

# **COMPORTAMENTO MECÂNICO DE MISTURAS BETUMINOSAS TEMPERADAS COM ELEVADA INCORPORAÇÃO DE MISTURAS BETUMINOSAS RECUPERADAS PARA CAMADAS DE DESGASTE EM AUTOESTRADA**

Eugénia Correia

BRISA, Lisboa, Portugal, eugenia.correia@brisa.pt

Maria João Rato

BRISA, Lisboa, Portugal, maria.rato@brisa.pt

Daniela Domingues

BRISA, Maia, Portugal, rosa.domingues@brisa.pt

José Neves

CERIS, DECivil, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Lisboa, Portugal,  
jose.manuel.neves@tecnico.ulisboa.pt

Teresa Carvalho

MOEVE, Lisboa, teresa.carvalho@moeveglobal.com

Pedro Nunes

Tecnovia Indústria, Lisboa, Portugal, pedro.nunes@tecnovia-industria.pt

Nuno Fernandes

Tecnovia, Lisboa, Portugal, nuno.fernandes@tecnovia.pt

RESUMO: A Brisa, em linha com a estratégia de sustentabilidade que definiu, tem estudado e adotado práticas de inovação e sustentabilidade focadas na redução das emissões de gases com efeito de estufa nas atividades de operação e manutenção dos seus ativos rodoviários; no consumo de matérias-primas e na produção de resíduos; bem como na promoção de práticas de reutilização e reciclagem. Neste sentido, a Brisa identificou a oportunidade de avaliar e estudar, numa primeira iteração, o fabrico e aplicação de uma mistura betuminosa temperada a aplicar numa camada de desgaste rodoviária, produzida e compactada na gama de temperaturas das misturas denominadas temperadas, e numa segunda iteração, que esta mistura incorpore uma percentagem de 20% de mistura betuminosa recuperada. Este estudo sintetiza os resultados obtidos em laboratório e nas secções piloto, comparando as propriedades mecânicas das misturas betuminosas estudadas,

nomeadamente com os parâmetros definidos no Caderno de Encargos da Brisa para uma mistura betuminosa de referência produzida a quente. Tendo em conta que se considera que estes tipos de misturas betuminosas promovem princípios de circularidade e redução de emissões, os resultados obtidos até à data neste estudo permitiram também determinar que este tipo de misturas betuminosas têm um bom desempenho para aplicação na camada de desgaste.

**PALAVRAS-CHAVE:** Pavimento Rodoviário, Economia Circular, Redução de Emissões, Misturas Betuminosas Temperadas, Misturas Betuminosas Recuperadas, Propriedades Mecânicas

## 1. Introdução

A Brisa é um operador de mobilidade com uma forte experiência nacional e internacional na exploração e gestão de infraestruturas rodoviárias, a operar desde 1972. É um dos mais relevantes gestores de infraestruturas de autoestradas a operar em Portugal, sendo responsável pela exploração e gestão de mais de 1500 km de extensão de autoestradas, distribuídas por um total de 14 autoestradas.

A sustentabilidade é um princípio com o qual o Grupo Brisa está profundamente empenhado, refletindo-se num conjunto de sólidas metas (BRISA GRUPO, 2023) que asseguram importantes benefícios ambientais, sociais, técnico e económicos para as atividades do Grupo e, consequentemente, para os seus *stakeholders* e para as comunidades servidas, nomeadamente:

- redução das emissões de carbono de âmbito 1 e 2 em 60%, quando comparado com 2021;
- ser Net-Zero até 2040; atingir o Nível 3 do Ranking de Ação em Biodiversidade em Áreas de Alto Valor Natural (AAVN) nas margens das autoestradas até 2028 (Ano Base: 2022);
- atingir o nível 3 do Ranking de Ação da Economia Circular até 2028, quando comparado com 2022.

No âmbito da sua atividade, a Brisa concluiu que a incorporação de misturas betuminosas recuperadas (MBR) em camadas de desgaste possibilitava importantes benefícios ambientais, acrescidos de possíveis ganhos económicos, privilegiando princípios de economia circular.

