

INCORPORAÇÃO DE PLÁSTICOS NÃO RECICLÁVEIS EM MISTURAS BETUMINOSAS

João Clérigo Fonseca

Faculdade de Engenharia, Universidade Lusófona, Lisboa, Portugal, jcclerigofonseca@gmail.com

Vítor Antunes

Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal, vantunes@lnec.pt

Ana Cristina Freire

Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal, acfreire@lnec.pt

RESUMO: Nos últimos 50 anos, a produção mundial de plástico aumentou exponencialmente. Cerca de 40% deste plástico é utilizado em embalagens descartáveis e 20% na construção. Apesar das grandes quantidades produzidas, apenas 6% dos plásticos descartados são reciclados, 10% são incinerados e a maioria é eliminada sem uma gestão adequada. Com baixas taxas de reciclagem e alguns plásticos não recicláveis ou com ciclos de reciclagem limitados, é importante explorar novas formas de reutilizar estes resíduos como matérias-primas secundárias. Este estudo explora a incorporação de resíduos plásticos não recicláveis em misturas betuminosas, visando uma solução sustentável para camadas de desgaste com desempenho igual ou superior ao das misturas betuminosas tradicionais, através da incorporação de plástico por via seca. Uma mistura betuminosa com 10% de plástico foi formulada e testada em termos de sensibilidade à água, deformação permanente e módulo de rigidez. Complementarmente efetuaram-se comparações ambientais e económicas com uma mistura de referência. Os resultados revelaram uma menor suscetibilidade às variações de frequência e temperatura, rigidez reduzida e maior resistência à água e à deformação permanente. Assim, a adição de plástico não só melhora as propriedades mecânicas, como também reduz os custos, oferecendo uma alternativa sustentável aos plásticos não recicláveis na pavimentação.

PALAVRAS-CHAVE: Misturas betuminosas, Via seca, Incorporação de plástico, Reciclagem, Camada de desgaste.

1. Introdução

Os plásticos são indispensáveis no mundo atual devido às suas propriedades únicas e à sua relação custo-benefício. São amplamente utilizados em embalagens, cosméticos e vestuário, entre outras áreas. A indústria do plástico é imensa. Em 2021, os produtores de matérias-primas, os fabricantes e empresas de reciclagem de plásticos e os produtores de equipamentos representavam uma cadeia que empregava mais de 1,5 milhões de pessoas na Europa (Plastics Europe, 2022). Estas empresas contribuíram com um volume de negócios de cerca de 40 mil milhões de euros para as finanças europeias (Plastics Europe, 2022). Todos os anos, a produção de plástico continua a aumentar, especialmente nas últimas décadas. São produzidos anualmente cerca de 380 milhões de toneladas de plástico, metade dos quais são plásticos de utilização única (Geyer et al., 2019).

Os plásticos fabricados a partir de polímeros orgânicos sintéticos provêm da destilação do petróleo e do gás natural e representam 99% da produção mundial de plásticos (Hamilton et al., 2019). Com o crescimento exponencial da produção de plásticos, estima-se que as emissões de dióxido de carbono equivalente (CO_{2e}) ao longo de todo o ciclo de vida dos plásticos (desde a extração da matéria-prima até ao fim de vida) ascenderão a 2,80 Giga toneladas, o equivalente a 615 centrais elétricas a carvão com uma capacidade de 500 megawatts

a funcionar em pleno até 2050 (Hamilton et al., 2019) . Sendo um material não biodegradável com uma taxa de reciclagem de apenas 9%, os resíduos de plástico encontram-se em grandes quantidades em todo o mundo, contribuindo significativamente para uma das principais crises ambientais do século XXI (Geyer et al., 2019).

2. Enquadramento

Milhares de plásticos patenteados diferem nas suas características. Exemplos de polímeros sintéticos incluem o poliestireno (PS), o polietileno (PE), o tereftalato de polietileno (PET), o polipropileno (PP) e o cloreto de polivinilo (PVC). Os plásticos dividem-se em dois grandes grupos: os termoplásticos e os termoendurecíveis. O primeiro grupo, os termoplásticos, apresentam a característica de amolecem quando expostos ao calor, o que lhes permite serem fundidos de novo e moldados em novas formas através do processo de moldagem. Os termoplásticos são materiais que podem ser reciclados, no entanto, a sua taxa de reciclagem é limitada devido à degradação das suas propriedades ao longo dos sucessivos ciclos de reciclagem. São utilizados para produzir garrafas, vestuário, poliestireno expandido e extrudido e outros produtos. Em contrapartida, os termoendurecíveis não podem ser fundidos novamente após a sua produção inicial, uma vez que mantêm a sua rigidez mesmo quando aquecidos. Estes materiais são utilizados para fabricar componentes rígidos e não deformáveis e podem ser reforçados com fibras como o vidro, o basalto ou o carbono para aumentar a resistência. Os termoendurecíveis são amplamente utilizados em várias indústrias, incluindo a construção (e.g. tomadas e tubos elétricos), a produção de energia (e.g. torres de turbinas eólicas) e os transportes (e.g. veículos, aviões, comboios e navios), entre outros. Apesar das suas diferenças, ambos partilham o facto de não se decomporem no ambiente e, por isso, são um resíduo que apresenta um problema cada vez maior devido ao seu crescimento exponencial.

