida la primera etapa, y analizados los resultados obtenidos, se continuó con una segunda etapa que consistió principalmente en elegir otro RAP con diferentes características respecto al utilizado en la primera etapa. Además, se aumentaron los tiempos de mezclado, así como el contenido de betún en la mezcla reciclada. Esta segunda etapa fue llevada a cabo en la Universidad de Nottingham ubicada en Reino Unido con materiales (áridos de aportación, RAP y betún de aportación) de procedencia local.

Materiales y métodos utilizados

La mezcla de referencia y las recicladas fueron tipo AC22S. Estas granulometrías se han mantenido iguales a las de la etapa 1.

El RAP procedía del fresado de una capa de rodadura de una vía urbana en la ciudad de Londres, Reino Unido. La empresa responsable del fresado fue Conway Company, empresa dedicada a la conservación de carreteras en Reino Unido.

Se presenta un resumen de la distribución del tamaño de los áridos en la tabla 3.4., así como también se muestran las curvas granulométricas empleadas en esta etapa en la figura 3.13.

Tabla 3.4 Distribución del tamaño de los áridos de aportación y del RAP.

Abertura de los tamices Norma UNE-EN 933-2 (mm)	Huso granulométrico AC22S (%)	Distribución de tamaños de áridos objetivo (%)	Granulometría del RAP antes de la extracción (%)	Granulometría del RAP después de la extracción (%)
22	90-100	100	100	100
16	70-88	79	98	100
8	50-66	58	75	79
2	24-38	31	40	45
0.500	11-21	16	18	25
0.250	7-15	11	14	18
0.063	3-7	5	4	7

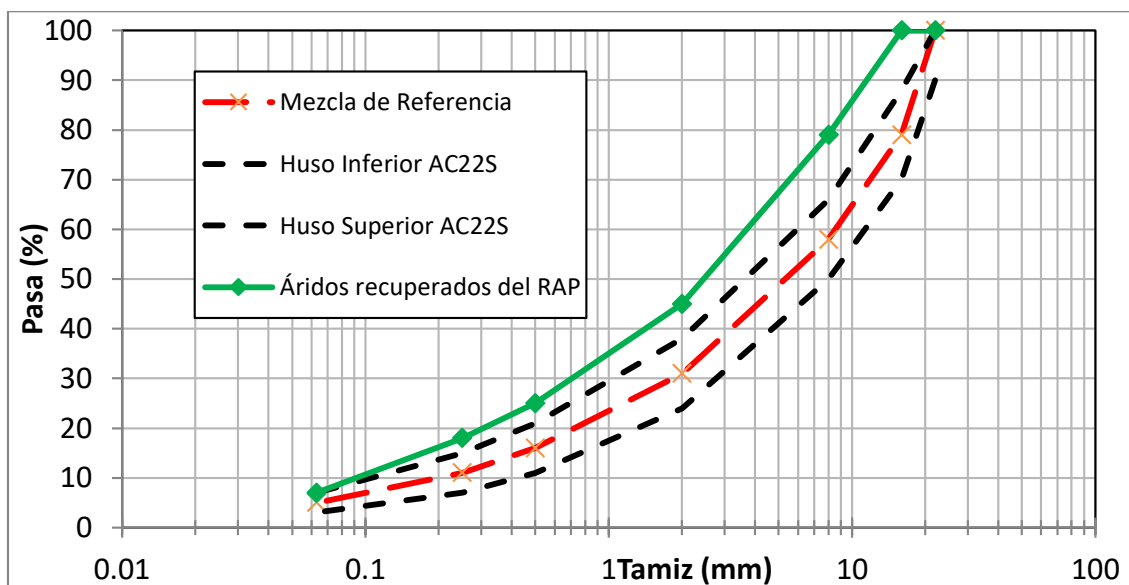


Fig.3.13 Curvas granulométricas de las mezclas estudiadas (Elaboración propia, 2017).

La mezcla bituminosa de referencia fue elaborada con un betún convencional 40/60 y árido calizo, cuya granulometría objetivo se ha ajustado con objeto de obtener un contenido de huecos del 4%, con un contenido de betún del 5.0%. Las mezclas recicladas con 60% de RAP se han fabricado con un betún más blando, 70/100.

Se ha extraído y recuperado el betún del RAP de acuerdo con las normas EN 12697-01 y EN 12697-03 respectivamente. Se han determinado la penetración a 25°C y el punto de reblandecimiento siguiendo las normas EN 1426 y EN 1427 como puede observarse en la tabla 3.5, que resume las características de los todos los ligantes usados en esta segunda etapa. El porcentaje de betún contenido en el RAP fue de 5.7%. El porcentaje de betún final de la mezcla reciclada fue de 5.0 % y este se calculó la suma del ligante envejecido más el ligante de aportación.

Tabla 3.5. Características de los betunes empleados en la segunda etapa.

Propiedad	Norma UNE EN	Unidad	Betún Mezcla de referencia	Betún Mezclas recicladas	
			40/60	70/100	Recuperado del RAP
Penetración	1426	0,1 mm	49	81	21
Punto de reblandecimiento A y B	1427	°C	56	50	74

Se probaron diferentes combinaciones de temperaturas y tiempos de mezclado para evaluar su influencia en la mezcla resultante (tabla 3.6). El efecto de estos parámetros se estudió en mezclas recicladas que contenían solo un 60% de RAP y los resultados se compararon con una mezcla de referencia, teniendo especial cuidado de mantener la granulometría constante para todos los casos.

Tabla 3.6 Condiciones de tiempo y temperatura de las mezclas de referencia y mezclas recicladas con 60% de RAP.

Mezcla	Temperatura Áridos (°C)	Temperatura RAP (°C)	Tiempo mezclado (min)	Temperatura del betún (°C)
Referencia	160	-	2	155
Serie 1	160	110	2.5	155
Serie 2	160	110	5.0	155
Serie 3	160	20	2.5	155
Serie 4	160	20	5.0	155

Se fabricaron un total de 60 probetas divididas en 4 series de mezclas recicladas con 60% de RAP y en 1 serie para la mezcla de referencia. Se elaboraron 12 probetas por serie y las propiedades evaluadas fueron las mismas que en la primera etapa: los huecos, el módulo de rigidez a 20°C, la resistencia a tracción indirecta en seco y en húmedo a 15°C, de acuerdo con las normas UNE-EN 12697-8, UNE-EN 12697-26, UNE-EN 12697-12, respectivamente, y la resistencia a la fisuración mediante el empleo del ensayo Fénix, las temperaturas en esta etapa fueron 20 y 5°C. Todas las probetas se han fabricado de acuerdo con la compactación por medio de impactos (UNE-EN 12697-30) con 75 golpes por cara, excepto aquellas que se utilizaron para evaluar la sensibilidad al agua, que se compactaron con 50 golpes.

Del mismo modo que en la etapa anterior, para mantener las mismas condiciones de mezclado, se ha decidido implementar una mezcladora mecánica para así conservar la energía de mezclado constante para cada muestra, tal y como se presenta en la figura 3.14.



Fig. 3.14 Mezcladora mecánica de la Universidad de Nottingham (Elaboración propia, 2017).

En la figura 3.15 se presenta el diagrama de flujo del plan experimental que se llevó a cabo en la segunda etapa de la tesis.

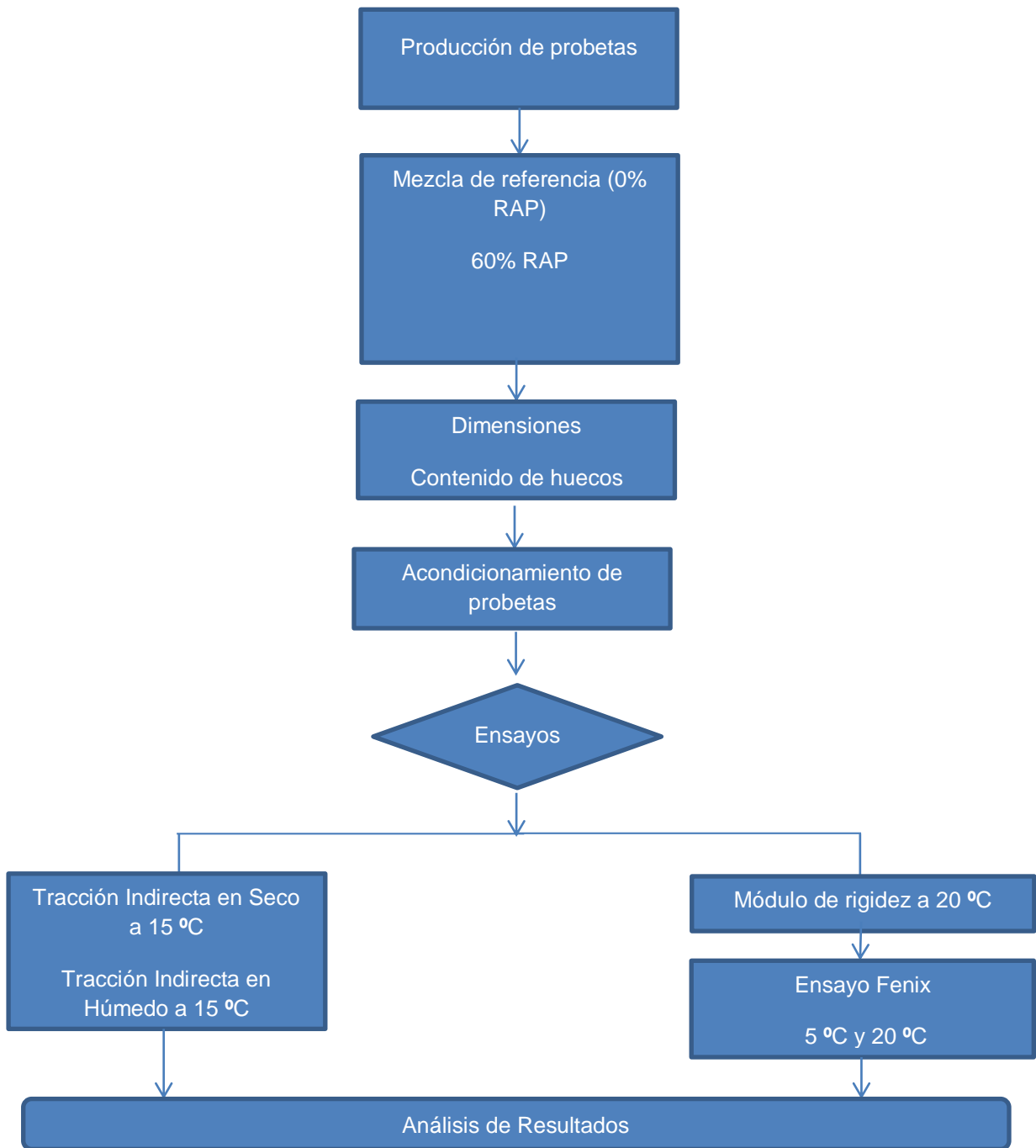


Fig. 3.15. Diagrama de flujo del plan experimental (2ª etapa) realizada en la Universidad de Nottingham.

3.3 Análisis del efecto de los rejuvenecedores en las mezclas bituminosas recicladas

Cuando se trabaja con ligantes muy envejecidos o con altos porcentajes de RAP es común recurrir al empleo de rejuvenecedores para restaurar las propiedades del ligante envejecido.

El propósito de este estudio es valorar las propiedades mecánicas de una mezcla reciclada con 60% de RAP, empleando rejuvenecedores y comparar los resultados obtenidos con una mezcla de referencia sin reciclar con el fin de analizar el efecto del rejuvenecedor en las propiedades de la mezcla de referencia evaluadas en el estudio anterior.

Materiales y métodos

Se ha utilizado el mismo RAP de la primera etapa de la “Investigación sobre el efecto del tiempo y temperatura de mezclado en mezclas bituminosas recicladas en caliente” (ver apartado 3.2). Las mezclas de referencia y las recicladas con 60% de RAP también han sido las mismas que las de la primera etapa.

Para las mezclas recicladas rejuvenecidas se ha utilizado el rejuvenecedor SYLVAROAD™ RP1000 de Arizona BV, empresa subsidiaria de Kraton Corporation, con dotaciones variables: 0, 5, 10 y 20% sobre el peso del ligante contenido en el RAP. Este rejuvenecedor es de origen orgánico, diseñado especialmente para compensar el efecto negativo del envejecimiento del betún presente en el RAP (figura 3.16). A través del proceso de envejecimiento, el betún se vuelve cada vez más rígido y frágil debido a la modificación química que sufre, causada principalmente por un incremento del contenido de asfaltenos y, por lo tanto, de la polaridad del betún.



Fig. 3.16 Rejuvenecedor SYLVAROAD™ RP1000 de Arizona BV y aplicación de este sobre el RAP (Elaboración propia, 2017).

El agente rejuvenecedor orgánico usado en este estudio permite dispersar las fracciones altamente polares. Por lo tanto, el principal beneficio de este agente es esperado a bajas temperaturas, al devolver la flexibilidad al material y recuperar su resistencia a la fisuración. Este agente rejuvenecedor obtenido a partir de recursos renovables (pinos), permite movilizar y restaurar el ligante envejecido.

Se ha comprobado experimentalmente que una dotación de agente rejuvenecedor del 5% sobre el peso del ligante envejecido es capaz de restaurar este ligante en 2 grados PG (Superpave Performance Grade). Este efecto es consistente tanto para un betún blando como para uno duro, (Porot y Grady, 2016). El aditivo es compatible y miscible con el betún, siendo efectivo a largo plazo y aún después de haber sufrido un proceso de envejecimiento. Se trata de un producto de color amarillo claro, líquido a temperatura ambiente, con un alto punto de inflamación, lo que garantiza un uso seguro en la planta asfáltica. En el Anexo B de esta tesis podemos ver más con más detalle las propiedades del rejuvenecedor.

Para llevar a cabo esta investigación, se han producido 5 series de 12 probetas mediante compactador de impacto. De las 5 series, 1 ha sido la serie de referencia (0% RAP), la primera serie se fabricó con 60% de RAP sin rejuvenecedor. Las últimas 3 series se fabricaron en las mismas condiciones que la serie 1, añadiendo

rejuvenecedor para mejorar las condiciones del betún viejo del RAP. En la tabla 3.7 queda representado un resumen de las condiciones de las probetas.

Tabla 3.7. Características de las mezclas estudiadas.

Mezcla	Porcentaje de RAP (%)	Rejuvenecedor sobre peso del betún RAP (%)	Temperatura Áridos (°C)	Temperatura RAP (°C)	Tiempo mezclado (min)	Probetas
Referencia	0	0	160	-	2	12
Serie 1	60%	0	160	110	2.5	12
Serie 2		5	160	110	2.5	12
Serie 3		10	160	110	2.5	12
Serie 4		20	160	110	2.5	12

Las propiedades evaluadas han sido el contenido de huecos, el módulo de rigidez a 20°C, la resistencia a tracción indirecta en seco y en húmedo a 15°C, de acuerdo con las normas UNE-EN 12697-8, UNE-EN 12697-26, UNE-EN 12697-12, respectivamente, y la resistencia a la fisuración mediante el empleo del ensayo Fénix a -5°C, 5°C y 20°C. Todas las probetas se han fabricado con 75 golpes por cara, excepto aquellas que se han utilizado para evaluar la sensibilidad al agua, que se han compactado con 50 golpes por cara.

3.4 Estudio de la suposición de grado de mezclado del betún contenido en el RAP

Muchas administraciones públicas limitan la cantidad de RAP que se puede colocar en las diferentes capas de pavimento. Una de las principales razones por las que se limita el uso del RAP es la incertidumbre que existe en el grado de mezclado entre el RAP y los materiales vírgenes. La pregunta que debe responderse es qué

parte del betún contenido en el RAP se mezcla con el betún virgen de aportación. ¿Hay un 100% de mezclado o un 0% de mezclado? La respuesta es probablemente que ambos betunes se mezclen en un cierto porcentaje ubicado entre los dos extremos.

En la actualidad, en España no existe un método estandarizado aprobado por las administraciones para predecir el grado de mezclado en laboratorio, por lo que se deben realizar pruebas para evaluar los efectos de la interacción entre el ligante del RAP y el ligante virgen en el comportamiento mecánico de las mezclas con RAP. Basándose en estas premisas, el objetivo de este estudio se centra en determinar la suposición de grado de mezclado del betún del RAP en una mezcla reciclada con 2 tasas (40% y 60%) de RAP. Además, otro objetivo ha sido proporcionar una metodología que cuantifique la suposición de grado de mezclado del betún envejecido que se produce en mezclas con alto porcentaje de RAP.

Hemos analizado los posibles escenarios de suposición de grado de mezclado del betún del RAP en la mezcla, estos han sido: que el RAP actué como una roca inerte sin suposición de grado de mezclado del betún (Black Rock); que el betún del RAP se mezcle con el betún nuevo de aportación dando como resultado una suposición de grado de mezclado total (Complete Blending); y que una parte del betún del RAP se mezcle con el betún virgen causando así una suposición de grado de mezclado parcial (Partial Blending). A continuación, se describirá las metodologías de los 3 posibles escenarios de suposición de grado de mezclado de este estudio.

Simulación de roca inerte sin grado de mezclado del betún del RAP (Black Rock)

Cuando no hay suposición de grado de mezclado implica la situación en que no hay interacción entre el RAP y el betún virgen. Partiendo de aquí, se propuso una hipótesis que consistió en que el betún contenido en el RAP no se movilizó, por lo que solamente el betún virgen de aportación fue el que envolvió a todos los componentes (RAP y áridos de aportación).

Materiales y métodos

Se ha dado continuidad a los trabajos realizados con anterioridad, por lo tanto, se utilizaron los materiales de la misma procedencia que los empleados hasta el momento. También se utilizarán las mismas condiciones de tiempo y temperatura de mezclado de la serie 1 recogida en la sección 3.2 (T áridos: 160°C, T RAP: 110°C, Tiempo de mezclado: 2.5 minutos).

Para llevar a cabo esta parte del estudio se comenzó por dosificar las respectivas partes del RAP (40% y 60%), para posteriormente extraer el betún del RAP de acuerdo a la norma EN 12697-01 Anexo B (B.1.5 Método con extractor centrifugo) tal y como se muestra en la figura 3.17. Esta extracción del betún se hizo con el fin de obtener los áridos recuperados del RAP sin ningún tipo residuo del betún envejecido.



Fig. 3.17 Extracción del Betún del RAP (Elaboración propia, 2015).

Tras varias extracciones del betún del RAP, se obtiene la granulometría del árido recuperado. En la tabla 3.8 se recoge la granulometría del RAP utilizado en esta parte del estudio.

Tabla 3.8 Granulometría del árido del RAP antes y después de la extracción del ligante.

	Porcentaje medio que pasa (% en masa)						
	Tamices UNE (mm)						
	22	16	8	2	0.5	0.25	0.063
RAP en acopio	100	95	80	42	16	9	2
RAP tras extracción	100	99	87	55	28	19	8

En la figura 3.18 se muestran las curvas de distribución de los tamaños de los áridos del RAP antes y después de la extracción del ligante.

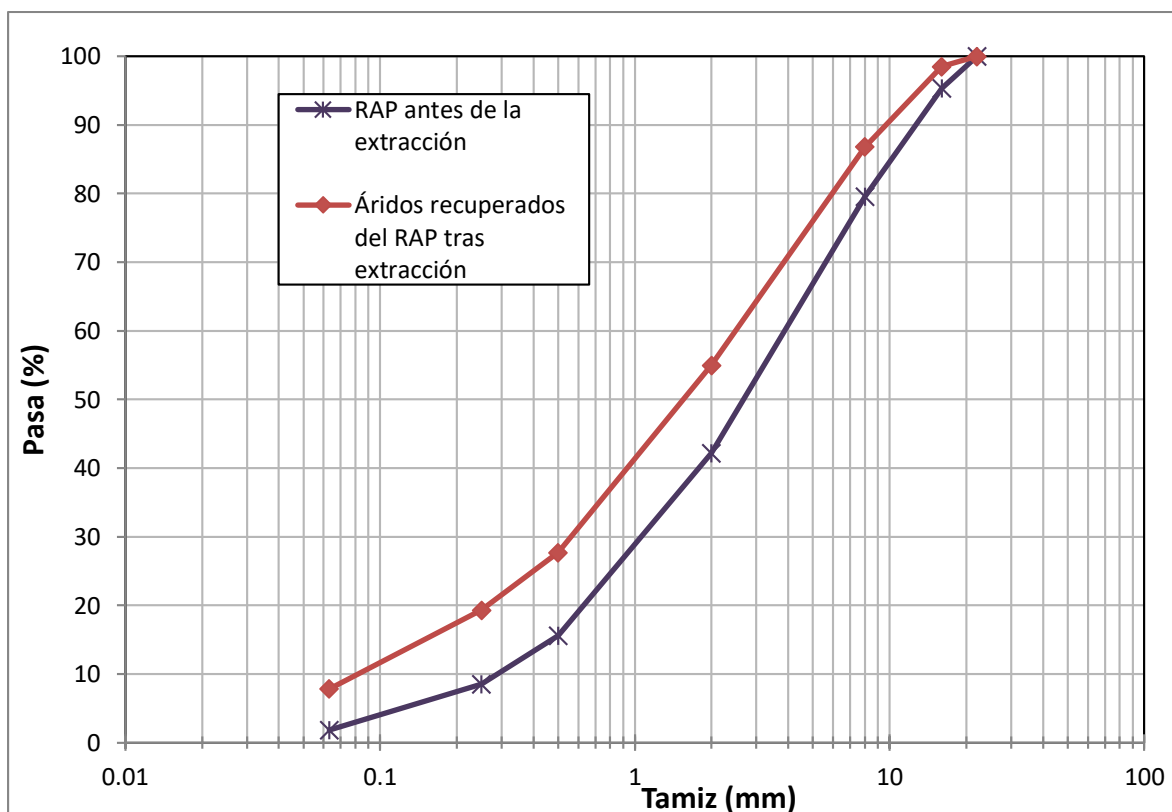


Fig. 3.18 Distribución de los tamaños de los áridos del RAP (Elaboración propia, 2017).

Para la producción de las probetas que se han utilizado en los estudios previos, se han calculado los porcentajes correspondientes de áridos de aportación con base a la granulometría del RAP después de la extracción. Sin embargo, en este estudio de simulación del grado de mezclado nulo, se han calculado los áridos de aportación, pero en base a la granulometría del RAP antes de la extracción, la razón es porque el RAP con sus aglomeraciones se va a comportar como si se tratara de

un árido más a incorporar dentro de la mezcla. Es decir, no se considerará exclusivamente el tamaño de los áridos si no el árido envuelto y se simulará este árido. Las granulometrías resultantes de las mezclas para el escenario de simulación del grado de mezclado nulo con 40% y 60% se presentan en la figura 3.19.

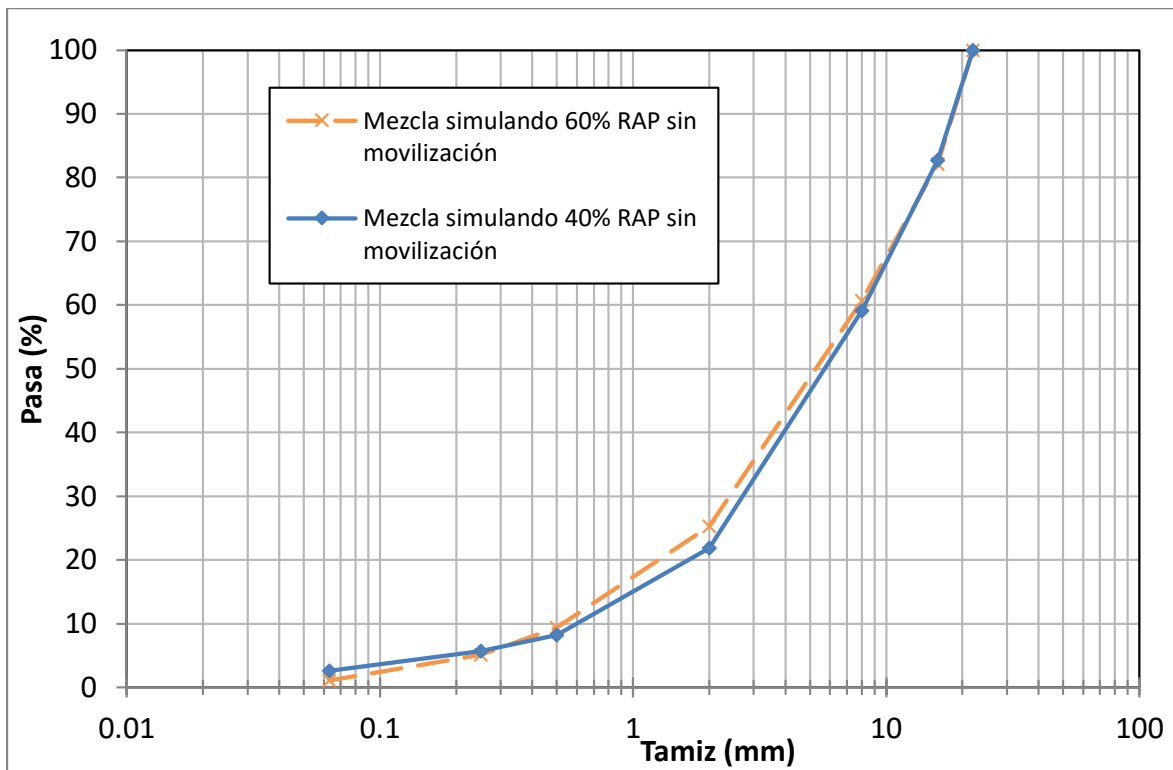


Fig. 3.19 Granulometría de los áridos del RAP y de aportación para simular el supuesto grado de mezclado nulo en este estudio (Elaboración propia, 2017).

Cuando se elaboró el estudio “Investigación sobre el efecto del tiempo y temperatura de mezclado en mezclas bituminosas recicladas en caliente” (primera etapa) se ha supuesto que el betún contenido en el RAP se iba a mezclar con el betún de aportación para obtener un betún total de 4.25 % tal y como se muestra en la tabla 3.9.

Tabla 3.9. Características de las mezclas usadas en el estudio anterior (primera etapa).

RAP(%)	Árido de aportación	Betún de aportación	Betún de aportación(%)	Betún del RAP(%)	Betún total(%)
40	60	70/100	2.90	1.35	4.25
60	40		2.16	2.09	4.25

Teniendo en cuenta los porcentajes de betún utilizados anteriormente, se ha establecido que para simular el grado de mezclado nulo del betún del RAP hay que considerar al betún de aportación como único ligante entre los áridos del RAP y los áridos de aportación tal y como lo muestra la tabla 3.10.

Tabla 3.10. Porcentajes de betún total utilizados en el escenario de roca inerte.

RAP(%)	Árido de aportación	Betún de aportación	Betún de aportación(%)	Betún del RAP(%)	Betún total(%)
40	60	70/100	2.90	-	2.90
60	40		2.16	-	2.16

Suposición de grado de mezclado completo (total)

Se ha establecido una hipótesis en la que se simula este escenario de supuesto grado de mezclado, que consiste en argumentar que cuando se da el mezclado completo, los 2 betunes se fusionan completamente para comportarse como un solo betún con características combinadas tanto en penetración como en punto de reblandecimiento.

Para cada uno de los casos estudiados (40 y 60% de RAP) se tiene que elegir el betún que más represente las características del supuesto grado de mezclado total. Para seleccionar los ligantes de aportación, predecimos el comportamiento de la mezcla final de betunes, una vez que se hayan mezclado los dos ligantes (RAP y aportación). Para ello hemos decidido usar la hipótesis usada en la ecuación 3.9 que muestra el cálculo de la penetración del ligante y el punto de reblandecimiento anillo y bola tal y como lo establece la Anexo A de la norma UNE-EN 13108-1 2006.

$$(a + b) \log(\text{pen}_{mezcla}) = a \log(\text{pen}_1) + b \log(\text{pen}_2), \quad (3.9)$$

donde, pen_{mezcla} : es la penetración calculada del ligante; pen_1 : es la penetración del ligante recuperado del asfalto reciclado; pen_2 : es la penetración del ligante añadido; a y b : son las porciones en masa de ligante del asfalto reciclado (a) y del ligante añadido (b) en la mezcla; $a + b = 1$.

Para el cálculo del punto de reblandecimiento del ligante de la mezcla se aplica la siguiente ecuación 3.10:

$$T_{RyB\text{ mez}} = a \times T_{RyB1} + b \times T_{RyB2}, \quad (3.10)$$

donde, $T_{RyB\text{ mez}}$: es el punto de reblandecimiento calculado del ligante en la mezcla que contiene el asfalto reciclado; T_{RyB1} : es el punto de reblandecimiento del ligante recuperado del asfalto reciclado; T_{RyB2} : es el punto de reblandecimiento del ligante añadido; a y b :son las porciones en masa de ligante del asfalto reciclado (a) y del ligante añadido (b) en la mezcla; $a + b = 1$.

Con las ecuaciones anteriores se ha calculado la penetración y el punto de reblandecimiento de la interacción entre betunes del RAP y aportación tal y como se recoge en la tabla 3.11.

Tabla 3.11. Penetración y punto de reblandecimiento de la mezcla de los betunes del RAP y aportación.

Propiedad	Unidad	Betún Mezclas recicladas		Mezcla del betún del RAP y aportación	Mezcla del betún del RAP y aportación
		Aportación 70/100	Recuperado del RAP	40% de RAP	60% de RAP
Penetración	0,1 mm	84	7	38	24
Punto de reblandecimiento AyB	°C	47,2	87	60	67

Las características estimadas en esta tabla 3.11 (penetración y punto de reblandecimiento anillo y bola) se pueden reproducir mediante los siguientes betunes: un betún de tipo 35/50 para el caso de 40 % de RAP y un betún de tipo 15/25 para el caso de 60% de RAP. Las características de estos betunes se recogen en la tabla 3.12.

Tabla 3.12 Características de los betunes empleados para la suposición del grado de mezclado total

Propiedad	Unidad	Betunes para la suposición de grado de mezclado total	
		Aportación 35/50	Aportación 15/25
Penetración	0,1 mm	39	24
Punto de reblandecimiento A y B	°C	53	62

En este escenario a diferencia del anterior, los áridos que conformaron las mezclas de la suposición del grado de mezclado total serán los áridos recuperados del RAP tras la extracción del betún descritos anteriormente y los áridos de aportación de tipo calizo. Para calcular la granulometría de los áridos de aportación se tomó como referencia la granulometría de los áridos recuperados del RAP. En la figura 3.20 se muestra la gráfica de las granulometrías utilizadas en este escenario.

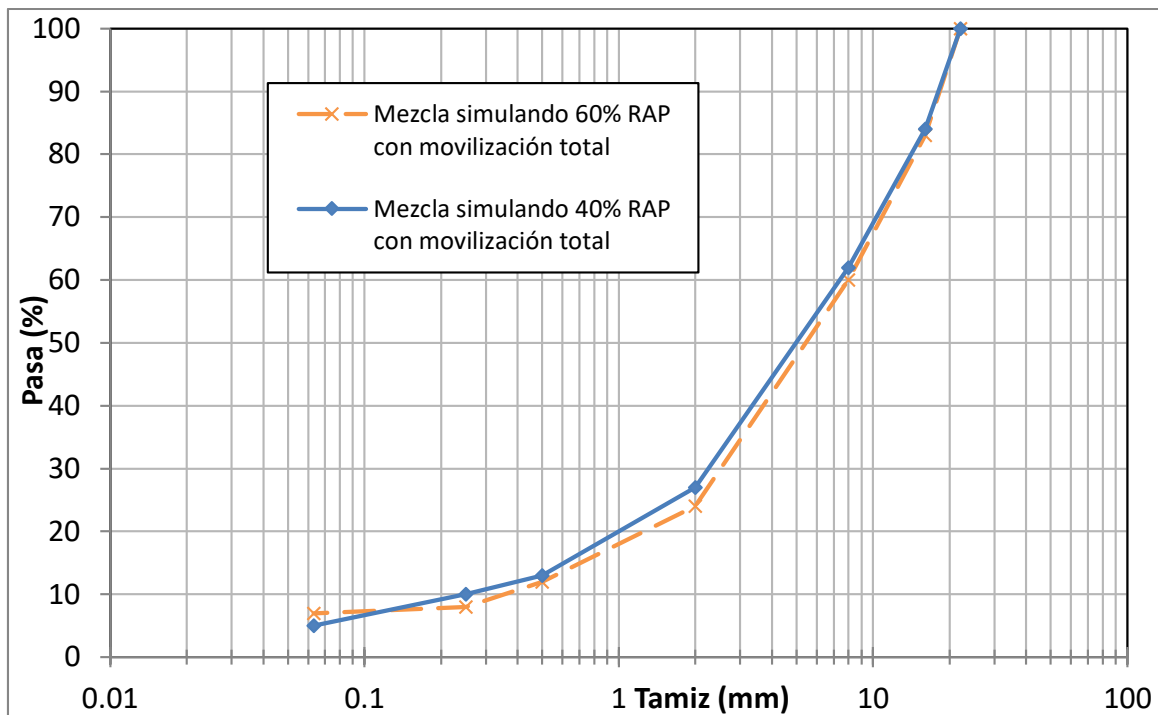


Fig. 3.20 Granulometría de los áridos del RAP y de aportación para simular el grado de mezclado total en este estudio (Elaboración propia, 2017).

Se han elaborado 4 series de 6 probetas y las propiedades evaluadas han sido: el contenido de huecos de aire, el módulo de rigidez a 20°C, de acuerdo con las normas UNE-EN 12697-8, UNE-EN 12697-26, respectivamente, y la resistencia a la fisuración mediante el empleo del ensayo Fénix a 20 y 5 °C. Todas las probetas se fabricaron de acuerdo con la compactación por medio de impactos (UNE-EN 12697-30) con 75 golpes por cara. En la tabla 3.13 se recogen las características de las series que van llevadas en este escenario.

Tabla.3.13 Características de las series de probetas para el estudio de la suposición del grado de mezclado total

Escenario de grado de mezclado	Áridos de aportación (%)	Áridos recuperado del RAP (%)	Betún tipo	Penetración (0.1 mm)	Punto de reblandecimiento AyB (°C)	Betún de Aportación (%)
Nulo	60	40	70/100	84	47.2	2.90
Nulo	40	60	70/100	84	47.2	2.16
Total	60	40	35/50	39	53.6	4.25
Total	40	60	15/25	24	60.0	4.25

Suposición del grado de mezclado parcial

El mezclado parcial argumenta que solo una parte RAP se ha interrelacionado con el ligante virgen. Por lo se ha hecho la hipótesis de mezclado parcial suponiendo que la mezcla reciclada original de la etapa anterior es la que realmente la represente, es decir, a la espera de obtener un resultado intermedio a los 2 anteriores.

3.5 Investigación sobre de la influencia del contenido y la temperatura del mástico del RAP en las propiedades de las mezclas bituminosas recicladas mediante el Método UCL

El mástico de una mezcla bituminosa es una parte muy significativa para el buen comportamiento de estas mezclas, ya que es el encargado de proporcionar la cohesión-adhesión a todos sus componentes. Para el análisis del comportamiento del mástico se ha decidido llevar a cabo en el Laboratorio de Caminos de la Universidad Politécnica de Cataluña, un estudio sobre la influencia que tiene el mástico del RAP en el comportamiento de las mezclas recicladas, variando las condiciones de fabricación y comparando el efecto del rejuvenecedor.

Materiales y métodos empleados

Se intentó dar continuidad a los estudios realizados en los estudios anteriores, por lo que se utilizaron los materiales de la misma procedencia que los empleados hasta ahora.

EL RAP que se utilizó fue el mismo que en la etapa 1 de la “Investigación sobre el efecto del tiempo y temperatura de mezclado en mezclas bituminosas recicladas en caliente” descrito en capítulos anteriores de esta tesis. Para el alcance de este estudio es necesario dividir el RAP en 2 fracciones finas separadas por el tamiz 0.63 mm, ya que solamente utilizaremos la parte del RAP que pasa por dicho tamiz tal y como se muestra en la figura 3.21.

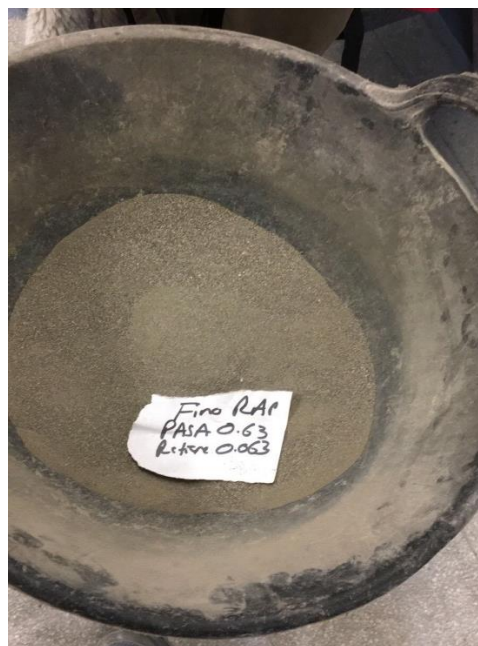


Fig.3.21 Aspecto de la fracción fina del RAP 0.63-0.063 mm (Elaboración propia, 2016).

Teniendo en cuenta que hemos separado la fracción del RAP que pasa por el tamiz 0.63 mm se procedió a realizar una caracterización detallada de dicho material, mediante la extracción del ligante contenido en él y obteniendo la granulometría y su contenido de betún, estos datos serán necesarios para el diseño de las mezclas. En la tabla 3.14 se presentan los valores promedios de las extracciones del betún.

Tabla 3.14 Promedio de los porcentajes de los materiales después de varias extracciones.

Materiales del RAP	Proporción (%)
Árido 0.63/0.063	71.1%
Filler	22.0%
Betún	6.9%

Los áridos de aportación que se utilizaron para la elaboración de las probetas es de origen granítico de acuerdo con lo especificado con la normativa del método UCL®. Este árido granítico proviene de la cantera Berta y el filler de aportación es el que hemos utilizado en las anteriores investigaciones de esta tesis doctoral (a excepción de la etapa en Nottingham), el cual es de origen calizo y proveniente de la cantera Foj.

Los ligantes de aportación fueron los que hemos utilizados a lo largo de esta tesis doctoral, los cuales han sido los betunes de tipo 50/70 y 70 /100, esto con el fin de darle continuidad a los trabajos realizados anteriormente. Las principales características se describen en la tabla 3.15.

Tabla 3.15. Características de los ligantes bituminosos empleados en este estudio.

Propiedad	Norma UNE EN	Unidad	Betún Mezcla de referencia	Betún Mezclas recicladas
			50/70	70/100
Penetración	1426	0,1 mm	61	84
Punto de reblandecimiento A y B	1427	°C	50.9	47.2

Para llevar a cabo este estudio se ha decidido utilizar una distribución de tamaños de los áridos diferente a la que está establecida en las normas del método del UCL convencional, ya que en este método se analiza el desempeño de distintos ligantes

y no cuentan con el áridos que pasen el tamiz UNE 0.63 mm. El objetivo de este estudio es analizar la influencia del mástico por lo que hemos decidido incluir partículas finas y filler que nos permita observar la variación de la capacidad adhesiva (capacidad conjunta de cohesión y adhesión) del mástico del RAP.

Método UCL

El Método Universal de Caracterización de Ligantes (UCL®) fue desarrollado en la Universidad Politécnica de Cataluña por los doctores Pérez Jiménez y Miró Recasens. Basado en la aplicación del ensayo Cántabro, es un procedimiento directo y sencillo que evalúa las propiedades funcionales del ligante a partir de la determinación del grado de cohesión-adhesión que proporciona a una mezcla patrón y de la observación de cómo esta cualidad varía con la temperatura, la acción del agua y el envejecimiento. Se ha decidido utilizar este método debido a los buenos resultados que se han obtenido en estudios anteriores y a la tecnología de fácil aplicación.

