

# Determinación de los tiempos óptimos de amasado en seco para mezclas bituminosas con reutilización de RAP en sistemas de incorporación sin precalentamiento

Pablo Álvarez Troncoso,  
palvarez@becsa.es  
Aida Marzá Beltrán,  
amarza@becsa.es

Carlos Quintana Gálvez,  
cquintana@becsa.es

Gracias a la creciente demanda social y a la paralela concienciación y compromiso de todos los agentes implicados en el sector de las infraestructuras, la reutilización de material fresado en la fabricación de mezclas bituminosas atraviesa un nuevo período de impulso y renovación auspiciado por una serie de cambios normativos que establecen claramente los protocolos, procedimientos de control y nivel de desempeño que debe alcanzar una mezcla bituminosa de este tipo para asegurar una durabilidad adecuada.

Como en toda adaptación o implementación normativa, la acumulación de experiencia en la aplicación de la misma va perfilando algunos aspectos técnicos que en algún caso cobran mayor importancia con el avance en el desarrollo de la técnica. Tal es el caso, como se indica en la orden circular 40/2017 en el apartado 22.7.1.3.2, de la necesaria eficiencia en la transferencia de calor y la integración homogénea de todos los materiales con los áridos de aportación en los procesos de fabricación de mezclas con RAP en centrales con adición directa al mezclador. En ese caso se describe en el documento la necesidad de garantizar una envuelta en seco efectiva previa a la inyección del ligante de aportación y que dicho tiempo de envuelta deberá ser aprobado por la dirección de obra.

Dada la probada importancia que esta homogenización en seco tiene en el comportamiento mecánico de las mezclas resultantes, este artículo trata de proponer un procedimiento de optimización de tiempos de envuelta basado en parámetros cuantificables mediante en el ensayo Fénix de resistencia a la fisuración (NLT-383/20) que complementan las inspecciones visuales de marcado carácter cualitativo que se realizan en la actualidad, con el fin de dotar a la dirección de obra de una herramienta cuantitativa de evaluación y que ésta ayude simultáneamente al fabricante a optimizar los mencionados tiempos de envuelta con el menor impacto posible en la producción de las plantas con instalaciones de este tipo.

**Palabras Clave:** RAP, reutilización, durabilidad, transferencia de calor eficiente, mezclas bituminosas, evaluación cuantitativa, amasado en seco, tiempo de envuelta, parámetros de tracción, ensayo Fénix.

Due to the increasing social request, the consciousness-raising and the agreement of all the partners involved in the infrastructure sector, the reuse of reclaimed asphalt pavement (RAP) in the manufacture of new bituminous mixtures is crossing a period of thrust and renovation backed by the normative changes established by protocols, control procedures and performance level that a mixture must achieve to ensure an adequate durability.

As in all adaptation or regulation implementation, the accumulation of experience along the application

# Determinación de los tiempos óptimos de amasado en seco para mezclas bituminosas con reutilización de RAP en sistemas de incorporación sin precalentamiento

of it is defining some technical aspects that, in some cases, took on more importance with the advance in the technical development. As it is indicated in the OC 40/2017 section 22.7.1.3.2, it is necessary a required efficiency of the heat transfer and the homogeneous integration of all materials with the virgin aggregates in the manufacturing process of mixtures that contain RAP fed directly to the mixer. In this case, it is described in the document, the necessity to guarantee an effective dry coating previous to the addition of the virgin bitumen and the endorsement of these coating times by the project management. By reason of the proven importance of this dry homogenization has in the mechanical behaviour of the resultant mixtures, this article comes to propose a procedure to optimize the coating times based in traction parameters that complement the qualitative visual inspection, which are performed nowadays. In order to provide project management with a quantitative tool of evaluation and simultaneously the manufacturer to optimize such coating times with the fewer impact along the manufacturing process.

**Keywords:** RAP, reuse, durability, efficient heat transfer, bituminous mixtures, quantitative evaluation, dry mix, coating time, traction parameters, Fenix test.

