

DESEMPENHO MECÂNICO E RECOMENDAÇÕES DE UTILIZAÇÃO DE MISTURAS BETUMINOSAS COM ALTA TAXA DE RECICLAGEM REJUVENESCIDAS COM ÓLEO ALIMENTAR USADO OU *BIO-HEATING OIL*

Silvino Capitão

Instituto Politécnico de Coimbra, Instituto Superior de Engenharia de Coimbra, SusCita, Coimbra, Portugal & CERIS, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Lisboa, Portugal, capitao@isec.pt

Luís Picado-Santos

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

Arminda Almeida

Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra, Coimbra, Portugal & CITTA, Centro de Investigação do Território, Transportes e Ambiente, arminda@dec.uc.pt.

RESUMO: Este artigo apresenta uma síntese dos resultados do projeto CoolAsphalt, no qual se desenvolveram misturas betuminosas temperadas com 80% de MBR – misturas betuminosas recuperadas – e misturas a quente com 60% de MBR. Utilizaram-se como rejuvenescedores do betume envelhecido óleo alimentar usado (OAU) ou BHO (*bio-heating oil*). A campanha de ensaios laboratoriais forneceu resultados para as características volumétricas, Marshall e de desempenho mecânico das misturas. Recomendam-se ainda boas práticas para o uso das misturas formuladas, tendo por base os resultados obtidos e a experiência de construção de trechos de pavimento à escala real. O artigo mostra também a redução de custos diretos alcançáveis com esta tecnologia. Conclui-se que as misturas betuminosas concebidas no projeto são adequadas para pavimentos rodoviários de médio/baixo tráfego, tendo durabilidade adequada mesmo após a ocorrência de envelhecimento por ação combinada da radiação solar e da água.

PALAVRAS-CHAVE: Misturas betuminosas recuperadas, Rejuvenescimento, Óleo alimentar usado, *bio-heating oil*, desempenho mecânico.

1. Introdução

A crescente preocupação com a escassez de materiais não renováveis tem impulsionado o desenvolvimento de políticas públicas orientadas para a economia circular e o uso sustentável dos recursos naturais. No setor de infraestruturas de transporte, é essencial explorar alternativas para valorização de materiais, garantindo múltiplos ciclos de vida para pavimentos rodoviários e minimizando o seu impacto ambiental. Embora a reciclagem de baixas taxas de misturas betuminosas recuperadas (MBR) seja uma prática consolidada (Santos et al., 2010), a utilização de altas quantidades ainda é ainda limitada. Por isso, a indústria rodoviária deve aumentar a taxa de incorporação de MBR em misturas betuminosas para estar mais alinhada com os objetivos atuais de desenvolvimento sustentável. O aumento da taxa de incorporação de MBR exige a recuperação das propriedades do ligante envelhecido, aproximando-as das características do betume virgem. Esse processo contribui para reduzir a rigidez do material, aumentar a sua resistência ao fendilhamento e melhorar a adesividade aos agregados (Zaumanis & Mallick, 2015).

Paralelamente, há resíduos ou subprodutos que resultam de processos de outras indústrias que podem ser utilizados com vantagem em simultâneo com o aumento das taxas de MBR. Indicam-se como exemplos, o óleo alimentar usado (OAU) e o BHO (*bio-heating oil*). O primeiro tem sido produzido de forma crescente à escala mundial (Xu et al., 2023), enquanto o segundo é um subproduto da produção de biodiesel a partir de OAU e de gorduras animais utilizados como matéria-prima principal, habitualmente utilizado como combustível para alimentação de caldeiras (Capitão et al., 2025). Estes bio-óleos constituem soluções promissoras para rejuvenescer o betume envelhecido presente nas MBR. Estes aditivos amolecem o ligante por aumentarem a proporção dos componentes mais leves do ligante, enquanto reduzem a quantidade de asfaltenos (Azahar et al., 2016). A sua utilização oferece benefícios ambientais por reduzir a deposição de resíduos em

aterros e redes de esgotos, contribuindo para a diminuição do consumo energético na produção de misturas betuminosas com MBR.

Este artigo sintetiza os resultados de desempenho mecânico de misturas betuminosas com 60% e 80% de MBR, utilizando OAU ou BHO como rejuvenescedores. Além disso, apresenta uma análise comparativa de custos diretos destas misturas e de soluções convencionais, a qual mostra vantagens económicas consideráveis para estradas de tráfego médio e baixo. Apresentam-se também boas práticas para o uso das misturas estudadas, demonstrando o potencial destes materiais para viabilizar um maior aproveitamento de MBR, OAU e BHO.

2. Materiais

As misturas betuminosas estudadas foram formuladas com 60% e 80% de MBR e OAU como rejuvenescedor (Capitão et al., 2023). Durante o desenvolvimento do projeto, a guerra na Europa levou a uma subida acentuada do preço do OAU, pelo que se optou por estudar também uma alternativa mais barata com a utilização de BHO. A MBR tinha 4,5% de betume envelhecido. A Figura 1 apresenta as curvas granulométricas das misturas com 60% e 80% de MBR após extração do betume, e o fuso granulométrico aplicável em Portugal para camadas de desgaste (AC14 surf). Os agregados novos adicionados eram de natureza granítica (fração 4/16 e parte do pó de pedra 0/4) e calcária (parte do pó de pedra 0/4 e filler). As composições utilizadas nas misturas após o estudo de formulação são as indicadas no Quadro 1.

