

INCORPORAÇÃO DE ELEVADAS TAXAS DE MISTURA BETUMINOSA FRESADA EM MISTURAS BETUMINOSAS

Vítor Antunes^{1,2}, Ana Cristina Freire² e José Neves³

¹ Instituto Superior Técnico da Universidade de Lisboa, Departamento de Engenharia Civil, Arquitectura e Georrecursos, Av. Rovisco Pais nº1, 1049-001 Lisboa, Lisboa, Portugal

email: vitorfsantunes@gmail.com

² Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Departamento de Transportes, Av. Do Brasil 101, 1700-066 Lisboa, Lisboa, Portugal

³ CERIS, Instituto Superior Técnico da Universidade de Lisboa, Departamento de Engenharia Civil, Arquitectura e Georrecursos, Av. Rovisco Pais nº1, 1049-001 Lisboa, Lisboa, Portugal

Sumário

Anualmente, as administrações rodoviárias destinam grandes orçamentos para a construção e manutenção de estradas, havendo, portanto, a necessidade de implementar práticas mais sustentáveis. As operações de manutenção produzem uma quantidade considerável de misturas betuminosas fresadas (RAP), trazendo a sua incorporação em novas misturas benefícios económicos e ambientais. Pretende-se apresentar uma revisão do conhecimento existente sobre a incorporação de RAP em misturas betuminosas e também avaliar o seu potencial de multi-reciclagem. O desempenho mecânico das misturas recicladas é afetado por variáveis intrínsecas, como a granulometria, teor em betume e propriedades volumétricas; assim como variáveis extrínsecas como é o caso dos métodos de incorporação do RAP, adição de rejuvenescedores e/ou betume com um menor valor de penetração.

Palavras-chave: RAP, economia circular de materiais, misturas betuminosas com reciclado, redução de custos, multi-reciclagem

1 INTRODUÇÃO

O setor da construção continua a ser um dos sectores que mais contribui para a produção anual de resíduos, representando cerca de 34% desta produção [1]. O sector das infraestruturas de transporte, em particular o que se dedica à construção de infraestruturas rodoviárias, apresenta uma contribuição significativa para esta percentagem. Os pavimentos flexíveis representam cerca de 80% da rede rodoviária Europeia, o que se traduz em cerca de 950 milhares de milhões de toneladas de mistura betuminosa que se encontram aplicados nesta rede [2]. De forma a manter a qualidade da infraestrutura rodoviária, anualmente, são alocados orçamentos muito avultados em operações de construção e manutenção de estradas. As ações de manutenção, nomeadamente quando é realizada uma renovação da camada de desgaste, produzem uma quantidade significativa de mistura betuminosa fresada (*Reclaimed Asphalt Pavement* - RAP). Este material é definido na norma Europeia EN 13108-8 como toda a mistura betuminosa obtida através da fresagem das camadas betuminosas existentes numa estrada, pela britagem de lajes ou pedaços de mistura betuminosa retiradas do pavimento e pelo excedente da produção de mistura betuminosa [3].

Vários estudos realizados desde a década de 70 têm demonstrado que o RAP pode ser reciclado e incorporado na produção de nova mistura betuminosa, sem que seja necessário reduzir a sua funcionalidade através da incorporação em camadas com menor exigência [2,4–8]. Esta capacidade ganha relevância quando se analisam as preocupações globais relacionadas com as questões ambientais e com a economia circular de materiais. A União Europeia (EU) por forma a promover um crescimento sustentável até 2020 tem definido políticas com foco na aplicação eficaz dos recursos e que têm por base uma economia de baixas emissões de carbono. Estas preocupações podem ser atingidas através da realização de um Eco-dimensionamento das soluções, o que vai além de uma mera reciclagem, podendo-se alcançar a multi-reciclagem dos materiais aplicados.

A multi-reciclagem expressa a capacidade dos materiais serem sujeitos a vários processos de reciclagem sem perderem as suas propriedades. Durante os processos de reciclagem podem ser realizadas algumas ações de

valorização, como por exemplo, ações de britagem e fracionamento no caso do RAP. Estas ações permitem que sejam garantidas as propriedades dos materiais e conseqüentemente que se tenha um maior controle na formulação da mistura betuminosa reciclada [4,9,10].

Misturas betuminosas que contenham RAP na sua constituição, geralmente, apresentam um incremento no módulo de deformabilidade, na resistência à fadiga e um decréscimo na sensibilidade à água. Contudo, estas misturas podem apresentar uma tendência para fendilhar quando sujeitas a baixas temperaturas [11–15].

A reciclagem de RAP, pela incorporação deste em misturas betuminosas, apresenta claros e inequívocos benefícios económicos e ambientais. As principais vantagens da incorporação deste material no ciclo de vida das misturas betuminosas são os seguintes: menor quantidade de emissões, redução da utilização de materiais virgens e conseqüente redução da sua exploração, redução dos custos de transporte e de operações associadas à exploração dos materiais virgens, menores consumos energéticos e conseqüente redução da utilização de combustíveis no transporte e ainda menor quantidade de materiais colocados em aterro.

