# COOLASPHALT

GUIA DE BOAS PRÁTICAS



RECICLAGEM TOTAL DE **MISTURAS BETUMINOSAS COM ÓLEO ALIMENTAR USADO COMO REJUVENESCEDOR** 

2023











# ÍNDICE

SUMÁRIO EXECUTIVO	1
1. ENQUADRAMENTO	14
2. MATÉRIAS-PRIMAS	
Quantidades disponíveis	17
Requisitos gerais	23
Manuseamento e armazenagem	31
3. FORMULAÇÃO DAS MISTURAS BETUMINOSAS	
Formulação da composição de base	34
Verificação da composição de base	37
Fórmula para execução	38
4. FABRICO E APLICAÇÃO	
Centrais e processos de produção	40
Transporte, espalhamento e compactação	43









# ÍNDICE

5. MONITORIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES	
Controlo da composição	48
Controlo das propriedades mecânicas	49
6. EMISSÕES, RUÍDO E LIXIVIADOS	
Emissões atmosférias e ruído ambiente	51
Lixiviados	52
7. ANÁLISE DO CICLO DE VIDA	
Custos	54
ACV - Avaliação de ciclo de vida	58
8. LICENCIAMENTO	62
9. CONSIDERAÇÕES FINAIS	65
REFERÊNCIAS	67









# **EQUIPA**



André Lourenço



Rosa Mendes



Ricardo Mendes





Silvino Capitão



Luís Castro



Carlos Rodrigues







Luís Picado-Santos



José Neves



Manuel Pinheiro



Joaquim Dias



Marisa Almeida



Pedro Frade



Alice Oliveira



Nuno Guerra



Victor Francisco









# COOLASPHALT



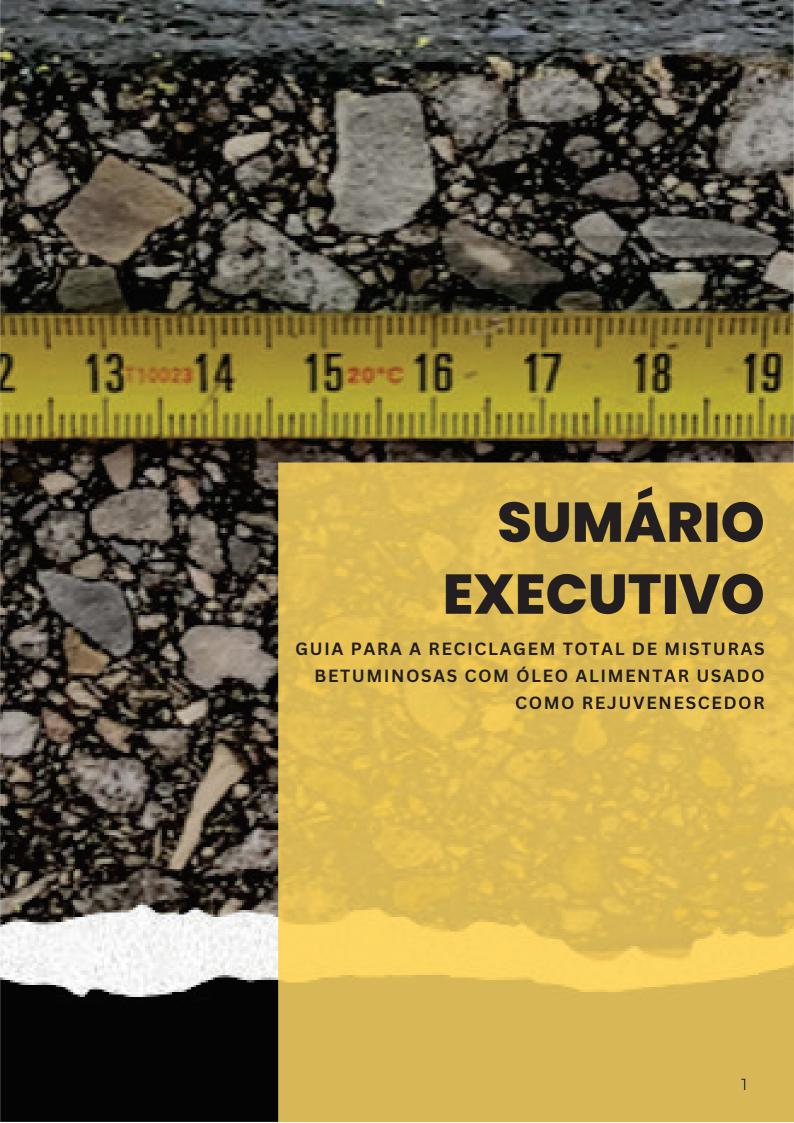
RECICLAGEM TOTAL DE MISTURAS BETUMINOSAS COM ÓLEO ALIMENTAR USADO COMO REJUVENESCEDOR







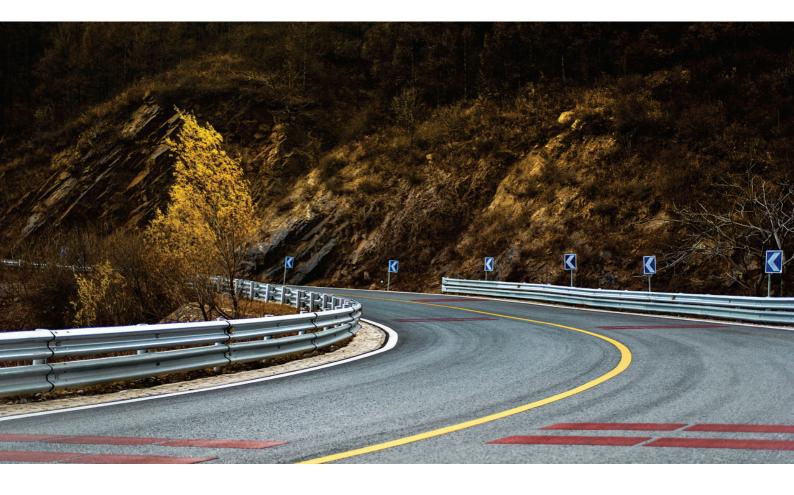




## TÍTULO E IDENTIFICAÇÃO DO DOCUMENTO

Este Guia de Boas Práticas foi elaborado no âmbito do projeto em Copromoção CoolAsphalt - Reciclagem Total de Misturas Betuminosas com Óleo Alimentar Usado como Rejuvenescedor, financiado pelos Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER), Compete2020, Lisboa2020 e Portugal 2020 (POCI-01-0247-FEDER-047037). O projeto foi liderado pela empresa Construções JJR & Filhos, SA, contando ainda com os seguintes parceiros: Instituto Politécnico de Coimbra, Instituto Superior Técnico e Centro Tecnológico da Cerâmica e do Vidro. As atividades previstas realizaram-se entre janeiro de 2021 e junho de 2023.





### **CONTEXTO**

Os pavimentos rodoviários e aeroportuários são em grande parte formados por camadas betuminosas, podendo estas ter uma espessura com algumas dezenas de centímetros de materiais betuminosos. Estes materiais compósitos têm como constituintes principais materiais não renováveis, nomeadamente rochas britadas em partículas de várias dimensões e betume asfáltico (resíduo da refinação do petróleo bruto). Por requererem um considerável consumo de energia na sua exploração e transformação, geram emissões de substâncias gasosas para a atmosfera.

Por haver uma grande utilização das infraestruturas de transporte por veículos pesados que degradam os pavimentos, é necessário proceder regularmente a ações de conservação e reabilitação dos mesmos. As referidas intervenções geram volumes elevados, e cada vez maiores, de materiais betuminosos deteriorados. A fraca adoção de tecnologias de valorização e reutilização dos resíduos produzidos na própria indústria das infraestruturas de transporte, tem originado uma deposição ambientalmente incorreta. Além disso, estas práticas de economia linear não têm permitido uma reutilização em larga escala dos resíduos betuminosos de pavimentação, nem têm promovido a integração do valor daquela matéria-prima em novas camadas de pavimentos. Decorre dessas práticas tradicionais um passivo ambiental, associado ao consumo de novas matérias-primas, não renováveis, e à deposição indevida dos resíduos gerados, que é necessário reduzir.



Dados de 2018 da European Asphalt Pavement Association indicam que mais de 90% dos 5,2 milhões de km de estradas têm misturas betuminosas aplicadas. Acresce aos valores indicados a grande maioria das pistas e caminhos de circulação aeroportuários europeus. Esta realidade mostra o enorme potencial de disponibilidade de MBR – misturas betuminosas recuperadas – com origem em pavimentos que se vão degradando, assim como uma grande quantidade de infraestruturas a exigir ações de conservação ao longo do tempo. Além disso, como as taxas de reutilização de MBR tem sido baixa, a capacidade de crescimento do mercado da produção e aplicação de materiais de pavimentação novos a partir da reutilização e valorização de misturas betuminosas de pavimentos em fim de vida é muito grande.



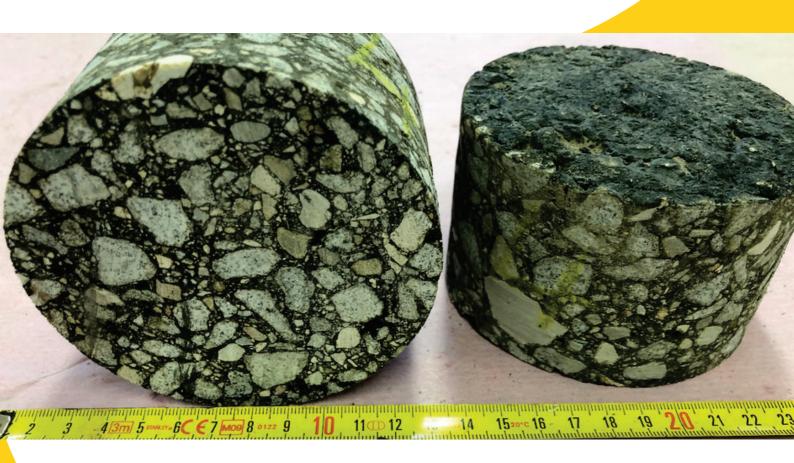
### **OBJETIVOS DO PROJETO**

O projeto CoolAsphalt surge como resposta à necessidade identificada de integrar, na indústria das infraestruturas de transporte e no habitat construído, tecnologias alinhadas com os desafios societais de:

- a) uso mais sustentável de recursos não renováveis;
- b) redução da pegada ambiental;
- c) redução de custos de conservação das infraestruturas de transporte;
- d) melhoria da qualidade de vida dos cidadãos.

Os objetivos do projeto CoolAsphalt foram o desenvolvimento de um novo conceito de mistura betuminosa, com reciclagem total de material betuminoso recuperado de pavimentos degradados, rejuvenescido com OAU (ou BHO), com menor impacte ambiental no ciclo de vida do material, mais barato, mais eco-eficiente e com características técnicas comparáveis às das misturas tradicionais.

O projeto CoolAsphalt teve como objetivo o desenvolvimento de um conceito inovador de material betuminoso para pavimentos de infraestruturas de transporte rodoviárias, criando um produto diferenciado. O conceito recorreu à valorização e reutilização, como matérias-primas, de resíduos de pavimentos betuminosos em fim de vida, disponíveis em grande quantidade em Portugal e no espaço europeu, e de óleo alimentar usado (OAU) – utilizou-se também Bio Heating Oil (BHO) como alternativa mais económica – para criar um material de pavimentação mais económico e mais eco-eficiente em comparação com as soluções convencionais, garantindo uma durabilidade adequada na maior parte das infraestruturas rodoviárias, como são as estradas de tráfego médio ou baixo. Pretendeu-se ainda reduzir o consumo de energia no fabrico com a adição de ceras orgânicas.



#### **METODOLOGIA**

O CoolAsphalt desenvolveu-se através da execução das seguintes atividades principais:

- a) Síntese das principais especificações técnicas indicadas na literatura da especialidade relativas aos constituintes (MBR, OAU, betume, agregados e aditivos) e do produto final (misturas betuminosas com MBR e OAU), bem como do processo produtivo incluindo os equipamentos necessários;
- **b)** Caracterização e formulação em laboratório de misturas com reutilização total de MBR e OAU (ou BHO);
- c) Execução de protótipos de pavimentos com misturas com incorporação integral de MBR e OAU (ou BHO);
- d) Validação dos protótipos de pavimentos;
- e) Avaliação ambiental, económica e preparação do licenciamento;
- f) Promoção e disseminação de resultados.

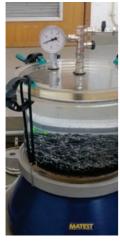


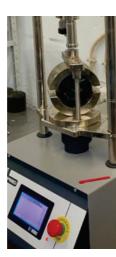
#### PRINCIPAIS RESULTADOS

Os resultados dos ensaios realizados sobre amostras de laboratório e recolhidas nos protótipos de pavimentos mostraram misturas betuminosas fabricadas a quente e temperadas, incorporando uma elevada percentagem de MBR e OAU (ou BHO como alternativa mais económica) como rejuvenescedor do ligante, são materiais adequados para estradas de tráfego pesado médio e baixo, as quais constituem a larga maioria das vias da rede rodoviária.

## Formulação das misturas:

- a) Estabelecer as percentagens de MBR e de constituintes granulares a incorporar na mistura;
- **b)** Estimar a percentagem de betume total da mistura (novo + recuperado), recorrendo a expressões baseadas na superfície específica da mistura;
- **c)** Propor a percentagem de rejuvenescedor (OAU ou BHO) com base no ensaio de compressão Marshall;
- d) Verificar a(s) composição(ões) de base recorrendo à avaliação do desempenho mecânico relativamente a sensibilidade à água e resistência à deformação permanente em ensaios de pista de laboratório.
- e) Reduzir o risco de insucesso recorrendo, eventualmente, a avaliação da rigidez e/ou da resistência à fadiga em ensaios de flexão.
- f) Complementarmente, realizar trechos experimentais, com produção e aplicação de misturas em condições de obra, para ajustar os procedimentos de fabrico e aplicação das composições validadas previamente.