A incorporação de materiais reciclados e de resíduos em misturas betuminosas é uma prática amplamente adotada. Vários materiais incluindo cinzas (Xue et al., 2009), escórias (Skaf et al., 2021), óleos (Paolo et al., 2020), misturas betuminosas recuperadas (Antunes et al., 2023), fillers e agregados de resíduos de pedreiras e betão, foram testados e integrados com sucesso em misturas betuminosas.

Embora a utilização de plásticos reciclados em pavimentação seja relativamente recente, tendo os primeiros estudos sido efetuados no início dos anos 90, estes estudos revelaram dados promissores para a sua utilização na indústria de pavimentação (Little, 1992; Alhadidi et al., 2024). Este tipo de aplicação pode ser uma opção viável para ajudar a mitigar a eliminação do plástico em aterros ou por incineração, reduzindo potencialmente as emissões produzidas durante este último processo. Poderá também reduzir a quantidade de micro e nanoplásticos produzidos, uma vez que estes materiais, ao serem incorporados numa mistura betuminosa, poderão ficar incorporados na matriz betuminosa.

Nos últimos 30 anos, foram realizados vários estudos sobre a incorporação de diferentes tipos de plásticos, utilizando diferentes métodos, nomeadamente a via húmida (Harbinson, & Remtulla, 1994; Fang et al., 2014; Ali, 2013) e a via seca (Martin-Alfonso et al., 2019; Capuano et al., 2020), com diferentes taxas de incorporação e também combinados com diferentes materiais, tais como misturas betuminosas recuperadas (Diefenderfer & Mcghee, 2015) e borracha de pneus reciclados (Yan et al., 2019). Além disso, têm sido utilizados alguns aditivos para promover a dissolução do plástico nas misturas betuminosas, de modo a garantir uma maior homogeneidade. No entanto, é de salientar que mais de 90% dos estudos efetuados limitam-se a investigações laboratoriais sobre betumes modificados com plástico ou sobre o comportamento das misturas betuminosas, com pouca experiência em aplicações à escala real. Os estudos existentes mostraram, em geral, que o comportamento mecânico da mistura melhora com a incorporação de uma percentagem de plástico, tanto por via seca como por via húmida. A análise do ciclo de vida evidenciou uma diminuição do custo de produção da mistura, um aumento da durabilidade da camada e do número de ciclos de manutenção.

3. Objetivos

O presente estudo propõe uma solução inovadora e sustentável para a gestão de resíduos plásticos não recicláveis, através da sua incorporação em misturas betuminosas para camadas de desgaste de pavimentos. Os objetivos essenciais são a melhoria do comportamento mecânico das misturas, visando o aumento da sua durabilidade, resistência ao desgaste e resistência à água, cruciais para o desempenho dos pavimentos. Adicionalmente, o objetivo final do estudo é reduzir o consumo de matérias-primas, nomeadamente a quantidade de betume e agregados necessários para a sua produção e avaliar a viabilidade económica desta abordagem, através da substituição da utilização de matérias-primas pela incorporação de resíduos plásticos. Note-se que a maioria dos plásticos incorporados e estudados na produção de novas misturas betuminosas é constituída por plásticos processados especificamente para o efeito, como os granulados de plástico.

A incorporação de resíduos plásticos não recicláveis foi realizada através da via seca, numa proporção de 10% da massa total da mistura betuminosa. A escolha desta taxa de incorporação teve como motivação a necessidade de mitigar a crise do plástico e baseou-se em estudos anteriores, que indicam a viabilidade desta percentagem. Optou-se pela via seca, uma vez que, tipicamente, permite a incorporação de uma maior quantidade de resíduos plásticos em comparação com técnicas alternativas. Para avaliar a compatibilidade e o desempenho da mistura plástica betuminosa, foram efetuados ensaios laboratoriais como a análise do ponto de fusão, a sensibilidade à água, a deformação permanente e a rigidez. Os resultados obtidos indicaram que esta solução não só reduziu o consumo de betume, como também melhorou as características mecânicas do pavimento, resultando numa mistura betuminosa mais sustentável.

Adicionalmente, foram avaliados os benefícios ambientais e económicos da incorporação de resíduos plásticos na construção de estradas, o que mostrou que esta abordagem é claramente uma alternativa promissora aos materiais convencionais.

4. Materiais

Este estudo investiga a incorporação de um tipo específico de resíduo plástico em misturas betuminosas. Como referência, foi utilizada uma mistura betuminosa densa com tamanho máximo dos agregados de 14 mm e betume com uma penetração nominal de 35/50 (AC 14 surf 35/50). O resíduo plástico foi o foco central da investigação, analisando-se o seu potencial para melhorar as propriedades da mistura. Para complementar este estudo, foram selecionados diversos agregados e betume, com base na sua aplicação padrão na construção de pavimentos. Esta abordagem permite uma avaliação abrangente de como o resíduo plástico pode modificar e otimizar o desempenho global da mistura betuminosa. A mistura modificada foi comparada com a mistura de referência para avaliar o seu desempenho face a uma mistura betuminosa tradicional. Na mistura betuminosa com incorporação de plástico, utilizou-se um betume puro com penetração nominal de 50/70, uma vez que se previa a modificação das propriedades do betume.

