

# PAVIMENTOS SUSTENTÁVEIS COM INCORPORAÇÃO DE PLÁSTICOS RECICLADOS

Maria João Rato<sup>1</sup>, Daniela Domingues<sup>2</sup>, Henrique M. Borges Miranda<sup>3</sup>, Vítor Antunes<sup>4</sup>

<sup>1</sup> BRISA, Quinta da Torre da Aguilha - Edifício BRISA, 2785-599 São Domingos de Rana, Portugal

email: [maria.rato@brisa.pt](mailto:maria.rato@brisa.pt)      <http://www.brisa.pt>

<sup>2</sup> BRISA, Quinta da Torre da Aguilha - Edifício BRISA, 2785-599 São Domingos de Rana, Portugal

<sup>3</sup> ISEL – Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Instituto Politécnico de Lisboa, Rua Conselheiro Emídio Navarro, n.º 1, 1959-007 Lisboa, Portugal

CITTA – Centro de Investigação do Território, Transportes e Ambiente, Coimbra, Portugal

<sup>4</sup> CERIS, Faculdade de Engenharia da Universidade Lusófona de Humanidades e Tecnologias, Campo Grande, n.º 376, 1749-024 Lisboa, Portugal

---

## Sumário

*Os resíduos de plástico apresentam-se como um desafio ambiental significativo e crescente, incluindo desde plásticos industriais, sacos de plástico, embalagens para alimentos, entre outros. Em resposta à crescente preocupação, tem havido um progressivo interesse na incorporação destes resíduos em outras aplicações, nomeadamente, a incorporação de resíduos de plástico reciclado em materiais de construção. Mas será a sua utilização viável na pavimentação rodoviária? Os resultados obtidos são encorajadores, permitindo constatar para diferentes tipos de aditivos de plásticos reciclados disponíveis no mercado uma melhoria do comportamento dos ligantes betuminosos e sua interligação com os agregados.*

---

**Palavras-chave:** Sustentabilidade; Plástico reciclado; Afinidade; Penetração; Recuperação elástica; Temperatura de amolecimento

## 1 INTRODUÇÃO

Os plásticos são materiais sintéticos derivados do petróleo refinado, caracterizados por apresentarem uma elevada temperatura de amolecimento, uma elevada resistência à decomposição e à radiação ultravioleta (UV) [4]. As características anteriores conferem potencialmente inúmeros benefícios quando se pretende utilizar os seus resíduos em misturas betuminosas, como aditivo para melhorar as propriedades do ligante betuminoso, ou para a sua substituição parcial. Contudo, a sua utilização requer responsabilidade, uma vez que estes resíduos permanecem no meio ambiente por centenas de anos, criando um desafio ambiental acrescido [1, 2, 3]. Além disso, os produtos químicos tóxicos presentes em muitos plásticos são biocumulativos, apresentando assim um risco para a saúde e segurança da cadeia alimentar.

Adicionalmente, os plásticos consistem num amplo conjunto de materiais com distintas propriedades (físicas, mecânicas e químicas), características e aplicações, que apresentam diferentes temperaturas de amolecimento que podem variar entre 100 °C até mais de 265 °C [5, 6]. Pode, portanto, diferenciar-se os plásticos reciclados a incorporar em misturas betuminosas, como [5]: plásticos que apresentam uma reduzida temperatura de amolecimento, próximas das temperaturas utilizadas para a produção, transporte e aplicação de misturas betuminosas, sendo potencialmente passíveis de substituir ou modificar o ligante betuminoso; e aqueles que apresentam uma elevada temperatura de amolecimento, que podem substituir parcialmente parte dos agregados (recursos naturais finitos) constituintes da mistura betuminosa.

Neste âmbito, o presente estudo tem como principal objetivo contribuir para um maior conhecimento na utilização de plásticos reciclados passíveis de substituir ou modificar o ligante betuminoso, nomeadamente, no que respeita à sua influência no comportamento do ligante (penetração, temperatura de amolecimento e recuperação elástica) e respetiva afinidade com os agregados. São igualmente apresentadas algumas recomendações práticas no que concerne à utilização de plásticos reciclados em laboratório.