Adicionalmente a Brisa percecionou vantagens, no âmbito da redução de emissões e consumos energéticos, na utilização de misturas betuminosas temperadas, ou seja, na utilização de misturas betuminosas produzidas e aplicadas a temperaturas cerca de 20 – 40°C mais baixas que as misturas betuminosas a quente (EAPA, 2014).

Neste âmbito, a Brisa identificou a oportunidade de avaliar e estudar: numa primeira iteração, a produção, aplicação e compactação de uma mistura betuminosa temperada numa camada de desgaste de autoestrada: AC 14 Surf PMB 45/80-75 BT (BBr) - MBT (PMB).

No entanto tendo presente que no decurso das atividades de beneficiação de pavimentos são geradas misturas betuminosas a recuperar, resultantes das operações de fresagem das camadas de pavimento existentes, identificou a oportunidade de que numa segunda iteração, a mistura betuminosa temperada incorporasse uma percentagem de 20% de mistura betuminosa recuperada, proveniente da fresagem da camada de desgaste a substituir: AC 14 Surf PMB 45/80-75 BT (BBr) + 20% RA - MBT-MBR (PMB).

O artigo inclui as conclusões retiradas de uma análise prévia, para perceber qual o contributo do betume envelhecido da mistura betuminosa recuperada (MBR), proveniente da fresagem da camada de desgaste da A6 - Autoestrada Marateca – Caia nos sublaços de Évora Nascente/Estremoz/Borba; apresenta um resumo das propriedades mecânicas das duas misturas betuminosas temperadas estudadas e produzidas em laboratório, das duas misturas betuminosas temperadas produzidas em central e aplicadas nas secções piloto. Por fim, o artigo compara os resultados obtidos relativamente aos parâmetros definidos no Caderno de Encargos da BCR (Brisa Concessão Rodoviária) para uma mistura betuminosa a quente AC14 Surf PMB 45/80-75 (BBr) - MBQ (PMB), que foi a mistura betuminosa aplicada em maior escala na camada de desgaste da A6 - Autoestrada Marateca – Caia nos sublaços de Évora Nascente/Estremoz/Borba.

## **2. Estratégia de beneficiação**

### **2.1. Descrição da beneficiação**

A Brisa determinou uma beneficiação do pavimento dos sublanços Évora Nascente/Estremoz/Borba, da Autoestrada A6 – Marateca-Caia entre o km 95+370 e o km 116+750, numa extensão de aproximadamente 21,4 km (GEOVIA, 2023). Évora é um distrito de Portugal que se caracteriza por verões cada vez mais quentes e frequentes ciclos de gelo/degelo no inverno, com elevados gradientes térmicos ao longo do dia, que requerem a utilização de um betume modificado de alto desempenho para a camada de desgaste, com uma temperatura de amolecimento de 75°C (GEOVIA, 2023).

A Brisa identificou nesta obra de beneficiação, localizada numa região geográfica com condições climatéricas particularmente agressivas para as camadas de pavimento em misturas betuminosas; a oportunidade de avaliar o comportamento mecânico de uma mistura betuminosa temperada e de uma mistura betuminosa temperada com incorporação de 20% de MBR; ambas as camadas aplicadas em camada de desgaste.

A beneficiação destes sublanços consistiu principalmente, na substituição da antiga camada de desgaste, que tinha uma espessura de 0,04 m, através da realização de uma fresagem de 0,05 m de espessura; e a execução de uma nova camada em AC14 Surf PMB 45/80-75 (BBr) - MBQ (PMB), com uma espessura de 0,05 m (GEOVIA, 2023). A beneficiação de pavimentos contemplou ainda outros trabalhos, que se excluem de relevância para o âmbito do presente artigo, pelo que não serão referidos.

O presente caso de estudo sintetiza os resultados de desempenho mecânico, obtidos até ao momento, para as misturas betuminosas estudadas:

- AC14 Surf PMB 45/80-75 BT (BBr) – MBT (PMB)
- AC14 Surf PMB 45/80-75 BT (BBr) + 20% RA - MBT-MBR (PMB)

Como mistura betuminosa de referência, foi utilizado um AC14 Surf PMB 45/80-75 (BBr) - MBQ (PMB), que foi a mistura betuminosa prevista para a camada de desgaste, na empreitada de beneficiação do pavimento nos Sublanços Évora Nascente/Estremoz/Borba da A6 - Autoestrada Marateca – Caia.