El ensayo Cántabro de pérdida por desgaste consiste en introducir, en el tambor utilizado para el ensayo de desgaste de Los Angeles, un espécimen fabricado por medio de la compactación por impactos (UNE-EN 12697-30) y someterla al ensayo de desgaste a 300 revoluciones sin colocar carga abrasiva. Las revoluciones en la máquina del desgaste Los Ángeles dan lugar a un proceso de deterioro en los especímenes, de tal forma en que las cargas del tránsito lo hacen en los firmes. En la figura 3.22 se muestra la máquina del desgaste de Los Ángeles y diferentes especímenes ensayados con el método UCL.



Fig. 3.22 Máquina para el desgaste de los Ángeles y probetas (Elaboración propia, 2017).

La cohesión-adhesión se valora determinando las pérdidas en el ensayo Cántabro, en seco y a 25°C. La susceptibilidad térmica se analiza variando la temperatura de las probetas que son sometidas al ensayo Cántabro y determinando las Curvas de Estado o variación de las pérdidas con la temperatura. Estas pérdidas de peso de la probeta referida se expresan en tanto por ciento del peso inicial y se calculan de acuerdo con la ecuación 3.8.

$$P_c = \left[\frac{(P_i - P_f)}{P_i} \right] * 100, \quad (3.8)$$

donde, P_c : pérdidas al Cántabro (%); P_i : peso inicial(g); P_f : peso final (g).

Una parte de la energía que se genera en cada impacto es absorbida por la deformación elástica del material, otra parte se elimina con las deformaciones plásticas y el resto de la energía no se puede eliminar causando la fisuración, rotura o disgregación.

Particularmente en esta tesis doctoral se pretende aplicar el método UCL® para valorar la cohesión-adhesión que el mástico del RAP (en las diferentes condiciones de mezclado) aporta a la mezcla, así como su variación por efecto de la temperatura.

Tanto para la mezcla de referencia, como para las mezclas recicladas, se ha utilizado una granulometría de tipo discontinua con un 80% de árido grueso, que

pasa por el tamiz UNE 5.0 mm y queda retenido en el tamiz UNE 2.5 mm y el 20% de árido fino, que pasa por el UNE 0.63 mm y queda retenido en el UNE 0.063 mm.

En la tabla 3.16 se observa la distribución de los tamaños que presentan los áridos utilizados para fabricar los diferentes especímenes de acuerdo con la compactación por medio de impactos (UNE-EN 12697-30) y que posteriormente fueron ensayadas al Cántabro. También se muestra en la figura 3.23 la curva granulométrica de los áridos empleados.

Tabla 3.16 Granulometría de los áridos para formar las probetas para el método UCL.

Tamices UNE (mm)	5	2.5	0.63	0.063
Porcentaje que pasa (% en masa)	100	20	20	4.8

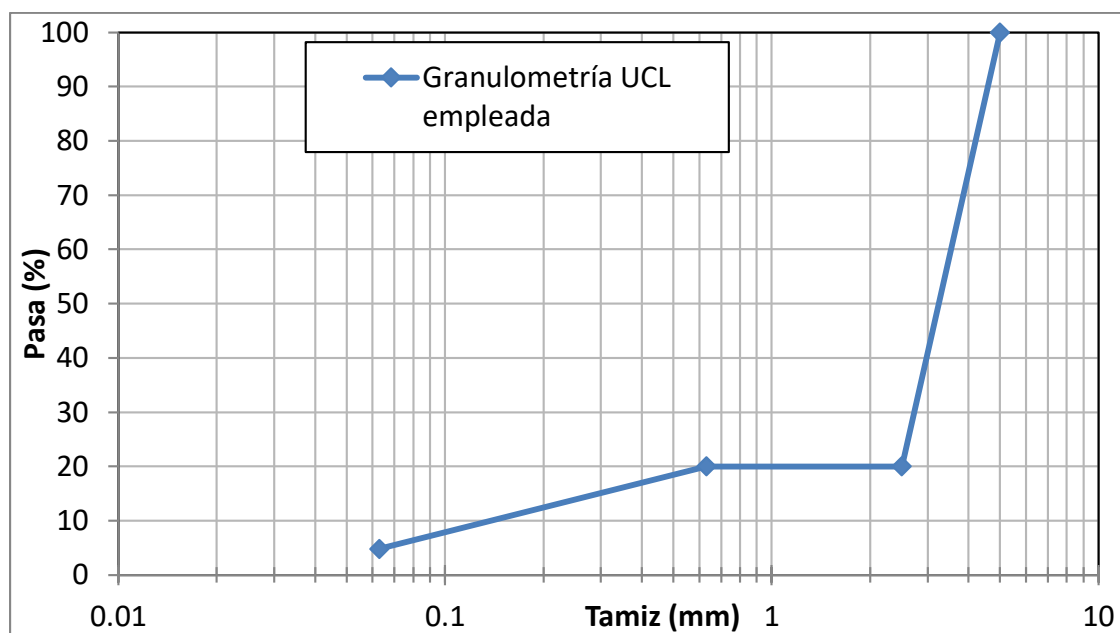


Fig. 3.23 Curva granulométrica de los áridos de las probetas ensayadas al Cántabro (Elaboración propia, 2017).

Para el alcance de este estudio se diseñó una serie de referencia (0% RAP) y unas series de mezclas recicladas donde solamente se usó RAP en la fracción fina, por lo tanto, en todas las mezclas que se fabricarán, el 80% del árido restante de la fracción 2.5/5 mm será árido de aportación.

Hemos decidido incluir el rejuvenecedor SYLVAROAD™ RP1000 de Arizona BV, usado anteriormente en esta tesis, con 2 dotaciones diferentes: 10 y 20 % sobre el peso del ligante contenido en el mástico del RAP. Este rejuvenecedor se aplicó directamente al mástico del RAP antes de ser mezclado con materiales vírgenes.

Se ha dosificado una serie de referencia con un 4.25% de betún total, las 4 series restantes hechas con el mástico del RAP se dosificarán con un 3.69 % de betún de aportación. En la tabla 3.17 se muestran las características de las series fabricadas en este estudio. Estas probetas han sido ensayadas a diferentes temperaturas (-20, -5, 10, 25, 40 y 60°C) para observar su efecto que tiene en el comportamiento de las mezclas.

Tabla.3.17 Series de probetas fabricadas para el estudio del mástico mediante el método UCL.

Serie	Fracción 2,5/5 mm Áridos de aportación	Fracción fina 0,63 /0,063 mm	Temperatura RAP (°C)	Betún tipo	Betún nuevo (%)	Probetas
Referencia	80%	Aportación 20%	----	50/70	4.25	18
2	80%	RAP 20%	20	70/100	3.69	18
3	80%	RAP 20%	110	70/100	3.69	18
4	80%	RAP 20%+ 10% rejuvenecedor	110	70/100	3.69	18
5	80%	RAP 20%+ 20% rejuvenecedor	110	70/100	3.69	18
Total						90

4. Análisis de resultados

En este apartado se describen y analizan los resultados obtenidos en los ensayos llevados a cabo a lo largo de esta investigación. Es importante mencionar que la mayor parte del proyecto de investigación se basó en analizar el efecto del tiempo y temperatura de mezclado en mezclas bituminosas recicladas en caliente. Los demás estudios que se realizaron en esta tesis doctoral sirvieron como complemento del primero. Algunos de estos estudios llevados a cabo han sido incluidos en diferentes artículos publicados en revistas indexadas con factor de impacto y en diferentes congresos nacionales e internacionales especializados en el área de las mezclas bituminosas.

4.1 Investigación sobre el efecto del tiempo y temperatura de mezclado en mezclas bituminosas recicladas en caliente

4.1.1 Primera Etapa

Esta etapa se ha desarrollado en el Laboratorio de Caminos de la Universidad Politécnica de Cataluña, tal y como se describe en el capítulo 3. A continuación se muestran los resultados de: contenido de huecos, módulo de rigidez, resistencia a tracción indirecta y parámetros del ensayo Fénix.

4.1.1.1 Contenido de huecos

En las tablas 4.1, 4.2 y 4.3 quedan representados los valores medios calculados del contenido de huecos de aire para los diferentes contenidos de RAP.

Tabla 4.1 Valores medios del contenido de huecos para la mezcla de referencia y mezcla reciclada con un 20% de RAP.

		0 % RAP	20% RAP				
		Referencia	1	2	3	4	5
Condición de Mezclado		Árido: 160°C 2:00 min	Árido 160°C RAP 110°C 2:30 min	Árido 160°C RAP 20°C 2:30 min	Árido 160°C RAP 20°C 3:30 min	Árido 200°C RAP 20°C 2:30 min	Árido 200°C RAP 20°C 3:30 min
75 Golpes	Contenido de Huecos (%)	3.9	3.9	4.4	4.1	4.2	3.8
50 Golpes	Contenido de Huecos (%)	5.3	4.9	5.7	5.4	6.0	5.6

Tabla 4.2 Valores medios del contenido de huecos para la mezcla reciclada con un 40% de RAP.

		40% RAP				
		1	2	3	4	5
Condición de Mezclado		Árido 160°C RAP 110°C 2:30 min	Árido 160°C RAP 20°C 2:30 min	Árido 160°C RAP 20°C 3:30 min	Árido 200°C RAP 20°C 2:30 min	Árido 200°C RAP 20°C 3:30 min
75 Golpes	Contenido de Huecos (%)	4.4	6.2	5.7	5.7	5.3
50 Golpes	Contenido de Huecos (%)	5.7	7.4	70.4	6.6	6.3

Tabla 4.3 Valores medios del contenido de huecos para la mezcla reciclada con un 60% de RAP.

		60% RAP				
		1	2	3	4	5
Condición de Mezclado		Árido 160°C RAP 110°C 2:30 min	Árido 160°C RAP 20°C 2:30 min	Árido 160°C RAP 20°C 3:30 min	Árido 200°C RAP 20°C 2:30 min	Árido 200°C RAP 20°C 3:30 min
75 Golpes	Contenido de Huecos (%)	6.8	8.8	7.9	8.7	7.4
50 Golpes	Contenido de Huecos (%)	7.2	10.5	9.9	9.9	8.5

Posterior a la obtención de los valores medios, se procedió a graficar cada uno de los parámetros obtenidos para entender mejor el comportamiento de las mezclas.

En las siguientes gráficas (4.1-4.6) se muestra cómo cambia este valor a medida que se va agregando RAP. Las columnas son los valores medios de los huecos y además se ilustran las barras de error.

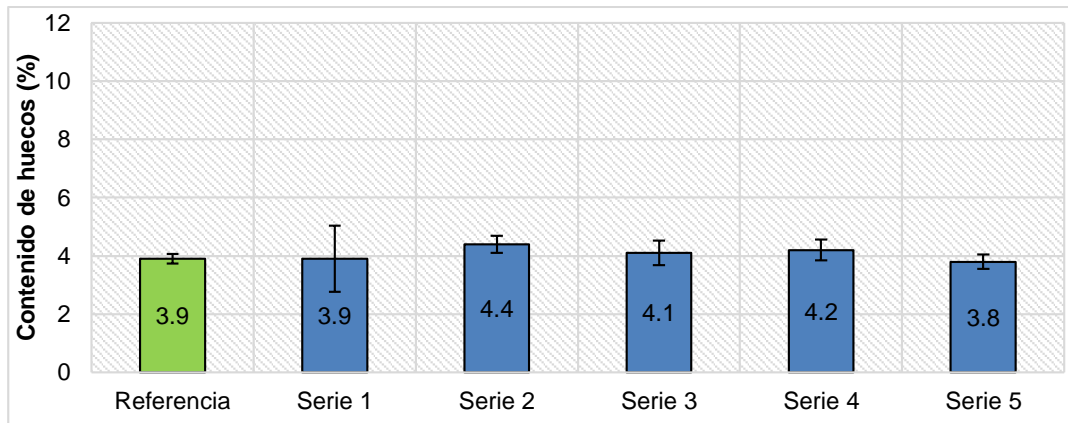


Fig.4.1 Contenido de huecos de las series con 20% de RAP y 75 golpes.

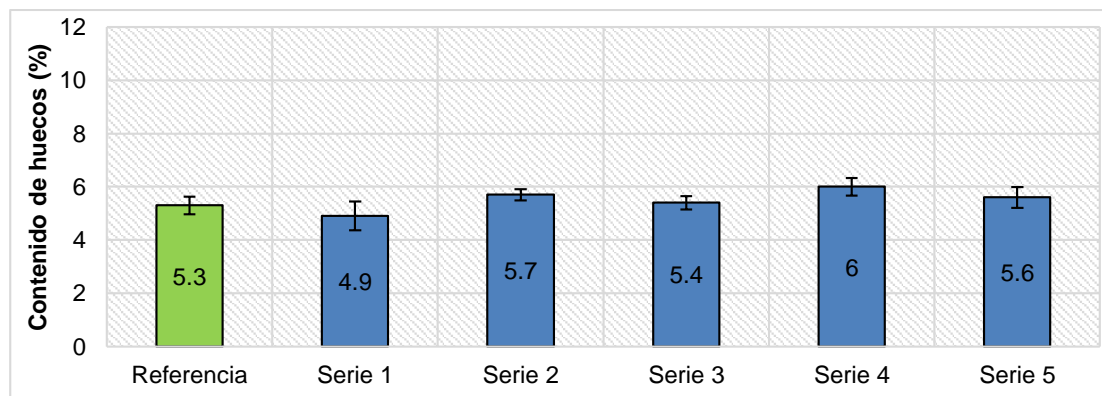


Fig.4.2 Contenido de huecos de las series con 20% de RAP y 50 golpes.

En general, se puede observar que usando el 20% de RAP, el contenido de huecos aumenta ligeramente en comparación con la mezcla de referencia. También la dispersión es ligeramente mayor en las mezclas con este porcentaje de RAP. El contenido de huecos obtenidos con 75 golpes se ubica en el rango de los huecos que se presentan generalmente en capas intermedias. Se espera que este parámetro aumente a medida que crezca el porcentaje de RAP en la mezcla.

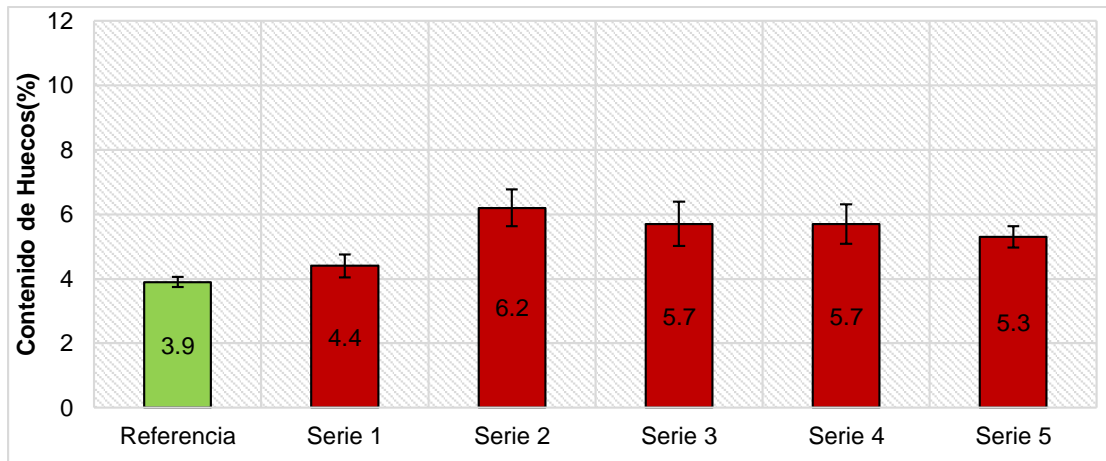


Fig.4.3 Contenido de Huecos de las series con 40% de RAP y 75 golpes.

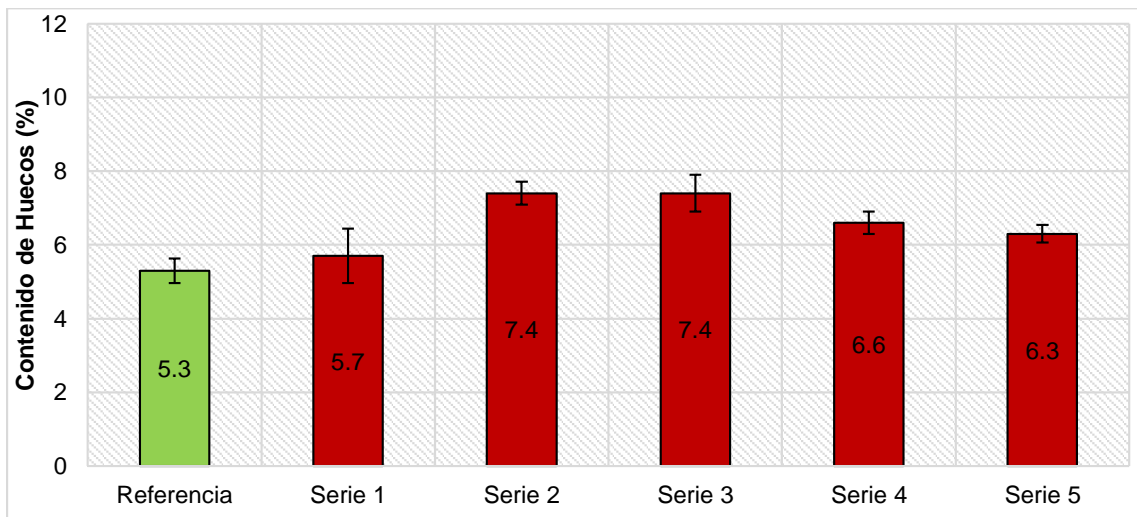


Fig.4.4 Contenido de Huecos de las series con 40% de RAP y 50 golpes.

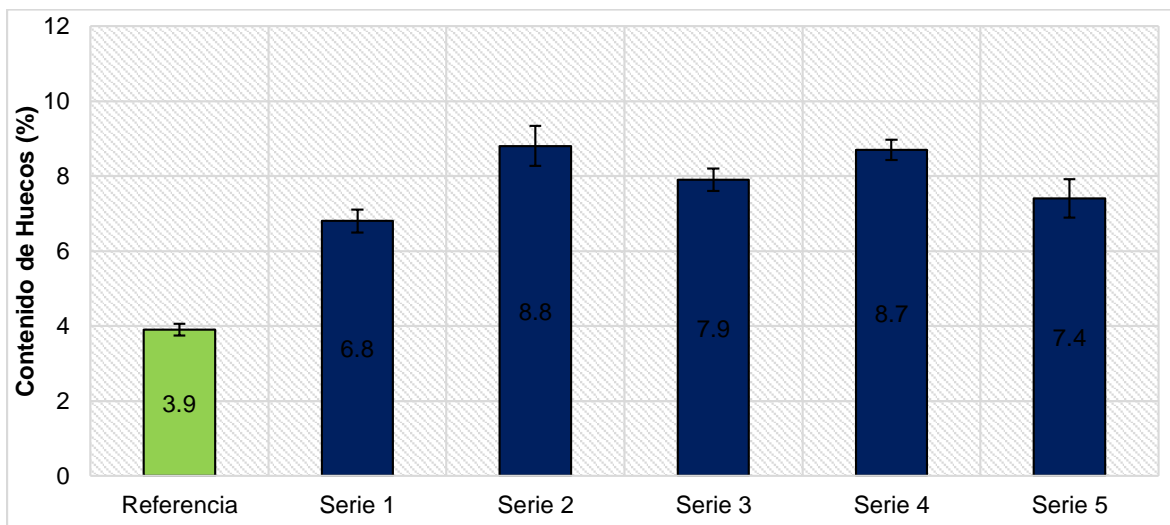


Fig.4.5 Contenido de Huecos de las series con 60% de RAP y 75 golpes.

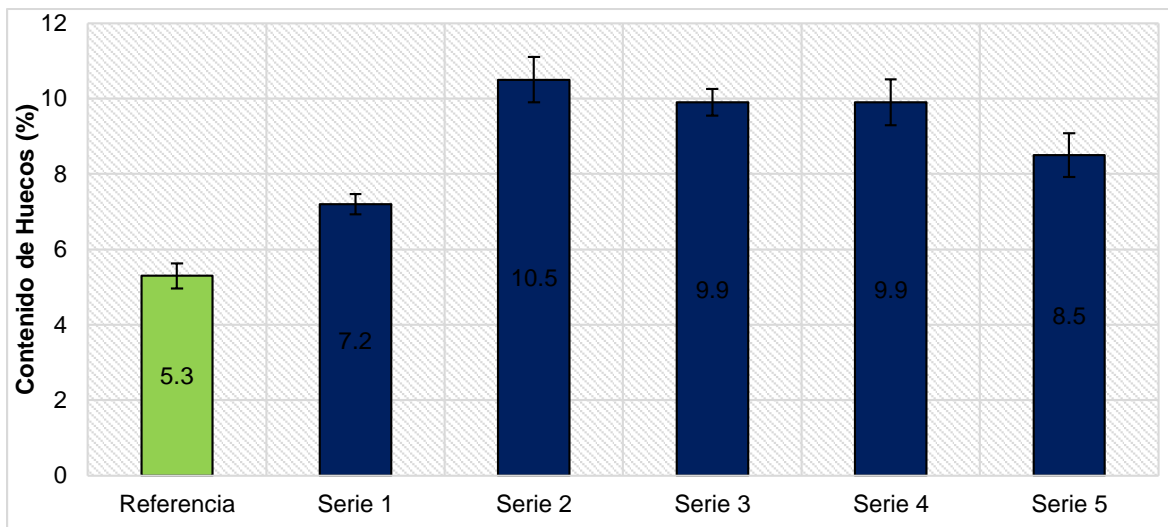


Fig.4.6 Contenido de Huecos de las series con 60% de RAP y 50 golpes.

En general, se observa claramente que el contenido de huecos aumenta con el contenido de RAP. Las series con el 40% y 60% de RAP son las que muestran las mayores dispersiones, lo cual puede deberse a que el RAP presenta variaciones en su composición, lo que nos lleva a variaciones en la granulometría y contenido de betún de las mezclas. Este comportamiento es más evidente en las mezclas recicladas donde el envejecimiento del RAP es notable.

Influencia de la temperatura y tiempo de mezclado

La temperatura de la mezcla influye ampliamente en el contenido de huecos y en consecuencia en la efectividad de la compactación. Es importante mantener el betún por debajo de temperaturas muy altas, ya que puede envejecer rápidamente y consecuentemente modificar sus propiedades. En todos los casos el contenido de huecos asume la misma tendencia tanto para 75 golpes como para 50 golpes. Un aumento de la temperatura conduce a una disminución de los huecos.

El menor contenido de huecos de todos los casos estudiados (20%, 40% y 60%) se localiza en las mezclas con el RAP a 110°C, serie 1, mientras que los valores más altos se obtienen en las mezclas con el RAP a 20°C y el menor tiempo de mezclado, serie 2.

Al aumentar 1 minuto el tiempo de mezclado, las mezclas con 20% de RAP han disminuido hasta en un 0.4% el contenido de huecos. Las mezclas que tienen 40% de RAP, reducen sus huecos en un 0.5% como máximo y las mezclas con un 60% de RAP llegan a reducir su contenido de huecos hasta en un 1.4%. Esto puede deberse a que la acción de mezclar más tiempo genera más energía de mezclado permite acomodar mejor las partículas. Sería importante seguir analizando este parámetro en los trabajos posteriores para ver como varía el contenido de huecos de las mezclas recicladas.

Específicamente en la temperatura de mezclado, estos resultados demuestran que para altos contenido de RAP en las mezclas recicladas (40% y 60%), cuando el RAP se precalienta a 110°C, la mezcla se compacta mucho mejor que si el RAP se añade a temperatura ambiente (20°), permitiendo alcanzar densidades más similares a las de la mezcla virgen de referencia. La reducción de los huecos es máxima en las mezclas con 60% de RAP, compactadas con 50 golpes con el valor de 1.4% (serie 3 vs serie 5). Estos resultados están en correlación con la hipótesis propuesta y los resultados en la disertación doctoral llevada a cabo por Nguyen (2009).

En la fig. 4.7 se presenta el efecto de la temperatura y el tiempo de mezclado en el contenido de huecos de aire compactadas con 75 golpes para una tasa del 40% de RAP. Se ha decidido incluir esta gráfica para el 40% de RAP ya que es el porcentaje que mejor representa las variaciones de la influencia del tiempo y temperatura de mezclado en el comportamiento del contenido de huecos. Se puede apreciar que, si el RAP se añade a temperatura ambiente, tanto el sobrecalentamiento de los áridos como el aumento del tiempo de mezclado permiten mejorar la compactación, reduciendo el porcentaje de huecos, aunque siempre quedan con un valor superior al de la mezcla de referencia o la mezcla con precalentamiento de RAP.

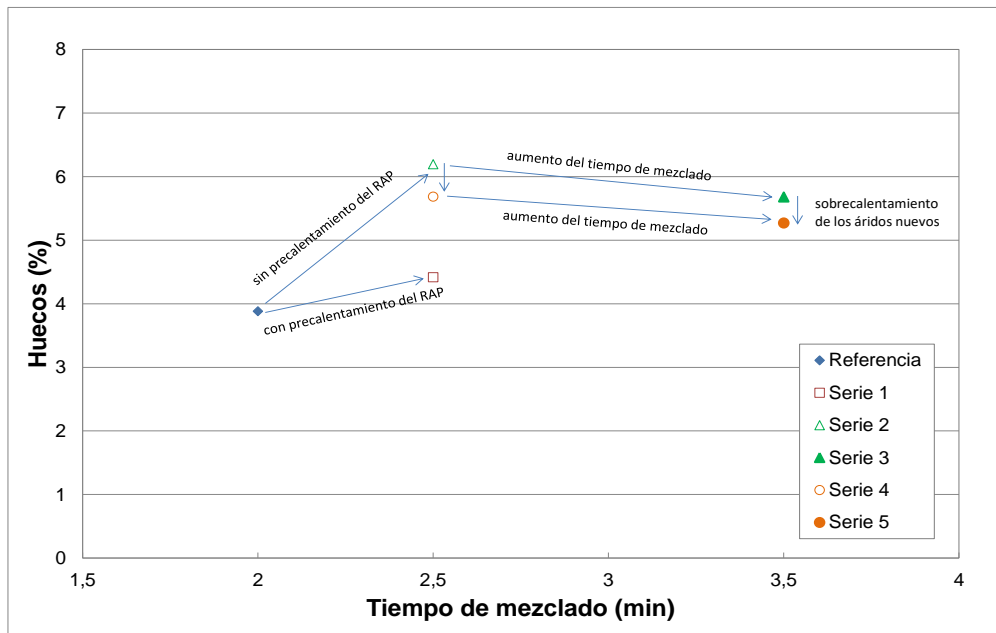


Fig.4.7 Influencia de la temperatura y tiempo de mezclado en el contenido de huecos.

4.1.1.2 Módulo de Rigidez

A continuación, se presentan en la tabla 4.4 los resultados de los ensayos de cada serie con los respectivos coeficientes de variación.

Tabla 4.4 Valores medios de los Módulos de rigidez para las diferentes mezclas estudiadas.

Mezcla de Referencia	
Módulo de Rigidez (MPa)	4202
Coefficiente de Variación(%)	8.0

Contenido de RAP	Parámetro	Serie 1	Serie 2	Serie 3	Serie 4	Serie 5
20 %	Módulo de Rigidez (MPa)	5301	5099	5422	5228	5675
	Coefficiente de Variación(%)	3.7	9.7	9.9	12.4	7.0
40 %	Módulo de Rigidez (MPa)	8385	5628	6251	6836	6903
	Coefficiente de Variación(%)	5.6	10.3	11.2	15.0	6.0
60%	Módulo de Rigidez (MPa)	8609	4446	6279	4769	4955
	Coefficiente de Variación(%)	3.7	9.7	9.9	12.4	7.0

Se ha graficado en las figuras 4.8, 4.9 y 4.10 los valores promedio del módulo de rigidez para ver la variación de cada una de las series estudiadas para cada porcentaje de RAP.

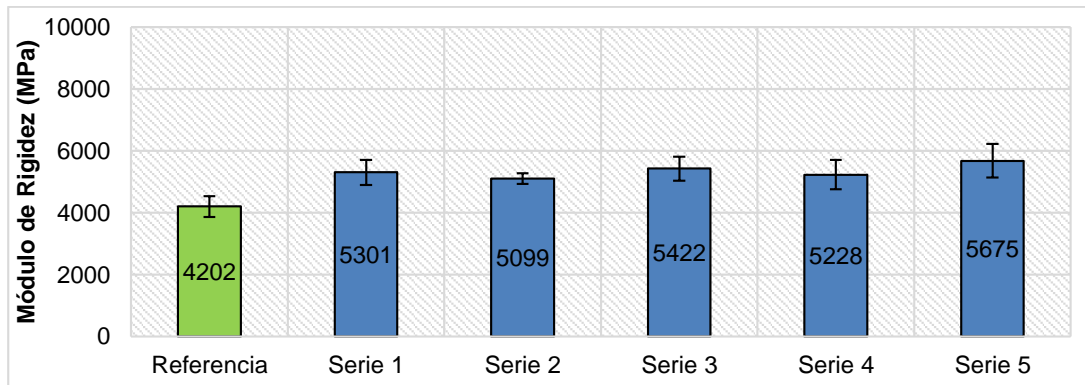


Fig.4.8 Módulo de Rigidez (MPa) para un contenido de 20% de RAP.

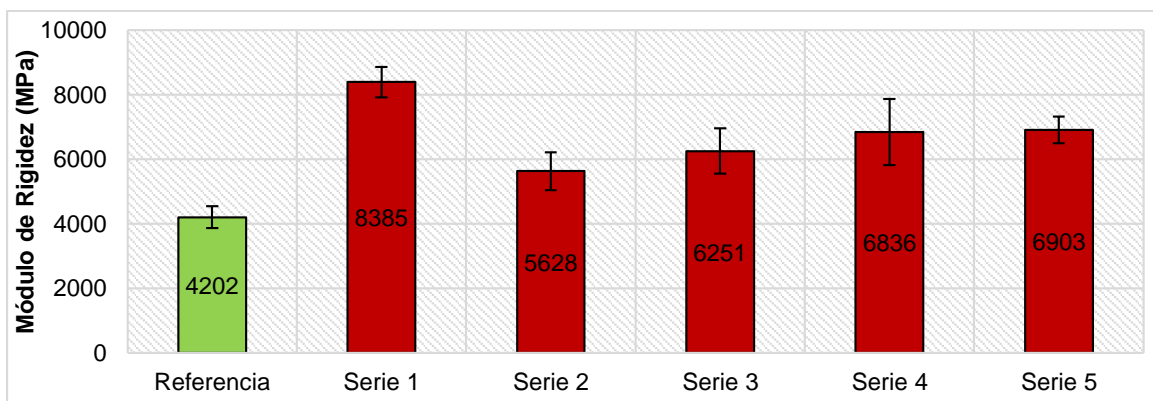


Fig.4.9 Módulo de Rigidez para un 40% de RAP.

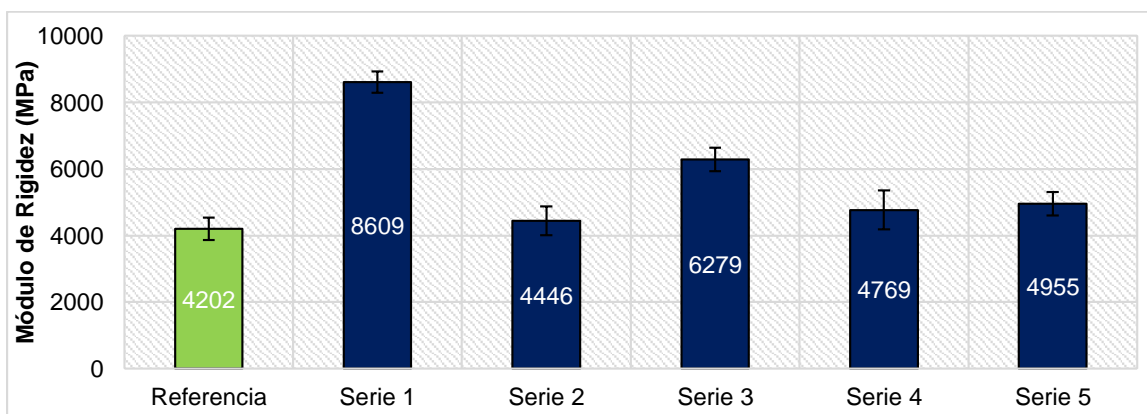


Fig.4.10 Módulo de Rigidez para un 60% de RAP.

Efecto de la temperatura y tiempo de mezclado

Se vuelve a recordar las condiciones de tiempo y temperatura de las series analizadas en la tabla 3.3 recogida de la metodología.

Tabla 3.3 Condiciones de tiempo y temperatura de las mezclas de referencia y mezclas recicladas para cada porcentaje de RAP.

Mezcla	Temperatura Áridos (°C)	Temperatura RAP (°C)	Tiempo mezclado (min)
Referencia	160	-	2
Serie 1	160	110	2.5
Serie 2	160	20	2.5
Serie 3	160	20	3.5
Serie 4	200	20	2.5
Serie 5	200	20	3.5

Con el 20% de RAP, todos los módulos son mayores a la mezcla de referencia llegando superarlo hasta 1400 Mpa. Además, no se observan diferencias notables entre las 5 series recicladas.

Considerando al 40% de RAP se puede apreciar que estas series tienen una tendencia definida. Cuando el RAP se incorpora a la mezcla, aumenta considerablemente el valor del módulo dinámico, llegando a duplicarlo en el caso de las mezclas en las que el RAP se ha calentado, serie 1, como se puede apreciar en la Figura 4.11. En cambio, si el RAP se introduce a temperatura ambiente, el módulo no aumenta tanto; en esta condición, tanto el sobrecalentamiento de los áridos, como el aumento del tiempo de mezclado provocan que el módulo aumente. En el caso de que los áridos se hayan sobrecalentado, el aumento del tiempo de mezclado tiene menor efecto. Estos resultados están en concordancia con la hipótesis propuesta y los resultados obtenidos por West et al (2013).

Para el caso del 60% de RAP, y al calentar el RAP hasta 110°C (serie 1) se alcanzaron valores de módulo considerables. Se puede apreciar el efecto del aumento del tiempo de mezclado en el aumento del módulo de rigidez. Sin embargo, el impacto del sobrecalentamiento de los áridos de aportación no se aprecia con este porcentaje de RAP.

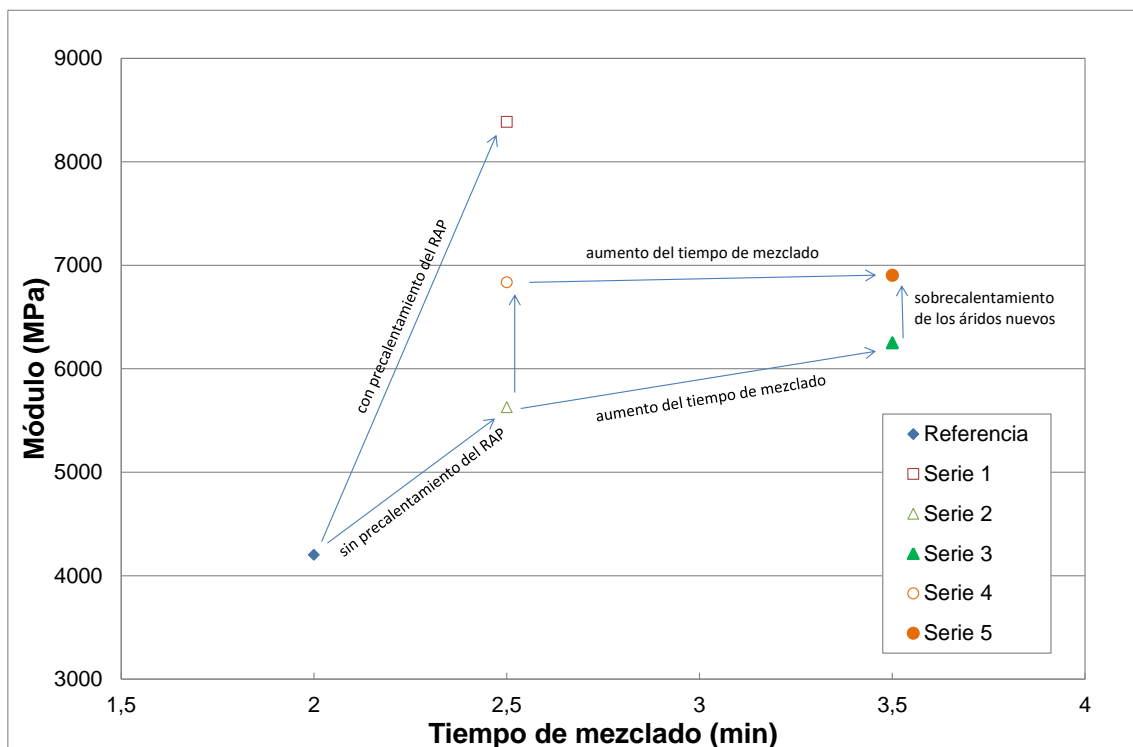


Fig.4.11 Influencia de la temperatura y tiempo de mezclado en el módulo de rigidez de las mezclas con 40% de RAP.

4.1.1.3 Resistencia a Tracción Indirecta

Los datos obtenidos son un conjunto de puntos que sirven para graficar la curva carga-desplazamiento de cada proceso de rotura (figuras 4.12-4.15). Estas figuras se muestran a modo de ejemplo, para poder apreciar el comportamiento típico de las curvas.

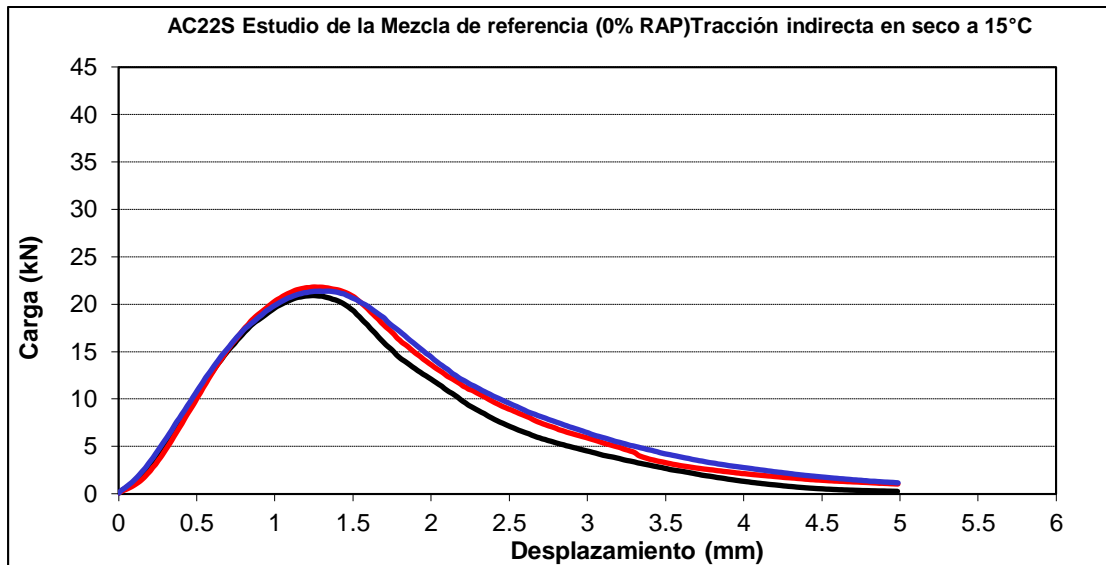


Fig.4.12: Ejemplo de ensayo a tracción indirecta para 3 probetas sin RAP.