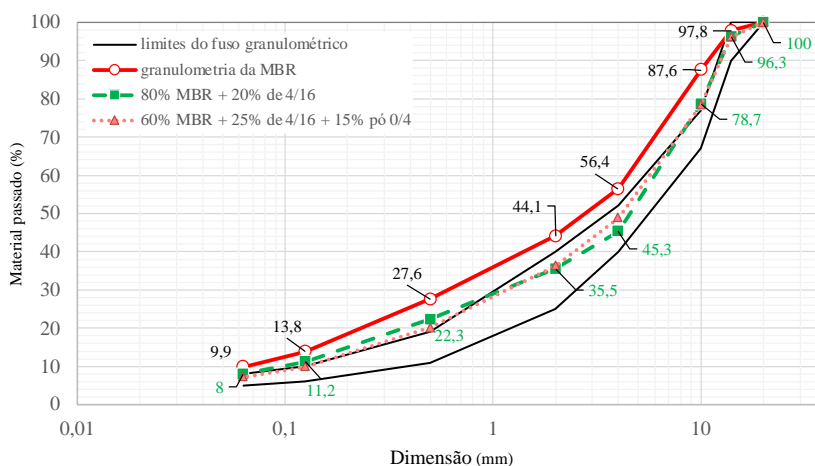


Figura 1. Granulometrias: MBR, misturas com 60 e 80% de MBR, fuso granulométrico para camadas de desgaste

Quadro 1. Composições avaliadas após estudos de formulação

Designação	MBR (%)	OAU / BHO (%)	Agregado novo (%)	Betume novo (%)	Cera orgânica (%)	Produção
W-OAU-80	80	10	20	1	1,5	laboratório/campo
W-BHO-80	80	10	20	1	1,5	laboratório/campo
H-OAU-60	60	10	40	1	---	laboratório/campo
H-BHO-60	60	10	40	1	---	laboratório/campo

Designações: H – misturas a quente; W – misturas temperadas; 80 ou 60 – % de MBR relativa à massa total de mistura.

Notas: % de OAU ou BHO relativa à massa total de betume; % agregado novo relativa à massa total de agregado; % de betume novo relativa à massa total de mistura; % de cera orgânica para a produção de misturas temperadas relativa à massa total de betume.

A quantidade total de betume puro adicionado foi estimada considerando a superfície específica de todos os agregados na mistura (Capitão et al., 2023), resultando em 5,1% e 5,0%, respetivamente, para as misturas com 80% e 60% de MBR. Estimou-se que apenas 85% dos 4,5% de betume da MBR atuaria como ligante (o restante considerou-se *black rock*). Assim, além de 4,5% de betume da MBR (3,8% ativo), inicialmente estudaram-se composições com a adição de 0,6% e 1,0% de betume virgem no caso das misturas com 80% de MBR, e de 0,5% e 1,0% no caso das misturas com 60% de MBR. Após os estudos de formulação iniciais (Capitão et al., 2023), optou-se por misturas com 5,5% de ligante total. No entanto, considerando a percentagem de betume ativo (3,8%), compararam com a mistura de referência, um betão betuminoso convencional (AC 14 surf 35/50), com 5% de betume 35/50.

Uma vez que o objetivo do projeto era desenvolver misturas betuminosas de baixo custo, com elevada taxa de MBR, admitiram-se granulometrias que não cumpriam integralmente os limites dos fusos granulométricos, desde que fossem alcançados níveis de performance satisfatórios. Para os estudos laboratoriais, o OAU utilizado teve origem na recolha de resíduos domésticos, apresentando valores de acidez entre 0,359 e 0,426 mg KOH/g e uma densidade de 919 kg/m³. O BHO foi fornecido por uma empresa produtora de biodiesel a partir de OAU, tendo uma acidez de 2,19 mg KOH/g e uma densidade a 40°C de 926,1 kg/m³.

3. Métodos

Nos ensaios de laboratório, os constituintes das misturas betuminosas foram pré-aquecidos em estufa antes do fabrico, a 150°C e 130°C para as misturas a quente e temperadas, respetivamente. Antes da compactação, as misturas foram mantidas à temperatura de fabrico durante 30 minutos para permitir a interação do rejuvenescedor (OAU ou BHO) com o ligante. As propriedades volumétricas, Marshall e de sensibilidade à água foram determinadas sobre provetes cilíndricos com 102 mm de diâmetro e 64 mm de altura. Nos dois primeiros casos os provetes foram compactados com 75 pancadas por face e no último caso com 50 pancadas por face. Tratando-se de misturas não convencionais para pavimentos com médio/baixo tráfego, no processo de formulação para o estabelecimento da composição de base (Capitão et al., 2023) – antes da avaliação de desempenho – aceitaram-se misturas com valores Marshall de 26,5 kN e 5,0 mm para estabilidade e deformação, respetivamente. Estes valores consideraram um aumento de 25% em relação aos valores máximos atualmente aplicados para misturas produzidas com matérias-primas virgens.

A sensibilidade à água foi avaliada em ensaios de resistência à tração indireta (ITS) realizados a 15°C, utilizando como parâmetro a resistência conservada à tração indireta (ITSR), tal como indicado na norma EN 12697-12. Compactaram-se lajetas com um compactador de laboratório com setor circular. Este tipo de lajetas foi utilizado para a realização de ensaios de pista de laboratório, a 50°C (EN 12697-22), e para cortar vigas prismáticas com 410×50×50 mm³ para avaliar o módulo de rigidez (EN 12697-26) e a resistência à fadiga (EN 12697-24) em ensaios de flexão em quatro pontos (4PB), à temperatura de 20°C. Nos ensaios de fadiga, aplicaram-se níveis de deformação com amplitudes de 150 a 400 µm/m e uma frequência de ensaio de 10 Hz. Considerou-se uma redução da rigidez inicial de 50% para a condição de paragem dos ensaios de fadiga. Estes ensaios de flexão foram realizados antes e depois de um procedimento de envelhecimento acelerado com radiação UVB e ciclos de molhagem-secagem dos provetes no equipamento TEAGE (Crucho et al., 2018) para simular um tempo de serviço de 5 anos.