### Resistência mecânica:

- a) Misturas com estabilidade e deformação Marshall até 25% mais elevadas que os requisitos habituais para pavimentos rodoviários revelaram-se adequadas.
- b) Excelente resistência à ação da água, com valores de ITSR acima de 90%.
- c) Boa resistência à deformação permanente a 50°C em ensaios de pista de laboratório (valores de PRDair máximos de 5,9% e 14,76% para misturas a quente com 60% de MBR e temperada com 80%, respetivamente).
- **d)** Módulos de rigidez adequados para estradas de médio / baixo tráfego de pesados (a 10 Hz e 20°C, superiores a 3500 MPa e 2500 MPa para misturas a quente com 60% de MBR e temperada com 80%, respetivamente).
- e) Satisfatória resistência ao fendilhamento por fadiga (a 10 Hz e 20°C, parâmetros epsilon6 superior a 234 e 198 micron para misturas a quente com 60% de MBR e temperada com 80%, respetivamente).

### Resistência ao envelhecimento:

Adequada resistência ao fendilhamento por fadiga após envelhecimento acelerado de longo prazo, simulado no TEAGE – (TEcnico Accelerated aGEing), através de radiação UV e ciclos de molhagem e secagem de amostras compactadas de mistura (a 10 Hz e 20°C, parâmetros epsilon6 superior a 179 e 132 micron para misturas a quente com 60% de MBR e temperada com 80%, respetivamente).



#### Características funcionais:

- a) Superaram os requisitos habituais relativos à profundidade da textura (MTD de 0,91 e 1,78 mm para misturas a quente com 60% de MBR e temperada com 80%, respetivamente).
- **b)** Cumpriram as exigências habituais para a resistência à derrapagem, medida com pêndulo britânico (PTV de 80 e 76,5 para misturas a quente com 60% de MBR e temperada com 80%, respetivamente).

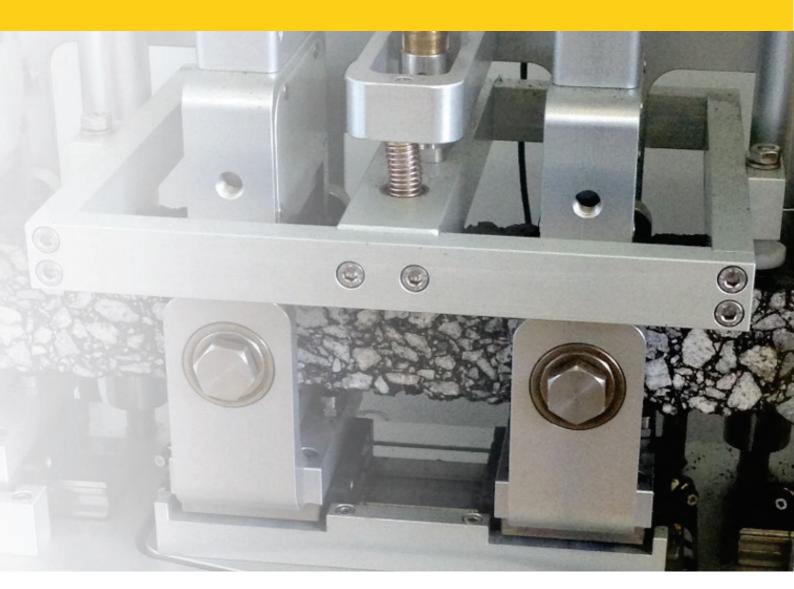




## **LIMITAÇÕES**

As circunstâncias de desenvolvimento do projeto conduziram às seguintes limitações:

- a) As misturas betuminosas com 100% de MBR não foram avaliadas relativamente a alguns aspetos do seu desempenho a longo prazo, tais como a resistência ao fendilhamento por fadiga antes e após envelhecimento acelerado;
- **b)** Apesar de os protótipos de pavimento estarem sujeitos a tráfego pesado, não foram construídos numa estrada da rede rodoviária, pelo que limitará as conclusões futuras relativas à avaliação do comportamento a longo prazo dos materiais estudados.



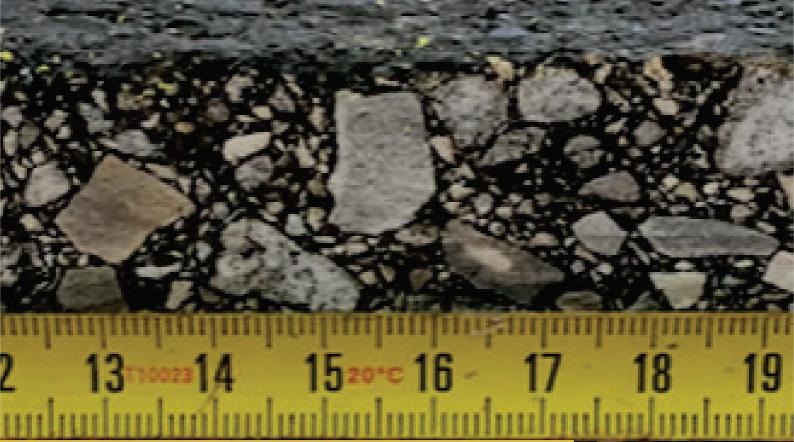


## **CONCLUSÕES**

- a) As misturas com elevada taxa MBR e OAU como rejuvenescedor contribuem para a concretização dos princípios da economia circular prosseguidos nos estados-membros da União Europeia porque reutiliza e valoriza uma grande quantidade de resíduos, reduzindo o consumo de matérias-primas não renováveis.
- b) Estes materiais de pavimentação inovadores possuem as características técnicas e a durabilidade adequadas (características superficiais e resistência à ação da água, deformação permanente e fendilhamento por fadiga).
- c) Existe matéria-prima disponível para responder à potencial procura do mercado; o consumo de óleo alimentar no mundo ultrapassa 200 milhões de toneladas anuais e em Portugal chega a 116 mil toneladas; na Europa produz-se anualmente cerca de 146,6 milhões de toneladas de MBR).
- d) O preço de venda das misturas estudadas é de 63 (para 100% de MBR) a 84% (para 60% de MBR) do preço da mistura a quente típica para camada de desgaste (mistura de referência). Mesmo quando se considera uma vida 20% mais curta para as misturas estudadas no projeto, à exceção da mistura com 60% de MBR, todas as restantes têm custos anualizados mais baixos que a mistura de referência.
- e) Verificou-se a viabilidade ambiental de utilização dos óleos alimentares usados incorporados em misturas betuminosas, sem significativo agravamento das emissões atmosféricas e do ruído emitidos pela unidade industrial onde foram realizados os ensaios semi-industriais.
- f) Numa abordagem do "berço ao portão" (ou seja, considerando os impactes desde a extração das matérias-primas até à obtenção do produto final), as misturas betuminosas com OAU e BHO reciclados possuem um menor impacte ambiental (melhoria do desempenho ambiental), comparativamente à mistura de referência sem a utilização destes produtos (melhorias entre 6 e 69%).
- g) A extensão de rede rodoviária com médio / baixo tráfego de pesados em Portugal e na generalidade dos países europeus é muito superior à rede estruturante com importância nacional, o que garante uma grande dimensão potencial do mercado para o tipo de misturas estudadas.

## RECOMENDAÇÕES

- a) Armazenagem da MBR: A MBR deve ser armazenada sob uma cobertura, abrigada do sol e da precipitação, porquanto o aumento do seu teor em água resulta em custos energéticos acrescidos no processo de fabrico para eliminar a água, e dificulta a utilização da gama de temperatura adequada às condições de produção e aplicação desejadas. Durante a descarga da MBR dos camiões a armazenagem deve ser feita por camadas, ou seja, descarregando os camiões em cima da camada já espalhada e não à frente dela; isso permite que a pá carregadora empurre o material para a frente, promovendo a mistura das frações fina e grossa, reduzindo a potencial segregação na descarga.
- b) Análise da composição da MBR: Considerando a provável variação da composição da MBR ao longo do processo de fabrico de misturas betuminosas com elevada taxa de MBR, recomenda-se para cada aplicação (para cada obra) a separação e a homogeneização da quantidade necessária de MBR, constituindo uma reserva necessária para fornecer toda a obra em causa, sendo ainda recomendável uma análise de caracterização do MBR a cada 5.000 toneladas aplicadas para reduzir a possibilidade de variabilidade de propriedades com significado na mistura betuminosa aplicada. A armazenagem do material homogeneizado deve ser feito em lotes de até 5 toneladas para que fique caracterizado para um trabalho de 2 a 3 semanas de pavimentação.
- c) Cuidados na transferência da MBR a partir da pilha de armazenagem: Para evitar segregação dimensional na transferência do material da pilha de armazenagem para os camiões e/ou dos camiões para as tremonhas da central, a pá carregadora deve pegar no material a partir da base da pilha. As partículas finas tendem a colocar-se na base, perdendo-se uma parte caso não sejam tidos cuidados para incluir essa fração durante a manuseamento.
- d) Controlo da temperatura e da dosagem no fabrico em central: Para reduzir a variabilidade das propriedades do produto final, controlar de forma constante as dosagens dos constituintes da mistura e a temperatura do material ao longo do processo de fabrico e aplicação.
- e) **Aplicar o método de formulação preconizado:** Estabelecer a percentagem de betume virgem e de OAU a adicionar com base no método de formulação proposto neste guia.
- f) Construir um trecho experimental: Para aumentar as possibilidades de sucesso durante o processo de fabrico e aplicação em condições reais, recomenda-se a construção de um trecho experimental para, em função dos resultados obtidos, decidir sobre a necessidade de ajustar o processo produtivo.



# **ENQUADRAMENTO**

GUIA PARA A RECICLAGEM TOTAL DE MISTURAS BETUMINOSAS COM ÓLEO ALIMENTAR USADO COMO REJUVENESCEDOR



## 1. ENQUADRAMENTO

projeto CoolAsphalt teve como objetivo o desenvolvimento de um conceito inovador de material betuminoso para pavimentos de infraestruturas de transporte, criando um produto diferenciado, recorrendo à valorização e reutilização, como matérias-primas, de resíduos de pavimentos betuminosos em fim de vida (misturas betuminosas recuperadas – MBR) e de óleo alimentar usado (OAU) para criar um material de pavimentação mais económico e mais ecoeficiente em comparação com as soluções convencionais.

O conceito inovador estabelece uma tecnologia comercial e ambientalmente competitiva que valoriza, reutiliza e reduz a crescente geração de resíduos betuminosos vindos da demolição de camadas de pavimentos existentes, utilizando como rejuvenescedor desses materiais o OAU, resíduo da indústria alimentar e doméstico.

No entanto, o uso de MBR como constituinte de novas misturas betuminosas, principalmente quando a reciclagem incorpora altas taxas de MBR, envolve alguns 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 [1], que envolve diferentes origens e mecanismos, como oxidação e volatilização dos constituintes [2]. Esses fenómenos acontecem durante as atividades de produção e construção de misturas betuminosas, bem como durante toda a vida útil do pavimento. Um betume envelhecido apresenta alterações ao nível dos seus grupos moleculares, geralmente com quantidades aumentadas de frações mais pesadas, o que resulta num ligante mais viscoso [3]. A proporção de asfaltenos face à de maltenos, por exemplo, geralmente aumenta com o envelhecimento, tendo como resultado um betume mais duro e frágil, com menos capacidade para se ligar aos agregados e de os revestir [4].



Fonte: João Crucho, 2018

## 1. ENQUADRAMENTO

O restabelecimento das propriedades do betume envelhecido a um nível satisfatório pode ser alcançado pela adição de uma quantidade considerável de betume virgem à mistura betuminosa, e/ou pela aplicação de rejuvenescedores apropriados. O grau de rejuvenescimento que o rejuvenescedor é capaz de induzir no ligante envelhecido é de grande importância para atingir um desempenho adequado da mistura betuminosa. A difusão do rejuvenescedor no ligante é crucial para alcançar o seu adequado rejuvenescimento [5]. A temperatura de fabrico é um dos parâmetros com maior influência na taxa de difusão do rejuvenescedor na mistura [6].

Parte do betume envelhecido da MBR, conhecida internacionalmente por black rock (rocha negra), não se combina com o rejuvenescedor, impedindo que o betume seja reativado [7,8]. O uso de rejuvenescedores químicos, desenvolvidos especificamente para rejuvenescer betume envelhecido, pode constituir uma parte dispendiosa da reciclagem de MBR [9]. Assim, a reutilização de alguns subprodutos como rejuvenescedores alternativos, como o OAU [9,10,11,12,13], pode trazer algumas vantagens tecnológicas e económicas, nomeadamente, pela potencial redução de custos.





13 15 15 16 17 18 19



# MATÉRIAS-PRIMAS

GUIA PARA A RECICLAGEM TOTAL DE MISTURAS BETUMINOSAS COM ÓLEO ALIMENTAR USADO COMO REJUVENESCEDOR

- 2.1 Quantidades disponíveis
- 2.2 Requisitos gerais
- 2.3 Manuseamento e armazenagem



## 2.1 QUANTIDADES DISPONÍVEIS

#### 2.1.1 Óleo alimentar usado

Verifica-se um crescente aumento do consumo de óleo alimentar em todo o mundo (Figura 1).

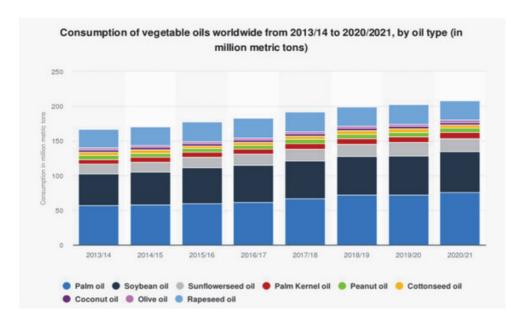


Figura 1

Consumo global de óleo vegetal em todo o mundo por tipo de óleo [14].

Tradução: óleo de palma; óleo de soja; óleo de girassol; óleo de semente de palma; óleo de amendoim; óleo de caroço de algodão; óleo de coco; azeite; óleo de colza.

A quantidade de óleo alimentar produzida deveria ser identificada nos sistemas de rastreamento de OAU. Contudo, verifica-se geralmente um défice de informação do OAU face às quantidades reportados de óleo alimentar colocado no mercado.