### **2.2. Materiais**

Os materiais utilizados na produção das misturas betuminosas são descritos a seguir.

#### **2.2.1. Betume modificado com polímeros**

Neste estudo foram utilizados betumes de elevada viscosidade, modificados por com polímeros (PMB):

- Elaster RAF AV© (PMB 45/80-75) (MOEVE/CEPSA, 2022);
- Elaster RAF AV BT © (PMB 45/80/75) (MOEVE/CEPSA).

Ambos os betumes incorporam um aditivo promotor de adesividade, uma vez que os agregados utilizados na empreitada (granito) apresentam algumas limitações ao nível da sua ligação com o betume. Estes ligantes diferem entre si pelo facto de o segundo ser um ligante com características adaptadas para ser utilizado em mistura betuminosa temperada.

Para se obter o betume Elaster RAF AV BT ©, foi adicionado um aditivo surfactante ao produto principal (Elaster RAF AV ©) que não altera as características reológicas do betume e permite trabalhar a mistura betuminosa temperada da mesma forma que uma mistura betuminosa a quente, mas com a vantagem de o fazer a temperaturas mais baixas.

Ambos os betumes requerem temperaturas de armazenamento entre os 175 – 185°C. Para o Elaster RAF AV ©, a gama de temperaturas recomendadas para a produção de mistura betuminosa situa-se entre 175 – 185°C.

Para o Elaster RAF AV BT ©, a gama de temperaturas recomendadas para a produção de mistura betuminosa situa-se entre os 140 – 185°C. Em relação à compactação, o Elaster RAF AV © permite temperaturas de compactação entre 170 – 180°C e o Elaster RAF AV BT © permite temperaturas de compactação entre 135 – 180°C (MOEVE/CEPSA) (MOEVE/CEPSA, 2022) (MOEVE/CEPSA, 2025).

### 2.2.2. Agregados naturais

Os agregados naturais utilizados na produção das misturas betuminosas foram granitos da Pedreira da Tecnovia Indústria no Monte das Flores, em Évora. As frações utilizadas foram 10/16 mm, 4/12 mm e 0/4 mm.

### 2.2.3. Mistura Betuminosa Recuperada

A mistura betuminosa recuperada (MBR) utilizada na produção das novas misturas betuminosas foi o material fresado processado, proveniente da camada de desgaste dos referidos sublanços da autoestrada A6. De acordo com a informação do Projeto de Execução (GEOVIA, 2023) a camada de desgaste seria um betão betuminoso rugoso BBr com um betume modificado 60/70 no sublanço Évora-Estremoz e um betão betuminoso antiderrapante BBad com um betume modificado 60/70 no sublanço Estremoz / Borba Os agregados da mistura betuminosa recuperada são granodioritos, que foram inicialmente britados, e posteriormente crivados para produzir uma fração 8/16 mm, originando uma mistura betuminosa recuperada com a seguinte classificação: 16 RA 0/10 mm. A mistura betuminosa recuperada apresentava 2,8% de betume, uma penetração de 10 (0,1mm), ponto de amolecimento de 91,0°C e índice de penetração de 2,2.

A Figura 1 (a) corresponde ao local de armazenamento dos agregados naturais a utilizar na produção de misturas betuminosas, consoante diversas frações, e a Figura 1 (b) corresponde ao local de armazenamento da mistura betuminosa recuperada na fração utilizada.



(a)



(b)

Figura 1: Armazenamento de agregados naturais (a) armazenamento de MBR (b)

## 2.3. Equipamentos

Na produção das misturas betuminosas foi utilizada uma central contínua, a Ermont TSM 21 XLM, pertencente à Tecnovia Indústria, localizada no Monte das Flores, em Évora.

Foi utilizada uma pavimentadora Vogelle Super 1800-3 e cilindros de rolos tipo Hamm HD70 e HD110, para o espalhamento e compactação das misturas betuminosas. O trabalho de fresagem foi realizado com uma fresadora Wirtgen W200i, utilizando minicarregadoras com vassoura para as limpezas do pavimento.