Construíram-se trechos experimentais de pavimentos, em condições normais de produção industrial, com as misturas a quente e temperadas validadas em laboratório, para avaliar a possibilidade de produzir e aplicar aqueles materiais em condições reais de produção. Verificaram-se alguns desvios das temperaturas de produção e compactação face às utilizadas em laboratório para as misturas com OAU, as quais foram produzidas e compactadas cerca de 20°C abaixo do objetivo, essencialmente pelo facto da MBR ter um teor em água de 3,2% que induziu uma redução da temperatura. Desses trechos de pavimentos, foram recolhidos provetes para comparar os resultados com os obtidos em laboratório e, assim, recomendar procedimentos para o uso da tecnologia estudada. A Figura 2 mostra aspetos dos trechos experimentais e das misturas produzidas.

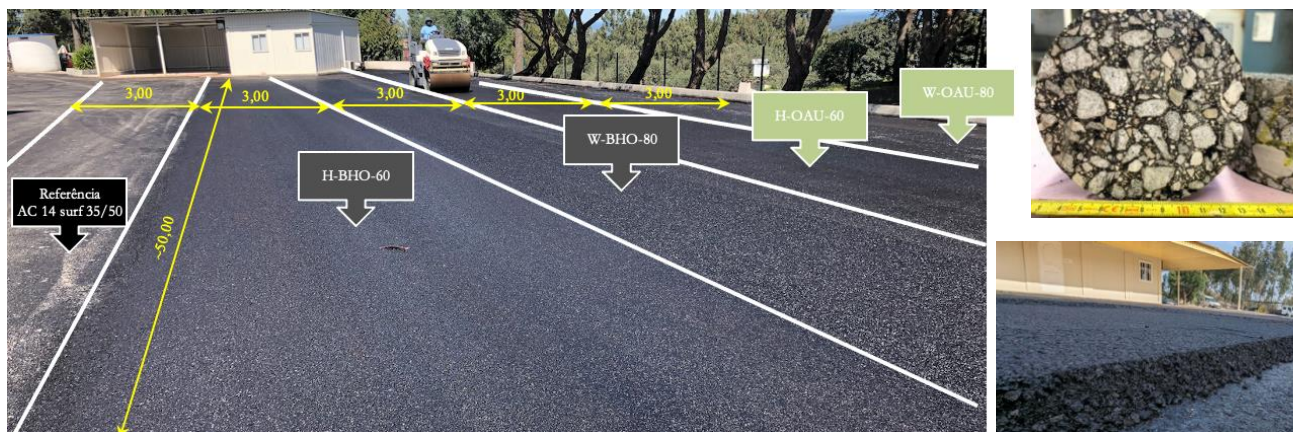


Figura 2. Aspetos dos trechos experimentais e das misturas produzidas

4. Resultados e Discussão

4.1 Propriedades volumétricas e Marshall

A Figura 3 sintetiza os resultados das propriedades volumétricas e dos ensaios de compressão Marshall realizados sobre as misturas produzidas em laboratório. Apenas se produziram provetes Marshall no âmbito do estudo de formulação realizado em laboratório.

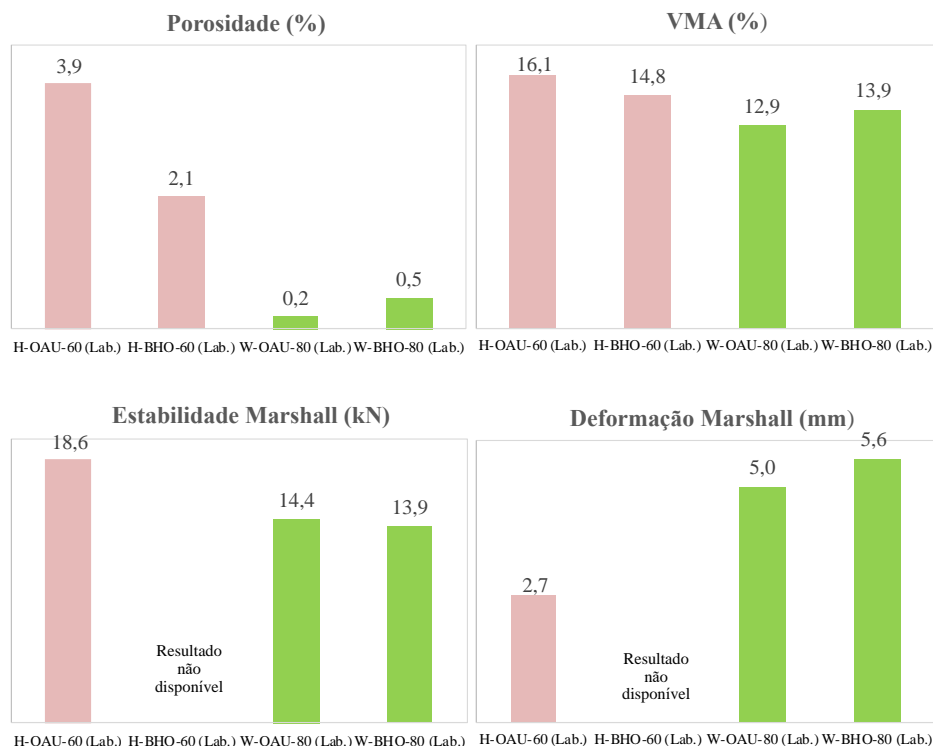


Figura 3. Propriedades volumétricas e Marshall das misturas estudadas em laboratório

Como se referiu, as curvas granulométricas não estão completamente contidas no fuso granulométrico habitualmente considerado para um AC 14 surf. Dada a elevada quantidade de finos, especialmente na mistura com 80% de MBR, a porosidade é relativamente baixa. Apesar dos baixos valores de porosidade, os resultados para o VMA – vazios na mistura de agregados – cumprem praticamente o mínimo habitual de 14%. Só por si, estes resultados não constituem impedimento a que se utilizem estas misturas, desde que o seu desempenho mecânico seja adequado para a utilização desejada. No que diz respeito à estabilidade e deformação Marshall, verificaram-se também valores um pouco fora dos limites habituais, embora isso não tenha sido impeditivo do prosseguimento do estudo, porquanto a escolha final se baseou em avaliação do desempenho mecânico.

