

AVALIAÇÃO DA MULTI-RECICLAGEM DE MISTURAS BETUMINOSAS RECUPERADAS PARA INCORPORAÇÃO COM ELEVADAS TAXAS EM CAMADAS DE DESGASTE DE PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS

Vítor Antunes¹, José Neves² e Ana Cristina Freire³

¹CERIS, Universidade Lusófona de Humanidades e Tecnologias, Faculdade de Engenharia, Tel: 217515500 Campo Grande 376, 1749-024 Lisboa, Portugal email: vitor.antunes@ulusofona.pt <https://www.ulusofona.pt/feg>

²CERIS, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Departamento no Departamento de Engenharia Civil, Arquitectura e Georrecursos, Av. Rovisco Pais, 1049-001 Lisboa, Portugal

³Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Departamento de Transportes, Av. Do Brasil 101, 1700-066 Lisboa, Portugal

Sumário

O artigo apresenta os resultados de um estudo laboratorial que pretendeu avaliar a capacidade de multi-reciclagem de misturas betuminosas recuperadas considerando elevadas taxas de incorporação para camadas de desgaste (75%). De forma a avaliar o desempenho no ciclo vida, foram avaliadas misturas betuminosas considerando condições com e sem envelhecimento, através de processo de envelhecimento acelerado em laboratório. Posteriormente, as misturas betuminosas foram avaliadas em termos do seu comportamento mecânico. O estudo incluiu dois ciclos de reciclagem que permitiu concluir que as misturas betuminosas apresentaram em geral um desempenho melhor do que as misturas betuminosas produzidas apenas com materiais virgens.

Palavras-chave: Comportamento mecânico; economia circular; mistura betuminosa recuperada; multi-reciclagem; sustentabilidade

1. INTRODUÇÃO

A reciclagem de misturas betuminosas recuperada (MBR), vulgarmente designadas por misturas fresadas, é um procedimento comum em vários países para a aplicação em camadas ligadas de pavimentos rodoviários. Em países onde os agregados naturais de qualidade suficiente para aplicação em pavimentos rodoviários são escassos ou inexistentes, têm surgido a necessidade de aumentar a percentagem de incorporação de MBR até 100%, o que levará a uma redução dos custos incorridos pelas entidades gestoras da rede rodoviária para as ações de construção, manutenção e reabilitação de estradas [1–3]. A multi-reciclagem da MBR apresenta-se assim como avanço na direção da economia circular de materiais pela reutilização da MBR ao longo da vida das infraestruturas rodoviárias, sem que seja diminuída a sua funcionalidade [4,5]. Os benefícios económicos e ambientais da reciclagem de MBR em misturas betuminosas são bem conhecidos e têm sido demonstrados em vários estudos [1,6–9]. Contudo, a sua utilização tem enfrentado alguns desafios e barreiras que necessitam de ser superadas de forma a que a sua utilização passe a ser prática comum, assim como seja possível alargar a sua aplicação às diferentes camadas ligadas e a diferentes tipos de mistura betuminosa, considerando taxas de incorporação até 100%. Uma análise de ciclo de vida realizada a uma secção da rede rodoviária nacional, considerando diferentes taxas de incorporação de MBR em misturas betuminosas novas, demonstrou benefícios ambientais significativos quando se compararam as soluções que preconizaram diferentes taxas de incorporação de MBR com soluções onde apenas se utilizou materiais virgens.

Este artigo apresenta os resultados de um estudo laboratorial sobre a capacidade de multi-reciclagem de misturas betuminosas com elevadas taxas de incorporação de MBR (75%). De forma a avaliar o comportamento ao longo do ciclo de vida foi considerado a avaliação do comportamento de misturas betuminosas envelhecidas e não envelhecidas, considerando uma metodologia laboratorial de simulação de envelhecimento. Este trabalho tem assim como objetivo a avaliação da capacidade de multi-reciclagem da MBR em misturas betuminosas recicladas a quente. Para tal, foi produzido em laboratório um betão betuminoso com a máxima dimensão do agregado de 14 mm para camada de desgaste, utilizando uma MBR proveniente da manutenção e reabilitação de uma estrada da rede rodoviária nacional, onde foi substituída a camada de desgaste. Esta MBR foi também utilizada na produção de mistura betuminosa para camada de desgaste, aplicando-se assim uma abordagem de economia circular sem reduzir a funcionalidade do material. De forma a estudar a multi-reciclagem, a misturas betuminosa com 75% de MBR foi envelhecida em laboratório de forma a simular a vida de uma mistura betuminosa desde a produção até ao fim de vida e consequente reciclagem, sendo uma segunda vez reciclada. Em ambas as misturas betuminosas com MBR

foi utilizado rejuvenescedor de base biológica renovável (*Crude Tall Oil* – CTO) uma vez que resulta da produção de papel utilizando madeira de pinheiro. Este rejuvenescedor permitiu reduzir a viscosidade do betume proveniente da MBR, obtendo-se valores de penetração nominal e de temperatura de amolecimento próximas do betume de penetração nominal 35/50, sendo este o betume de referência. Foram assim realizados dois ciclos de reciclagem com incorporação de 75% de MBR para camada de desgaste. O estudo incidiu sobre a avaliação do desempenho mecânico.