4.1 Amostra de Plástico

Foi recolhida uma amostra de plástico identificada pelo centro de reciclagem como “Cápsulas de alumínio rejeitadas” (Figura 1). A amostra apresentou heterogeneidade, contendo dez tipos distintos de resíduos plásticos, com predominância de materiais flutuantes, incluindo cápsulas de papel misto, plásticos transparentes e cápsulas plásticas brancas e azuis, conforme identificado por inspeção visual.

4.2 Agregados

Este estudo envolveu diferentes frações de agregados de basalto (0/4 mm, 4/12 mm, 10/16 mm), agregados de calcário (0/4 mm) e um fíler comercial, todos em conformidade com as normas e especificações aplicáveis.

4.3 Betume

O betume utilizado na produção da mistura betuminosa com plástico foi um betume com penetração nominal de 50/70, em conformidade com a norma EN 12591. O betume apresentou uma penetração de $48,8 \times 10^{-1}$ mm e uma temperatura de amolecimento de 54,9 °C. O betume 35/50 apresentou uma penetração de 44×10^{-1} mm e um ponto de amolecimento de 54,6 °C.



Figura 1. Amostra de plástico

5. Procedimentos Experimentais

Para avaliar a eficácia da incorporação de resíduos plásticos em misturas betuminosas, foi efetuado um conjunto alargado de ensaios laboratoriais. Estes incluíram uma análise do ponto de fusão dos plásticos para avaliar a sua adequabilidade para incorporação por via seca e para avaliar as suas potenciais interações com o betume para modificar as suas características. Adicionalmente, foi realizado o ensaio Marshall para determinar o teor ótimo de betume (OBC) e um conjunto de ensaios de desempenho para avaliar o comportamento mecânico das misturas. Especificamente, foram efetuados ensaios para avaliar a sensibilidade à água, a deformação permanente e a rigidez, proporcionando uma visão do impacto dos resíduos plásticos no desempenho global da mistura betuminosa.

5.1 Ponto de Fusão

Para avaliar a capacidade da amostra ser incorporada no betume, foi efetuada uma análise do ponto de fusão dos constituintes mais representativos. Cada constituinte foi colocado numa estufa ventilada durante 45 minutos e sujeito a um aquecimento sequencial a 50 °C, 75 °C e 100 °C, seguido de aumentos de temperatura incrementais de 10 °C até um máximo de 200 °C. Uma temperatura de fusão mais baixa indica uma maior probabilidade de incorporação eficaz na matriz betuminosa, facilitando uma melhor integração dos resíduos plásticos na mistura.

5.2 Formulação e Teor Ótimo de Betume

Os provetes Marshall foram preparados utilizando a via seca com uma relação de 90% de agregado e 10% de plástico, com base numa mistura de referência (AC 14 surf 35/50). O plástico foi misturado com o agregado a 200 °C durante 2 min, seguido da adição de betume a 175 °C durante mais 3 min. A metodologia utilizada para a produção dos provetes foi realizada de acordo com a norma EN 12697-35. Para determinar o teor ótimo de betume, foram produzidos provetes Marshall com teores de betume de 3,5%, 4,0% e 4,5%, considerando que a formulação da mistura de referência tinha um teor de 5,0%. É importante referir que a incorporação de plástico modifica as propriedades do betume, levando a uma redução do teor de betume necessário.

Após a preparação dos provetes Marshall, foram realizados ensaios para determinar o teor ótimo de betume desejado, incluindo a baridade imersa, baridade máxima teórica (BMT), ensaio Marshall, porosidade e o volume de vazios nos agregados minerais (VAM).

5.3 Ensaios Mecânicos

O desempenho da mistura foi avaliado com base nas características mecânicas, tais como a sensibilidade à água, a deformação permanente e a determinação da rigidez. A Tabela 1 apresenta as normas e condições de ensaio.

Tabela 1. Ensaios Mecânicos

Âmbito de Aplicação (Norma)	Condições
Sensibilidade à água (EN 12697-12)	Método A: Resistência à tração indireta Temperatura: 15 °C Condicionamento do provete: 72 h
Deformação permanente Ensaio wheel tracking (EN 12697-22)	Método: Dispositivo de pequenas dimensões; Procedimento B no ar Temperatura: 60 °C Condicionamento do provete: 6 h a 60 °C
Rigidez (EN 12697-26)	Método: Ensaio de flexão em quatro pontos (4PTB) Temperatura: 10 °C, 20 °C e 30 °C Frequências: 1, 3, 5, 10, 20, 30 e 1 Hz

6. Resultados e Discussão

Observou-se que os constituintes mais representativos - cápsulas de papel misto flutuante, cápsulas flutuantes e plásticos transparentes flutuantes - fundiram a uma temperatura de aproximadamente 120 °C, o que resultou em aproximadamente 77% da amostra apresentar características promissoras para incorporação no betume. O estado dos constituintes à temperatura mencionada pode ser observado na Figura 2. Verificou-se também que os constituintes flutuantes (com uma densidade inferior à da água) eram capazes de fundir mais facilmente a temperaturas mais baixas.