4.2 Sensibilidade à água

A Figura 4 mostra os resultados da avaliação da sensibilidade à água, considerando a resistência conservada à tração indireta de provetes, ITSR, após condicionamento em água.

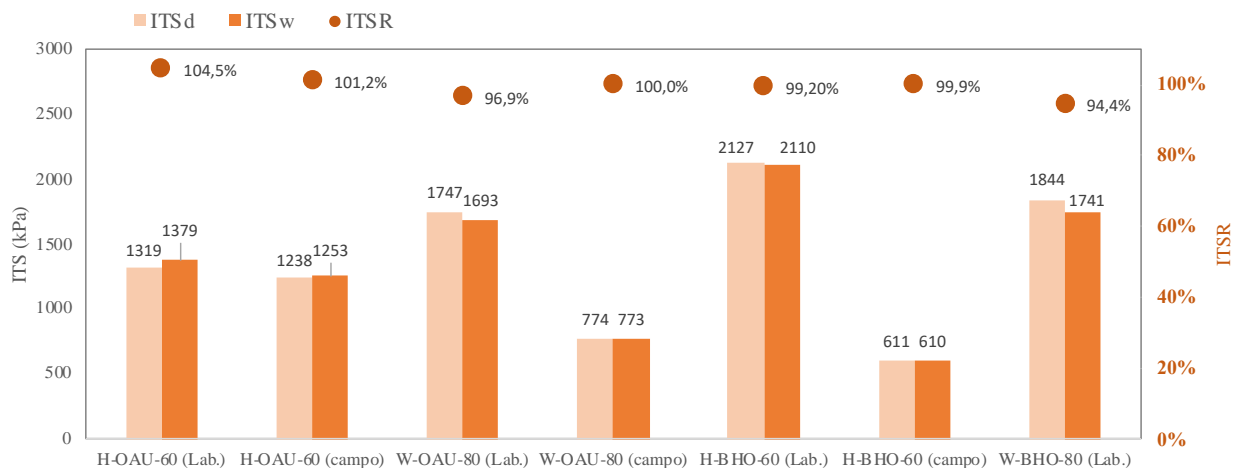


Figura 4. Propriedades volumétricas e Marshall das misturas estudadas

Os resultados obtidos para as misturas produzidas em laboratório e recolhidas no campo mostram uma baixa sensibilidade à água porque os valores de ITSr são superiores a 80%, valor normalmente exigido. No entanto, os valores de resistência à tração indireta, ITS, foram relativamente baixos para os tarolos recolhidos nos trechos experimentais para as misturas temperadas com 80% de MBR com OAU ou com BHO. Verificou-se que as porosidades destas misturas foram consideravelmente mais elevadas no campo que no laboratório. As razões identificadas para essa variação foram as seguintes: granulometria mais grosseira no campo que a de laboratório para a mesma mistura, uma percentagem total de ligante da ordem de 0,5% abaixo do esperado e gama de temperaturas de compactação no campo inferior à de laboratório. Também no caso da mistura W-BHO-60, o valor de ITS no campo foi baixo. Note-se que a porosidade dos tarolos da composição W-OAU-80 foi de 5,7%, o que pode explicar os menores valores de ITS para estes em comparação com os provetes compactados em laboratório cuja porosidade média foi de 0,2%.

O método de compactação no campo é diferente do método de compactação de provetes cilíndricos em laboratório. Enquanto no campo se utilizam cilindros de compactação, no laboratório os provetes são compactados por impactos sucessivos. Os diferentes métodos de compactação conduzem a arranjos diferentes e, por isso, tendem a originar porosidades potencialmente diferentes.

4.3 Resistência à deformação permanente

Os ensaios laboratoriais de pista, realizados em lajetas das diferentes misturas, forneceram curvas que representam a variação do cavado de rodeira com o número de passagens da roda de carga. A Figura 5 apresenta os resultados para os parâmetros RDair – o cavado de rodeira após 10.000 ciclos – e WTSair – a inclinação média das curvas entre os ciclos 5.000 e 10.000.

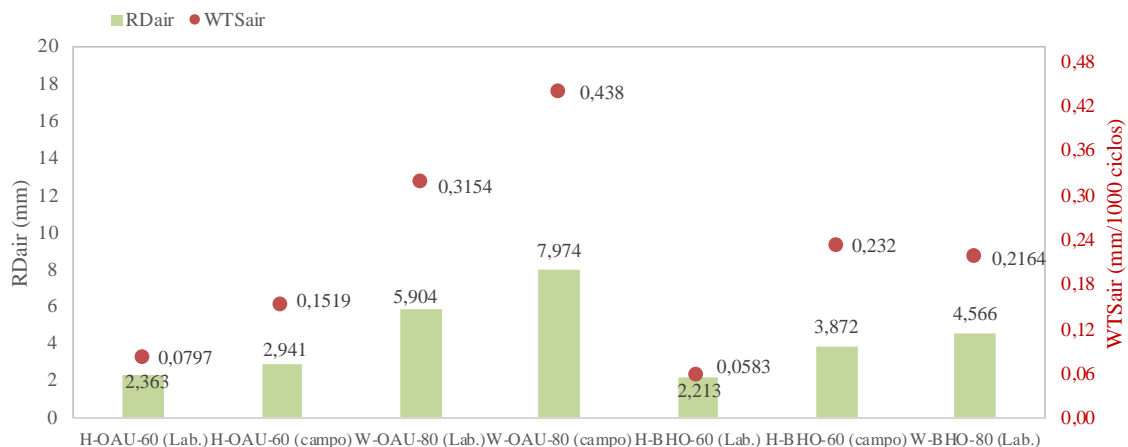


Figura 5. Resistência à deformação permanente das misturas estudadas

Os resultados mostram que as lajetas recolhidas no campo se deformaram mais que as correspondentes lajetas produzidas em laboratório, verificando-se essa tendência para RDair (deformação total) e para WTSair (inclinação da curva entre os ciclos 5.000 e 10.000). Verifica-se que para as misturas com BHO, o aumento da deformação das lajetas de campo é mais expressivo que no caso das misturas com OAU. A maior porosidade obtida no campo pode explicar diferenças observadas relativamente aos resultados obtidos para as lajetas de laboratório. A mistura com 60% de MBR e OAU é a que exibiu menor variação de resistência à deformação permanente entre as lajetas de campo e de laboratório porque as propriedades volumétricas eram semelhantes nas duas situações. Apesar disso, as lajetas de campo deformaram-se mais, pelo que a diferente estrutura do agregado em ambas as situações pode explicar o pior comportamento apresentado pelas lajetas dos trechos.