2. MATERIAIS

A formulação das misturas betuminosas considerou a utilização dos seguintes materiais:

- Agregados naturais – Três frações de agregado basáltico com as granulometrias: 0/4 mm, 4/12 mm e 10/16 mm; uma fração de agregado calcário com a granulometria 0/4 mm; e filer comercial.
- Betume – Um betume tradicional de penetração nominal 35/50 de acordo com a norma EN 12591, com valor de penetração a 25 °C de 44×10^{-1} mm, temperatura de amolecimento de 54,6 °C e índice de penetração de -0,40.
- Mistura Betuminosa Recuperada (MBR) – A MBR utilizada no primeiro ciclo de reciclagem (75MBR1 e 75MBR1E) foi obtida durante a ação de manutenção e reabilitação de um pavimento rodoviário que preconizou a substituição da camada de desgaste. Esta MBR foi recolhida e a sua granulometria foi caracterizada de acordo com a norma EN 933-1. Seguidamente a MBR foi fracionada em laboratório sendo separada e armazenada em 3 frações, desde a mais fina até à mais grossa: fração fina com granulometria a variar entre 0 e 4,75 mm (MBR1 F), fração média com granulometria a variar entre 4,75 e 12,5 mm (MBR1 M) e fração grossa com granulometria a variar entre 12,5 e 19 mm (MBR1 G). Para o segundo ciclo de reciclagem foi utilizada uma MBR produzida em laboratório (MBR2). Esta MBR2 resultou da britagem de provetes envelhecidos da mistura com MBR1 do primeiro ciclo de reciclagem. Após a britagem a MBR2 foi igualmente fracionada como realizado para a MBR1, tendo sido igualmente dividida em três frações com granulometria semelhante (MBR2 F, MBR2 M e MBR2 G). Este procedimento visa a reproduzir de forma mais aproximada o que ocorre em verdadeira grandeza.
- Rejuvenescedor – Um produto de base biológica, subproduto da indústria de produção de papel através da madeira de pinheiro. Consiste em uma mistura de ácidos resínicos, ácidos gordos, ácido abiético e outros compostos pertencentes à mesma família química de agentes decapantes ou emulsificantes [10,11]. Este produto pode atuar como redutor de viscosidade, dispersante/ compatibilizador/remobilizador do betume envelhecido presente na MBR. Este rejuvenescedor tem apresentado bons resultados em outros estudos [12–15].

3. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

3.1. Protocolo de ensaio

Dado a repetibilidade do processo ao longo do estudo, uma vez que se pretendeu avaliar a capacidade de multi-reciclagem da MBR, foi fundamental definir um protocolo detalhado de ensaio. Assim, foi tomada como referência uma mistura betuminosa do tipo betão betuminoso para camada de desgaste com dimensão máxima do agregado 14 mm e um betume de penetração nominal 35/50 – AC14 surf BB 35/50. Para esta referência foram estudadas: uma mistura sem MBR produzida apenas com agregados virgens e betume tradicional de penetração nominal 35/50 (0MBR e 0MBRE); duas misturas com elevada taxa de incorporação de MBR, 75% por massa total de mistura, uma correspondente ao primeiro ciclo de reciclagem produzida com a MBR1 proveniente da ação de reabilitação da secção da rede rodoviária nacional (75MBR1 e 75MBR1E); e outra correspondente ao segundo ciclo de reciclagem produzida com a MBR2 proveniente da britagem dos provetes produzidos em laboratório da 75MBR1E (75MBR2 e 75MBR2E). Para as três misturas foram avaliadas condições sem envelhecimento (0MBR, 75MBR1 e 75MBR2) e com envelhecimento (0MBRE, 75MBR1E e 75MBR2E).

3.2. Caracterização dos materiais

Os agregados foram caracterizados de acordo com a norma EN 13043 que apresenta as propriedades limite e as normas de ensaio necessárias para a completa caracterização dos mesmos.

A MBR foi caracterizada através dos seguintes ensaios laboratoriais:

- A granulometria do agregado da MBR foi determinada de acordo com as normas EN 933-1 e EN 12697-2.

- O teor em betume foi determinado de acordo com a norma EN 12697-1.
- Os valores da penetração do betume recuperado e da temperatura de amolecimento foram determinados de acordo com as normas EN 1426 e EN 1427, respetivamente.

As propriedades do betume da MBR para o primeiro (MBR1) e segundo (MBR2) ciclo de reciclagem foram avaliadas utilizando as frações médias (MBR1 M e MBR2 M) e grossas (MBR1 G e MBR2 G), tendo sido o betume recuperado recorrendo ao método do evaporador rotativo de acordo com a norma EN 12697-3. O betume das frações mais finas (MBR1 F e MBR2 F) não foi avaliado devido ao elevado teor em material fino. Contudo, como a MBR apresentou a mesma origem, pode-se assumir que o betume das diferentes frações apresentou as mesmas características. As amostras de betume recuperado foram caracterizadas em termos da penetração e da temperatura de amolecimento.

3.3. Dosagem do rejuvenescedor

Para definir a dosagem de rejuvenescedor foram avaliadas diferentes percentagens de incorporação de rejuvenescedor sobre a massa de betume recuperado da MBR. O betume proveniente da MBR foi tratado com as percentagens de rejuvenescedor, de acordo com uma metodologia desenvolvida para o efeito, sendo definido como a percentagem ótima de rejuvenescedor aquela que permite que o betume proveniente da MBR, depois de tratado, apresente valores de penetração e temperatura de amolecimento semelhantes ao betume de referência para a mistura que pretende ser produzida. No caso deste estudo, assumiu-se como referência um betume tradicional de penetração nominal 35/50. Foram consideradas as percentagens de 4,5% e 5,0% sobre a massa total de betume proveniente da MBR para o primeiro e segundo ciclo de reciclagem, respetivamente.

3.4. Produção e envelhecimento da mistura betuminosa

A mistura betuminosa sem MBR foi produzida de acordo com a EN 12697-35. Para as misturas com MBR, o protocolo normativo foi modificado para incluir um tratamento prévio da MBR com o rejuvenescedor. A metodologia definida pretendeu simular a produção da mistura em central com pré-aquecimento da MBR e o tratamento com rejuvenescedor. O aquecimento da MBR a temperaturas mais baixas pretendeu evitar o envelhecimento adicional e consequente endurecimento do betume presente na MBR e a emissão de fumos azuis [1,9,16,17]. No caso de misturas com elevadas percentagens de incorporação de MBR, essas mudanças na metodologia atual têm impactos substanciais. Assim, as frações de MBR foram aquecidas a 130 °C por 2,5 h. Para atingir a temperatura de mistura para uma penetração nominal de 35/50, o agregado foi superaquecido a 205 °C por 4 h, 40 °C acima da temperatura de mistura recomendada. O betume virgem foi aquecido a 165°C por 3 h, conforme definido na norma. O procedimento de mistura para a mistura RAP foi o seguinte:

- 1) No recipiente de mistura, o rejuvenescedor foi espalhado sobre o RAP aquecido e misturado por 30 s.
- 2) Os agregados superaquecidos foram adicionados e misturados por mais 60 s.
- 3) O betume virgem foi adicionado e misturado por 90 s.
- 4) A mistura foi vertida no molde e compactada utilizando o compactador de rolo de acordo com a norma EN 12697-33.

