

# REGENERAÇÃO DE MISTURAS BETUMINOSAS RECICLADAS PELA UTILIZAÇÃO DE BETUMES MODIFICADOS

Hélder Torres<sup>1</sup>, Hugo Silva<sup>2</sup>, Joel Oliveira<sup>3</sup>, Paulo Pereira<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Civil, Campus de Azurém, 4800-058 Guimarães, Portugal, email: [htorres.civil@gmail.com](mailto:htorres.civil@gmail.com)

<sup>2</sup> Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Civil, Campus de Azurém, 4800-058 Guimarães, Portugal, email: [hugo@civil.uminho.pt](mailto:hugo@civil.uminho.pt)

<sup>3</sup> Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Civil, Campus de Azurém, 4800-058 Guimarães, Portugal, email: [joliveira@civil.uminho.pt](mailto:joliveira@civil.uminho.pt)

<sup>4</sup> Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Civil, Campus de Azurém, 4800-058 Guimarães, Portugal, email: [ppereira@civil.uminho.pt](mailto:ppereira@civil.uminho.pt)

## Resumo

Atualmente, a reciclagem de materiais assume uma importância crescente para a Sociedade, e em particular no que diz respeito ao sector da construção. Nas infraestruturas rodoviárias caminha-se no mesmo sentido, uma vez que a reutilização de materiais nas misturas betuminosas permite fazer frente ao gradual aparecimento de uma grande diversidade de resíduos, sendo ainda possível reduzir os custos de produção. De facto, a reutilização de materiais nas misturas betuminosas permite a redução dos custos, a redução do impacto ambiental, e a necessidade de utilização de novos agregados e ligantes betuminosos, constituindo um ciclo fechado de vida do material.

O presente artigo tem como objetivo apresentar as vantagens da utilização de betumes modificados comerciais e produzidos em laboratório na regeneração ou na melhoria do desempenho de misturas betuminosas com elevadas taxas de reciclagem. Os materiais utilizados no estudo foram material fresado (50%), agregados novos, polímeros e betumes. Na modificação dos betumes base foram utilizados polímeros virgens (SBS) e reciclados (EVA), sendo ainda utilizado um betume modificado comercial.

Os ensaios laboratoriais demonstram que a utilização de betumes modificados como materiais regeneradores melhora significativamente o desempenho das misturas à deformação permanente, por comparação com uma mistura betuminosa reciclada de referência com um rejuvenescedor comercial. No que diz respeito à sensibilidade à água todas as misturas produzidas com estes betumes regeneradores demonstram um excelente resultado. Porém, a mistura produzida com o betume modificado comercial destaca-se das restantes pela maior capacidade em resistir a este fenómeno. Considera-se que de uma forma geral os resultados obtidos neste trabalho trouxeram novas perspectivas no que respeita ao processo de regeneração dos betumes presentes no material fresado e na reciclagem de misturas betuminosas.

**Palavras-chave:** Reciclagem de misturas betuminosas; Elevadas taxas de reciclagem; Regeneração; Betumes modificados; Desempenho das misturas betuminosas

## 1 Introdução

A reciclagem de materiais é muito importante para a sociedade em geral, mas em particular no que diz respeito ao sector da construção. No domínio das infraestruturas rodoviárias, caminha-se no mesmo sentido, fazendo frente à grande diversidade de materiais existentes. Em Portugal, a maior preocupação será na reciclagem de pavimentos do tipo flexível, ou seja, pavimentos constituídos por camadas de materiais granulares e de misturas betuminosas, dada a predominante expressão na rede rodoviária nacional [1].

A reutilização de materiais nas misturas betuminosas permite a redução dos custos, a redução do impacto ambiental, e a necessidade de utilização de novos agregados e ligantes betuminosos. Desta forma, a reciclagem de pavimentos rodoviários é uma técnica de reabilitação estrutural de pavimentos degradados, que surge como alternativa às soluções tradicionais que envolvem a colocação de um reforço no pavimento [2]. Existem diversos processos de reciclagem que se podem distinguir entre si no que respeita ao sítio onde se produz a mistura e a temperatura a que esta se produz, pelas características do material a reciclar e pelo tipo de ligante utilizado [3].