## 2 MATERIAIS E METODOLOGIA

O presente trabalho insere-se num estudo mais amplo, em curso, focando nesta fase a avaliação da influência da adição de diferentes tipos de plástico reciclado nas características de diferentes betumes, assim como na afinidade entre o betume e os agregados. Para desenvolvimento do estudo foram considerados os seguintes materiais (Quadro 1):

- Agregados grossos de natureza granodiorítica fornecidos pela Mota Engil; betume convencional 50/70 e um betume modificado com polímeros do tipo PmB 45/80-65 (designados por B1 e B2, respetivamente), ambos fornecidos pela CEPSA.
- Cinco tipos de plásticos reciclados provenientes de diferentes fornecedores disponíveis no mercado (por motivos de confidencialidade aqui designados por P1, P2, P3, P4 e P5). Os aditivos apresentam-se sob a forma de granulado composto por diferentes tipos de plásticos reciclados (P2 e P3), ou como granulado (*pellets*) industrialmente processado a partir de diferentes tipos de plásticos reciclados (P1, P4, P5).

Os plásticos reciclados em análise foram incorporados no betume de penetração nominal 50/70 no caso do plástico 1 (P1), tendo os restantes quatro aditivos sido incorporados no betume modificado do tipo PmB 45/80-65.

Quadro 1. Materiais estudados e condições de mistura

Identificação das amostras estudadas	Avaliação do ligante betuminoso		Afinidade
	% de incorporação de plásticos reciclados	Tipo de betume	Natureza dos agregados
B1	0 %	50/70	Granodioritos
B1P1	5 %		
B2	0 %	PmB 45/80-65	
B2P2	6 %		
B2P3	6 %		
B2P4	2 %		
B2P5	2 %		

As percentagens de plásticos reciclados adicionadas e tipo de betume base foram definidas conjuntamente com os fabricantes, tendo como pressuposto maximizar o desempenho do ligante betuminoso após adição dos plásticos.

No que concerne à mistura dos plásticos reciclados foi efetuada de forma mecânica através de uma misturadora durante sessenta minutos (B2P2 e B2P3), trinta minutos (B2P4 e B2P5) e cinco minutos (B1P1). A variação no tempo requerido decorre do especificado pelos fabricantes dos aditivos.

Ainda para mistura dos aditivos com o betume teve-se em consideração as temperaturas de mistura propostas pelos fabricantes dos ligantes e dos aditivos de plástico reciclado:

- 50/70 – 155 °C.
- PmB 45/80-65 – 165 °C.
- B1P1 – 180 °C.
- B2P2 e B2P3 – 170 °C.
- B2P4 e B2P5 – 170 °C.

Apesar das condições previamente definidas para mistura dos plásticos reciclados, observou-se alguma heterogeneidade nos ligantes produzidos, decorrente de uma reduzida capacidade de dispersão dos plásticos, como se pode observar na Fig. 1. As exceções são os aditivos B2P4 e B2P5 que se dispersaram totalmente no betume (Fig. 1).



Fig. 1. Betume homogéneo (esquerda, B2P4) e heterogéneo (direita, B2P2)

Complementarmente, para o aditivo B2P3 observou-se uma alta efervescência aquando da sua adição ao betume como evidenciado na Fig. 2.



Fig. 2. Efervescência decorrente da adição e mistura do aditivo B2P3 ao betume

A efervescência observada na Fig. 2 pode resultar de uma menor limpeza e/ou de uma inadequada lavagem do plástico e/ou incorreta secagem do mesmo durante o fabrico do aditivo promovendo, respetivamente, a existência de gorduras e/ou água no aditivo, sendo no presente caso maioritariamente decorrente da existência de água. A existência de água no plástico pode contribuir para condicionar o fabrico das misturas betuminosas em central, nomeadamente através da colmatação do filtro de partículas do recuperador de finos.