Para avaliar o desempenho das misturas betuminosas a longo-prazo, o processo de envelhecimento foi simulado em laboratório. A metodologia consistiu no envelhecimento em estufa ventilada simulado para curto-prazo (STOA – *Short-Term Oven Ageing*) e longo-prazo (LTOA – *Long-term Oven Ageing*) de acordo com a norma AASHTO R30. Foram assim produzidos dois conjuntos de provetes: um envelhecido e outro não envelhecido.

3.5. Avaliação do desempenho das misturas betuminosas

O desempenho das misturas betuminosas foi avaliado em termos de propriedades mecânicas: módulo de deformabilidade e ângulo de fase, resistência à fadiga, determinação da sensibilidade à água e resistência à deformação permanente. O Quadro 1 apresenta as normas e condições de ensaio utilizadas. Os provetes foram compactados em moldes prismáticos (método do rolo compactador) e, posteriormente, cortados para obtenção de provetes prismáticos de menores dimensões, para os ensaios de determinação do módulo de deformabilidade e resistência à fadiga, e carotados para obtenção de provetes cilíndricos para o ensaio de sensibilidade à água.

Quadro 1. Métodos para a avaliação do comportamento mecânico

Norma/Procedimento	Condições de ensaio
Módulo de deformabilidade (EN12697-26)	<ul style="list-style-type: none"> Método: Ensaio de 4 pontos Temperatura: 20 °C Frequências: 0,1, 0,2, 0,3, 0,4, 0,5, 0,6, 0,7, 0,8, 0,9, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 15, 20, 25, 30, 1 e 0,1 Hz Deformação: 50 µm/m
Resistência à fadiga (EN 12697-24)	<ul style="list-style-type: none"> Método: Ensaio de 4 pontos Temperatura: 20 °C Frequência: 10 Hz Deformação: 200, 300 e 400 µm Critério de rotura: modulo de deformabilidade reduzir 50% do modulo inicial
Sensibilidade à água (EN 12697-12)	<ul style="list-style-type: none"> Método A: Resistência à tração indireta Temperatura: 15 °C Condicionamento dos provetes: 72 h (condições secas e molhadas)
Ensaio de pista (EN 12697-22)	<ul style="list-style-type: none"> Método: Equipamento de pequena dimensão; Procedimento B com condicionamento a ar Temperatura: 60 °C Condicionamento dos provetes: 6 h a 60 °C

4. DISCUSSÃO DE RESULTADOS

4.1. Composição e propriedades volumétricas da mistura betuminosa

O Quadro 2 mostra a composição e as propriedades das misturas betuminosas estudadas. As misturas betuminosas possuem as mesmas frações de agregados naturais e todas cumprem o teor mínimo total de betume de 4% definido no caderno de encargos para este tipo de mistura betuminosa.

As curvas granulométricas dos agregados das frações de MBR foram utilizadas para estabelecer a curva granulométrica das misturas betuminosas com 75% de MBR do primeiro e segundo ciclos de reciclagem. As curvas granulométricas, tanto para a mistura sem MBR como para a mistura com MBR, cumprem o fuso granulométrico estabelecido no caderno de encargos para este tipo de mistura [18,19].

Adicionalmente, assumiu-se que todo o betume proveniente da MBR foi mobilizado e misturado com o betume virgem [15,20]. Assim, foram consideradas as percentagens de 2,8% e 3,1% de betume proveniente da MBR para o primeiro ciclo e segundo ciclos de reciclagem, respetivamente.

A formulação da mistura betuminosa foi realizada pelo método Marshall de acordo com a norma EN 12697-34 tendo sido avaliadas as propriedades de estabilidade e deformação. No Quadro 2 são apresentados os valores médios para as propriedades volumétricas dos provetes das misturas betuminosas com e sem MBR: baridade máxima teórica (ρ_{mv}), baridade aparente (ρ_{bssd}), índice de vazios (V), vazios no agregado mineral (VMA), vazios preenchidos com betume (VFB) e relação fíler-betume (F/B).

Os teores totais de betume nas misturas betuminosas com MBR de primeiro e segundo ciclos de reciclagem foram, respetivamente, 0,7% e 0,5%, menores do que a mistura betuminosa sem MBR, apresentando uma influência direta no índice de vazios e VFB, sendo estes valores maiores e menores, respetivamente. Como os agregados provenientes da MBR já se encontravam cobertos por betume, então os fenómenos de adsorção e absorção do betume por parte do agregado já tinham ocorrido, justificando assim as menores necessidades de betume por parte destas misturas. Além disso, para as misturas betuminosas com MBR não foi necessário a adição de fíler, dado que estas já apresentam uma elevada percentagem de fração fina, o que também leva a que a necessidade de betume seja reduzida. No caso de terem sido considerados teores iguais de betume para todas as misturas betuminosas, iria levar a que no caso das misturas com MBR não estivesse a ser utilizado o teor ótimo em betume, o que afetaria o desempenho destas misturas. O fracionamento e o controlo das propriedades da MBR permitiram um maior controlo sobre as características finais das misturas com MBR.