## 1. INTRODUCCIÓN

El nivel de desempeño de una mezcla bituminosa reciclada en caliente está íntimamente relacionado con la homogeneidad de su composición, y ésta a su vez, responde en gran medida a la consecución de una óptima disgregación del material RAP (Reclaimed Asphalt Pavement) que se introduce en la nueva mezcla y del posterior grado de interacción alcanzado durante el proceso de fabricación entre los dos ligantes que participan en la mezcla; el ligante envejecido procedente del RAP y el ligante nuevo de aportación. El ligante resultante, fruto del correcto mezclado de los anteriores, regirá el comportamiento visco-elástico de la mezcla y por tanto su desempeño físico-mecánico. Esta homogeneidad de distribución de los componentes de los nódulos de material envejecido, que persigue deshacer los gránulos y repartirlos por toda la masa de la mezcla, depende de

factores como la temperatura de incorporación del RAP, el tiempo de contacto con el árido virgen y su temperatura, y de la eficacia de disgregación que proporciona el amasado previo a la inyección del nuevo ligante, lo que se conoce como amasado en seco. De lo expuesto con anterioridad puede deducirse que una óptima disgregación en esta primera fase, favorece una mayor superficie de contacto entre las partículas de RAP y el ligante nuevo y por tanto potencia un mayor grado de mezclado y combinación entre ambos ligantes, minimizando así la persistencia de gránulos de material envejecido que limitan la necesaria interacción entre betunes. La presencia de estos nódulos, conocidos en la bibliografía como black rock (o árido negro) resta contenido de ligante efectivo en el seno de la mezcla reciclada y es lógico pensar, debido a su estructura, que tienen una influencia negativa en la resistencia a la fisuración de las mezclas resultantes, y por tanto en su durabilidad.

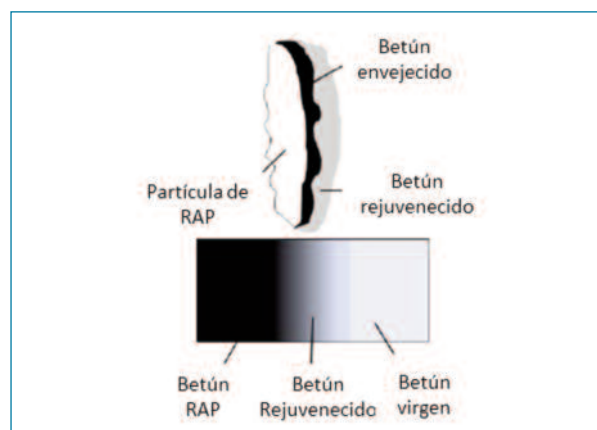
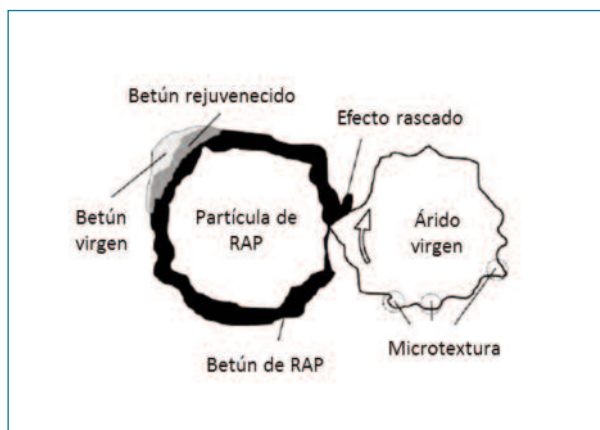


Figura 1. Mecanismo de disgregación mecánica y esquema de interacción de betunes en mezclas con RAP.

El presente estudio busca proponer un método para detectar mediante ensayos de laboratorio la presencia de éstas heterogeneidades en las mezclas recicladas fabricadas mediante instalaciones que utilizan la transferencia de calor del árido virgen en el mezclador como fuente de calentamiento del material fresado y asimismo busca establecer parámetros de ensayo para fijar los tiempos de amasado en seco que optimicen la eficacia de disgregación del RAP.