(a)



(b)

Figura 2: Tulhas para material reciclado (a) Pormenor de tapete para introdução de MBR (b)

### 3. Formulação e desempenho mecânico das misturas betuminosas

A formulação laboratorial das misturas betuminosas foi baseada no estudo Marshall, que depois foi completado com ensaios complementares de avaliação do desempenho, tendo como base as propriedades mecânicas presentes nas Cláusulas Técnicas Especiais do Caderno de Encargos da BCR, para as misturas betuminosas aplicadas na Rede de Autoestradas da Brisa.

#### 3.1. Análise prévia para aferir contributo do betume envelhecido da mistura betuminosa recuperada

Numa análise prévia foi verificado laboratorialmente, se o betume envelhecido existente na mistura betuminosa recuperada teria um contributo ativo no comportamento mecânico da mistura betuminosa temperada com incorporação de 20% de MBR. Para esse efeito fizeram-se duas formulações laboratoriais de mistura betuminosa temperada, com igual incorporação de MBR, em 20%, em que se testaram duas hipóteses:

- Não considerar o contributo do betume envelhecido da MBR e adicionar 5% de betume virgem.
- Considerar o contributo do betume envelhecido da MBR e adicionar 4,4% de betume virgem, ou seja, considerar um contributo de 0,6% de betume envelhecido. A formulação laboratorial da mistura estudada nesta hipótese apresenta-se na Tabela 1 do presente artigo. Os resultados do comportamento mecânico da mistura betuminosa formulada laboratorialmente nesta hipótese apresentam-se na Tabela 2 do presente artigo. Essa mistura corresponde à MBT-MBR (PMB).

Na hipótese em que não se considerou o contributo do betume envelhecido na formulação laboratorial da nova mistura betuminosa no estudo laboratorial obtiveram-se alguns resultados, que fundamentaram a exclusão desta opção, nomeadamente:

- Valor de Porosidade baixo: 1,7%
- Valor de Deformação Marshall elevado: 4,9 mm;
- No que concerne aos valores do Ensaio “Wheel Tracking”, de uma forma geral obtiveram-se piores valores quando não se considera o contributo do betume envelhecido da MBR. Indicam-se seguidamente os valores obtidos quando não se considerou o contributo da MBR: Profundidade de rodeira após 10 000 ciclos: 2,8 mm; Percentagem de profundidade de rodeira após 10 000 ciclos: 5,2%; Taxa de deformação: 0,06 mm/10<sup>3</sup> ciclos.

Esta análise permitiu concluir que o betume envelhecido da MBR influencia o comportamento mecânico da nova mistura betuminosa, o que permitiu uma redução da percentagem de betume virgem a incorporar na nova

mistura betuminosa. Os resultados que se partilham nos capítulos seguintes são relativos à MBT-MBR (PMB), em que se considerou um contributo de 0,6% de betume envelhecido e uma adição de 4,4% de betume virgem.

### 3.2. Formulação laboratorial das misturas betuminosas estudadas

Para a formulação das misturas estudadas betuminosas foram consideradas as seguintes temperaturas de produção em laboratório:

- Para a produção de todas as misturas betuminosas em laboratório: MBQ (PMB), MBT (PMB) e MBT-MBR(PMB) foi considerada uma temperatura para o betume de 175°C;
- Para a mistura betuminosa MBQ (PMB) foi considerada uma temperatura de agregados de 170°C, uma temperatura da mistura de 165°C e um tempo de mistura de 300 s;
- Para a mistura betuminosa MBT (PMB) foi considerada uma temperatura de agregados de 150°C, uma temperatura da mistura de 150°C e um tempo de mistura de 300 s;
- Para a mistura betuminosa MBT-MBR (PMB) foi considerada uma temperatura de aquecimento dos agregados em estufa de 160°C, uma temperatura da mistura de 150°C e um tempo de mistura de (300) s. Embora o tempo de mistura em laboratório seja o mesmo que a mistura sem incorporação de MBR, no caso da mistura com incorporação de MBR existe uma fase anterior à mistura com betume, na qual os seguintes materiais são colocados na misturadora para pré-aquecimento durante (2400) s: (agregado de maiores dimensões (160°C) + agregado fino (160°C) + 1/3 de fíler (temperatura ambiente) + MBR (temperatura ambiente), até que os materiais estabilizem a cerca de 145°C (a misturadora envolve” para “145°C) e a cada 30 segundos a misturadora envolve o material de modo que fique todo à mesma temperatura antes da introdução do betume. Este processo demora cerca de 40 minutos (2400 s), este tempo é dependente do tipo de equipamento utilizado e da quantidade de material introduzido à temperatura ambiente. Espera-se que a transposição do estudo de formulação da mistura betuminosa para a central siga o procedimento normal, exigindo maior atenção no que diz respeito às temperaturas de produção e aos tempos de mistura que garantam a qualidade final da mistura betuminosa.