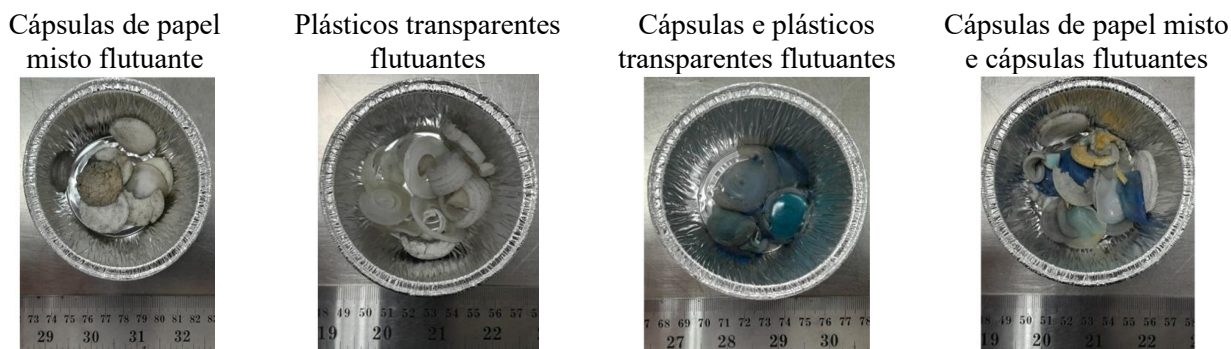


Figura 2. Ponto de fusão a 120 °C

Para determinar o OBC para os ensaios mecânicos, avaliou-se a porosidade, a estabilidade Marshall, o VAM e a deformação para os três teores de betume testados (Figura 3).

As linhas vermelhas a tracejado nos gráficos representam os limites definidos nas especificações. Uma análise abrangente indicou que um teor de betume de 4% era o ideal para a porosidade. Todos os valores de estabilidade Marshall estavam dentro do intervalo especificado para cada teor de betume testado, sustentando a seleção de 4% para a estabilidade. Observou-se que apenas um teor de 4,5% de betume satisfazia o intervalo desejado para o VAM. Os valores de deformação mantiveram-se consistentes em todos os teores de betume, no entanto, os ensaios de baridade imersa revelaram que o teor de 4% de betume alcançou o valor mais elevado. Selecionou-se um teor de betume de 4,5% para a deformação, com o objetivo de obter uma média nos quatro fatores avaliados. O teor ótimo de betume foi assim determinado como sendo 4,2%, conforme a média destes fatores. A Figura 4 ilustra a determinação da sensibilidade à água através da relação de resistência à tração indireta (ITSR). A Figura 4a mostra os resultados da resistência à tração indireta dos provetes secos (ITSD) e dos provetes húmidos (ITSW) da mistura betuminosa com plástico e da mistura de referência. Em condições secas, a mistura com plástico apresentou um ITSD de 1,80 MPa, enquanto a mistura de referência apresentou 2,35 MPa. Em condições húmidas, a mistura com plástico atingiu 1,82 MPa e a mistura de referência obteve

2,25 MPa para ITSW. A Figura 4b demonstra que a mistura com plástico atingiu um ITSR de aproximadamente 101%, ultrapassando os 100%. Este valor superior a 100% deve-se ao processo de seleção dos provetes para a realização dos ensaios em condições húmidas e secas. Em contraste, a mistura de referência apresentou um ITSR de aproximadamente 95%, indicando uma redução de 5% na resistência à tração quando exposta à água em comparação à condição seca. Estes resultados demonstram a vantagem da incorporação de plástico nas misturas betuminosas, na medida em que aumenta a resistência à água das misturas. O elevado valor de ITSR reflete a maior durabilidade e resistência da mistura com plástico, mesmo em condições extremas.