## 2. REFERENCIAS NORMATIVAS A LA EXIGENCIA DE HOMOGENEIDAD EN MEZCLAS RECICLADAS EN CALIENTE Y SEMICALIENTE

La orden circular 40/2017 del Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana sobre reciclado de firmes y pavimentos bituminosos es en la actualidad, normativa de referencia para la descripción y control de los procesos de reciclado en caliente y semicaliente en central de capas bituminosas. En el apartado 22.7.1 de la mencionada orden se establecen los protocolos exigibles para la fabricación de mezclas bituminosas recicladas y el tratamiento de sus componentes. En lo referente al presente estudio, que como se ha indicado se centra en las mezclas fabricadas en instalaciones en las que el RAP se incorpora al mezclador a temperatura ambiente, la normativa establece una serie de pautas para posibilitar una adecuada transferencia de calor de los áridos de aportación al material fresado y optimizar así su disgregación previa a la inyección de ligante de aportación (apdo. 22.7.1.3.2). En la orden circular se indica que se debe establecer un tiempo suficiente de envuelta en seco en el mezclador que sumado al amasado en húmedo (tras la inyección de ligante virgen) garanticen la eliminación de la humedad del RAP, la distribución homogénea del mismo en la masa de la mezcla y la integración de todos los componentes, asegurando la desaparición de los nódulos de RAP. Se indica igualmente que estos tiempos deben ser aprobados por el Director de las obras.

En buena lógica, estos tiempos deben ser superiores en todo caso a aquellos estándares que los fabricantes tienen fijados en sus plantas para las mezclas bituminosas convencionales, ya que la duración de ambos períodos

se debe adaptar para cubrir lo especificado en el pliego. A su vez, es razonable pensar que, al aumentar los porcentajes de RAP en la fabricación de mezclas recicladas en instalaciones de este tipo, estos tiempos aumenten de forma paralela y por tanto se pueda producir una afección en la capacidad de producción de la planta con el consiguiente impacto económico que ha de ser tomado en consideración. Por tanto desde ambos puntos de vista, de aseguramiento de la calidad y rendimiento económico adecuado, resultaría interesante contar con herramientas que permitan establecer estos tiempos en los procesos de fabricación de mezclas recicladas en caliente y semicaliente en central con mezclador discontinuo.

## 3. PROCEDIMIENTOS ACTUALES PARA LA DETERMINACIÓN DE LOS TIEMPOS DE AMASADO EN CENTRALES DISCONTINUAS

Existen descritos en la bibliografía numerosos procedimientos, todos ellos de elevada complejidad técnica, que permiten la evaluación del grado de interacción que se produce entre el ligante envejecido y el de aportación en la mezcla final en el seno de las mezclas bituminosas recicladas en central. Ejemplo de ello son diversas técnicas cromatográficas, de microscopía o de análisis de imagen llevadas a cabo sobre el ligante recuperado de las mezclas tras su fabricación. Debido a la mencionada complejidad, estas técnicas no son susceptibles de implementación ágil para que el fabricante pueda evaluar la bondad de los tiempos de amasado con el fin de asegurar lo descrito en los apartados anteriores.

Si nos ceñimos a la necesaria eficacia de disgregación de los nódulos de RAP, en la que juega un papel fundamental las condiciones de amasado en seco en planta, el método de control más extendido y que se ajusta, en buena medida, a la consecución de los objetivos propuestos, es el denominado método de la muestra en gris que consiste en observar el grado de reblandecimiento y de disgregación de los nódulos de RAP a través del nivel de envuelta conseguido durante el amasado en seco. Este procedimiento permite evaluar de forma cualitativa la eficacia del amasado en esta primera fase, ya que se puede observar como influyen la variación de tiempo de amasado, la temperatura del árido virgen e



## Determinación de los tiempos óptimos de amasado en seco para mezclas bituminosas con reutilización de RAP en sistemas de incorporación sin precalentamiento

incluso el nivel de llenado del mezclador en la distribución del betún envejecido sobre el total de la masa de mezcla antes de la inyección del ligante de aportación.

