

ESTUDO PREPARATÓRIO PARA A RECICLAGEM INTEGRAL DE MISTURAS BETUMINOSAS COM ÓLEO ALIMENTAR USADO E OUTROS REJUVENESCEDORES

Silvino Capitão¹, Luís Picado-Santos², Arminda Almeida³, Fábio Mendes⁴

¹ Instituto Politécnico de Coimbra, Instituto Superior de Engenharia de Coimbra & CERIS, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Portugal, capitao@isec.pt (apresentador do trabalho)

² CERIS, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Portugal,
luispicadosantos@tecnico.ulisboa.pt

³ Universidade de Coimbra, Departamento de Engenharia Civil, Coimbra, Portugal & CITTA Centro de Investigação do Território, Transportes e Ambiente, Porto, Portugal, arminda@dec.uc.pt

⁴ Universidade de Coimbra, Departamento de Engenharia Civil, Coimbra, Portugal,
fabioapmendes@gmail.com

Resumo

Em Portugal, tal como em outros países europeus, as redes rodoviárias estruturantes estão praticamente construídas. Por essa razão, a conservação e reabilitação dos pavimentos dessas infraestruturas geram quantidades cada vez maiores de resíduos de misturas betuminosas, designados habitualmente por misturas betuminosas recuperadas (MBR). Esta situação exige que as tecnologias de pavimentação estejam orientadas para a valorização daqueles resíduos, eliminando o seu depósito em locais inapropriados, e aplicando os princípios da economia circular e uso eficiente de recursos não renováveis.

O estudo que se apresenta faz parte integrante dos trabalhos do projeto CoolAsphalt, financiado pela União Europeia e pelo programa Portugal 2020. Os resultados referem-se aos estudos preliminares de formulação das misturas betuminosas e seleção dos produtos rejuvenescedores do betume a incorporar: óleo alimentar usado (OAU), subprodutos de OAU e rejuvenescedores comerciais (óleo de poliéster). Além disso, testou-se também a adição de uma pequena quantidade de betume, até 1% da massa total de mistura.

Apresentam-se resultados para as propriedades volumétricas, a resistência mecânica em ensaios de compressão Marshall e à tração indireta. Os resultados preliminares mostram que a gama de composições com capacidade para serem aplicadas em pavimentos é relativamente larga, podendo intervir-se em alguns parâmetros para ajustar os materiais a condições específicas de utilização. As estratégias que são possíveis de antever nesta fase do projeto, relacionam-se com a variação da quantidade de betume novo a adicionar, com a correção da quantidade de partículas grossas na mistura com recurso a agregados novos, com a variação da percentagem e tipo de agente rejuvenescedor e com o uso de tecnologia de misturas betuminosas temperadas.

Palavras-chave: economia circular, misturas betuminosas recuperadas, rejuvenescedores de betume, sustentabilidade.

1 Introdução

Com as crescentes preocupações ambientais, vários setores da sociedade e da indústria estão a mudar o seu comportamento em relação ao consumo de recursos naturais, gestão de resíduos e eficiência na produção de bens e serviços. A reciclagem e a valorização de materiais não renováveis passaram a ser cada vez mais necessárias para que seja possível alcançar uma economia circular e um uso sustentável dos recursos. A indústria da construção e manutenção de infraestruturas de transporte está gradualmente a aplicar soluções ambientalmente mais convenientes, com o objetivo de reduzir a sua pegada ecológica.

A introdução de misturas betuminosas recuperadas (MBR) na produção de misturas novas é uma técnica de reciclagem muito utilizada, recorrendo a diferentes processos produtivos, como misturas betuminosas fabricadas a quente, temperadas, e a frio [1–6]. Com este tipo de abordagem, reduz-se a deposição de resíduos em locais inapropriados, e pode diminuir-se o consumo de energia e, conseqüentemente, as emissões associadas ao processo de produção de matérias-primas e de construção [7].

Contudo, o uso de MBR como constituinte de novas misturas betuminosas, principalmente quando se incorporam elevadas percentagens de MBR, coloca desafios relacionados com a capacidade do betume envelhecido da MBR atuar como aglutinante. Sabe-se que o betume sofre envelhecimento de curto e longo prazo, que envolve diferentes origens e mecanismos, como oxidação e volatilização dos constituintes [8]. Um betume envelhecido apresenta quantidades aumentadas nas suas frações mais pesadas, o que aumenta a viscosidade do ligante [9], tornando o betume mais duro e frágil, com uma menor capacidade para ligar e revestir as partículas dos agregados [10].

A adição de betume virgem e/ou o uso de aditivos rejuvenescedores durante o fabrico da nova mistura permite restaurar, em parte, as propriedades do aglutinante envelhecido. Para que o processo tenha sucesso deve ocorrer um tempo de interação entre o ligante envelhecido, o betume virgem e o agente rejuvenescedor, pelo que a adequada difusão destes constituintes na massa da mistura é um fator crítico de sucesso [11]. Mesmo que ocorra uma adequada disseminação do rejuvenescedor, sabe-se que uma parcela do betume envelhecido da MBR, designada em inglês por *black rock* (rocha negra), não é reativada pela ação do rejuvenescedor [12].

A indústria alimentar produz abundantemente óleo alimentar usado (OAU), o qual pode produzir impactos ambientais negativos consideráveis quando colocado em aterro ou na rede de esgotos. Por essa razão, o OAU tem sido utilizado para a produção de sabão e também como matéria-prima para a produção de biodiesel. Além disso, encontram-se na literatura vários estudos que avaliam a possibilidade de incorporação de OAU como rejuvenescedor para ligantes betuminosos [11,13–17]. De acordo com os dados publicados por Zahoor *et al.* [18] o consumo de óleo alimentar no mundo ultrapassou 200 milhões de toneladas em 2020/21.