As propriedades Marshall foram determinadas para as misturas betuminosas não envelhecidas: estabilidade, deformação e coeficiente (Quadro 2). A mistura do primeiro ciclo de reciclagem (75MBR1) apresentou a maior estabilidade seguida da mistura do segundo ciclo de reciclagem (75MBR2). A mistura 75MBR2 apresentou a maior deformação seguida pela mistura 75MBR1. Estes valores levaram a que a mistura 75MBR1 apresenta-se o maior coeficiente Marshall, seguida da mistura 75MBR2 e da mistura sem MBR (0MBR) apresentando ambas o mesmo

valor para este coeficiente. Em geral, os resultados atenderam aos valores limite definidos para este tipo de mistura betuminosa [18,19]. No entanto, a mistura com MBR reciclada uma vez apresentou um valor de estabilidade igual ao limite máximo definido para agregados do tipo granitoide. Uma vez que não era conhecida a origem dos agregados provenientes da MBR, este valor superior foi assumido.

Quadro 2. Composição e propriedades das misturas betuminosas

Composição/propriedades		0MBR 0MBRE	75MBR1 75MBR1E	75MBR2 75MBR2E	Valores limite
Betume	35/50 (%)	5	1,5	1,4	-
	RAP (%)	0	2,8	3,1	-
	Percentagem total %	5	4,3	4,5	4
Rejuvenescedor (% de betume da RAP)	CTO	0	4,5	5,0	-
	VMA (%)	15,5	14,2	15	Min 14
	VFB (%)	79,5	76,1	76,4	-
	Índice de vazios (%)	3,2	3,4	3,5	3-5
	Estabilidade Marshall (kN)	14,8	21,0	16,7	7.5-15/21
	Deformação Marshall (mm)	3,0	3,2	3,4	2-4
	Coefficiente Marshall (kN/mm)	4,9	6,6	4,9	Min 3
	ρ_{bssd} (Mg/m ³)	2,56	2,61	2,62	-
	ρ_{mv} (Mg/m ³)	2,64	2,69	2,71	-
	F/B ()	1,4	1,8	1,8	-

4.2. Avaliação do comportamento mecânico

4.2.1. Módulo de deformabilidade e ângulo de fase

A Fig. 1a) apresenta o módulo de deformabilidade e a Fig. 1b) o ângulo de fase das misturas betuminosas. Contrariamente ao que era expectável, a mistura com MBR do segundo ciclo de reciclagem apresentou uma diminuição do módulo de deformabilidade de 23% e 42% quando comparada com a mistura sem MBR (0MBR) e com a mistura com MBR do primeiro ciclo de reciclagem (75MBR1), respetivamente, considerando todas em condições não envelhecidas. O segundo ciclo de reciclagem não revelou assim o aumento contínuo do módulo de deformabilidade, o que contribui para a viabilidade da aplicação de multi-reciclagem. A incorporação de 5% de rejuvenescedor na MBR multi-reciclada levou a que fosse possível obter uma mistura betuminosa com menor módulo de deformabilidade, inclusivamente quando comparada com uma mistura produzida apenas com materiais novos. Estes resultados apresentam uma inversão quando comparados com os resultados obtidos para a estabilidade Marshall, tendo a mistura sem MBR apresenta um valor de estabilidade 13% inferior do que a mistura com MBR do segundo ciclo de reciclagem.

A metodologia de envelhecimento laboratorial afetou significativamente o módulo de deformabilidade das misturas betuminosas, tendo conduzido a aumentos de 13,5% para a mistura sem MBR, 31,9% para a mistura com MBR do primeiro ciclo de reciclagem e 49,7% para a mistura com MBR do segundo ciclo de reciclagem. Estes resultados confirmam, que as misturas com MBR apresentaram uma maior suscetibilidade aos efeitos do envelhecimento, quando é analisado o módulo de deformabilidade. No entanto, a mistura com MBR do segundo ciclo de reciclagem envelhecida apresentou um módulo de deformabilidade médio 15,9% superior à mistura sem MBR não envelhecida, sendo que para frequências mais elevadas a primeira mistura apresentou módulos de deformabilidade inferiores.

Em termos de ângulo de fase, a mistura betuminosa com MBR de segundo ciclo de reciclagem não envelhecida (75MBR2) apresentou um aumento médio de 1,1% quando comparada com a mistura sem MBR não envelhecida (0MBR). Isto pode significar que a multi-reciclagem da MBR não teve efeito direto no endurecimento do mástique betuminoso da mistura. A utilização de uma dosagem ótima de rejuvenescedor permitiu obter mástiques betuminosos com comportamento semelhante às misturas produzidas apenas com materiais virgens. A mistura betuminosa com MBR do segundo ciclo de reciclagem não envelhecida (75MBR2) apresentou um ângulo de fase médio 41,3 % superior à mistura com MBR do primeiro ciclo de reciclagem sem envelhecimento, o que indica a capacidade do betume envelhecido proveniente da MBR ser rejuvenescido e consequentemente multi-reciclado.

A metodologia de envelhecimento laboratorial contribuiu na generalidade para o endurecimento das misturas betuminosas levando a uma diminuição do ângulo de fase em 3,9% para a mistura sem MBR, 25,7% para a mistura com MBR do primeiro ciclo de reciclagem e 25,4% da mistura com MBR do segundo ciclo de reciclagem, quando

as misturas betuminosas envelhecidas e não envelhecidas são comparadas.