No que concerne à metodologia foram considerados os ensaios e respetivas condições apresentadas no Quadro 2, para aferir a influência dos plásticos reciclados no comportamento dos ligantes betuminosos e na sua afinidade com os agregados.

Quadro 2 – Ensaio e respetivas condições para avaliação da influência do plástico reciclado

Propriedades	Avaliação do ligante betuminoso			Afinidade
	Penetração	Temperatura de amolecimento	Recuperação elástica	
Ensaio	Ensaio de penetração com agulha, 25 °C, 5 segundos (EN 1426)	Ensaio de temperatura de amolecimento, 5 °C/min (EN 1427)	Ensaio de recuperação elástica, 25 °C (EN 13398)	Ensaio de afinidade entre agregados e betume, 5 °C (EN 12697-11, método A)

No Quadro 2 é possível observar, nomeadamente, que a influência dos plásticos reciclados em apreço foi avaliada através da determinação das seguintes propriedades:

- Temperatura de amolecimento pelo método de anel e bola (EN 1427); penetração com agulha a 25 °C (EN 1426); recuperação elástica (EN 13398).
- Complementarmente, foi ainda avaliada a afinidade segundo a norma EN 12697-11 (método A), determinada pelo registo visual da percentagem da superfície das partículas de agregado grosso/aditivo de plástico reciclado revestida pelo ligante após rotação mecânica da mistura na presença de água.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 Influência da adição de plásticos reciclados no comportamento do betume

Para a avaliação da influência da adição de plásticos reciclados no comportamento foram preparadas diversas amostras de ligante betuminoso sendo apresentadas na Fig. 3 as características referentes à penetração, temperatura de amolecimento e recuperação elástica do ligante betuminoso após mistura mecânica com os aditivos de plásticos reciclados comparativamente ao betume base.

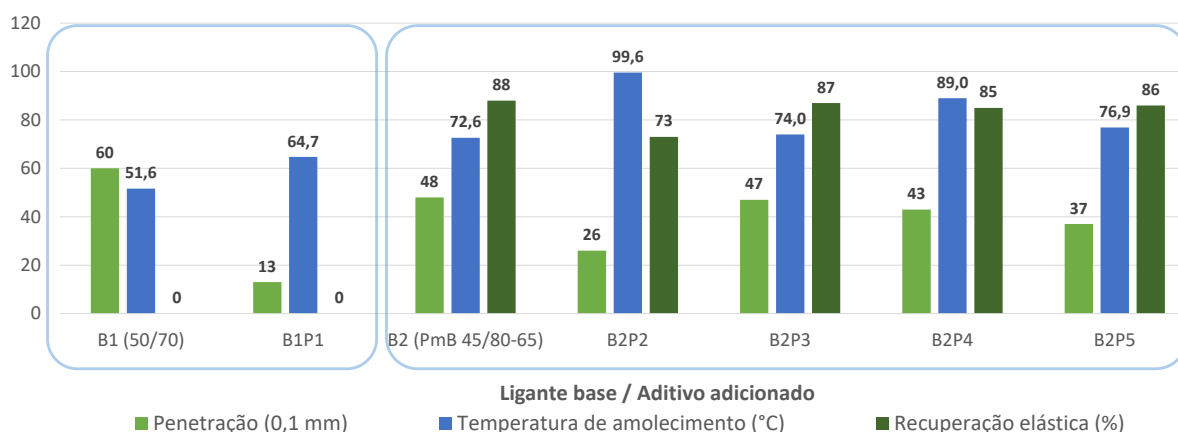


Fig. 3. Características do ligante betuminoso com e sem aditivos de plásticos reciclados

Na Fig. 3 é possível observar, independentemente do betume base (B1, 50/70 ou B2, PmB 45/80-65), uma redução genérica da penetração (mais acentuada para os aditivos B1P1 e B2P2) e um incremento da temperatura de amolecimento para os vários aditivos (mais acentuado para o aditivo B2P2). No caso do aditivo B1P1 quando adicionado ao betume B1 (50/70) apesar do aumento significativo da temperatura de amolecimento não é o suficiente para ser equivalente à obtida para o betume B2 (PmB 45/80-65).