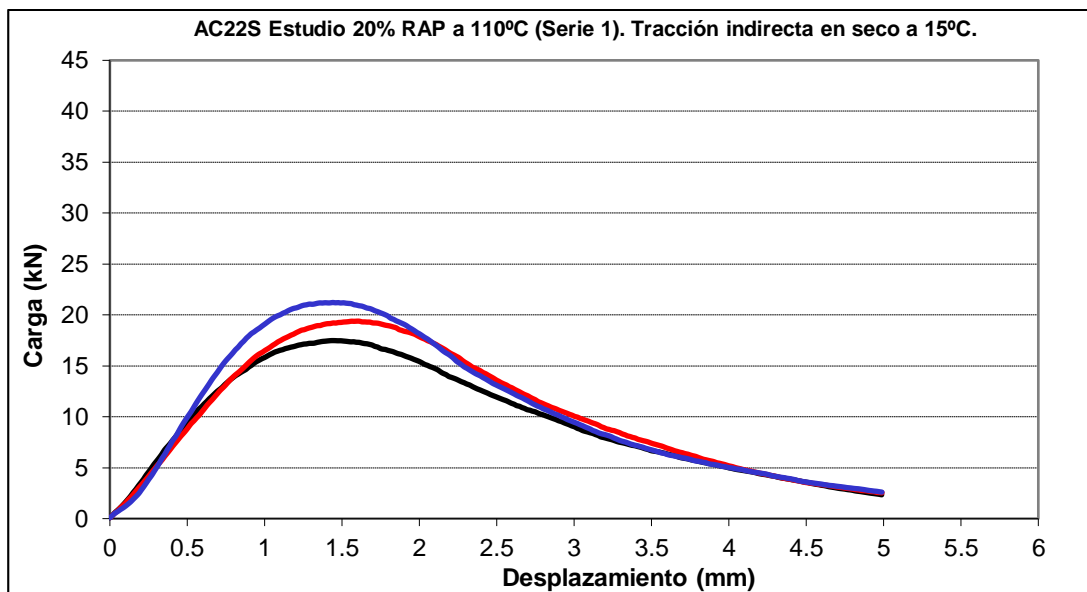


Fig. 4.13: Ejemplo de ensayo a tracción indirecta para 3 probetas con 20% RAP.

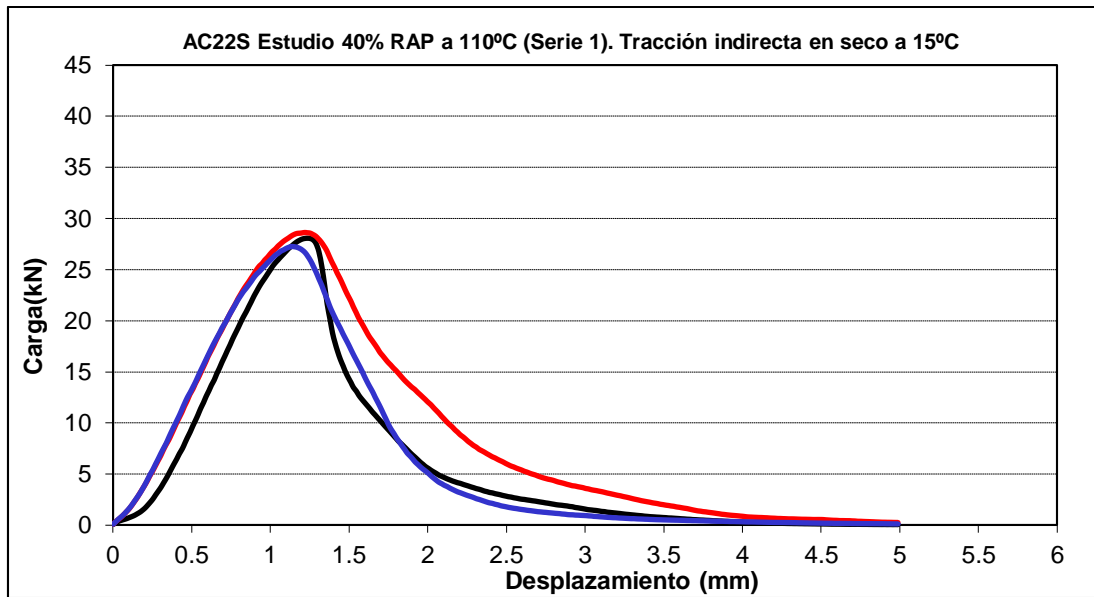


Figura 4.14: Ejemplo de ensayo a tracción indirecta para 3 probetas con 40% RAP.

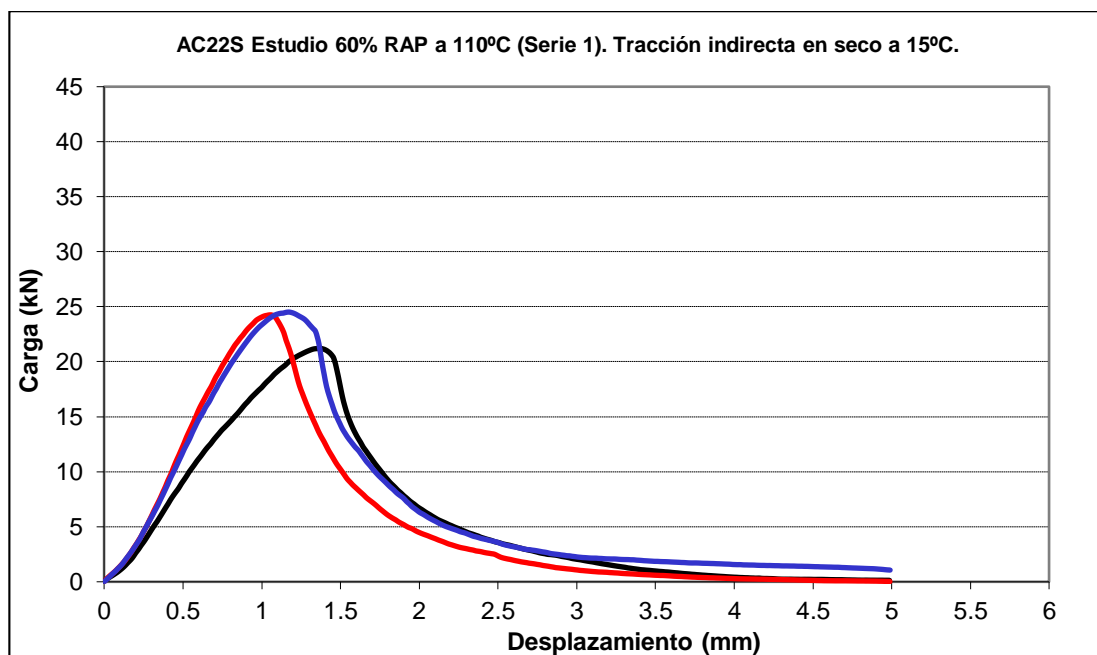


Fig. 4.15: Ejemplo de ensayo a tracción indirecta para 3 probetas con 60% RAP.

Comparando los gráficos mostrados anteriormente, se puede concluir que, a medida que se agrega RAP a la mezcla, la curva carga-desplazamiento muestra el valor máximo más pronunciado y menor desplazamiento al alcanzar este parámetro indicando que esta tiende a volverse más frágil. En las probetas con mayor

contenido de RAP (40 y 60% de RAP), la pendiente de la curva del post-pico tiende a ser más pronunciada.

Los resultados del ensayo de resistencia a la tracción indirecta (RTI) se recogen en las tablas 4.5 y 4.6 con los valores medios y el coeficiente de variación.

Tabla 4.5 Valores medios de las resistencias a tracciones indirectas en seco para las diferentes mezclas estudiadas.

Mezcla de Referencia	
RTI (MPa)	1.95
Coeficiente de Variación(%)	2.7

Contenido de RAP	Parámetro	Serie 1	Serie 2	Serie 3	Serie 4	Serie 5
20%	RTI (MPa)	2.19	2.01	2.19	1.97	2.11
	Coeficiente de Variación(%)	9.7	0.8	0.9	1.0	5.7
40%	RTI (MPa)	2.67	2.16	2.13	2.18	2.24
	Coeficiente de Variación(%)	1.8	0.5	6.1	7.3	13.8
60%	RTI (MPa)	2.42	1.42	1.42	1.58	1.67
	Coeficiente de Variación(%)	0.5	3.4	9.9	9.5	4.6

Tabla 4.6 Valores medios de las resistencias a tracciones indirectas en húmedo para las diferentes mezclas estudiadas.

Mezcla de Referencia	
RTI (MPa)	1.85
Coeficiente de Variación(%)	9.97

Contenido de RAP	Parámetro	Serie 1	Serie 2	Serie 3	Serie 4	Serie 5
20%	RTI (MPa)	2.03	1.82	1.92	1.84	2.04
	Coficiente de Variación(%)	19.1	4.4	4.1	7.0	10.8
40%	RTI (MPa)	2.42	1.81	1.83	2.00	2.23
	Coficiente de Variación(%)	15.3	2.21	1.9	9.0	1.7
60%	RTI (MPa)	2.18	1.02	1.26	1.24	1.49
	Coficiente de Variación(%)	8.2	9.7	2.9	15.3	0.7

Se presentan en las siguientes figuras (4.16-4.18) los valores graficados de RTI a través de un gráfico de barras para ver con más claridad la variación de este parámetro. Se muestra el promedio de tres probetas para cada condición (seca y húmeda) y las barras de error para poder apreciar la dispersión de datos.

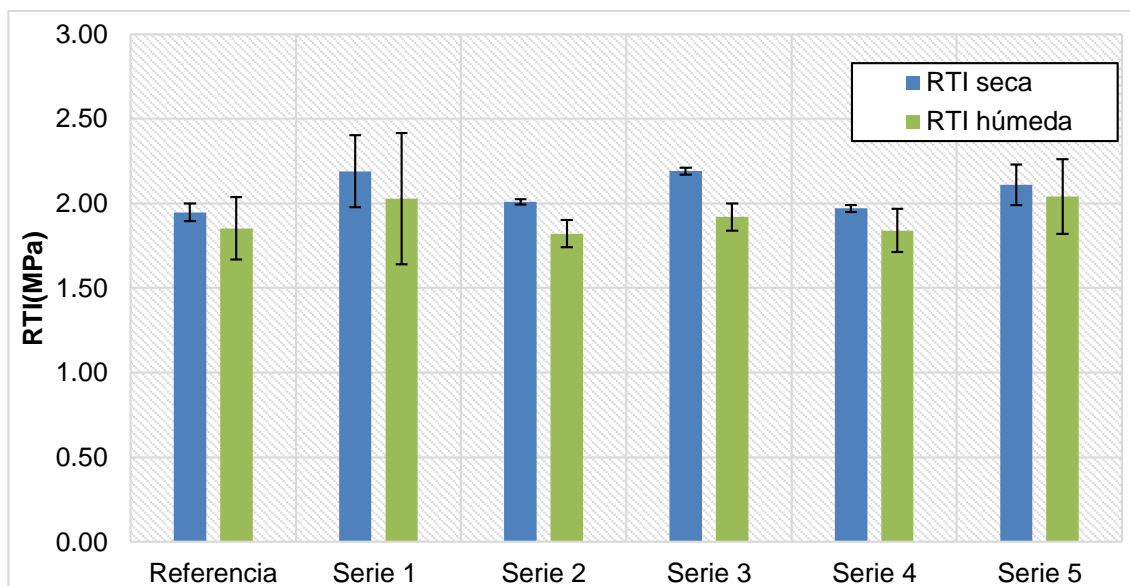


Fig. 4.16 Resistencia a tracción indirecta de las series con un 20% de RAP a 15°C.

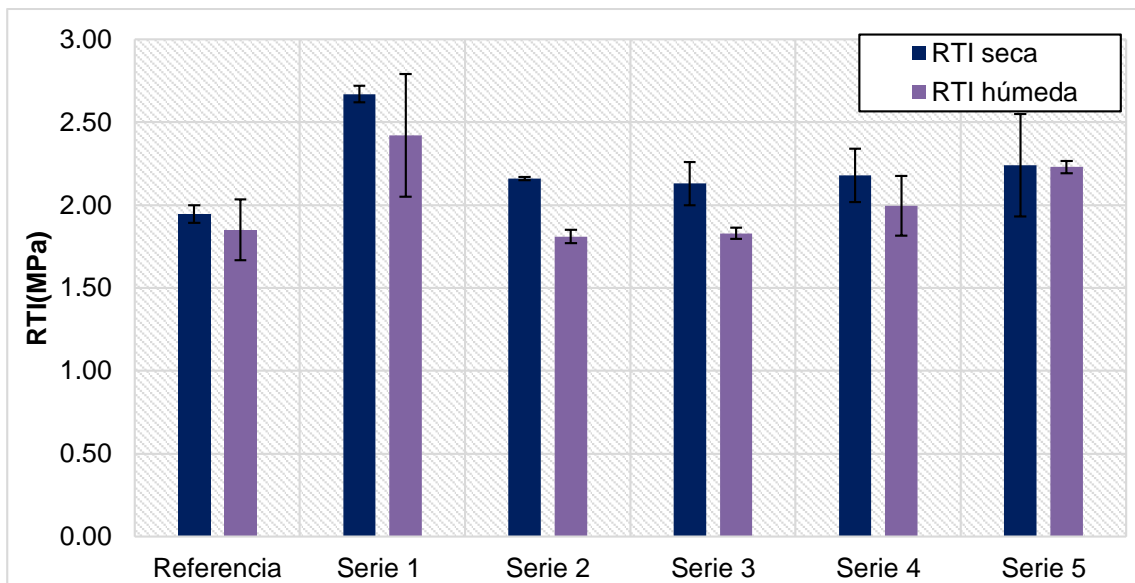


Fig. 4.17 Resistencia a tracción indirecta de las series con un 40% de RAP a 15°C.

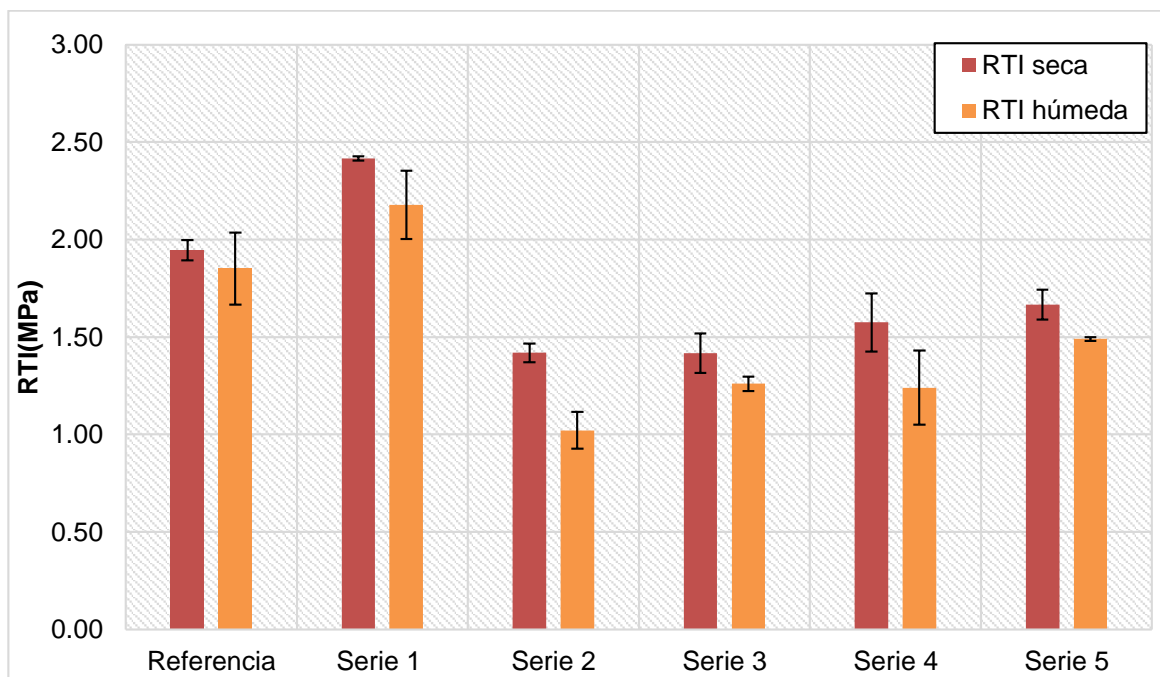


Fig. 4.18 Resistencia a tracción indirecta de las series con un 60% de RAP a 15°C.

En términos generales, se puede aseverar que los valores de resistencia (tanto en seco como en húmedo) a la tracción son más altos a medida que aumenta el porcentaje de RAP hasta 40%. El betún envejecido es más rígido y tiene un punto de reblandecimiento más alto. Por estas razones, cuando el ligante de aportación

se mezcla con el envejecido, aumenta su resistencia a las cargas de tracción. Estos resultados son coherentes con la investigación llevada a cabo por Iwanski (2012). Sin embargo, al pasar del 40% al 60% de RAP ambas resistencias disminuyen, fenómeno también observado por otros investigadores, [(Al Helo, K. H. I., et al 2016), (Shunyashree T. B. et al, 2013) (Arshad A. K., et al., 2017)]. A efectos comparativos, en este estudio se ha mantenido constante el contenido total de betún, aunque podría ocurrir que el contenido de betún óptimo para cada mezcla reciclada sea diferente en cada caso, especialmente cuando se incorpora un 60% de RAP, debido al alto grado de envejecimiento del betún aportado por el RAP.

La relación entre la resistencia a tracción indirecta en seco y en húmedo se puede representar por la resistencia conservada tal y como se presenta en la figura 4.19. La resistencia conservada proporciona una medida de susceptibilidad a la humedad de la mezcla reciclada. El valor de la resistencia conservada tiende a disminuir a medida que se aumenta el porcentaje de RAP, este comportamiento pudo haber sido provocado por la influencia del contenido de huecos en las mezclas con 40% y 60% de RAP. Estos resultados siguen la misma tendencia que los resultados de la tesis doctoral de Alarcón (2003). En casi todas las series se cumple con la especificación mínima para la Resistencia Conservada (80%), para mezclas en capa de base e intermedia, haciendo excepción en las series 2 y 4 del 60% de RAP por lo que se pone de manifiesto que estas son las series con las peores condiciones de fabricación y por ende la resistencia conservada baja hasta valores menores al límite exigido.

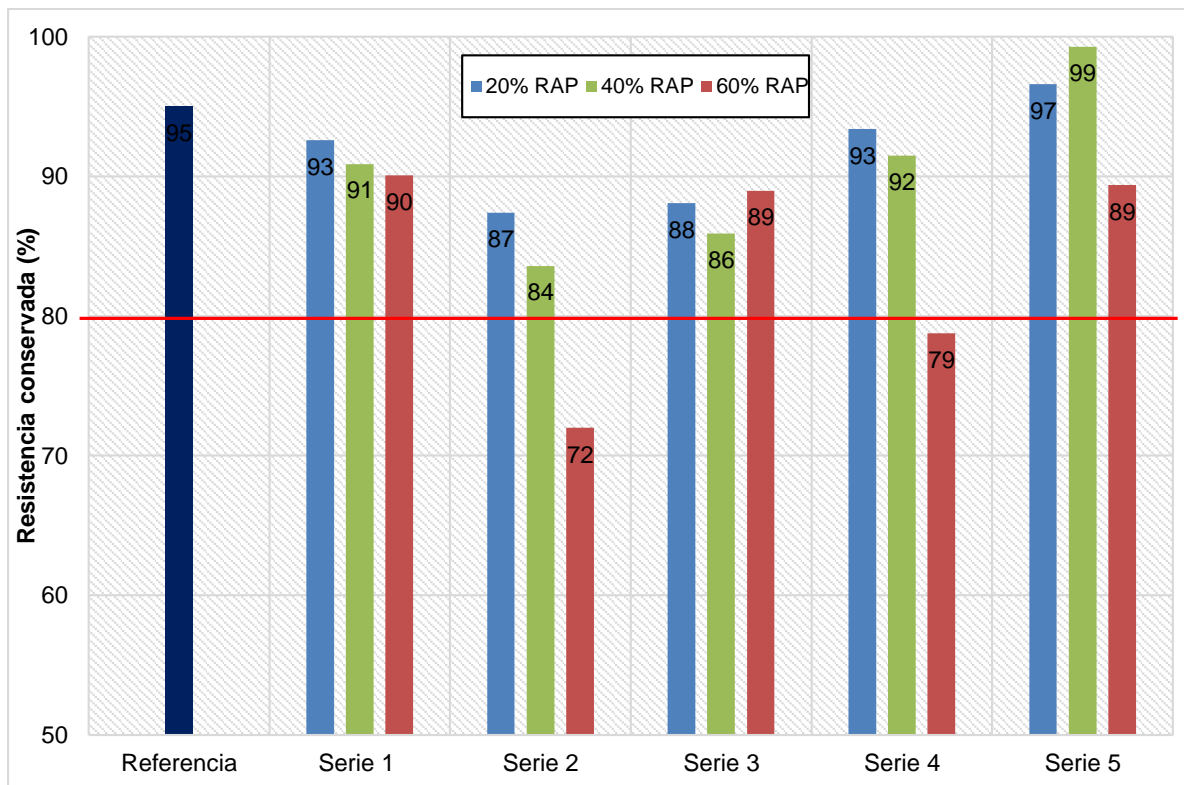


Fig.4.19 Resistencia conservada de todas las mezclas estudiadas en esta etapa.

Efecto de la temperatura y tiempo de mezclado

La resistencia a tracción indirecta por la vía seca tiene una tendencia similar para todas las mezclas estudiadas. Esta tendencia muestra que el máximo valor (para cualquier porcentaje de RAP) es el correspondiente a la mezcla reciclada de la serie 1 (RAP a 110°C). A pesar de la poca variación mostrada en las series donde el contenido de RAP es mayor (40% y 60%), las tendencias son parecidas a las del módulo de rigidez. En este caso, el efecto del sobrecalentamiento de los áridos de aportación es poco notable.

Los resultados de la resistencia a tracción indirecta vía húmeda muestran una tendencia similar a la observada en la vía seca, y nuevamente se aprecia una mayor resistencia en la serie donde el RAP se calienta a 110°C.

Donde mejor se observan el efecto del tiempo y temperatura de mezclado es el caso del 60% de RAP, por lo que se ha decidido profundizar más en este caso (figura 4.20). Cuando se precalienta el RAP, se obtienen valores medios de RTI (húmeda y seca) más altos que la de la mezcla virgen de referencia. Sin embargo, cuando el RAP se añade a temperatura ambiente, los valores de RTI son inferiores a la mezcla virgen. También, en la figura 4.20 se aprecia que el aumento de la temperatura o del tiempo de mezclado concede a la mezcla una mayor resistencia a la acción del agua, esto se puede atribuir a que el contenido de huecos es menor, generando mezclas más cerradas y consecuentemente dando por resultado unas resistencias conservadas más elevadas. En cambio, si no se precalienta el RAP genera una notable disminución de la resistencia conservada (serie 1 vs serie 2). Si se aumenta el tiempo de mezclado este valor tiende a recuperarse (serie 2 vs serie 3). Si el RAP no se precalienta, pero se sobrecalientan los áridos de aportación, existe una ligera recuperación de (serie 2 vs serie 4).

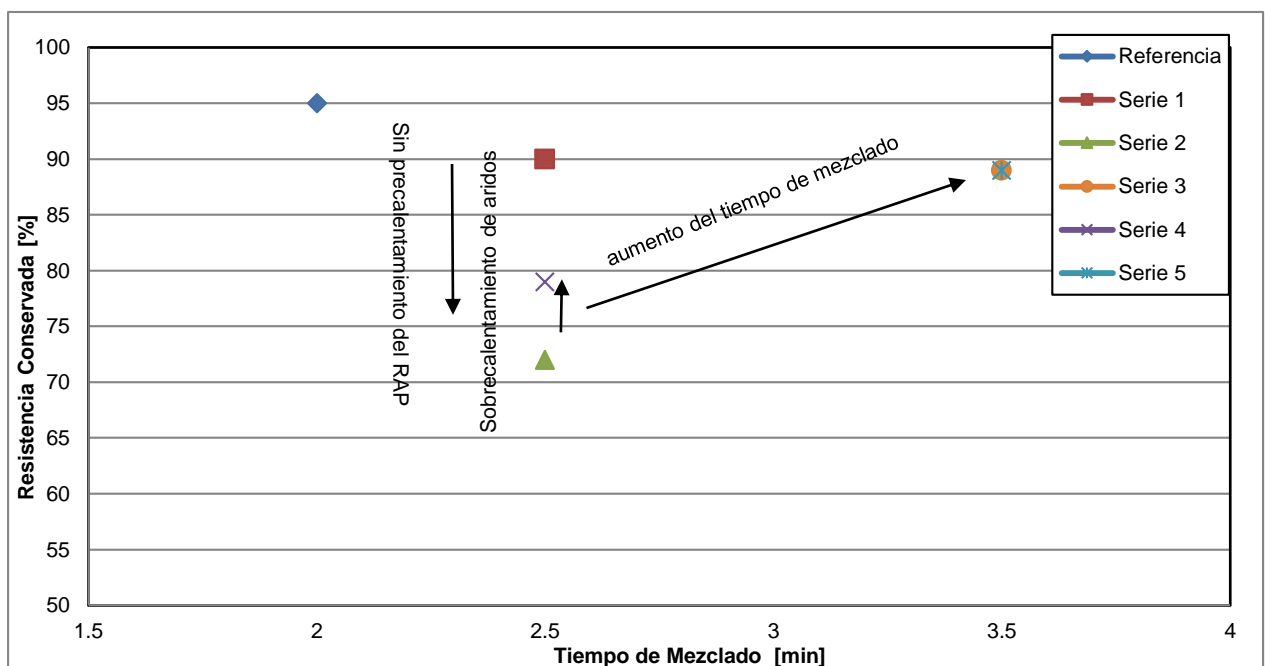


Fig. 4.20 Influencia de la temperatura y tiempo de mezclado en la resistencia conservada de mezclas recicladas con 60% de RAP.

4.1.1.4 Ensayo Fénix

En la figura 4.21 donde se observa el comportamiento típico de las curvas esfuerzo-desplazamiento del ensayo Fénix a distintas temperaturas de ensayo. A medida que disminuye la temperatura de ensayo el comportamiento del material se vuelve más frágil. La pendiente del tramo elástico aumenta, igual que la carga máxima, mientras que la ductilidad disminuye considerablemente.

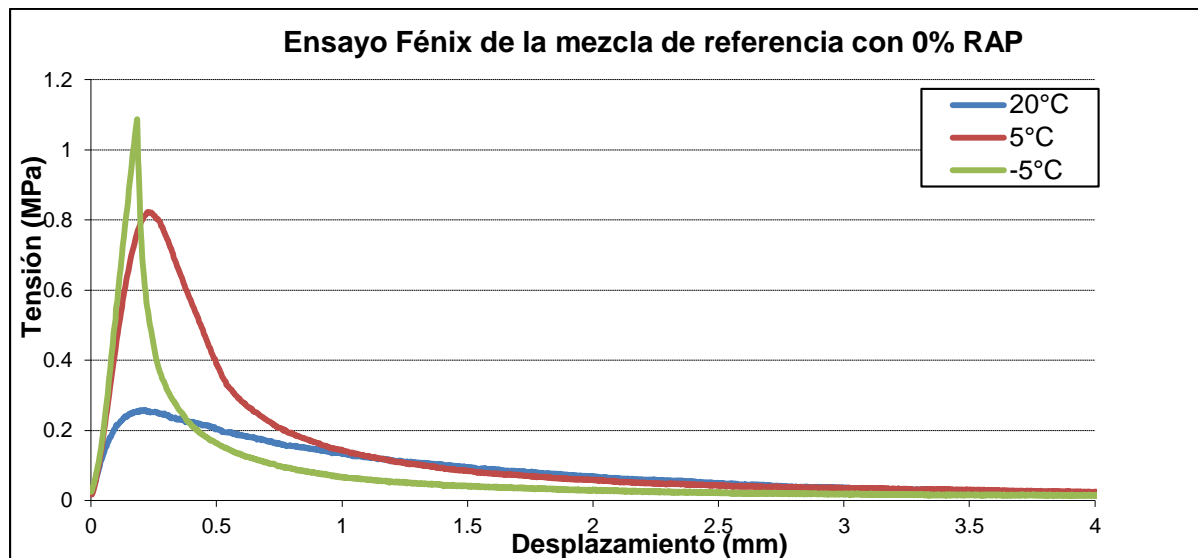


Fig. 4.21. Ejemplo de curvas obtenidas del ensayo Fénix a diferentes temperaturas.

Se representan gráficamente los resultados de los valores de IRT a las 3 temperaturas ensayadas en las figuras 4.22-4.24. Debido a que los resultados en estas figuras se solapan, dificulta su análisis en detalle. Se presentan todos los resultados en las tablas 4.7, 4.8 y 4.9.

Índice de Rigidez a Tracción (IRT)

Para todos los porcentajes de RAP las mezclas recicladas son más rígidas que la mezcla de referencia (excepto series 4 y 5 con 20% de RAP). A medida que aumenta la temperatura, se observa cómo se reduce la carga máxima y como aumenta el desplazamiento. A temperatura ambiente (20°C), la debilidad de las mezclas está representada por el mástico, mientras que, a temperaturas más bajas, la falla puede ocurrir tanto por el mástico como en los áridos porque presentan un

comportamiento más frágil. La disminución del IRT con el aumento de la temperatura se aprecia en las mezclas con todos los contenidos de RAP (20 %, 40% y 60%).

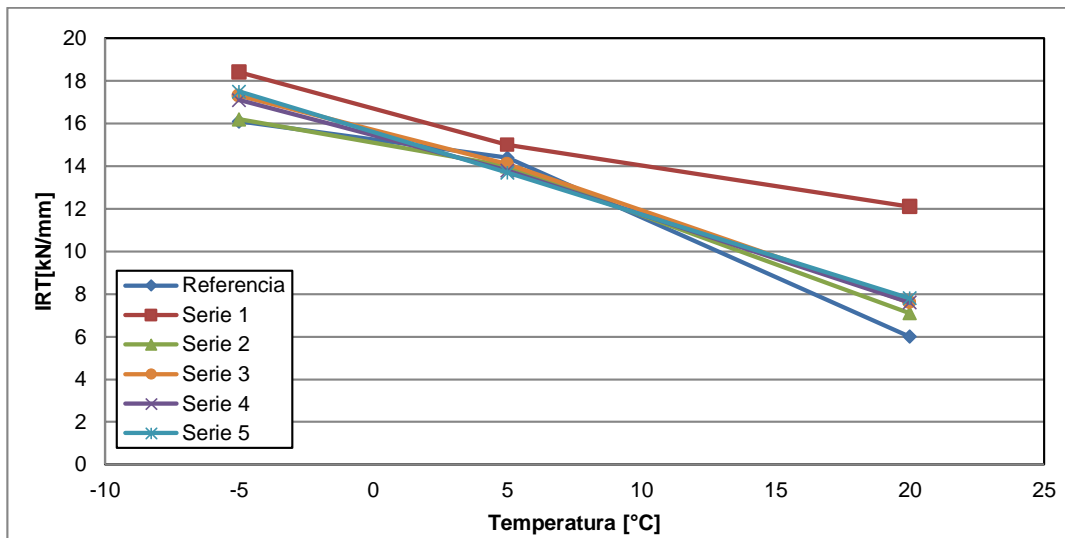


Fig.4.22 Índice de rigidez a tracción de las mezclas con 20% de RAP.

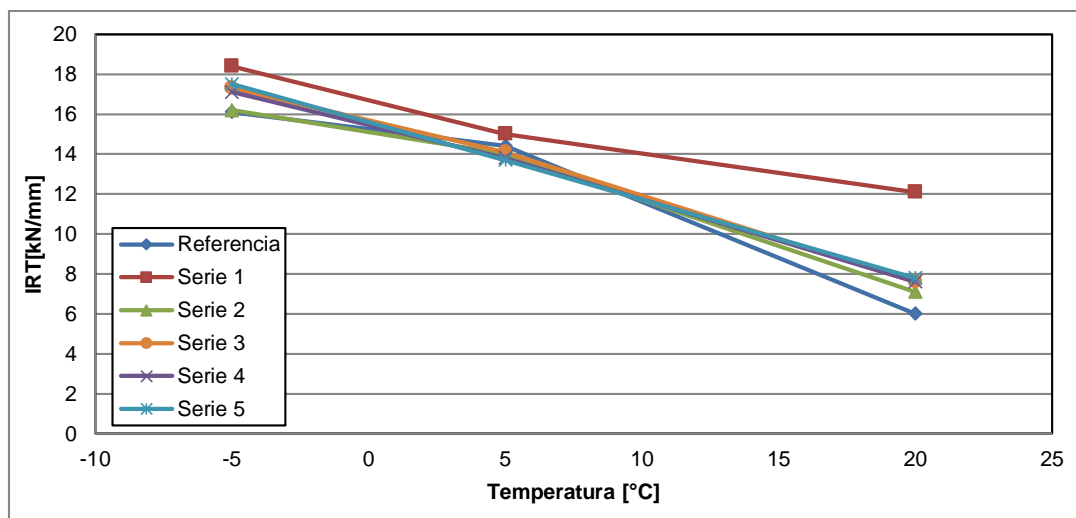


Fig. 4.23 Índice de rigidez a tracción de las mezclas con 40% de RAP.

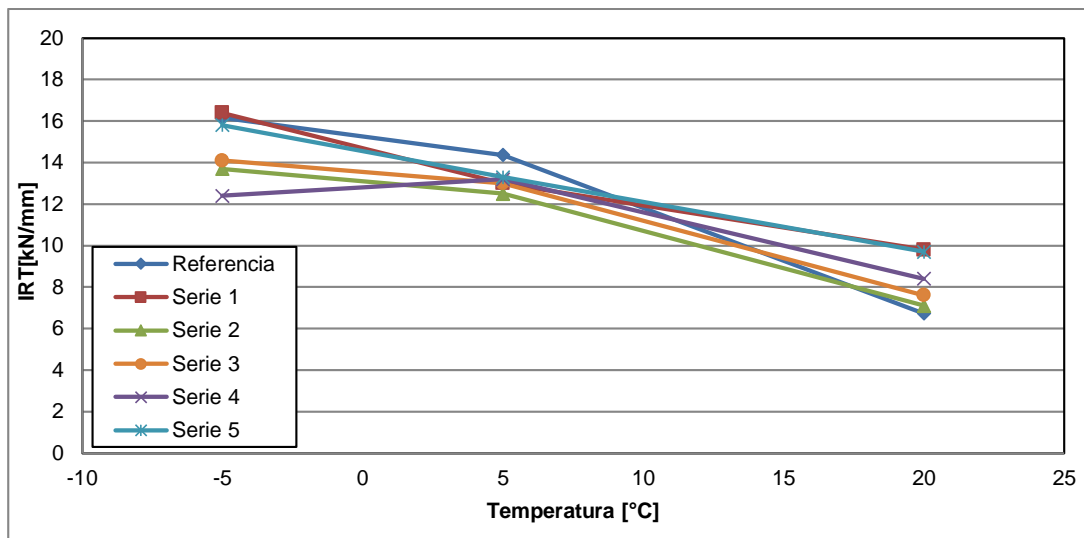


Fig. 4.24 Índice de rigidez a tracción de las mezclas con 60% de RAP.

A continuación, se muestran las tablas 4.7-4.9 que contiene el resumen de los valores medios del índice de rigidez a tracción para los diferentes porcentajes de RAP y diferentes grupos de probetas sometidas al ensayo Fénix.

Tabla 4.7 Índice de rigidez a tracción de las mezclas con 20% de RAP.

Temperatura	Parámetro	0% RAP	20% RAP				
		Ref.	1	2	3	4	5
20°C	IRT (kN/mm)	6.0	7.4	7.1	7.4	5.3	5.4
	Coefficiente de Variación (%)	18.8	23.6	2.9	13.5	4.6	24.2
5°C	IRT (kN/mm)	14.4	15.3	14.7	15.7	13.7	14.4
	Coefficiente de Variación (%)	3.0	6.2	12.6	6.1	10.6	4.6
-5°C	IRT (kN/mm)	16.1	18.6	17.7	18.4	16.6	18.8
	Coefficiente de Variación (%)	27.3	8.1	8.2	9.2	15.6	5.5

Tabla 4.8 Índice de rigidez a tracción de las mezclas con 40% de RAP.

Temperatura	Parámetro	0% RAP	40% RAP				
		Ref.	1	2	3	4	5
20°C	IRT (kN/mm)	6.0	12.1	7.1	7.6	7.6	7.8
	Coefficiente de Variación (%)	18.8	9.4	29.5	18.6	15.5	18.5
5°C	IRT (kN/mm)	14.4	15.0	14.0	14.1	13.8	13.7
	Coefficiente de Variación (%)	5.1	8.1	5.3	12.2	9.5	7.4
-5°C	IRT (kN/mm)	16.1	18.4	16.2	17.3	17.1	17.5
	Coefficiente de Variación (%)	27.3	7.3	15.5	2.5	13.6	13.6

Tabla 4.9 Índice de rigidez a tracción de las mezclas con 60% de RAP.

Temperatura	Parámetro	0% RAP	60% RAP				
		Ref.	1	2	3	4	5
20°C	IRT (kN/mm)	6.0	9.8	7.1	7.6	8.4	9.7
	Coefficiente de Variación (%)	18.8	3.1	14.6	21.6	25.5	10.6
5°C	IRT (kN/mm)	14.4	13.0	12.5	13.0	13.2	13.3
	Coefficiente de Variación (%)	3.0	14.0	7.6	11.5	14.5	9.3
-5°C	IRT (kN/mm)	16.1	16.4	13.7	14.1	12.4	15.8
	Coefficiente de Variación (%)	27.3	9.9	10.5	12.5	11.6	9.6

Efecto del tiempo y la temperatura

En términos generales, observando las tablas 4.7 a 4.9 a 20°C se confirma que todas las mezclas recicladas (exceptuando las series 4 y 5 con 20% de RAP) tienen más IRT que la mezcla de referencia. A 5°C y -5°C todas las mezclas muestran valores de IRT muy parecidos a la de la mezcla de referencia. El efecto del aumento del tiempo de mezclado (de la serie 2 a la 3 o de la serie 4 a la 5) se aprecia un ligero aumento del IRT en la mayoría de los casos. En cuanto al efecto del sobrecalentamiento de los áridos no se aprecia una tendencia clara.

La figura 4.25 muestra la influencia del tiempo y temperatura de mezclado en el índice de rigidez a tracción, se ha elegido las mezclas recicladas con 60% de RAP y la temperatura de ensayo de 20°C ya que son las condiciones que mejor representa las variaciones en estos parámetros. En esta figura se sigue una tendencia similar a la obtenida con el módulo de rigidez. La mezcla con el RAP a 110°C, serie 1, es la presenta el mayor índice IRT. En cambio, si la mezcla reciclada se fabrica incorporando el RAP a temperatura ambiente (serie 2) se puede apreciar que el índice de resistencia a tracción es menor. Para compensar esta falta de temperatura durante el mezclado, y aumentar el IRT se pueden sobrecalentar los áridos nuevos de aportación o aumentar el tiempo de mezclado.