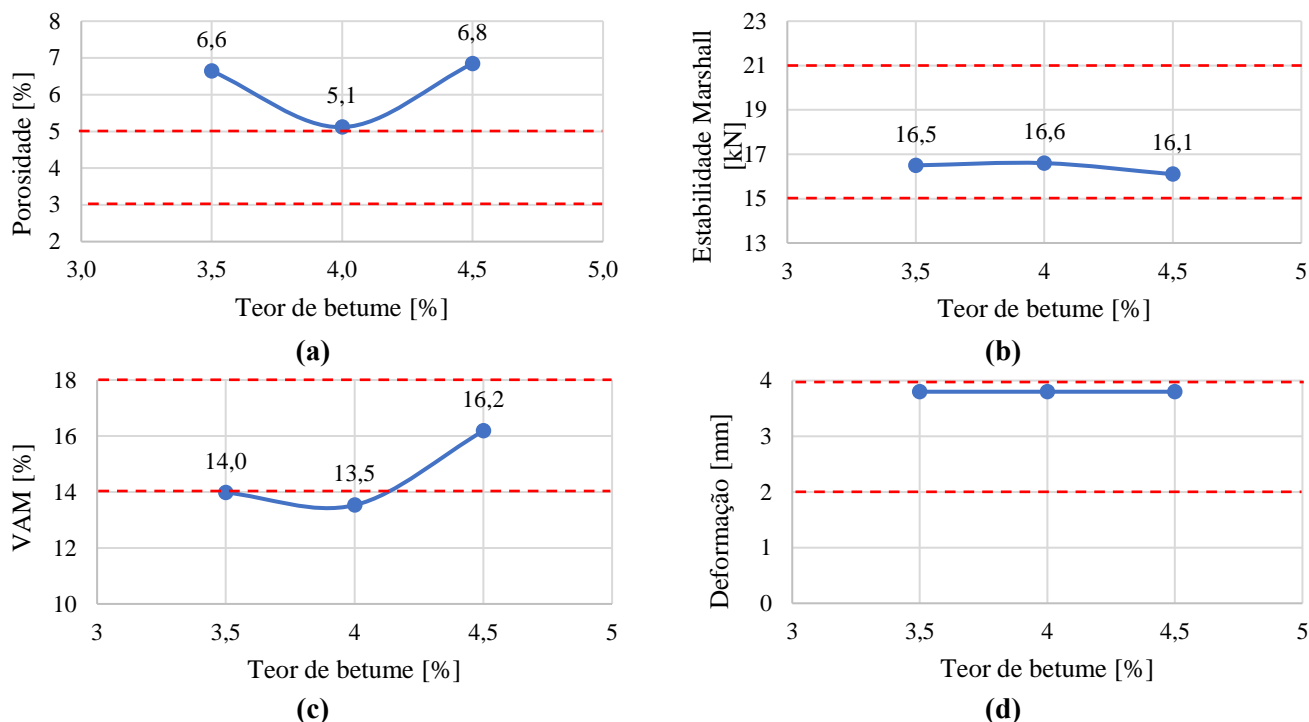


Figura 3. (a) Porosidade; (b) Estabilidade Marshall; (c) VAM; (d) Deformação.

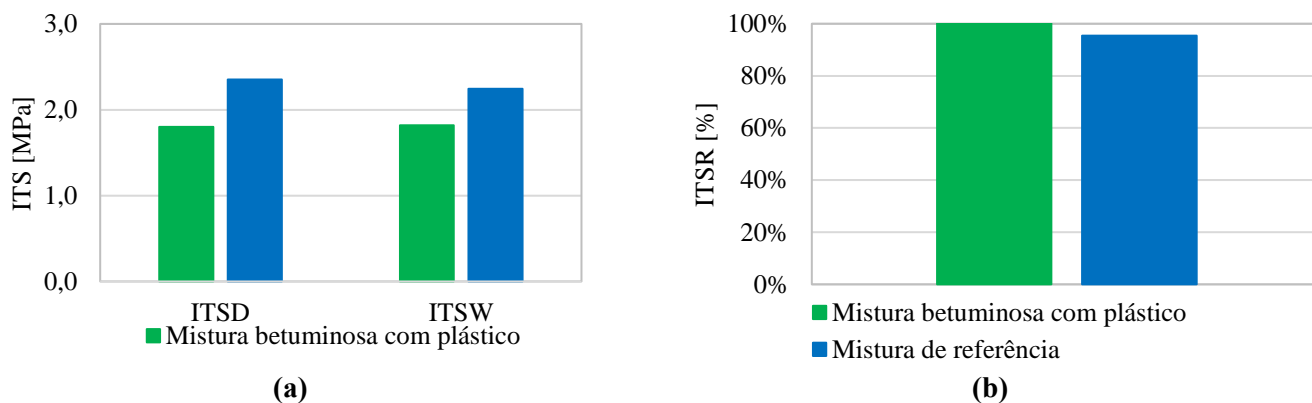


Figura 4. Avaliação da sensibilidade à água: (a) Resistência à tração indireta em condições secas e húmidas; (b) Relação de resistência à tração indireta.

O ensaio efetuado avaliou três parâmetros principais: a profundidade média de rodeira a 10 000 ciclos [RD_{AIR}], a taxa de deformação [WTS_{AIR}], que relaciona a profundidade da rodeira com o número de ciclos de carga, e média da percentagem de profundidade de rodeira [PRD_{AIR}], que representa a profundidade de rodeira em relação à espessura da camada betuminosa. A Figura 5 mostra a relação entre a profundidade da rodeira e o número de ciclos, tanto para a mistura betuminosa com plástico como para a mistura de referência. A profundidade da rodeira na mistura betuminosa com plástico é mínima, resultando num RD_{AIR} de 0,2 mm, em comparação com 5,9 mm para a mistura de referência. Estes resultados sugerem que, para aplicações em camadas de desgaste, a mistura betuminosa modificada com plástico demonstra uma elevada resistência à

deformação permanente, aumentando significativamente a durabilidade do pavimento e a resistência ao desgaste induzido pela carga.