Com este artigo pretende-se apresentar uma revisão do conhecimento sobre a reciclagem de RAP em mistura betuminosa em termos de materiais, percentagens de incorporação, desempenho e ganhos a nível económico e ambiental. Pretende-se promover a utilização deste material em aplicações de valor similar e, assim, maximizar a utilidade deste material, através da multi-reciclagem, contribuindo simultaneamente para uma economia circular de materiais. São ainda identificados os principais fatores responsáveis pelas diferentes conclusões obtidas na bibliografia quando são estudadas misturas com incorporação de RAP, assim como os principais desafios à reciclagem destes materiais em aplicações de valor similar.

2 REICLAGEM DO RAP EM MISTURAS BETUMINOSAS

2.1 Conceitos e importância

Diferentes definições de RAP podem ser encontradas nas especificações e normas dos diferentes países [3,4,7]. De uma forma geral, este material é obtido quando as camadas das misturas betuminosas presentes nos pavimentos são removidas no decorrer de ações de reabilitação, manutenção ou para acesso a infraestruturas enterradas. Este é um material com elevada qualidade, consistindo em agregado revestido por betume, que pode ser sujeito a ações de britagem e de fracionamento, por forma a cumprir com os requisitos de granulometria da mistura. Assim, o RAP pode ser processado e utilizado para substituir agregado e betume necessários à mistura, apresentando um valor acrescentado para a reciclagem.

A incorporação de RAP em mistura betuminosa introduz algumas variações nas respetivas propriedades. Os principais fatores que afetam o desempenho das misturas betuminosas com a incorporação de RAP são: o tipo de mistura (mistura betuminosa a quente, temperada ou a frio), a homogeneidade da mistura com o RAP, a homogeneidade do RAP, as técnicas de incorporação aplicadas, as taxas de incorporação e ainda a utilização de rejuvenescedor e o seu tipo.

A aplicação de RAP na produção de misturas betuminosas tem apresentado vários casos de sucessos ao longo da história. Outros materiais reciclados têm também sido utilizados nomeadamente escórias, borracha, fibras, vidro, noutros projetos ou mesmo em conjunto com RAP [4,12,13,15–18]. A utilização deste material tem crescido desde o primeiro registo datado de 1915, contudo apenas se tornou uma prática recorrente depois da década de 70, quando os preços do betume sofreram um aumento elevado em resultado da crise do petróleo em 1973 [4,5]. Nos Estados Unidos da América, em resposta ao embargo do fornecimento de produtos petrolíferos, foram desenvolvidas técnicas de reciclagem, de modo a reduzir a necessidade de ligantes betuminosos para a produção das misturas e, conseqüentemente reduzir os custos [4,19,20]. Muitas destas técnicas continuam a ser aplicadas nos dias de hoje; e a experiência desenvolvida durante os vários anos revelaram que as misturas betuminosas podem ser recicladas e incorporadas em novas misturas. Assim, as misturas betuminosas com incorporação de reciclado, que sejam corretamente formuladas, têm apresentado resultados similares a misturas betuminosas produzidas com materiais novos [2,19,21–25].

A incorporação de RAP em misturas betuminosas tem vindo a ganhar um maior suporte, nos últimos anos, dadas as políticas para a adoção de tecnologias verdes e mais sustentáveis. Assim, a reciclagem de mistura betuminosa é um passo na direção de soluções mais sustentáveis. Este aspeto ganha uma maior relevância quando se verifica que a produção de RAP voltou a crescer. Na Figura 1 é possível verificar as quantidades anuais de RAP

disponíveis em milhares toneladas entre 2001 e 2017 com base em dados de 23 países apresentados nas publicações da *European Asphalt Pavement Association* (EAPA). Neste gráfico é possível verificar o decréscimo da produção deste material, resultante da crise económica vivida durante os últimos anos, e que teve efeito sobre o sector da construção. Após o período de recessão vivida, a quantidade de RAP disponível apresenta uma tendência crescente nos últimos 4 anos, situação que se poderá manter, sendo de toda a importância uma adequada avaliação da reciclagem deste material, tendo em consideração os benefícios que pode apresentar.