Os ácidos gordos livres (AGL) presentes no OAU aumentam com a temperatura de fritura aplicada, o tempo de utilização e o teor em água resultante das atividades de fritura [19]. Para que se alcance um adequado contributo do OAU para o rejuvenescimento do betume, a acidez do OAU deve ser baixa, sendo esta medida em massa necessária de hidróxido de potássio (KOH) em miligramas para neutralizar um grama de OAU. Valores de acidez no intervalo de 0,4 a 3,2 mg KOH/g têm sido considerados melhores para obter uma boa reologia do betume rejuvenescido a alta temperatura [16], estando habitualmente disponíveis OAU com acidez de 1,32 a 3,6 mg KOH/g [19].

Este trabalho apresenta os resultados dos estudos preparatórios realizados em laboratório com vista ao estabelecimento de composições de misturas betuminosas, a aplicar em trechos experimentais de pavimentos, no âmbito do projeto CoolAsphalt em desenvolvimento, para estudar o desenvolvimento de um produto betuminoso, à escala industrial, que compreenda a reciclagem integral de MBR, rejuvenescida com OAU.

2 Materiais e Métodos

2.1 Materiais constituintes da mistura: MBR, Betume, Agregados Virgens, Óleo Alimentar Usado e Cera Orgânica

Considerou-se como mistura betuminosa de referência, um AC 14 surf 35/50 com 5% de betume em relação à massa total de mistura (de acordo com a designação europeia, corresponde a um *asphalt concrete* de camada de desgaste, com 14 mm de dimensão máxima de agregado, e betume com penetração entre 35 e 50 décimas de milímetro). A referência corresponde a uma mistura nova, com frações grossas de agregado granítico e frações finas de agregado calcário e granítico, semelhante ao material que se recolheu do pavimento por fresagem, para ser utilizado como MBR no projeto CoolAsphalt.

A MBR utilizada, com cerca de 14 anos de idade, é constituída por frações grossas de agregados graníticos, e frações finas de agregados calcários e graníticos, tendo uma percentagem de betume residual de 4,5%. A Figura 1 apresenta as curvas granulométricas dos agregados da MBR após eliminação do betume por incineração e o fuso granulométrico geralmente utilizado em Portugal para camadas de desgaste. Como se verifica, a granulometria da MBR que resultou do processo de fresagem é bastante mais fina que os limites do fuso granulométrico. Pretende-se ajustar granulometria da MBR tão pouco quanto possível, de modo que a mistura betuminosa final resulte num custo bastante baixo, uma vez que se pretende um material de pavimentação que cumpra requisitos de desempenho mecânico aceitáveis para estradas de médio/baixo tráfego. No entanto, por estar previsto o uso de uma central convencional contínua para a produção das misturas para a construção de trechos experimentais (protótipos de pavimentos), o processo de fabrico pode exigir a utilização de frações de agregados virgens, de modo a evitar danos no sistema de recolha de pó da central por sobreaquecimento. Por essa razão, também foram consideradas curvas granulométricas com correção de agregados virgens, como se ilustra na Figura 1.

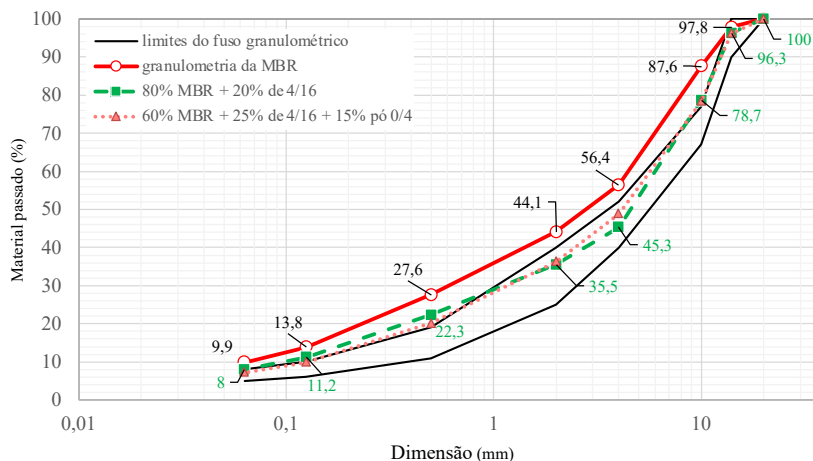


Figura 1. Granulometrias da MBR, das curvas testadas e fuso granulométrico especificado para camadas de desgaste

Nesta fase preliminar dos estudos estimaram-se as propriedades do betume contido na MBR e, a partir destas, as previstas para o betume final sem rejuvenescedor, considerando diferentes

taxas de reciclagem de betume. Estimou-se um valor de 20 décimas de milímetro (valor próximo dos obtidos por Antunes *et al.* [20]) para a penetração a 25°C do betume da MBR, de modo a avaliar, pela fórmula (1), proposta na EN 13108-8 - *Reclaimed asphalt*, os valores da penetração do betume final.

$$\log(PEN_{final}) = \frac{P_{novo} \times \log(PEN_{novo}) + P_{MBR} \times \log(PEN_{MBR})}{100} \quad (1)$$

onde PEN representa os valores de penetração em décimas de milímetro para as várias condições do betume presente na mistura, P_{MBR} representa a percentagem ponderal de betume da MBR no betume da mistura recuperada, e P_{novo} representa a percentagem ponderal de betume novo no betume da mistura recuperada.

Para a estimativa da temperatura de amolecimento do betume final sem rejuvenescedor ($T_{ABfinal}$), aplicou-se a fórmula (2) proposta por Kennedy [21], que se baseia nos valores de PEN_{final} .

$$T_{ABfinal} = 99,13 - 26,35 \times \log(PEN_{final}) \quad (2)$$

Os valores indicativos obtidos para a $T_{ABfinal}$ são os apresentados na Figura 2 para diferentes taxas de reciclagem de betume. Note-se que para taxas de reciclagem da MBR de 60 a 100%, quando se adiciona até 1% de betume virgem, as taxas de reciclagem de betume variam de 49,5 a 100%, respetivamente. Os dois cenários ilustrados na Figura 2 consideram os limites da penetração a 25°C (pen25) do betume 35/50. A utilização de rejuvenescedores proporciona a recuperação de componentes voláteis do betume endurecido e, assim, ocorre em geral um aumento da penetração e uma redução da temperatura de amolecimento face aos valores indicados. Uma vez que o projeto está orientado para a avaliação do desempenho das misturas betuminosas, antes e após um procedimento de envelhecimento acelerado, não se procedeu ainda à avaliação experimental das propriedades do betume recuperado.