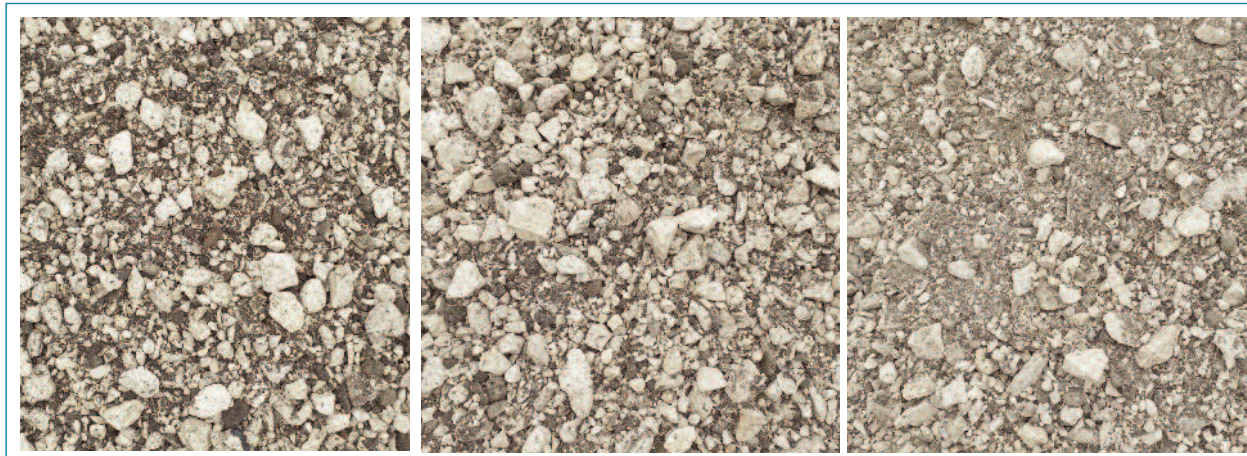


Figura 2. Ejemplo de evolución del grado de disgregación con el tiempo de amasado para una amasada en gris

Sin embargo entendemos que, debido a la importancia de los factores descritos, esta metodología debería ser complementada, en la medida de lo posible, por la determinación de algún parámetro de ensayo sobre la mezcla que pudiera ayudar a la hora de la toma de decisiones sobre los tiempos de amasado ya que, como se ha indicado, éstos influyen en la productividad de las centrales de fabricación además de hacerlo, claro está, en la calidad y durabilidad del producto.

### 4. BÚSQUEDA DE PARÁMETROS REPRESENTATIVOS. FUNDAMENTOS DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA

Recientes experiencias del Instituto de Ingeniería de la Universidad de Aachen en Alemania han tratado de evaluar, a nivel de laboratorio, la influencia de las condiciones de mezclado de las mezclas que incorporan RAP en la homogeneidad a escala macro de las mismas, utilizando para ello ensayos de rigidez multidireccionales. Los trabajos en este campo persiguen evaluar la homogeneidad de la mezcla final mediante la determinación de rigidez (ASTM D7369-20) sobre familias de mezclas fabricadas variando la temperatura de partida de la mezcla amasada en seco (RAP + árido virgen) y el tiempo de amasado en húmedo, tras la incorporación del betún virgen. Se obtienen de este modo gráficos como los de la

figura 3. La magnitud del módulo de rigidez se ve influenciada por el aumento de la difusión entre el betún envejecido y el nuevo, pero no es menos cierto que un

aumento del tiempo de amasado en húmedo también contribuye de forma decisiva en el envejecimiento del betún de aportación, lo que enmascara el primero de los efectos. Así, para salvar este enmascaramiento en estos trabajos se determina el coeficiente de variación obtenido para los ensayos de una misma familia con el fin de determinar el grado de homogeneidad de cada subgrupo. Con ello se elabora un mapa, que indica el grado de homogeneidad alcanzado según el coeficiente de variación obtenido con las mismas condiciones fijadas.

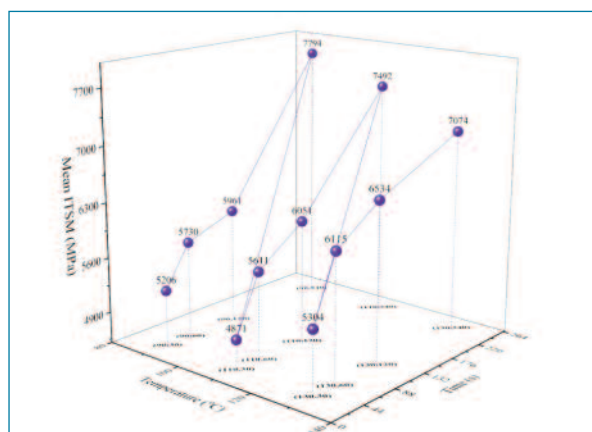


Figura 3. Gráfico de evolución del módulo de rigidez del estudio de homogeneidad de propiedades en mezclas recicladas de la Universidad de Aachen (Alemania)