O sistema português de relato à Agência Portuguesa do Ambiente (APA) das quantidades de OAU produzidas em Portugal é da responsabilidade dos operadores envolvidos no ciclo de vida dos óleos alimentares. Com base na informação reportada pelos operadores envolvidos, a APA recolheu os valores relativos aos óleos alimentares indicados no Quadro 1:

Quadro 1: Dados relativos aos óleos alimentares comunicados pela APA ao INE

Óleo alimentar	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Colocação no mercado <sup>a)</sup> (ton)	76 778	126 735	101 503	125 919	132 104	116 461
Produção de OAU (ton)	22 781	29 811	25 979	74 352	19 039	29 125
Valorização de OAU <sup>b)</sup> (ton)	24 383	60 044	148 078	127 760	204 561	124 992

(Fonte: APA)

a) óleo alimentar novo produzido em Portugal; b) superior à produção nacional de OAU por haver entrada de resíduo produzido no estrangeiro (particularmente de Espanha) para valorização em Portugal.

Os dados indicados no Quadro 1 mostram que o OAU registado é uma pequena percentagem da quantidade de óleo alimentar colocado no mercado. O relatório de 2018 da APA, indica que o setor HORECA representou nesse ano 79% da produção de OAU, sendo o restante repartido pelo setor industrial (2%), doméstico (1%), comércio (4%) e outros (15%). Note-se que, o setor HORECA não se encontra obrigado a reportar informação sobre a produção de OAU no âmbito do Decreto-Lei n.º 267/2009, estando isentos, na sua generalidade, a reportar informação ao abrigo do Regime Geral de Gestão de Resíduos, pelo que os quantitativos de OAU referidos não corresponderão à sua produção efetiva.

De acordo com a Associação Zero, tendo por base dados de 2015, em Portugal cerca de 35 mil toneladas por ano de OAU serão encaminhadas para as redes urbanas de drenagem de águas residuais, o que prejudica o ambiente e corresponde a um desperdício daquele resíduo, o qual tem um elevado potencial económico. De acordo com a Zero, perde-se cerca de 25% do óleo alimentar colocado no mercado que fica retido nos alimentos ou é utilizado em processos industriais. Considerando que esta estimativa é razoável, e tendo em conta as quantidades de óleo alimentar colocadas no mercado, poderia esperar-se que as quantidades de OAU disponíveis em Portugal fossem as indicadas no Quadro 2. Às quantidades indicadas acrescem as obtidas por importação de outros países, com destaque para Espanha, as quais podem satisfazer uma procura crescente de OAU, para a produção de biodiesel, de sabão ou de misturas betuminosas.



Quadro 2: Estimativa das quantidades reais de OAU produzidas em Portugal

Óleo alimentar	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Colocação no mercado <sup>a)</sup> (ton)	76 778	126 735	101 503	125 919	132 104	116 461
Produção de OAU (ton)	57 600	95 050	76 130	94 500	99 100	87 350

(Fonte: APA)

a) óleo alimentar novo produzido em Portugal

#### 2.1.2 Misturas betuminosas recuperadas

Em Portugal a rede rodoviária nacional é constituída por cerca de 15 000 km em itinerários principais, itinerários complementares, estradas nacionais e estradas regionais [15]. À rede rodoviária nacional acrescem ainda as várias redes municipais com cerca de 70 000 km. A grande maioria destes pavimentos rodoviários são do tipo flexível, constituídos por camadas betuminosas.

Geralmente, após cumprirem o seu ciclo de vida em exploração, todos os pavimentos existentes são alvo de reabilitação/reconstrução. Desta forma, dentro de alguns anos, os materiais atualmente aplicados em pavimentos serão convertidos em resíduos de construção e demolição (RCD). As misturas betuminosas constituintes destes pavimentos são um tipo de RCD com potencial para ser reutilizado, reciclado e incorporado, novamente, em camadas de pavimentos. A este tipo particular de RCD – as misturas betuminosas alvo de demolição/fresagem – foi atribuída a designação de misturas betuminosas recuperadas (MBR).



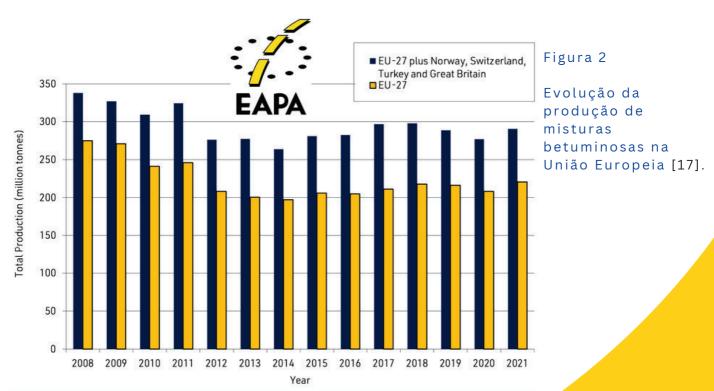
No âmbito técnico, a Norma Europeia que define as MBR é a EN 13108-8 – Misturas betuminosas, especificação dos materiais, Parte 8: Misturas betuminosas recuperadas. Sendo adotada em língua inglesa a designação de Reclaimed Asphalt (RA). A nível nacional, em concordância com a EN 13108-8, o Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) publicou a especificação LNEC E 472 (2009) – Guia para a reciclagem de misturas betuminosas a quente em central, que aborda a reciclagem de misturas betuminosas a quente em central. As publicações referidas estabelecem que as MBR podem ser provenientes das seguintes origens:

- a) Misturas betuminosas fresadas;
- b) Placas retiradas de camadas de pavimentos posteriormente desagregadas e/ou britadas;
- c) materiais excedentários da produção de misturas betuminosas.

O Decreto-Lei n.º 102-D/2020, alterado pela Lei nº 52/2021, aprova o regime geral da gestão de resíduos, o regime jurídico da deposição de resíduos em aterro e altera o regime da gestão de fluxos específicos de resíduos, transpondo as Diretivas (UE) 2018/849, 2018/850, 2018/851 e 2018/852.

A legislação nacional vem evoluindo no sentido de reduzir ao máximo a eliminação de resíduos por deposição em aterro. Inclusivamente, menciona a proibição, a partir de 2030, de envio para aterro quaisquer resíduos suscetíveis de reciclagem ou valorização. Para atingir este objetivo, como mecanismo de incentivo a legislação vem atualizar a taxa de gestão de resíduos (TGR), introduzida pelo Decreto-Lei n.º 178/2006. A TGR é aplicável aos sistemas de gestão de resíduos urbanos e instalações de tratamento de resíduos, devendo ser repercutida nas tarifas e prestações financeiras cobradas ao longo da cadeia de valor da gestão de resíduos até ao produtor dos resíduos.

A nível europeu a *European Asphalt Pavement Association* (EAPA) publica anualmente um relatório com diversas informações relativamente à industria das misturas betuminosas. Apesar de nestas publicações as informações relativamente a Portugal serem muito limitadas, é possível ter uma perspetiva da realidade europeia e estimar a situação nacional. A publicação mais atual é o relatório anual referente a 2021 [17]. A Figura 2 apresenta as quantidades de misturas betuminosas produzidas em vários países europeus durante de 2008 a 2021.





Relativamente aos dados indicados na Figura 2 para a UE-27 e os quatro países não integrados, o rácio médio entre a produção de MBR e a produção de misturas betuminosas novas é de 19,2% e o relação entre as MBR disponível para se utilizada pela indústria de betuminosos e o material designado por *site-won asphalt* (1) é de 57,2%.

Na publicação da European Asphalt Pavement Association (EAPA) as informações referentes a Portugal são muito limitadas. Sabe-se que em 2021 foram produzidas no país 4 milhões de toneladas de misturas betuminosas novas, mas não são conhecidas as quantidades de MBR geradas e disponíveis para utilização.

Considerando para Portugal rácios semelhantes aos de Espanha ou tendo por base o valor médio dos países indicados na da Figura 2, a quantidade de MBR produzida anualmente em Portugal estará entre 390 a 780 mil toneladas. A quantidade de MBR disponível em cada ano para aplicação pela indústria estará compreendida entre 300 a 600 mil toneladas. Provavelmente, estes valores são conservativos, pois a produção anual de misturas betuminosas entre 2010 e 2018 foi o dobro da registada no período de 2019-2020.

(1) Site-won asphalt: material betuminoso fresado ou na forma de lajes removidas de pavimentos, ou rejeitado, de produção em excesso ou deficiente produção. Este materiais necessitam de avaliação, requerendo frequentemente processamentos antes de adquirirem características adequadas para utilização.



## 2.2 REQUISITOS GERAIS

#### 2.2.1 Óleo alimentar usado

A fritura em óleo alimentar é um processo no qual os alimentos são fritos a uma temperatura entre 150-200°C na presença de humidade, antioxidantes e pró-oxidantes [18]. Durante a fritura ocorrem várias reações, como hidrólise, polimerização, isomerização e decomposição do óleo [19]. A composição e variação nos compostos orgânicos que compõem o OAU dependem da origem do óleo e da reação de degradação durante a fritura. A reação de degradação aumenta a densidade, a viscosidade, o calor específico, a formação de espuma e o valor total do material polar do óleo [20]. As condições de utilização do óleo alimentar durante a fritura produzem alterações das propriedades físicas e químicas do produto, o que origina OAU com diferentes composições e propriedades. Na literatura internacional podem encontrar-se valores habituais das propriedades do OAU produzido que se reproduzem no Quadro 3.

Quadro 3: Propriedades de vários OAU referidos na literatura

Origem do OAU	Densidade (kg/m³)	Viscosidade cinemática (mm²/s)	Visc. absoluta (cP)	Teor em humidade (%)	Ponto de inflamação (°C)	Acidez (mg KOH/g)
Amostra de óleo industriala)	928±200	-				7,24±0,11
Amostra de óleo industriala)	921±130	-				3,57±0,07
Restaurante local <sup>a)</sup>	910±230					3,66±0,21
Barraca de comida na estrada <sup>a)</sup>	912±170					5,39±0,18
Barraca de comida na estrada a)	936±110					9,01±0,21
Cozinha mista e barraca de frango frito <sup>b)</sup>		39,54 – 6,04		0,02 - 0,15	198 - 290	
OAU de palma <sup>c)</sup>	905		37		168	
OAU de oleína de palma <sup>d)</sup>	915,7±0,003	51,04±0,01*		0,12	309±1	2,04±0,03

a) Haq, I. et al. (2021) [21]; b) Aliasa, N. et al. (2018) [22]; c) Ali, Md e Jaafar, M. (2019) [23];

d) Chuah, L. et al. (2015) [24].

<sup>\*</sup> à temperatura de 40°C

O OAU de melhor qualidade para rejuvenescer betume deve ter baixo valor de acidez (ou seja, massa necessária de hidróxido de potássio (KOH), em miligramas, para neutralizar um grama de OAU) [13]. Zhang et al. [13] concluíram que valores de acidez do OAU na gama de 0,4 a 3,2 mg KOH/g são preferíveis para que se obtenha um betume rejuvenescido com boa reologia a temperaturas de serviço altas. Também verificaram que os OAU com valores de acidez entre 0,4 e 0,7 mg KOH/g cumprem geralmente os requisitos necessários para o rejuvenescimento de betume. Embora as amostras de OAU tenham sido obtidas em condições controladas e pouco exigentes, aquele rejuvenescedor pode ter valores de acidez baixos, desde 0,38 mg KOH/g [13], enquanto os OAU habitualmente mais disponíveis têm valores de acidez de 1,32 a 3,6 mg KOH/g [25].



O OAU de melhor qualidade para rejuvenescer betume deve ter baixo valor de acidez (ou seja, massa necessária de hidróxido de potássio (KOH), em miligramas, para neutralizar um grama de OAU) [13]. Zhang et al. [13] concluíram que valores de acidez do OAU na gama de 0,4 a 3,2 mg KOH/g são preferíveis para que se obtenha um betume rejuvenescido com boa reologia a temperaturas de serviço altas. Também verificaram que os OAU com valores de acidez entre 0,4 e 0,7 mg KOH/g cumprem geralmente os requisitos necessários para o rejuvenescimento de betume. Embora as amostras de OAU tenham sido obtidas em condições controladas e pouco exigentes, aquele rejuvenescedor pode ter valores de acidez baixos, desde 0,38 mg KOH/g [13], enquanto os OAU habitualmente mais disponíveis têm valores de acidez de 1,32 a 3,6 mg KOH/g [25].







De acordo com os valores recolhidos na bibliografia, verifica-se que é relativamente fácil obter OAU com capacidade de rejuvenescimento de betumes asfálticos de pavimentação sem que seja necessário recorrer a qualquer pré-tratamento químico. Em geral, bastará filtrar as partículas sólidas em suspensão. Contudo, a natureza altamente complexa do OAU pode limitar sua possível utilização, podendo ser necessário um pré-tratamento para que os subprodutos do OAU sejam utilizados numa finalidade especificada [26].

No Quadro 4 sintetizam-se os principais tratamentos físicos e químicos disponíveis, suscetíveis de serem realizados antes de utilizar OAU na indústria de pavimentação quando o resíduo não apresente características adequadas aos objetivos desejados, designadamente um elevado teor de FFA.

Quadro 4: Tecnologias de pré-tratamento de OAU para redução do teor de FFA e água

Tecnologias	Designação da tecnologia	Objetivo			
	Filtração e centrifugação	Remoção de partículas finas e de água do OAU			
Tratamento físico	Destilação	Redução de compostos voláteis e água do OAU			
	Separação de membrana	Redução de partículas indesejadas do OAU			
	Transesterificação catalisada por base	Redução da acidez do OAU			
Tratamento químico	Esterificação catalisada por ácido	Redução da acidez do OAU com mais de 1% de FFA (conversão de triglicéridos em esteres)			
	Transesterificação por irradiação de micro-ondas	Redução da acidez do OAU auxiliada por micro-ondas			



A água existente no OAU pode também ser removida com adição de pó de cerâmica e argila para absorver a água, através de tratamento com sílica gel, sulfato de magnésio e sódio anidro, ou por evaporação que resulte de temperaturas elevadas [26].