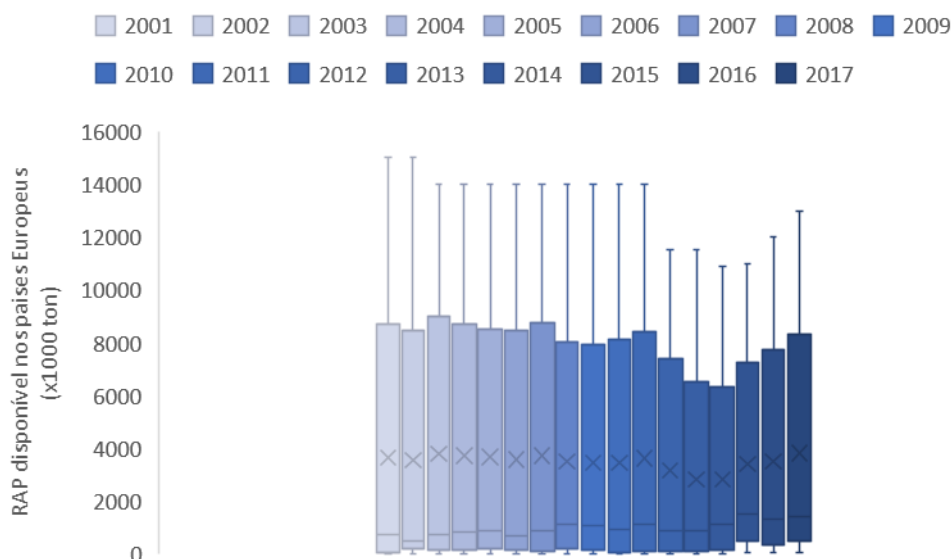


Figura 1 – Avaliação da quantidade de RAP disponível entre 2001 e 2017

2.2 Vantagens e desvantagens técnicas, ambientais e económicas

A incorporação de RAP em misturas betuminosas novas apresenta benefícios económicos e ambientais [5,26]. Os benefícios económicos estão associados à redução dos custos dos materiais, que resultam da redução da quantidade de agregados e betume novos necessários para a produção da mistura. Adicionalmente podem ainda ser associados a redução dos custos de transporte dos materiais novos, desde a sua origem até à central betuminosa. Os benefícios ambientais estão relacionados com a redução das emissões e do consumo de combustível necessário durante os processos de extração, transporte e processamento dos materiais novos, assim como a redução da necessidade de recursos não renováveis. Adicionalmente podem ainda ser consideradas a redução da quantidade de material transportada para aterro e consequente custos de transporte [5].

A EU tem vindo a desenvolver alguns guias e metas de forma a promover a reciclagem e o uso dos resíduos e subprodutos, incluindo o RAP. De acordo com a diretiva 2008/98/EC, os estados membros da EU devem tomar medidas por forma a promover a reutilização dos subprodutos, de forma a se obter uma reciclagem de alta qualidade. Desta forma, a utilização de RAP em novas misturas betuminosas, sem uma redução do nível de exigência da camada onde vai ser aplicado, promove a economia circular de materiais. A Comissão Europeia define que na economia circular de materiais o valor dos produtos é mantido pelo maior período possível. Assim, a quantidade de resíduos e a utilização de novos recursos são reduzidas e, quando um produto chega à fase de fim de vida este pode ser reutilizado ou reciclado, criando um valor acrescentado [2,27,28].

Os pavimentos rodoviários necessitam de manutenção regular. Entre os anos de 2008 e 2014, a produção de mistura betuminosa a quente e temperada rondou em média as 300 milhões de toneladas anuais, só na Europa, sendo que 7,2 milhões destas misturas foram produzidas em Portugal. Apenas esta última representa um custo anual de produção de aproximadamente 410 milhões de euros [6,29].

Dois estudos apresentam reduções de custos significativas e benefícios ambientais consideráveis quando são comparadas soluções com e sem incorporação de RAP. Nestes estudos são apresentadas reduções de custos que podem chegar aos 70% para taxas de incorporação de 100% [5,26]. Na Figura 2 são apresentadas as reduções em

termos de custos com o crescimento da taxa de incorporação, para o caso desta ser feita em mistura betuminosa a quente. Considerando apenas o caso de Portugal, a redução de custos poderia ascender a 290 milhões de euros anuais. Adicionalmente, obter-se-ia uma redução da necessidade de matéria prima que poderia variar entre as 3.4 e os 6.8 milhões de toneladas por ano para as taxas de incorporação de 50 % e 100 %, respetivamente.

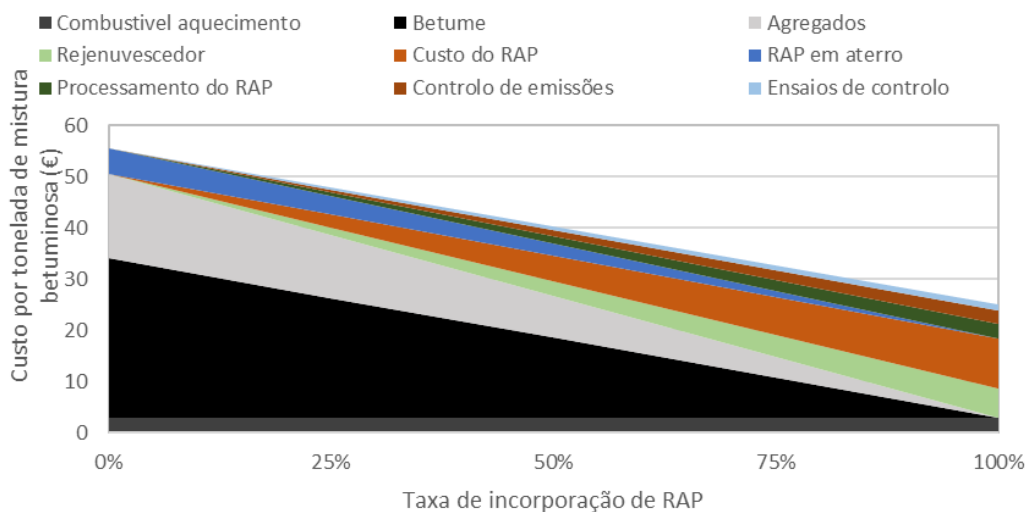


Figura 2 – Evolução do custo da mistura betuminosa com a taxa de incorporação de RAP (adaptado de [5])