A incorporação de material fresado na produção de novas misturas pode no entanto causar alguns problemas devido às características do betume. O facto do betume presente no material fresado se encontrar envelhecido obriga normalmente a um cuidado extra na formulação e execução de novas misturas [4].

Os problemas que resultam do envelhecimento do betume traduzem-se essencialmente no seu endurecimento e conseqüente aumento da fragilidade [5]. Este facto potencia a ocorrência de fenómenos de degradação do pavimento, como fendilhamento por fadiga, térmico e pela desagregação superficial resultante da perda de adesão entre o betume e os agregados [6].

Desta forma, são colocados importantes desafios à reciclagem, no sentido de dar resposta aos problemas anteriormente enunciados. Uma forma de resolver este problema é a utilização de aditivos comerciais, conhecidos como agentes de rejuvenescimento, para restabelecer as propriedades do betume perdidas no processo de envelhecimento [7].

Este tipo de aditivos tem, como o próprio nome indica, o objetivo de rejuvenescer as misturas betuminosas, permitindo a recuperação de parte das propriedades iniciais dos betumes envelhecidos através da reconstituição química do betume. Os rejuvenescedores são produtos com a capacidade de restaurar a parte dos maltenos que desaparecem do betume devido à oxidação [8].

Todos os aspetos abordados servem de motivação na procura de soluções alternativas às existentes atualmente, por forma a resolver o problema do envelhecimento do betume.

Um método que permite melhorar significativamente a qualidade das misturas betuminosas aplicadas nos pavimentos é a adição de polímeros [9], sendo que a modificação do betume com polímeros é considerada a melhor opção para melhorar as propriedades da mistura [10].

Nesse sentido, considerou-se pertinente estudar a possibilidade de utilizar betumes modificados para solucionar os problemas associados ao envelhecimento do betume quando se produzem misturas recicladas com elevadas percentagens de material fresado. Para o efeito foram utilizados betumes modificados comerciais ou especialmente desenvolvidos em laboratório.

## 2 Materiais e métodos

### 2.1 Materiais

Os materiais utilizados no presente estudo podem dividir-se em quatro tipos: o material resultante da fresagem de pavimentos, os agregados novos, os betumes e os polímeros.

O material fresado (MF) é o resultado da fresagem da camada superficial de um pavimento de uma autoestrada, que foi armazenado junto à central betuminosa de uma empresa de construção rodoviária. O MF é composto por agregados e betume. Este último material implica a realização de um estudo mais cuidado, devido aos anos de serviço em que esteve exposto aos agentes climáticos, podendo encontrar-se num estado avançado de envelhecimento [4].

A escolha do tipo de agregados novos tem em conta a disponibilidade destes na região onde o estudo é realizado. Assim, os agregados são essencialmente de origem granítica, com exceção do filler que é de origem calcária.

Neste estudo procura-se utilizar os polímeros com maior potencial para a modificação de betumes, de forma a otimizar a sua aplicação. Nem todos os polímeros são adequados para a modificação do betume, pois devem ser compatíveis com o betume. Deste modo, o polímero virgem mais utilizado atualmente para modificar o betume é o elastómero sintético estireno-butadieno-estireno, conhecido por SBS [9]. No que diz respeito aos polímeros reciclados, estudos anteriores demonstraram que o uso do polímero EVA pode ser considerado uma alternativa viável, tanto do ponto de vista ambiental como económico [11].