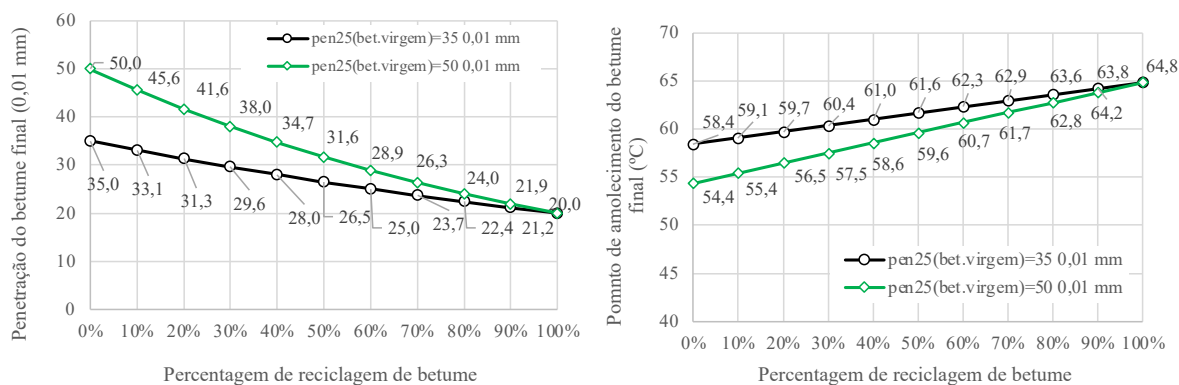


Figura 2. Estimativa da penetração e do ponto de amolecimento do betume final sem rejuvenescedor

O OAU utilizado como rejuvenescedor é óleo de girassol convencional recolhido diretamente de uso doméstico. Além de um simples processo de filtração realizado para remover as partículas sólidas em suspensão, o resíduo não sofreu qualquer tratamento químico para redução dos ácidos gordos livres. Um OAU deste tipo apresenta geralmente densidades de cerca de 910 kg/m³ e um

valor de acidez de até 3,6 mg KOH/g [22]. Usou-se em alternativa, um residuo derivado do processo de transesterificação do OAU para a produção de biodiesel, designado internacionalmente por *Bio Heating Oil* (bio óleo de aquecimento). Trata-se de um produto semissólido, com uma densidade a 40°C de 926,1 kg/m³, sendo possível vertê-lo do recipiente que o contém a temperaturas acima de 18°C. Apresenta uma acidez de 2,19 mg KOH/g e um ponto de inflamação de 176,5 °C.

Para a produção de mistura temperada utilizou-se uma cera orgânica adicionada por via seca, durante o processo de produção da mistura, de modo a reduzir a viscosidade do betume e, assim, permitir uma redução da temperatura da ordem de 30°C. O ponto de fusão da cera orgânica é de 100°C.

2.2 Materiais: Composições das Misturas

Foram produzidas as misturas betuminosas cujas designações e composições se indicam na Tabela 1. Além da mistura betuminosa de referência fabricada a quente, do tipo AC 14 surf 35/50, consideraram-se composições com incorporação de MBR em diferentes percentagens, 100, 80 e 60% de MBR, incorporando em algumas delas OAU ou BHO como rejuvenescedor e betume 35/50 virgem. A gama de percentagens de rejuvenescedor consideradas foi estabelecida com base em anteriores estudos [23] que indicaram como adequadas as quantidades de rejuvenescedor utilizadas.

Tabela 1. Composições e designações das misturas betuminosas ensaiadas

CONSTITUINTES E DESIGNAÇÕES DAS MISTURAS			LABORATÓRIO														
			MBQ	sem rejuv.				com rejuv. sem alteração granulometria				com rejuv. com alteração granulometria					
				Referência (AC14 surf 35/50)	H-0R <i>e</i> j-100RAP- <i>a</i> NB	H-0R <i>e</i> j-80RAP- <i>a</i> NB	W-0R <i>e</i> j-80RAP- <i>b</i> NB	H-0R <i>e</i> j-60RAP- <i>a</i> NB	H-10WCO-100RAP- <i>a</i> NB	H-18WCO-100RAP- <i>a</i> NB	H-10BHO-100RAP- <i>a</i> NB	H-18BHO-100RAP- <i>a</i> NB	H-10WCO-80RAP- <i>b</i> NB	H-18WCO-80RAP- <i>b</i> NB	W-10WCO-80RAP- <i>b</i> NB	W-18WCO-80RAP- <i>b</i> NB	H-10WCO-60RAP- <i>c</i> NB
BETUME	35/50 virgem (% massa de mistura)	5,0	<i>a</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>a</i>	<i>a</i>	<i>a</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>b</i>	<i>b</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>c</i>	
	da MBR (% massa de MBR)		4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	
AGREGADOS NATURAIS (% massa de agregado)	Fração 4/16: Granito	56		20	20	25					20	20	20	20	25	25	
	Fração 0/4: Granito	14				15											
	Fração 0/4: Calcário	28													15	15	
	Filer: Calcário	2															
Subproduto código LER - lista europeia de resíduos (%)	17 03 02: MBR Mistura betuminosa recuperada		100	80	80	60	100	100	100	100	80	80	80	80	60	60	
ADITIVOS (% massa de betume)	Polyram L200 Promotor de adesividade	0,3															
	OAU Óleo alimentar usado						10	18		10	18	10	18	10	18		
	BHO <i>Bio Heating Oil</i>								10	18							
	Sasobti REDUX Cera orgânica				1,5	1,5						1,5	1,5				

a: 0, 0,5 e 1,0% | *b*: 0, 0,6 e 1,0% | *c*: 0,5 e 1,0%

H (mistura a quente); W (mistura temperada); *i*WCO (*i*% de OAU); *j*BHO (*j*% de BHO); *k*RAP (*k*% de MBR); *x*NB (*x*% de betume virgem).