4.4 Módulo de rigidez

A Figura 6 apresenta os resultados do módulo de rigidez obtidos para as misturas estudadas. Apresentam-se os valores para 3, 5 e 10 Hz por serem os que representam melhor as condições mais correntes de dimensionamento de pavimentos. Não se dispõe de resultados de campo para a misturas com 80% de MBR e BHO.

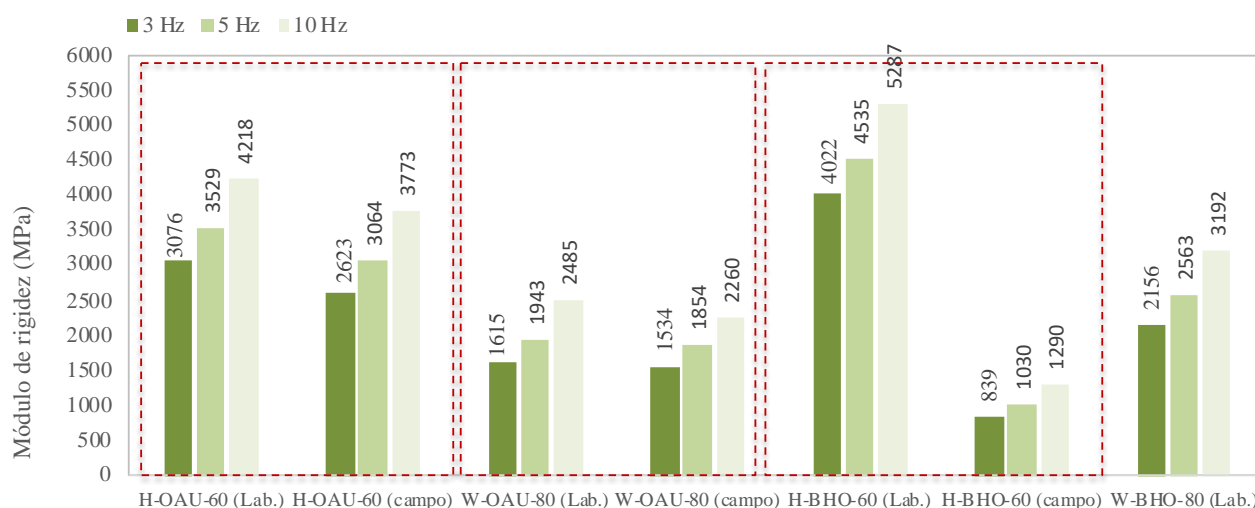


Figura 6. Resultados do módulo de rigidez das misturas estudadas

As misturas a quente com 60% de MBR apresentam valores de módulo de rigidez superiores às misturas temperadas com 80% de MBR. Esta diferença ocorreu tanto para as misturas cujo rejuvenescedor foi o OAU como para as que incorporaram BHO. A melhor estrutura de agregados das misturas com 60% de MBR e a presença de cera orgânica nas misturas temperadas com 80% de MBR explicam provavelmente estes resultados. Apesar disso, os provetes de laboratório das composições com BHO apresentaram maior módulo de rigidez que as composições semelhantes produzidas com OAU.

Comparando os provetes serrados nos trechos experimentais com os produzidos em laboratório, verifica-se que os primeiros apresentaram sempre valores mais baixos. No caso das misturas com OAU a diferença de resultados entre amostras de laboratório e de campo foi pequena. Já no caso das misturas com BHO, os módulos dos provetes de campo foram muito inferiores aos de laboratório. Note-se que a porosidade obtida nos trechos experimentais das misturas com BHO foi consideravelmente mais elevada pelas razões construtivas já referidas, o que explica a diferença de resultados.

4.5 Resistência à fadiga

Os resultados da resistência à fadiga resultam do ajuste de uma regressão do tipo potência para representar o número de repetições de carga (N) até à ruína dos provetes em função do nível de extensão (ϵ_t) aplicado. A Figura 7 apresenta a comparação do desempenho das misturas à fadiga através do valor da extensão necessária para que a ruína de fadiga ocorra para 1 milhão de ciclos de carga (ϵ_6). Quanto mais elevado é o valor, maior é a resistência à fadiga. Considerando

que o envelhecimento em serviço poderia prejudicar muito a resistência à fadiga, procedeu-se ao envelhecimento acelerado no TEAGE, de modo a avaliar a resistência à fadiga após a simulação de aproximadamente 5 anos de envelhecimento.