No que concerne à recuperação elástica e se considerado o B2 como betume de referência observa-se uma ligeira diminuição para os vários aditivos, à exceção do B2P2 para o qual a diminuição foi mais significativa. O B1P1 teve uma recuperação elástica nula, à semelhança do seu betume base B1.

Dos diversos aditivos o B2P3 foi o único que de uma forma genérica para as várias propriedades apresenta um comportamento semelhante ao betume base.

De uma forma genérica, observa-se que a adição de plásticos reciclados deverá contribuir para uma melhoria do comportamento do ligante betuminoso à deformação permanente, sem que se observe uma alteração significativa da elasticidade (consequentemente resistência ao fendilhamento). Note-se que no caso do B1P1, o plástico conferiu uma melhoria de comportamento relativamente ao betume original, contudo não permitiu conferir propriedades equivalentes a um betume modificado, não tendo sido observadas alterações ao nível da elasticidade, que consequentemente podem conferir um aumento da resistência ao fendilhamento quando aplicado na mistura betuminosa.

Adicionalmente, no caso dos aditivos B1P1, B2P2 e B2P3 observou-se limitações numa adequada dispersão no betume, contudo os resultados obtidos demonstram que os dois primeiros aditivos são passíveis de substituir ou modificar o ligante betuminoso, sendo espectável que o aditivo B2P3 atue como agregado e não tanto como agente modificador do ligante. Os resultados do estudo mais abrangente em curso, permitirão aferir sobre misturas betuminosas os presentes resultados.

### 3.2 Influência da adição de plásticos reciclados na afinidade entre agregados e o ligante betuminoso

O registo da evolução da perda de adesividade entre o ligante e os agregados/aditivo de plástico reciclado foi realizada para 6 e 24 horas, sendo os resultados apresentados na Fig. 4.

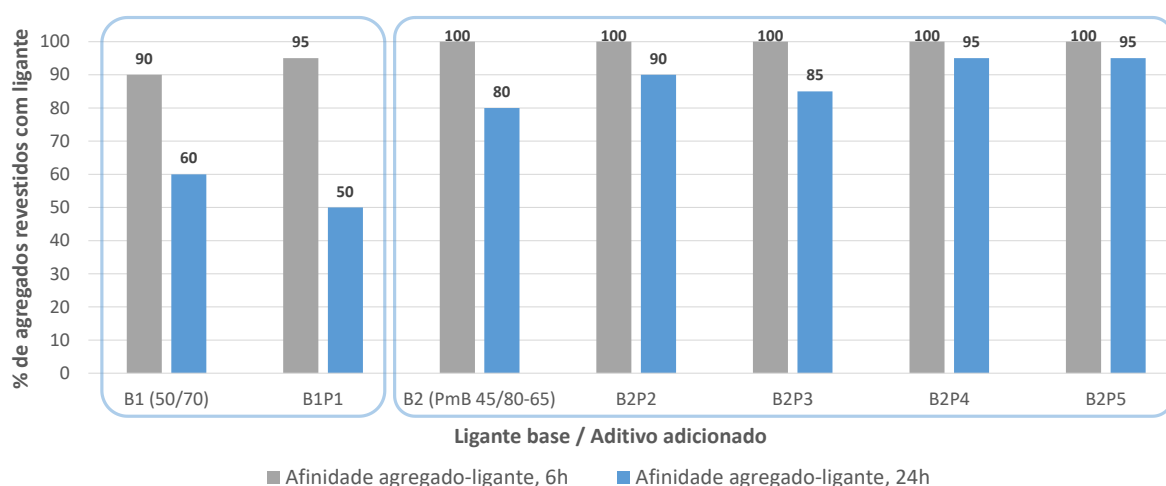


Fig. 4. Afinidade entre os agregados e ligantes com e sem adição de plásticos reciclados

De acordo com a Fig. 4 é possível observar que:

- O betume 50/70 (B1) com e sem adição de plásticos reciclados P1 tem valores de afinidade inferiores aos observados para os restantes aditivos adicionados ao betume modificado PmB 45/80-65 (B2).
- A adição de plásticos reciclados P1 reduz a afinidade comparativamente ao betume base 50/70 (B1).
- Os aditivos B2P2, B2P4 e B2P5 apresentam uma afinidade melhorada comparativamente ao betume base PmB 45/80-65, podendo futuramente ser potencialmente considerados como promotores de adesividade para adição a betumes de menor qualidade.