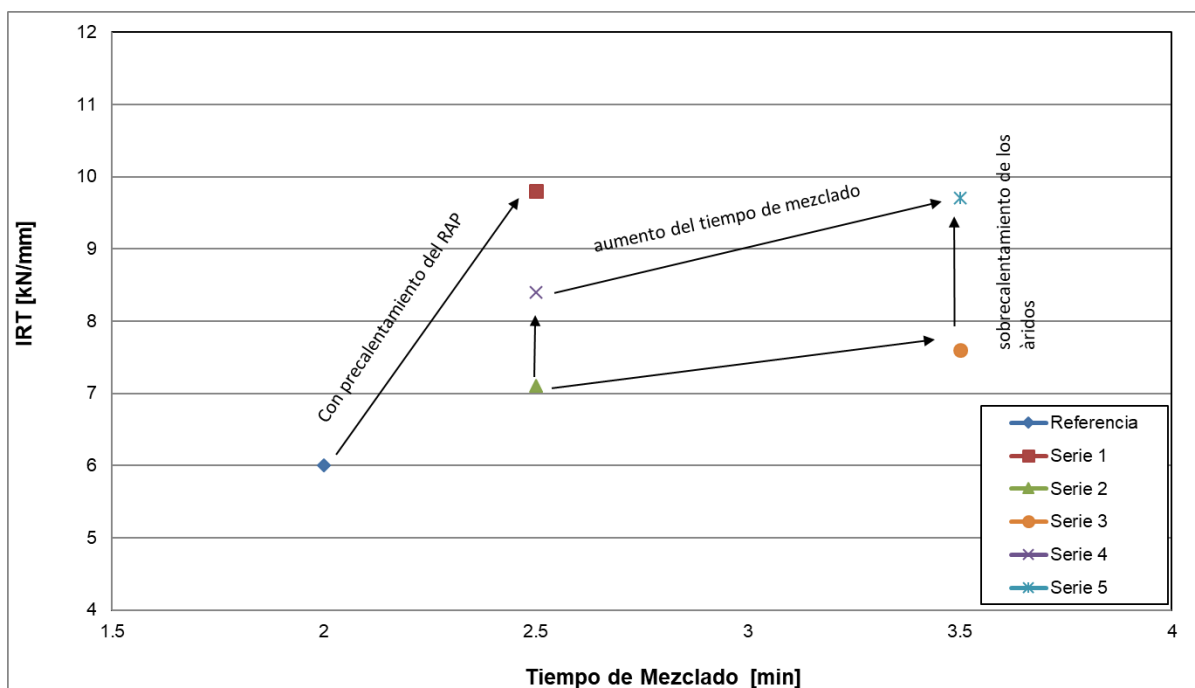


Fig. 4.25 Influencia de la temperatura y tiempo de mezclado en el IRT de mezclas recicladas con 60% de RAP y a 20°C.

Tanto el aumento del tiempo de mezclado, como el sobrecalentamiento de los áridos de aportación ayudaron a las diferentes series de mezclas recicladas a aumentar el IRT. Para este caso específico se puede afirmar que el sobrecalentamiento de los áridos de aportación tiene un mayor efecto en el IRT, en comparación con el tiempo de mezclado.

Energía disipada (G_D)

En las siguientes tablas (4.10-4.12) quedan representados los valores medios y el coeficiente de variación de los resultados obtenidos de energía disipada a diferentes temperaturas de ensayo. También se han graficado los valores de G_D a cada una de las temperaturas del ensayo en las figuras 4.26, 4.27 y 4.28

Tabla 4.10 Energía disipada a tracción de las mezclas con 20% de RAP

Temperatura	Parámetro	0% RAP	20% RAP				
		Ref.	1	2	3	4	5
20°C	G _D (J/m ²)	331	489	280	342	316	409
	Coeficiente de Variación (%)	6.11	15.1	9.33	9.63	22.5	11.3
5°C	G _D (J/m ²)	725	507	552	587	551	633
	Coeficiente de Variación (%)	24.0	28.0	19.9	16.8	11.0	11.5
-5°C	G _D (J/m ²)	319	338	260	288	251	328
	Coeficiente de Variación (%)	16.8	8.37	3.3	16.5	4.0	19.4

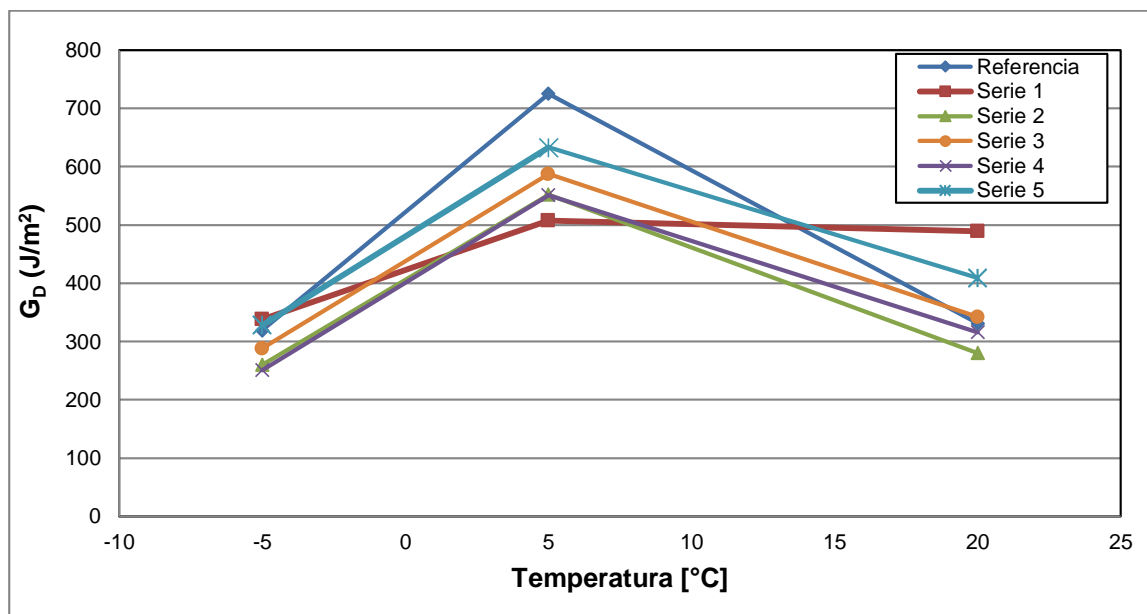
Tabla 4.11 Energía disipada a tracción de las mezclas con 40% de RAP

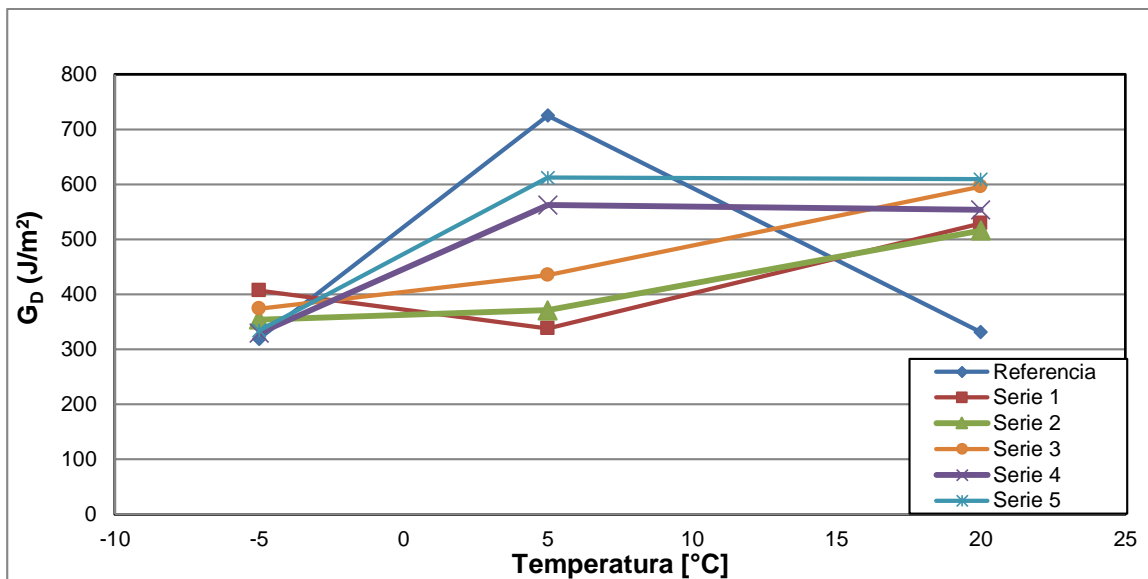
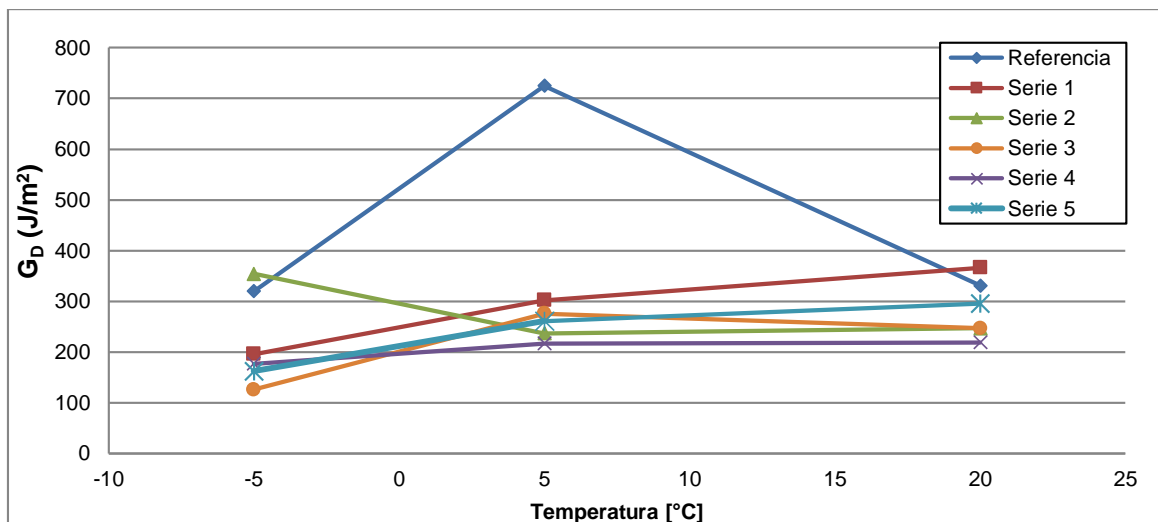
Temperatura	Parámetro	0% RAP	40% RAP				
		Ref.	1	2	3	4	5
20°C	G _D (J/m ²)	331	529	516	596	554	609
	Coeficiente de Variación (%)	6.11	5.35	9.33	8.63	22.5	16.3
5°C	G _D (J/m ²)	725	338	371	435	562	612
	Coeficiente de Variación (%)	24.0	28.0	19.9	16.8	11.0	11.5
-5°C	G _D (J/m ²)	319	407	354	374	329	334
	Coeficiente de Variación (%)	16.8	8.37	23.3	22.5	4.0	26.7

Tabla 4.12 Energía disipada a tracción de las mezclas con 60% de RAP

Temperatura	Parámetro	0% RAP	60% RAP				
		Ref.	1	2	3	4	5
20°C	G _D (J/m ²)	331	366	247	247	219	296
	Coefficiente de Variación (%)	6.1	25.3	31.3	18.3	22.5	16.3
5°C	G _D (J/m ²)	725	302	237	276	217	261
	Coefficiente de Variación (%)	24.0	28.0	19.9	16.8	11.0	11.5
-5°C	G _D (J/m ²)	319	196	165	126	177	162
	Coefficiente de Variación (%)	16.8	18.3	13.3	12.5	5.0	26.7

A 5°C todas las mezclas recicladas tienen menor G_D que la mezcla de referencia. A -5°C las mezclas con 20% y 40% de RAP tienen una energía del mismo orden (y a veces un poco superior) que la mezcla de referencia, mientras que las mezclas con 60% de RAP quedan muy por debajo de la de referencia. A 20°C las tendencias son diferentes para cada contenido de RAP, en las mezclas con 20% se destaca la serie 1, con mayor energía que las demás series, debido a las condiciones de fabricación, en las mezclas con 40% de RAP.

Fig. 4.26 Energía disipada G_D de las mezclas con 20% RAP.

Fig. 4.27 Energía disipada G_D de las mezclas con 40% RAP.Fig. 4.28 Energía disipada G_D de las mezclas con 60% RAP.

Efecto de la temperatura y tiempo de mezclado

En las mezclas con 20% se destaca la serie 1, con mucha más energía que el resto de las series, donde se pone en evidencia el efecto del precalentamiento del RAP. En las mezclas con 40% se analizan con detalle a continuación. En el caso del 60% de RAP, sólo la serie 1 es la que presenta mayor energía que la serie de referencia.

La figura 4.29. muestra los resultados entre las distintas series para un 40% de RAP a 20 $^{\circ}C$. Se destaca la influencia del tiempo de mezclado, tanto con los áridos a

160°C como a 200°C. Cuando el RAP se agrega a temperatura ambiente (20°C) pero se sobrecalientan de los áridos vírgenes de aportación a 200°C, esta mezcla mejora la energía disipada de la mezcla.

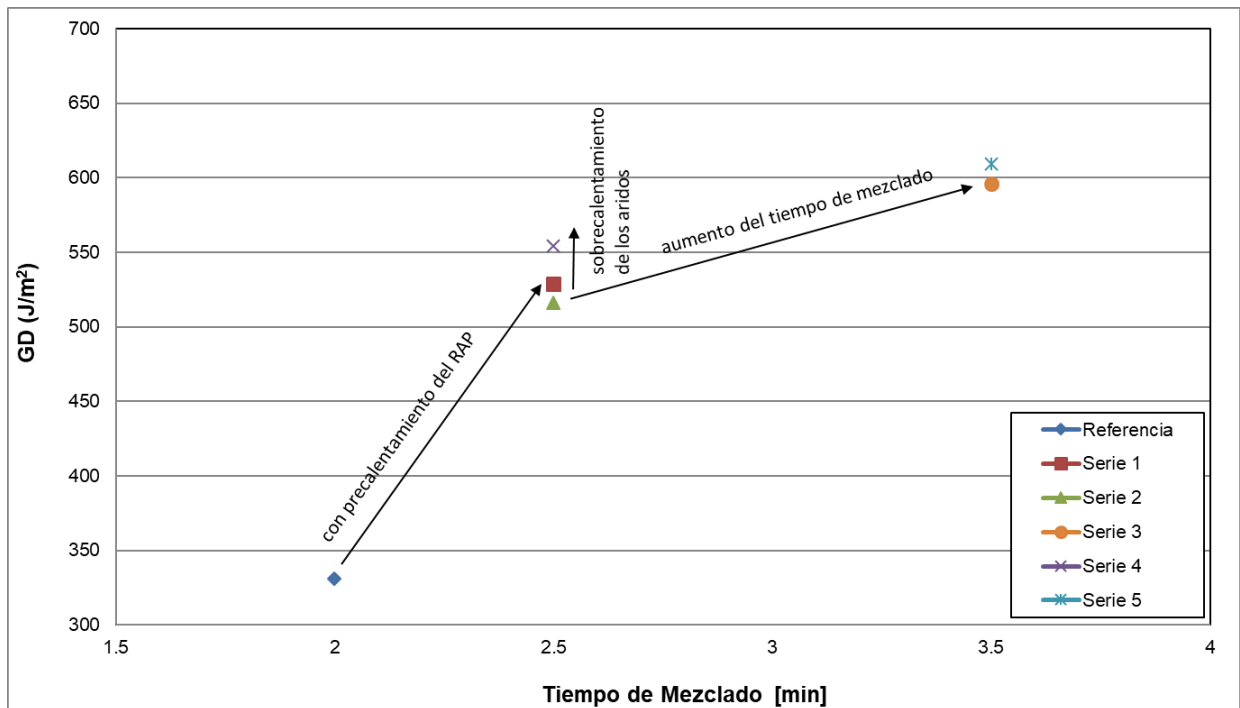


Fig. 4.29 Influencia de la temperatura y tiempo de mezclado en el GD de mezclas recicladas con 40% de RAP y temperatura de ensayo de 20°C.

Desplazamiento al 50% de la carga máxima post pico, d 0.5 (mm)

Para completar la caracterización de la resistencia a la fisuración de las mezclas con RAP, se considerará el desplazamiento al 50% de la carga posterior al pico. Los valores obtenidos del análisis del d 0.5 se informan en las tablas 4.13-4.15 y en los gráficos posteriores (4.30-4.32). En estas figuras se observa que d 0.5 disminuye a medida que la temperatura del ensayo baja. Esto sucede porque la forma de la curva carga-desplazamiento adquiere una forma cada vez más afinada. Las consecuencias de este hecho son los cambios en los parámetros considerados anteriormente. Observando los gráficos (4.30-4.32), los valores del desplazamiento de la mezcla de referencia son los más altos de todas las mezclas analizadas. El betún virgen confiere a la mezcla un buen comportamiento. Vale la pena recordar que el betún virgen utilizado en la mezcla de referencia tiene una penetración menor

(50/70) a comparación de las mezclas con RAP (70/100). A pesar de haber usado un betún de aportación más blando en las mezclas recicladas para compensar el envejecimiento del betún del RAP, este afecta de manera importante las buenas propiedades del betún del de aportación.

Para el caso de la temperatura de ensayo a 20°C, la ductilidad de las mezclas recicladas se ve disminuida al incrementar el contenido de material fresado en su composición, ya que se observa que el desplazamiento al 50% de la carga máxima post pico disminuye drásticamente al incrementar el contenido de RAP de las mezclas. Para el caso de 5°C y -5°C no se puede observar variaciones significativas para todos los porcentajes de RAP, por lo que a bajas temperaturas estudiar este parámetro resulta poco concluyente.

Tabla 4.13 Desplazamiento al 50% de la carga máx. post pico, d 0.5 de las mezclas con 20% de RAP.

Temperatura	Parámetro	0% RAP	20% RAP				
		Ref.	1	2	3	4	5
20°C	d 0.5 (mm)	1.11	1.05	0.76	0.81	1.02	1.10
	Coefficiente de Variación(%)	8.74	19.0	19.4	11.2	21.5	25.5
5°C	d 0.5 (mm)	0.59	0.46	0.46	0.46	0.47	0.47
	Coefficiente de Variación(%)	20.1	7.0	12.9	4.3	16.2	5.5
-5°C	d 0.5 (mm)	0.30	0.23	0.24	0.24	0.26	0.25
	Coefficiente de Variación(%)	35.4	11.7	1.9	19.1	5.5	11.4

Tabla 4.14 Desplazamiento al 50% de la carga máx. post pico, d 0.5 de las mezclas con 40% de RAP.

Temperatura	Parámetro	0% RAP	40% RAP				
		Ref.	1	2	3	4	5
20°C	d _{0.5} (mm)	1.11	0.68	0.69	0.81	0.81	0.82
	Coefficiente de Variación(%)	8.74	19.0	19.4	11.2	21.5	25.5
5°C	d _{0.5} (mm)	0.59	0.36	0.39	0.40	0.41	0.48
	Coefficiente de Variación(%)	20.1	7.0	10.9	7.3	15.3	7.3
-5°C	d _{0.5} (mm)	0.30	0.24	0.24	0.24	0.23	0.24
	Coefficiente de Variación(%)	35.4	9.0	10.1	14.1	5.5	11.4

Tabla 4.15 Desplazamiento al 50% de la carga máx. post pico, d 0.5 de las mezclas con 60% de RAP.

Temperatura	Parámetro	0% RAP	60% RAP				
		Ref.	1	2	3	4	5
20°C	d 0.5 (mm)	1.11	0.55	0.64	0.65	0.52	0.59
	Coefficiente de Variación(%)	8.74	19.0	19.4	22.2	22.5	23.5
5°C	d 0.5 (mm)	0.59	0.39	0.36	0.37	0.58	0.55
	Coefficiente de Variación(%)	20.1	17.0	15.9	8.3	21.1	7.3
-5°C	d 0.5 (mm)	0.30	0.25	0.24	0.21	0.27	0.27
	Coefficiente de Variación(%)	35.4	19.0	11.1	12.1	15.5	14.4

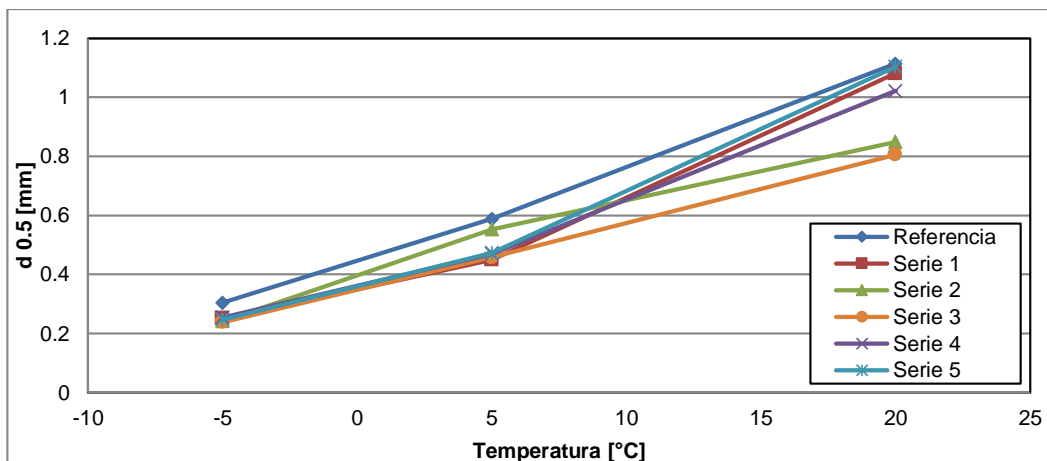


Fig. 4.30 d 0.5 de las mezclas con 20% de RAP.

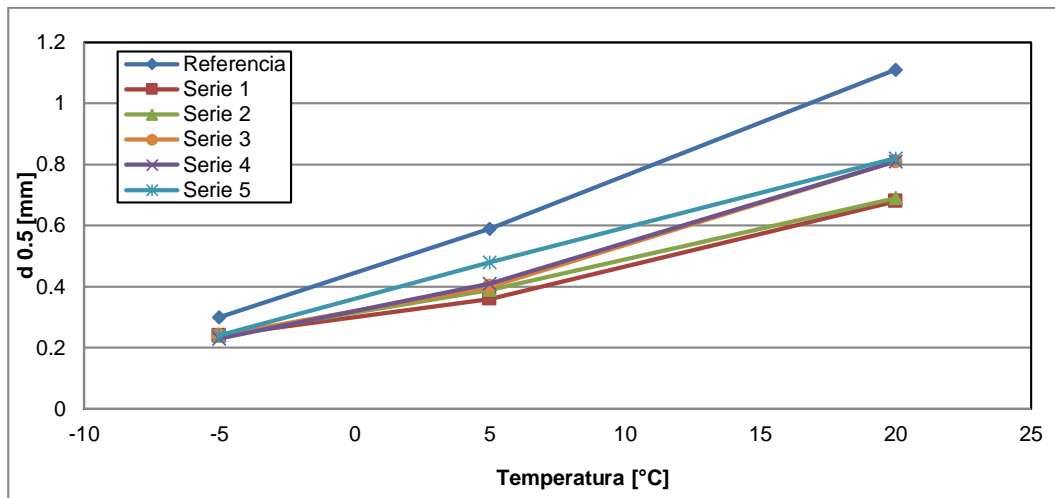


Fig. 4.31 d 0.5 mm de las mezclas con 40% de RAP.

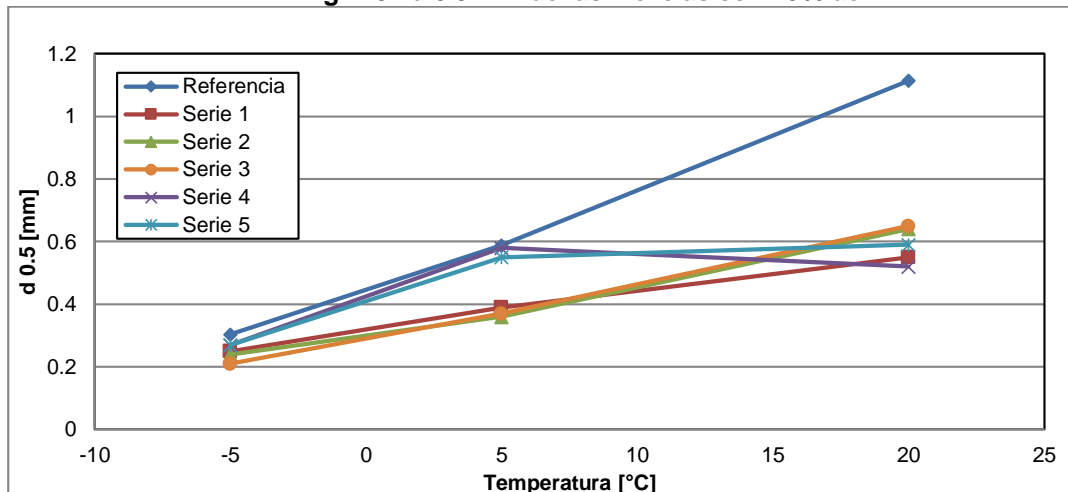


Fig. 4.32 d 0.5 mm de las mezclas con 60% de RAP.

Efecto del tiempo y temperatura de mezclado

Se observa claramente en la fig. 4.33 el efecto del tiempo y temperatura del mezclado en el desplazamiento al 50% de la carga máxima en la zona post-pico. Se consideró seleccionar los valores obtenidos para un 40% de RAP y a una temperatura de ensayo de 20°C ya que estos resultados se reflejan las variaciones considerables. Si el RAP no se precalienta, el sobrecalentamiento de los áridos o el aumento del tiempo de mezclado tiene un efecto similar sobre el d 0.5, pero si se

aumenta el tiempo de mezclado cuando los áridos nuevos se han sobrecalentado (ambas condiciones juntas) no se observan cambios en el resultado del parámetro d 0.5.

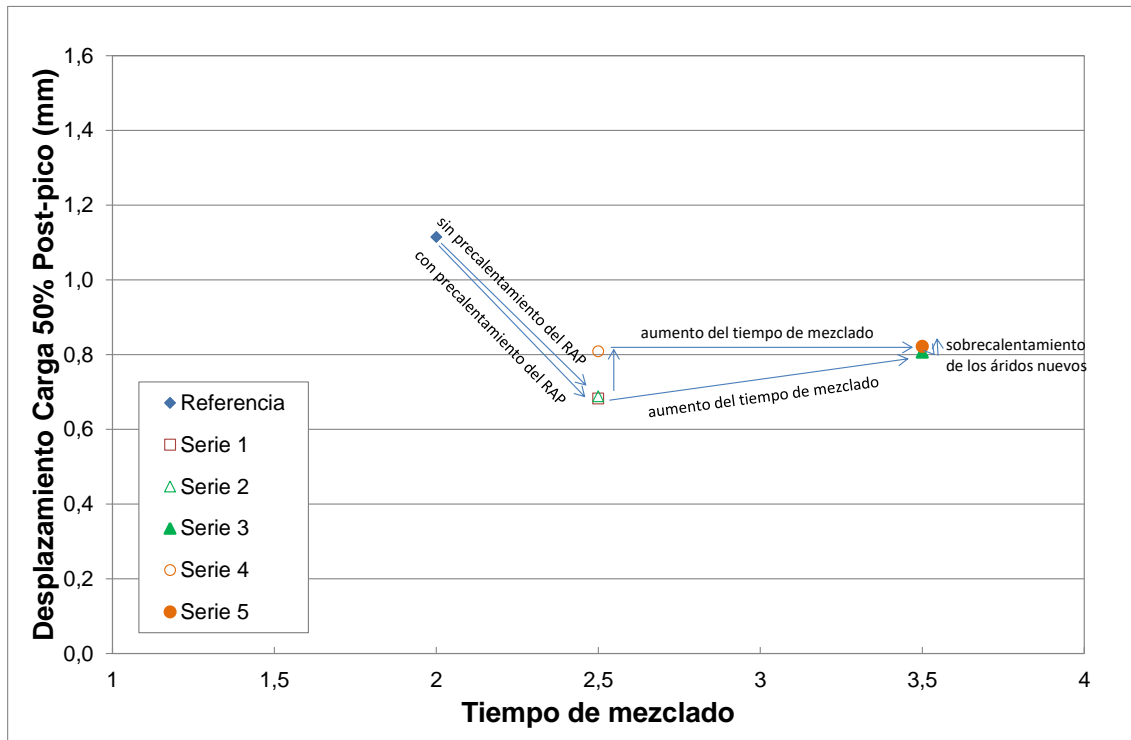


Fig.4.33 Efecto del tiempo y temperatura en el d 0.5 con 40% de RAP y temperatura de ensayo a 20°C.

4.1.2 Segunda Etapa

Esta segunda etapa fue llevada a cabo en el Nottingham Transportation Engineering Centre (NTEC) de la Universidad de Nottingham ubicada en Reino Unido. Esta etapa consistió básicamente en elegir otro RAP con diferentes características respecto al utilizado en la primera etapa. A continuación, se muestran los resultados de: contenido de huecos, módulo de rigidez, resistencia a tracción indirecta y parámetros del ensayo Fénix.

4.1.2.1 Contenido de huecos de aire

Se vuelve a recordar las condiciones de tiempo y temperatura de las mezclas de referencia y mezclas recicladas con solo 60% de RAP en la tabla 3.6. recogida de la metodología.

Tabla 3.6 Condiciones de tiempo y temperatura de las mezclas de referencia y mezclas recicladas con 60% de RAP.

Mezcla	Temperatura Áridos (°C)	Temperatura RAP (°C)	Tiempo mezclado (min)
Referencia	160	-	2
Serie 1	160	110	2.5
Serie 2	160	110	5.0
Serie 3	160	20	2.5
Serie 4	160	20	5.0

Una vez concluida la primera etapa, habiendo procesado los datos y calculado los valores medios del contenido de huecos se procedió a realizar las tablas y las gráficas con este parámetro, en las figuras 4.34, 4.35 y en la tabla 4.16 se muestran el comportamiento del contenido de huecos de la mezcla virgen y las mezclas fabricadas con 60% de RAP.

Tabla 4.16 Valores medios del contenido de huecos para la mezcla de referencia y mezcla reciclada con un 60% de RAP.

		0 % RAP	60% RAP			
		Referencia	1	2	3	4
Condición de Mezclado		Árido: 160°C 2:00 min	Árido 160°C RAP 110°C 2:30 min	Árido 160°C RAP 110°C 5:00 min	Árido 160°C RAP 20°C 2:30 min	Árido 160°C RAP 20°C 5:00 min
75 Golpes	Contenido de Huecos (%)	3.7	4.7	4.3	6.7	5.3
50 Golpes	Contenido de Huecos (%)	4.4	5.7	5.2	7.3	6.5

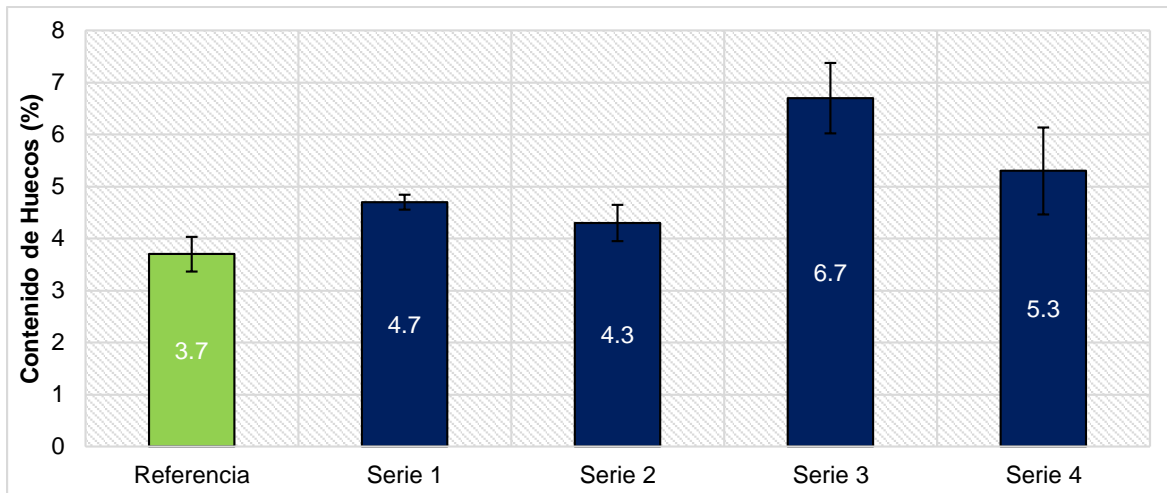


Fig.4.34 Contenido de Huecos de las series con 60% de RAP y 75 golpes.

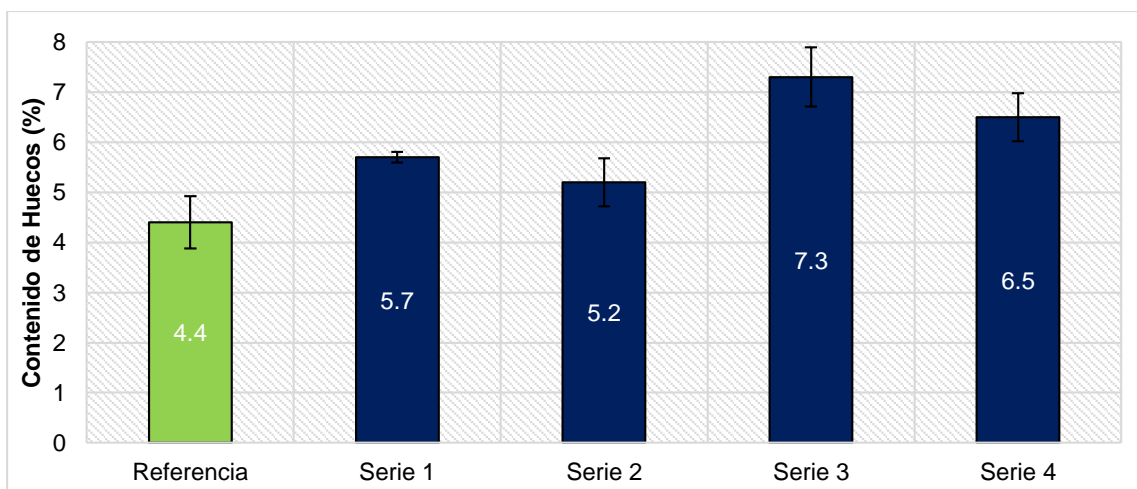


Fig.4.35 Contenido de Huecos de las series con 60% de RAP y 50 golpes.

Para analizar el efecto de la temperatura y el tiempo de mezclado se ha representado gráficamente el contenido de huecos a 75 golpes en la fig.4.36. De esta figura se puede aseverar que:

En términos generales, para todos los casos, si se precalienta el RAP o se aumenta el tiempo de mezclado se obtuvo un efecto positivo en el contenido de huecos de aire. El menor contenido de huecos se da en la serie donde las mezclas recicladas se han producido precalentando el RAP a 110°C y se ha mezclado 5 minutos, por lo que estas condiciones favorecieron que la mezcla tienda a compactarse mejor, alcanzando valores similares a la de la mezcla de referencia. Una posible

explicación es que al precalentar el RAP se consigue movilizar mayor cantidad de betún envejecido y al aumentar el tiempo de mezclado las aglomeraciones del RAP comienzan a separarse y por ende se produce una mejor compactación en las mezclas.

Si comparamos sólo las series recicladas, podemos apreciar que, para un mismo tiempo de mezclado, pero diferentes temperaturas del RAP (20°C vs 110°C) hay una gran disminución de huecos del orden de 43% como máximo (Serie 3 vs Serie 1 a 75 golpes). Este porcentaje se calculó teniendo como base el menor valor. Haciendo el mismo razonamiento, para una misma temperatura, pero diferentes tiempos de mezclado del RAP (2.5 minutos vs 5 minutos) el contenido de huecos disminuye alrededor del 30% como máximo (Serie 3 vs Serie 4 a 75 golpes).

Una solución, para tomar en consideración en el diseño de mezclas recicladas, sería la aplicación de una u otra condición (precalentamiento del RAP y extensión del tiempo de mezclado), para alcanzar los límites exigidos por las especificaciones del contenido de huecos de la mezcla. Al emplear ambas condiciones, simultáneamente se produce un mayor efecto en el desempeño final de la mezcla reciclada (serie 3 vs serie 2).

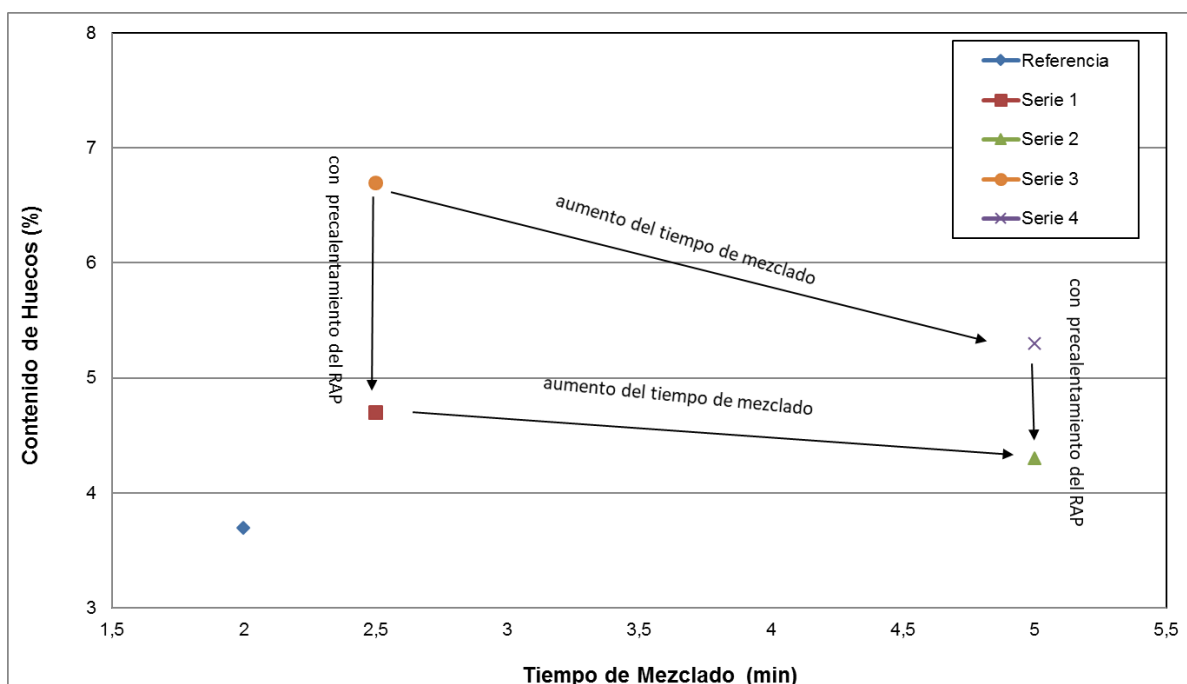


Fig.4.36 Efecto del tiempo y temperatura en el contenido de huecos.

4.1.2.2 Módulo de Rigidez

Los valores medios del módulo de rigidez a 20°C se recogen en la tabla 4.17. y se grafican en la figura 4.37. Como se puede apreciar, el mayor módulo de rigidez de todas las mezclas estudiadas se obtiene con la mezcla reciclada donde el RAP se precalienta a 110°C y el tiempo de mezclado se extiende a 5 minutos. En general, las tendencias mostradas por el módulo concuerdan con las presentadas por los huecos: a mayor contenido de huecos, menor módulo.

El coeficiente de variación refleja que el módulo de rigidez en las mejores condiciones de fabricación, serie 2, es la que presenta menor dispersión, incluso siendo menor que la de la mezcla de referencia. En contraste, la que más presenta dispersión es la serie que se ha hecho en las condiciones más desfavorables de mezclado, serie 3.

Tabla 4.17 Valores medios de los módulos de rigidez para las diferentes mezclas estudiadas.