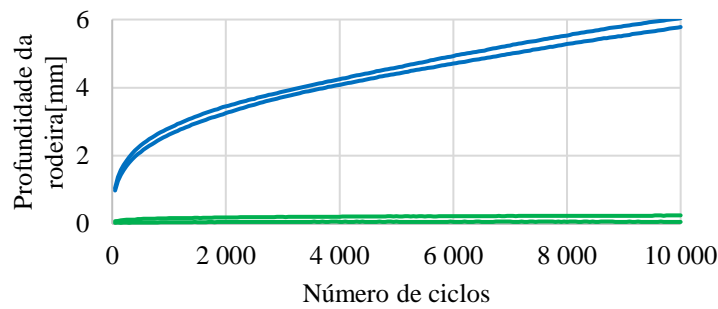


Figura 5. Deformação permanente

A Figura 6a-b compara o comportamento da rigidez e os ângulos de fase (ϕ) da mistura betuminosa com plástico e da mistura de referência a diferentes temperaturas e frequências, respetivamente. Na Figura 6a, a mistura com plástico apresenta uma rigidez mais baixa, particularmente a 10 °C e 20 °C, mas demonstra maior estabilidade com menores variações entre temperaturas. Em contraste, a mistura de referência apresenta aumentos mais significativos na rigidez à medida que a frequência aumenta. Particularmente, a 30 °C, a mistura com plástico apresenta uma rigidez ligeiramente superior à da mistura de referência. Em geral, embora a mistura com plástico tenha uma rigidez inferior à da mistura de referência, apresenta uma maior estabilidade relativamente à variação da rigidez com a temperatura de ensaio. A mistura de referência demonstra ϕ maiores, particularmente a 30 °C, que diminuem com a frequência (Figura 6b). Em contraste, a mistura com plástico apresenta ϕ menores e mais consistentes em todas as temperaturas (Figura 6b). Isto indica que a mistura com plástico é menos suscetível a variações de frequência, sugerindo uma tendência reduzida para a deformação viscosa, especialmente a temperaturas mais baixas (Figura 6b).

Em geral, a mistura com plástico apresenta uma rigidez mais baixa, uma suscetibilidade reduzida a variações de frequência e uma flexibilidade mais elevada em comparação com a mistura de referência. Este comportamento indica as suas potencialidades para aplicações em pavimentos sujeitos a condições variáveis de tráfego e clima, assegurando um desempenho consistente.

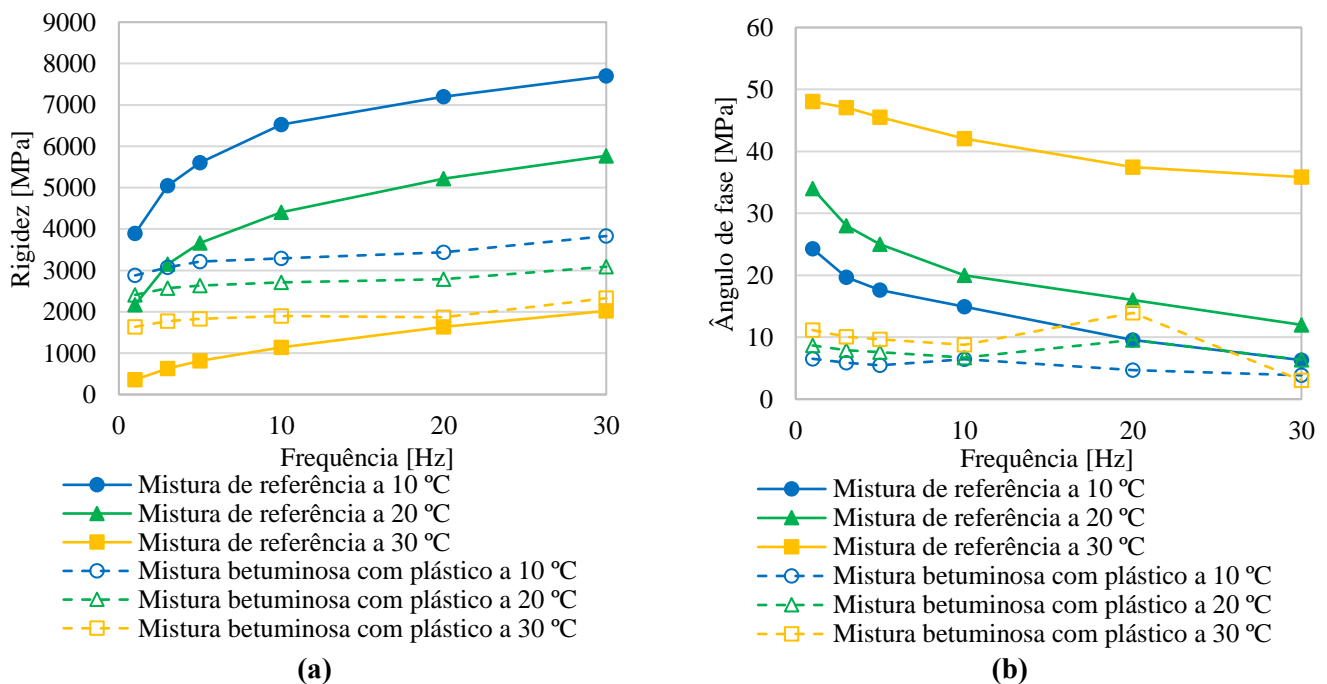


Figura 6. (a) Módulo de rigidez; (b) Ângulo de fase;

7. Análise Ambiental e de Custo

Para comparar a quantidade de materiais e o custo da utilização de uma mistura betuminosa com plásticos em relação à mistura betuminosa de referência, foi efetuado um estudo de caso relativo a uma camada de desgaste de uma estrada com 1 km de comprimento, com duas faixas de rodagem de 3 m de largura, uma em cada sentido, e bermas de 1 m de largura. A Tabela 2 indica as dimensões da secção tipo de estrada em estudo e a massa necessária da mistura betuminosa.