### 2.2.2 Bio Heating Oil – BHO

Considerando o súbito aumento de preço de mercado do OAU, afigura-se interessante a utilização de um bio-óleo, conhecido por BHO – bio heating oil, como rejuvenescedor do betume em substituição do OAU. Trata-se dum subproduto obtido no processo de produção de biodiesel a partir de OAU, utilizado principalmente na valorização energética pela indústria como combustível de baixo custo, gerando consequentemente emissões atmosféricas. Nesta altura, o BHO tem um valor de mercado em Portugal da ordem de 25% do OAU.

O processo de produção envolve a esterificação de ácidos gordos livres em meio ácido com metanol, seguida de transesterificação. O biodiesel resultante passa por separação de fases e é purificado por destilação, dando origem a um bio-óleo pesado ou resíduo de BHO. É um líquido oleoso preto de baixa viscosidade [27,28,29], cuja densidade é de cerca de 900 a 950 kg/m3 a 15°C e a viscosidade rotacional a 25°C é de cerca de 140 mPa.s [27,28,29]. Os bio-óleos obtidos de acordo com o processo descrito são geralmente formados por uma percentagem reduzida de asfaltenos e uma elevada proporção de maltenos (aromáticos, resinas e saturados) [30].

O Quadro 5 sintetiza as propriedades típicas do BHO descrito. Das propriedades indicadas, destaca-se o baixo valor da acidez, o que permite a utilização direta do subproduto como rejuvenescedor do betume, sem que seja necessário pré-tratamento.

Quadro 5: Propriedades típicas do BHO

Propriedades	Resultado		
FFA – ácidos gordos livres (%) m/m	31		
Ponto de fluidez (°C)	18		
Valor calorífico bruto (MJ/kg)	38,81		
Valor calorífico líquido (MJ/kg)	36,40		
Densidade at 40°C (kg/m³)	926,1		
Ponto de inflamação (°C)	176,5		
Acidez (mg KOH/g)	2,19		



#### 2.2.3 Misturas betuminosas recuperadas

A Norma Europeia aplicável às misturas betuminosas recuperadas é a EN 13108-8. A nível nacional, o LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil – produziu várias especificações relativas ao uso de misturas betuminosas recuperadas, particularmente, a Especificação LNEC E 472-2009 – Guia para a reciclagem de misturas betuminosas a quente em central, publicada em 2006 e atualizada em 2009.

No Caderno de Encargos Tipo Obra (CETO) da Infraestruturas de Portugal (IP) [31] já são previstas várias metodologias de reciclagem. Inclusivamente, para áreas superiores a 70 000 m2, a IP obriga à realização de estudo de viabilidade técnica e financeira envolvendo soluções de reabilitação que considerem a reutilização e/ou reciclagem dos materiais existentes. No caso da mistura reciclada a quente em central, os requisitos do CETO são extensivamente baseados na EN 13108-8 e na LNEC E 472 (neste caso, na versão de 2006).



Relativamente à incorporação de MBR em misturas betuminosas, e de acordo com a especificação LNEC E 472-2009, as propriedades da MBR e a respetiva taxa de incorporação terão influência propriedades finais da nova mistura. As propriedades da MBR mais importantes de avaliar são: o tamanho máximo das partículas, as propriedades do agregado, o teor de betume, as propriedades do betume e a quantidade de matéria estranha.

Não é admissível a utilização de resíduos de mistura betuminosa que contenham alcatrão. A suspeita relativamente à presença de alcatrão implica a realização de ensaios de despistagem, tal como indicam a norma EM 13108-8 e a especificação LNEC 472. De acordo com o CETO, também é referido que não devem ser utilizados materiais provenientes de pavimentos que apresentem estados de degradação muito avançados, nomeadamente, deformações plásticas.

De acordo com a EN 13108-8, a MBR deve ser designada em função do seu tamanho, no formato U RA d/D, em que U é o tamanho máximo das partículas de MBR, d/D é designação de tamanho dos agregados e RA significa *reclaimed asphalt*.

Nos casos em que será utilizado betume de pavimentação na mistura nova e foi utilizado betume de pavimentação na MBR, o cálculo da penetração, da temperatura de amolecimento e da viscosidade do ligante final na mistura pode ser feito recorrendo às fórmulas seguintes propostas nas EN 13108-1 e na LNEC E 472-2006):

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

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

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

onde:

PEN representa os valores de penetração em décimas de milímetro;

TAB representa os valores da temperatura de amolecimento anel e bola em °C;

V representa a viscosidade em Poise;

Pnovo representa a percentagem ponderal de betume da MBR no betume da mistura reciclada;

**PMBR** representa a percentagem ponderal de betume novo no betume da mistura reciclada;

o índice **final** corresponde ao ligante na mistura reciclada (mistura betuminosa nova contendo MBR), o índice MBR corresponde ao betume da MBR e o índice novo corresponde ao betume novo a adicionar.



Como os requisitos para as misturas betuminosas são os mesmos, independentemente da incorporação de MBR, os requisitos da mistura final são definidos pelas normas EN 13108-1 – betão betuminoso, EN 13108-2 – misturas betuminosas para camadas muito delgadas, EN 13108-3 – misturas betuminosas moles, EN 13108-4 – misturas betuminosas cilindradas a quente, EN 13108-5 – stone mastic asphalt, EN 13108-6 – mastic asphalt, EN 13108-7 – betão betuminoso drenante e EN 13108-9 – misturas betuminosas para camadas ultrafinas.

Parte do betume envelhecido da MBR, conhecida internacionalmente por *black rock* (rocha negra), não se combina com o rejuvenescedor, impedindo que o betume seja reativado [1][13]. Quanto maior for o tempo de serviço da MBR no pavimento e a exposição às condições atmosféricas (radiação, temperatura e humidade), mais elevado será o envelhecimento do ligante e, também, maior tenderá a ser a percentagem de black rock. Por isso, têm sido propostos alguns métodos simplificados para avaliar a disponibilidade de ligante envelhecido, principalmente quando a mistura incorpora uma taxa elevada de MBR [31]. Uma suposição errada da percentagem de ligante ativo pode levar a misturas betuminosas secas (falta de ligante) ou misturas com excesso de ligante [32]. A percentagem do aglutinante não mobilizável geralmente diminui quando a temperatura de fabricação aumenta. Quando não se avalia experimentalmente a quantidade de black rock, Martin et al. [32] recomendam que se considere uma disponibilidade de ligante de 75% para misturas com elevada taxa de MBR ou um ligante muito envelhecido.

No sentido de analisar qual a percentagem de betume da mistura betuminosa recuperada que não é passível de ser reativada, podem aplicar-se os procedimentos indicados por Kaseer et al. [33], tal como se ilustra na Figura 3.

Figura 3 - Princípio do método proposto pelo NCHRP 09-58 para quantificar a disponibilidade de betume reciclado [7]

## Mistura virgem

Frações de agregado & betume virgem

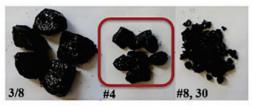


#### MBR (RAP)

Mistura com betume virgem e agregado + MBR







Frações de mistura betuminosa com MBR



Determinar **Pb** do material retido no peneiro #4 por incineração



Designada Pb de referência

(constante para uma mistura específica)

Designada **Pb da MBR** (RAP) (variável com a origem da MBR)

De acordo com Kaseer et al. [33], a metodologia baseia-se no princípio de que se não houver diferença entre a percentagem de betume das partículas revestidas (retidas no peneiro #4) da MBR e do agregado virgem, haverá 100% do betume da MBR disponível, considerando-se que a totalidade do ligante da MBR é libertado, ficando ativo e disponível na mistura betuminosa final. Ao invés, se as partículas revestidas da MBR tiverem uma percentagem de betume superior à das partículas de agregado virgem, o ligante da MBR não será totalmente libertado e, portanto, não ficará ativo e disponível na sua totalidade na mistura betuminosa final. A diferença encontrada permite, portanto, determinar a percentagem de ligante da MBR disponível [RAP BAF – fator de disponibilidade de betume].

A Figura 4 ilustra a realização em laboratório do procedimento para estimar a percentagem de betume disponível da MBR no âmbito do projeto CoolAsphalt. Para taxas de reciclagem elevadas, como foi o caso do projeto CoolAsphalt, o método utilizado não permite reproduzir essas taxas. No projeto utilizou-se 30% de MBR, o que é bastante abaixo das taxas estudadas no projeto. Além disso, as curvas granulométricas da mistura de referência e da mistura com MBR apresentam diferenças, sendo possível obter erros na estimativa, facto indicado pelos próprios autores da metodologia.

Figura 4 - Divisão da mistura betuminosa nas frações retidas nos peneiros ASTM #8, #4 e 3/8, e agregado da mistura após eliminação do betume por incineração



Divisão da mistura betuminosa solta nas frações necessárias



Frações da mistura betuminosa (da esquerda para a direita: retidas nos peneiros #8, #4, 3/8



Agregado da mistura betuminosa obtido após incineração

## 2.2.4 Betume e agregados virgens

O betume asfáltico de pavimentação e os agregado virgens devem respeitar os requisitos habituais para misturas betuminosas correntes, tais como os indicados nas normas EN 12591 e EN 13043, respetivamente.

No projeto CoolAsphalt foi utilizado um betume convencional 35/50, agregados grossos graníticos e agregados finos calcários e graníticos. Se a técnica estudada se destinar a misturas betuminosas para camadas de ligação, regularização e base, não é requerida a utilização de agregados específicos para camadas de desgaste.

#### 2.3 MANUSEAMENTO E ARMAZENAGEM

De acordo com a Especificação LNEC E 472 – 2009, as misturas betuminosas recuperadas devem ser armazenadas separadamente consoante a sua origem. Por exemplo, misturas betuminosas fresadas de diferentes camadas de pavimentos, assim como excedentes de diversas produções de misturas betuminosas, devem ser colocados em pilhas distintas. A dimensão das pilhas assim formadas deve estar limitada a valores máximos, em geral com altura não superior a 3 m, de forma a prevenir quer a segregação do material, quer a aglomeração das partículas da mistura betuminosa desagregada.

Fonte: Fernando Martinho, 2014 [34]





Fonte: R. West, 2015 [35]

Ainda de acordo com aquela especificação, as MBR devem ser acondicionadas, protegendo-as das ações atmosféricas adversas (chuvas, ventos fortes, temperaturas elevadas), e prevenir a contaminação e a escorrência de ligante. Além disso, as MBR devem ser mantidas tão secas quanto possível, quer para reduzir os riscos de lixiviação e oxidação, quer para não aumentar o consumo de energia na secagem e aquecimento dos materiais. Para isso, as pilhas de MBR devem ser feitas em locais cobertos e arejados para permitir a evaporação da água.

Habitualmente, a MBR é movida de um local para outro para alimentar a central de produção de misturas betuminosas, o que constitui uma ocasião para misturar o material e conferir-lhe maior homogeneidade. Dado tratar-se de materiais granulares, pode ocorrer segregação nas pilhas de aprovisionamento porque as partículas mais grosseiras tendem a rolar em direção à base da pilha. Esta situação resulta em heterogeneidade dimensional e de distribuição de ligante na MBR, porquanto as partículas mais finas têm um teor de betume mais elevado que as de maior dimensão. Este problema pode ser mitigado usando tapetes transportadores para a movimentação, separando a MBR em duas frações, uma mais final e outra mais grada. Quando se utiliza uma pá carregadora para movimentar os materiais da pilha de armazenamento para as tremonhas de central, a pá deve recolher material desde a base até ao topo da pilha para incluir todas as frações durante a



13-1002314 15-20°C 16 - 17 18 19

# FORMULAÇÃO DAS MISTURAS BETUMINOSAS

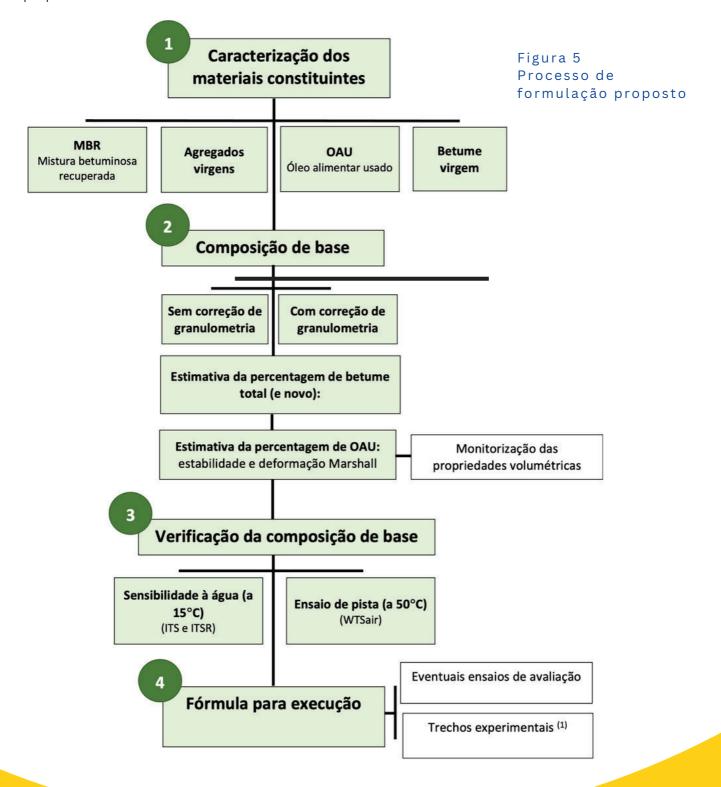
GUIA PARA A RECICLAGEM TOTAL DE MISTURAS BETUMINOSAS COM ÓLEO ALIMENTAR USADO COMO REJUVENESCEDOR

- 3.1 Formulação da composição de base
- 3.2 Verificação da composição de base
- 3.3 Fórmula para execução





Considerando a experiência adquirida com os ensaios realizados e os resultados obtidos, propõe-se um procedimento de formulação para o tipo de misturas em estudo no projeto CoolAsphalt. O objetivo é considerar, na fase de formulação, um conjunto de procedimentos que avalie aspetos relevantes de possíveis composições de base, de modo a obter o comportamento desejado para os materiais, sem tornar o procedimento demasiado complexo. Na Figura 5 apresenta-se o esquema do processo de formulação proposto.