Adicionalmente podem ser quantificados os ganhos em termos de redução das emissões e das necessidades energéticas. Como referido, a incorporação de RAP em misturas betuminosas reduz a necessidade de materiais virgens e, conseqüentemente, a energia e emissões associados a estes processos. Quando comparada uma mistura betuminosa a quente tradicional com uma mistura com uma taxa de incorporação de 100 % de RAP, aplicando 12 % de rejuvenescedor, são estimados valores de 35% de redução das emissões de dióxido de carbono equivalente e 20 % de redução das necessidades energéticas [5]. Contudo, apesar destes ganhos consideráveis, estes referem-se apenas à fase de construção ou manutenção. Caso seja considerado todo o ciclo de vida de um pavimento, considerando as emissões resultantes do tráfego, os ganhos perdem expressão. Ao se considerar as emissões de um veículo ligeiro de pequenas dimensões, cujas emissões médias são cerca de 122 g/km, numa viagem de 150 km o veículo emitirá o correspondente à quantidade de emissões reduzidas por cada tonelada de mistura. Desta forma, e apesar dos ganhos em termos de emissões, estes ganhos são secundários e não podem ser considerados como um fator decisivo para a adoção destas tecnologias.

Por outro lado, a incorporação de RAP em mistura betuminosa apresenta alguns desafios e problemas. As especificações e normas existentes podem ser consideradas como uma barreira à adoção de soluções com elevadas taxas de incorporação de agregados reciclados [17,30], dadas as limitações impostas às percentagens máximas de RAP a ser incorporadas. Outro problema é o preço sendo que em alguns países, os materiais naturais apresentam preços inferiores aos praticados para os agregados reciclados. Quando se associa este fator com a maior confiança existente nos agregados naturais conduz a soluções de misturas sem incorporação de RAP ou com uma taxa de incorporação mínima. A falta de confiança nos agregados deve-se à falta de resultados e à falta de aceitação, expressa nos cadernos de encargos, para a incorporação deste material, ou quando aceite, é apenas em pequenas percentagens. Adicionalmente é ainda de referir o problema das emissões de fumos quando é realizada a incorporação de RAP na mistura betuminosa a quente. Contudo, este problema pode ser resolvido através da aplicação de um sistema de filtragem, ou pela utilização de misturas com temperaturas mais baixas [5].

Em resumo, os principais desafios relacionados com a incorporação de RAP em mistura betuminosa referem-se ao custo, especificações e cadernos de encargos restritos, falta de confiança por parte dos empreiteiros e donos de obra e questões ambientais. Desta forma, é fundamental a realização de mais estudos para avaliar o

desempenho a longo prazo de soluções com elevadas taxas de incorporação de RAP. Nestes estudos deve ser tida em consideração a análise dos aspetos económicos, ambientais e sociais associados, assim como o desenvolvimento de modelos de previsão do comportamento deste tipo de soluções a longo prazo. Para aumentar a confiança e o grau de aceitação por parte dos empreiteiros e donos de obra, é necessário criar um suporte, transpondo a formulação de laboratório para a escala industrial sem causar grandes perturbações no funcionamento normal das empresas. Os custos associados à modernização/adaptação das centrais devem ser também avaliados, assim como determinado o período de retorno associado. Além disso devem ser contabilizadas as despesas adicionais por parte dos empreiteiros com a compra de ligantes não convencionais, a instalação dos respetivos tanques de armazenamento e despesas com ensaios por forma a caracterizar o RAP [4,10,17].

2.3 Experiência na reciclagem do RAP

Diferentes estudos têm sido realizados ao longo dos anos sobre a incorporação de RAP em mistura betuminosa nova, tendo sido obtidos resultados similares às misturas de referência produzidas com materiais virgens. Contudo, têm também sido obtidas algumas variações a estes resultados. A incorporação deste material em misturas betuminosas novas introduz algumas alterações no comportamento mecânico e físico. Com o aumento das taxas de incorporação de RAP verifica-se um aumento da variabilidade dos resultados obtidos nos diferentes ensaios laboratoriais. Estas variações são tanto maiores conforme menor for o controlo sobre a granulometria do RAP. Outro fator que ainda afeta a variabilidade dos resultados são as técnicas de introdução utilizadas para a incorporação do RAP. Quando o material é previamente aquecido os resultados apresentam uma menor variabilidade. Assim, o controlo sobre a granulometria do RAP assume uma maior importância. Desta forma o RAP deve ser fracionado e disposto por granulometria, garantindo-se um maior controlo sobre as propriedades volumétricas finais da mistura.

No que respeita ao módulo de rigidez de mistura, de um modo geral, tem se verificado que este normalmente apresenta um incremento com a taxa de incorporação de RAP. Contudo, quando se aplicam rejuvenescedores, de modo a recuperar as propriedades do ligante presente, e/ou um betume virgem de penetração nominal superior, podem-se obter módulos de rigidez inferiores ou iguais aos das misturas betuminosas de referência.