Mezcla de Referencia	
Módulo de Rigidez (MPa)	6540
Coeficiente de Variación(%)	7.9

Porcentaje	Parámetro	Serie 1	Serie 2	Serie 3	Serie 4
60%	Módulo de Rigidez (MPa)	6035	7306	3093	5179
	Coeficiente de Variación(%)	8.1	7.2	12.1	10.1

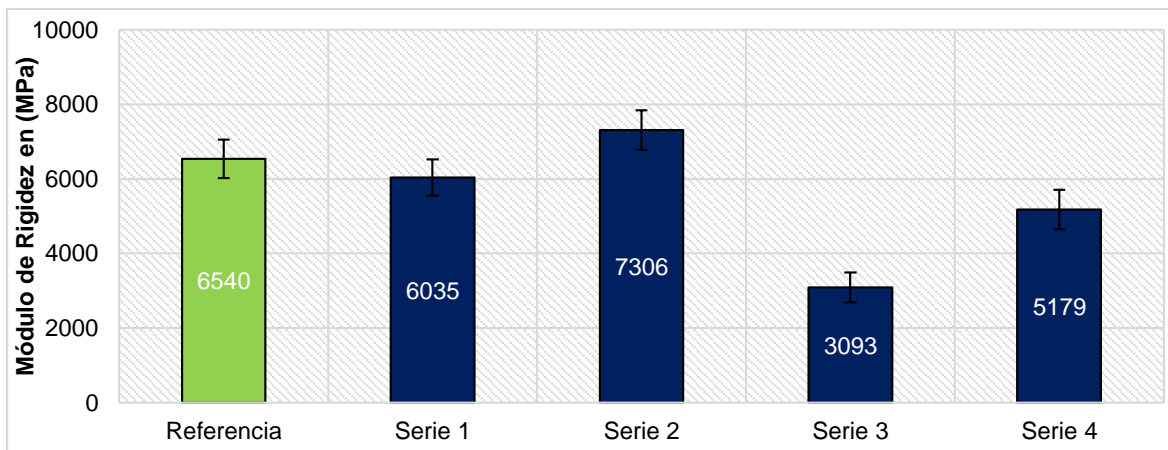


Fig.4.37 Módulo de Rigidez con un 60% de RAP.

Para analizar el efecto de la temperatura y el tiempo de mezclado se ha representado gráficamente el módulo de rigidez con estas 2 variables en la figura 4.38. Se puede concluir que:

El mayor módulo se da en la serie donde las mezclas fabricadas se han hecho precalentando el RAP a 110°C y se ha mezclado 5 minutos. En términos generales, para todos los casos, si se precalienta el RAP o se aumenta el tiempo de mezclado se obtiene un aumento del valor de módulo de rigidez.

Si comparamos sólo las series recicladas, podemos apreciar que, para un mismo tiempo de mezclado, pero diferentes temperaturas del RAP (110°C vs 20°C) hay un incremento considerable llegando casi a duplicar el valor de módulo de rigidez (Serie 3 vs Serie 1). Para una misma temperatura, pero extendiendo el tiempo de mezclado (de 2.5 minutos a 5 minutos) el módulo de rigidez aumenta alrededor de 70%. (Serie 3 vs Serie 4). Este porcentaje se calculó teniendo como base el menor valor.

Una conclusión para tomar en cuenta en el diseño de mezclas recicladas sería que es suficiente aplicar una u otra condición (precalentamiento del RAP y aumento del tiempo de mezclado), para aumentar la rigidez de la mezcla. Al aplicar ambas condiciones simultáneamente se produce un efecto muy significativo en el

comportamiento de la mezcla a rigidez (serie 2 vs serie 3), alcanzando valores similares a la mezcla de referencia.

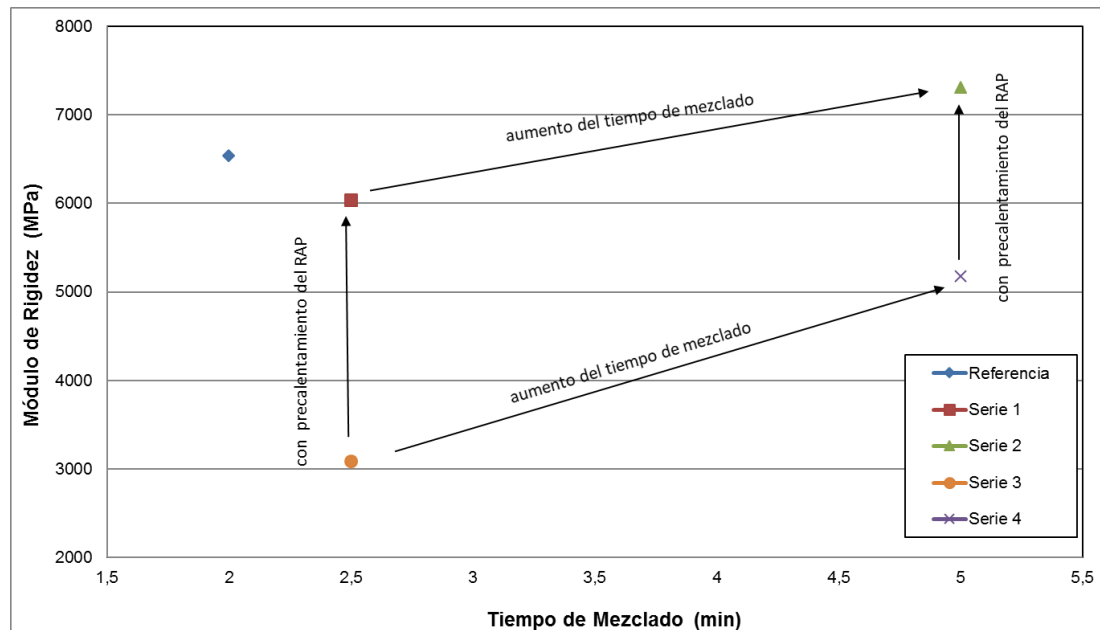


Fig.4.38 Efecto del tiempo y temperatura en el módulo de rigidez.

4.1.2.3 Resistencia a Tracción Indirecta

Se procedió a calcular los valores medios de resistencia a tracción indirecta en seco y tras inmersión de las mezclas fabricadas en diferentes condiciones de fabricación tal y como se muestra en la tabla 4.18 y en la figura 4.39.

Tabla 4.18 Valores medios de la resistencia a tracción indirecta para las diferentes mezclas estudiadas.

Parámetro	0 % RAP	60% RAP			
	Referencia	1	2	3	4
Condición de Mezclado	Árido: 160°C 2:00 min	Árido 160°C RAP 110°C 2:30 min	Árido 160°C RAP 110°C 5:00 min	Árido 160°C RAP 20°C 2:30 min	Árido 160°C RAP 20°C 5:00 min
RTI Seca (MPa)	2.43	2.20	2.57	1.34	1.86
Coefficiente de Variación(%)	1.9	9.0	5.7	10.34	7.25
RTI Húmeda (MPa)	2.26	1.89	2.32	1.03	1.52
Coefficiente de Variación(%)	5.1	2.7	2.9	3.5	10.5

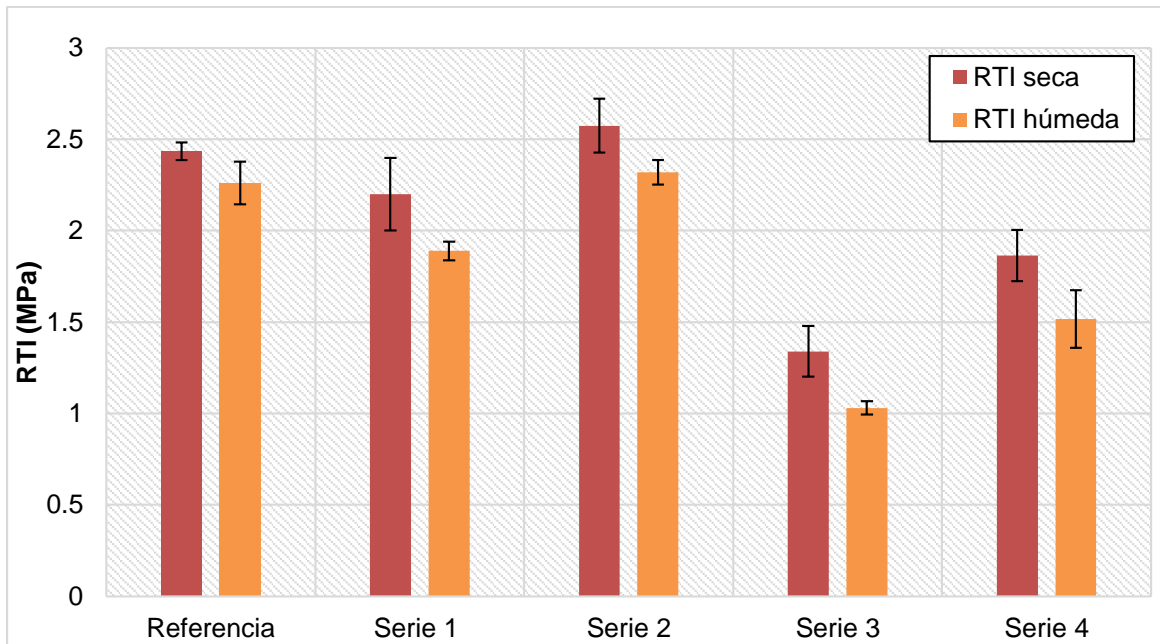


Fig. 4.39 Resistencia a tracción indirecta en seco y tras inmersión de las series con 60% de RAP a 15°C.

En la figura y tabla anterior se pueden observar tendencias muy significativas entre las que se pueden mencionar las siguientes: Las mezclas recicladas donde se ha precalentado el RAP a 110°C y se ha incrementado el tiempo de mezclado a 5 minutos (serie 3) logran las resistencias a tracción indirecta más elevadas tanto en seco como en inmersión.

En términos generales, para todos los casos, si se precalienta el RAP o se aumenta el tiempo de mezclado se obtiene un aumento del valor de RTI. Para un mismo tiempo de mezclado, pero diferentes temperaturas del RAP (110°C vs 20°C) hay un incremento de más del 80% del valor de la tracción indirecta tras inmersión (Serie 3 vs Serie 1). Para una misma temperatura, pero diferentes tiempos de mezclado del RAP (2.5 minutos vs 5 minutos) hay un gran aumento de este valor de más de del 50% del valor de la tracción indirecta húmeda (Serie 3 vs Serie 4).

Resistencia conservada

En la figura 4.40 queda representada la relación entre las resistencias vía seca y húmeda (resistencia conservada). De todas las mezclas estudiadas la mezcla de referencia es la que tiene un mayor valor de resistencia conservada, seguida de la mezcla con el precalentamiento del RAP y mayor tiempo de mezclado, serie 2. La mezcla fabricada sin calentar el RAP y donde el tiempo de mezclado es menor (serie 3) es la que muestra la menor resistencia conservada.

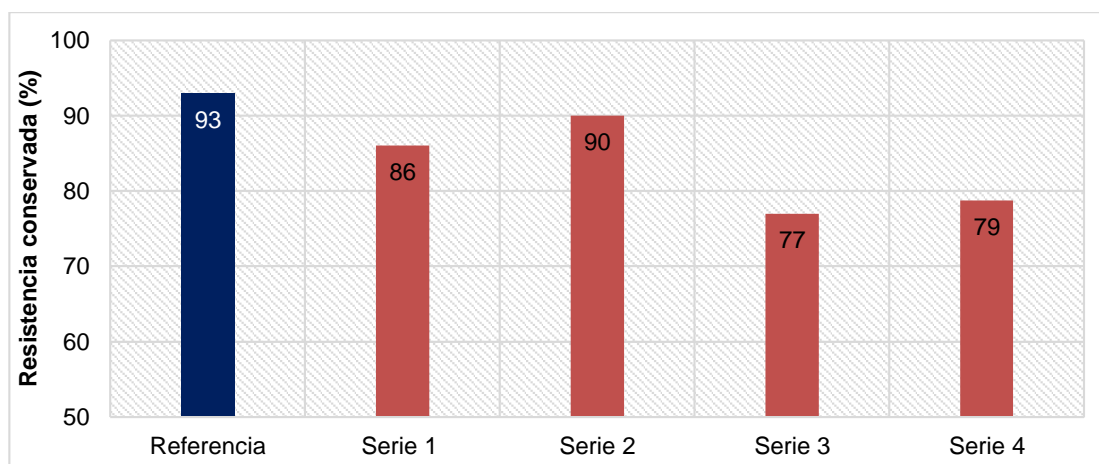


Fig.4.40. Resistencia conservada de las series analizadas.

Se pone de manifiesto que, en las series con las peores condiciones de fabricación, la resistencia conservada baja hasta valores menores de 80% por lo que no cumplen la especificación mínima para la resistencia conservada. Es de suma importancia fabricar las mezclas recicladas en las mejores condiciones para poder recuperar las propiedades del RAP y así cumplir los valores exigidos por las especificaciones.

Para poder apreciar con más claridad la influencia de la temperatura y tiempo de mezclado en la resistencia conservada se ha graficado en la figura 4.41 la resistencia conservada en términos de tiempo y temperatura de mezclado. En términos generales, para todos los casos, si se precalienta el RAP o se aumenta el tiempo de mezclado se obtuvo una cierta recuperación del valor de resistencia conservada.

Para un mismo tiempo de mezclado, pero diferentes temperaturas del RAP (110°C vs 20°C) hay un ligero aumento de casi el 15% del valor de la resistencia conservada (Serie 2 vs Serie 4).

Si comparamos la serie que tiene las peores condiciones (serie 3) con la serie con las mejores condiciones (serie 2) existe un aumento un poco mayor de casi el 20% del valor de la resistencia conservada.

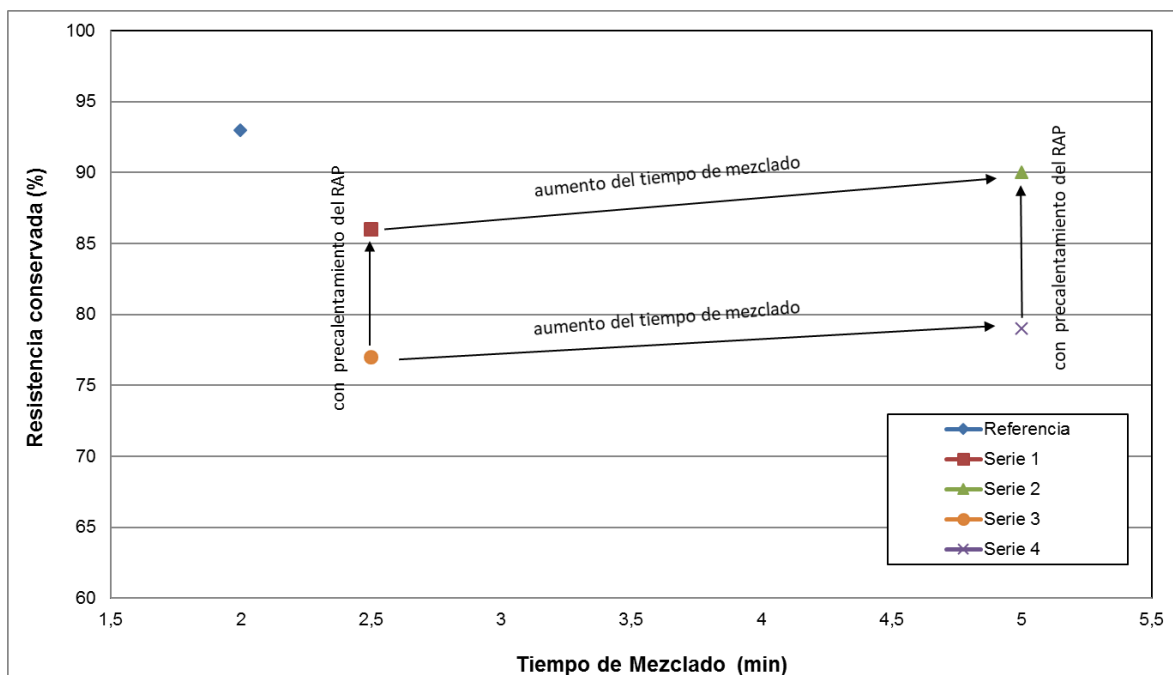


Fig.4.41. Influencia del tiempo y temperatura en la resistencia conservada.

4.1.2.4 Ensayo Fénix

Índice de Rigidez a Tracción (IRT)

Se vuelve a recordar las condiciones de tiempo y temperatura de las mezclas de referencia y mezclas recicladas con solo 60% de RAP en la tabla 3.6 tomada del capítulo 3 "Metodología".

Tabla 3.6 Condiciones de tiempo y temperatura de las mezclas de referencia y mezclas recicladas con 60% de RAP.

Mezcla	Temperatura Áridos (°C)	Temperatura RAP (°C)	Tiempo mezclado (min)
Referencia	160	-	2
Serie 1	160	110	2.5
Serie 2	160	110	5.0
Serie 3	160	20	2.5
Serie 4	160	20	5.0

En la tabla 4.19 se presenta el resumen de los valores medios de IRT obtenidos para cada uno de los diferentes grupos de probetas sometidas al Ensayo Fénix para 2 temperaturas (20°C y 5°C). En esta tabla también se presenta el coeficiente de variación y se puede apreciar que, en el caso de la temperatura de ensayo de 20°C, las mezclas con las mejores condiciones de mezclado, serie 2, son las que la presenta la menor dispersión. En contraste, la serie fabricada en las condiciones más desfavorables, es la que tiene una mayor dispersión.

Una vez calculados los valores de IRT se procede a graficarlos en la fig. 4.42, la cual muestra la resistencia a tracción media obtenida por cada una de las mezclas evaluadas y se puede observar claramente para ambas temperaturas (5°C y 20°C, las curvas siguen las mismas tendencias.

Tabla 4.19 Valores medios del IRT de las mezclas estudiadas.

Temperatura	Parámetro	0% RAP	60% RAP			
		Ref.	1	2	3	4
20°C	IRT (kN/mm)	8.44	7.5	10.0	5.5	6.5
	Coeficiente de Variación(%)	3.38	9.3	4.8	11.2	8.5
5°C	IRT (kN/mm)	15.7	15.1	16.6	11.5	13.0
	Coeficiente de Variación(%)	4.38	12.5	5.6	5.9	2.2

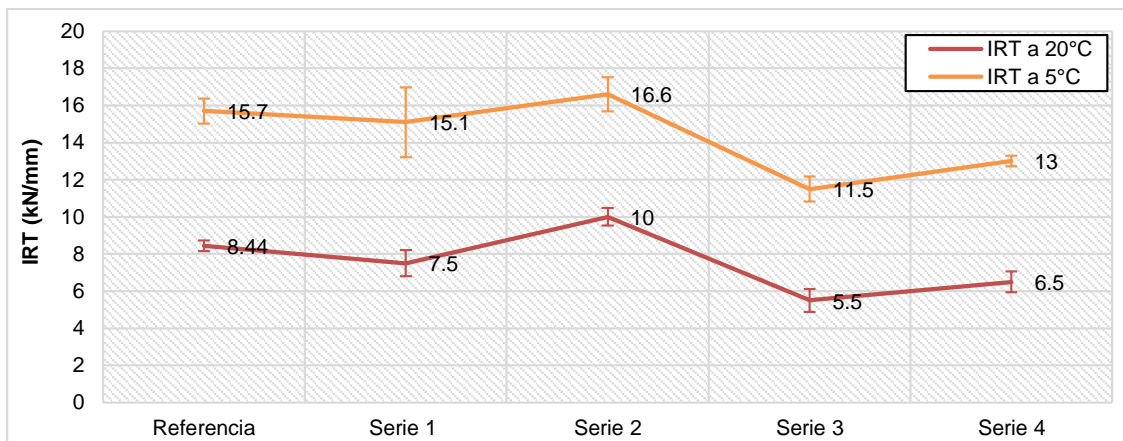


Fig. 4.42 Gráfica del IRT de las mezclas ensayadas a 20°C y 5°C.

A continuación, se puede observar el efecto del tiempo y de la temperatura de mezclado en la fig.4.43 para un IRT a 20°C que es donde se presentan tendencias más significativas, entre las que se pueden mencionar las siguientes:

En términos generales, para todos los casos, si se precalienta el RAP o se aumenta el tiempo de mezclado se obtiene un aumento del valor del índice de resistencia a tracción.

Para todas las mezclas estudiadas (referencia y recicladas) la mezcla fabricada con el RAP a 110°C y tiempo de 5 minutos es la que presenta el mayor IRT. Tomando en cuenta sólo las mezclas recicladas, se puede establecer que para un mismo tiempo de mezclado, pero diferentes temperaturas del RAP (110°C vs 20°C) incrementa alrededor de 55% del valor del IRT (Serie 4 vs Serie 2). Este porcentaje se calculó tomando como base el valor menor. Similarmente para una misma temperatura, pero diferentes tiempos de mezclado del RAP (2.5 minutos vs 5 minutos) hay un aumento de más del 33% (Serie 1 vs Serie 2). Por lo que, en este caso, la temperatura de mezclado tuvo un poco más de influencia con respecto al tiempo de mezclado.

Si se compara la serie en la que se tiene las mejores condiciones de tiempo y temperatura, contra las condiciones más desfavorables (serie 2 vs serie 3) se puede concluir que existe una diferencia de alrededor de 80% en el valor de IRT, por lo

que si se conjuntan el tiempo y temperatura jugarán un papel muy importante para el desempeño de la mezcla.

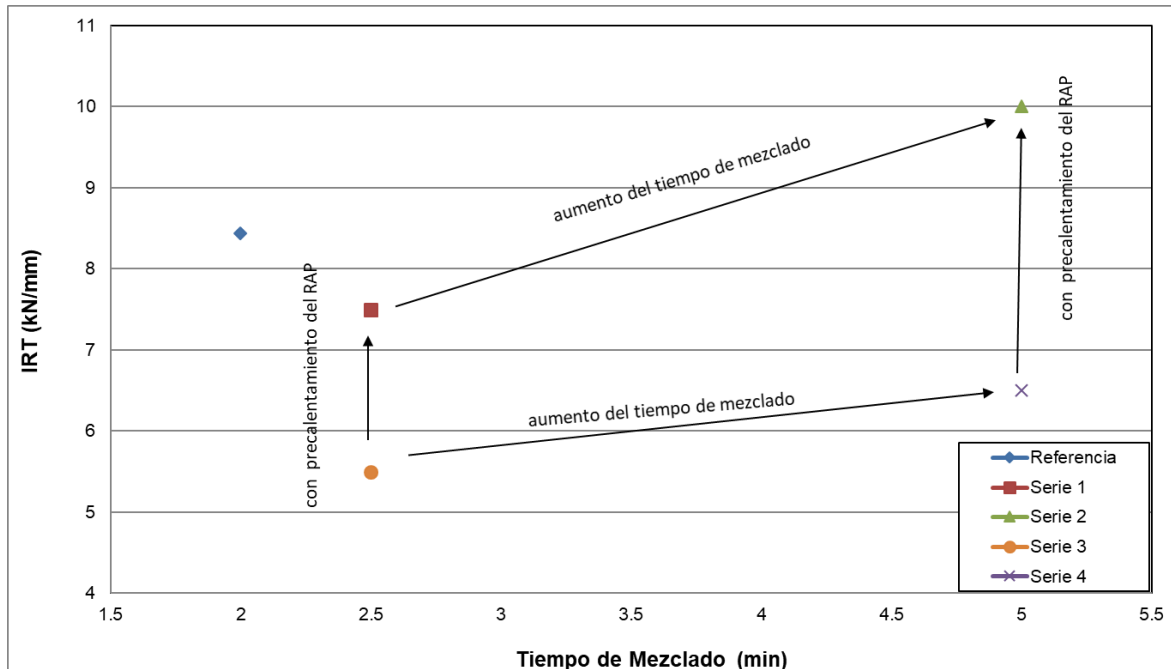


Fig. 4.43 Influencia del tiempo y temperatura en el IRT a 20°C.

Energía disipada

Se presenta el resumen de los valores promedios de G_D obtenidos para cada una de las diferentes series de probetas sometidas al ensayo Fénix para 2 temperaturas (20°C y 5°C) en la figura 4.44 y en la tabla 4.20. También se presenta el coeficiente de variación y se puede deducir que reiteradamente en el caso de las mezclas recicladas, la dispersión más baja (tanto para 20°C como para 5°C) se encuentra en las mezclas con las ideales condiciones de tiempo y temperatura de mezclado, serie 2, por lo que un compuesto bien mezclado tiene una distribución más homogénea de los áridos y un buen grado de mezclado entre los betunes participantes. No obstante, la serie fabricada bajo las condiciones más desfavorables, es la que tiene mayor dispersión, serie 4. El valor máximo de G_D de todas las mezclas estudiadas se presenta en la mezcla de referencia ensayada a 5°C.

Tabla 4.20. Energía disipada a tracción de las mezclas con 60% de RAP.

Temperatura	Parámetro	0% RAP	60% RAP			
		Ref.	1	2	3	4
20°C	G _D (J/m ²)	388	308	543	138	197
	Coefficiente de Variación(%)	6.6	5.92	11.3	12.3	21.5
5°C	G _D (J/m ²)	622	398	607	200	267
	Coefficiente de Variación(%)	8.93	11.8	12.4	12.9	16.8

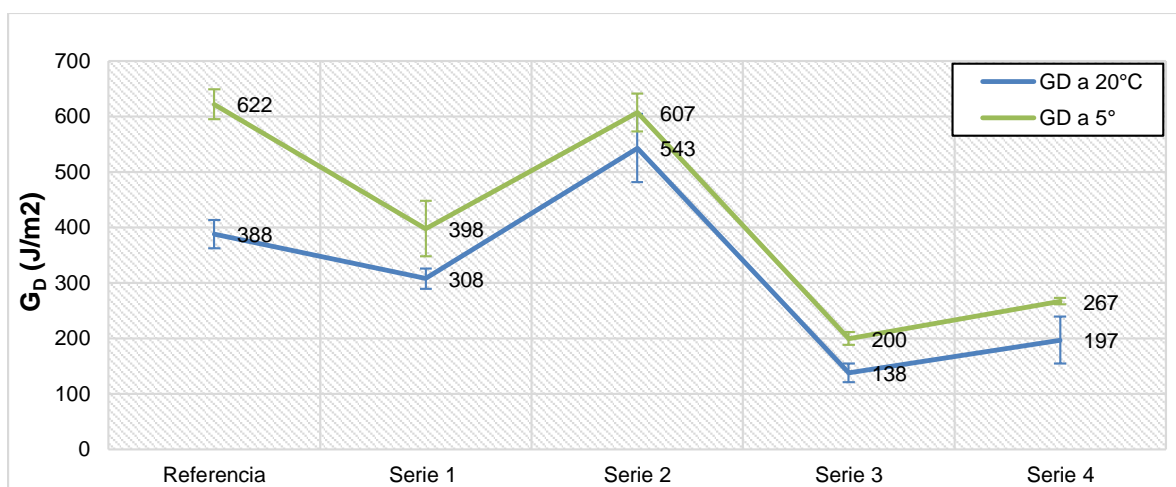


Fig. 4.44 Energía disipada de las mezclas analizadas.

Para analizar el efecto del tiempo y de la temperatura de mezclado en la fig.4.45 queda reflejado el G_D a 20°C ya que es la temperatura donde mejor se identifica las variaciones. De estas tendencias se pueden mencionar las siguientes:

Hemos establecido que, si se precalienta el RAP o se aumenta el tiempo de mezclado se obtiene un aumento del valor de G_D. La mezcla reciclada fabricada con el RAP a 110°C y tiempo de 5 minutos es la que presenta el máximo valor de G_D (serie 2).

Para una misma temperatura, pero diferentes tiempos de mezclado del RAP (2.5 minutos vs 5 minutos) hay un aumento de aproximadamente 80% del valor de la energía disipada (Serie 1 vs Serie 2). Similarmente para un mismo tiempo de mezclado, pero diferentes temperaturas del RAP (110°C vs 20°C), el valor del G_D

se eleva del orden de 175% (Serie 2 vs Serie 4), por lo que casi se triplica el valor del G_D con el simple hecho de precalentar el RAP. En este caso la temperatura tuvo mayor impacto que el tiempo de mezclado.

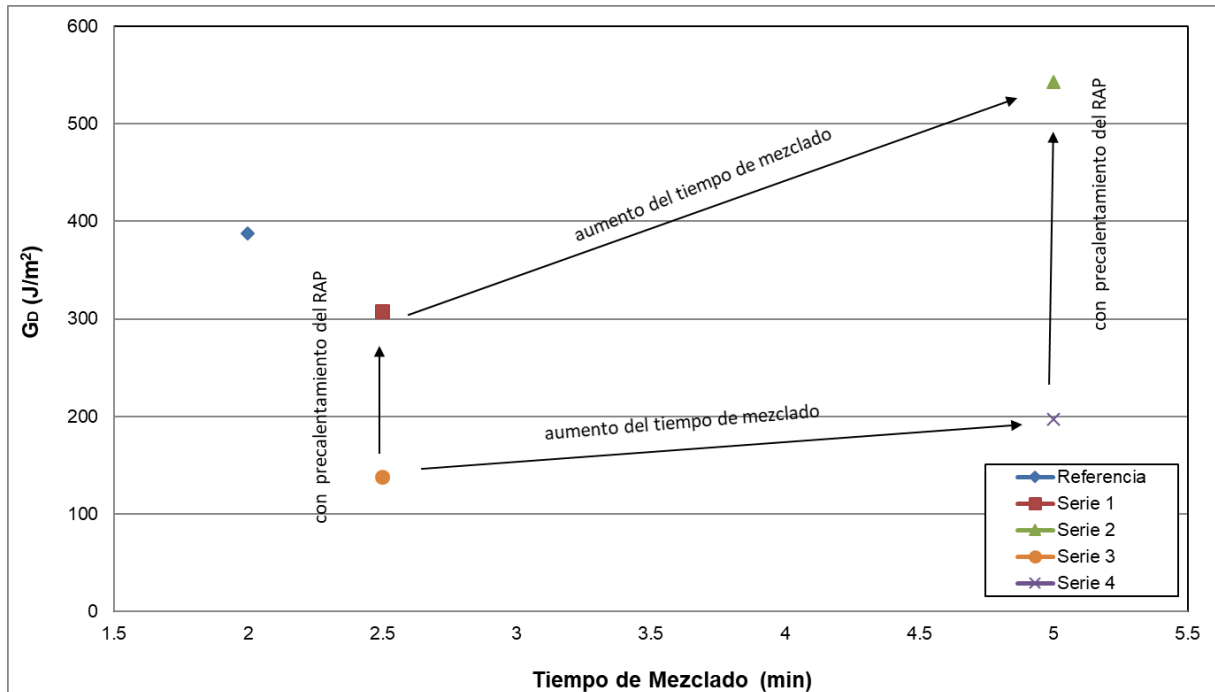


Fig. 4.45 Influencia del tiempo y temperatura en la energía disipada a 20°C.

Desplazamiento al 50% de la carga máxima post pico, d 0.5 mm

En la tabla 4.21 y la figura 4.46 (5°C y 20°C) se representan los resultados obtenidos del d 0.5. Tomando en cuenta las 2 temperaturas de ensayo, la mezcla de referencia presenta el mayor d 0.5 y la menor variabilidad de datos, mientras que la serie reciclada que se ha producido bajo las condiciones más desfavorables, presenta el menor d 0.5. Se puede observar claramente para ambas temperaturas (5°C y 20°C), las curvas siguen las mismas tendencias.

Tabla 4.21 Desplazamiento al 50% de la carga máx. post pico, d 0.5 de las mezclas con 60% de RAP.

Temperatura	Parámetro	0% RAP	60% RAP			
		Ref.	1	2	3	4
20°C	d 0.5 (mm)	1.23	0.78	0.85	0.68	0.72
	Coefficiente de Variación(%)	1.7	3.35	4.34	2.5	4.3
5°C	d 0.5 (mm)	0.47	0.40	0.45	0.30	0.36
	Coefficiente de Variación(%)	6.4	11.6	5.5	15.3	5.6

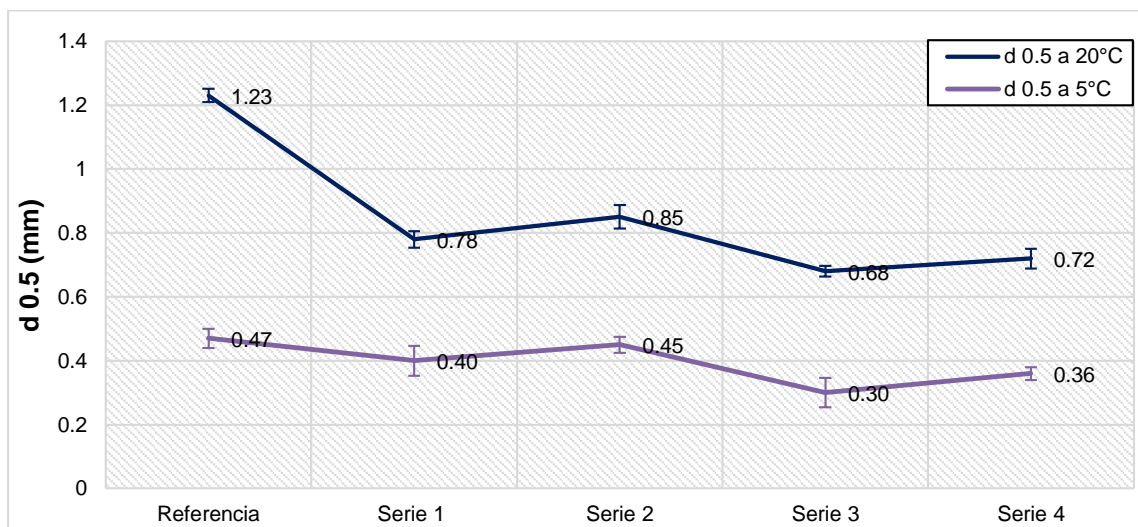


Fig. 4.46 Desplazamiento al 50% de la carga máx. post pico, d 0.5 mm de las mezclas con 60% de RAP.

Se puede apreciar que en todas las series recicladas el valor de d 0.5 están por debajo de la serie de referencia.

A continuación, se analiza el efecto del tiempo y de la temperatura de mezclado en la figura 4.47 para un d 0.5 a 20°C que es donde nuevamente se presentan tendencias más significativas entre las que se pueden mencionar las siguientes conclusiones:

Para todos los casos, si se precalienta el RAP o se aumenta el tiempo de mezclado se obtiene una cierta mejora en esta propiedad, confiriendo ductilidad a mezcla. En el caso de las mezclas recicladas, la mezcla fabricada con precalentamiento del RAP y tiempo aumentado es la que adquiere mayor d 0.5.

Si se comparan únicamente las series recicladas, se puede concluir que, para un mismo tiempo de mezclado, pero diferentes temperaturas del RAP (110°C vs 20°C) el desplazamiento aumenta aproximadamente 20% (Serie 4 vs Serie 2). Este porcentaje se ha calculado tomando como base el menor valor. De manera similar para una misma temperatura, pero diferentes tiempos de mezclado del RAP hay una ligera recuperación del 10% del valor de la ductilidad. Comparando la serie en la que se tiene las mejores condiciones de tiempo y temperatura, contra las condiciones más desfavorables (serie 2 vs serie 3) se puede concluir que existe una diferencia del orden de 25% en el valor del desplazamiento, por lo que el tiempo y temperatura coadyuvan conjuntamente para que la mezcla adquiera una mayor ductilidad.

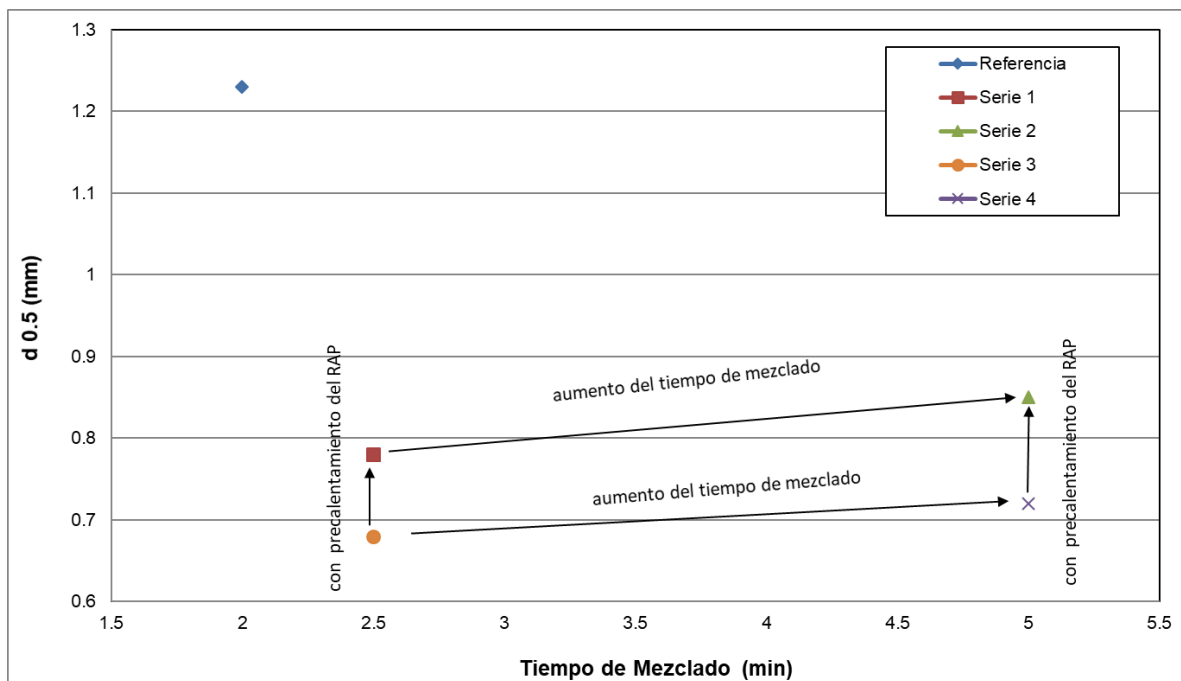


Fig. 4.47 Influencia del tiempo y temperatura en desplazamiento al 50% de la carga máx. post pico, d 0.5 a 20°C.

4.2 Efecto de rejuvenecedores en mezclas bituminosas recicladas

4.2.1 Contenido de huecos

La tabla 4.22 y figura 4.48 muestran los valores medios del contenido de huecos de cada una de las series analizadas junto con las barras de error representando la desviación estándar. Estos resultados destacan el efecto del 60% de RAP en la mezcla reciclada, dado que todas las mezclas recicladas incrementan el contenido de huecos hasta en un 2% con respecto a la mezcla de referencia. Al añadir el rejuvenecedor en bajas dotaciones (5%) la modificación en el contenido de huecos es nulo. Si agregamos el rejuvenecedor en dotaciones recomendadas por el fabricante (10%), el cambio del contenido de huecos es pequeño. Y si agregamos rejuvenecedor en grandes cantidades (20%), este parámetro disminuye significativamente (26% del contenido de huecos de aire de la mezcla sin rejuvenecedor).

Tabla 4.22 Valores medios del contenido de huecos para las mezclas estudiadas.