Adicionalmente, no decorrer dos ensaios foi possível observar para o B2P2, que a sua reduzida dispersão no ligante origina esporadicamente a ocorrência de superfícies de interface com maior fragilidade entre agregado e plásticos reciclados, como as que se podem observar na Fig. 5.

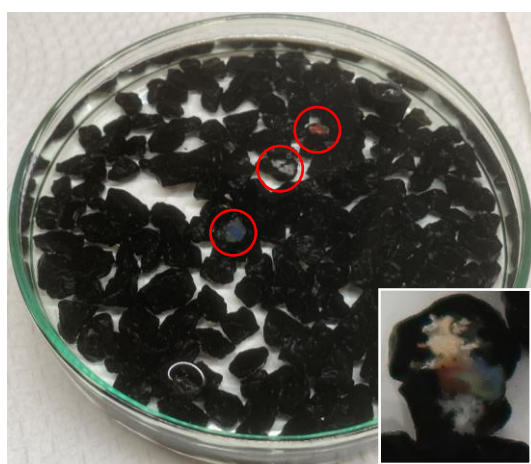


Fig. 5. Aspecto de agregados/plásticos reciclados com superfícies sem revestimento betuminoso

Os resultados obtidos permitem aferir sobre a importância da utilização de aditivos que assegurem uma adequada dispersão no ligante. A utilização de aditivos com reduzida capacidade de dispersão, apesar de permitirem um comportamento à afinidade semelhante, ou melhor do que o obtido sem adição de plástico reciclado pode contribuir para condicionar o desempenho da mistura betuminosa à ação da água e fendilhamento.

No caso dos aditivos P4 e P5 que apresentam uma fácil e rápida dispersão nos agregados, considera-se recomendável a sua adição posteriormente ao ligante para evitar a sua absorção pelos agregados, limitando o seu contributo para a melhoria do desempenho.

## 4 CONCLUSÕES

O presente estudo, inserido num programa experimental mais amplo em curso, contempla uma análise da influência da adição de cinco tipos distintos de plásticos reciclados no comportamento do ligante betuminoso, assim como na afinidade entre o ligante e os agregados.

Como contributo para um maior conhecimento sobre a utilização de plásticos reciclados na pavimentação rodoviária, os resultados obtidos neste estudo permitiram obter as seguintes conclusões principais:

*Influência da adição de plásticos reciclados no comportamento do betume*

- (i) Os aditivos de plásticos reciclados utilizados no estudo abarcam uma gama de potenciais materiais disponíveis no mercado, os quais variam de: plásticos com maior rigidez, tendo-se observado quando adicionados ao betume originam ligantes heterogéneos (resultante de uma temperatura de

amolecimento ligeiramente superior à temperatura de mistura do betume e/ou inadequada limpeza dos aditivos que pode limitar a interação com o betume); ou de plásticos que quando adicionados se dispersam totalmente no betume (temperatura de amolecimento inferior à temperatura de mistura do betume).