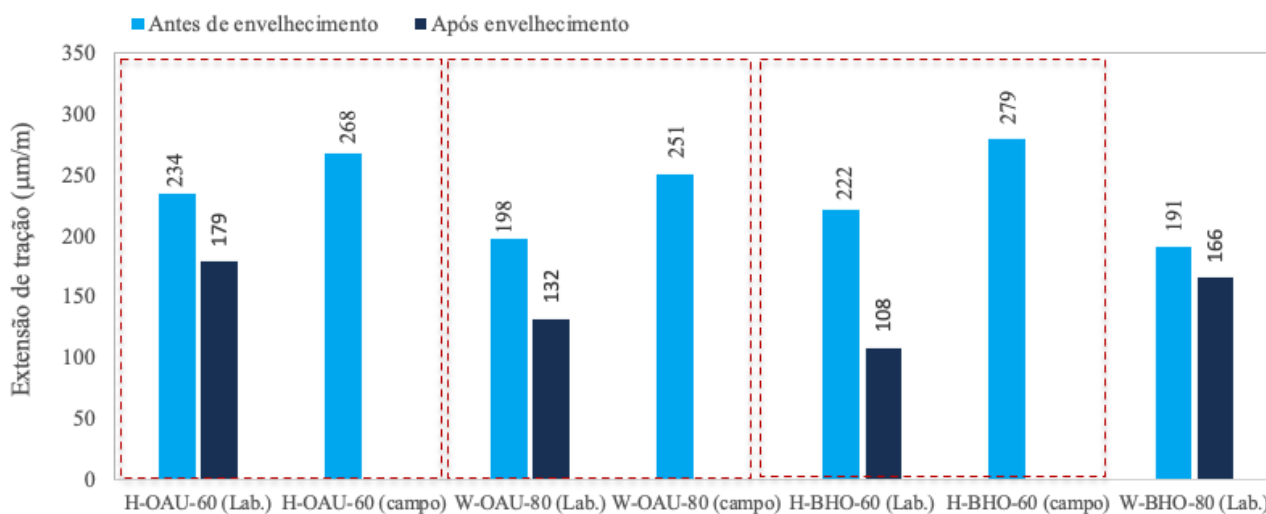


Figura 7. Resistência à fadiga representada pelo parâmetro ϵ_6 para as misturas estudadas

Os resultados mostram que apesar das diferenças assinaladas no que respeita às porosidades dos provetes de laboratório e de campo, a resistência à fadiga das misturas com OAU obtida nos trechos é adequada e até consideravelmente superior à observada para os provetes de laboratório. No caso das misturas com BHO apenas se dispõe de resultados de campo para as misturas com 60% de MBR. Tanto para as misturas com OAU como com BHO, com 60 ou 80% de MBR, a resistência à fadiga foi adequada antes de envelhecimento. Note-se que um AC 14 surf 35/50 convencional utilizado para o mesmo fim e com uma composição comparável obteve um valor de ϵ_6 de 131 $\mu\text{m/m}$. Após envelhecimento, embora haja uma redução assinalável da resistência à fadiga, as misturas mantêm uma suficiente resistência para estradas de médio/baixo tráfego.

5. Recomendações para Produção

Como se referiu, o projeto envolveu a construção de trechos experimentais de pavimentos à escala industrial. Esta atividade incluiu a produção das misturas numa central contínua de tambor-secador e misturador separado, o transporte do material para o local da obra, a aplicação com pavimentadora e compactação com um cilindro misto de rolos e de pneus. A central permitia a entrada da MBR numa posição afastada da chama, sendo o agregado virgem introduzido no tambor-secador à frente da chama, protegendo a MBR da sua ação direta. No caso da mistura com 80% de MBR, utilizou-se cera orgânica como aditivo para baixar a viscosidade do betume e, conseqüentemente, a temperatura de fabrico, tendo-se produzido uma mistura temperada. Essa abordagem permitiu verificar que é possível produzir em escala industrial este tipo de misturas, sendo necessários alguns cuidados para que as propriedades medidas em laboratório sejam alcançadas no campo. A experiência de realização dos trechos experimentais permitem propor as seguintes recomendações:

- Proteger a MBR armazenadas da exposição direta da radiação solar e da precipitação, para evitar a oxidação excessiva e manter o teor em água tão baixo quanto possível;
- No armazenamento da MBR, descarregar os camiões sobre a MBR já em pilha para facilitar a mistura entre as frações finas e grossas;
- Analisar a MBR a cada 5.000 toneladas utilizadas, reduzindo a possibilidade de variações significativas nas propriedades da mistura betuminosa final;
- Ao transferir o material da pilha para os camiões e/ou para as tremonhas da central, a pá carregadora deve retirar o material desde a base, evitando a perda de partículas finas;
- Controlar regularmente as composições e dosagens dos constituintes e a temperatura do material ao longo de todo o processo de fabrico e aplicação.

É importante assinalar que a utilização de taxas de reciclagem de MBR tão elevadas como as utilizadas neste projeto acarreta desafios, nomeadamente ao nível do controlo do processo e da composição da MBR. Com a experiência adquirida, pode afirmar-se que a tecnologia é praticável, desde que a utilização seja precedida de um processo de formulação adequado, tal como está descrito noutra publicação dos autores (Capitão et al., 2023), e seja feita uma monitorização apropriada dos constituintes da mistura, do seu processo de fabrico, transporte e colocação. Embora a separação da MBR em duas frações, uma mais fina e outra mais grosseira, possa assegurar maior controlo do processo de fabrico, no projeto CoolAsphalt não se seguiu esse procedimento por se pretender obter misturas o mais económicas possível e, portanto, reduzindo tanto quanto possível operações de processamento de matérias-primas, para além da necessária homogeneização da MBR e da sua proteção em relação aos agentes climatéricos.

6. Análise de Custos Diretos

Os custos diretos associados à utilização de MBR com OAU ou BHO como rejuvenescedor são apenas uma parte de todos os custos relacionados com o uso deste tipo de misturas betuminosas. Se a avaliação dos custos considerar todos os gastos no ciclo de vida das misturas betuminosas, ou seja, no fabrico, uso na estrada e fim de vida, o custo global pode ser consideravelmente mais elevado. A perspetiva do custo no ciclo de vida (LCCA – *life-cycle cost analysis*) é mais útil para as administrações rodoviárias, uma vez que estas gerem a infraestrutura ao longo da sua vida útil. Além dos custos administrativos, a análise LCCA tem considerado cada vez mais o ponto de vista das partes interessadas, incluindo os custos dos utilizadores e os custos ambientais.