O aumento do módulo pode, contudo, estar associado a um comportamento quebradiço da mistura, o que faz com que esta apresente uma menor resistência à fadiga, assim como uma menor resistência ao fendilhamento quando sujeita a temperaturas mais baixas. Estes problemas podem também ser afetados pela aplicação de camadas mais finas de mistura betuminosa ou pela própria estrutura do pavimento. Em algumas misturas com RAP é possível verificar ainda que as leis de fadiga e os módulos são similares a misturas de alto módulo [11]. Como é possível verificar não existe um consenso sobre a utilização do RAP em misturas betuminosas, sendo que diferentes conclusões são obtidas no que diz respeito à resistência à fadiga.

Por outro lado, alguns estudos têm apresentado misturas com elevadas taxas de incorporação de RAP que apresentam módulos de rigidez mais baixos do que as misturas de referência produzidas com materiais virgens. Estas conclusões podem estar relacionadas com diversos fatores, entre os quais, um elevado teor em ligante, uma granulometria mais fina do que o esperado, um maior volume de vazios no esqueleto pétreo assim como um maior volume de vazios na mistura, assim como a presença de rejuvenescedor. Os três últimos fatores enunciados conduzem a misturas que apresentam menores módulos de rigidez e por consequência menor resistência [13–15].

Desta forma, a determinação das propriedades do RAP, entre as quais teor em ligante, propriedades do ligante envelhecido, granulometria do agregado recuperado são fundamentais para um maior controlo das misturas com elevada taxa de incorporação de RAP. Este controlo pode ser conseguido através da utilização de RAP fracionado, com as frações caracterizadas, de modo a ser possível avaliar as necessidades de ligante virgem assim como da utilização de rejuvenescedores. Além destas, as técnicas de incorporação do RAP na mistura apresentam também a maior importância para que seja possível se obter misturas com uma maior homogeneidade.

3 A MULTI-RECICLAGEM DO RAP

As misturas betuminosas possuem um ciclo de vida limitado, sendo após este período substituídas por novas misturas por forma a manter as condições necessárias à segurança e conforto dos utentes. Desta forma, vários milhares de milhões de euros são gastos anualmente em operações de construção, manutenção e reabilitação das estradas. Durante as operações de manutenção da infraestrutura rodoviária são produzidas quantidades consideráveis de RAP que pode ser reciclado em aplicações de valor similar, não sendo necessário a redução da sua funcionalidade. Desta forma, as misturas betuminosas que se encontram atualmente em serviço e que na sua constituição já tenham incorporado RAP, irão também atingir o seu fim de vida em serviço, necessitando de ser substituídas e recicladas. Assim, a capacidade da mistura betuminosa ser várias vezes recicladas deve ser adequadamente avaliada e apresenta a maior importância.

Um pavimento após um período em serviço de 10 a 15 anos, geralmente, necessita de sofrer ações de manutenção, entre as quais se podem destacar as ações de repavimentação. Estas compreendem a fresagem, pelo menos, da camada de desgaste e reposição da mesma. Uma mistura betuminosa aplicada numa camada de desgaste tem, portanto, uma vida útil curta, sendo esta ainda mais reduzida para os materiais que constituem uma mistura, dado se tratarem de materiais de fontes não renováveis. Contudo, e apesar de a camada atingir o seu fim de vida, os agregados e betume que a constituem podem apresentar maiores períodos de utilidade. Desta forma, a procura de soluções que vão além da reciclagem única destes materiais apresenta a maior importância. Assim, a multi-reciclagem destes materiais apresenta uma elevada importância, tendo em consideração as vantagens já apresentadas, e ainda o incremento da utilidade destes materiais, dado que permite serem incorporados mais do que uma vez no mesmo tipo de aplicação, o que permite contribuir para a economia circular de materiais.

A multi-reciclabilidade é a capacidade de os materiais serem sujeitos a vários processos de reciclagem sem perderem as suas propriedades, o que conduz a uma redução da quantidade de resíduos produzidos e da necessidade de levar materiais para aterro. Durante estes processos de reciclagem, pode ser necessário que ocorram algumas ações de valorização dos materiais. No que se refere às misturas betuminosas podem ser necessárias ações de fracionamento e de britagem, entre outras. Estas ações permitirão preservar as propriedades dos constituintes da mistura, e consequentemente, conseguir um maior controlo aquando da formulação das novas misturas com a incorporação do material reciclado [4,9,10].

Na Figura 3 é apresentado o ciclo de vida de uma mistura betuminosa considerando a multi-reciclagem do RAP. Apesar deste processo ser um ciclo quase fechado, de modo a prolongar ao máximo a utilidade dos materiais, pode-se considerar que este se inicia com uma Eco-formulação da mistura betuminosa. Esta formulação permitirá a incorporação de elevadas taxas de RAP na formulação da mistura, tendo em consideração as propriedades funcionais e mecânicas exigidas às misturas com materiais virgens. Por forma a se obter um melhor desempenho da mistura e tirar partido do ligante presente no RAP, podem ser incorporados rejuvenescedores, assim como um betume com um valor de penetração nominal mais elevado. Após esta formulação a mistura seguirá o ciclo corrente de uma mistura desde a sua produção até ao seu fim de vida (FdV). No FdV a camada de mistura betuminosa com RAP será fresada, sendo produzido RAP que voltará a entrar num novo processo de reciclagem e de Eco-formulação, devolvendo-se assim a utilidade ao material.