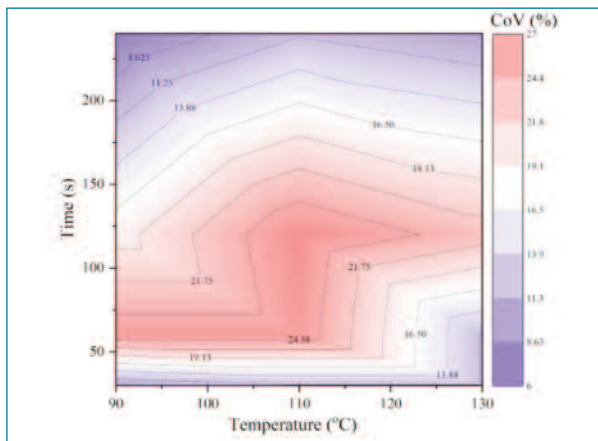


Figura 4. Mapa de homogeneidad de propiedades obtenido en el estudio de mezclas recicladas de la Universidad de Aachen (Alemania)

Por otro lado, los ensayos de tracción, y más concretamente, los ensayos de resistencia a la fisuración tipo Fénix (NLT-383/20) han demostrado suficiente sensibilidad para discernir entre los diversos grados de envejecimiento (o grados de penetración) de los betunes de pavimentación presentes en una mezcla cuando se ensayan mediante este procedimiento para determinar parámetros de curvas tensión-deformación. Aplicado a las mezclas que incluyen RAP, la Universidad Politécnica de Cataluña ha desarrollado numerosas experiencias para evaluar la influencia del tiempo de amasado y la temperatura en el comportamiento de las mezclas, llegando a poner de manifiesto la importancia de la temperatura del árido virgen o los cambios que produce en la ductilidad de la mezcla el mayor o menor grado de interacción entre el ligante envejecido y el aportado, al aumentar la temperatura a la que se incorpora el RAP.

Estas experiencias previas nos han llevado a tomar en consideración la viabilidad de utilizar parámetros de ensayo Fénix en la evaluación de los tiempos de amasado en seco para mezclas que incorporen RAP a temperatura ambiente. Basándonos en los trabajos anteriormente descritos, se plantearon las siguientes hipótesis de partida:

1) Parece viable detectar el grado de difusión entre los ligantes presentes en la mezcla (envejecido y aportado) a través del análisis de parámetros del ensayo Fénix de resistencia a la fisuración.

2) Si se fija la temperatura de calentamiento del árido virgen, la temperatura de adición del RAP (en las instalaciones objeto del presente trabajo es la temperatura ambiente) y el tiempo de amasado en húmedo de las mezclas, al mantener constante la contribución al envejecimiento del ligante final de la duración del mezclado en húmedo, se debería observar un comportamiento asintótico de ciertos parámetros Fénix al aumentar el tiempo de amasado en seco. Es decir, la optimización de la disgregación de los nódulos de RAP se debe alcanzar cuando no se observe mayor contribución del ligante envejecido por mucho que se aumente el tiempo de amasado en seco.

## 5. PROTOCOLO DEL ESTUDIO Y RESULTADOS OBTENIDOS

### 5.1. Central de fabricación. Mezclas estudiadas.

El presente estudio se ha realizado sobre mezclas fabricadas en central discontinua con adición de RAP directamente al mezclador. Concretamente, el estudio ha sido llevado a cabo con mezclas fabricadas en nuestras instalaciones de Aldaia en Valencia. Se trata de una planta INTRAME UM-160 que cuenta con un mezclador con capacidad de amasado de 2000 kg y 32 brazos con una velocidad de giro de 1500 rpm.

Las mezclas objeto de estudio han sido de tipo AC 22 BIN S y una mezcla tipo AC 16 SURF D con incorporación de un 20% de RAP, fabricadas con árido de naturaleza caliza y filler de recuperación.

### 5.2. Condiciones

El protocolo de fabricación ha consistido en la elaboración de amasadas de las mezclas descritas, variando el tiempo de amasado en seco desde los 5s a los 25s, y manteniendo constante un tiempo de amasado en húmedo de 40s. Las diferentes amasadas han sido fabricadas de forma consecutiva para cada tipo de mezcla con el fin de evitar diferencias significativas en la temperatura de calentamiento del árido virgen y a su vez asegurar una cierta homogeneidad en la composición del mate-

## Determinación de los tiempos óptimos de amasado en seco para mezclas bituminosas con reutilización de RAP en sistemas de incorporación sin precalentamiento

rial fresado aportado. Las probetas destinadas a los ensayos Fénix, se han fabricado mediante el procedimiento de impacto UNE EN 12697-30:2019 con 75 golpes por cara en nuestro laboratorio a pie de planta con el fin de evitar procesos de recalentamiento que pudieran interferir en la determinación de las magnitudes estudiadas. Tomando como referencia los estudios previos realizados por la UPC los parámetros valorados según se recoge en la NLT 383-20 han sido la energía de rotura (energía disipada) GD, la ductilidad medida como el desplazamiento post-pico al 50% de la carga máxima d50pm, a los que se ha añadido el indicador de rigidez a tracción IRT. Todos ellos se han determinado a la temperatura de 20°C.