A Tabela 1 resume a formulação laboratorial das misturas estudadas em laboratório:

Tabela 1 – Formulação das misturas betuminosas estudadas

Propriedades	MBQ (PMB)	MBT (PMB)	MBT-MBR (PMB)	Requisitos (Caderno de Encargos da BCR)
Fração 10/16mm (%)	19,0	19,0	20,9	-
Fração 4/12 mm (%)	39,9	39,9	26,6	-
Fração 0/4 mm (%)	31,4	31,4	23,8	-
Fíler (%)	4,8	4,8	4,8	-
16 RA 0/10 mm (%)	0	0	19,0	-
Betume Virgem (%)	4,9	5,0	4,4	-
MBR Betume (%)	-	-	0,6	
Betume total (%)	4,9	5,0	5,0	5,0 ± 0,2
Relação Fíler Total/Betume (%)	1,6	1,4	1,5	1,4 ± 0,2

### 3.3. Desempenho Mecânico

Em laboratório foram realizados ensaios de sensibilidade à água e de resistência à deformação permanente (“Wheel-Tracking”). Adicionalmente, foram realizados ensaios de módulo de deformabilidade e fadiga no

Instituto Superior Técnico da Universidade de Lisboa, para a mistura betuminosa AC14 Surf PMB 45/80-75 BT (BBr) + 20% RA - MBT-MBR (PMB). As amostras ensaiadas foram produzidas em laboratório.

Os ensaios de sensibilidade à água (EN 12697-12) foram realizados para avaliar o efeito da sensibilidade à água das misturas betuminosas. Foi utilizado o método A, que avalia a resistência à tração indireta de provetes cilíndricos de misturas betuminosas. Embora os resultados do ITSr obtidos para a MBT (PMB) e a MBT-MBR (PMB) tenham sido inferiores aos resultados obtidos para a MBQ (PMB), ambas as misturas betuminosas formuladas em laboratório apresentaram resultados satisfatórios atendendo ao definido no Caderno de Encargos da BCR.

Para avaliar a suscetibilidade dos materiais à deformação permanente, foram realizados ensaios de “Wheel Tracking” (EN 12697-22) sobre as misturas betuminosas produzidas e compactadas em laboratório. Os resultados obtidos mostram que as misturas betuminosas MBT (PMB) e MBT-MBR (PMB) apresentaram melhores resultados que a MBQ (PMB). Todas as misturas betuminosas formuladas em laboratório apresentaram resultados em conformidade com o definido no Caderno de Encargos da BCR. A Tabela 2 apresenta as propriedades Marshall, bem como os resultados dos ensaios de sensibilidade à água e de resistência à deformação permanente das misturas betuminosas estudadas em laboratório. A Tabela 2 apresenta também os resultados obtidos do controlo de qualidade realizado às amostras recolhidas nas secções piloto.

Tabela 2 - Características Mecânicas das Misturas Betuminosa

Propriedades	Formulação Laboratorial			Resultados do Controlo de Qualidade (Secções Piloto)			Requisitos (Caderno de Encargos da BCR)
	MBQ (PMB)	MBT (PMB)	MBT-MBR (PMB)	MBQ (PMB)	MBT (PMB)	MBT-MBR (PMB)	
Porosidade (%)	2,6	2,5	2,4	3,1	2,9	2,4	3-6
VMA (%)	14,0	14,1	14	14,6	14,3	13,7	≥ 14
Estabilidade (kN)	16,9	15,7	15,1	17,7	16,3	15,2	12,5 - 15
Deformação (mm)	4,0	4,9	4,2	3,8	4,9	5,9	2-4
Quociente Marshall (kN/mm)	4,2	3,2	3,6	4,6	3,3	2,6	≥ 3
ITSr (%)	96	87	89	95	77	73	≥ 85
Profundidade de Rodeira (mm) (após 10000 ciclos)	2,3	1,4	1,6	2,4	1,5	1,3	NR
Profundidade de Rodeira (%) (após 10000 ciclos)	4,3	2,8	3,1	4,3	3,8	2,4	NR
Taxa de deformação (ciclos mm/10 <sup>3</sup> )	0,05	0,03	0,03	0,07	0,04	0,03	≤ 0,10