Figura 3 – Representação ilustrativa da multi-reciclagem

Diferentes fontes referem que as misturas betuminosas podem ser recicladas a 100 % e possuem o potencial para serem recicladas mais do que uma vez [2,7,31]. A economia circular de materiais inicia-se desde a fase de dimensionamento, no caso das misturas betuminosas, da sua formulação. Assim, através de uma formulação que permita incorporar elevadas quantidades de material fresado em misturas betuminosas novas, múltiplas vezes, permitirá estender o período de vida útil dos materiais, conduzindo a uma redução da necessidade de materiais virgens e consequentemente numa clara otimização dos recursos naturais, com ganhos económicos associados.

É possível verificar na bibliografia a intenção de alguns autores de promoverem a multi-reciclagem da mistura betuminosa, tendo-se verificado que esta apresenta este potencial. Nestes estudos foram realizadas diferentes abordagens: por um lado avaliar o efeito das múltiplas reciclagens na viscosidade do ligante, através da simulação laboratorial de vários ciclos de vida de uma mistura betuminosa [7]; por outro lado foi realizada a incorporação de material que sofreu mais do que um processo de reciclagem numa mistura betuminosa nova, sendo aplicadas diferentes taxas de incorporação, técnicas e rejuvenescedores [31,32].

No primeiro caso, foram realizados vários ciclos de envelhecimento sobre uma amostra de betume extraída de uma amostra de RAP, por forma a avaliar o comportamento do ligante quando sujeito aos vários processos de reciclagem. Os testes revelaram que não se verificaram aumentos significativos na viscosidade do betume após cada ciclo de envelhecimento, mostrando a capacidade do RAP ser sujeito a processos semelhantes.

No segundo caso, foi realizada a avaliação do desempenho de misturas betuminosas com incorporação de RAP que já tinha sido sujeito a mais do que um ciclo de reciclagem, sendo que num dos casos este RAP provinha de uma mistura que já havia estado em serviço e que na sua constituição já tinha RAP [31] e no outro o RAP foi produzido em laboratório, tendo sido a mistura betuminosa sido sujeita a ciclos de envelhecimento para simular o ciclo de vida da mistura [32]. Tanto num caso como no outro, as misturas com o RAP proveniente de multi-reciclagem apresentaram comportamentos similares às misturas de referência.

Os estudos indicam assim a viabilidade de aplicação da multi-reciclagem da mistura betuminosa. Contudo, o tópico da multi-reciclagem apresenta ainda várias lacunas no conhecimento, sendo para isso necessário corrigir alguns aspetos que não foram tidos em consideração nos diferentes estudos realizados. Desta forma, é necessário continuar a avaliar este tópico, para que sejam definidas metodologias e processos que venham a acrescentar valor ao conhecimento existente e que tragam suporte à indústria para a aplicação deste material reciclado.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As infraestruturas rodoviárias são vitais para o desenvolvimento das sociedades. O transporte rodoviário garante o transporte de pessoas e mercadorias, pelo menos em parte do seu trajeto, caso não seja na totalidade. A rede de estradas Europeia tem crescido com o decorrer dos anos, tendo sido, no entanto, a maioria das estradas construídas nos últimos 100 anos. Dada a densidade da rede existente, os sistemas de gestão de estradas têm vindo a alterar o seu paradigma da construção para a manutenção da rede existente. Desta forma, quantidades significativas de RAP têm vindo a ser produzidas e continuarão a ser produzidas ao longo dos anos.

O principal atributo das misturas betuminosas é poderem ser 100% recicladas sem perderem a sua funcionalidade. Assim, a incorporação deste material na produção de nova mistura betuminosa apresenta um dimensionamento focado numa aplicação *cradle-to-cradle*, o que promove uma economia circular de materiais. Este tipo de aplicação traduz-se em benefícios económicos, ambientais e sociais. A utilização do RAP apresenta, desta forma, um impacto considerável no que respeita à redução dos custos e das necessidades de materiais virgens para a produção de mistura betuminosa nova.

Nos últimos anos, diferentes estudos têm vindo a ser realizados por forma a avaliar a viabilidade de aplicação de RAP na produção de mistura betuminosa. Tendo sido avaliadas diferentes percentagens de incorporação, desde 10% a 100%, e aplicadas diferentes técnicas de incorporação e aditivos. De uma forma geral, a introdução de pequenas quantidades de RAP, até cerca de 15%, em mistura betuminosa a quente, não apresenta diferenças significativas em termos de desempenho quando comparada com uma mistura com materiais virgens. Por outro lado, quando são incorporadas maiores taxas de RAP verificam-se efeitos no desempenho da mistura, nomeadamente, em termos do aumento do módulo de rigidez, variações da resistência à fadiga e no fendilhamento a baixas temperaturas. Contudo, os diferentes desempenhos obtidos podem estar associados às diferentes variáveis da mistura.