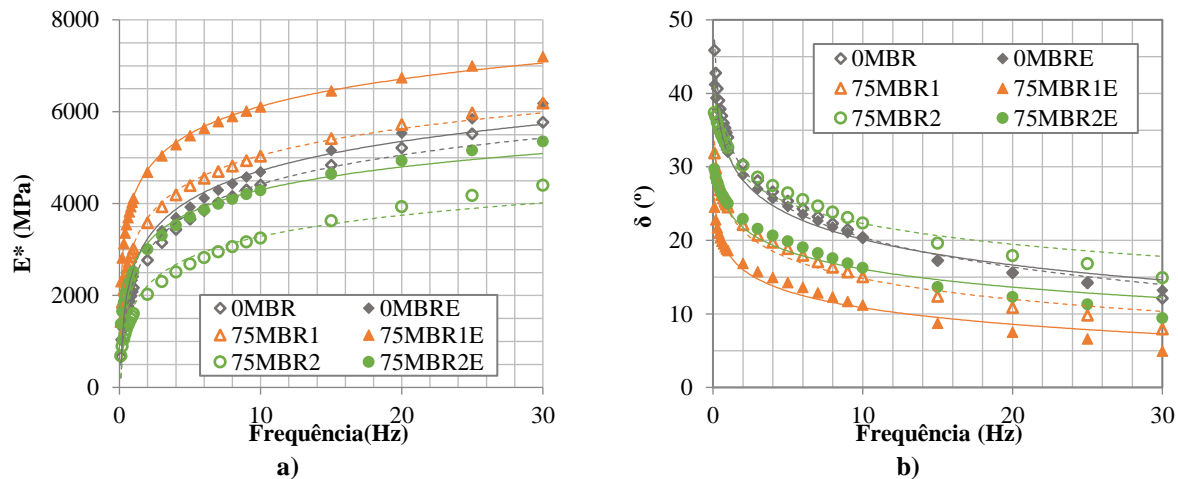


Fig. 1. a) Módulo de deformabilidade; b) ângulo de fase

4.2.2. Resistência à fadiga

O Quadro 3 apresenta os coeficientes das leis de fadiga ($\epsilon = a \times N^b$) obtidos para três níveis de deformações impostas 200 μm , 300 μm e 400 μm . A análise da resistência à fadiga pode ser baseada: (1) nas curvas das leis de fadiga; ou (2) nas extensões críticas de rotura - ϵ_4 , ϵ_5 and ϵ_6 – que correspondem a 10^4 , 10^5 e 10^6 ciclos de aplicação de carga, respetivamente. O parâmetro ϵ_6 é normalmente utilizado como limite de desempenho em fadiga para as misturas betuminosas. A mistura betuminosa com MBR do segundo ciclo de reciclagem não envelhecida apresentou um aumento de 37% e 35% quando comparada com a mistura sem MBR não envelhecida e a mistura com MBR do primeiro ciclo de reciclagem, respetivamente. Este valor mais elevado de ϵ_6 revela que a mistura com MBR do segundo ciclo de reciclagem tem maior resistência à fadiga. O menor módulo de deformabilidade desta mistura conferiu uma maior capacidade de resistência à fadiga, o que demonstra que a multi-reciclagem não comprometeu esta propriedade.

Em condições envelhecidas, a mistura com MBR do segundo ciclo de reciclagem apresentou extensões críticas de rotura semelhantes às outras misturas (OMBR e 75MBR1E). Apesar dos ciclos de reciclagem e do processo de envelhecimento em laboratório, a mistura com MBR do segundo ciclo de reciclagem apresentou bom desempenho a longo prazo, o que indica resultados promissores para misturas betuminosas multi-recicladadas.

Quadro 3. Coeficientes experimentais das leis de fadiga

Mistura betuminosa	<i>a</i>	<i>b</i>	R ²
OMBR	3151,28	-0,21	0,96
OMBRE	1831,03	-0,17	0,91
75MBR1	3408,09	-0,22	0,89
75MBR1E	1937,78	-0,18	0,89
75MBR2	2393,06	-0,17	0,97
75MBR2E	3418,03	-0,22	0,96

A Fig. 3 apresenta a sensibilidade à água avaliada pelo método do ITSR, assim como as resistências à tração indireta em condições secas (ITS_d) e húmidas (ITS_w). As misturas com MBR apresentaram um bom desempenho apresentando um valor de ITSR superior a 80% (ITS_{80}), sendo este um valor de referência mínimo [21]. As misturas com MBR apresentaram uma baixa sensibilidade aos efeitos da água, apresentando resistência à ação nociva da água. A mistura com MBR do segundo ciclo de reciclagem envelhecida apresentou o valor mais elevado ($ITS_{80}=98\%$), seguida pela mistura com MBR de segundo ciclo de reciclagem não envelhecida e a mistura com MBR de primeiro ciclo de reciclagem não envelhecida, ambas apresentando o valor de 96%. Foi possível observar que o processo de multi-reciclagem não afetou a sensibilidade à água das misturas. Adicionalmente, a mistura com MBR do primeiro ciclo de reciclagem apresentou um aumento de 20% tanto na resistência à tração indireta em condições secas e molhadas. As misturas com MBR do primeiro ciclo de reciclagem, envelhecida e não envelhecida, apresentaram valores baixa sensibilidade à água, associada a maiores resistências à tração indireta, o que está de acordo com os maiores valores de estabilidade Marshall e maiores módulos de deformabilidade. As misturas com MBR do segundo ciclo de reciclagem, em condições envelhecidas e não envelhecidas, apresentaram menores resistências à tração indireta quando comparadas com as misturas sem MBR envelhecidas e não envelhecidas,

respetivamente. Este comportamento indica a capacidade da mistura betuminosa de regenerar e recuperar as suas propriedades, nomeadamente ao nível do betume, conferindo à mistura betuminosa um comportamento com menor rigidez.