Dado que o betume é o componente das misturas betuminosas que tem maior influência no seu desempenho [12], deve-se ter especial atenção na seleção do mesmo. Da modificação dos betumes base com polímeros prevê-se maior rigidez e ductilidade do betume resultante, tendo em conta as características conhecidas dos polímeros [9]. Assim, deve-se selecionar um betume base com penetração elevada e ponto de amolecimento baixo. Tendo em conta estes aspetos, e os produtos existentes no mercado português, selecionou-se o betume Cepsa 160/220 como betume base a utilizar para preparação dos betumes modificados em laboratório.

O mercado dos betumes apresenta hoje soluções comerciais que podem, no âmbito deste estudo, ser utilizadas com o mesmo princípio. Desta forma, deve-se optar por um betume que cumpra os requisitos de penetração, anel e bola, recuperação elástica e que tenha ainda em atenção a sua disponibilidade no mercado. Assim, o betume Styrelf 13/60 foi o que melhor se adequou aos parâmetros de seleção.

### 2.2 Metodologia do estudo

A caracterização do material fresado e a formulação da mistura betuminosa teve em consideração trabalhos anteriores desenvolvidos neste domínio. No que diz respeito à formulação, após um processo de separação do material fresado, 30% do MF fino (dimensão inferior a 8 mm) é introduzido a frio na mistura e 20% do MF grosso é aquecido juntamente com os agregados novos, perfazendo 50% de MF no total da mistura betuminosa [4, 13, 14].

O estudo de betumes vai permitir determinar as propriedades reológicas, sendo desta forma possível prever o comportamento dos ligantes em serviço, definir a temperatura dos agregados, dos betumes regeneradores e as correspondentes temperaturas de produção e compactação das misturas betuminosas. Para o estudo de betumes, não se recorreu à utilização de betumes envelhecidos em ambiente artificial. O objetivo é recuperar do MF as quantidades de betume envelhecido necessárias para o estudo, uma vez que é reconhecida a importância de abordar a caracterização de betumes envelhecidos em ambiente natural e com a sua própria química e estrutura.

Como o objetivo final deste trabalho é determinar qual o betume regenerador mais adequado para as misturas recicladas, depois de se realizar o estudo dos betumes procedeu-se à realização de ensaios para validação do desempenho das misturas betuminosas produzidas com esses betumes. Realizou-se ensaios de sensibilidade à água (EN 12697-12) e ensaios de pista (EN 12697-22).

### 2.3 Métodos de produção

O estudo de betumes pressupõe a mistura do betume envelhecido com diferentes betumes regeneradores (tal como acontece na mistura reciclada). Assim, por forma a facilitar a interpretação dos resultados, são atribuídas as seguintes nomenclaturas aos betumes base:

- B0 - Betume envelhecido (recuperado do material fresado);
- B1 - Betume Styrelf 13/60;
- B2 - Betume Cepsa 160/220.

Os betumes regeneradores foram produzidos com recurso ao método húmido com um dispersor de alto corte (7200 rpm) a uma temperatura de 180 °C. A percentagem de polímero foi definida através de estudos anteriores realizados neste domínio [15]. Os betumes produzidos em laboratório resultam da mistura do betume base B2 com os polímeros EVA e SBS de acordo com a Tabela 1.

Tabela 1 – Constituição dos betumes regeneradores produzidos em laboratório

		Betume base		Polímeros	
		B0	B2	EVA	SBS
Betumes regeneradores	B3	-	95,0%	5,0%	-
	B4	-	95,0%	-	5,0%

Em seguida, a Tabela 2 apresenta a constituição dos ligantes finais das misturas recicladas, que resultam da mistura dos betumes regeneradores com o betume recuperado do MF (B0). Nesta fase, os ligantes finais são materiais de maior complexidade, resultantes da mistura do betume regenerador com o betume envelhecido.