NR – Não requerido

Para analisar o desempenho mecânico da mistura betuminosa produzidas em laboratório, foram ainda realizados ensaios de módulo de deformabilidade (EN 12697-26) e de resistência à fadiga (EN 12697-24) em laboratório a 20°C, de acordo com o procedimento de flexão em quatro pontos em provetes prismáticos (4PB-PR). Os ensaios de módulo de deformabilidade foram realizados para várias frequências: 1, 3, 5, 10, 20 e 30 Hz. Os ensaios de fadiga foram realizados a extensão controlada: 250, 350 e 450 µm/m. A Figura 3 mostra os resultados obtidos para o módulo de deformabilidade e para o ângulo de fase. Na Figura 4 estão representadas as leis de fadiga. O comportamento mecânico da mistura betuminosa MBT-MBR (PMB) foi comparado em ambos os ensaios com os resultados de uma mistura betuminosa a quente convencional do tipo AC 14 surf

35/50 (MBQ). Em geral, os resultados confirmaram que a mistura betuminosa temperada com incorporação de 20% de mistura betuminosa recuperada apresentou maior resistência à fadiga. Os resultados dos ensaios mostraram que a mistura betuminosa MBT-MBR (PMB), apesar de evidenciar um menor módulo de deformabilidade, apresentou, contudo, um maior comportamento viscoelástico, especialmente para maiores frequências do carregamento, tal como seria de esperar devido ao tipo de betume que foi utilizado no seu fabrico.