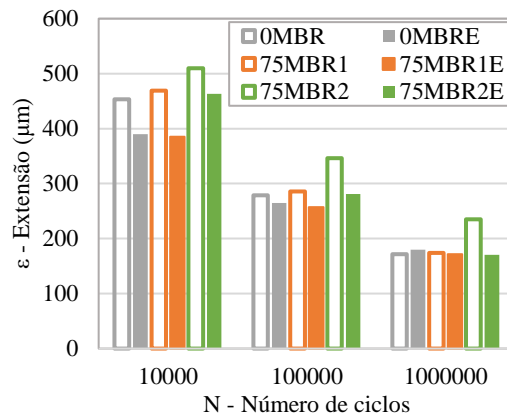


Fig. 2. Extensões de rotura em função do número de aplicação de cargas 10^4 , 10^5 e 10^6

O envelhecimento não afetou o desempenho da mistura betuminosa sem MBR, mas diminuiu o valor de ITSR da mistura com MBR de primeiro ciclo de reciclagem em 6%, tendo apresentado um valor de ITSR de 90%, que evidencia uma boa resistência aos efeitos da água. Por outro lado, o envelhecimento aumentou o valor de ITSR em 2% no caso da mistura com MBR após dois ciclos de reciclagem. No caso da mistura betuminosa do primeiro ciclo de reciclagem, a redução do valor do ITSR pode estar correlacionado com valores mais elevados de resistência à tração indireta, tanto na condição molhada como na condição seca. Em geral, o envelhecimento levou a um aumento de ambas as resistências à tração indireta, sendo que no caso da mistura sem MBR os aumentos foram de 8% e 7%. Na mistura com MBR do primeiro ciclo de reciclagem, os incrementos foram de 24% e 17% e na mistura com MBR do segundo ciclo de reciclagem os aumentos foram de 9% e 12%, em ambos os casos para ITS_d e ITS_w , respetivamente.

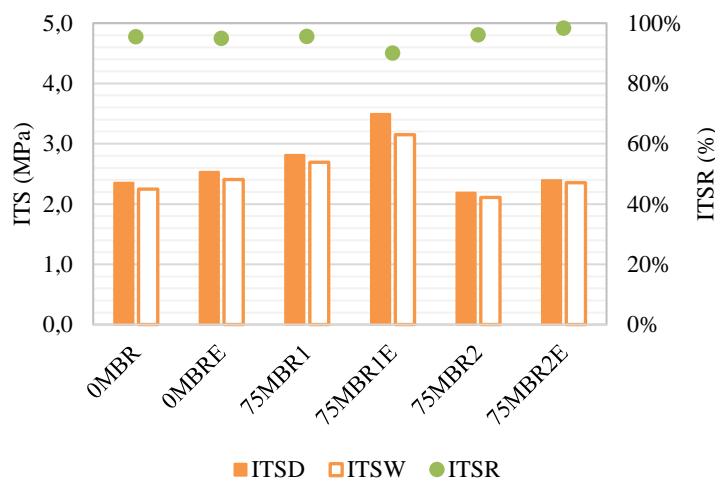


Fig. 3. Sensibilidade à água

4.2.3. Resistência à deformação permanente

A Fig. 4a) apresenta as curvas de evolução da deformação obtidas durante o ensaio de pista. Em termos do valor médio de profundidade de rodeira (RD_{AIR}), as misturas betuminosas podem ser classificadas do maior para o menor valor da seguinte forma: 5,9 mm, 3,4 mm, 2,3 mm, 2,0 mm, 1,9 mm e 1,6 mm, que correspondem respetivamente a: mistura sem MBR não envelhecida (0MBR), mistura sem MBR envelhecida (0MBRE), mistura com MBR do segundo ciclo de reciclagem não envelhecida (75MBR2), mistura com MBR do primeiro ciclo de reciclagem não envelhecida (75MBR1), mistura com MBR do segundo ciclo de reciclagem envelhecida (75MBR2E) e mistura com MBR do primeiro ciclo de reciclagem envelhecida (75MBR1E). Na Fig. 4b) são apresentados os resultados do declive da tangente (WTS_{AIR}) e da média da profundidade proporcional de rodeira (PRD_{AIR}). A mistura com MBR de segundo ciclo de reciclagem não envelhecida apresentou diminuições de 62%, 83% e 61% quando comparada com a mistura sem MBR não envelhecida e um aumento de 12%, 81% e 14% quando comparada com a mistura com MBR do primeiro ciclo de reciclagem, em termos de RD_{AIR} , WTS_{AIR} e PRD_{AIR} , respetivamente. Este

comportamento demonstrou uma efetiva contribuição da MBR para o aumento da resistência à deformação permanente. Além disso, é possível observar que a mistura do segundo ciclo de reciclagem não apresentou uma tendência decrescente ao longo dos ciclos de reciclagem, o que pode mostrar a capacidade de recuperação das propriedades da mistura betuminosa, apresentando a mistura de segundo ciclo um comportamento com menor rigidez. As resistências desenvolvidas por ambas as misturas betuminosas com MBR podem estar relacionadas tanto com o esqueleto pétreo, sendo este mais fino, o que contribui para o aumento do número de contactos entre as partículas, assim como com a presença do mastique betuminoso envelhecido proveniente da MBR.

O envelhecimento apresentou um claro efeito na resistência à deformação permanente observado quando se procede à comparação das misturas betuminosas envelhecidas com as não envelhecidas em termos dos parâmetros RD_{AIR} , WTS_{AIR} e PRD_{AIR} , respetivamente: a mistura sem MBR apresentou reduções de 43%, 71% e 42%; a mistura com MBR do primeiro ciclo de reciclagem apresentou reduções de 20%, 3,7% e 19% e a mistura com MBR do segundo ciclo de reciclagem apresentou reduções de 17%, 31% e 19%. Considera-se que estas reduções para os parâmetros em análise podem estar fortemente correlacionadas com o envelhecimento do mastique betuminoso que ocorreu a curto e longo prazo.

O gráfico da Fig. 4a) mostra que ambas as misturas betuminosas com MBR apresentaram uma tendência para a estabilização num valor limite, enquanto que a mistura sem MBR não envelhecida não apresentou essa tendência pois ocorreu sempre um aumento contínuo do valor da profundidade máxima da rodeira. A mistura com MBR do primeiro ciclo de reciclagem envelhecida foi a que apresentou o melhor resultado para os 3 parâmetros.