Tabela 2 – Constituição dos ligantes finais em estudo (betume regenerador e betume envelhecido)

		Betume base		Betume regenerador		
		B0	B2	B1	B3	B4
Ligante	BM1	50,0%	-	50,0%	-	-
	BM2	50,0%	-	-	50,0%	-
	BM3	50,0%	-	-	-	50,0%

Neste trabalho, também foi produzido um ligante de referência (BR) que prevê a utilização de um rejuvenescedor (RC), por ser uma solução utilizada de forma mais corrente [16]. A Figura 1 apresenta um esquema da produção dos betumes regeneradores e dos ligantes finais nas diferentes fases do estudo, bem como das misturas betuminosas correspondentes a cada betume regenerador.



Figura 1 – Esquema de produção dos betumes regeneradores e respetivas misturas betuminosas

### 3 Resultados

#### 3.1 Caracterização base dos betumes

Na Figura 2 apresentam-se os resultados da produção dos betumes regeneradores. Verifica-se que a adição de 5,0% de polímero EVA ao betume B2, com recurso ao dispersador de alto corte, permite baixar de forma considerável o valor de penetração. Já o valor da temperatura de amolecimento sofre um aumento. Esta modificação permite ainda que o betume regenerador B3 adquira uma nova propriedade, a resiliência. Em relação à modificação do betume B2 com 5,0% de SBS, este apresenta uma redução ainda maior da penetração e um aumento significativo da temperatura de amolecimento em relação ao betume base B2. No que se refere à comparação dos dois betumes regeneradores (B3 e B4), verifica-se que o polímero SBS tem melhores resultados, pois permite baixar mais a penetração, e aumentar mais a temperatura de amolecimento e a resiliência.

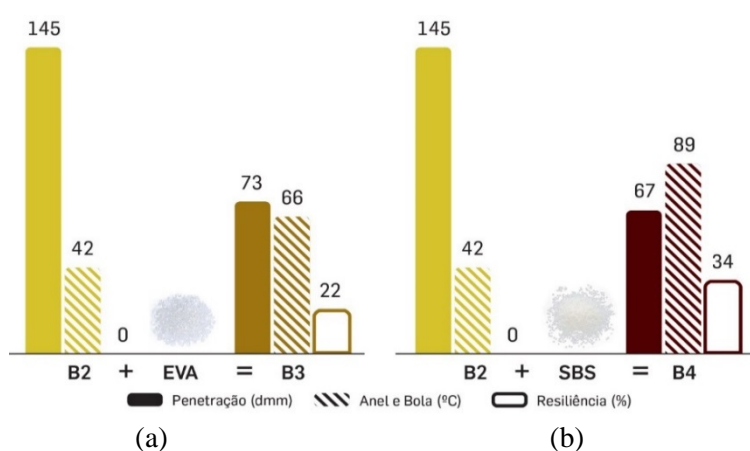


Figura 2 – Características dos betumes regeneradores (a) B3 e (b) B4

Na Figura 3 (a) e (b) apresentam-se as características do betume B0 e os resultados da mistura com os betumes regeneradores. Assim, os resultados demonstram que o betume B0 apresenta uma penetração muito baixa e uma temperatura de amolecimento elevada, o que indica que se trata de um betume com elevada rigidez e falta de flexibilidade devido ao seu estado de oxidação. Como se esperava, este material não apresenta propriedades resilientes.