Nas misturas para as quais se considerou a adição de agregado virgem, estimou-se a percentagem de betume virgem que seria necessário adicionar, tendo em consideração a superfície específica do agregado total (reciclado e virgem) na mistura. Para isso, aplicaram-se as expressões (3) e (4):

$$t_b = K \times \frac{2,65}{\rho_a} \times \sqrt[5]{S_e} \quad (3)$$

$$S_e = \frac{1}{100} (0,25 G + 2,3 S + 12 s + 135 f) \quad (4)$$

onde t_b é o teor em betume da mistura (relação entre a massa de betume e a massa de agregado), K é o módulo de riqueza que pode assumir um valor mínimo de 3,2 para um betão betuminoso 0/14, ρ_a é a massa volúmica da mistura de agregados em g/cm^3 , S_e é a superfície específica da mistura de agregados em m^2/kg , G , S , s e f são, respetivamente, as percentagens ponderais de agregado de dimensão: superior a 6,3 mm; compreendida entre 6,3 e 0,315 mm; compreendida entre 0,315 e 0,08 mm; inferior a 0,08 mm.

A aplicação das expressões (3) e (4) para as misturas com 80% de MBR (+20% de 4/16) e com 60% de MBR (+15% de 0/4 + 25% de 4/16) conduziu a estimativas da percentagem total de betume na mistura de 5,0 e de 5,1% de betume, respetivamente. Assim, no primeiro grupo de casos (H-j/WCO-80RAP-xNB e W-j/WCO-80RAP-xNB) estudou-se a adição de 0,6 e de 1% de betume virgem além dos 4,5% da MBR. No segundo grupo de casos (H-x/WCO-60RAP-yNB) analisou-se a adição de 0,5 e de 1% de betume virgem.

2.3 Métodos

Para a moldagem de provetes cilíndricos com cerca de 10 cm de diâmetro e 6,5 cm de altura para a avaliação de propriedades volumétricas das misturas e determinação das propriedades Marshall, os materiais foram misturados numa misturadora mecânica e compactados com 75 pancadas por face de acordo com a EN 12697-30. O material foi aquecido em estufa de modo a alcançar uma temperatura de mistura da ordem de 160°C. Após o processo de produção, as misturas foram colocadas em estufa, a 150°C, durante 30 minutos, para permitir a interação entre o OAU e o betume envelhecido. Nos casos em que não se adicionou OAU, os materiais não foram sujeitos ao condicionamento térmico em estufa. O procedimento utilizado para a produção de misturas temperadas foi semelhante, tendo-se utilizado uma temperatura de mistura de 130°C.

Os provetes moldados foram avaliados, de acordo com a EN 12697-9, em termos de baridade SSD (provetes saturados com a superfície seca), compressão de Marshall (EN 12697-34) e baridade máxima teórica (EN 12697-5). Para a avaliação da sensibilidade à água, através do índice de resistência conservada em tração indireta (ITSR), produziram-se provetes semelhantes aos anteriormente descritos, mas compactados com apenas 50 pancadas por face (EN 12697-12 e EN 12697-23). A sensibilidade à água em Portugal é avaliada em ensaios de compressão diametral, a $20 \pm 5^\circ\text{C}$ (usou-se 15°C), sobre dois grupos de provetes com baridades médias semelhantes, sendo um dos grupos sujeito a um condicionamento hídrico e térmico normalizado, de modo a determinar a razão entre a resistência à tração indireta dos provetes húmidos e dos provetes secos.

3 Resultados e Discussão

3.1 Baridade das Misturas Betuminosas Sem Alteração da Granulometria

A Figura 3 **Erro! A origem da referência não foi encontrada.** resume os valores médios da baridade das misturas betuminosas estudadas, em função das percentagens de OAU ou BHO (em relação à massa total de betume da mistura) e de betume virgem (em relação à massa total de mistura). Note-se que a mistura de referência com betume e agregados virgens tem uma baridade de $2341,4 \text{ kg/m}^3$.

Observa-se alguma variação nos resultados da baridade obtidos, mais visível no caso dos provetes produzidos com OAU que nos que incorporaram BHO. Presume-se que a variação esteja relacionada com a variabilidade das características da MBR, porquanto o material foi utilizado sem recomposição, por se pretender utilizar um procedimento de fabrico simples e barato. No entanto, verificou-se uma tendência de aumento da baridade com a quantidade de OAU ou de BHO nas misturas, ou seja, aumentando a percentagem de rejuvenescedor de 10 para 18% tende a originar misturas mais fechadas. A mistura fabricada apenas com MBR, sem betume virgem e sem rejuvenescedor, apresentou uma baridade baixa em comparação com a generalidade dos valores obtidos para as restantes misturas.