Tabela 2. Estudo de caso – Características da camada de desgaste

Propriedade	Unidade	Mistura de referência	Mistura betuminosa com plástico
Espessura	[m]		0,06
Largura	[m]		8
Comprimento	[m]		1000
Volume	[m ³]		480
Baridade imersa	[Mg/m ³]	2,56	2,19
Massa necessária	[Mg]	1228,8	1051,2

As quantidades de cada material constituinte da mistura betuminosa foram determinadas em função da correspondente massa volúmica da mistura e os custos de construção por quilómetro de estrada foram obtidos através de consulta a empresas nacionais e com base no perfil transversal acima referido. O preço unitário dos materiais acima apresentado não tem em conta as distâncias de transporte, uma vez que foram assumidas distâncias de transporte semelhantes para os vários materiais utilizados.

Comparando os resultados apresentados na Figura 7, verifica-se que as quantidades de basalto e de filler comercial são semelhantes entre as duas misturas, não havendo, como seria de esperar, uma variação significativa de custos. No caso da mistura betuminosa com plástico, são necessários menos 147,7 megagramas de calcário em relação à mistura de referência, o que se traduz num custo de 2 363 €/km. A maior contribuição da mistura estudada é a redução da quantidade de betume, que reduz o custo em cerca de 15 756 €/km. Considerando todos os constituintes das misturas betuminosas em estudo, é possível determinar uma redução de custo por quilómetro de estrada de cerca de 19 839 €, correspondendo a uma redução percentual de cerca de 26,5% por km de estrada.

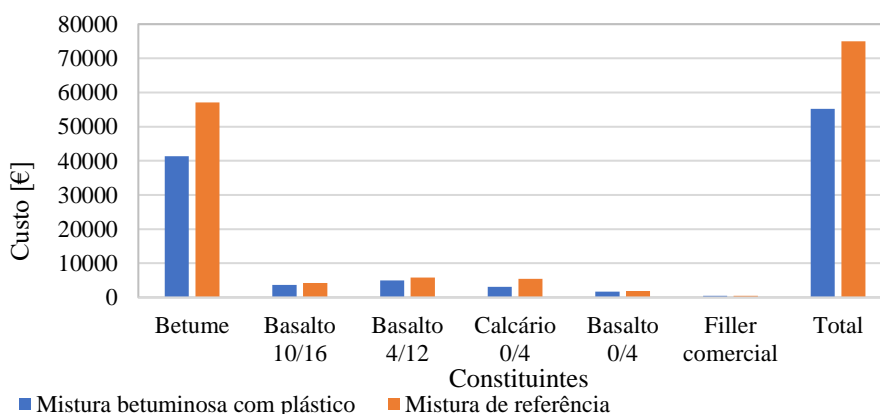


Figura 7. Análise de custos dos constituintes das misturas betuminosas

8. Considerações finais

A investigação desenvolvida neste trabalho debruça-se sobre a incorporação de plásticos não recicláveis numa mistura betuminosa para camadas de desgaste. O plástico foi submetido a uma primeira separação através de um ensaio de densidade em água, seguido da determinação do seu ponto de fusão. Posteriormente, o plástico foi triturado antes de ser incorporado na mistura betuminosa por via seca. Em seguida, foram efetuados ensaios

laboratoriais de sensibilidade à água, de deformação permanente e de rigidez para avaliar a melhoria das propriedades da mistura betuminosa.

As principais conclusões deste estudo foram as seguintes:

- Os plásticos mais adequados para a incorporação por via seca são os que apresentam menor ponto de fusão;
- O teor ótimo de betume para as misturas betuminosas com plástico é de 4,2%. Este valor é inferior ao das misturas de referência, uma vez que o plástico fundido pode adquirir propriedades ligantes semelhantes às do betume;
- A mistura betuminosa com plástico apresentou uma excelente resistência à água, o que demonstra a sua durabilidade em condições climáticas adversas para utilização como camada de desgaste;
- A mistura betuminosa com plástico revelou uma elevada resistência à deformação permanente e resistência do pavimento com um RD_{AIR} de apenas 0,2mm;
- O comportamento da rigidez das misturas betuminosas varia com a temperatura. A 10 °C, estas misturas apresentam uma rigidez elevada. No entanto, a 20 °C e a 30 °C, a rigidez diminui, o que sugere que o plástico proporciona uma maior flexibilidade a temperaturas mais elevadas. Estas alterações permitem que a mistura com plástico ofereça um bom desempenho em climas frios, ao proporcionar uma maior rigidez, e em climas quentes, ao proporcionar uma maior flexibilidade, contribuindo para a durabilidade e resistência dos pavimentos em diversas condições ambientais;
- Em termos económicos, a utilização da mistura betuminosa com plástico é significativamente mais rentável em comparação com a mistura de referência AC 14 surf 35/50, com uma redução de 26,5% no custo por quilómetro de estrada devido à redução das quantidades de matérias-primas necessárias.

Em resumo, a incorporação de resíduos plásticos em misturas betuminosas tem um potencial significativo para revolucionar a gestão de resíduos e a construção de pavimentos rodoviários. Os benefícios previstos em termos de maior durabilidade, resistência à água e redução de custos são bastante promissores. É imperativo desenvolver continuamente metodologias para abordar as limitações atuais, com vista a explorar plenamente estas oportunidades. A adoção de práticas sustentáveis e inovadoras não só contribuirá para a sustentabilidade ambiental, como também abrirá caminho a infraestruturas rodoviárias mais eficientes e duradouras para as gerações futuras.