Os custos diretos são cruciais do ponto de vista do empreiteiro, uma vez que são examinados de perto quando se avalia a viabilidade de implementar tecnologias ou constituintes alternativos para construir camadas de pavimento de betão betuminoso. A atratividade da tecnologia depende dos custos das matérias-primas e de fabrico. Outra variável que influencia o processo de decisão é a durabilidade a longo prazo da camada de betuminosa e a sua capacidade de suporte no prazo do contrato. Assim, a análise que se apresenta a seguir (Quadro 2) corresponde à realidade portuguesa, considerando valores médios de aquisição de matérias-primas, custos e rendimentos de equipamentos e de mão de obra, e as margens comuns consideradas em obras públicas. Também se apresentam custos para uma composição com 100% de MBR que foi produzida com sucesso em laboratório. Embora a central utilizada permitisse alguma flexibilidade no fabrico, não foi possível reproduzir à escala real, com as condições disponíveis, o fabrico da mistura com 100% de MBR.

Quadro 2. Custos diretos médios para as misturas de referência e para as misturas com OAU

Custos unitários e recursos considerados		Preços unitários médios	Mistura a quente ^[1]				Mistura temperada ^[1]	
			AC 14 surf 35/50	Agregados naturais + 60% MBR	Agregados naturais + 80% MBR	Agregados naturais + 100% MBR	AC 14 surf 35/50	Agregados naturais + 80% MBR
			€	€	€	€	€	€
Materiais	Betume 35/50	565 €/t	28,25	15,82	10,74	5,65	27,78	10,57
	Agregados naturais	11 €/t	10,19	4,06	2,03	-	10,19	2,03
	MBR	5 €/t	-	3,12	4,16	5,20	-	4,16
	Cera orgânica	3 000 €/t	-	-	-	-	2,48	2,48
	Óleo alimentar usado	1 000 €/t	-	5,50	5,50	5,50	-	5,50
Equipamento ^[2]	Central de fabrico	300 €/h	1,88	2,33	2,51	3,00	1,65	1,88
	Combustível da central	753 €/t	3,77	4,52	5,27	5,27	3,01	3,77
	Pá carregadora	60 €/h	0,38	0,47	0,50	0,60	0,33	0,38
	Camiónes	50 €/h	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00
	Pavimentadora	80 €/h	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80
	Cilindros compactadores	40 €/h	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80
Mão de obra	Trab. qualificados	17 €/h	0,32	0,40	0,43	0,32	0,28	0,39
	Trab. indiferenciados	10 €/h	0,50	0,62	0,67	0,50	0,44	0,62
Outros gastos & contingências (10%)			5,19	4,34	3,84	3,26	5,28	3,84
Gastos gerais (10%)			5,71	4,78	4,22	3,59	5,80	4,22
Lucro (10%)			6,28	5,25	4,65	3,95	6,38	4,64
TOTAIS (€ por ton de mistura)			69,0	57,8	51,1	43,4	70,2	51,1
TOTAIS (% do AC 14 surf 35/50)			100%	84%	74%	63%	102%	74%

^[1] Para camada de desgaste

^[2] Inclui combustível, manobreadores e manutenção

Os custos diretos das misturas a quente com MBR+OAU são 63 a 84% (MBR+BHO são 59 a 79%) dos custos de um betão betuminoso convencional semelhante, AC 14 surf 35/50. O valor mínimo é obtido para composições com 100% de

MBR. No caso das misturas temperadas, os materiais constituintes tendem a ter custos mais elevados pela necessidade de adicionar uma cera orgânica para reduzir a temperatura de fabrico. No entanto, esse acréscimo de custo pode ser compensado, em parte, pela redução do consumo de energia. Esta compensação de custos leva a que a mistura temperada com 80% de MBR + OAU tenha um custo de 74% da mistura convencional. No caso da mistura semelhante com BHO, aquela percentagem foi de 70%.

Considerando que atualmente o BHO tem um preço de venda consideravelmente inferior ao OAU, afigura-se como uma boa alternativa ao OAU. Comparativamente aos valores apresentados no Quadro 2, obtiveram-se custos por tonelada de mistura betuminosa a variar de 59, para 100% de MBR, a 79% para a mistura H-BHO-60, do custo de uma mistura convencional a quente.

A durabilidade das camadas betuminosas em serviço é outra questão relevante. Os resultados obtidos indicam que, seguindo as recomendações, as propriedades mecânicas das misturas com MBR+OAU são adequadas para estradas de médio / baixo tráfego. Assim, pode esperar-se que a vida útil do material seja comparável à de um betão betuminoso convencional, mesmo considerando um cenário de envelhecimento acelerado para avaliar a ação do clima sobre o material durante cerca de 5 anos. Apesar do bom comportamento observado, simulou-se a influência nos custos diretos da variação de $\pm 20\%$ na vida útil das misturas betuminosas relativamente ao cenário base de 10 anos de durabilidade. Pretende-se com esta análise mostrar que, apesar de existir alguma incerteza sobre a vida útil das camadas em serviço, os custos mantêm-se mais reduzidos comparativamente a um betão betuminoso convencional. A Figura 8 apresenta os resultados da variação dos custos anuais. Para o cálculo dos custos considerou-se o valor presente, não tendo sido incluída qualquer taxa de desconto.