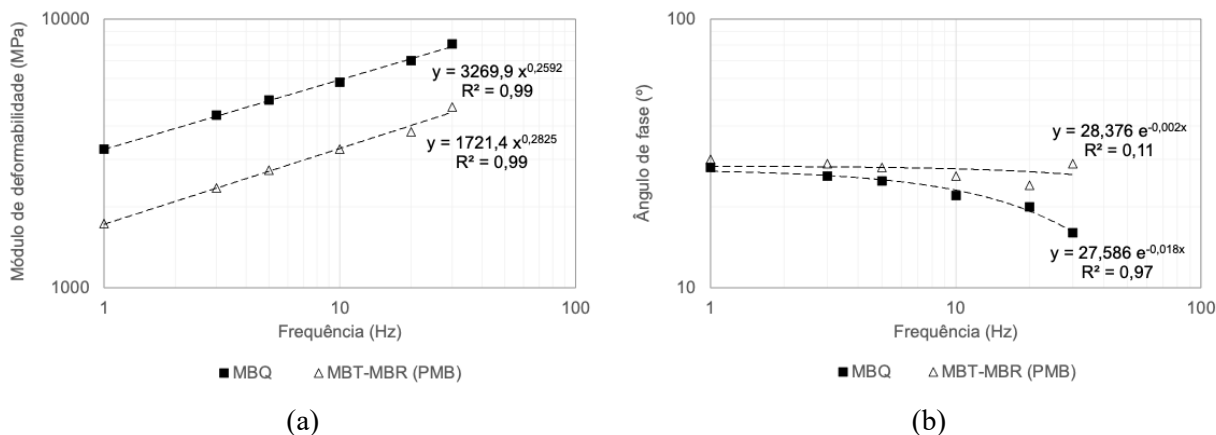


Figura 3: Módulo de deformabilidade (a) e ângulo de fase (b) a 20°C

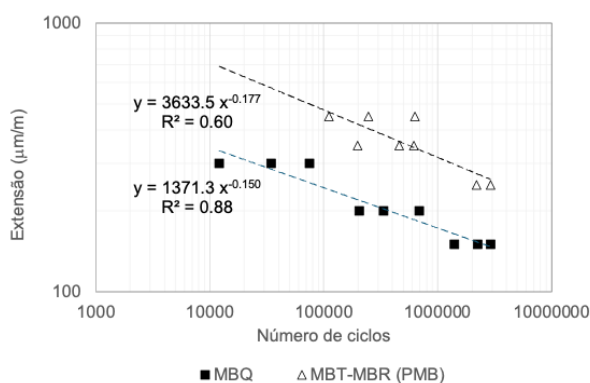


Figura 4: Leis de fadiga a 20°C

## 4. Construção das secções piloto

### 4.1. Condições de produção e construção

No âmbito da empreitada de construção foram selecionados os locais para a implementação das secções piloto. As três misturas betuminosas abrangidas neste estudo foram aplicadas nessas secções piloto, nas condições de produção e execução seguidamente descritas. As secções piloto foram construídas no sublanço Évora Nascente/Estremoz. As duas secções piloto onde foram aplicadas as misturas betuminosas temperadas estudadas, encontram-se a cerca de 60 km da central de produção de misturas betuminosas, nos sublanços Évora Nascente/Estremoz/Borba, da Autoestrada A6 – Marateca-Caia.

- AC14 Surf PMB 45/80-75 (BBr) - MBQ (PMB)

A mistura betuminosa de referência corresponde à preconizada no projeto de execução realizado pela GEOVIA e foi aplicada na extensão total da empreitada, foi o AC 14 Surf PMB 45/80-75 (BBr) - MBQ (PMB). De acordo com os Estudos de Formulação da Mistura (TECNOVIA, 2023), a temperatura para produzir esta mistura betuminosa foi entre 175°C e 185°C e a temperatura de compactação entre 170°C e 180°C.

- AC14 Surf PMB 45/80-75 BT (BBr) – MBT (PMB)

A mistura betuminosa AC14 Surf PMB 45/80-75 BT (BBr) - MBT (PMB) foi produzida numa gama de temperaturas de 147°C e 153°C e compactada numa gama de temperaturas entre 130°C e 140°C. Cerca de 473 toneladas de MBT (PMB) foram produzidas e aplicadas numa extensão total de 1150 m, numa via de lentos.

- AC14 Surf PMB 45/80-75 BT (BBr) + 20% RA - MBT-MBR (PMB)

A mistura betuminosa AC14 Surf PMB 45/80-75 BT (BBr) + 20% RA - MBT-MBR (PMB) foi produzida numa gama de temperaturas de 150°C e 157°C e compactada numa gama de temperaturas entre 135°C e 145°C. Devido à introdução da mistura betuminosa recuperada na central, que estava armazenada em condições atmosféricas à temperatura ambiente, as temperaturas de produção da central tiveram de ser ligeiramente aumentadas, quando comparadas com a MBT (PMB). Foram produzidas cerca de 438 toneladas de MBT-MBR (PMB) e aplicadas numa extensão total de 968 m, em via de lentos e via direita. Foram incorporadas cerca de 80 toneladas de MBR na nova mistura betuminosa.

## 4.2. Controlo de qualidade

A Tabela 2, que se apresentou no capítulo 3 do presente artigo, apresenta os resultados obtidos do controlo de qualidade realizado para a mistura betuminosa de referência e para as misturas betuminosas temperadas estudadas, de acordo com o Caderno de Encargos da BCR para as amostras recolhidas nas secções piloto. O desempenho mecânico das misturas betuminosas foi avaliado através das propriedades de Marshall, sensibilidade à água (ITSR) e deformação permanente. Os resultados obtidos para as amostras de MBT (PMB) e MBT-MBR (PMB), recolhidas nas secções piloto, apresentaram valores de ITSR inferiores aos resultados obtidos para a MBQ (PMB), e ambas as misturas betuminosas apresentaram resultados ligeiramente abaixo do Caderno de Encargos da BCR, o que deve ser avaliado com ensaios de desempenho adicionais aos materiais estudados. Para avaliar a resistência dos materiais à deformação permanente sob carga cíclica, foram realizados ensaios de “Wheel Tracking” (EN 12697-22) sobre as misturas recolhidas nas secções piloto. Os resultados obtidos demonstraram que a MBT (PMB) e a MBT-MBR (PMB) apresentaram melhores resultados que a MBQ (PMB). Todas as misturas betuminosas apresentaram resultados em conformidade com o Caderno de Encargos da BCR.