	Contenido de Huecos (%)			
0 % RAP	60% RAP			
Referencia	0% Rejuvenecedor	5% Rejuvenecedor	10% Rejuvenecedor	20% Rejuvenecedor
3.9	6.8	6.9	6.3	5.4

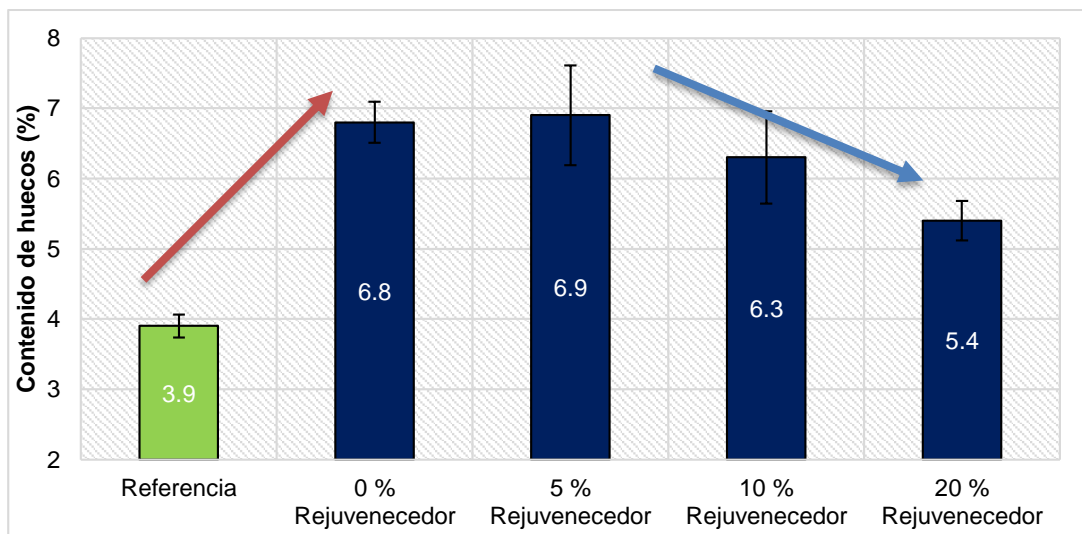


Fig.4.48 Contenido de huecos y desviación estándar de las mezclas estudiadas.

4.2.2 Módulo de Rigidez

El módulo de rigidez se aprecia en la tabla 4.23 y en la figura 4.49. Cuando el RAP se incorpora a la mezcla, el valor del módulo de rigidez aumenta considerablemente, llegando a duplicarlo en el caso de las mezclas recicladas sin rejuvenecedor, poniendo en evidencia el efecto del betún envejecido, dando por resultado una mezcla más rígida. Este efecto ha sido observado por muchos investigadores, aunque no existe un consenso general al respecto (Izaks et al., 2015). Al añadir el rejuvenecedor, se observa un cambio notable en el valor del módulo, que se reduce significativamente con respecto al de la mezcla reciclada sin rejuvenecedor, a pesar de mantener un contenido de huecos similar. Si se comparan los resultados con la mezcla de referencia, se aprecia cómo las mezclas con el rejuvenecedor con 5% y 10%, muestran módulos más similares. Sin embargo, con un 20% de aditivo el módulo se había reducido mucho más que el de la mezcla de referencia (64% del módulo de referencia).

Tabla 4.23 Valores medios de los módulos de rigidez para las diferentes mezclas estudiadas.

Parámetro	0 % RAP	60% RAP			
	Referencia	0% Rejuvenecedor	5% Rejuvenecedor	10% Rejuvenecedor	20% Rejuvenecedor
Módulo de Rigidez (MPa)	4202	8609	5111	4855	2716
Coefficiente de Variación(%)	8.0	3.7	21.0	9.27	6.9

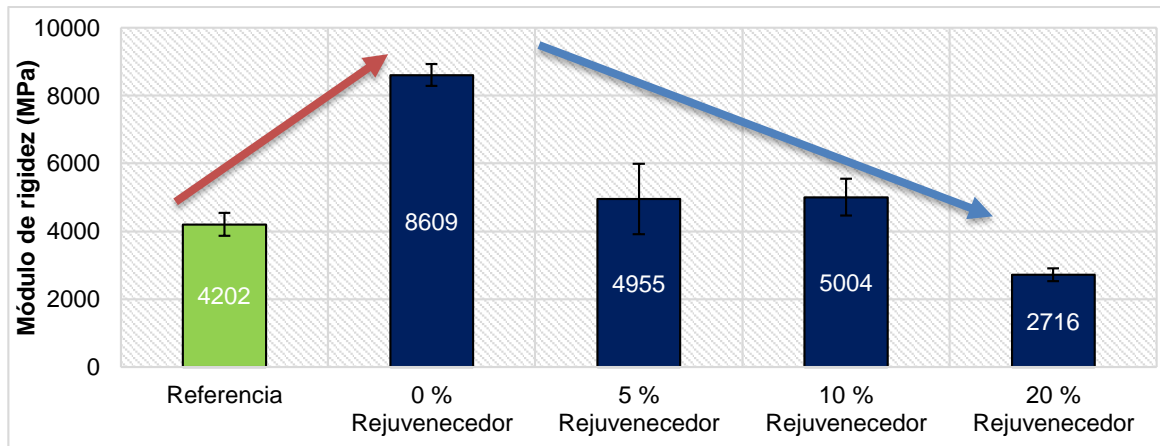


Fig.4.49 Módulo de rigidez y barras de error de las mezclas analizadas.

4.2.3 Resistencia a tracción indirecta

La resistencia a tracción indirecta (RTI) por la vía seca muestra el máximo valor en la mezcla reciclada sin rejuvenecedor, como se puede apreciar en la tabla 4.24 y figura 4.50. La RTI por la vía húmeda muestra una tendencia similar a la mostrada en la vía seca; y nuevamente la mayor resistencia corresponde a las mezclas recicladas sin rejuvenecedor. El efecto del rejuvenecedor en todos los casos hace disminuir tanto la resistencia por la vía seca como por la vía húmeda.

Tabla 4.24 Valores medios de la resistencia a tracción indirecta para las diferentes mezclas.

Parámetro	0 % RAP	60% RAP			
	Referencia	0% Rejuvenecedor	5% Rejuvenecedor	10% Rejuvenecedor	20% Rejuvenecedor
RTI Seca (MPa)	1.95	2.41	1.52	1.72	1.31
Coefficiente de Variación (%)	2.7	0.5	0.5	12.3	4.9
RTI Húmeda (MPa)	1.85	2.18	1.38	1.63	1.22
Coefficiente de Variación (%)	9.9	8.0	5.9	6.9	4.5

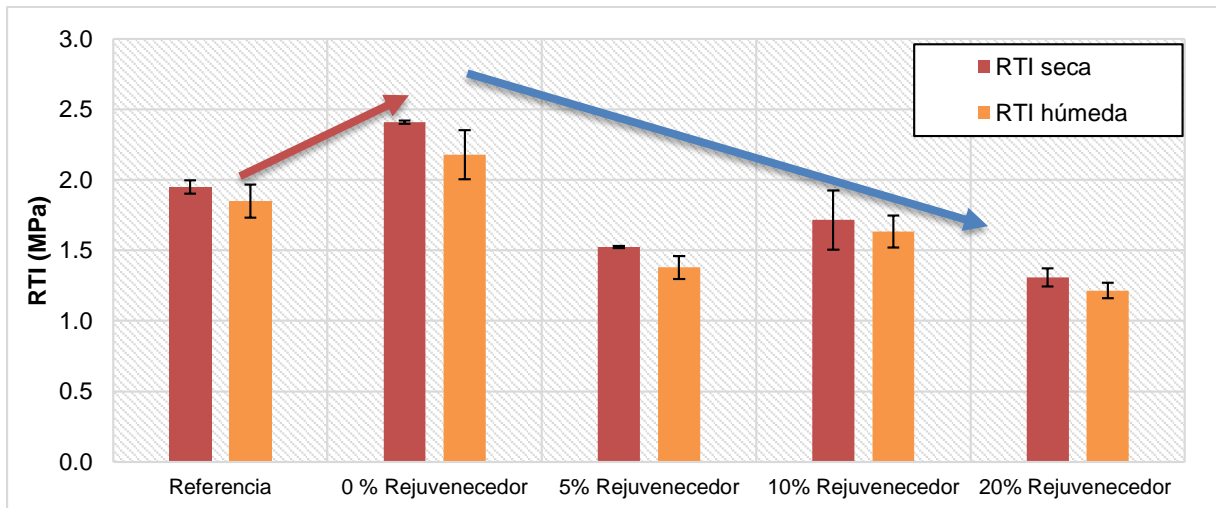


Fig. 4.50 Resistencia a tracción indirecta de las series analizadas a 15°C.

Todas las mezclas presentan una resistencia conservada superior al 90% (figura 4.51), es decir, todas cumplen el requerimiento del 80% exigido para mezclas en capas de base e intermedias, donde las especificaciones españolas permiten extender mezclas recicladas. A pesar de haberse obtenido resultados satisfactorios en todos los casos es visible que la resistencia conservada disminuye al agregar el RAP en la mezcla y vuelve a subir al añadir el rejuvenecedor.

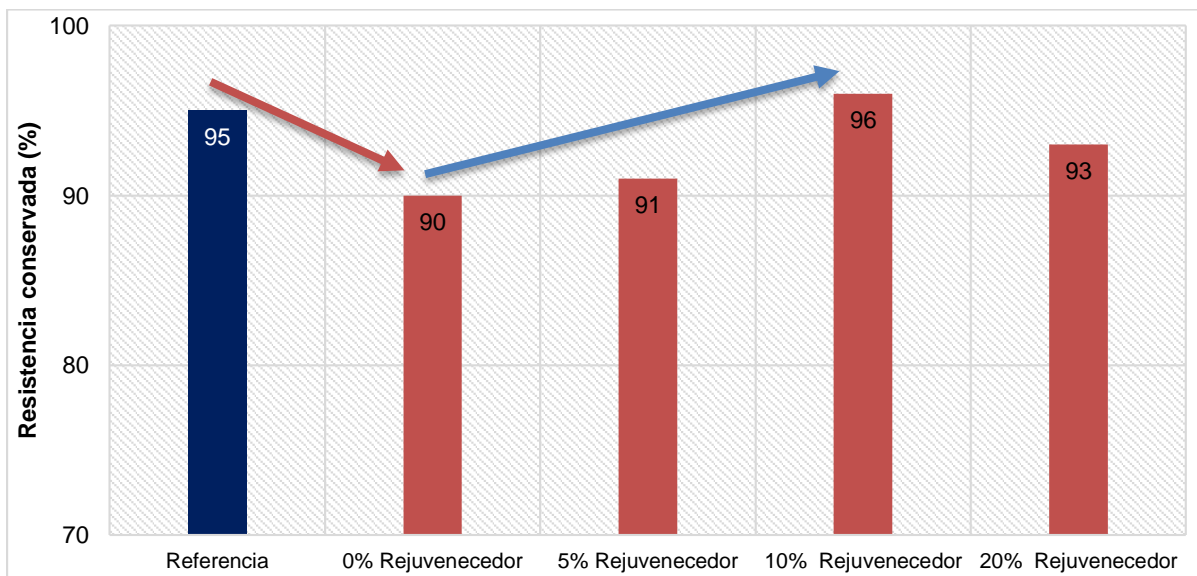


Fig. 4.51 Resistencia conservada de las series analizadas.

4.2.4 Ensayo Fénix a 20°C

Se presentan en la tabla 4.25 los parámetros obtenidos del ensayo Fénix: Índice de rigidez a tracción (IRT), Energía disipada G_D y Desplazamiento correspondiente al 50% de la carga máxima en la zona post-pico ($d_{0.5PM}$), a 20°C.

Tabla 4.25 Parámetros Fénix a 20°C de las mezclas con 60% de RAP con rejuvenecedor.

Temperatura	Parámetro	0% RAP	60% RAP (Rejuvenecedor)			
		Ref.	0%	5%	10%	20%
20°C	IRT (kN/mm)	6.0	10.4	7.9	7.5	4.7
	Coefficiente de Variación(%)	18.8	3.1	18.6	21.6	25.5
	G_D (J/m²)	331	366	280	285	216
	Coefficiente de Variación(%)	6.1	25.3	14.6	12.1	10.8
	$d_{0.5}$ (mm)	1.11	0.55	0.70	0.72	0.88
	Coefficiente de Variación(%)	8.7	22.1	12.1	7.3	10.4

Índice de resistencia a tracción (IRT)

En la fig. 4.52 muestra que el índice de rigidez a tracción experimenta un ascenso notable de la serie reciclada sin rejuvenecedor con respecto al de la mezcla de referencia, poniendo en evidencia el efecto del material envejecido añadido a las mezclas recicladas. En cambio, al incorporar el rejuvenecedor progresivamente a las mezclas recicladas disminuye su rigidez, tendiendo a valores similares a los de la mezcla de referencia, siguiendo una evolución muy parecida a la del módulo de rigidez.

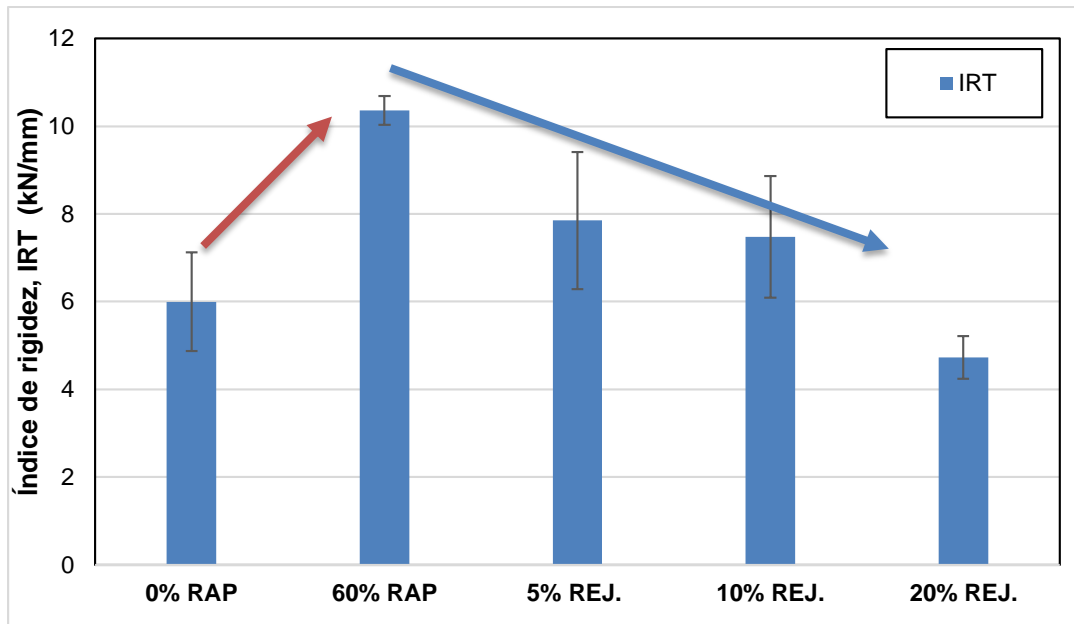


Fig. 4.52 Índice de rigidez a tracción y barras de error de las mezclas analizadas.

Energía Disipada

La figura 4.53 muestra la variación de la energía disipada a 20°C, con una tendencia similar a la observada en el IRT. El efecto del rejuvenecedor reduce esta energía a valores inferiores que los de la mezcla de referencia con las tres dotaciones estudiadas.

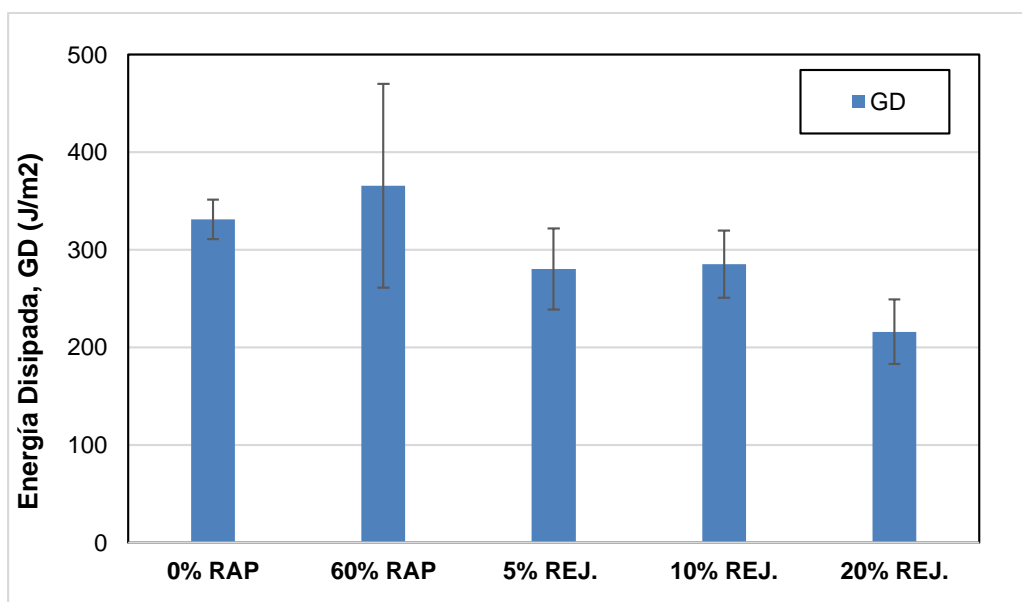


Fig. 4.53 Energía disipada y barras de error de las mezclas analizadas.

Desplazamiento al 50% de la carga máxima en la zona post-pico (d 0.5)

En cuanto al desplazamiento al 50% de la carga máxima en la zona post-pico, representada en la figura 4.54, se observa que la mezcla reciclada sin rejuvenecedor es la que presenta una menor ductilidad, del orden de la mitad del valor de la mezcla de referencia. Con 5% y 10% de rejuvenecedor el resultado de la ductilidad se incrementa ligeramente en un 30%. Al incorporar un 20% de rejuvenecedor, se puede apreciar un aumento importante de la ductilidad de aproximadamente 60%, alcanzando casi la ductilidad de la mezcla de referencia.

Ambos parámetros (rigidez y ductilidad) permiten confirmar que al aumentar el contenido de rejuvenecedor se reduce la rigidez y aumenta la ductilidad de las mezclas recicladas.

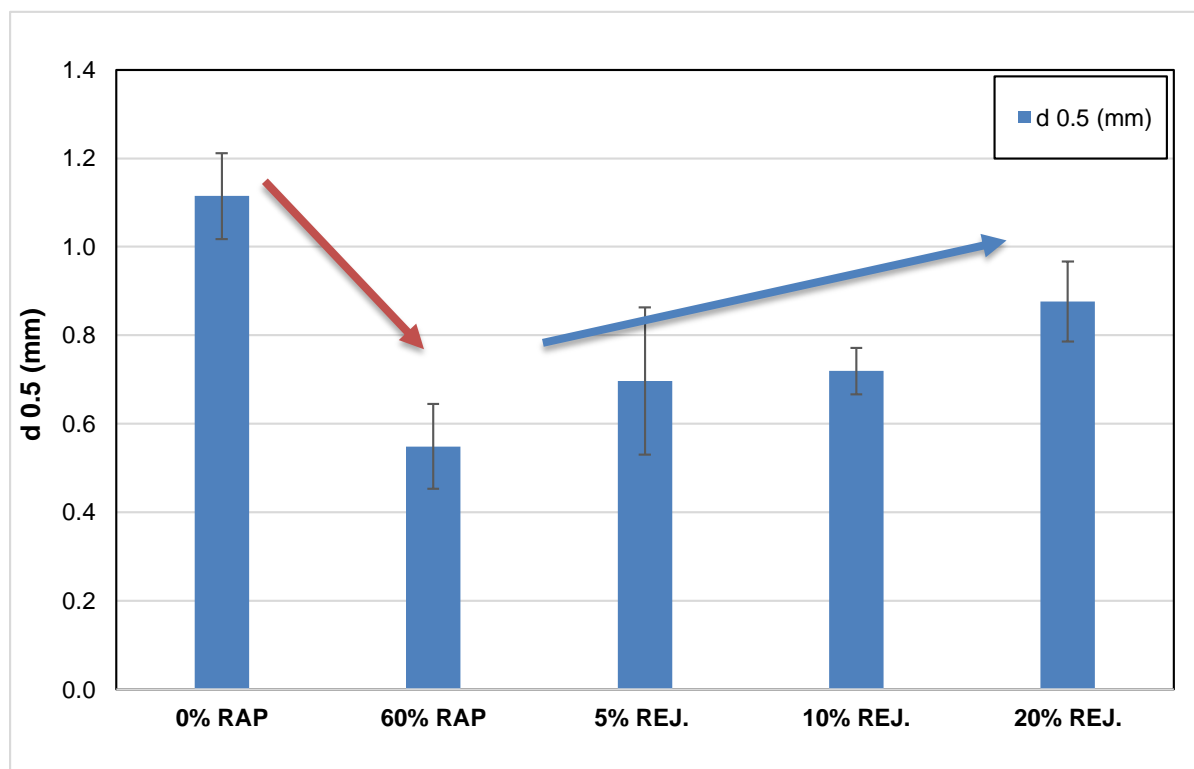


Fig. 4.54 Desplazamiento al 50% de la carga máxima en la zona post-pico y barras de error de las mezclas analizadas.

4.3 Estudio de la suposición de grado de mezclado del betún contenido en el RAP

4.3.1 Contenido de huecos

En la tabla 4.26 y figura 4.55 se presentan la variación del contenido de huecos de las mezclas con los casos analizados y bajo la hipótesis de grado de mezclado total, parcial y nulo tanto para las mezclas con 40% de RAP, como para 60% de RAP.

Tabla 4.26 Valores medios del contenido de huecos de las mezclas analizadas.

Contenido de Huecos (%)					
40 % RAP			60% RAP		
Simulación Total	Simulación Parcial	Simulación Nula	Simulación Total	Simulación Parcial	Simulación Nula
4.0	4.4	9.0	5.5	6.8	12.6

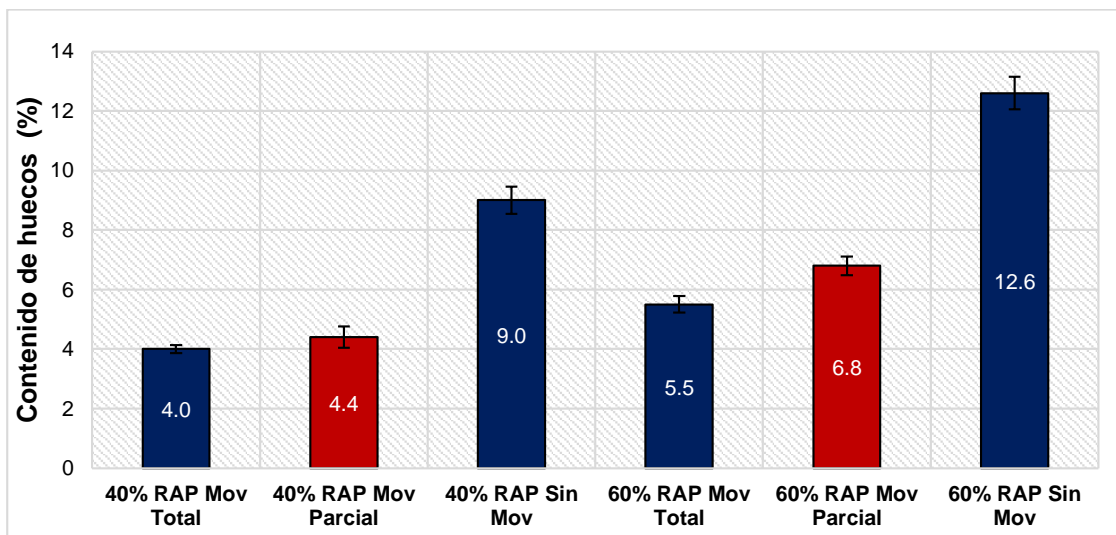


Fig.4.55 Contenido de huecos de las series con diferentes condiciones de grado de mezclado.

Se puede apreciar que para ambos contenidos de RAP (40 y 60%) el contenido de huecos más bajo se presenta en el caso de la suposición de grado de mezclado total, mientras que el contenido más alto se muestra en la suposición de grado de

mezclado nulo. Según la hipótesis planteada, el valor del contenido de huecos para el caso de suposición de grado de mezclado parcial es el que efectivamente se encuentra entre estos 2 casos.

4.3.2 Módulo de Rigidez

Una vez que se han calculado los valores medios de los módulos de rigidez de las series ensayadas a diferentes condiciones. En la tabla 4.27 y figura 4.56 se muestran las variaciones obtenidas para las diferentes series fabricadas con suposición de grado de mezclado total, parcial y nulo. También se presenta la dispersión de datos mediante el coeficiente de variación y se puede observar que, para ambas tasas de RAP, el caso de suposición de grado de mezclado total es la que presenta la menor dispersión.

Tabla 4.27 Valores medios del Módulo de rigidez de las mezclas analizadas.

Suposición de grado de mezclado	40 % RAP			60% RAP		
	Total	Parcial	Nulo	Total	Parcial	Nulo
Módulo de Rigidez (MPa)	10 126	8385	3497	11 149	8609	3 353
Coefficiente de Variación(%)	4.2	5.6	7.5	0.7	3.7	10.2

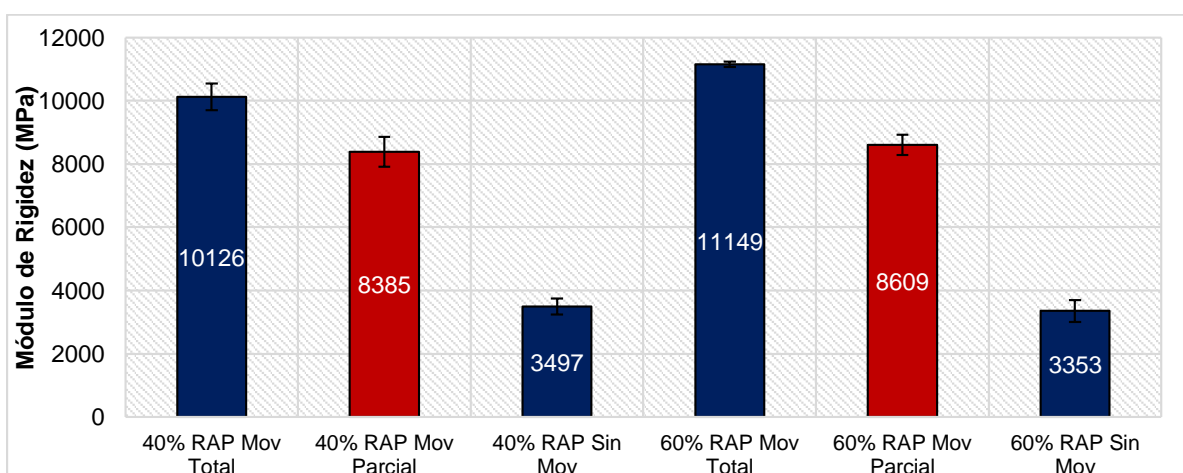


Fig.4.56 Módulo de Rigidez de las mezclas con suposición de grado de mezclado.

Se observa que para ambos contenidos de RAP (40 y 60%) el módulo de rigidez más elevado se indica en el caso de la suposición de grado de mezclado total, mientras que el módulo más bajo se muestra el caso de suposición de grado de mezclado nulo. Siguiendo lo estimado con la hipótesis planteada, el valor del contenido de huecos para el caso de suposición de grado de mezclado parcial es el que se encuentra entre ambos casos (total y nulo).

4.3.3 Ensayo Fénix

Una vez que se han calculado los parámetros del ensayo Fénix (IRT, GD y d 0.5) de las series ensayadas a 20°C y 5°C para cada una de las mezclas estudiadas, se elaboraron las tablas 4.28-4.30 en las que se muestran los valores medios y el coeficiente de variación de cada uno de los parámetros en las diferentes simulaciones de suposición de grado de mezclado.

Tabla 4.28 Índice de rigidez a tracción de las mezclas con simulación de grado de mezclado

Suposición de grado de mezclado		40% RAP			60% RAP		
		Total	Parcial	Nulo	Total	Parcial	Nulo
20°C	IRT (kN/mm)	12.2	12.1	3.1	10.3	9.8	3.4
	Coeficiente de Variación(%)	9.2	9.4	15.6	6.6	3.1	28.6
5°C	IRT (kN/mm)	16.0	15.0	12.0	15.0	13.0	7.3
	Coeficiente de Variación(%)	5.0	8.1	3.6	2.9	14.0	15.3

Tabla 4.29 Energía disipada de las mezclas con simulación de grado de mezclado

Suposición de grado de mezclado		40% RAP			60% RAP		
		Total	Parcial	Nulo	Total	Parcial	Nulo
20°C	GD (J/m ²)	561	529	164	559	365	85
	Coeficiente de Variación(%)	4.3	5.3	19.6	5.2	28.5	11.5
5°C	GD (J/m ²)	516	338	329	249	303	157
	Coeficiente de Variación(%)	16.3	28.1	17.2	12.4	22.15	5.0

Tabla 4.30 Desplazamiento al 50% de la carga máx. post pico, d 0.5 mm de las mezclas con simulación de grado de mezclado

Suposición de grado de mezclado		40% RAP			60% RAP		
		Total	Parcial	Nulo	Total	Parcial	Nulo
20°C	d0.5 (mm)	1.00	0.68	0.90	0.72	0.55	0.60
	Coefficiente de Variación(%)	15.5	19.0	8.9	6.23	19.0	9.92
5°C	d0.5 (mm)	0.28	0.36	0.40	0.28	0.39	0.40
	Coefficiente de Variación(%)	6.32	7.0	18.2	1.6	7.0	19.9

También se presentan figuras 4.57-4.59, en las que se representa gráficamente los principales cambios para las diferentes series fabricadas con simulación de grado de mezclado total, parcial y nulo. En términos generales, se puede concluir que, tanto para 20°C, como para 5°C, los parámetros del Fénix del IRT y d 0.5 siguen la misma tendencia.

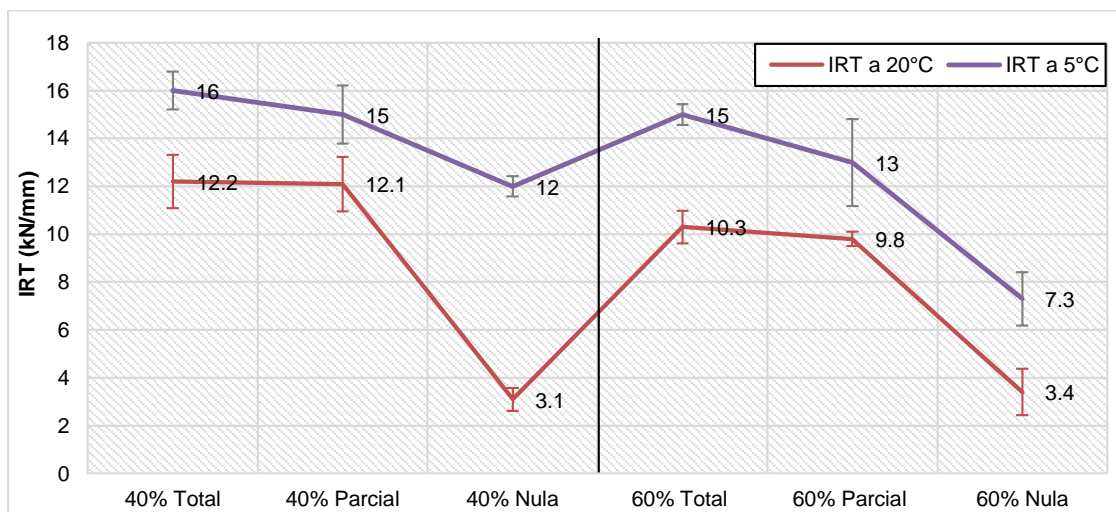


Fig. 4.57 Índice de rigidez a tracción de las mezclas con simulación de grado de mezclado.

Si analizamos el IRT (para 20°C y 5°C) se observa que para ambos contenidos de RAP (40 y 60%) el IRT más elevado se presenta en el caso de la simulación de grado de mezclado total, mientras que el IRT más bajo se muestra el caso de simulación de grado de mezclado nulo. Siguiendo la hipótesis propuesta, se comprueba que el valor del IRT para el caso de simulación de grado de mezclado parcial es el que se encuentra entre estos casos (total y nulo).

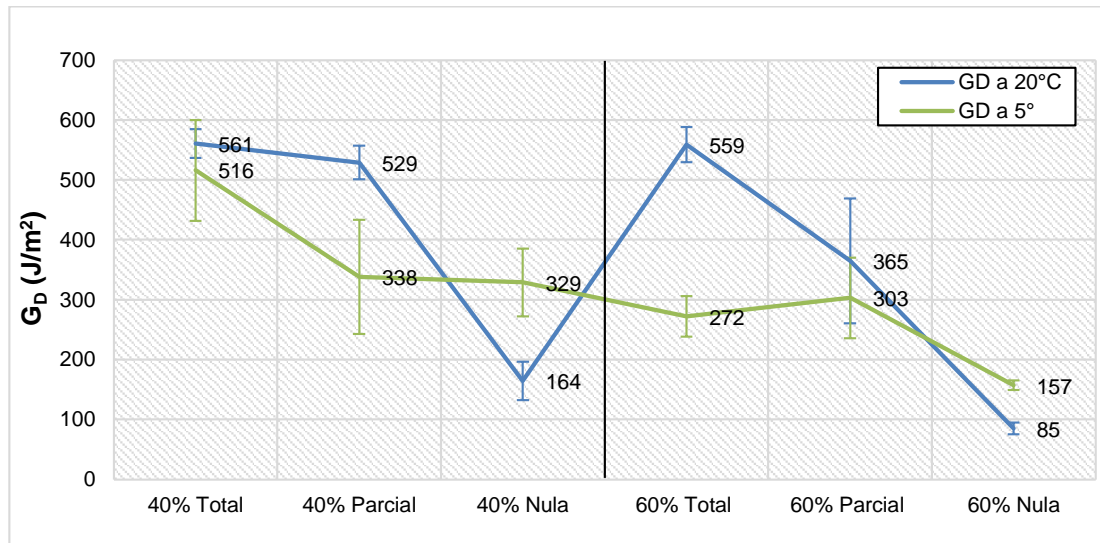


Fig. 4.58 Energía disipada de las mezclas con simulación de grado de mezclado.

Para todos los casos, el valor de Gd para la simulación de grado de mezclado parcial es el que se encuentra entre ambos casos (total y nulo). A 20°C la suposición del grado de mezclado parcial es la más parecida al grado de mezclado total, mientras que a 5°C se asemeja más a la simulación del grado de mezclado nulo, poniendo en evidencia el efecto de la temperatura baja en la energía disipada de las mezclas recicladas.

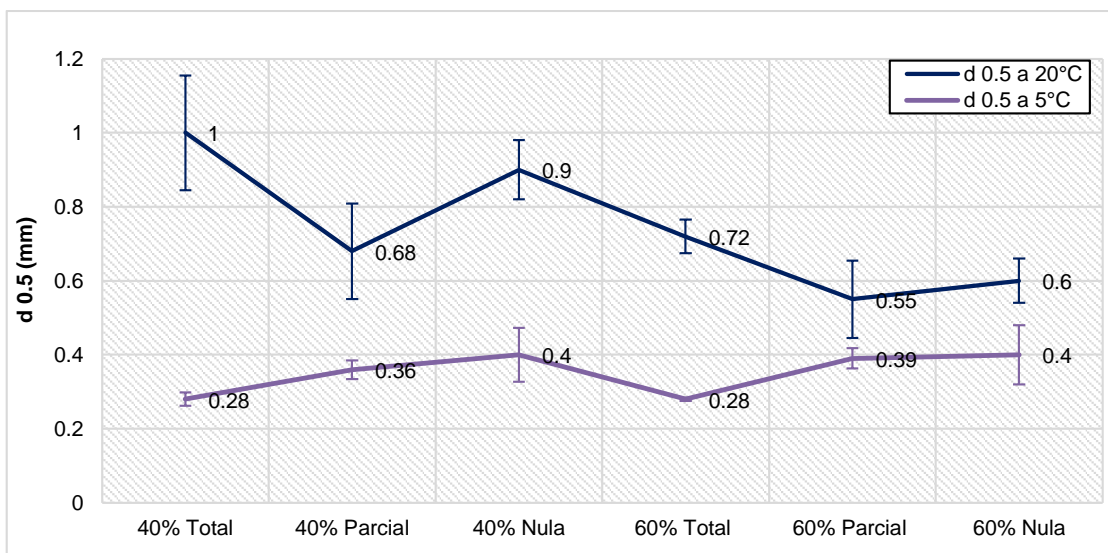


Fig. 4.59 Desplazamiento al 50% de la carga máx. post pico, d 0.5 mm de las mezclas con simulación de grado de mezclado.

Se puede apreciar que para el valor de $d_{0.5}$, para todos los casos a 20°C la mezcla con menor desplazamiento fue la parcial. Una posible explicación sería que en el mezclado total hay mayor contribución de los dos betunes y por eso hay mayor desplazamiento, y en el caso del mezclado nulo la mezcla tiene muchos huecos y muy poca resistencia, por eso también tiene mayor desplazamiento.

A 5°C en el caso del mezclado total, la combinación de los dos betunes es más dura que el betún que resulta en el caso del mezclado parcial y por eso el desplazamiento es menor. En cambio, en el caso del mezclado nulo, si bien hay menor cantidad de betún efectivo, la penetración del betún es mayor y sumado al alto contenido de huecos, le permite aumentar la ductilidad de la mezcla.

4.4 Investigación sobre la influencia del contenido y la temperatura del mástico del RAP en las propiedades de las mezclas bituminosas recicladas mediante el Método UCL

En la tabla 4.31 se presentan los valores medios del contenido de huecos para las diferentes series con un 20% de RAP en la fracción fina. También se presenta gráficamente estos valores en la fig. 4.60.

Tabla 4.31 Valores medios del contenido de huecos de las mezclas.

		0 % RAP	20% RAP			
		Referencia	1	2	3	4
Condición de Mezclado		Árido: 160°C	Árido 160°C RAP 110°C	Árido 160°C RAP 20°C	Árido 160°C RAP 110°C 10% Rejuv.	Árido 160°C RAP 110°C 20% Rejuv.
50 Golpes	Contenido de Huecos (%)	15.6	16.5	17.3	15.8	15.3

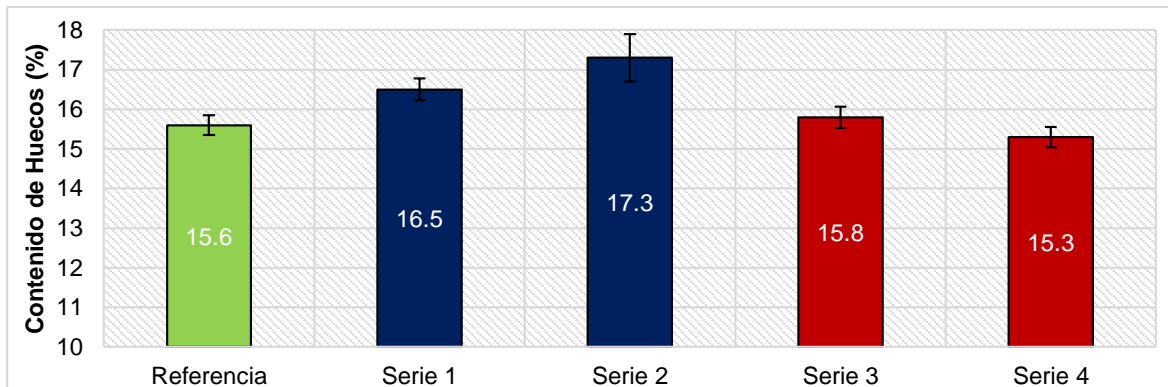


Fig.4.60 Contenido de Huecos para 50 golpes de las series con diferentes características.