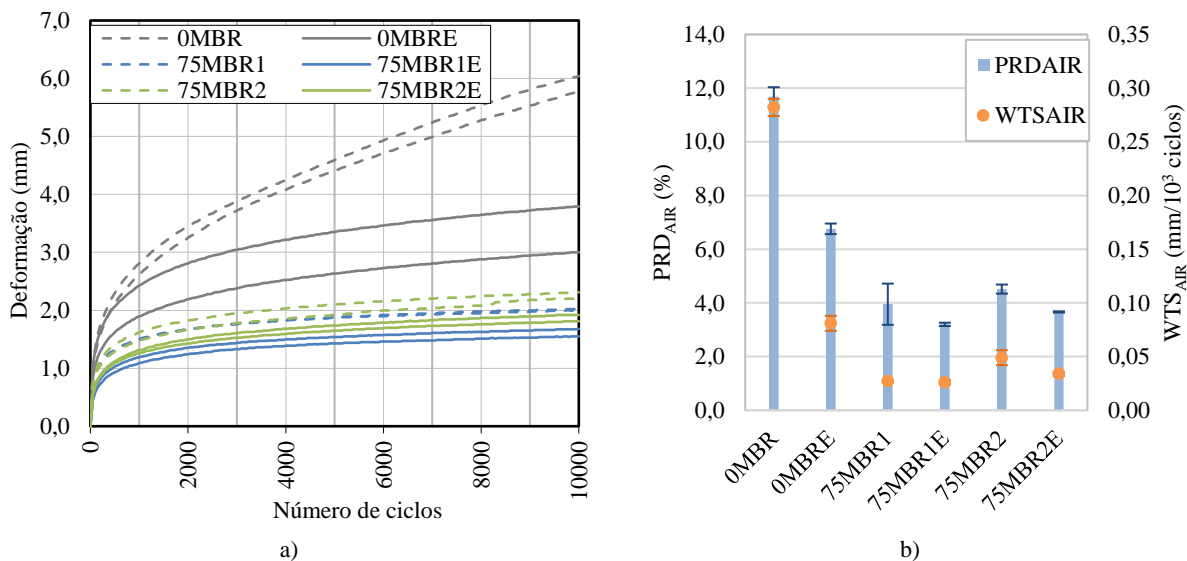


Fig. 4. Resistência à deformação permanente: a) curvas de deformação permanente do ensaio de pista; b) WTS_{AIR} e PRD_{AIR}

5. CONCLUSÕES

Neste artigo pretendeu-se apresentar uma parte de um estudo de investigação sobre o desempenho de misturas com MBR multi-recicladas com elevadas taxas de incorporação de MBR (75%) durante toda a vida de uma mistura betuminosa desde a sua produção até ao fim de vida (incluindo o processo de envelhecimento) e considerando dois ciclos de reciclagem. Para avaliação do desempenho foram estudadas três misturas betuminosas na condição não envelhecida e envelhecida. A mistura sem MBR foi produzida utilizando agregados naturais e betume tradicional de penetração nominal 35/50 (0MBR e 0MBRE). A mistura com MBR de primeiro ciclo de reciclagem (75MBR1 e 75MBR1E) foi produzida com 75% de MBR1 proveniente da reabilitação de uma estrada de rede rodoviária nacional, um rejuvenescedor do tipo *crude tall oil*, agregados naturais e betume tradicional de penetração nominal 35/50. A mistura com MBR de segundo ciclo de reciclagem (75MBR2 e 75MBR2E) foi produzida em laboratório por meio da britagem de provetes envelhecidos da mistura betuminosa com MBR1 do primeiro ciclo de reciclagem (75MBR1E). Todas as misturas betuminosas foram ensaiadas em condições não envelhecidas e envelhecidas para simular toda a vida da mistura betuminosa e avaliar o desempenho a curto e a longo prazo.

Deste trabalho foi possível concluir que o fracionamento da MBR e a caracterização do betume proveniente da MBR são processos muito importantes para garantir a homogeneidade final das misturas betuminosas com incorporação de MBR, sobretudo nos casos de elevadas taxas de incorporação. A utilização do rejuvenescedor derivado de uma base vegetal permitiu recuperar com sucesso as propriedades do betume envelhecido da MBR. Após os dois ciclos

de reciclagem foi suficiente adicionar 5% de rejuvenescedor por massa de betume envelhecido.

Em geral, o trabalho apresentado neste artigo pretendeu demonstrar a capacidade de multi-reciclagem das misturas betuminosas com elevadas taxas de incorporação de MBR, tendo sido possível validar o seu desempenho adequado a curto e longo prazo para aplicação em camadas de desgaste. Com base nos resultados obtidos para a mistura betuminosa com MBR do segundo ciclo de reciclagem na avaliação do desempenho mecânico foi possível obter as seguintes conclusões principais:

- O módulo de deformabilidade diminuiu em média 23% e 42%, em comparação com a mistura sem MBR e a mistura com MBR de primeiro ciclo de reciclagem, respetivamente.
- A resistência à fadiga, não envelhecida, aumentou, sendo que o parâmetro ϵ_c foi 37% superior à mistura sem MBR não envelhecida.
- A deformação permanente diminuiu, verificando-se reduções de 62%, 83% e 61% para os parâmetros RD_{AIR} , WTS_{AIR} e PRD_{AIR} , respetivamente, quando em comparação com a mistura sem MBR não envelhecida.
- A suscetibilidade ao envelhecimento não foi afetada nos sucessivos ciclos de reciclagem, tendo mesmo sido constatado uma variação semelhante do módulo de deformabilidade no primeiro e o segundo ciclo de reciclagem.
- A sensibilidade à água não foi afetada, pois foram obtidos valores de ITSR de 96% e 98% para as condições não envelhecida e envelhecida, respetivamente. As resistências à tração indireta em condições não envelhecidas e envelhecidas da mistura com MBR do segundo ciclo de reciclagem foram inferiores às da mistura sem MBR, o que pode traduzir uma capacidade da MBR em se regenerar e recuperar as suas propriedades, nomeadamente no que respeita ao betume proveniente da MBR.