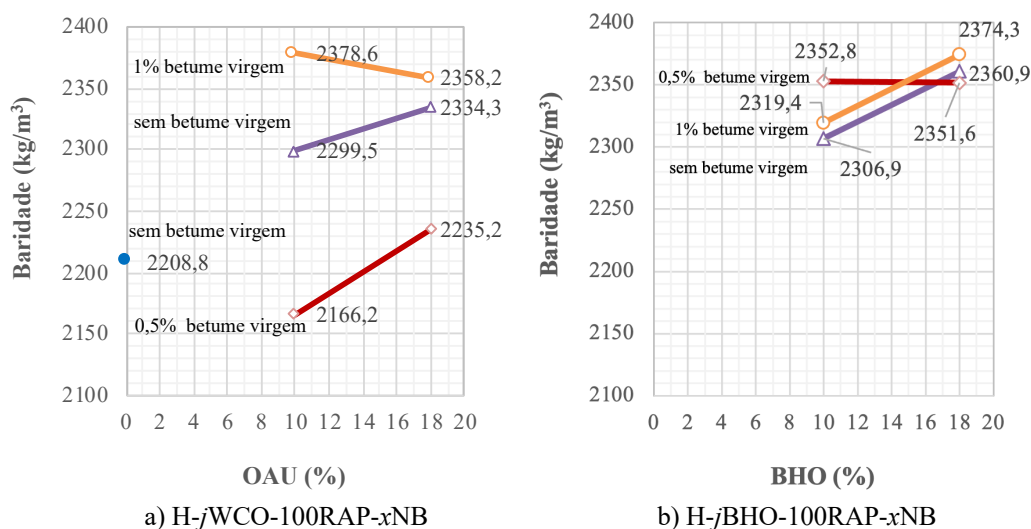


Figura 3. Baridade das misturas betuminosas sem alteração da granulometria: a) com OAU; b) com BHO

3.2 Baridade das Misturas Betuminosas Com Alteração da Granulometria

Mediram-se também os valores da baridade das misturas betuminosas para as quais se alterou a granulometria, tal como se ilustrou na Figura 1. Representam-se nas Figura 4 e

Figura 5 os valores médios medidos para as misturas a quente e temperadas produzidas.

No caso das misturas a quente, a temperatura de fabrico foi suficientemente alta para que a viscosidade do betume fosse adequada para ocorrer o envolvimento dos agregados, originando valores de baridade sem grande variação entre as composições testadas. Para as misturas temperadas, produzidas a uma temperatura mais baixa que as misturas a quente, os valores representados permitem verificar que a falta de rejuvenescedor (0% OAU) conduziu a baridades um pouco mais baixas comparativamente às obtidas para o mesmo tipo de misturas quando se adicionou 10 ou 18% de OAU.

No caso das misturas com 60% de MBR (Figura 5), considerando que parte do betume envelhecido (*black rock*) não é reativado com a adição de OAU, verifica-se que a adição de 1% de betume virgem resulta numa maior subida da baridade à medida que se acrescenta OAU. Note-se que a quantidade de betume virgem adicionada tem como objetivo revestir o agregado virgem adicionado à mistura nestes casos, sendo de esperar que apenas 0,5% não satisfaz esse objetivo convenientemente.

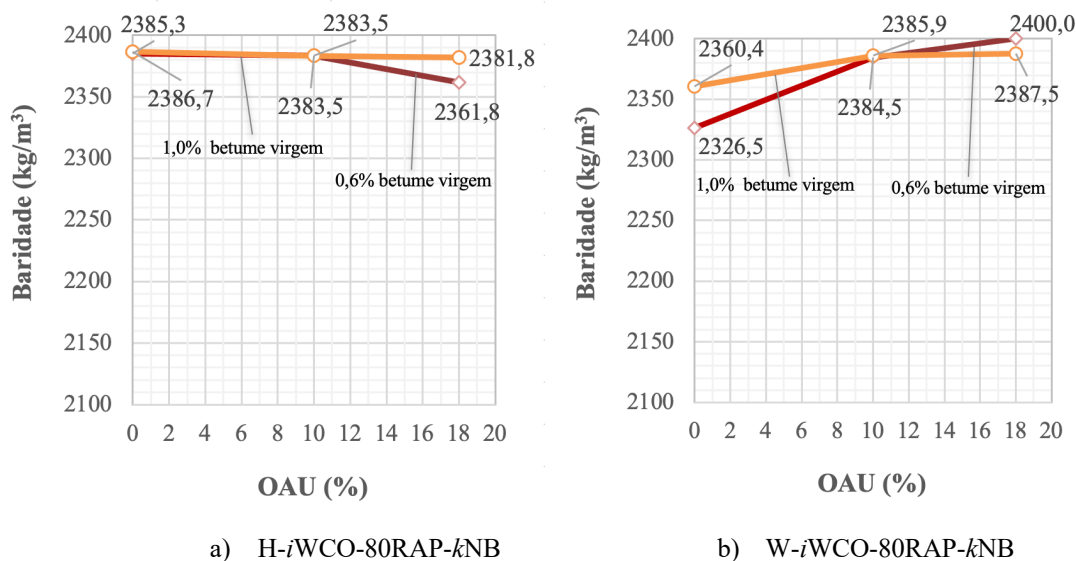


Figura 4. Baridade das misturas betuminosas com 80% de MBR e com alteração da granulometria: a) misturas a quente; b) misturas temperadas

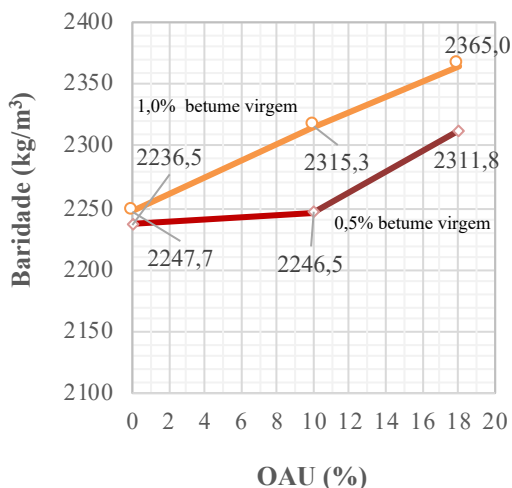


Figura 5. Baridade das misturas betuminosas com 60% de MBR (a quente) e com alteração da granulometria

3.3 Estabilidade e Deformação Marshall

A mistura betuminosa de referência apresenta um valor de estabilidade de 11,9 kN e uma deformação de 3,3 mm no ensaio de compressão Marshall realizado a 60°C.