### 5.3. Resultados obtenidos

Para cada una de las mezclas se ha llevado a cabo, con anterioridad a la experimentación, el análisis visual de las amasadas en gris tal y como se recoge en el apartado 3. Con las observaciones realizadas se establecieron los rangos de trabajo detallados en 5.2.

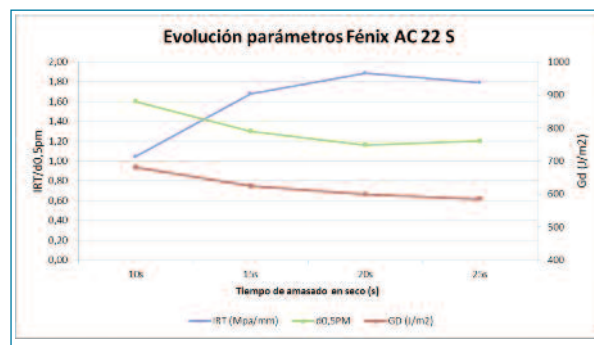
Para la mezcla AC 22 S se obtuvieron los siguientes datos:

Tiempo amasado en seco (s)	10s	15s	20s	25s
IRT (Mpa/mm)	1,05	1,68	1,89	1,79
GD(J/m <sup>2</sup> )	681	624	599	585
d <sub>0,5PM</sub>	1,60	1,30	1,16	1,20

**Tabla 1. Datos obtenidos mediante ensayo Fénix (NLT-383/20) para la AC 22 S RC20**

Se puede observar un aumento en el valor de índice de rigidez a tracción (IRT) y disminuciones tanto en la energía de rotura (GD) como en la ductilidad (d<sub>0,5PM</sub>) con el aumento del tiempo de amasado en seco. Esto es en principio compatible con la progresiva incorporación del betún envejecido del RAP al betún final al aumentar la eficacia de disgregación del mismo.

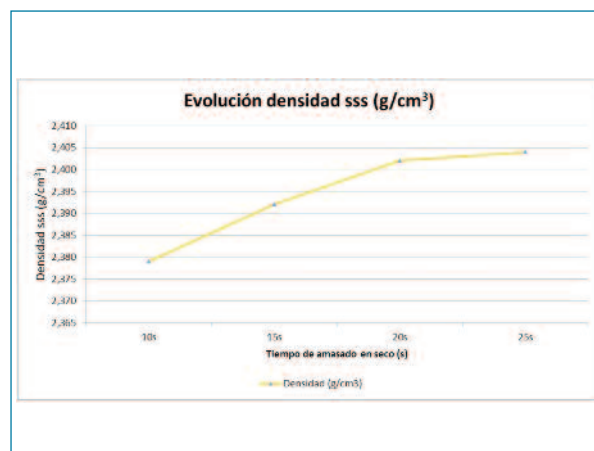
Gráficamente se obtiene:



**Figura 5. Evolución de parámetros Fénix con el tiempo de amasado en seco (s) para AC 22 S**

Se aprecia en la gráfica anterior cómo se produce un cierto comportamiento asintótico de los parámetros (o un cambio de tendencia en su evolución) a partir de los 20 segundos de amasado en seco. Estos resultados parecen apoyar la hipótesis de partida planteada, es decir, debería producirse una evolución de los parámetros mecánicos de la mezcla en paralelo a la mayor eficacia de disgregación de los nódulos de RAP hasta un valor determinado, en que la aportación de esta disgregación se mantuviera constante.

De forma paralela se ha observado un comportamiento similar en el valor de las densidades obtenidas para cada una de las familias de probetas fabricadas:



**Figura 6. Evolución de las densidades sss con el tiempo de amasado en seco (s) para AC 22 S**



Esto podría tener su base en un aumento del betún total disponible en el medio conforme se aumenta la eficacia de disgregación y que este hecho influyera en la compactabilidad de la mezcla final.