#### 3.1 FORMULAÇÃO DA COMPOSIÇÃO DE BASE

Alguns projetos [13] têm utilizado a via húmida para rejuvenescer betumes endurecidos com OAU. Nesses casos a quantidade de rejuvenescedor a adicionar baseia-se nas propriedades do betume (por exemplo, penetração e temperatura de amolecimento) que resultam da mistura do OAU com o betume endurecido recuperado das MBR. No entanto, essa metodologia é pouco prática porque exige um demorado processo de recuperação do betume e, além disso, não permite explicitar de forma direta o efeito do OAU nas propriedades da mistura betuminosa. Assim, no projeto CoolAsphalt optou-se por estabelecer o procedimento de formulação com base nas propriedades das misturas betuminosas.

A primeira fase do processo de formulação inclui os pontos 1 e 2 da estrutura ilustrada na Figura 5, de modo a estabelecer combinações previsivelmente adequadas de **granulometria**, **percentagem de betume total** e **virgem**, e **percentagem de OAU**.

A formulação da(s) composição(ões) de base envolve os seguintes etapas:

- a) Conhecer as propriedades mais correntes dos constituintes das misturas:
  - MBR mistura betuminosa recuperada (granulometria do agregado e percentagem de betume residual);
  - Betume novo (propriedades indicadas na ficha de produto do fornecedor);
  - Agregado virgem, quando necessário (propriedades indicadas na ficha de produto do fornecedor);
  - o OAU (acidez).
- b) Estabelecer a percentagem de MBR a incorporar na mistura (desejavelmente 100% ou, caso a central de produção o não permita, uma percentagem menor, de 50% ou mais);
- c) Determinar a granulometria da mistura, decidindo sobre as percentagens dos constituintes granulares;
- d) Estimar a percentagem de betume total da mistura (novo + recuperado), recorrendo às expressões seguintes que consideram a superfície específica da mistura, garantindo, assim, o completo revestimento das partículas de agregado pelo ligante;

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

$$S_e = \frac{1}{100} (0.25 G + 2.3 S + 12 S + 135 f)$$

#### Onde,

t<sub>b</sub> – teor em betume da mistura (relação entre a massa de betume e a massa de agregado);

K – módulo de riqueza que pode assumir um valor mínimo de 3,2 para um betão betuminoso 0/14;

 $\rho_a$  – massa volúmica da mistura de agregados em g/cm<sup>3</sup>;

S<sub>e</sub> – superfície específica da mistura de agregados em m<sup>2</sup>/kg;

G, S, s e f – percentagens ponderais de agregado de dimensão, respetivamente superior a 6,3 mm, compreendida entre 6,3 e 0,315 mm, compreendida entre 0,315 e 0,08 mm, e inferior a 0,08 mm.

e) Propor a percentagem de rejuvenescedor (OAU) com base na estabilidade e deformação Marshall (aceitando composições com valores de estabilidade abaixo de 26,5 kN e deformação abaixo de 5 mm.

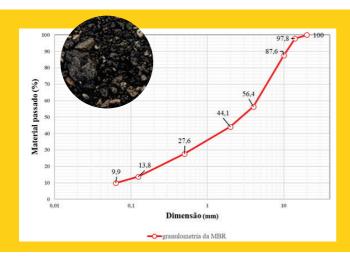
Tendo em conta o tipo de composições e os constituintes utilizados, os requisitos correntes de propriedades volumétricas, estabilidade e deformação Marshall, estabelecidos para misturas betuminosas do tipo AC podem não ser integralmente cumpridos. Considera-se que isso não constituirá um problema impeditivo da aplicação destas misturas com elevada incorporação de MBR porquanto será a avaliação do seu desempenho mecânico (a realizar na fase de verificação) que validará as composições a utilizar. Espera-se que, mesmo incumprindo alguns dos requisitos habituais, os critérios de avaliação de desempenho possam validar a aplicação daquele tipo de misturas para certas condições de serviço, designadamente as condições das estradas com médio ou baixo tráfego.

Por se estar a utilizar o método por via seca para produzir as misturas betuminosas, adicionando o OAU durante o processo de produção das misturas, optou-se por considerar a **estabilidade** e a **deformação Marshall** para estimar o **intervalo mais adequado de rejuvenescedor a adicionar**. Para isso, tomou-se uma variação de **25% relativamente aos requisitos Marshall** considerados nos cadernos de encargos em Portugal:

- **Estabilidade máxima: 26,5 kN** (cerca de 25% acima do valor de 21 kN habitualmente considerado para agregados granitóides;
- o Deformação máxima: 5 mm (cerca de 25% acima do valor de 5 mm habitualmente considerado.

#### Exemplo:

Propriedades correntes dos constituintes



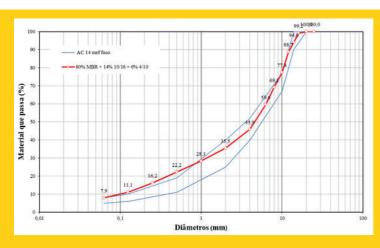


Acidez: 0,359 a 0,426 mg KOH/g



Penetração: 35 - 50 0,01 mm Temperatura de amolecimento: 50 - 58 C

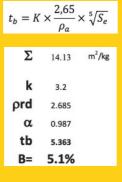
Percentagem de MBR na mistura e dos constituintes granulares

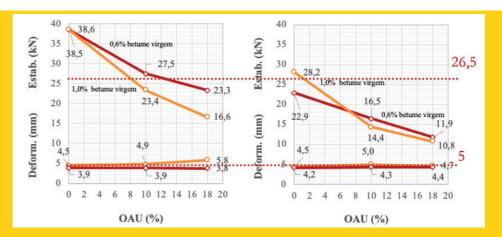




Estimar a percentagem de betume (superfície específica) e de OAU (estabilidade e deformação Marshall)

 $S_e = \frac{1}{100} (0.25 G + 2.3 S + 12 S + 135 f)$   $G \qquad 40.4$   $S \qquad 41.7$   $S \qquad 9.0$   $f \qquad 8.88$ 





#### 3.2 VERIFICAÇÃO DA COMPOSIÇÃO DE BASE

As composições resultantes da realização das etapas 1 e 2 que cumpram os requisitos de base são submetidas a um processo de verificação das propriedades mecânicas indicadas na etapa 3 do processo:

- a) Sensibilidade à água (EN 12697-12), a 15°C, através do parâmetro ITSR, para assegurar que a quantidade do binómio betume / rejuvenescedor garante a resistência da mistura à ação da humidade (Figura 6); esta avaliação garante que a quantidade do binómio betume / rejuvenescedor ficará acima do mínimo requerido;
- **b)** Resistência à deformação permanente em ensaios de pista de laboratório (EN 12697-22), a 50°C, através dos parâmetros WTSair e RDair, para assegurar que a quantidade do binómio betume / rejuvenescedor não torna a mistura demasiado suscetível à deformação a temperaturas altas (Figura 7); esta avaliação garante que a quantidade do binómio betume / rejuvenescedor ficará abaixo do máximo requerido.

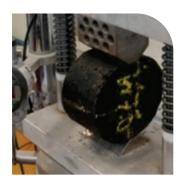
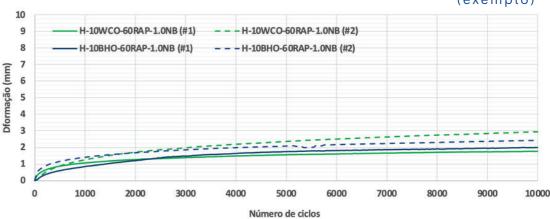




Figura 6 Sensibilidade à água (exemplo)

Figura 7 Resistência à deformação permanente (exemplo)





#### 3.3 FÓRMULA PARA EXECUÇÃO

Quando se pretende reduzir o risco de insucesso do material em serviço, poderá recorrer-se a **ensaios de avaliação de desempenho** adicionais, tais como medição do módulo de **rigidez** (EN 12697-26) em ensaios de flexão em quatro pontos (a 20°C), e/ou ensaios de **avaliação da resistência à fadiga** (EN 12697-24) em ensaios de flexão em quatro pontos (a 20°C) (Figura 8).



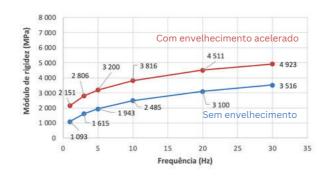
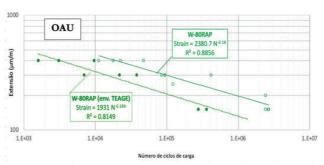


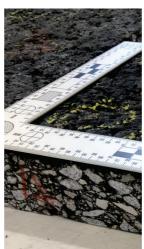
Figura 8 Módulos de rigidez e resistência à fadiga (exemplo)



Pode ainda realizar-se **trechos experimentais**, com produção e aplicação de misturas à escala real, de modo a verificar a capacidade dos procedimentos de fabrico e aplicação para a execução das composições validadas no procedimento de formulação descrito (Figura 9).









Construção de trechos experimentais, amostras extraídas e ensaios de carga in situ (exemplo)

Figura 9

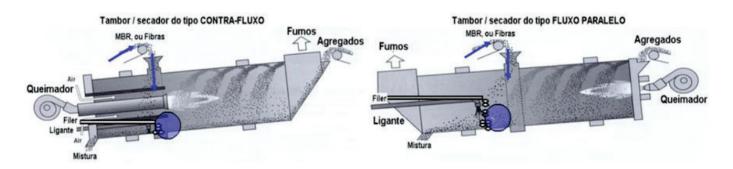


#### 4.1 CENTRAIS E PROCESSO DE PRODUÇÃO

O fabrico pode fazer-se em centrais contínuas ou descontínuas, com eventuais adaptações que permitam a incorporação de MBR. O processo deve evitar a degradação do ligante da MBR durante o fabrico, por sobreaquecimento.

No caso de centrais contínuas, as MBR devem ser introduzidas numa zona do tambor-secador (eventualmente, também misturador) protegida da chama do queimador, devendo o aquecimento e a secagem da MBR ser feita pelos gases de combustão quentes e/ou pelo contacto com os agregados virgens aquecidos à temperatura necessária para integrarem a mistura betuminosa em produção (Figura 10). Nas centrais contínuas tradicionais é aconselhável utilizar uma cortina de agregados virgens para proteger a MBR da ação direta da chama nas centrais de fluxos paralelos. Em alternativa, a MBR é introduzida atrás da chama no tambor quando o fluxo é em contracorrente [36]. Para garantir uma boa capacidade de mistura, recomenda-se o uso de anéis de entrada de MBR instalados tão proximamente do início do processo quanto possível, e câmaras de mistura longas quando as centrais são de tambor-secador-misturador [37,38]. Existem tecnologias mais complexas e menos correntes, como, por exemplo, centrais em que o tambor-secador que aquece os agregados novos está envolvido por um duplo tambor no qual é lançada a MBR, ocorrendo um aquecimento indireto desta, sem contacto com a chama do queimador. Nestes casos o tambor externo também pode ter funções de misturador dos agregados novos e dos restantes constituintes introduzidos no tambor externo. Em centrais contínuas, dependendo da configuração, podem usar-se diferentes taxas de reciclagem de MBR, tendo sido reportados taxas até 70% [36]. Na Especificação LNEC E 472 recomenda-se que a gama de reciclagem varie de 10 % a 50 %.

Figura 10 Centrais contínuas de tambor-secador-misturador com anel para introdução de MBR (Fonte: Martinho, 2014 [34])



Na reciclagem em centrais descontínuas convencionais apenas é possível tirar partido da transmissão de calor entre os agregados virgens, sobreaquecidos, para aquecer a MBR incorporada. Por essa razão, apenas é recomendada na LNEC E 472 a incorporação de 10 % a 30 % de MBR naquele tipo de centrais. Quando se utiliza tecnologia mais complexa, por exemplo, centrais com um segundo tambor-secador para aquecer as MBR e outro para os agregados virgens, podem atingir-se maiores percentagens de reciclagem de MBR, em geral até percentagens da ordem de 70 %.

A trabalhabilidade das misturas pode diminuir quando se incorporam elevadas percentagens de MBR por causa da incorporação de uma grande quantidade de aglutinante envelhecido rígido. O uso de aglutinante mais mole [39], rejuvenescedores [40] e aditivos de misturas temperadas [41] têm mostrado eficácia na melhoria da trabalhabilidade e, portanto, na mistura dos constituintes.

No projeto CoolAsphalt utilizou-se uma central contínua munida de um tambor-secador de fluxo contracorrente e de um misturador externo para fabricar as misturas aplicadas nos trechos experimentais (Figura 11), com capacidade para produzir 180 t/h.





O facto da central ter características próximas das convencionais mostrou que era possível produzir misturas betuminosas em centrais sem um elevado nível de alteração, mantendo o objetivo de produzir misturas betuminosas de baixo custo. Caso o processo apenas fosse possível em centrais muito complexas e desenhadas especificamente para produzir misturas com MBR e rejuvenescedor, o produto final perderia atratividade por ser difícil de produzir em condições próximas das que a indústria do setor dispõe.

A central contínua utilizada, cujo quadro sinótico se mostra na Figura 12, permitiu seguir algumas das indicações recolhidas na literatura a propósito das características desejáveis de centrais contínuas para o fabrico de misturas com MBR, destacando-se as seguintes:

- MBR é introduzida numa zona do tambor-secador afastada da chama;
- o possibilidade de utilização de uma cortina de agregados virgens para proteger o filtro de mangas e a MBR da ação direta da chama;
- o câmara de mistura é separada do tambor de aquecimento, para melhorar o tempo de mistura para uma maior homogeneidade, e adicionar o rejuvenescedor e o betume virgem num ponto do processo fora da influência da chama do queimador;
- o a central foi concebida para utilizar taxas de reciclagem de 50%, mas permitiu atingir 80% no caso de misturas temperadas, fabricadas com temperaturas mais baixas e com menos emissões gasosas.