A Figura 6 apresenta os resultados dos ensaios de compressão Marshall obtidos para as misturas a quente, com 100% de MBR, quando se usou OAU ou BHO como rejuvenescedores. Os valores da estabilidade são bastante elevados comparativamente ao valor máximo de 21 kN geralmente especificado em Portugal para misturas novas com agregados granitóides. No entanto, os resultados obtidos, para as combinações de 18% de OAU ou BHO e 1% de betume virgem adicional, conduziram a valores que poderão ser validados mais adiante no projeto quando se

realizarem ensaios de avaliação de desempenho mecânico. Os valores da deformação obtidos são adequados, maioritariamente abaixo do limite de 4 mm, valor requerido para betões betuminosos novos semelhantes à mistura de referência.

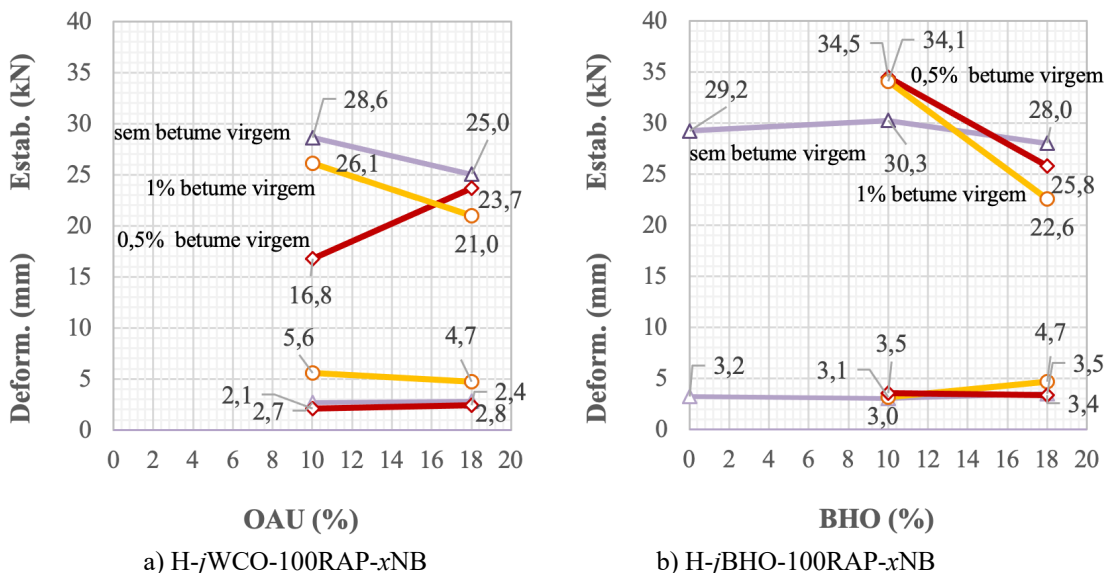


Figura 6. Estabilidade e deformação Marshall das misturas betuminosas sem alteração da granulometria: a) com OAU; b) com BHO

A Figura 6 compara os resultados da compressão Marshall obtidos para as misturas a quente e temperadas, com 80% de MBR, quando se usou OAU ou BHO como rejuvenescedores.

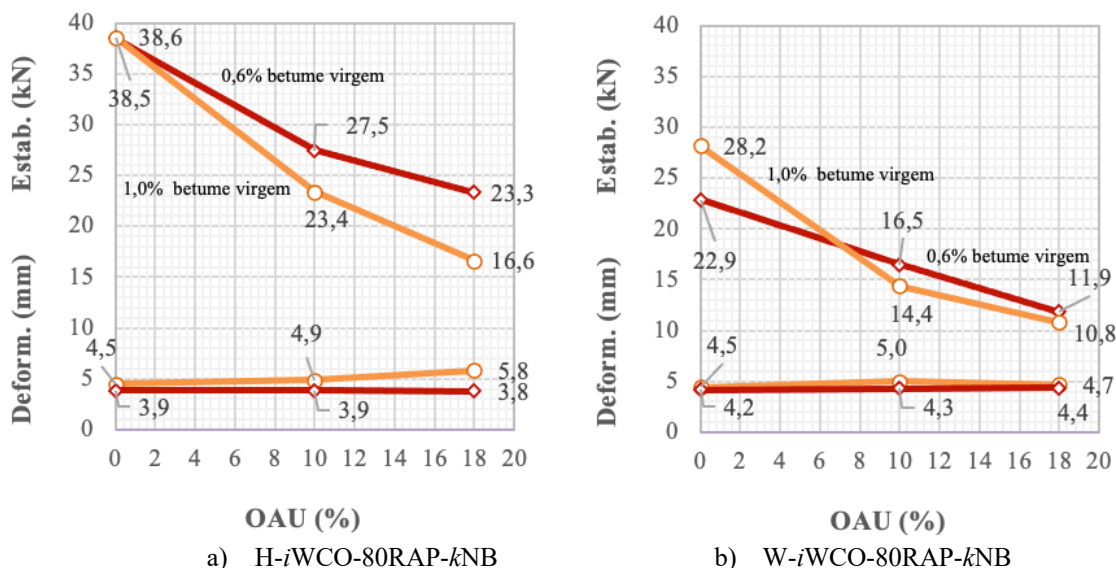


Figura 7. Estabilidade e deformação Marshall das misturas betuminosas com 80% de MBR e com alteração da granulometria: a) misturas a quente; b) misturas temperadas

É visível que para as misturas temperadas os valores da estabilidade baixam comparativamente aos da mistura a quente. Além disso, a adição de uma maior quantidade de betume virgem associada a uma maior percentagem de OAU contribui para baixar a estabilidade para valores inferiores a 21 kN. No entanto, para 18% de OAU, adicionando 1% de betume origina uma deformação acima de 4 mm, o que é elevado considerando os requisitos habituais para misturas betuminosas semelhantes com constituintes virgens. A deformação nas misturas temperadas é em geral superior a 4 mm. Sendo um valor ligeiramente acima dos requisitos habituais, poderá vir a ser validado nos posteriores ensaios de avaliação de desempenho.