## 5. Conclusões

O artigo apresentou uma análise comparativa das propriedades mecânicas das três misturas betuminosas aplicadas na camada de desgaste da Autoestrada A6 – Autoestrada Marateca-Caia, em Portugal, concessionada à Brisa Concessão Rodoviária (BCR): Mistura betuminosa a quente; Mistura betuminosa temperada; e Mistura betuminosa temperado com incorporação de 20% de mistura betuminosa recuperada. Em termos de comportamento mecânico, os resultados obtidos até o momento, para as misturas betuminosas MBT (PMB) e MBT-MBR (PMB), mostraram desempenhos promissores relativamente à deformação permanente. Para compreender melhor o comportamento destas misturas betuminosas, foi importante proceder a ensaios adicionais de fadiga e módulo de deformabilidade. Também foi importante avaliar as causas possíveis para a obtenção de valores inferiores nos ensaios de sensibilidade à água, nas amostras recolhidas nas secções piloto, quando comparados com os resultados obtidos nos ensaios realizados às amostras produzidas em laboratório.

Em termos de controlo de temperatura e consumo de energia, as misturas betuminosas MBT (PMB) e MBT-MBR (PMB) permitiram trabalhar em temperaturas de produção e compactação mais baixas; permitindo uma redução de cerca de 30°C, para o MBT (PMB), e de 25°C para o MBT-MBR (PMB) em termos de temperaturas de produção; e uma redução de 40°C e de 35°C em termos de temperaturas de compactação, respetivamente. A mistura betuminosa MBT-MBR (PMB) permitiu ainda a incorporação de cerca de 80 toneladas de mistura betuminosa recuperada, na nova mistura betuminosa, promovendo os princípios de economia circular.

Os resultados obtidos até à data permitem concluir que as misturas betuminosas temperadas estudadas apresentaram resultados bastante satisfatórios em termos de comportamento mecânico, havendo vantagens na incorporação de mistura betuminosa recuperada. Contudo, são necessários ainda ensaios adicionais para uma avaliação melhor e mais completa das características de desempenho deste tipo de materiais. Por exemplo, serão realizados ensaios de avaliação da deformabilidade e da resistência à fadiga da mistura betuminosa MBT (PMB).

## AGRADECIMENTOS

O autor José Neves agradece o apoio da Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT) através do financiamento UIDB/04625/2020 do CERIS.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BRISA GRUPO. (2023). *Relatório Integrado 2023*. Grupo Brisa.

EAPA . (2014). *The use of Warm Mix Asphalt - EAPA – Position Paper*. Brussels: EAPA - European Asphalt Pavement Association.

GEOVIA. (2023). *PROJETO DE EXECUÇÃO "ESTUDO DE BENEFICIAÇÃO DE PAVIMENTOS SUBLANÇOS ÉVORA NASCENTE / ESTREMOZ / BORBA"*. São Domingos de Rana: BCR.

Grupo Brisa. (27 de Fevereiro de 2025). *Sustentabilidade - O Nosso Compromisso*. Obtido de Grupo Brisa: <https://grupobrisa.pt/sustentabilidade/compromisso>

MOEVE/CEPSA. (s.d.). *Ficha Técnica - ELASTER RAF BT (PMB 45/80-75)*.

MOEVE/CEPSA. (2022). *Ficha Técnica - ELASTER RAF AV (PMB 45/80-75)* .

MOEVE/CEPSA. (23 de Janeiro de 2025). *Betumes Modificados com Polímeros*. Obtido de Moeveglobal: <https://pt.moeveglobal.com/pt/utilizacao/produtos-servicos/gasoleos-fueis-e-asfaltos/estradas/betumes-modificados>

TECNOVIA. (2023). *Relatório de Estudo de Mistura Betuminosa - AC 14 SURF PMB 45/80-75 (BBr) - Betão Betuminoso Rugoso - BENEFICIAÇÃO DO PAVIMENTO DOS SUBLANÇOS ÉVORA NASCENTE /ESTREMOZ / BORBA DAA6 – AUTO-ESTRADA MARATECA / CAIA*. Évora.