Figura 12 Quadro sinótico da central contínua utilizada no projeto CoolAsphalt



Recomenda-se que a MBR seja submetida a um pré-aquecimento, por exemplo passando primeiro dentro do tambor-secador quente, com temperatura moderada, com ausência de chama ou, em alternativa, num segundo tambor com chama encapsulada, antes da introdução da MBR no processo de mistura propriamente dito. Esse procedimento permite reduzir o teor de humidade da MBR e melhorar o balanço térmico dos constituintes da mistura no processo de fabrico. Não procedendo deste modo, torna o processo de produção mais simples mas acarreta riscos adicionais, como a queima de parte do betume da MBR ou a obtenção de temperaturas de mistura final abaixo do desejado.

#### 4.2 TRANSPORTE, ESPALHAMENTO E COMPACTAÇÃO

O transporte entre a central de fabrico e o local de aplicação das misturas pode ser efetuado nas condições habituais para o betão betuminoso convencional com um camião de caixa aberta (Figura 13). Quando as distâncias a percorrer forem elevadas, tal como acontece para as misturas betuminosas convencionais, **recomenda-se** que a caixa do camião seja coberta para evitar o arrefecimento excessivo do material.

Sendo uma boa prática tomar medidas que reduzam o arrefecimento das misturas durante o transporte, salienta-se que durante o desenvolvimento do projeto CoolAsphalt não se identificaram problemas específicos de trabalhabilidade quando a gama de temperatura da mistura final respeitou os valores recomendados, tanto no caso de misturas a quente como no caso de misturas temperadas. A experiência adquirida relativa à trabalhabilidade foi o resultado da construção dos trechos experimentais em condições de reais de produção e da avaliação da trabalhabilidade em laboratório com prensa giratória de corte.

Figura 13 Transporte de misturas betuminosas no projeto CoolAsphalt











O procedimentos de espalhamento e pré-compactação do tipo de misturas estudadas no projeto CoolAsphalt foram em tudo semelhantes ao que é habitual para misturas betuminosas correntes. Face à experiência obtida, não há recomendações específicas para este tipo de misturas com elevada taxa de MBR e OAU como rejuvenescedor.

No projeto, o espalhamento das misturas betuminosas foi efetuado com uma pavimentadora Vöggel Super 1900-2, munida de capacidade de vibração na mesa de espalhamento, a qual foi utilizada na sua largura base mínima. A Figura 14 mostra aspetos do espalhamento das misturas betuminosas nos trechos experimentais.

Figura 14 Processo de colocação das misturas betuminosas no projeto CoolAsphalt







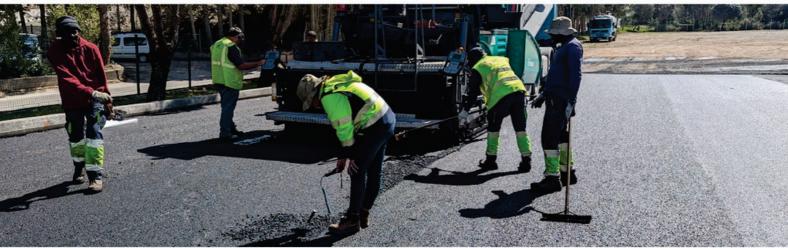






**Recomenda-se** o controlo da temperatura antes da compactação das misturas, utilizando termómetros digitais munidos de sonda para cravar no material, para avaliar a temperatura no interior da massa (Figura 15).

Figura 15 Medição da temperatura no interior da massa das misturas no projeto CoolAsphalt









A amostragem de registos de temperaturas nos vários trechos permitiu verificar uma variação considerável, pouco desejável que ocorra num processo produtivo. Os valores medidos da temperatura do material após espalhamento mostram que o **teor em água da MBR é um parâmetro crítico** para o fabrico das misturas nas condições pretendidas.

Tendo em conta que a taxa de MBR incorporada é elevada, quando o teor em água deste material é alto, uma parte significativa da energia disponível no tambor-secador é perdida na evaporação da água, comprometendo os objetivos em termos de gama de temperaturas alcançadas. Recomenda-se que o teor em água da MBR seja da ordem de 0,5% ou menos.

Considerando a boa trabalhabilidade do tipo de misturas desenvolvidas no projeto CoolAsphalt, a compactação não acarreta problemas particulares comparativamente ao processo de compactação de misturas betuminosas convencionais. Uma vez que no projeto foram construídas camadas com cerca de 6 cm de espessura, utilizou-se um cilindro misto, de rolo e de pneus, com um peso operacional de 3700 kgf, uma carga estática linear de 14,3 kgf/cm, uma largura de compactação de 1300 mm e uma carga por roda de 464 kgf. A Figura 16 mostra aspetos da compactação das misturas betuminosas dos trechos experimentais.

Figura 16 Compactação das misturas betuminosas no projeto CoolAsphalt











O teor em água da MBR é um dos parâmetros críticos do processo, tal como se referiu. No projeto CoolAsphalt verificou-se que nos casos em que a MBR tinha um teor em água da ordem de 3% a temperatura das misturas ficou abaixo do desejado. Como seria de esperar, a porosidade da mistura final aumentou e as propriedades mecânicas foram prejudicadas por essa situação.

Resulta do exposto proteger a MBR da precipitação durante o armazenamento é uma recomendação de primeiro nível.



13-1002314 1520°C 16 - 17 18 19

# MONITORIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES

GUIA PARA A RECICLAGEM TOTAL DE MISTURAS BETUMINOSAS COM ÓLEO ALIMENTAR USADO COMO REJUVENESCEDOR

5.1 Controlo da composição

5.2 Controlo das propriedades mecânicas





#### 5. MONITORIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES

#### 5.1 CONTROLO DA COMPOSIÇÃO

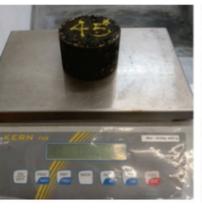
Para estudar as propriedades dos materiais efetivamente colocados nos pavimentos **recomenda-se** o controlo da composição de amostras dos pavimentos construídos. As composições volumétrica e ponderal devem ser sistematicamente controladas para identificar eventuais variações na produção.



A frequência de verificação deve cumprir os requisitos indicados na norma EN 13108-8 ou, em alternativa, ser de **três avaliações por cada 1000 toneladas de mistura betuminosa aplicada**. As propriedades a verificar são as seguintes:

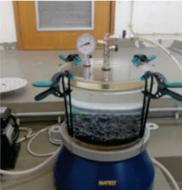
- a) Baridade (norma EN 12697-6);
- b) Porosidade e VMA vazios na mistura de agregados (norma EN 12697-8);
- c) Percentagem de ligante (norma EN 12697-39).

Os resultados devem ser obtidos em tarolos recolhidos do pavimento e provetes cilíndricos Marshall, compactados com 75 pancadas em cada face, moldados com mistura recolhida no momento da aplicação. Recomenda-se que se investiguem as razões que conduzam a resultados com variações além de ±5% comparativamente aos resultados do estudo de formulação.







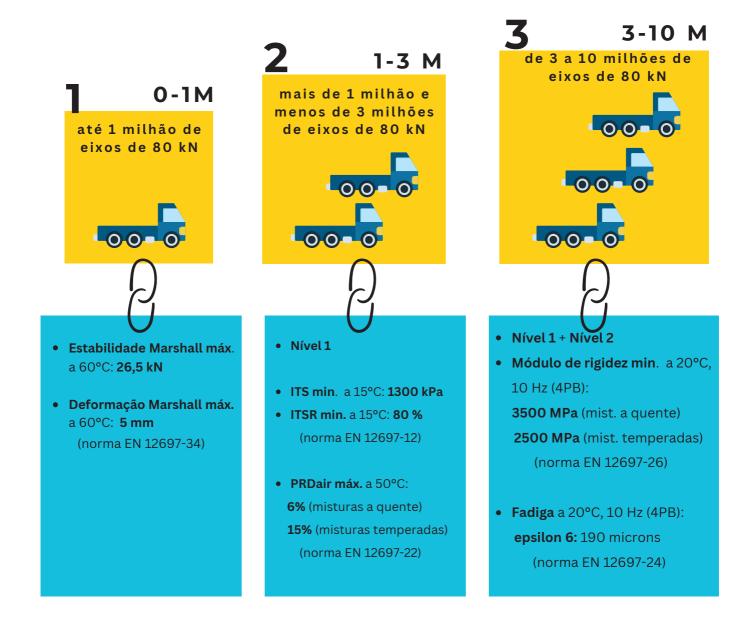


#### 5. MONITORIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES

#### 5.2 CONTROLO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS

Considerando a experiência adquirida durante o projeto CoolAsphalt para as composições estudadas, recomenda-se que o controlo das propriedades mecânicas seja efetuada em três níveis, conforme a importância da obra e o nível tráfego de pesados previsto. Os valores dos parâmetros são os recomendados tendo por base os resultados obtidos para as composições estudadas no CoolAsphalt.

Figura 17 Três níveis de controlo das propriedades mecânicas





2 13\*\*\*\*\*\*14 15\*\*\*\*\* 16 - 17 18 19

### EMISSÕES E LIXIVIADOS

GUIA PARA A RECICLAGEM TOTAL DE MISTURAS BETUMINOSAS COM ÓLEO ALIMENTAR USADO COMO REJUVENESCEDOR

6.1 Emissões gasosas6.2 Lixiviados





#### 6. EMISSÕES, RUÍDO E LIXIVIADOS

#### **6.1 EMISSÕES ATMOSFÉRICAS E RUÍDO AMBIENTE**

A caracterização das emissões atmosféricas no local de produção das misturas betuminosas rejuvenescidas, com e sem OAU, tiveram em conta o auto-controlo que a unidade industrial utilizada tem de efetuar como medida de prevenção e controlo da poluição atmosférica e garantia do cumprimento da legislação aplicável, tendo-se verificado que, na monitorização realizada no âmbito do projeto, **todos os poluentes analisados se encontravam abaixo dos respetivos valores limite definidos legalmente.** 

Atendendo aos resultados obtidos e a que a unidade de produção de mistura betuminosa possui já um sistema de tratamento de efluentes gasosos (p.e. um filtro de mangas), não se afigura necessária a adoção de qualquer outro sistema de tratamento e/ou medida de minimização de impacte ambiental da atividade para a proteção do recurso ar, decorrente da incorporação de óleos alimentares.



No que diz respeito à emissão de ruído, foi possível verificar que a utilização dos OAU na produção das misturas betuminosas não acarreta alterações significativas, na medida em que, relativamente à situação de referência, apenas ocorreu um ligeiro acréscimo do nível de ruído determinado no recetor sensível avaliado, o qual se encontra dentro da margem de incerteza das medições efetuadas. Este resultado decorre da inexistência de alterações significativas ao nível dos equipamentos necessários para implementar a pretendida incorporação dos resíduos nas misturas betuminosas.



Concluiu-se da viabilidade ambiental de utilização dos óleos alimentares usados incorporados em misturas betuminosas, sem significativo agravamento das emissões atmosféricas e do ruído emitidos pela unidade industrial onde foram realizados os ensaios semiindustriais. 51

#### 6. EMISSÕES, RUÍDO E LIXIVIADOS

#### **6.2 LIXIVIADOS**

Avaliaram-se os efeitos ambientais das misturas betuminosas com a incorporação de MBR e OAU (ou BHO), em termos de lixiviação considerando os materiais em fim de vida. Os ensaios de lixiviação permitiram avaliar os critérios de admissibilidade das misturas relativamente os valores limite constantes na legislação em vigor relativamente à sua deposição em aterro, tendo em conta a proteção dos recursos hídricos no caso das misturas betuminosas com incorporação dos resíduos tenham como destino a deposição em aterro.



Dos ensaios realizados neste âmbito verificou-se que, para as misturas ensaiadas, a maioria dos parâmetros se encontram abaixo dos valores limite estipulados no diploma em vigor, permitindo classificar as diversas misturas como inertes, com exceção de alguns parâmetros orgânicos (COT e óleo mineral), o que permite a sua classificação como resíduos não perigosos.



2 13 10023 14 15 20°C 16 - 17 18 19

# ANÁLISE DO CICLO DE VIDA

GUIA PARA A RECICLAGEM TOTAL DE MISTURAS BETUMINOSAS COM ÓLEO ALIMENTAR USADO COMO REJUVENESCEDOR

7.1 Custos 7.2 ACV



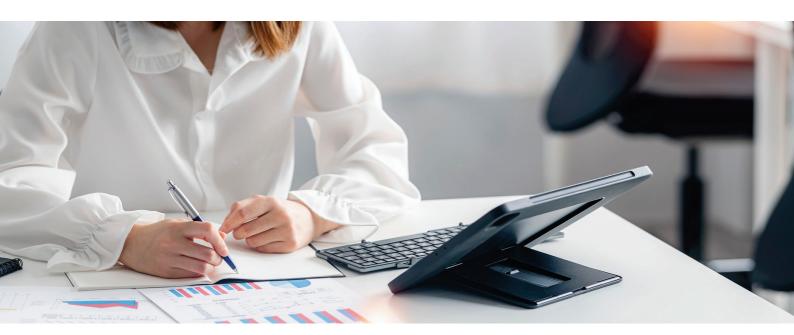


#### 7.1 CUSTOS

Os custos diretos associados à utilização de MBR com OAU 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, os incorridos 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) 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.

Na visão dos empreiteiros, os custos diretos são uma variável crucial para apoiar a decisão sobre o uso das misturas apresentadas. A atratividade da tecnologia depende principalmente dos custos das matérias-primas e dos custos de produção e aplicação das misturas betuminosas. No entanto, também influenciam a decisão, a durabilidade e o desempenho do material em serviço durante todo o período de garantia do contrato. Pelas razões indicadas, a análise que se apresenta a seguir corresponde à realidade portuguesa considerando valores médios de aquisição de matérias-primas, custos de equipamentos, custos de mão de obra e as margens comuns consideradas em obras públicas.

O Quadro 6 resume a avaliação dos custos diretos médios das misturas betuminosas a quente produzidas com os constituintes apresentados na tabela.