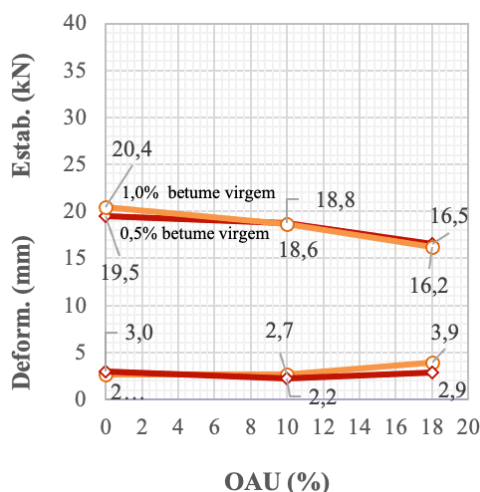


Figura 8. Estabilidade e deformação Marshall das misturas betuminosas com 60% de MBR (a quente) e com alteração da granulometria

3.4 Sensibilidade à água

A sensibilidade à água é um dos principais aspetos a avaliar porquanto a existência nas misturas de uma quantidade significativa de betume envelhecido pode conduzir a elevada sensibilidade. Tem-se como referência a resistência à tração indireta, antes e depois de condicionamento em água, obtida para a mistura de referência formada por constituintes virgens. Neste caso obtiveram-se valores de resistência à tração indireta, dos provetes secos (ITS_{seco}) de 1612,3 kPa, e dos provetes húmidos ($ITS_{húmido}$) de 1455,9 (a 20°C). O rácio entre os dois valores (ITSR) é de 90,3%, valor claramente acima de 80% geralmente requerido.

Na Figura 9 apresentam-se os resultados disponíveis até ao momento para misturas com 80 e 60% de MBR ensaiadas a 15°C. No caso das misturas com 80% de MBR, 10% de OAU e 0,6% de betume virgem, o comportamento foi excelente, quer no que diz respeito aos valores da resistência à tração quer no que concerne ao valor de ITSR. Para as misturas com 60% de MBR parece existir um problema de coesão da mistura, embora o ITSR para a mistura H-10WCO-60RAP-0.5NB seja superior a 80%. A mistura H-0WCO-60RAP-0.5NB resistiu mal à ação da água provavelmente por incorporar uma baixa quantidade de betume virgem (apenas 0,5%), para a quantidade de agregado virgem incorporado, tendo em conta que alguma parte do betume da MBR não tenha sido reativado.

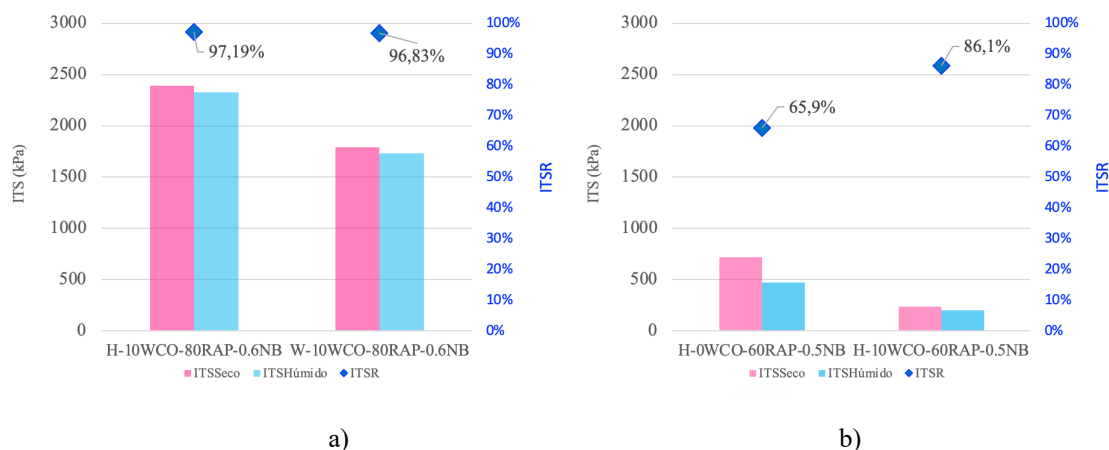


Figura 9. Sensibilidade à água a 15°C das misturas betuminosas: **a)** 80% de MBR, com 10% de OAU e 0,6% betume virgem, a quente (H-10WCO-80RAP-0.6NB) e temperada (W-10WCO-80RAP-0.6NB); **b)** 60% de MBR, a quente, e 0,5% de betume virgem, com 0 (H-0WCO-60RAP-0.5NB) e 10% (H-10WCO-60RAP-0.5NB) de OAU

4 Conclusões

O estudo preparatório apresentado neste artigo relativo a misturas betuminosas com incorporação de elevadas percentagens de MBR, e OAU ou BHO como rejuvenescedores, conduziu às conclusões que se sintetizam a seguir: 1) A incorporação de OAU ou BHO em, pelo menos, 10% da massa do betume, complementada com a incorporação de uma pequena percentagem de betume virgem permite obter misturas betuminosas com potencial para utilizar como material de pavimentação, quer em termos de baridade quer no que diz respeito a estabilidade e deformação Marshall; 2) A adição de cera orgânica permite alargar a técnica de utilização de OAU como rejuvenescedor às misturas temperadas, com bons resultados em termos de características mais comuns, mesmo quando se incorpora alguma percentagem de agregado virgem na mistura; 3) A sensibilidade à água das misturas com elevada percentagem de MBR com OAU como rejuvenescedor pode ser um aspeto crítico que importa investigar com maior detalhe, porquanto a insuficiente resistência à água pode limitar a utilização de algumas composições; 4) Pela avaliação realizada, pode inferir-se que as quantidades de rejuvenescedor e de betume adicionado são fatores críticos de sucesso.

As composições mais promissoras obtidas até ao momento deverão ser validadas nas fases posteriores do projeto, através da realização de ensaios de avaliação de desempenho mecânico.