Cabe mencionar aquí que no se obtuvieron resultados reproducibles para los ensayos realizados con tiempo de amasado en seco de 5 segundos. Es más, a la vista de la figura 7, pudiera considerarse que las discontinuidades que aparecen en algunas de las curvas Fénix correspondientes al ensayo, pudieran estar relacionadas con la presencia de nódulos no disgregados de RAP. Esta suposición sería acorde a la aparición de estas mesetas de tensión a 20°C, que no se han producido para ningún otro tiempo de amasado.

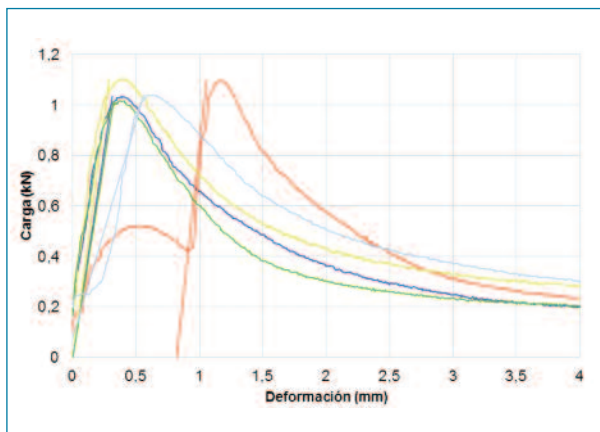


Figura 7. Curvas Fénix para un tiempo de amasado en seco de 5s para AC 22 S

Para la mezcla AC 16 D los datos obtenidos fueron los siguientes:

Tiempo amasado en seco (s)	10s	15s	20s	25s
IRT (Mpa/mm)	1,16	2,07	2,12	2,22
G <sub>D</sub> (J/m <sup>2</sup> )	670	555	447	515
d <sub>0,5PM</sub>	1,96	1,51	1,38	1,35

Tabla 2. Datos obtenidos mediante ensayo Fénix (NLT-383/20) para la AC 16 D RC20

En este caso el comportamiento asintótico parece alcanzarse a un tiempo algo menor. Gráficamente se observa:

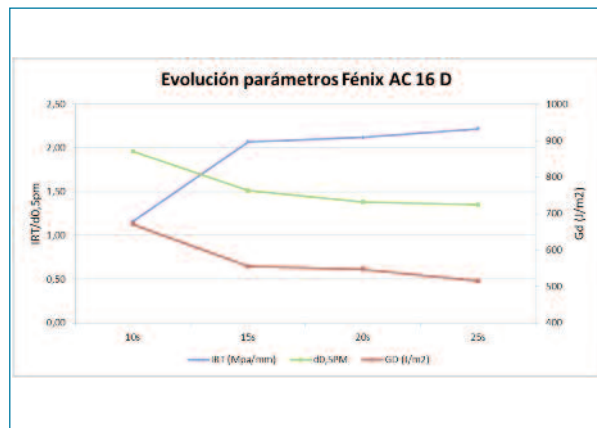


Figura 8. Evolución de parámetros Fénix con el tiempo de amasado en seco (s) para AC 16 D

El comportamiento de las densidades encontradas en las probetas fabricadas para el ensayo se refleja en el siguiente gráfico:

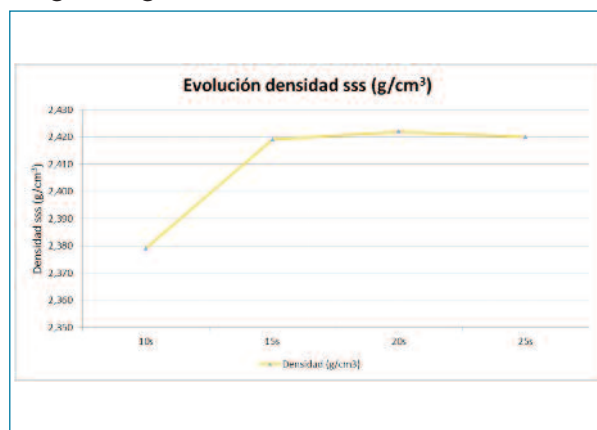


Figura 9. Evolución de las densidades sss con el tiempo de amasado en seco (s) para AC 16 D