O trabalho de investigação em que se baseou o presente artigo pretendeu dar um contributo importante para superar o problema que se vai colocar no futuro próximo quando os pavimentos que incorporam atualmente MBR necessitarem de ser reabilitados num segundo ciclo de reciclagem. Os resultados selecionados para serem apresentados neste artigo pretendem confirmar a viabilidade da multi-reciclagem da MBR sem que seja necessário diminuir a sua funcionalidade. O fracionamento da MBR combinado com a caracterização do betume da MBR são processos essenciais para garantir uma adequada homogeneidade da composição e comportamento das misturas com MBR, independentemente do ciclo de reciclagem. O desempenho das misturas com MBR não foi suscetível aos sucessivos ciclos de reciclagem. Contudo, os trabalhos de investigação devem prosseguir no futuro no que respeita à diversificação de rejuvenescedores, tecnologias de produção de misturas (por exemplo, misturas temperadas) e tipos de misturas betuminosas (por exemplo, *Stone Mastic Asphalt* – SMA, misturas porosas – PA). Além disso, considera-se vantajoso que mais trabalhos de investigação sejam realizados à escala micro de forma a melhor compreender o comportamento reológico do betume ao longo dos sucessivos ciclos de reciclagem.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação para a Ciência e Tecnologia pelo financiamento concedido através da bolsa SFRH/BD/114715/2016, e ao CERIS (*Civil Engineering Research and Innovation for Sustainability*).

REFERÊNCIAS

1. V. Antunes, A.C. Freire, J. Neves, A review on the effect of RAP recycling on bituminous mixtures properties and the viability of multi-recycling, *Constr. Build. Mater.* 211 (2019) 453–469. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.258>.
2. M. Zaumanis, R.B. Mallick, R. Frank, Evaluation of Rejuvenator's Effectiveness with Conventional Mix Testing for 100% RAP Mixtures, *TRB 2013 Annu. Meet.* (2013) 17–25. <https://doi.org/10.3141/2370-03>.
3. M. Zaumanis, R.B. Mallick, R. Frank, 100% recycled hot mix asphalt: A review and analysis, *Resour. Conserv. Recycl.* 92 (2014) 230–245. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2014.07.007>.
4. European Commission, Sustainability and circular economy - Circular economy, (2018). https://ec.europa.eu/growth/industry/sustainability/circular-economy_en (acedido a 17 de junho de 2018)).
5. J. van Barneveld, G. van der Veen, K. Enenkel, C. Mooren, L. Talman-Gross, K. Eckartz, K. Ostertag, N. Duque-Ciceri, T. Fischer, L. Scheidt, H. Wilts, L. Schäfer, S. Fischer, Regulatory barriers for the Circular Economy Lessons from ten case studies, Amsterdam, 2016.
6. J. Anthonissen, W. Van den bergh, J. Braet, Review and environmental impact assessment of green technologies

- for base courses in bituminous pavements, *Environ. Impact Assess. Rev.* (2016). <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2016.04.005>.
7. J. Santos, S. Bressi, V. Cerezo, D. Lo Presti, M. Dauvergne, Life cycle assessment of low temperature asphalt mixtures for road pavement surfaces: A comparative analysis, *Resour. Conserv. Recycl.* 138 (2018) 283–297. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.07.012>.
 8. S. Bressi, J. Santos, M. Giunta, L. Pistonesi, D. Lo Presti, A comparative life-cycle assessment of asphalt mixtures for railway sub-ballast containing alternative materials, *Resour. Conserv. Recycl.* 137 (2018) 76–88. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.05.028>.
 9. M. Zumanis, R.B. Mallick, R. Frank, 100% Hot Mix Asphalt Recycling: Challenges and Benefits, *Transp. Res. Procedia.* 14 (2016) 3493–3502. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.05.315>.
 10. L. De Bock, N. Piérard, S. Vansteenkiste, A. Vanelstraete, Categorisation and analysis of rejuvenators for asphalt recycling - Dossier 21, Brussels, Belgium, 2020.
 11. H. Tabatabaee, Y. Brion, H. Moolenaar, Anova Régénération Evaluation [presentation, PN MURE - ANR Improv. (2017). https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwjhg_u_Q48PtAhWHAMMBHZGSCMkQFjALegQLAhAC&url=https%3A%2F%2Fwww.pnmure.fr%2Fwp-content%2Fuploads%2F2017%2F03%2F09_MURE_Journ%25C3%25A9e-r%25C3%25A9g%25C3%25A9n%25C3%25A9 (acedido a 10 de dezembro de 2020).
 12. N. Tran, A. Taylor, P. Turner, C. Holmes, L. Porot, Effect of rejuvenator on performance characteristics of high RAP mixture, *Asph. Paving Technol. Assoc. Asph. Paving Technol. Tech. Sess.* 85 (2016) 283–313. <https://doi.org/10.1080/14680629.2015.1266757>.
 13. 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*. <https://doi.org/978-80-01-05962-3>.
 14. 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*. <https://doi.org/10.14311/EE.2016.334>.
 15. V. Antunes, A.C. Freire, J. Neves, Investigating aged binder mobilization and performance of RAP mixtures for surface courses, *Constr. Build. Mater.* 271 (2021) 121511. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121511>.
 16. EAPA, Asphalt the 100% recyclable construction product EAPA Position paper, Brussels, Belgium, 2014.
 17. R.C. West, QIP 129 - Best Practices for RAP and RAS Management, Lanham, USA, 2015.
 18. EP, Construction specifications book. 14.03 - Materials (in Portuguese), (2012).
 19. EP, Construction specifications book. 15.03 - Constructive methods (in Portuguese), Almada, Portugal, 2014.
 20. V. Antunes, J. Neves, A.C. Freire, Performance Assessment of Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) in Road Surface Mixtures, *Recycling.* 6 (2021) 1–19. <https://doi.org/10.3390/recycling6020032>.
 21. A. Nikolaidis, *Highway Engineering: Pavements, Materials and Control of Quality*, CRC Press - Taylor & Francis Group, 2015.