5 Referências

- [1] Antunes, V.; Freire, A.C.; Neves, J. *A review on the effect of RAP recycling on bituminous mixtures properties and the viability of multi-recycling*. Constr. Build. Mater. 2019, 211, 453–469, doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.03.258.
- [2] Zaumanis, M.; Mallick, R. *Review of very high-content reclaimed asphalt use in plant-produced pavements: State of art*. International J. Pavement Eng. 2014, 16, 39–55, doi:10.1080/10298436.2014.893331.
- [3] Lo Presti, D.; Cárrión, A.; Airey, G.; Hajj, E. *Towards 100% recycling of reclaimed asphalt in road courses binder design methodology and case studies*. J. Clean. Prod. 2016, 131, 43–51, doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.05.093.

- [4] Baptista, A.; Picado-Santos, L.; Capitão, S. *Design of hot mix recycled asphalt concrete produced in plant without preheating the reclaimed material*. IJPE—Int. J. Pavement Eng. 2013, 14, 95–102, doi:10.1080/10298436.2011.587009.
- [5] Picado-Santos, L.; Baptista, A.; Capitão, S. *Assessment of the use of hot mix recycled asphalt concrete in plant*. ASCE J. Transp. Eng. 2010, 136, 1159–1164, doi:10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000190.
- [6] Martinho, F.; Picado-Santos, L.; Capitão, S. *Mechanical properties of warm-mix asphalt concrete containing different additives and recycled asphalt as constituents applied in real production conditions*. Constr. Build. Mater. 2017, 131, 78–89, doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.11.051.
- [7] Martinho, F.; Picado-Santos, L., Capitão, S. *Feasibility assessment of the use of recycled aggregates for asphalt mixtures*. Sustainability 2018, 10, 1737, doi:10.3390/su10061737.
- [8] Crucho, J.; Picado-Santos, L.; Neves, J.; Capitão, S.; Al-Qadi, I. *Tecnico accelerated ageing (TEAGE)—A new laboratory approach for bituminous mixture ageing simulation*. Int. J. Pavement Eng. 2018, 21, 753–765, doi:10.1080/10298436.2018.1508845.
- [9] Carraher Jr., C. *Seymour/Carraher's Polymer Chemistry*, 6th ed.; Marcel Dekker: New York, NY, USA, 2003.
- [10] Mazzoni, G.; Bocci, E.; Canestrari, F. *Influence of rejuvenators on bitumen ageing in hot recycled asphalt mixtures*. J. Traffic Transp. Eng. (Engl. Ed.) 2018, 5, 157–168, doi:10.1016/j.jtte.2018.01.001.
- [11] Karlsson, R., Isacson, U., *Application of FTIR-ATR to characterization of bitumen rejuvenator diffusion*. J. Mater. Civ. Eng. 15, 157–165, 2003, doi:10.1061/(ASCE)0899-1561(2003)15:2(157).
- [12] Asli, H., Ahmadi, E. Zargar, M., Karim, M., *Investigation on physical properties of waste cooking oil—Rejuvenated bitumen binder*. Constr. Build. Mater. 37, 398–405, 2012, doi:10.1016/j.conbuildmat.2012.07.042.
- [13] Zargar, M. Ahmadi, E. Asli, H. Karim, M., *Investigation of the possibility of using waste cooking oil as a rejuvenating agent for aged bitumen*. J. Hazard. Mater. 233–243, 254–258, 2012, doi:10.1016/j.jhazmat.2012.06.021.
- [14] Chen, M., Xiao, F., Putman, B., Leng, B., Wu, S. *High temperature properties of rejuvenating recovered binder with rejuvenator, waste cooking and cotton seed oils*. Constr. Build. Mater. 59, 10–16, 2014, doi:10.1016/j.conbuildmat.2014.02.032.
- [15] Azahar, W., Jaya, R., Hainin, M., Bujang, M., Ngadi, N., *Chemical modification of waste cooking oil to improve the physical and rheological properties of asphalt binder*. Constr. Build. Mater. 126, 218–226, 2016, doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.09.032.
- [16] Zhang, D., Chen, M., Wu, S., Liu, J., Amirkhanian, S., *Analysis of the relationships between waste cooking oil qualities and rejuvenated asphalt properties materials*. J. Hazard. Mater. 10, 508, 2017, doi:10.3390/ma10050508.
- [17] Azahar, W., Bujang, M., Jaya, R., Hainin, M., Mohamed, A. Ngadi, N., Jayanti, D., *The potential of waste cooking oil as bio-asphalt for alternative binder—An overview*. J. Teknol., 78, 111–116, 2016, doi:10.11113/jt.v78.8007.
- [18] Zahoor, M., Nizamuddin, S., Madapusi, S., Giustozzi, F. (2021). *Sustainable asphalt rejuvenation using waste cooking oil: A comprehensive review*. J. Clean. Prod., 278, 123304. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123304>.
- [19] Carlini, M.; Castellucci, S.; Cocchi, S. *A pilot-scale study of waste vegetable oil transesterification with alkaline and acidic catalysts*. Energy Procedia 2014, 45, 198–206, doi:10.1016/j.egypro.2014.01.022.
- [20] Antunes, V., Freire, A.C., Neves, J., *Investigating aged binder mobilization and performance of RAP mixtures for surface courses*. Constr. Build. Mater. 271, 121511, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121511>.
- [21] Kennedy, C., 1985. *Analytical Flexible Pavement Design: a critical state of the art review 1984*. Proc. Of Institution Of Civil Engineering, Part 1, Vol. 78, pp.897-917, Londres.
- [22] Haq, I., Akram, A., Nawaz, A., Zohu, X., Abbas, S., Xu, Y., Rafatullah, M. (2021). *Comparative analysis of various waste cooking oils for esterification and transesterification processes to produce biodiesel*, Green Chemistry Letters and Reviews, 14:3, 462-473, DOI: 10.1080/17518253.2021.1941305.
- [22] Fernandes, F., Picado-Santos, L., Capitão, S., *Reciclagem total de misturas betuminosas usando óleo alimentar como rejuvenecedor*, Atas do 9º Congresso Rodoviário Português, Lisboa, 2019.