A la vista de los resultados obtenidos parece evidente que los ensayos planteados arrojan diferencias significativas en función de los tiempos de amasado en seco planteados y que estas diferencias responden de forma adecuada a las hipótesis de partida del presente estudio. Es razonable pensar que los tiempos óptimos de amasado en seco para estas mezclas se situarían a partir de aquellos en los cuales las magnitudes estudiadas responden a un comportamiento asintótico y el aspecto de las amasadas en gris fuera suficientemente homogéneo. Con la finalidad de no sacrificar produc-

# Determinación de los tiempos óptimos de amasado en seco para mezclas bituminosas con reutilización de RAP en sistemas de incorporación sin precalentamiento

ción en la planta podría ser recomendable, para contar también con un margen adecuado de seguridad, que este óptimo se situara en la mitad del intervalo de tiempo entre los dos primeros puntos de comportamiento asintótico. Es decir, para las experiencias reflejadas en el presente trabajo, se situarían en 23 s y 17 s para la AC 22S y AC 16 D respectivamente.

No obstante, entendemos necesaria una investigación de mayor recorrido en el que se planteen estudios a diversos porcentajes de incorporación de RAP, para determinar, por ejemplo, el límite de sensibilidad del método o el peso de la influencia del tiempo de amasado en húmedo tras la adición del nuevo ligante, una vez se fija el tiempo de amasado en seco. Este mayor conocimiento del comportamiento de las mezclas recicladas en caliente en central mediante este sistema, entendemos redundaría en un mayor aseguramiento de su calidad y por tanto de su vida útil.

## 6. CONCLUSIONES

Este estudio ha tratado de ahondar en el conocimiento por parte del fabricante de sus procesos de fabricación de mezclas bituminosas recicladas en caliente en central. Se ha focalizado en las instalaciones que aportan el material fresado sin precalentamiento y directamente al mezclador, al estimar éstas como el primer estadio de acceso a la tecnología por parte de las empresas, debido a su menor coste de inversión.

De lo expuesto en el presente trabajo y en la bibliografía existente puede deducirse la importancia de los procesos y protocolos de fabricación en las características mecánicas y de durabilidad de los productos fabricados con esta tecnología. Para poner de manifiesto esta importancia se ha tratado de introducir parámetros cuantificables, basados en el ensayo Fénix de resistencia a la fisuración (NLT-383/20), para evaluar la bondad de dichos procedimientos. La estrategia se ha basado en la búsqueda de cambios de comportamiento significativos en los parámetros característicos de este ensayo en función del mayor o menor impacto de los procesos llevados a cabo durante la fabricación en la calidad de producto final.

Los resultados encontrados resultan prometedores

al reflejar vía datos las hipótesis planteadas para el control del proceso de amasado en seco. De forma paralela los valores absolutos obtenidos para los parámetros de ensayo Fénix sobre el producto final responden a los criterios y especificaciones para el diseño de mezclas AC publicados en los trabajos de la Universidad Politécnica de Catalunya para mezclas sin RAP, lo que nos sitúa en condiciones de asegurar que las mezclas fabricadas con una correcta aplicación de esta tecnología son equiparables a aquellas en propiedades mecánicas asociadas a la durabilidad.

## 7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Félix E. Pérez-Jiménez, Rodrigo Miró Recasens, Ramón Botella Nieto, Adriana H. Martínez Reguero, Marina Muñoz Oliver, José Amorós Parras. "Criterios y especificaciones para el uso del ensayo Fénix en el diseño de mezclas bituminosas tipo AC. IX Jornada Nacional de ASEFMA. 2014
- [2] NLT 383-20. "Evaluación de la resistencia, tenacidad y energía de rotura de las mezclas bituminosas mediante el ensayo Fénix"
- [3] Domingo Pérez Madrigal, Andrea Iannone, Adriana Martínez, Filippo Giustozzi. "Effect of mixing time and temperature on cracking resistance of bituminous mixtures containing reclaimed asphalt pavement material". *Journal of Materials in Civil Engineering/ Volume 29 Issue 8- August 2017*
- [4] Quan Liu and Markus Oeser. "The Influence of Mixing Conditions on the Macro-Scale Homogeneity of Asphalt Mixtures Blended with Reclaimed Asphalt Pavement (RAP)". *Materials 2021, 14,4137. <https://doi.org/10.3390/ma41154137>*
- [5] Jacinto Luis García Santiago. "¿Sabemos cuál es, realmente, el ligante que gobierna el comportamiento de una mezcla reciclada y en qué proporción lo hace?". *Revista Asfalto y Pavimentación. Número 36. Volumen X. Primer trimestre 2020.*