Quadro 6: Comparação da estimativa de custos diretos médios por tonelada de mistura betuminosa, para misturas convencionais e com MBR+OAU

					Mistura a	Mistura temperada [1]			
Custos unitários e recursos considerados		Preços unitários médios	AC 14 surf 35/50	Agregados naturais +	Agregados naturais + 80% MBR	100% MBR	AC 14	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	19	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
Custos diretos	Equipmento [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
tos		Pá carregadora	60 €/h	0,38	0,47	0,50	0,60	0,33	0,38
Sus	ud <sub>i</sub>	Camiões	50 €/h	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00
_	mb <sub>2</sub>	Pavimentadora	80 €/h	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80
	щ	Cilindros compactadores	40 €/h	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80
- 5	Mão de	Trab. qualificados	17 €/h	0,32	0,40	0,43	0,32	0,28	0,39
	obra	Trab. indiferenciados	10 €/h	0,50	0,62	0,67	0,50	0,44	0,62
(	Outros gastos & contigências (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%

<sup>[1]</sup> Para camada de desgaste

<sup>[2]</sup> Inclui combustível, manobradores e manutenção



Os custos diretos das misturas a quente com MBR+OAU são **63 a 84% dos custos de um betão betuminoso convencional semelhante**, AC 14 surf 25/50. 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 pela redução do consumo de energia. Esta compensação de custos é responsável leva a que a mistura temperada com 80% de MBR + OAU tenha um custo de **74% da mistura convencional**.

O projeto CoolAsphalt estudou ainda, como alternativa mais económica, a utilização de BHO como rejuvenescedor. O Quadro 7 resume a avaliação dos custos diretos médios para este tipo de misturas.

Quadro 7: Comparação da estimativa de custos diretos médios por tonelada de mistura betuminosa, para misturas convencionais e com MBR+BHO

				Mistura a quente [1]				Mistura temperada <sup>[1]</sup>	
Preços  Custos unitários e recursos considerados unitários médios		unitários	AC 14 surf 35/50	naturais +	Agregados naturais + 80% MBR		AC 14 surf 35/50	Agregados naturais + 80% MBR	
				€	€	€	€	€	€
	80000	Betume 35/50	565 €/t	28,25	15,82	10,74	5,65	27,78	10,57
Custos diretos	ais	Agregados naturais	11 €/t	10,19	4,06	2,03		10,19	2,03
	Materiais	MBR	5 €/t	-	3,12	4,16	5,20	-	4,16
	Ma	Cera orgânica	3 000 €/t	10	-	-		2,48	2,48
		ВНО	600 €/t		3,30	3,30	3,30	17.0	3,30
	Equipmento [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
		Camiões	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	Trab. qualificados	17 €/h	0,32	0,40	0,43	0,32	0,28	0,39
	obra	Trab. indiferenciados	10 €/h	0,50	0,62	0,67	0,50	0,44	0,62
	Outros gastos & contigências (10%)			5,19	4,12	3,62	3,04	5,28	3,62
Gastos gerais (10%)			5,71	4,53	3,98	3,35	5,80	3,98	
Lucro (10%)			6,28	4,99	4,38	3,68	6,38	4,38	
TOTAIS (€ por ton de mistura)			69,0	54,9	48,2	40,5	70,2	48,1	
TOTAIS (% do AC 14 surf 35/50)				100%	79%	70%	59%	102%	70%

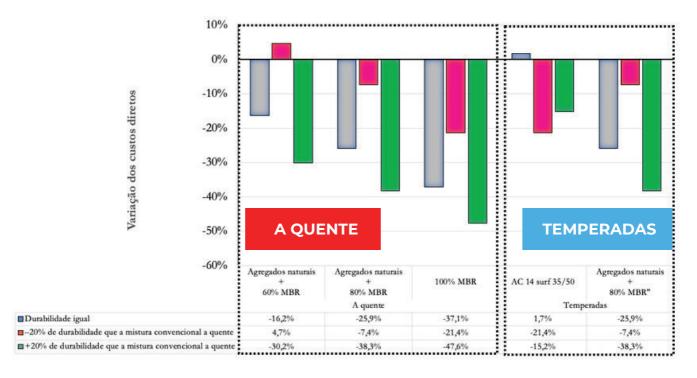
<sup>&</sup>lt;sup>[4]</sup> Para camada de desgaste <sup>[4]</sup> Inclui combustível, manobradores e manutenção

Considerando que atualmente o BHO tem um preço de venda consideravelmente inferior ao OAU, afigura-se como uma boa alternativa ao OAU. Como se observa no Quadro 7, comparativamente aos valores apresentados no Quadro 6, obtêm-se custos por tonelada de mistura betuminosa a variar de 59 a 79% do custo de uma mistura convencional a quente.

Outra questão importante relacionada aos custos diretos é a durabilidade das camadas betuminosas em serviço. Os resultados obtidos no projeto CoolAsphalt indicam que as propriedades mecânicas das misturas com MBR+OAU são adequadas e, por isso, não é de esperar uma redução da sua vida útil comparativamente à de um betão betuminoso convencional. Mesmo quando se considerou o envelhecimento acelerado que simulou a ação do clima sobre o material durante cerca de 5 anos, verificouse que o as misturas manteriam um comportamento adequado.

Apesar do bom comportamento observado, considerou-se uma vida útil de 10 anos para a durabilidade das misturas betuminosas e uma variação de ±20% para calcular os custos diretos por ano de vida útil. Esta análise justifica-se por existir alguma incerteza sobre a vida útil das camadas em serviço. A Figura 18 apresenta a variação dos custos anuais em comparação com os das misturas convencionais. Para o cálculo dos custos considerou-se o valor presente, não tendo incluída qualquer taxa de desconto.

Figura 18 Variação dos custos diretos anuais, comparativamente a uma mistura convencional a quente, considerando diferentes durabilidades



Com as misturas desenvolvidas no CoolAsphalt, os **custos diretos anuais são 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 18) 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.

#### 7.2 ACV - AVALIAÇÃO DE CICLO DE VIDA

As questões associadas à garantia da proteção ambiental são essenciais na implementação de estratégias de economia circular como seja a do presente projeto Coolasphalt, no qual se valorizam dois resíduos não perigosos, os óleos alimentares usados (OAU) e o bio heating oil (BHO), como substitutos de rejuvenescedores químicos, no processo de rejuvenescimento do betume existente em misturas betuminosas recuperadas (MBR), numa perspetiva de circularidade, no fabrico de novas misturas betuminosas com elevada taxa de MBR.

O BHO é a fração pesada da destilação do biodiesel, que é retirada do fundo da coluna de destilação e que constitui um resíduo das unidades industriais de produção de biodiesel por esterificação básica. Os **OAU de origem doméstica ou industrial** resultam maioritariamente dos processos de fritura de alimentos a nível doméstico ou na indústria alimentar.

É assim essencial **determinar os aspetos e impactes ambientais ao longo do ciclo de vida** como um meio de **fundamentação de estratégias de economia circular e sustentabilidade** do presente processo de fabrico de misturas betuminosas elevada taxa de MBR.



No âmbito do CoolAsphalt foram desenvolvidos novas produtos de misturas betuminosas, com base na incorporação de várias tipologias de subprodutos e resíduos gerados como sejam os óleos alimentares usados (OAU) e o bio heating oil (BHO), nomeadamente em 4 composições:

- H-60RAP-10WCO-1.0NB (mistura a quente, com 60% de MBR e OAU);
- W-80RAP-10WCO-1.0NB (mistura temperada, com 80% de MBR e OAU);
- H-60RAP-10BHO-1.0NB (mistura a quente, com 60% de MBR e BHO);
- W-80RAP-10BHO-1.0NB (mistura temperada, com 80% de MBR e BHO).

A metodologia selecionada para avaliar e quantificar os impactes ambientais desta estratégia (4 produtos com incorporação de MBR e OAU/BHO) comparando-a com a mistura betuminosa tradicionais (AC 14 surf), foi a avaliação de ciclo de vida (ACV), de acordo com as normas vigentes (ISO14040 e ISO14044 e sempre que aplicável a ISO14025 e a NP EN15804+A2), e em particular para o carbono a metodologia do IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change e da pegada ambiental (Recomendação EU 2021/2279).

eutrophication
non-renewable biomass

climate change
human toxicity

ozone depletion
non-renewable resources
particulate matter



Numa abordagem do "berço ao portão", ou seja, considerando os impactes desde a extração das matérias-primas até à obtenção da MBR, verificase que, de um modo geral, betuminosas com OAU e BHO reciclados possuem um menor impacte ambiental (melhoria do desempenho ambiental), comparativamente à mistura de referência sem a utilização destes produtos, na maioria das categorias de impacte ambiental em estudo e para o conjunto de métodos aplicados. Estas melhorias variam entre 6 e 69%. As únicas categorias em que essa melhoria não se verifica são a oxidação fotoquímica e a eutrofização marinha, cujos impactes se agravam face à mistura de base, o que se justifica pelo aumento ligeiro das emissões de NOx e COV nos efluentes gasosos aquando do uso dos OAU e BHO.

Por outro lado, verifica-se que as **misturas temperadas (W)** exibem um **menor impacte ambiental quando comparadas com as misturas a quente (H)**, o que se pode justificar quer pela menor temperatura de fabrico (**menores consumos energéticos** e respetivas emissões), quer pelo maior **contributo de percentagem de valorização de MBR** (60% nas misturas a quente, 80% nas misturas temperadas), o que se reflete menores quantidades de recursos virgens extraídos.

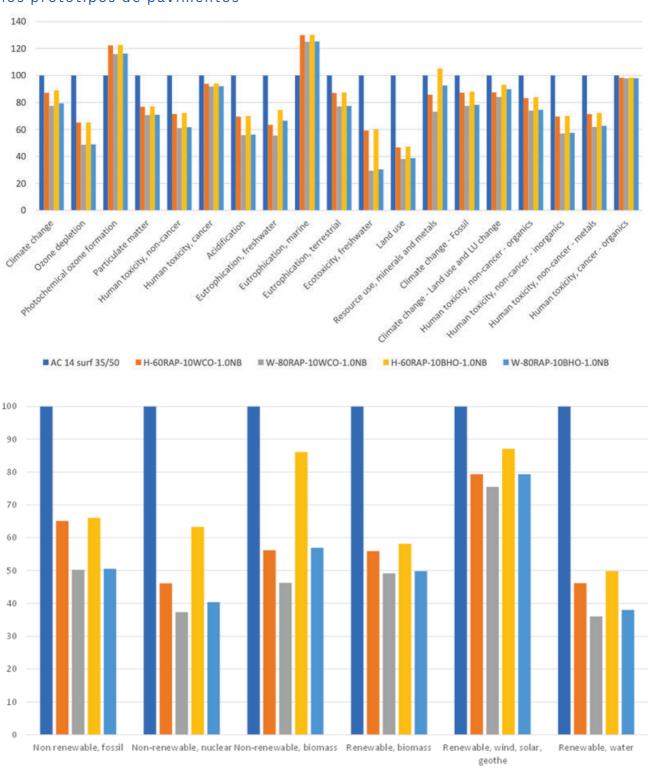
Adicionalmente, em termos da **comparação de OAU e BHO**, verifica-se que o **OAU possui em geral menores impactes ambientais**, o que traduz os impactes ambientais associados à produção do BHO.

Em termos de maiores contributos para os impactes ambientais verifica-se que a **produção de betume**, as **atividades na fábrica** (com destaque para as associadas ao consumo de energia e respetivas emissões na central betuminosa) e ainda os **transportes** são as principais fontes de impactes, dependendo das categorias de impacte, pelo que **as ações de melhoria deverão estar centradas nestes processos**. Segue-se a produção de eletricidade e a produção dos combustíveis, mas de um modo menos expressivo.

A Figura 19 apresenta os resultados obtidos no âmbito da avaliação do ciclo de vida.



Figura 19 Resultados da avaliação de ciclo de vida para as composições testadas nos protótipos de pavimentos



■ H-60RAP-10WCO-1.0NB
■ W-80RAP-10WCO-1.0NB

■ AC 14 surf 35/50

■ H-60RAP-10BHO-1.0NB



2 13 10023 14 15 20°C 16 - 17 18 19

#### LICENCIAMENTO

GUIA PARA A RECICLAGEM TOTAL DE MISTURAS BETUMINOSAS COM ÓLEO ALIMENTAR USADO COMO REJUVENESCEDOR

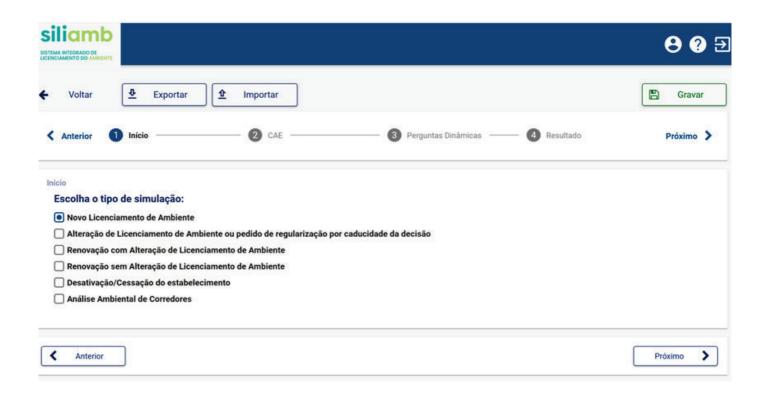




#### 8. LICENCIAMENTO

No presente projeto valorizaram-se dois resíduos não perigosos, os óleos alimentares usados (OAU) e o bio heating oil (BHO), como substitutos de rejuvenescedores químicos, no processo de rejuvenescimento do betume utilizado na reciclagem de misturas betuminosas, numa perspetiva de circularidade, trazendo vantagens tecnológicas, económicas e ambientais ao processo de reciclagem de misturas betuminosas recicladas (MBR).

O BHO é a fração pesada da destilação do biodiesel, que é retirado do fundo da coluna de destilação e que constitui um resíduo das unidades industriais de produção de biodiesel por esterificação básica. Os OUA de origem doméstica ou industrial resultam maioritariamente dos processos de fritura de alimentos a nível doméstico ou na indústria alimentar.