Del contenido de huecos se puede percibir que nuevamente se sigue el mismo comportamiento de los demás estudios realizados en esta tesis. El máximo valor de contenido de huecos se encuentra en la serie donde el RAP se ha añadido a temperatura ambiente (20°C). Por el contrario, en la serie donde se agrega una tasa de rejuvenecedor al 20%, esta es la que se presenta el mínimo contenido de huecos en la mezcla, incluso llegando a valores menores que la mezcla de referencia. Por lo que la una temperatura de mezclado mayor y el uso de rejuvenecedor provocan que la mezcla con RAP sea más cerrada.

Una vez que se ha obtenido el contenido de huecos de procedió a calcular en primer lugar los valores medios de las pérdidas al Cántabro de las series de referencia y sin rejuvenecedor (serie 1 y 2) ensayadas en el rango de temperaturas establecido en el plan de trabajo (tabla 4.32), además se elaboró la figura 4.61 en la que se muestran las curvas de estado obtenidas para la serie de referencia y las mezclas recicladas sin rejuvenecedor, con el objeto de observar la influencia que tiene la temperatura de mezclado en el comportamiento del mástico estudiado.

Tabla 4.32 Resultados medios de las series de probetas con 20% de RAP con rejuvenecedor mediante el método UCL a diferentes temperaturas de ensayo.

Serie	Porcentaje de pérdidas al Cántabro a diferentes temperaturas (%)					
	-20°C	-5°C	10°C	25°C	40°C	60°C
Referencia	21.1	16.7	13.5	7.5	4.8	6.1
COV. (%)	7.1	6.8	9.7	13.8	4.0	14.8
1 (RAP 110°C)	34.1	27.2	25.8	17.6	14.6	16.8
COV. (%)	7.9	6.1	3.5	4.7	24.2	4.4
2 (RAP 20°C)	51.8	42.6	32.7	23.7	18.8	20.4
COV. (%)	6.0	16.0	14.2	9.9	12.0	10.3

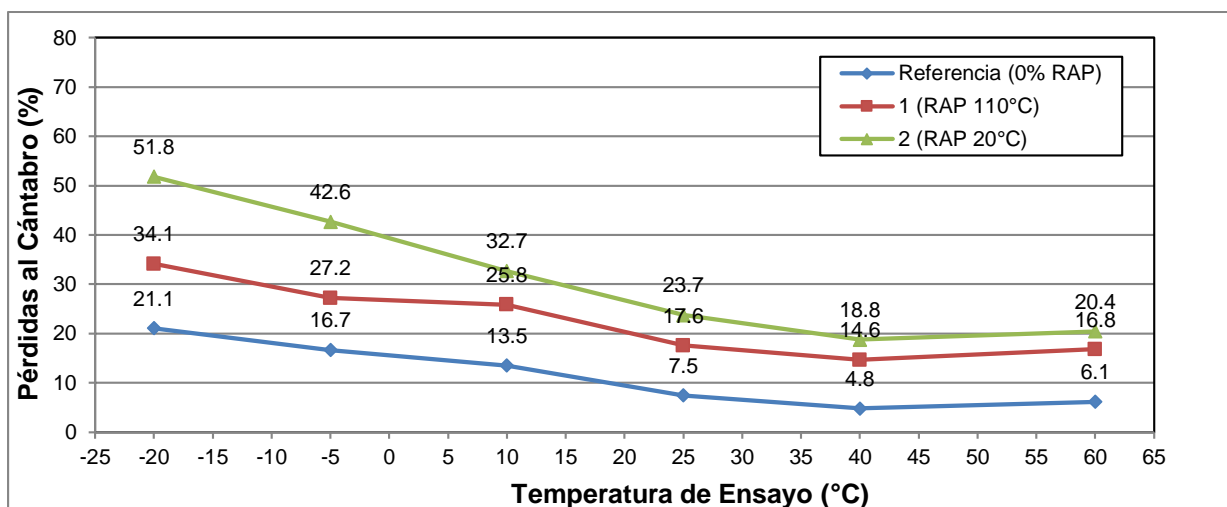


Fig.4.61 Curvas de estado para las probetas fabricadas con un 20% de RAP sin rejuvenecedor y ensayadas al Cántabro mediante el método UCL a diferentes temperaturas.

Se puede observar que, para todas las temperaturas ensayadas, las probetas de la mezcla de referencia son las que presentan las menores pérdidas, no obstante, las probetas que fueron fabricadas con el RAP a temperatura ambiente (20°C) presentan las pérdidas más elevadas, lo cual nos indica que esta mezcla es más frágil. Si se precalienta el mástico del RAP a 110°C, se logra tener menos pérdidas en comparación de la mezcla con RAP a 20°C, esto nos indica el precalentamiento del RAP, ha logrado restablecer parte de la capacidad aglomerante del mástico del fresado.

Por otra parte, en la tabla 4.33, se pueden observar los valores medios obtenidos para las distintas series fabricadas con la aplicación de dos porcentajes de

rejuvenecedor (10% y 20%) y que fueron ensayadas nuevamente en el rango de temperaturas establecido.

Tabla 4.33 Resultados medios de las series de probetas con 20% de RAP con rejuvenecedor mediante el método UCL a diferentes temperaturas de ensayo.

Serie	Porcentaje de pérdidas al Cántabro a diferentes temperaturas (%)					
	-20°C	-5°C	10°C	25°C	40°C	60°C
Referencia	21.1	16.7	13.5	7.5	4.8	6.1
COV. (%)	7.1	6.8	9.7	13.8	4.0	14.8
3 (10% rej.)	36.8	33.8	28.2	25.0	29.4	41.2
COV. (%)	1.9	9.7	14.0	7.4	6.0	22.5
4 (20% rej.)	31.4	21.0	17.1	18.6	36.9	66.9
COV. (%)	5.7	6.2	22.7	4.4	5.5	3.2

Se presentan en la figura 4.62 las curvas de estado de las diferentes series fabricadas con un 10 y 20% de rejuvenecedor para poder observar más claramente el comportamiento de los diferentes mástico rejuvenecidos.

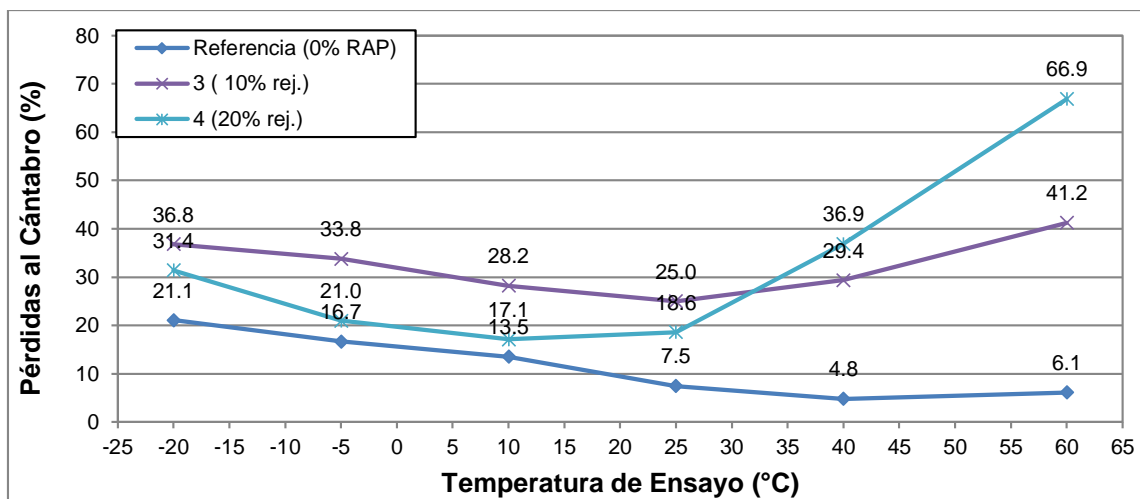


Fig. 4.62 Curvas de estado para las probetas fabricadas con un 10 y 20% de rejuvenecedor. ensayadas al Cántabro mediante el método UCL a diferentes temperaturas.

Se observa la forma en que el rejuvenecedor hace que las pérdidas de las mezclas recicladas se aproximen a la mezcla de referencia, sobre todo a bajas temperaturas (de -20°C a 25°C). Sin embargo, se presentan pérdidas muy elevadas con una temperatura de ensayo de 40°C y 60°C para el caso del 20% de rejuvenecedor.

Esto se debe principalmente a la susceptibilidad térmica del betún 70/100 junto con el rejuvenecedor que pierde consistencia a altas temperaturas, por lo que nos indica que es importante analizar el comportamiento de los productos utilizados como supuestos rejuvenecedores, porque no siempre soportan bien los cambios de temperatura.

5. Conclusiones

La utilización del RAP en la fabricación de mezclas bituminosas recicladas va creciendo día a día debido a los beneficios económicos y ambientales que conlleva esta técnica de conservación de carreteras. Sin embargo, existe cierta preocupación sobre las propiedades resultantes de la mezcla reciclada debido al efecto de las condiciones de fabricación de las mismas. De ahí el interés de estudiar el comportamiento de las mezclas bituminosas que contienen altos porcentajes de RAP ha motivado a realizar esta investigación en el Laboratorio de Caminos de la Universidad Politécnica de Cataluña, complementando estos estudios en el Nottingham Transportation Engineering Centre (NTEC).

La investigación realizada durante el desarrollo de esta tesis doctoral tuvo como primer alcance un estudio bibliográfico mediante la definición de un estado del arte sobre lo que concierne al desarrollo de nuevas técnicas sostenibles para el diseño, construcción y mantenimiento de obras recicladas con RAP, su interacción con materiales vírgenes de aportación y las innovaciones para predecir el comportamiento final de una mezcla reciclada con este material. Tras analizar el estado del arte se detectaron ciertas insuficiencias, como por ejemplo que las ecuaciones que actualmente existen para predecir el grado de mezclado por medio de las viscosidades, suponen que el ligante envejecido y el ligante virgen están completamente mezclados. La pregunta es si esta suposición en realidad ocurre en el proceso de producción de mezclas recicladas. De esta manera, las propiedades mecánicas de la mezcla reciclada se desviarían de lo esperado. Por lo que una de las conclusiones sería que el resultado arrojado por las ecuaciones del grado de mezclado de viscosidad usadas con frecuencia no se ajusta exactamente a la realidad. Estas ecuaciones de mezclado de viscosidad solo pueden proporcionar una idea del valor real aproximado. Una de tantas posibles soluciones sería reproducir en laboratorio las condiciones reales de fabricación en planta de mezclas recicladas, elaboradas con proporciones incrementales de RAP para ver la interacción de todos los componentes en el desempeño final de la mezcla.

Sucesivamente se comenzó con la etapa experimental mediante la realización de los diferentes ensayos de laboratorio, con la finalidad de comprobar cuál son los principales efectos de las condiciones de fabricación en las propiedades de las mezclas. Este objetivo se persiguió estableciendo 2 etapas de investigación. En la primera etapa las condiciones de fabricación de probetas han consistido en variar la temperatura del árido de aportación y del RAP, así como variar el tiempo de mezclado. La segunda etapa consistió básicamente en cambiar las características de la primera etapa, por ejemplo, cambiar el origen del RAP, extender el tiempo de mezclado, así como utilizar distintos materiales de aportación y equipos de laboratorio. La primera etapa fue llevada a cabo en la Universidad Politécnica de Cataluña y la segunda etapa se desarrolló en la Universidad de Nottingham.

En la primera etapa se ha analizado el efecto del contenido de RAP (20, 40 y 60%) y del rejuvenecedor (5, 10 y 20%) sobre las propiedades volumétricas y mecánicas de una mezcla tipo AC22S reciclada, mediante la determinación del contenido de huecos, el módulo de rigidez, la sensibilidad al agua y la resistencia a la fisuración con el ensayo Fénix. Las conclusiones de la primera etapa se resumen a continuación:

- A medida que el porcentaje de RAP aumenta resulta más difícil compactar la mezcla reciclada, dando como resultado un aumento en los huecos de aire. El betún envejecido tiene una mayor viscosidad que reduce la trabajabilidad de la mezcla durante la compactación. Los resultados también han permitido concluir que un aumento de la temperatura de mezclado implica una disminución de los huecos. El aumento del tiempo de mezclado tiene las mismas consecuencias, pero en menor medida. La incorporación del agente rejuvenecedor también permite reducir el contenido de huecos.
- El módulo de rigidez aumenta con el contenido de RAP llegando a superar el doble del valor registrado para la mezcla de referencia cuando se emplea un 60% de RAP. La mezcla de betunes resultante es más rígida al subir la tasa de RAP, mientras que se puede revertir este proceso al añadir el

rejuvenecedor. Comparando el módulo de rigidez de las diferentes mezclas recicladas, se puede aseverar que el precalentamiento del RAP permite que el ligante envejecido de RAP pueda difundirse mejor con el betún virgen dando como resultado una rigidez más alta. En contraste, el módulo más bajo se encontró en las muestras con RAP a 20°C, debido a que el betún del RAP no se logra movilizar.

- El ensayo de tracción indirecta aplicado a las mezclas recicladas puso nuevamente de manifiesto que estas mezclas se vuelven más frágiles al aumentar el contenido de RAP, especialmente en las que contienen el 40%. El betún envejecido es más duro, pero también más sensible al agua. El valor de la resistencia conservada tiende a disminuir a medida que se aumenta el porcentaje de RAP, este comportamiento pudo haber sido provocado por la influencia del contenido de huecos en las mezclas con 40% y 60% de RAP. En casi todas las series se cumple con la especificación mínima que rige en España para la Resistencia Conservada (80%), haciendo excepción en las series con las peores condiciones de fabricación con 60% de RAP, este efecto negativo se puede revertir aumentando la temperatura o del tiempo de mezclado, ya que se concede a la mezcla una mayor resistencia a la acción del agua. La incorporación del agente rejuvenecedor también permite aumentar ligeramente la resistencia conservada.
- Los resultados del ensayo Fénix han mostrado que a bajas temperaturas todas las mezclas tienden al mismo comportamiento ante la variación de las condiciones de fabricación. El IRT y el módulo de rigidez a 20°C presentan un comportamiento similar en sus distintos procesos de fabricación. Para las mezclas con 20% y 40% de RAP, la energía disipada es máxima cuando se ensaya a temperatura intermedia (5°C), mientras que para mayores contenidos de RAP (60%), la energía disipada máxima se localiza a temperaturas más altas (20°C), teniendo el máximo valor en los 20°C debido al mayor punto de reblandecimiento del ligante mezclado. La ductilidad de las mezclas recicladas se ve disminuida al incrementar el contenido de

material fresado en su composición, ya que se observa que el desplazamiento al 50% de la carga máxima post-pico disminuye drásticamente al incrementar el contenido de RAP de las mezclas. Si la mezcla reciclada se fabrica precalentando el RAP, se obtiene: un mayor índice de rigidez a tracción, IRT, un efecto positivo en la energía disipada G_D y una menor deformación al 50% de la carga máxima, $d_{0.5}$. En cambio, si la mezcla reciclada se fabrica incorporando el RAP a temperatura ambiente se puede apreciar que el IRT, la G_D , así como la ductilidad son reducidas. Para compensar esta falta de temperatura durante el mezclado, pueden sobrecalentarse los áridos nuevos de aportación, aumentarse el tiempo de mezclado o bien aplicar un rejuvenecedor.

En la segunda etapa se ha analizado un RAP con mejores características (en términos de penetración y porcentaje de betún) con contenido de RAP al 60% para investigar el efecto de las condiciones de fabricación sobre las propiedades volumétricas y mecánicas. Estas condiciones han consistido en variar la temperatura de mezclado y extender al máximo el tiempo de mezclado impuesto por las especificaciones (5 minutos). Las conclusiones de la segunda etapa se presentan en un resumen a continuación:

- Si la mezcla se fabrica en las peores condiciones de fabricación (RAP 20°C y solo 2.5 min), el contenido de huecos tiende a aumentar significativamente, alcanzando los máximos valores de todas las series analizadas. Una solución, para tomar en consideración en el diseño de mezclas recicladas, sería la aplicación de una u otra condición (precalentamiento del RAP y extensión del tiempo de mezclado), para alcanzar los límites exigidos por las especificaciones del contenido de huecos de la mezcla. No obstante, al emplear ambas condiciones simultáneamente, se disminuye alrededor del 60% el contenido de huecos (con respecto a las condiciones más desfavorables) produciendo un efecto bastante manifiesto.

- El coeficiente de variación refleja que el módulo de rigidez en las mejores condiciones de fabricación, es el que presenta una menor dispersión, incluso siendo menor que el de la mezcla de referencia. Además, la serie que más presenta dispersión es la serie que se ha hecho en las peores condiciones. Es suficiente aplicar una u otra condición para recuperar el valor de módulo de rigidez (100% de recuperación con el precalentamiento del RAP y 70% con aumento del tiempo de mezclado). Sin embargo, al aplicar ambas condiciones de forma simultánea, se produce un efecto demasiado significativo en la rigidez de la mezcla al aumentar más del 130% el valor del módulo (con respecto a las condiciones más desfavorables).

- De la misma forma, se obtuvo una cierta recuperación del valor de la resistencia a tracción indirecta para todos los casos, si se precalienta el RAP hay una recuperación de más del 80% del valor de RTI. Si se extiende el tiempo de mezclado hay un aumento de más del 50%. En términos de resistencia conservada, la mezcla fabricada sin calentar el RAP y donde el tiempo de mezclado es menor, es la que muestra la menor resistencia conservada incluso no cumpliendo la especificación mínima del 80%. Es de suma importancia fabricar las mezclas recicladas en las mejores condiciones para poder recuperar las propiedades del RAP y así cumplir los valores exigidos por las especificaciones. Esta especificación mínima se cumple aplicando cualquiera de las condiciones para mejorar las propiedades de la mezcla reciclada (precalentando el RAP a 110°C y ampliando el tiempo de mezclado). Aplicadas ambas condiciones de mejora existe una recuperación de casi el 20% del valor de la resistencia conservada.

- Para el caso de los parámetros Fénix, también se ha confirmado el efecto beneficioso de la mejora de las condiciones de mezclado. Si se precalienta el RAP a 110°C se maximiza el IRT, G_D y ductilidad hasta un 55%, 175% y 20% respectivamente con respecto a la condición más desfavorable. Si se aumenta el tiempo de mezclado el IRT, G_D y ductilidad mejora positivamente hasta un 33%, 80%, 10% respectivamente. En cambio, si se emplean ambas

condiciones se refleja un efecto sinérgico en los parámetros Fénix que se traduce en un incremento del IRT de hasta un 80%, de la G_D del 300% y de la ductilidad del 25%”

En el estudio anterior se ha mantenido constante el contenido total de betún (4.25% sobre mezcla en la primera etapa y 5.0% en la segunda); sin embargo, el contenido de betún óptimo para cada mezcla reciclada puede ser diferente en cada caso, teniendo en cuenta que no todo el betún existente en el RAP podría haberse movilizado y mezclado con el betún virgen. Es por eso que se decidió estudiar el estudio del grado de simulación de grado de mezclado del betún contenido en el RAP, cuya principal conclusión fue que para ambos contenidos de RAP (40 y 60%), los valores para el caso de simulación parcial del contenido de huecos, módulo de rigidez, y los parámetros Fénix IRT y G_D se encuentran muy próximos al de simulación total, poniendo en evidencia que es posible conseguir una mezcla con buenas propiedades de rigidez y energía. Sin embargo, se debe tener especial cuidado en el parámetro de ductilidad, $d_{0.5}$ que ha demostrado ser crítico a ambas temperaturas de estudio.

Por otra parte, se destaca la gran conveniencia de estudiar el comportamiento del mástico de las mezclas recicladas mediante el método UCL, ya que se muestra de forma clara y sencilla, la variación de la cohesión-adhesión de las mezclas recicladas al variar de temperatura del RAP, y las tasas de un rejuvenecedor. De este estudio se puede concluir que: el máximo valor de contenido de huecos se encuentra en la serie donde el RAP se añade a temperatura ambiente (20°C). Por el contrario, en la serie donde se agrega una tasa de rejuvenecedor al 20%, es la que se presenta el mínimo contenido de huecos en la mezcla, incluso llegando a valores menores que la mezcla de referencia. En términos de pérdidas al cántabro, las probetas que se fabrican con el RAP a temperatura ambiente (20°C) son las que presentan las pérdidas más elevadas, lo cual nos indica que la mezcla es más frágil y que cuenta con una menor cohesión-adhesión que las demás series. Si se precalienta el mástico del RAP a 110°C, se obtienen menos pérdidas en comparación con la mezcla con RAP a 20°C, esto nos indica que el

precalentamiento del RAP, ha logrado restablecer parte de la capacidad aglomerante del mástico del fresado. El rejuvenecedor ayuda ligeramente al mástico a recuperar ese poder aglomerante perdido, sobre todo a bajas e intermedias temperaturas (de -20°C a 25°C). Sin embargo, se presentan pérdidas muy elevadas con una temperatura de ensayo de 40°C y 60°C para el caso del 20% de rejuvenecedor, y además presenta una pendiente en la curva de estado muy elevada, por lo que nos indica que es importante analizar el comportamiento de los productos utilizados como supuestos rejuvenecedores, porque no siempre soportan bien los cambios de temperatura.

En resumen, se ha podido aseverar que las mezclas recicladas pueden alcanzar un desempeño similar al de las mezclas convencionales, siempre y cuando se tenga el tratamiento adecuado en el diseño y en el proceso de fabricación. Al precalentar el RAP se consigue difundir de mejor manera el ligante de aportación y también se logra movilizar una mayor cantidad del betún del RAP. Extender el tiempo de mercado provoca que las aglomeraciones del RAP comiencen a separarse y por ende se logra movilizar una mayor cantidad de betún. La incorporación de un aditivo rejuvenecedor produce un efecto positivo en las propiedades de las mezclas recicladas puesto que éste consigue restaurar las propiedades del betún envejecido. No obstante, en la mayoría de los casos, es suficiente aplicar alguna condición (precalentamiento del RAP, aumento del tiempo de mezclado, sobrecalentamiento de los áridos de aportación o el uso de los rejuvenecedores) para mejorar las propiedades, pero en algunos casos aplicar todas las condiciones simultáneamente produce un efecto sinérgico que se traduce en un efecto positivo en el comportamiento de las mezclas recicladas.

5. Conclusions

The use of RAP in the manufacture of recycled bituminous mixtures is growing day by day due to the economic and environmental benefits that this technique of road maintenance entails. However, there is some concern about the resulting properties of the recycled mixture due to the effect of the manufacturing conditions thereof. That is why the interest to study and deepen the behavior of bituminous mixtures that contain high percentages of RAP has motivated to carry out this research in the road laboratory of the Universidad Politécnica de Cataluña, together with the Nottingham Transportation Engineering Center (NTEC).

The research carried out during the development of this doctoral thesis had as its first scope a bibliographical study by defining a state of the art on what concerns the development of new sustainable techniques for the design, construction and maintenance of recycled works with RAP, their interaction with virgin materials of contribution and innovations to predict the final behavior of a recycled mixture with this material. After analyzing the state of the art, certain insufficiencies were detected, as for example that the equations that currently exist to predict the degree of mixing by means of the viscosities, suppose that the aged binder and the virgin binder are completely mixed. The question is whether this assumption actually occurs in the production process of recycled mixtures. In this way, the mechanical properties of the recycled mixture would deviate from what was expected. So one of the conclusions would be that the result thrown by the equations of the degree of viscosity mixing used frequently is not exactly what happens in reality. These viscosity mixing equations can only provide an idea of the approximate real value. One of many possible solutions would be to reproduce in the laboratory the actual manufacturing conditions in the plant of recycled mixtures, elaborated with incremental proportions of RAP to see the interaction of all the components in the final performance of the mixture. Subsequently, the experimental stage was started by carrying out the different laboratory tests, in order to check the main effects of the manufacturing conditions on the properties of the mixtures. This objective was pursued by establishing 2 stages of research. In the first stage, the conditions for

manufacturing test pieces consisted in varying the temperature of the aggregate and the RAP, as well as varying the mixing time. The second stage consisted basically in changing the characteristics of the first stage, for example, changing the origin of the RAP, extending the mixing time, as well as using different input materials and laboratory equipment. The first stage was carried out at the Universidad Politécnica de Cataluña and the second stage was held at the University of Nottingham.

In the first stage the effect of the RAP content (20, 40 and 60%) and the rejuvenator (5, 10 and 20%) on the volumetric and mechanical properties of a recycled AC22S type mixture was analyzed, by determining the void content, stiffness modulus, water sensitivity and cracking resistance with the Fenix test. The conclusions of the first stage to which they have arrived are summarized below:

- As the percentage of RAP increases, it becomes more difficult to compact the recycled mixture, resulting in an increase in air voids. Aged bitumen has a higher viscosity that reduces the workability of the mixture during compaction. The results have also allowed to conclude that an increase in the mixing temperature implies a decrease in the gaps. Increasing the mixing time has the same consequences, but in a lighter way. The incorporation of the rejuvenating agent also makes it possible to reduce the voids.
- The stiffness modulus increases with the RAP content, reaching more than twice the value registered for the reference mixture when 60% RAP is used. The resulting bitumen mixture is more rigid when the RAP rate is increased, while this process can be reversed by adding the rejuvenator. Comparing the stiffness modulus of the different recycled mixtures, it can be asserted that the pre-heating of the RAP allows the aged RAP binder to diffuse better with the virgin bitumen, consequently bringing a higher stiffness. In contrast, the lowest modulus was found in the samples with RAP at 20 °C, because the RAP bitumen was not able to be mobilized.

- The indirect tensile test applied to recycled blends once again showed that these indirect tensile strengths become more brittle when the RAP content increases, especially in those containing 40%. Aged bitumen is harder, but also more sensitive to water. The value of the retained resistance tends to decrease as the percentage of RAP increases, this behavior could have been caused by the influence of the voids in the mixtures with 40% and 60% RAP. In almost all the series the minimum specification for the Tensile Strength Ratio (80%) is met, making exception in the series with the worst manufacturing conditions with 60% RAP, this negative effect can be reversed by increasing the temperature or the mixing time, as it gives the mixture a greater resistance to the action of water. The incorporation of the rejuvenating agent also allows to slightly increase the strength retained.
- The results of the Fenix test have shown that at low temperatures all mixtures tend to have the same behavior in the face of variation in manufacturing conditions. The IRT and the stiffness modulus at 20°C present a similar behavior in their different manufacturing processes. For mixtures with 20% and 40% RAP, the energy dissipated is maximum when tested at intermediate temperature (5°C), while for higher RAP contents (60%), the maximum dissipated energy is localized at higher temperatures. high (20°C), having the maximum value at 20°C due to the higher softening point of the mixed binder. The ductility of the recycled mixtures is diminished by increasing the content of milled material in its composition, since it is observed that the displacement to 50% of the maximum post-peak load decreases drastically when increasing the RAP content of the mixtures. If the recycled mixture is manufactured by preheating the RAP, you get: a higher tensile stiffness index, IRT, a positive effect on the GD dissipated energy and less deformation at 50% of the maximum load, $d_{0.5}$. On the other hand, if the recycled mixture is manufactured incorporating the RAP at room temperature, it can be seen that the IRT, the GD, as well as the ductility are reduced. To compensate for this lack of temperature during mixing, the new aggregates can be superheated, the mixing time can be increased or a rejuvenator can be applied.

On the other hand, in the second stage, a RAP with better characteristics (in terms of penetration and percentage of bitumen) with 60% RAP content was analyzed to investigate the effect of the manufacturing conditions on the volumetric and mechanical properties. These conditions have consisted in varying the mixing temperature and extending the mixing time imposed by the specifications to the maximum (5 minutes). The conclusions of the second stage are presented in a summary below:

- If the mixture is manufactured in the worst manufacturing conditions (RAP 20°C and only 2.5 min), the content of voids tends to increase significantly, reaching the maximum values of all the series analyzed. One solution, to take into consideration in the design of recycled mixtures, would be the application of one or another condition (pre-heating of the RAP and extension of the mixing time), to reach the limits required by the specifications of the voids in the mixture. However, when both conditions are used simultaneously, the void decreases by about 60% (with respect to the most unfavorable conditions) producing a quite manifest effect.
- The coefficient of variation reflects that the stiffness modulus in the best manufacturing conditions, is the one that presents a lower dispersion, even being less than that of the reference mixture. In addition, the one that most presents dispersion is the series that has been done in the worst conditions. It is sufficient to apply one or another condition to recover the stiffness modulus value (100% recovery with pre-heating of the RAP and 70% with increased mixing time). However, when both conditions are applied simultaneously, an effect of synergy of both conditions is produced, producing an effect that is too significant in the behavior of the mixture to stiffness, increasing the stiffness value by more than 130% (with respect to the conditions more unfavorable).
- In the same way, a certain recovery of the value of the indirect tensile strength was obtained for all cases, if the RAP is preheated there is a recovery of

more than 80% of the RTI value, if the mixing time is extended there is an increase of more than 50%. In terms of tensile strength ratio, the mixture manufactured without heating the RAP and where the mixing time is shorter, is the one that shows the lowest resistance preserved even if it does not meet the minimum specification of 80%. It is of utmost importance to manufacture the recycled mixtures in the best conditions to be able to recover the properties of the RAP and thus meet the values required by the specifications. This minimum specification is met by applying any of the conditions to improve the properties of the recycled mixture (preheating the RAP to 110°C and extending the mixing time). Applied both conditions of improvement there is a recovery of almost 20% of the value of the resistance preserved.

- For the case of the Fenix parameters, the beneficial effect of the improvement of the mixing conditions has also been confirmed. If the RAP is preheated to 110°C, the IRT, GD and ductility are maximized up to 55%, 175% and 20% respectively with respect to the most unfavorable condition. If the mixing time is increased, IRT, GD and ductility positively improve up to 33%, 80%, 10% respectively. On the other hand, if both conditions are used, a synergic effect is reflected in the Fenix parameters and there is an increase of: IRT up to 80%, GD 300% and ductility 25%.

In the previous study the total bitumen content has remained constant (4.25% on mixture in the first stage and 5.0% in the second); however, the optimum bitumen content for each recycled mixture may be different in each case, bearing in mind that not all the bitumen existing in the RAP could have been mobilized and mixed with the virgin bitumen. That is why it was decided to study the degree of mobilization of bitumen contained in the RAP, in which the main conclusion was that for both contents of RAP (40 and 60%), the values for the case of partial mobilization of void content, stiffness modulus, and Fenix parameters are the ones that in the majority of the cases one between total mobilization and zero mobilization.

On the other hand, the great convenience of studying the behavior of the mastic of the recycled mixtures by means of the UCL method is highlighted, since it shows us in a clear and simple way, the variation of the cohesion-adhesion of the recycled mixtures by varying the temperature of the RAP, and the rates of a rejuvenator. From this study it can be concluded that: the maximum value of void content is found in the series where the RAP has been added at room temperature (20°C). In the series where a 20% rejuvenator rate is added, it is the minimum voids in the mixture, even reaching lower values than the reference mixture. In terms of losses, the specimens that were manufactured with the RAP at room temperature (20°C) are those that present the highest losses, which indicates that it is more fragile and has a lower cohesion-adhesion than the other series. If the RAP mastic is preheated to 110°C, it is possible to have less losses compared to the mixture with RAP at 20°C, this indicates the pre-heating of the RAP, it has managed to re-establish part of the binder capacity of the milling mastic. The rejuvenator helps the mastic to recover the binder power lost by the milled material, especially at low and intermediate temperatures (-20°C to 25°C). However, there are very high losses with a test temperature of 40°C and 60°C for the case of 20% rejuvenator, and also presents a slope in the very high state curve, so it indicates that it is important to analyze the behavior of the products used as rejuvenating assumptions, because they do not always support temperature changes well.

In summary, it has been possible to assert that recycled mixtures can achieve a performance similar to that of conventional mixtures, provided that they have the appropriate treatment in the design and in the manufacturing process. By preheating the RAP, it is possible to spread the bonding agent in a better way and it is also possible to mobilize a greater quantity of the RAP bitumen. Extending mixing time causes the RAP agglomerations to start to separate and, therefore, a greater amount of bitumen is mobilized. The incorporation of a rejuvenating additive produces a positive effect on the properties of the recycled mixtures since it manages to restore the properties of the aged bitumen. However, in most cases, it is sufficient to apply some condition (pre-heating of the RAP, increase of the mixing time, overheating of the virgin aggregates or the use of the rejuvenators) to improve

the properties, but in some cases applying all the conditions simultaneously produce a synergistic effect on the properties of the mixtures inducing a positive effect on the behavior of the recycled mixtures.

6. Líneas futuras de investigación

Esta tesis doctoral deja abiertas varias líneas de investigación que se podrían realizar en el futuro partiendo de los resultados obtenidos. Con el fin de ampliar la labor emprendida en esta tesis doctoral, se sugieren las siguientes líneas complementarias de estudio:

- Sería interesante profundizar en el estudio de las variables descritas, calentando el RAP a temperaturas intermedias entre 20°C y 110°C.
- También se debería estudiar el efecto de las condiciones de mezclado en las propiedades con un mayor porcentaje de RAP (por ejemplo, un 100%). Esto permitiría ahorrar una gran cantidad de recursos económicos y naturales con la consecuente reducción del impacto ambiental.
- Se podría ampliar el efecto de las condiciones de fabricación en otras propiedades, por ejemplo, la vida a la fatiga de materiales reciclados.
- Se puede extender el mismo estudio, con las mismas condiciones de fabricación, pero con otros materiales distintos del RAP, como por ejemplo el “RAS” (fibras impregnadas con betún y cubiertas con árido que se utilizan en los tejados de las viviendas), ya que recientemente el uso de este material en las mezclas recicladas va en aumento.

Referencias bibliográficas

Abu Al-Rub, R. y otros, (2013) Mechanistic-based constitutive modeling of oxidative aging in aging susceptible materials and its effect on the damage potential of asphalt concrete. *Construction and Building Materials*, Volumen 41, pp. 439-454.

Airey, G. (2003) State of the Art Report on Aging Test Methods for Bituminous Pavement Materials. *The International Journal of Pavement Engineering*, Vol 4, p: 165-176, September 2003.

Airey, G.D., Hunter, A.E., Collop, A.C., Zoorob, S.E., (2006) Comparison of field and laboratory compacted asphalt mixtures. In: 10th international conference on asphalt pavements, Quebec City. Leiden, The Netherlands: Balkema, Vol. 1, 35–46.

Alarcón, J. (2003) Estudio del comportamiento de mezclas bituminosas recicladas en caliente en planta. Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Barcelona.

Alkins, A.E., Lane, B., Kazmierowski, T. (2008) Sustainable Pavements Environmental, Economic, and Social Benefits of in Situ Pavement Recycling, *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No. 2084, pp. 100-103. DOI: 10.3141/2084-11.

Alonso, J., (2006). Estudio del proceso de deformación y agrietamiento por fatiga de mezclas bituminosas sometidas a carga cíclica. Tesis Doctoral. Universitat Politècnica de Catalunya.

Akbulut H, Aslantas K. (2004) Finite element analysis of stress distribution on bituminous pavement and failure mechanism. *Material and Design* 2004; 26:383–7.

Al Helo, K. H. I., Qasim, Z. I. Majeed, A. D. (2016) Tensile strength for mixture content reclaimed asphalt pavement. *Global Journal of Engineering Science and Research Management*. Karim H et al., 3(11), pp. 26-34, November.

Al-Qadi, Imad L.; Aurangzeb, Qazi; Carpenter, Samuel H.; Pine, William J.; Trepanier, James, (2012) Impact of high RAP contents on structural and performance properties of asphalt mixtures. Springfield: Illinois Center for Transportation, Report Number FHWA-ICT-12-002.

Al-Qadi, I.L., Elseifi, M.A., y Carpenter, S.H., (2007) Reclaimed asphalt pavement: a literature review. Springfield: Illinois Center for Transportation, Report Number FHWA-ICT-07-001.

Ammann Industries (2011) Asphalt mixing plants. In: *Developing technology for our customers' requirements*.

Ammann. Industries (2013) Asphalt recycling possibilities on the asphalt mixing plant [online]; Available at: <http://www.fehrl.org/?m=32ymode=download&idfile=15190> [accessed 14.10.13].

Anderson, R.M., Baumgardner G., May R., Reinke G.,(2008) Engineering properties, emissions, and field performance of warm mix asphalt technologies. Lexington, KY: Asphalt Institute, Report Number NCHRP 9–47.

Anderson, D., Hir Y.L., Planche, J. Y, Martin, D., Shenoy A. (2002) Zero Shear Viscosity of Asphalt Binders. *Transportation Research Record*, Vol 1810, p: 54-62, Transportation Research Board, National Research Council, Washington D.C.

Anderson RW, Hanlon LC, Martin GF. (2010) Temperature control in an indirectly heated recycled asphalt product heater. United States Patent US7,669,792 B1.

Arnold CJ, Nolting M, Riebensehl G, Denck C. (2012) Unlocking the full potential of reclaimed asphalt pavement (RAP) – high quality asphalt courses incorporating more than 90% RAP: a case study. In: 5th Euroasphalt y Eurobitume congress; p. 13–5.

Araújo, M., Lins, V., Pasa, V., (2011) Effect of Ageing on Porosity of Hot Mix Asphalt. *Brazilian Journal of Petroleum and Gas*, 5(1), pp. 011-018.

Arega, Z., Bhasin, A., De Kesel, T., (2013) Influence of extended aging on the properties of asphalt composites produced using hot and warm mix methods. *Construction and Building Materials*, Volumen 44, pp. 168-174.

Arshad A. K., Mohammad M., Shaffie E., Hashim W., Halim A. A. (2017) “Volumetric analysis and performance of hot mix asphalt with variable RAP content”. *MATEC Web of Conferences*, Vol. 103, 09004. EDP Sciences

Artamendi I, Bailey H, Phillips P, Allen B. (2011) Rejuvenation of bituminous mixtures containing reclaimed asphalt with used vegetable oil. In: 5th international conference bituminous mixtures and pavements.

Asociación Española de Normalización y Certificación AENOR (1994) UNE 103501. UNE 103501. Geotecnia. Ensayo de compactación. Próctor modificado.

Asociación Española de Normalización y Certificación AENOR (1998) Áridos para mezclas bituminosas y tratamientos superficiales de carretera. Norma UNE-EN 933-1. Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 1: Determinación de la granulometría de las partículas. Métodos del tamizado.

Asociación Española de Normalización y Certificación AENOR (2007) Serie de Normas UNE-EN 12697. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 6. Determinación de la densidad aparente de probetas bituminosas por el método hidrostático

Asociación Española de Normalización y Certificación AENOR (2006) Serie de Normas UNE-EN 12697. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 12. Determinación de la sensibilidad al agua de las probetas de mezcla bituminosa

Asociación Española de Normalización y Certificación AENOR (2004) Serie de Normas UNE-EN 12697. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 23. Determinación de la resistencia a la tracción indirecta de probetas bituminosas.

Asociación Española de Normalización y Certificación AENOR (2006) Serie de Normas UNE-EN 12697. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 24. Resistencia a la fatiga.

Asociación Española de Normalización y Certificación AENOR (2006) Serie de Normas UNE-EN 12697. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 26. Rigidez.

Asociación Española de Normalización y Certificación AENOR (2007) Serie de Normas UNE-EN 12697. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 30. Preparación de la muestra mediante el compactador de impactos.

Asociación Española de Normalización y Certificación AENOR (2004) Serie de Normas UNE-EN 12697. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 23. Determinación de la resistencia a la tracción indirecta de probetas bituminosas.

Asociación Española de Normalización y Certificación AENOR (2006) Serie de Normas UNE-EN 12697. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 26. Rigidez.

Asociación Española de Normalización y Certificación AENOR (2007) Serie de Normas UNE-EN 12697. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 30. Preparación de la muestra mediante el compactador de impactos.

Asociación Española de Normalización y Certificación AENOR, (2009) Norma UNE-EN 12697-12:2009. Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo para mezclas bituminosas en caliente. Parte 12: Determinación de la sensibilidad al agua de las probetas de mezcla bituminosa.