- (ii) Recomenda-se que particular atenção seja dada à limpeza dos aditivos e à existência de água no plástico de modo a mitigar a ocorrência de situações adversas no fabrico das misturas betuminosas em central e desempenho heterogéneo em obra.
- (iii) A utilização de plásticos reciclados contribui genericamente para uma redução da penetração do ligante betuminoso e para um incremento da sua temperatura de amolecimento. Porém, casos podem existir onde tal não se verifica como sucede com um dos aditivos avaliados.
- (iv) Contrariamente ao expectável, nem todos os aditivos de plásticos reciclados (três de cinco) apresentam uma redução significativa da recuperação elástica. Os resultados evidenciam uma melhoria no comportamento à deformação permanente das misturas betuminosas que incorporem este tipo de aditivos em especial a altas temperaturas, sem que o comportamento ao fendilhamento por fadiga seja significativamente condicionado, situação que se terá de validar quando estudadas as misturas betuminosas no âmbito do programa experimental em curso na BRISA sobre a utilização de plásticos reciclados.
- (v) A utilização de aditivos de plásticos reciclados, contribui para a melhoria do comportamento do betume e potencialmente da mistura betuminosa, onde podem atuar como agregados e/ou modificadores do betume, como resultado do tipo de plástico reciclado (rigidez e propriedades), sua origem (pré ou pós-consumidor), limpeza, e quantidade incorporada no fabrico de cada aditivo.
- (vi) As conclusões referentes ao comportamento de ligantes heterogéneos (reduzida dispersão dos aditivos de plástico reciclado), deve ser limitada, dada a potencial influência nos resultados obtidos.
- (vii) Aditivos de plástico reciclado que se dispersem facilmente no betume (temperatura de amolecimento inferior à de mistura do betume) recomenda-se que seja considerada a sua adição posteriormente à adição do ligante para evitar a sua absorção pelos agregados.
- (viii) De uma forma genérica a utilização de plásticos reciclados requer uma maior temperatura de fabrico (aumento consumo energético e emissões) o que poderá condicionar a aplicação da mistura (especialmente para temperaturas ambiente reduzidas) e mitigar o seu potencial impacto ambiental.

#### *Influência da adição de plásticos reciclados na afinidade entre agregados e o ligante betuminoso*

- (i) As amostras avaliadas com plásticos reciclados apresentam um comportamento à afinidade entre os agregados e o ligante similar ou melhorado relativamente ao betume base, à exceção de uma das amostras avaliadas.
- (ii) A utilização de plásticos reciclados pode ser considerada como uma potencial forma de produzir betumes de alto módulo sem recurso a betumes com maior rigidez (ex. 10/20), ou como promotores de adesividade para adição a ligantes de menor qualidade (para aditivos em que se observou uma melhoria significativa da adesividade).
- (iii) A utilização de aditivos com reduzida capacidade de dispersão, pode originar esporadicamente a ocorrência de superfícies de interface com maior fragilidade entre o agregado e os plásticos reciclados. Assim, apesar da adição de plásticos reciclados permitirem um comportamento à afinidade semelhante, ou melhor do que o obtido no betume base, poderá condicionar posteriormente, o desempenho da mistura betuminosa à ação da água e fendilhamento.



## 5 REFERÊNCIAS

1. D'Ambrieres, W. A. (2019). Plastics recycling worldwide: current overview and desirable changes. *The Journal of Field Actions: Field Action Science Reports: Special Issue 19*, 12-21.
2. Geyer, r., Jambeck, J. R., Law, K. L. (2017). Production, use, and fate of all plastics ever made, *Science Advances*, 3.
3. Gigault, J., Ter Halle, A., Braudrimont, M., Pascal, P. Y., Grauffre, F., Phi, T. L., El Hadri, H., Grassl, B., & Reynaud, S. (2018). Current opinion: What is a nanoplastic?. *Environmental Pollution*, 235, 1030-1034.
4. Plastics (2018). Literature review: Using recycled plastics for compounding and additives. *Plastics Industry Association*.
5. Willis, R., Yin, F., & Moraes, R. (2020). Recycled plastics in asphalt part A: State of the knowledge. (Report No. NAPA-IS-142), U.S.A: National Asphalt Pavement Association (NAPA) & Asphalt Institute.
6. Yin, F., Moraes, R., & Anand, A. (2020). Recycled plastics in asphalt part B: Literature review. (Report No. NAPA-IS-142), U.S.A: National Asphalt Pavement Association (NAPA) & Asphalt Institute.