É sabido que o comportamento da mistura com materiais reciclados, assim como da mistura tradicional, é afetado por variáveis intrínsecas e extrínsecas. As variáveis intrínsecas, como a granulometria, o teor em betume, e as propriedades volumétricas da mistura podem conduzir a diferentes comportamentos das misturas. Adicionalmente, as técnicas de incorporação de RAP, assim como a adição de rejuvenescedor e/ou de um betume com um grau de penetração mais elevado, para que seja obtida a viscosidade pretendida na mistura entre o betume presente no RAP com o betume novo, podem também afetar o comportamento da mistura com reciclado.

A incorporação de RAP em misturas betuminosas apresenta benefícios económicos e ambientais. Ao nível económico esta pode representar reduções de custo de até 70%. No que respeita aos benefícios ambientais, podem ser divididos em dois: uma redução da necessidade de exploração de recursos naturais e uma redução das emissões de gases com efeito estufa. Contudo, a incorporação destes materiais apresenta alguns desafios, nomeadamente no que respeita à confiança por parte da indústria e às restrições existentes nas especificações técnicas atualmente disponíveis. A falta de confiança é ainda reforçada pelo custo reduzido dos agregados naturais face aos custos dos agregados reciclados. Outro problema é a falta de suporte à indústria para adotar este tipo de soluções.

A multi-reciclagem de misturas betuminosas assim pode apresentar ganhos significativos, sendo possível prolongar o ciclo de vida dos materiais constituintes da mistura, e consequentemente, aumentar a sua utilidade. Este tópico pode trazer ganhos económicos e ambientais significativos dado que permite que os materiais continuem a ser utilizados por maiores períodos, diminuindo as necessidades de novos materiais e reduzindo a quantidade de resíduos produzidos. Os pavimentos que se encontram agora em serviço e que na sua composição já apresentem RAP irão atingir o seu fim de vida, tendo de ser depois também fresados e reciclados, sendo da maior importância compreender o comportamento a longo prazo da mistura, quando sujeita a vários ciclos de reciclagem.

5 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação para a Ciência e Tecnologia IP pelo financiamento fornecido através da Bolsa de Doutoramento SFRH/BD/114715/2016 financiada pelo Orçamento de Estado.

6 REFERÊNCIAS

- [1] Eurostat, Eurostat - Data Explorer, (2015). available: <http://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/show.do>. (accessed April 11, 2018).
- [2] EAPA, Asphalt the 100% recyclable construction product EAPA Position paper, Brussels, Belgium, 2014.
- [3] CEN, EN 13108-8: Bituminous mixtures - Material specifications - Part 8: Reclaimed asphalt, European Committee for Standardization, Brussels, Belgium, 2005.
- [4] R.C. West, QIP 129 - Best Practices for RAP and RAS Management, Lanham, USA, 2015.
- [5] M. Zaumanis, R.B. Mallick, R. Frank, 100% recycled hot mix asphalt: A review and analysis, *Resour. Conserv. Recycl.* 92 (2014) 230–245. doi:10.1016/j.resconrec.2014.07.007.
- [6] M. Dinis-Almeida, J. Castro-Gomes, M.L. Antunes, Mechanical Performance and Economic Evaluation of Warm Mix Recycling Asphalt, *Procedia - Soc. Behav. Sci.* 53 (2012) 286–296. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.09.881>.
- [7] L. Petho, E. Denneman, Maximising the Use of Reclaimed Asphalt Pavement in Asphalt Mix Design Field Validation. Austroads Research Report AP-R517-16, Sydney, Australia, 2016.
- [8] H.M.R.D. Silva, J.R.M. Oliveira, C.M.G. Jesus, Are totally recycled hot mix asphalts a sustainable alternative for road paving?, *Resour. Conserv. Recycl.* 60 (2012) 38–48. doi:10.1016/j.resconrec.2011.11.013.
- [9] J. Don Brock, L. Richmond, Technical Paper T-127. Milling and recycling, Chattanooga, USA, 2016.