Asociación Mexicana del Asfalto, A.C. (2008) Protocolo AMAAC “Desempeño de mezclas asfálticas”, agosto 2008

Asphalt Institute, (2007) Moisture Sensitivity. Best Practices to Minimize Moisture sensitivity in Asphalt Mixtures. Manual Series N°24 (MS-24). First Edition.

Asphalt Institute, (1996) Antecedentes del diseño y análisis de mezclas asfálticas de Superpave. US Department of Transportation. Federal Highway Administration.

ASTECC (1998) Fresado y Reciclaje de pavimentos, Revista Potencia Vol. 403, Goodman Business Press, Madrid, pp.16-30.

ASTECC Industries (2002) Inc. <www.asteccinc.com>. Fecha de acceso: 14 de enero de 2017.

ASTM, (1985). D1664-80: Standard Test Method for Effect of water on compressive strength of compacted bituminous mixtures. American Society for Testing and Materials.

ASTM, (1995a). D1754-94: Standard Test Method for Effect of Heat and Air on Asphaltic Materials (Thin Film Oven Test). American Society for Testing and Materials. Philadelphia, USA.

ASTM, (1995b). Standard Test Method for effect of heat and air on a moving film of asphalt (rolling thin film oven test). American Society for Testing and Materials. Philadelphia, USA.

ASTM, (2005). D3625-96: Standard Practice for Effect of water on Bituminous Coated Aggregate using Boiling Water. American Society for Testing and Materials.

ASTM, (2009) D-4867: Standard Test Method for Effect of moisture on asphalt concrete paving mixtures. American Society for Testing and Materials.

Asphalt Institute, (1995). Superpave performance graded asphalt binder specification and testing. Lexington, KY: Asphalt Institute.

ATEB, (2005). Las Emulsiones de Betún su Química - Física. Revista Carreteras, Issue 139.

Aurangzeb Q, Al-Qadi IL, Ozer H, Yang R. (2014) Hybrid life cycle assessment for asphalt mixtures with high RAP content. Resources Conservation and Recycling ; 83:77–86.

Bardesi, A., y Echevarría, O. (2001) Ligantes bituminosos para mezclas recicladas en caliente, Jornadas sobre mezcla bituminosa reciclada en caliente. Asociación Española de la Carretera. Barcelona, pp. 43-58

Bin Yu, Xingyu Gu, Ming Wu, Fujian Ni, (2016) Application of a high percentage of reclaimed asphalt pavement in an asphalt mixture: blending process and performance investigation, Road Materials and Pavement Design, 2016 DOI: 10.1080/14680629.2016.1182941

Belmonte, A., Ortuño, A. (2001), Reciclado integral de firmes rígidos. Experiencia en Andalucía, Ponencia del 11º Congreso Ibero-Latinoamericano del Asfalto (CILA), Lima (Perú).

Bennert, T. y Dongre, R., (2010) Method to determine effective asphalt binder properties of recycled asphalt pavement mixtures. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2179, 75–84. doi:10.3141/2179-09.

Bennert, Thomas, Jean-Valery Martin. (2010) Polyphosphoric Acid in Combination with Styrene-Butadiene-Styrene Block Copolymer—Laboratory Mixture Evaluation. *Asphalt Paving Technology-Proceedings Association of Asphalt Technologists* 79: 773.

Bermanian, S., Polish, P., Maurer, G. (2006) Cold In-Place Recycling and full-depth reclamation projects by Nevada Department of Transportation. *Transportation Research Board, Journal of the Transportation Research Board*, N° 1949, pp. 54-7.

Bonaquist, R., (2007) Can I run more RAP? *Hot Mix Asphalt Technology*, 12 (5), 11–13.: *Transportation Research Board, Report Number* 691.

Boyer RE. (2000) Asphalt rejuvenators fact, or fable. *Asphalt Institute* [online];2000, Available at: <http://www.totalasphalt.com/docs/products/Asphalt-Rejuvenators-Fact-or-Fable.pdf> [accessed 21.05.13].

Braham A., Peterson C., Buttlar W. (2009) Mixed-mode cracking in asphalt concrete, *Advanced Testing and Characterization of Bituminous Materials*, Vol.2, pp. 785-793.

Braham A, Buttlar W, Ni F. (2010) Laboratory mixed-mode cracking of asphalt concrete using the single-edge notch beam. *Road Material Pavement Design*; 11:947–68.

Brown R., Kandhal P., Zhang J. (2001) Performance Testing for Hot Mix Asphalt. *NCAT Report 01-05*, National Center for Asphalt Technology.

Brian K. Diefenderfer, Benjamin F. Bowers, Charles W. Schwartz, Azadeh Farzaneh, Zhuoyi Zhang (2016) Dynamic Modulus of Recycled Pavement Mixtures. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 2575, Transportation Research Board, Washington, D.C., 2016, pp. 19–26. DOI: 10.3141/2575-03.

Caro, S., Masada, E., Bhasina, A., Littlea, D., (2008) Moisture susceptibility of asphalt mixtures, Part 1: mechanisms. International Journal of Pavement Engineering, 9(2), pp. 81-98.

Carpenter, S., Wolosick, J., (1980) Modifier influence in the characterization of hot-mix recycled material. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 777, 15–22.

Carvalho R. L., Shirazi, H., Ayres M., Jr., Selezneva, O. (2010), “Performance of Recycled Hot-Mix Asphalt Overlays in Rehabilitation of Flexible Pavements.” Transportation Research Record: Journal of The Transportation Research Board, vol. 3, no 10-2209 pp. 55-62.

CEDEX. Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas. Dirección General de Carreteras, Ministerio de Fomento (2000), Normas NLT de ensayo de carreteras. Norma NLT- 161/00. Resistencia a compresión simple de mezclas bituminosas. Madrid.

CEDEX. Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas. Dirección General de Carreteras, Ministerio de Fomento (2000), Normas NLT de ensayo de carreteras. Norma NLT-162/00. Efecto del agua sobre la cohesión de las mezclas bituminosas compactadas. (Ensayo de inmersión-compresión). Madrid.

CEDEX. Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas. Dirección General de Carreteras, Ministerio de Fomento (1990), Normas NLT de ensayo de carreteras. Norma NLT- 164/90. Contenido de ligante en mezclas bituminosas. Madrid.

CEDEX. Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas. Dirección General de Carreteras, Ministerio de Fomento (1992), Normas NLT de ensayo de carreteras. Norma NLT- 363/92. Densidad en obra de pavimentos bituminosos por el método nuclear.

Celauro, C., Bernardo, C., Gabriele, B., (2010), Production of innovative, recycled and high performance asphalt for road pavement, Resources, Conservation and Recycling. no 54, pp. 337-347.

Chappat M, Bilal J. (2003) The environmental road of the future. Quantifying Sustainability in Pavement Rehabilitation Projects Session of the Annual Conference of the Transportation Association of Canada Toronto, Ontario.

Copeland, A., (2011) Reclaimed asphalt pavement in asphalt mixtures: state of the practice. McLean, VA: Turner-Fairbank Highway Research Centre, Report Number FHWA-HRT-11- 021.

Cross, S., Fager, GA. (1995), Fly ash in cold recycled bituminous pavements , Transport Research Board, nº 1486, pp. 49-56.

Cross, S. (2011), Comparison of CIR with mill and fill and two course HMA overlay, Annual meeting: Asphalt Recycling and Reclaiming Association (ARRA).

Cross, S., Chesner, W., Justus, H., Kearney, E. (2011), Life-Cycle environmental analysis for evaluation of pavement rehabilitation options, Transportation Research Board, Journal of the Transportation Research Board, nº 2227, pp. 43-52.

Daniel JS, Pochily JL, Boisvert DM. (2010) Can more reclaimed asphalt pavement be added? Study of extracted binder properties from plant produced mixtures with up to 25% reclaimed asphalt pavement. Transportation Research Record: J Transportation Research Board; 2180:19–29.

Damp S. (2007), Environmental impact of recycling the usage of asphalt recycling. Annual meeting: Asphalt Recycling and Reclaiming association (ARRA), Florida.

Decker, D.S. Young, T.J., (1999), Handling RAP in an HMA facility. In: T. Gregorski and T.J. DePoy, eds. Canadian technical asphalt association, March 1996 Edmonton, Alberta, Canada. Des Plaines, IL : Scranton Gillette Communications, 52–54.

DeKold SP, Amir Khanian SN. (1992) Reuse of moisture-damaged asphaltic concrete pavements. Transportation Research Record; 1337:79–88.

Del Rio M., Castro D., Vega A., Sanchez, E., (2011) Effects of aggregate shape and size and surfactants on the resilient modulus of bituminous mixes. Canadian Journal of Civil Engineers. Vol. 38, pp. 893-899.

Doyle, J. D., Howard, I. L. (2010). Laboratory Investigation of High RAP Content Pavement Surface 520 Layers. Final Report FHWA/MS-DOT-RD-10-212. USA.

EUROPEAN ASPHALT PAVEMENT ASSOCIATION (EAPA) (2013) “Asphalt in figures” www.eapa.org//Asphalt%20in%20Figures/AIF_2013_Final.pdf. (Fecha de acceso 15 de mayo de 2017).

Elvira, J. y Fernández del Campo, J., (1977). Comportement mécanique des mélanges bitumineux. Bitumes et enrobés bitumineux. En: Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées. Francia.

Farcas, F., (1996). Etude d'une Méthode de Simulation du Vieillissement sur Route des Bitumes. Thèse de Doctorat de l'Université Paris VI.

Fernández, L. (2002) Modelado de la fractura en el concreto. Tesis presentada en la División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería UNAM para obtener el grado de Doctor en Ingeniería (estructuras).

Federal Highway Administration (2000) Recycled materials in European Highway Environments". U.S. Department of Transportation and Federal Highway Administration.

Fernández del Campo, J.A. (1998) Tratado de estabilización y reciclado de capas de firmes con emulsión asfáltica, Asociación Española de la Carretera.

Frank R. (2004), Hot mix asphalt manufacturing system and method". United States Patent US6,832,850 B1.

García, J. (2001) Equipos y maquinaria para el reciclado en caliente, Jornadas sobre mezcla bituminosas recicladas en caliente, Asociación Española de la Carretera, Barcelona, pp.59-82.

Garnica Paul. (2002) Mecánica de Materiales para Pavimentos. Publicación Técnica No. 197. Instituto Mexicano del Transporte, Sanfandila, Querétaro. México.

Gambatese, John A., Sathyanarayanan Rajendran, (2005) Sustainable Roadway Construction: Energy Consumption and Material Waste Generation of Roadways, American Society of Civil Engineers, Reston, VA. Proceedings of 2005 Construction Research Congress. (<http://tinyurl.com/yyapyts>) (accessed 09-12-2011).

Glover C, Charles J., Davison, Richard R; Domke, Chris H; Ruan, Yonghong; Juristyarini, Pramitha; Knorr, Daniel B; Jung, Sung H ;(2005). "Development of a new method for assessing asphalt binder durability with field validation". Texas Transportation Institute.

Hansen KR, Copeland A. (2013) 2nd annual asphalt pavement industry survey on reclaimed asphalt pavement, reclaimed asphalt shingles, and warm-mix asphalt usage:2009–2011. Lanham, MD: National Asphalt Pavement Association.

Hintz C, Velasques R, Johnson C, Bahia H. (2011) Modification and validation of the linear amplitude sweep test for binder fatigue. Transportation Research Record: J Transportation Research Board; 2207:99–106.

Howard, I. L., Cooley, A. L. Jr., y Doyle, J. D. (2009) Laboratory testing and economic analysis of high rap warm mixed asphalt (Report Number FWHA/MS-DOT-RD-09-200). Jackson: Mississippi Department of Transportation.

Hassan, N.A., Khan, R., Raaberg, J., Lo Presti, D. (2015) Effect of mixing time on reclaimed asphalt mixtures: An investigation by means of imaging techniques, Construction and Building Materials, art. no. 7165, pp. 54-61. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.09.009.

Huang B, Li G, Vukosavljevic D, Shu X, Egan B. (2005) “Laboratory investigation of mixing hot-mix asphalt with reclaimed asphalt pavement”. Transportation Research Record.

Huang Y, Bird R, Heidrich O. (2009) Development of a life cycle assessment tool for construction and maintenance of asphalt pavements”. Journal of Clean Production; 17:283–96.

Instituto de Ingeniería, UNAM. (1999) Diseño estructural de pavimentos asfálticos, incluyendo carreteras de altas especificaciones. DISPAV-5 VERSIÓN 2.0. 1999.

Johansson, L. (1998) Bitumen aging and hydrated lime TRITA-IP FR- 98-38. Doctoral dissertation, Division of Highway Engineering, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden.

Kandhal, P. S., Rao, S., Watson, D., Young, B. (1995) Performance of recycled Hot- Mix Asphalt Mixtures in Georgia, Transportation Research Record 1507, Transportation Research Board, National Research Council, Washington D.C., pp. 67- 77.

Karlsson, R., Isacsson, U., y Ekblad, J., (2007) Rheological characterization of bitumen diffusion. Journal of Materials Science, 42, 101–108. doi:10.1007/s10853-006-1047-y.

Kennedy, T. W., Roberts, F. L. (1982) Quality-Assurance Considerations in Design of Recycled Asphalt Mixture, Transportation Research Record 885, Transportation Research Board, National Research Council, Washington D.C., pp. 1-7.

Kim, Y.R., Wen, H., (2002) Fracture energy from indirect tension testing. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, 71, 779–793.

Kraemer, C, Pardillo, J.M., Rocci, S., Romana, M., Sánchez, V., del Val, M.A. (2004) Ingeniería de Carreteras”, vol. II. Editorial Mc Graw Hill.

Kringos, N., (2007) Modelling of combined physical-mechanical moisture-induced damage in asphaltic mixes, PhD dissertation, TU Delft, ISBN 9789090217659.

Kringos, N., Scarpas, T., Kasbergen, C., Selvadurai, P., (2008) Modelling of combined physical-mechanical moisture-induced damage in asphalt mixes, Part 1: governing processes and formulations. International Journal of Pavement Engineering, 9(2), pp. 115-128.

Koh C., Lopp G., Roque R. (2009) Development of a Dog-Bone Direct Tension Test (DBDT) for asphalt concrete. Advanced Testing and Characterization of Bituminous Materials, Vol.1, pp. 585-596.

Kuai, H., Lee H., Zi G. (2009). Application of Generalized J Integral to Crack Propagation Modeling. In Transportation Research Board, 88th Annual Meeting. CD-ROM, Washington, D.C., USA.

Lane, B., Kazmierowski, T. (2005), "Implementation of Cold In-Place Recycling with expanded asphalt technology in Canada", Transportation Research Board, Journal of the Transportation Research Board, no 1905, pp. 17-24.

Lee, J. M., Salgado, R., Benal, A., Novell, C. W. (1999) Shredded tires and rubber-sand as lightweight backfill Journal of Geotechnical and Geo environmental Engineering, ASCE, vol. 25. no 2; pp.132-141.

Lee N, Chou C-P, Chen K-Y. (2012) Benefits in energy savings and CO2 reduction by using reclaimed asphalt pavement. In : Transportation Research Board 91st annual meeting.

Lefort, M. (1997) Le point sur le retraitement en place a froid des anciennes chaussées. Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées, no 212, Paris (France).

Lesueur, D. (2000) Emulsion aggregates interactions through water analysis, 2nd Euro asphalt and Eurobitume Congress. Barcelona, Book 2, pp. 315-325.

Lesueur, D., Herrero, L., Uguet, N., Hurtado, J., Pena, J.L., Potti, J.J., Walter, J., Lancater, I.M. (2006), Emulsions de bitume micronisees et leur potntiel d'emploi en recyclage a froid, Revue générale des routes et aérodromes, no 850.

Lytton, R., (2002) Mechanics and measurement of moisture damage. Proceedings of moisture damage symposium, Western Research Institute, Wyoming, julio.

Lo Presti, D., Khan, R., Abdul Hassan, N., Airey, G., Collop, A. (2014) Laboratory mix design of asphalt 531 mixture containing reclaimed material, *Advances in Materials Science and Engineering*, 2014, art. no. 507082, DOI: 10.1155/2014/507082.

Lo Presti, Davide, Ana Jiménez Del Barco Carrión, Gordon Airey, and Elie Hajj. (2016) Towards 100% Recycling of Reclaimed Asphalt in Road Surface Courses: Binder Design Methodology and Case Studies. *Journal of Cleaner Production* 131: 43–51.

Mallick, Rajib B; O'Sullivan, Karen Anne; Tao, Mingjiang; Frank, Robert, (2010). "Why not use rejuvenator for 100% RAP recycling?" Transportation research board 89th annual meeting, 10–14 January 2010 Washington, DC. Washington, DC: Transportation Research Record.

Marek Iwanski y Anna Chomicz Kowalska (2012) Experimental study of water and frost resistance of foamed bitumen mixes in the cold recycling technology. *Eurasphalt and Eurobitume Congress*. June.

Martínez F. (2006) Deterioro en Capas Asfálticas: Fisuración, *Jornadas Técnicas de Actualización y Capacitación en el Área de los Pavimentos Flexibles*, Argentina.

Martinez A., Miró R., Pérez-Jiménez F. (2007) Spanish Experience with the Application of Gyrotory Compactor and Indirect Tensile Test in Design and Control of Cold Recycled Asphalt Pavement.
<https://upcommons.upc.edu/handle/2117/2876>.

McDaniel, R.S., Anderson, R.M., (2000) Recommended use of reclaimed asphalt pavement in the Superpave mix design method". West Lafayette, in: North Central Superpave Center, NCHRP Project D9-12, Contractor Final Report.

McDaniel, R.S., Soleymani H., Shah A. (2002) Use of reclaimed asphalt pavement (RAP) under superpave specification: a regional pooled fund study. West Lafayette, IN: Purdue University, Joint Transportation Research Program, Report Number FHWA/ IN/JTRP-2002/6.

McDaniel, R.S., Anderson, R.M., (2001) Recommended use of reclaimed asphalt pavement in the Superpave mix design, International Journal of Pavement Engineering 53.

McGennis R., Anderson R., Kennedy T., Solaimanian M. (1994) Background of Superpave Asphalt Mixture Design and Analysis. Publication No. FHWA-SA-95-003.

Ministerio de Fomento. Dirección General de Carreteras (2002) Pliego de prescripciones técnicas generales para obras de conservación de carreteras, PG-4. Artículo 20. Reciclado in situ con emulsión de capas bituminosas. Orden Circular 8/2001.

Ministerio de Fomento. Dirección General de Carreteras (2003a), Norma 6.3 IC. Rehabilitación de Firmes. Orden FOM 3459/2003.

Ministerio de Fomento. Dirección General de Carreteras (2003b) Norma 6.1- IC "Secciones de Firme". Orden FOM 3460/2003.

Miró, R. (2001) Características mecánicas de las mezclas recicladas en caliente, Jornadas sobre mezcla bituminosas recicladas en caliente, Asociación Española de la Carretera, Barcelona, pp. 27-42.

Miró, R., Centeno, M., Martínez, A., Pérez, F. (2007) Evaluación de los métodos de reciclado y rehabilitación de firmes a partir del análisis de los tramos experimentales del proyecto europeo PARAMIX. Infraestructura Vial. nº 18, pp. 15-23.

Miró, R. Martínez, A., Pérez, F. (2011) Evaluation of High Modulus Mixture Behavior with High Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) Percentages for Sustainable Road Construction. *Construction and Building Materials* 25(10): 3854–62.

Moreno, L. (2001) Experiencia de Pavimentos Barcelona S. A. en el reciclado en planta en caliente. *Jornadas sobre mezcla bituminosas recicladas en caliente*, Asociación Española de la Carretera, Barcelona, pp. 146-151.

Moreno, F., Rubio, M.C., Martínez Echevarría, M.J. (2011) Reuse of sludge from the decorative quartz industry in hot bituminous mixes, *Construction and Building Materials*, vol. 25, pp. 2465-2471.

Moreno, F., Rubio, M.C., Martínez-Echevarría, M.J. (2012) The mechanical performance of dry process crumb rubber modified hot bituminous mixes: The influence of digestion time and crumb rubber percentage. *Construction and Building Materials*, vol. 26, pp. 466-474.

Morian, D.A., Zhao, Y., Arellano, J., Hall, D.E. (2005) Asphalt Pavement Rehabilitation Treatment. Analysis of 20 years of performance. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. n-1905, pp. 36-43.

Mogawer, W.S., Austerman. A.J y Roussel M., (2012) Performance characteristics of plant produced high RAP mixtures. *Road Materials and Pavement Design*, 13 (1), 183–208. doi:10.1080/14680629.2012. 657070.

Mohammad, L.N., Mull-Aglan, M.A., Othman, A. (2006) Fatigue crack growth analysis of hot-mix asphalt employing semicircular notched bend specime. In: *Transportation research board 85th annual meeting*, 22–26 January, Washington, DC. Paper No. 06–1665.

Molenaar A., Scarpas A., Liu X., Erkens S. (2002). Semi-Circular Bending Test; Simple but Useful? Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 71, pp. 795-815.

Newcomb, D., Brown, E., y Epps, J. (2007) Designing HMA mixtures with high RAP content: A practical guide. Lanham, MD: National Asphalt Pavement Association.

Nguyen, Hung Viet. (2013) Effects of Mixing Procedures and Rap Sizes on Stiffness Distribution of Hot Recycled Asphalt Mixtures. Construction and Building Materials 47: 728–42.

NCHRP. (2001) Report 452 Recommended Use of Reclaimed Asphalt Pavement in the Superpave Mix Design Method: Technician's Manual. onlinepubs.trb.org/onlinepubs/nchrp/nchrp_rpt_452.pdf accessed 24 February 2016, Washington, D.C., USA.

NCHRP. (2013) Report 752 "Improved Mix Design, Evaluation, and Materials Management Practices for Hot Mix Asphalt with High Reclaimed Asphalt Pavement Content". R.West y Maresteanu. Transportation research board. Washington.

Nosetti, R. A. (2009) Estudio del efecto de los materiales rellenos y de los áridos de aportación en las características de las mezclas recicladas en frío con ligantes bituminosos". Tesis doctoral por la Universidad Politécnica de Cataluña, España.

PABASA EUROASFALT (Empresa dedicada al campo de las carreteras), www.pabasa.com. (Fecha de acceso 24 de abril del 2016).

Pauls, J. y Welborn, J., (1952) Studies of the Hardening Properties of Asphaltic Materials. Proceedings Association of Asphalt Paving Technologists, Volumen 21, pp. 48-75.

Pérez, I. Pasandín, A.R. (2017) Moisture damage resistance of hot-mix asphalt made with recycled concrete aggregates and crumb rubber. *Journal of Cleaner Production*. Vol. 165, pp 405-414, 2017. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.07.140

Pérez-Jiménez, F. (2006) Reciclado en planta de mezclas bituminosas en caliente betuminosas recicladas a quente em central. crp.pt. [http://crp.pt/docs/A19S5-6-Misturas betuminosas recicladas a quente em central.doc](http://crp.pt/docs/A19S5-6-Misturas%20betuminosas%20recicladas%20a%20quente%20em%20central.doc) (January 1, 2006).

Pérez-Jiménez, F.; Valdés, G.; Miró, R.; Martínez, A. y Botella, R. (2010) “Fénix Test. Development of a new test procedure for evaluating cracking resistance in bituminous mixtures”. *Transportation Research Record, Journal of Transportation Research Board*, nº 2181, pp. 36-43, 2010.

Pérez-Jiménez, F.; Botella, R.; Martínez, A. y Miró, R. (2013) Analysis of the mechanical behavior of bituminous mixtures at low temperatures. *Construction and building materials*, Vol. 46, pp. 193-202, 2013.

Pérez-Jiménez, F.; Valdés, G.; Muñoz, M.; Miró, R.; Martínez, A.; Botella, R. y Amorós, J. (2014), Criterios y especificaciones para el uso del ensayo Fénix en el diseño de mezclas bituminosas tipo AC. IX Jornada Nacional ASEFMA. Asociación Española de Fabricantes de Mezclas Asfálticas (ASEFMA), Madrid.

Peterson G, Davison R, Glover C, Bullin JA. (2014), Effect of composition on asphalt recycling agent performance. *Transportation Research Record*; 1463:38–46.

PG-3. Pliego de prescripciones técnicas generales para obras de carreteras y puentes.

PG4-2001. Pliego de prescripciones técnicas generales para obras de conservación de carreteras.

Potter J, Mercer J. (1997) Full-scale performance trials and accelerated testing of hot-mix recycling in the UK. In: Eighth international conference on asphalt pavements; p. 10–4.

Poulikakos, L. y Partl, M., (2009) Evaluation of moisture susceptibility of porous asphalt concrete using water submersion fatigue tests. *Construction and Building Materials*, 23(12), pp. 3475-3484.

PROYECTO DIRECT-MAT. (2010) Synthesis of national and international documents on existing knowledge regarding the recycling of reclaimed road materials in asphalt. November 2010.

PROYECTO DIRECT-MAT (2011) “Report on practical application case studies regarding dismantling and recycling of asphalt”. Marzo 2011.

PROYECTO DIRECT-MAT (2011). “Best Practice guide for dismantling of asphalt roads and use of recycled materials in asphalt layers”. Agosto.

Qing, L. Harvey, J., (2005) Investigation of Conditions for Moisture Damage in Concrete and Appropriate Laboratory Test Methods. Report Number: UCPRC-RR-2005-15, University of California: Pavement Research Centre.

Ramond, G. y Such, C., (1990) Bitumes et Bitumes Modifiés - Relations Structures, Propriétés Composition.” *Bulletin de liaison des laboratoires des Ponts et Chaussées*, Volumen 168, pp. 65-87.

Read, J., Whiteoak, D. (2003) *The Shell Bitumen Handbook*. 5th ed. London, England: Thomas Telford Publishing, Shell Bitumen UK.

Roberts F., Kandhal P., Ray E., Lee D., Kennedy T. (1996) *Hot Mix Asphalt Materials, Mixture Design, and Construction*. NAPA Education Foundation, Second Edition.

Roberts F, Kendhal P, Brown ER, Lee DY, Kennedy T. (2009) Hot mix asphalt materials, mixture design and construction. 3rd ed. Lanham, MD: National Asphalt Pavement Association Research and Education Foundation.

Ruiz, A. (2001) Reciclado de mezclas bituminosas en planta en caliente: Proceso, ventajas y limitaciones, empleo y perspectivas, Jornadas sobre mezcla bituminosas recicladas en caliente, Asociación Española de la Carretera, Barcelona, pp. 9-26.

Sebaaly, P.E., Bazi, G., Hitti E., Weitzel, D., Bemanian, S. (2004) Performance of cold in-place recycling in Nevada, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, no 1896, pp. 162-169.

Sengoz, B. y Agar, E., (2007). Effect of asphalt film thickness on the moisture sensitivity characteristics of hot-mix asphalt. Building and environmental, Volumen 42, pp. 3621-3628.

Shah S., Shwartz S., Ouyang Ch. (1995), Fracture Mechanics of Concrete, Applications of Fracture Mechanics to Concrete, Rock and Other Quasi-Brittle Materials”, Wiley-Interscience Publication, New York, USA.

Shirodkar, P., Mehta, Y.; Nolan, A.; Sonpal, K.; Norton, A.; Tomlinson, C.; Dubois, E.; Sullivan, P., Sauber, R. (2011) A study to determine the degree of partial blending of reclaimed asphalt pavement (RAP) binder for high RAP hot mix asphalt”. Construction and Building Materials, Vol. 25, No. 1, pp. 150–155.

Shu X, Huang B, Vukosavljevic D. (2008) Laboratory evaluation of fatigue characteristics of recycled asphalt mixture. Construction Building Material; 22:1323–30.

Shunyashree T. B., Archana M. R., Amarnath M. S. (2013) Effect of use of recycled materials on indirect tensile strength of asphalt concrete mixes. IC-RICE Conference Issue, pp. 226-232.

Silva HM, Oliveira JR, Jesus CM. (2012), "Are totally recycled hot mix asphalt a sustainable alternative for road paving?" *Resources Conservation Recycling*; 60:38–48.

Singh, Dharamveer, Srinivas F. Chitragar, Prabin Kumar Ashish. (2017). "Comparison of Moisture and Fracture Damage Resistance of Hot and Warm Asphalt Mixes Containing Reclaimed Pavement Materials." *Construction and Building Materials* 157: 1145–53.

Solaimanian M, Tahmoressi M. (1996) Variability analysis of hot-mix asphalt concrete containing high percentage of reclaimed asphalt pavement. *Transportation Research Record*.

Stuart, K., (1990). Moisture damage in asphalt mixtures state of the art, Report FHWA-RD-90-019, FHWA, VA 22101-2296.

Taylor, M., Khosla, N., (1983). Stripping of asphalt pavements: state-of-the-art. *Transportation research record: journal of the transportation research board*, Volumen 911, pp. 150-157.

Terrel, R., Al-Swailmi, S., (1994). Water Sensitivity of Asphalt-Aggregate Mixes: Test Selection. Report Number: SHRP-A-403, Strategic Highway Research Program, National Research Council. Washington, D.C.

Terrel, R., Shute, J., (1989). Summary report on water sensitivity. SHRP-A/IR-89-003. Strategic Highway Research Program National Research Council. Washington.

Thunqvist, E., (2001). Long term effects of deicing salt on the roadside environment part II: groundwater and surface water. *Proceedings of the 9th maintenance management conference*.

Tonial, I., (2001). Influência do Envelhecimento do Revestimento Asfáltico na Vida da Fadiga de Pavimentos. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação de Engenharia Química. Universidade Federal do Rio de Janeiro.

Tuffour, Y.A., Ishai, I., Craus, J. (1989) Relating asphalt aging and durability to its compositional changes." AAPT, Vol. 58, 1989, pp. 163-181.

Valdés G., Pérez F. y Botella R. (2009) Ensayo Fénix, una nueva metodología para medir la resistencia a la fisuración en mezclas asfálticas, Revista de la Construcción, ISSN 0717-7925, N° 14, pp. 114- 125.

Valdes G., -Jimenez F., Miro R., Martinez A., Botella R (2011) Experimental study of recycled asphalt mixtures with high percentages of reclaimed asphalt pavement (RAP), Construction and Building Materials, Vol. 25, Issue 3, pp. 1289-1297.

Vallerga, B., Monismith, C., Granthem, K., (1957) A study of some factors influencing the weathering of paving asphalts. Proc. Assn. Asphalt Paving Technol., Volumen 26, pp. 126-150.

Vidal R, Moliner E, Martinez G, Rubio MC. (2013) Life cycle assessment of hot mix asphalt and zeolite-based warm mix asphalt with reclaimed asphalt pavement. Resource Conservation Recycle 2013; 74:101–14.

Volker Wessels. (2016). HERA system [online]. Fecha de acceso 14 de octubre de 2016. Disponible en: <http://en.volkerwessels.com/en/projects/detail/hera-system>.

Wagoner, M., Buttlar, W., y Paulino, J. (2005) Development of a Single Edge-Notched Beam Test for the Study of Asphalt Concrete Fracture. Advances in Pavement Engineering: pp. 1-13.

Wagoner MP, Buttlar WG, Paulino GH, (2005) Blankenship P. Investigation of the fracture resistance of hot-mix asphalt concrete using a Disk-Shaped Compact Tension test. Transportation Research Record 2005; 1929:18392.

Wagoner, M.P. (2006) Fracture tests for bituminous-aggregate mixtures: Laboratory and field investigations. Ph.D. dissertation, University of Illinois at Urbana-Champaign. USA.

Waymen M, Andersson-Skold Y, Bergmen R, Huang Y, Parry T, Raaberg J, (2012) Lifecycle assessment of reclaimed asphalt. European Commission.

West RC. (2008) Summary of NCAT survey of RAP management practices and RAP variability. Auburn, AL: National Center of Asphalt Technology, July.

West RC. (2011) Reclaimed asphalt pavement management: best practices. Auburn, AL: National Center for Asphalt Technology; August.

West R, Michael J, Turochy R, Maghsoodloo S. (2011) A comparison of virgin and recycled asphalt pavements using long-term pavement performance SPS-5 data. In: Annual meeting of the Transportation Research Board.

West R, Willis JR, Marasteanu M. (2013) Improved mix design, evaluation, and materials management practices for hot mix asphalt with high reclaimed asphalt pavement content. NCHRP.

West, Randy C., Nam H. Tran, Adam J. Taylor, y Richard J. Willis. (2016). Comparison of Laboratory Cracking Test Results with Field Performance of Moderate and High RAP Content Surface Mixtures on the NCAT Test Track.

Willis JR, Marasteanu M. (2013) Improved mix design, evaluation, and materials management practices for hot mix asphalt with high reclaimed asphalt pavement content. NCHRP; 2013, January.

Willburn D, Goonan T. (1998) Aggregates from natural and recycled sources. U.S. Department of Interior.

Wirtgen GmbH (2010), Wirtgen Cold Recycling Technology, Germany. ISBN 3-936215-05-7, pp. 74-77.

Wu, J., (2009). The influence of mineral aggregates and binder volumetric on bitumen ageing. Doctoral Thesis. The University of Nottingham.

Xiao, Feipeng, y Serji N. Amirkhanian. (2009). Laboratory Investigation of Moisture Damage in Rubberised Asphalt Mixtures Containing Reclaimed Asphalt Pavement. *International Journal of Pavement Engineering* 10(5): 319–28.

Xu X, Zaumanis M, dos Santos S, Poulikakos L. (2014) Rheological, microscopic and chemical characterization of the rejuvenating effect on asphalt binders., <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2014.06.038>.

Yoder, E.J. y Witczak, M.W. (1975) Principles of pavement design. John Wiley y Sons Inc., Second Edition, USA.

Yutave Ingeniería S.A DE CV., (2011) Formulación de dictámenes técnicos para la Evaluación estructural de la carretera México-Veracruz del Km. 65+000 al km 105+000, 2011, Secretaria de Comunicaciones y Transportes, México.

Zaumanis, M., Mallick RB, (2012a). Development of calculation tool for assessing the energy demand of warm mix asphalt. *Procedia Social and Behavioural Sciences*, 48, 63.

Zaumanis M, Mallick RB. (2013) Finite element modelling of rejuvenator diffusion in RAP binder film – simulation of plant mixing process. In: RILEM conference.

Zaumanis M. [Doctorate dissertation] (2014). 100% recycled hot mix asphalt and the use of rejuvenators [Doctorate dissertation]. Worcester, MA: Worcester Polytechnic Institute.

Zaumanis, Martins, Rajib B. Mallick, and Robert Frank. (2014). "100% Recycled Hot Mix Asphalt: A Review and Analysis." *Resources, Conservation and Recycling* 92: 230–45.

Zaumanis M, Mallick R, Frank R. (2014a) Evaluation of different recycling agents for restoring aged asphalt binder and performance of 100% recycled asphalt. *Mater Struct* 2014a., <http://dx.doi.org/10.1617/s11527-014-0332-5> [in press].

Zaumanis M, Mallick R, Frank R. (2014b) Determining optimum rejuvenator dose for asphalt recycling based on superpave performance grade specifications. *Constr Build Mater.*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.07.035> [in press].

Zaumanis, Martins, Rajib B. Mallick, Lily Poulikakos, and Robert Frank. (2014) "Influence of Six Rejuvenators on the Performance Properties of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) Binder and 100% Recycled Asphalt Mixtures." *Construction and Building Materials*, Volume 71, 2014, pp. 538-550.

Zaumanis, M. y Mallick, R.B., (2015) Review of very high-content reclaimed asphalt use in plant produced pavements: State of the Art. *International Journal of Pavement Engineering*, Vol. 16, No. 1, pp. 39–55.

Zhao, D., (2011) Evolution de l'Adhérence des Chaussées: Influence des Matériaux, du Vieillissement et du trafic - Variations Saisonnières. Thèse de l'École Doctorale Science pour l'Ingénieur, Géosciences, Architecture.

Zhao, Sheng, Baoshan Huang, Xiang Shu, and Mark E. Woods. (2016) Quantitative Evaluation of Blending and Diffusion in High RAP and RAS Mixtures. *Materials and Design* 89: 1161–70.

Zhou F, Das G, Scullion T, Hu S. (2010) RAP stockpile management and procession in Texas: state of the practice and proposed guidelines. Austin, TX: Texas Department of Transportation.

ANEXO A

Características del betún 70/100



Boletín de Análisis
2015-TAR-00306-TAR

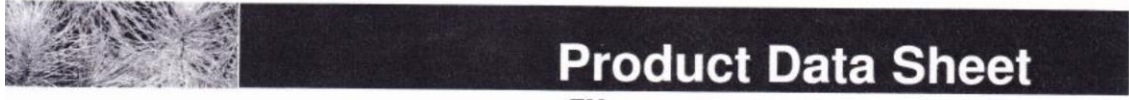
Ref	845	Product 70311 Cepsasfalt 70/85	Ensayos: FACTORIA	Pto. Muestreo T_BRC4	
Alternativa/Lote	/	Tipo Almacenamiento	Centro Muestra TARRAGONA	Motivo Control de Calidad	
Fecha Muestreo	04/11/2015 17:04:00	Fecha Recepción	05-nov-2015	Fecha Terminación	05-nov-2015

Metodo	Descripción Metodo	Parametro	Valor	Unidad	Especificación	
					Min	Max
UNE-EN-1425	Propiedades perceptibles	Cantidad y embalaje	1KG	-		
UNE-EN-1425	Propiedades perceptibles	Aspecto de la superficie	BRILLANTE	-		
UNE-EN-1425	Propiedades perceptibles	Presencia de sustancias extrañas	NO HAY	-		
UNE-EN-1425	Propiedades perceptibles	Consistencia de líquidos	LÍQUIDA	-		
UNE-EN-1425	Propiedades perceptibles	Homogeneidad	BUENA	-		
UNE-EN-1425	Propiedades perceptibles	Olor	TÍPICO	-		
UNE-EN-1425	Propiedades perceptibles	Observaciones	-	-		
UNE-EN-1426	Penetración	Penetración	84	dmm	70	85
Observaciones	Oliver					

Fecha de Emisión		
26/01/2016 12:36:14		

ANEXO B

Características del aditivo rejuvenecedor SYLVAROAD RP 1000



Product Data Sheet

SYLVAROAD™ RP 1000 Performance Additive

SPECIFICATIONS*	
Acid Value (mg KOH/g)	Max 15
Kinematic Viscosity at 40 °C (mm ² /s)	40-46
Color (Gardner)	Max 8

TYPICAL PROPERTIES*		
Flash Point (°C)	>295	
Dynamic Viscosity at 25 °C (mPa.s)	71	
Kinematic viscosity (mm ² /s)	-20 °C	1615
	0 °C	355
	20 °C	98
	40 °C	43
	100 °C	9
Density (ton/m ³)	0.93	
Appearance	Clear and bright, yellow to amber	
Soluble in:	SYLVAROAD™ RP 1000 Performance Additive is soluble in any grade of bitumen. Compatible with solvents like aromatics, ketones, alcohols.	
Compatible with:	SYLVAROAD™ RP 1000 Performance Additive is compatible with common additives such as anti-strip, adhesion promoters and warm mix additives.	
DOT Shipping Classification:	Non-volatile. Non-hazardous.	
Shipping:	Drums (180 kg) IBC's (900 kg)	
Storage:	Minimize exposure to excessively high temperatures during storage. Prevent storage in direct sunlight	

*Arizona Chemical Test Methods available on request.



The information and statements herein are believed to be reliable, but are not to be construed as a warranty or representation for which we assume legal responsibility. Users should undertake sufficient verification and testing to determine the suitability for their own particular purpose of any information or products referred to herein. NO WARRANTY OF FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE IS MADE. Nothing herein is to be taken as permission, inducement or recommendation to practice any patented invention without a license.