AGRADECIMENTOS

Os autores Ana Cristina Freire e Vítor Antunes agradecem o apoio prestado pelo projeto “be-READY-RESilient roAD pavements for sustainabilITy” (Grant FBR_OC2_21) financiado pela Islândia, Liechtenstein e Noruega através dos EEA Grants. Agradece-se também ao Laboratório Nacional de Engenharia Civil pelo apoio prestado durante o desenvolvimento do estudo experimental.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alhadidi, Y.I.; Al-Qadi, I.L.; Mohamed Ali, U.; García Mainieri, J.J.; Sharma, B.K. Impact of Nonrecyclable Plastics on Asphalt Binders and Mixtures. *Transp. Res. Rec. J. Transp. Res. Board* 0(0) 2024. <https://doi.org/10.1177/03611981241245692>.
- Ali, T. Sustainability Assessment of Bitumen with Polyethylene as Polymer. *IOSR J. Mech. Civ. Eng.* 2013, 10, 01–06. <https://doi.org/10.9790/1684-1050106>.
- Antunes, V.; Neves, J.; Freire, A.C. *Could High RAP Mixtures Be Multi-Recycled? Validation through Long-Term Performance Assessment.* *Transp. Eng.* 2023, 14, 100215. <https://doi.org/10.1016/j.treng.2023.100215>.

- Capuano, L.; Magatti, G.; Perucca, M.; Dettori, M.; Mantecca, P. *Use of recycled plastics as a second raw material in the production of road pavements: An example of circular economy evaluated with lca methodology*. *Procedia Environ. Sci. Eng. Manag.* 2020, 7, 37–43.
- Diefenderfer, S.; Mcghee, K. *Installation and Laboratory Evaluation of Alternatives to Conventional Polymer Modification for Asphalt—Final Report VCTIR 15-R15*; Virginia Center for Transportation Innovation and Research: Charlottesville, VA, USA, 2015.
- Fang, C.; Wu, C.; Hu, J.; Yu, R.; Zhang, Z.; Nie, L.; Zhou, S.; Mi, X. *Pavement Properties of Asphalt Modified with Packaging-Waste Polyethylene*. *J. Vinyl Addit. Technol.* 2014, 20, 31–35. <https://doi.org/10.1002/vnl.21328>.
- Geyer, R.; Jambeck, J.R.; Law, K.L. *Production, Use, and Fate of All Plastics Ever Made*. *Sci. Adv.* 2017, 3, e1700782. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1700782>.
- Hamilton, L.A.; Feit, S.; Muffett, C.; Kelso, M.; Rubright, S.M.; Bernhardt, C.; Schaeffer, E.; Moon, D.; Morris, J.; Labbé-Bellas, R. *Plastic & Climate: The Hidden Costs of a Plastic Planet*; Center for International Environmental Law 2019. Available online <https://www.ciel.org/plasticandclimate/> (accessed on 1 July 2022).
- Harbinson, B.; Remtulla, A. *The Development and Performance of an Environmentally Responsible Modified Binder*. In *Proceedings of the 9th AAPA International Asphalt Conference*, Surfers Paradise, Australia, 13–17 November 1994.
- Little, D. *Analysis of the Influence of Low Density Polyethylene Modification (Novophalt) of Asphalt Concrete on Mixture Shear Strength and Creep Deformation Potential*. In *Polymer Modified Asphalt Binders*; ASTM International: West Conshohocken, PA, USA, 1992; p. 186, ISBN 978-0-8031-5180-2.
- Martin-Alfonso, J.E.; Cuadri, A.A.; Torres, J.; Hidalgo, M.E.; Partal, P. *Use of Plastic Wastes from Greenhouse in Asphalt Mixes Manufactured by Dry Process*. *Road Mater. Pavement Des.* ISSN 2019, 20, 265–281. <https://doi.org/10.1080/14680629.2019.1588776>.
- Paolo, L.; Lu, X.; Ferrotti, G.; Conti, C.; Canestrari, F. *Investigating the “Circular Propensity” of Road Bio-Binders: Effectiveness in Hot Recycling of Reclaimed Asphalt and Recyclability Potential*. *J. Clean. Prod.* 2020, 255, 120193. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120193>.
- Plastics Europe. *Plastics—the Facts 2022*; Plastics Europe: Brussels, Belgium, 2022.
- Skaf, M.; Bartolomé, J.; Gonzalo-orden, H.; Linares-unamunzaga, A.; Skaf, M.; Bartolomé, J.; Gonzalo-orden, H.; Ortega-lópez, V.; Manso, J.M.; Ortega-lópez, V.; et al. *Bituminous Base Courses for Flexible Pavements with Steel Slags Bituminous Base Courses for Flexible Pavements with Steel Slags*. *Transp. Res. Procedia* 2021, 58, 83–89. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2021.11.012>.
- Xue, Y.; Hou, H.; Zhu, S.; Zha, J. *Utilization of Municipal Solid Waste Incineration Ash in Stone Mastic Asphalt Mixture: Pavement Performance and Environmental Impact*. *Constr. Build. Mater.* 2009, 23, 989–996. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.05.009>.
- Yan, Y.; Roque, R.; Hernando, D.; Chun, S. *Cracking Performance Characterisation of Asphalt Mixtures Containing Reclaimed Asphalt Pavement with Hybrid Binder*. *Road Mater. Pavement Des.* 2019, 20, 347–366. <https://doi.org/10.1080/14680629.2017.1393002>.