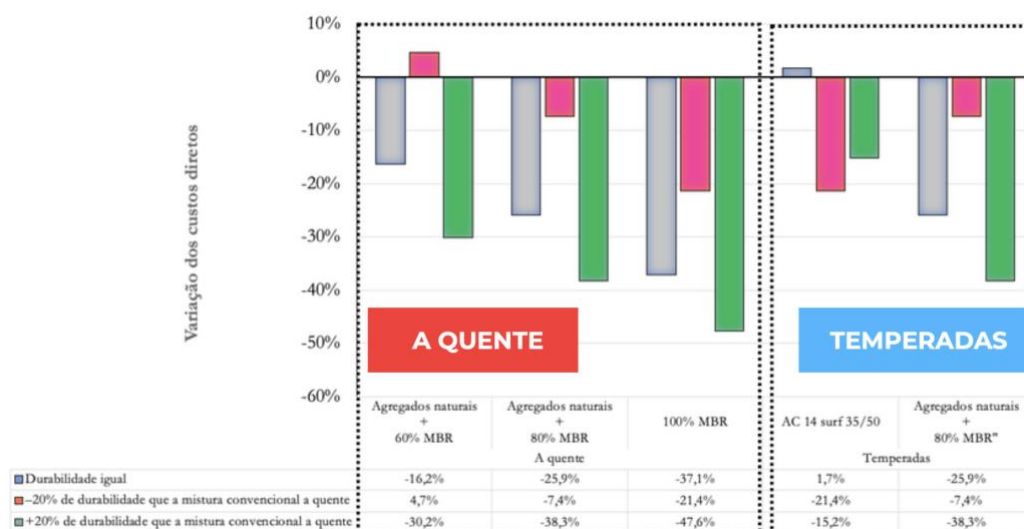


Figura 8. Variação dos custos diretos anuais considerando diferentes durabilidades

Com as misturas desenvolvidas, os custos diretos anuais variam de +4,7 a -47,6% que os calculados para o AC 14 surf 35/50 convencional. Apenas para a mistura a quente com 60% de MBR + OAU a incidência anual dos custos diretos excede o valor obtido para a mistura convencional (valor positivo no gráfico da Figura 7), quando a durabilidade da mistura com MBR é 20% inferior à da mistura convencional. No entanto, considerando os resultados de avaliação mecânica, a mistura a quente com 60% de MBR foi a que apresentou melhores características, pelo que o cenário tem uma probabilidade muito baixa de ocorrer.

7. Conclusões

O estudo apresentado para misturas betuminosas a quente com 60% de MBR e misturas temperadas com 80% de MBR, utilizando como rejuvenescedores OAU ou BHO, permite concluir que estes materiais são adequados para pavimentos de estradas com médio / baixo tráfego. Apresentam-se a seguir as principais conclusões:

- a) As composições estudadas com 60% de MBR apresentaram menores valores de porosidade que as misturas convencionais comparáveis; já as misturas com 80% de MBR, por conterem agregados com mais finos, apresentaram porosidades muito baixas; considerando o adequado desempenho mecânico obtido, os resultados da porosidade não devem impossibilitar a utilização destas misturas;
- b) Os valores da estabilidade e deformação Marshall embora possam, nalguns casos, exceder ligeiramente os limites habituais considerados para um AC 14 surf, não devem ser considerados limitativos do uso destas misturas, dado o bom desempenho mecânico observado;
- c) Verificou-se uma excelente resistência à ação da água, apesar de as misturas recolhidas no campo apresentarem baixos valores de resistência à tração indireta, resultado de uma porosidade elevada associada a aspetos construtivos;
- d) As composições estudadas apresentaram diferentes níveis de resistência à deformação permanente, embora, como acontece habitualmente, as misturas temperadas com 80% de MBR tenham resistido menos que as misturas a quente com 60% de MBR; para composições idênticas, o uso de BHO em vez de OAU levou a uma ligeira melhoria da resistência à deformação permanente;
- e) Seguindo as recomendações de produção, é possível obter valores de módulos de rigidez adequados, mesmo para as misturas temperadas com 80% de MBR, apesar dos menores módulos nestes casos;
- f) Adequada resistência à fadiga, mesmo após submeter os provetes a um processo de envelhecimento acelerado para simular as condições de longo prazo em serviço;
- g) Poupança relativamente aos custos diretos de matérias-primas e produção comparativamente a um betão betuminoso convencional.

REFERÊNCIAS

- Capitão, S. D., De Picado-Santos, L. G., & Marques Almeida, A. M. (2025). Properties of reclaimed asphalt pavement with Bio-Heating Oil as a rejuvenator considering ageing. *Transportation Engineering*, 19, 100295. <https://doi.org/10.1016/j.treng.2024.100295>
- Capitão, S., Picado-Santos, L., Almeida, A., & Mendes, F. (2023). Assessment of aged and unaged hot and warm asphalt concrete containing high reclaimed asphalt pavement rate rejuvenated with waste cooking oil. *Construction and Building Materials*, 400, 132801. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132801>
- Crucho, J., Picado-Santos, L., Neves, J., Capitão, S., & Alqadi, I. (2018). Tecnico accelerated ageing (TEAGE) – a new laboratory approach for bituminous mixture ageing simulation. *International Journal of Pavement Engineering*, 14. <https://doi.org/10.1080/10298436.2018.1508845>
- Santos, L. G. de P., Baptista, A. M. da C., & Capitão, S. D. (2010). Assessment of the Use of Hot-Mix Recycled Asphalt Concrete in Plant. *Journal of Transportation Engineering*, 136(12), 1159–1164. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)TE.1943-5436.0000190](https://doi.org/10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000190)
- Wan Azahar, W. N. A., Bujang, M., Jaya, R. P., Hainin, M. R., Mohamed, A., Ngad, N., & Jayanti, D. S. (2016). The potential of waste cooking oil as bio-asphalt for alternative binder – an overview. *Jurnal Teknologi*, 78(4). <https://doi.org/10.11113/jt.v78.8007>
- Xu, N., Wang, H., Wang, H., Kazemi, M., & Fini, E. (2023). Research progress on resource utilization of waste cooking oil in asphalt materials: A state-of-the-art review. *Journal of Cleaner Production*, 385, 135427. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135427>
- Zaumanis, M., & Mallick, R. B. (2015). Review of very high-content reclaimed asphalt use in plant-produced pavements: State of the art. *International Journal of Pavement Engineering*, 16(1), 39–55. <https://doi.org/10.1080/10298436.2014.893331>