- [10] Austroads, Maximising the Re-use of Reclaimed Asphalt Pavement Outcomes of Year Two : RAP Mix Design, 2015. www.austroads.com.au.
- [11] G. Valdés, F. Pérez-Jiménez, R. Miró, A. Martínez, R. Botella, Experimental study of recycled asphalt mixtures with high percentages of reclaimed asphalt pavement (RAP), *Constr. Build. Mater.* 25 (2011) 1289–1297. doi:10.1016/j.conbuildmat.2010.09.016.
- [12] V.H. Nguyen, Effects of laboratory mixing methods and RAP materials on performance of hot recycled asphalt mixtures [PhD Thesis], University of Nottingham, 2009. <http://etheses.nottingham.ac.uk/863/>.
- [13] W.S. Mogawer, A. Booshehrian, S. Vahidi, A.J. Austerman, Evaluating the effect of rejuvenators on the degree of blending and performance of high RAP, RAS, and RAP/RAS mixtures, *Road Mater. Pavement Des.* 14 (2013) 193–213. doi:10.1080/14680629.2013.812836.
- [14] R. Izaks, V. Haritonovs, I. Klasa, M. Zaumanis, Hot Mix Asphalt with High RAP Content, *Procedia Eng.* 114 (2015) 676–684. doi:10.1016/j.proeng.2015.08.009.
- [15] M. Elkashef, R.C. Williams, Improving fatigue and low temperature performance of 100% RAP mixtures using a soybean-derived rejuvenator, *Constr. Build. Mater.* 151 (2017) 345–352. doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.06.099.
- [16] W. Chesner, R. Collins, M. MacKay, J. Emery, User Guidelines for Waste and Byproduct Materials in Pavement Construction. FHWA-RD-97-148, Fed. Highw. Adm. Res. Technol. (2018). <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/structures/97148/rap132.cfm> (accessed August 14, 2018).
- [17] LNEC, LNEC E 472 - Guia para a reciclagem de misturas betuminosas a quente em central, (2009).
- [18] A.M.C. Baptista, Misturas betuminosas recicladas a quente em central - Contribuição para o seu estudo e aplicação [Tese de Doutoramento], Universidade de Coimbra, 2006.
- [19] I.L. Al-Qadi, Q. Aurangzeb, S.H. Carpenter, W.J. Pine, J. Trepanier, Impact of High RAP Content on Structural and Performance Properties of Asphalt Mixtures, (2012).
- [20] Y. Wang, The effects of using reclaimed asphalt pavements (RAP) on the long-term performance of asphalt concrete overlays, *Constr. Build. Mater.* 120 (2016) 335–348. doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.05.115.
- [21] I.L. Al-Qadi, S.H. Carpenter, G. Roberts, H. Ozer, Q. Aurangzeb, M. Elseifi, J. Trepanier, Determination of Usable Residual Asphalt Binder in RAP. Research Report ICT-09-031, Illinois, USA, 2009.
- [22] E. Bocci, A. Grilli, M. Bocci, V. Gomes, Recycling of high percentages of reclaimed asphalt using a bio-rejuvenator – a case study, in: Proc. 6th Eurasphalt Eurobitume Congr., 2016. doi:10.14311/EE.2016.334.
- [23] V. Gomes, M. Di Nolfo, P. Vlachos, M. Bocci, Two case studies with high levels of RA enabled by a rejuvenating agent, in: K. Suchý, J. Valentin, M. Southern, K. Carsten, H. Odelius, J.-P. Michaut, F. Cointe (Eds.), Proc. 6th Eurasphalt Eurobitume Congr. - 3rd June 2016, Czech Technical University in Prague, Prague, Czech Republic, 2016. doi:978-80-01-05962-3.
- [24] E. Hagos, M. Shirazi, A. Van De Wall, The development of 100 % RAP asphalt mixture with the use of innovative rejuvenator, in: K. Suchý, J. Valentin, M. Southern, C. Karcher, H. Odelius, J.-P. Michaut, F. Cointe (Eds.), Proc. 6th Eurasphalt Eurobitume Congr. - 3rd June 2016, Czech Technical University in Prague, Prague, Czech Republic, 2016. doi:dx.doi.org/10.14311/EE.2016.093.
- [25] F.C.G. Martinho, L.G. Picado-Santos, S.D. Capitão, Feasibility assessment of the use of recycled aggregates for asphalt mixtures, *Sustain.* 10 (2018). doi:10.3390/su10061737.
- [26] Y. Zhang, D. Goulias, A. Aydilek, Sustainability evaluation of pavements using recycled materials, in: A. Loizos, I. Al-Qadi, T. Scarpas (Eds.), Conf. 10th Int. Conf. Bear. Capacit. Roads, Railw. Airfields - BCRRRA 2017, CRC Press - Taylor & Francis Group, London, UK, 2017: pp. 1283–1291. doi:10.1201/9781315100333-185.
- [27] European Commission, Sustainability and circular economy - Circular economy, (2018).

https://ec.europa.eu/growth/industry/sustainability/circular-economy_en (accessed June 17, 2018).

- [28] F.E. Macarthur, Circular economy, *Circ. Econ. Syst. Diagr.* (2011). <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/circular-economy/infographic> (accessed October 22, 2018).
- [29] EAPA, Asphalt in figures 2014, European Asphalt Pavement Association, Brussels, Belgium, 2015.
- [30] EP, Caderno de Encargos Tipo Obra 14.03 - Pavimentação. Características dos materiais, (2012).
- [31] A. Pedraza, H. Di Benedetto, C. Sauzéat, S. Pouget, Linear viscoelastic behaviour of bituminous mixtures with multi-Recycled Asphalt Pavement, in: A. Loizos, I. Al-Qadi, T. Scarpas (Eds.), *Conf. 10th Int. Conf. Bear. Capacit. Roads, Railw. Airfields - BCRRA 2017*, CRC Press - Taylor & Francis Group, London, UK, 2017: pp. 201–208. doi:10.1201/9781315100333-30.
- [32] U. Heneash, Effect of the Repeated Recycling on Hot Mix Asphalt Properties [PhD Thesis], University of Nottingham, 2013.