Conforme se concluiu pelas análises efetuadas no projeto, o impacto da introdução destes dois resíduos na produção da misturas betuminosas recicladas (MBR) é reduzido, pelo que não se mostra necessário sistemas de tratamento adicionais para a produção de MBR recorrendo a qualquer um dos resíduos utilizados, pelo que o recurso a um filtro de mangas (que constitui uma Melhor Tecnologia Disponível (MTD) para o tratamento de efluentes gasosos pulverulentos[1]) constitui a o principal sistema de minimização do impacte ambiental da atividade.

#### 8. LICENCIAMENTO

O maior impacte a nível ambiental numa unidade fabril de produção das MBR face à alteração do processo produtivo desenvolvida no presente projeto decorre da necessidade de licenciar a operação de valorização dos dois resíduos não perigosos estudados. Efetivamente, a valorização destes dois resíduos pela sua utilização com vista a substituir, parcial ou totalmente, a matéria-prima virgem no processo produtivo de material betuminoso, carece de licenciamento da atividade enquanto Operador de Gestão de Resíduos nos termos definidos no Regime Geral de Gestão de Resíduos (RGGR), publicado no anexo I do Decreto-Lei n.º 102-D/2020, de 10 de dezembro, alterado pela Lei n.º 52/2021, de 10 de agosto.

Poderão, contudo, ser equacionadas abordagens que isentem esta alteração processual da necessidade de efetuar o licenciamento, nomeadamente no caso de:

- 1) a atividade de valorização destes resíduos na produção de MBR venha a ser prevista por Regras Gerais aprovadas nos termos do artigo 66.º do RGGR, conforme previsto no artigo 59º do mesmo regime.
- 2) o operador que produz o resíduo BHO venha a solicitar com sucesso um processo de desclassificação de Resíduo como Subproduto nos termos do n.º4 do artigo 91.º do RGGR
- 3) vir a ser aplicado aos resíduos o Fim do Estatuto de Resíduo (FER) com o fim de os valorizar na produção de MBR, conforme previsto no artigo 92.º do RGGR.
- **4)** o fornecedor sujeitar a MBR com incorporação daqueles resíduos valorizados como rejuvenescedores a marcação CE, no estrito cumprimento de norma harmonizada que preveja a utilização de resíduos, conforme previsto na alínea b) do n.º 1 do artigo 93.º do RGGR,

Caso estas abordagens não possam ser concretizadas o principal impacto da implementação do projeto em termos ambientais será, conforme se referiu anteriormente, a necessidade de efetuar o licenciamento das operações de valorização dos resíduos para poder rececionar, armazenar e valorizar o BHO e/ou o OAU.

O pedido de licenciamento, de acordo com os procedimentos previstos no RGGR, é feito nos termos do disposto no Decreto-Lei n.º 75/2015, de 11 de maio, na sua redação atual, que aprova o Regime de Licenciamento Único de Ambiente (LUA) e deverá ser submetido, via eletrónica, através do módulo licenciamento único de ambiente (módulo LUA) alojado no Sistema Integrado de Licenciamento de Ambiente (SILiAmb) do portal da APA. Uma vez obtido o licenciamento a unidade de produção de MBR com valorização de resíduos não perigosos passa a ter obrigatoriedade de comunicação anual dos resíduos rececionados e valorizados na produção de MBR.

[1] Exemplo: MTD 14 c) constante na Decisão de Execução (UE) 2022/2427 da Comissão, de 6 de dezembro de 2022, que estabelece as conclusões relativas às melhores técnicas disponíveis (MTD) para sistemas de gestão e tratamento comuns de efluentes gasosos no setor químico, ao abrigo da Diretiva 2010/75/UE do Parlamento Europeu e do Conselho relativa às emissões industriais.



2 13\*\*\*\*\*\*14 15\*\*\*\*\* 16 - 17 18 19

# CONSIDERAÇÕES FINAIS

GUIA PARA A RECICLAGEM TOTAL DE MISTURAS BETUMINOSAS COM ÓLEO ALIMENTAR USADO COMO REJUVENESCEDOR





#### 9. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O GUIA DE BOAS PRÁTICAS resume os aspetos mais relevantes relativos à aplicação de misturas betuminosas com incorporação total de MBR com OAU (ou BHO, como alternativa mais económica) como rejuvenescedor desenvolvidas no CoolAsphalt.

A informação disponibilizada destina-se, não só a profissionais especializados mas também a decisores que pretendam recorrer às misturas estudadas para obter soluções mais baratas, mais sustentáveis e mais alinhadas com a circularidade do uso de recursos naturais não renováveis.

A implementação progressiva deste tipo de materiais permitirá recolher dados adicionais relativos ao seu comportamento a longo prazo em condições reais de solicitação e, assim, poder melhorar os processos produtivos à escala industrial, numa perspetiva de melhoria contínua, de modo a serem mais eficientes e eficazes na prática industrial.



#### **REFERÊNCIAS**

- **1.** J. Crucho, L. Picado-Santos, J. Neves, S. Capitão & I. L. Al-Qadi. Tecnico accelerated ageing (TEAGE) a new laboratory approach for bituminous mixture ageing simulation, International Journal of Pavement Engineering, 2018.
- **2**. R. N. Hunter, A. Self, e J. Read. The Shell Bitumen handbook, Sixth edition. Westminster, London: Published for Shell Bitumen by ICE Publishing, 2015.
- **3.** C. E. Carraher e R. B. Seymour. Seymour/Carraher's polymer chemistry, 6th ed., New York: M. Dekker, 2003.
- **4.** G. Mazzoni, E. Bocci, e F. Canestrari. Influence of rejuvenators on bitumen ageing in hot recycled asphalt mixtures, Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition), vol. 5, n. 3, pp. 157–168, jun. 2018.
- **5.** M. Zaumanis, R. B. Mallick, e R. Frank, Evaluation of different recycling agents for restoring aged asphalt binder and performance of 100 % recycled asphalt, Mater Struct, vol. 48, n. 8, pp. 2475–2488, ago. 2015.
- **6.** R. Karlsson e U. Isacsson, Application of FTIR-ATR to Characterization of bitumen rejuvenator diffusion, J. Mater. Civ. Eng., vol. 15, n. 2, pp. 157–165, abr. 2003.
- **7.** I. L. Al-Qadi, M. Elseifi, e S. H. Carpenter. Reclaimed asphalt pavement a literature review, Report of the findings of ICT R27-11 Determination of Usable Residual Asphalt Binder in RAP, Illinois Center for Transportation, Illinois, 2007.
- **8.** L. Picado-Santos, A. Baptista, e S. Capitão. Assessment of the use of hot-mix recycled asphalt concrete in plant, J. Transp. Eng., vol. 136, n. 12, pp. 1159–1164, dez. 2010.
- **9.** H. Asli, E. Ahmadinia, M. Zargar, e M. R. Karim. Investigation on physical properties of waste cooking oil Rejuvenated bitumen binder, Construction and Building Materials, vol. 37, pp. 398–405, 2012.
- **10.** M. Zargar, E. Ahmadinia, H. Asli, e M. R. Karim. Investigation of the possibility of using waste cooking oil as a rejuvenating agent for aged bitumen, Journal of Hazardous Materials, vol. 233–234, pp. 254–258, set. 2012.
- **11.** M. Chen, F. Xiao, B. Putman, B. Leng, e S. Wu. High temperature properties of rejuvenating recovered binder with rejuvenator, waste cooking and cotton seed oils, Construction and Building Materials, vol. 59, pp. 10–16, mai. 2014.
- **12.** W. N. A. W. Azahar, R. P. Jaya, M. R. Hainin, M. Bujang, e N. Ngadi. Chemical modification of waste cooking oil to improve the physical and rheological properties of asphalt binder, Construction and Building Materials, vol. 126, pp. 218–226, nov. 2016.
- **13.** D. Zhang, M. Chen, S. Wu, J. Liu, e S. Amirkhanian. Analysis of the Relationships between Waste Cooking Oil Qualities and Rejuvenated Asphalt Properties, Materials, vol. 10, n. 5, p. 508, mai. 2017.

#### **REFERÊNCIAS**

- **14.** M. Zahoor, S. Nizamuddin, S. Madapusi, e F. Giustozzi, Sustainable asphalt rejuvenation using waste cooking oil: A comprehensive review, Journal of Cleaner Production, vol. 278, p. 123304, jan. 2021.
- 15. Infraestruturas de Portugal, https://www.infraestruturasdeportugal.pt (acedido 30 de junho de 2022).
- 16. European Asphalt Pavement Association e J. J. Potti. Asphalt in Figures 2020, p. 13, 2021.
- 17. European Asphalt Pavement Association e J. J. Potti. Asphalt in Figures 2020, p. 13, 2023.
- **18.** A. Safari, R. Salamat, e O.-D. Baik. A review on heat and mass transfer coefficients during deep-fat frying: Determination methods and influencing factors, Journal of Food Engineering, vol. 230, pp. 114–123, ago. 2018.
- **19.** E. Koh e J. Surh. Food types and frying frequency affect the lipid oxidation of deep-frying oil for the preparation of school meals in Korea, Food Chemistry, vol. 174, pp. 467–472, mai. 2015.
- **20.** A. V. Tomasevic e S. S. Siler-Marinkovic. Methanolysis of used frying oil, Fuel Processing Technology, vol. 81, n. 1, pp. 1–6, abr. 2003.
- **21.** I. ul Haq et al.. Comparative analysis of various waste cooking oils for esterification and transesterification processes to produce biodiesel, Green Chemistry Letters and Reviews, vol. 14, n. 3, pp. 462–473, jul. 2021.
- **22.** N. I. Alias, K. JayaKumara, e S. Zaina. Characterization of waste cooking oil for biodiesel production, Jurnal Kejuruteraan, vol. SI 1(2), pp. 79–83, 2018.
- **23.** M. Ali e F. Jaafar. Relationships derived from physical properties of waste cooking oil / diesel blends and biodiesel fuels, Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences, vol. 54, n. 1, pp. 191–203, 2019.
- **24.** L. F. Chuah, A. R. A. Aziz, S. Yusup, A. Bokhari, J. J. Klemeš, e M. Z. Abdullah. Performance and emission of diesel engine fuelled by waste cooking oil methyl ester derived from palm olein using hydrodynamic cavitation, Clean Techn Environ Policy, vol. 17, n. 8, pp. 2229–2241, dez. 2015.
- **25.** M. Carlini, S. Castellucci, e S. Cocchi. A Pilot-Scale Study of Waste Vegetable Oil Transesterification with Alkaline and Acidic Catalysts, Energy Procedia, vol. 45, pp. 198–206, 2014.
- **26.** J. Cárdenas, A. Orjuela, D. L. Sánchez, P. C. Narváez, B. Katryniok, e J. Clark. Pre-treatment of used cooking oils for the production of green chemicals: A review, Journal of Cleaner Production, vol. 289, p. 125129, mar. 2021.
- **27.** A. Sun, Z., Yi, J., Huang, Y., Feng, D., and Guo, C. Investigation of the potential application of biodiesel by-product as an asphalt modifier. Road Materials and Pavement Design, 17 (3), 737–752, 2016.

#### **REFERÊNCIAS**

- **28.** A. Sun, D., Lu, T., Xiao, F., Zhu, X., and Sun, G. Formulation and aging resistance of modified bio-asphalt containing high percentage of waste cooking oil residues. Journal of Cleaner Production, 161, 1203–1214, 2017.
- **29.** A. Wang, C., Xue, L., Xie, W., You, Z., and Yang, X. Laboratory investigation on chemical and rheological properties of bio-asphalt binders incorporating waste cooking oil. Construction and Building Materials, 167, 348–358, 2018.
- **30.** B. Z. Sun, J. Yi, Y. Huang, D. Feng, and C. Guo. Investigation of the potential application of biodiesel by-product as asphalt modifier. Road Materials and Pavement Design, 17 (3), 737–752, 2016.
- 31. IP, Estradas de Portugal, S.A., Caderno de Encargos Tipo Obra Pavimentação. 2014.
- **32.** A. E. Martin, E. Mercado, and A. Abdelaziz. Binder Availability in Recycled Materials: Review of Literature and Available Quantification Methods, Texas A&M Transportation Institute College Station, in cooperation with the Federal Highway Administration and the Texas Department of Transportation, Texas, USA, Cooperative Research Program, Oct. 2021.
- **33.** F. Kaseer, E. Arámbula-Mercado, and A. E. Martin. A Method to Quantify Reclaimed Asphalt Pavement Binder Availability (Effective RAP Binder) in Recycled Asphalt Mixes, Transportation Research Record, vol. 2673, no. 1, pp. 205–216, Jan. 2019.
- **34.** F. Martinho, Misturas betuminosas temperadas com incorporação de subprodutos industriais Caracterização e Validação Tecnológica. Tese aprovada em provas públicas para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil. Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, 2014.
- **35.** R. West. Best Practices for RAP and RAS Management. Quality Improvement Series 129. National Asphalt Pavement Association. Maryland, 2015.
- **36.** M. Zaumanis, R. B. Mallick, Review of very high-content reclaimed asphalt use in plant-produced pavements: state of the art, International Journal of Pavement Engineering, vol. 16, n. 1, pp. 39–55, jan. 2015.
- 37. J.D. Brock, Richmond, J.L. Milling and recycling. Chattanooga, TN: ASTEC, Technical Paper T-127, 2007.
- **38.** B.D Prowell,, G.C., Hurley, B. Frank. Warm-mix asphalt: best practices. 3rd ed.Lanham, MD: National Asphalt Pavement Association, 2012.
- **39.** W. Mogawer, T. Bennert, J. S. Daniel, R. Bonaquist, A. Austerman, e A. Booshehrian, Performance characteristics of plant produced high RAP mixtures, Road Materials and Pavement Design, vol. 13, n. sup1, pp. 183–208, jun. 2012, doi: 10.1080/14680629.2012.657070.
- **40.** M. Zaumanis, R. B. Mallick, e R. Frank. Evaluation of different recycling agents for restoring aged asphalt binder and performance of 100 % recycled asphalt, Mater Struct, vol. 48, n. 8, pp. 2475–2488, ago. 2015.
- **41.** M. Tao e R. B. Mallick. Effects of Warm-Mix Asphalt Additives on Workability and Mechanical Properties of Reclaimed Asphalt Pavement Material, Transportation Research Record, vol. 2126, n. 1, pp. 151–160, jan. 2009.