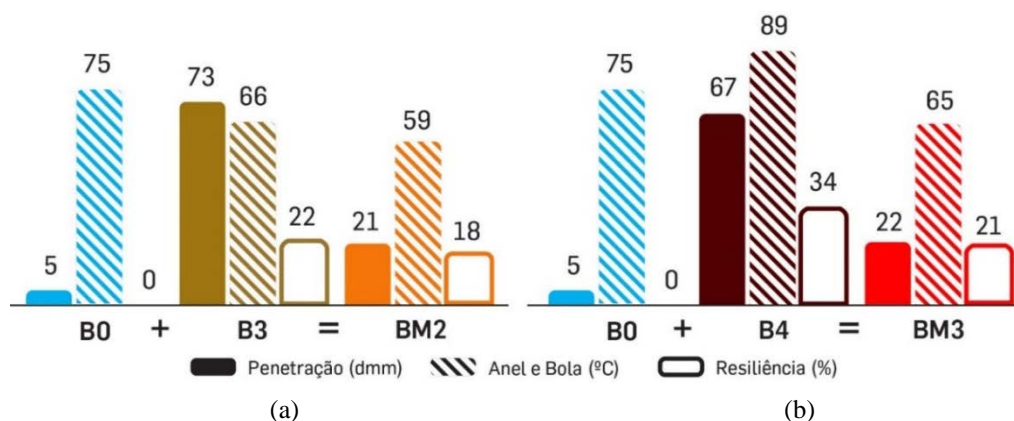


Figura 3 – Produção dos ligantes finais (a) BM2 e (b) BM3

A Figura 3 (a) mostra a produção do ligante BM2, que é a mistura do betume B0 com o betume regenerador B3. Ao nível da penetração, o valor do ligante BM2 apresenta valor intermédio dos dois betumes que lhe dão origem, apesar deste se aproximar da penetração do betume B0. Quanto à temperatura de amolecimento, este valor é menor do que os dos betumes B0 e B3 e não um valor intermédio, como seria espectável. De modo a justificar tal facto, é importante perceber o que acontece às características do betume que resulta da mistura do betume B0 com o betume B2 (Figura 4). Espera-se que esta análise ajude a entender de que forma o polímero interage com os betumes B0 (envelhecido) e B2 (160/220).

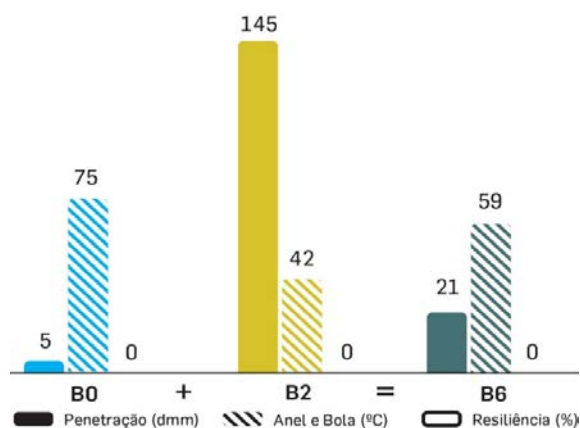


Figura 4 – Resultados da mistura do betume B0 com o betume B2

Através da Figura 4 verifica-se que temperatura de amolecimento é idêntica quando se compara o betume B6 e o ligante BM2, sendo que, ao analisar individualmente este parâmetro, o mesmo pode indicar que a presença do polímero não se faz sentir no ligante BM2. Contudo, pode-se justificar este resultado pelo facto da mistura do betume B0 com o B3 resultar numa percentagem de polímero no ligante BM2 de apenas 2,5%. Desta forma, o betume B0 potencia a dispersão da rede polimérica do betume regenerador B3 (que tinha 5,0% de polímero), reduzindo assim a temperatura anel e bola.

A resiliência do ligante BM2 sofre uma pequena redução quando comparada com o valor obtido no betume regenerador B3 devido à inexistência desta propriedade no betume B0.

Na Figura 3 (b) apresentam-se as características do ligante BM3, produzido em condições semelhantes ao ligante BM2, mas que resulta da junção do betume B0 com o B4. As propriedades avaliadas seguem a mesma evolução do ligante BM2. De referir, que o ligante BM3 apresenta maior capacidade resiliente e maior temperatura de amolecimento, sendo a penetração maior do que no ligante BM2.

Em seguida, na Figura 5 apresentam-se as características do ligante BM1, que resulta da mistura do betume regenerador B1 (betume comercial) com o betume B0. Em primeira análise verifica-se que o betume regenerador B1 apresenta características diferenciadoras dos betumes regeneradores B3 e B4, já que a temperatura de amolecimento do ligante BM1 resulta num valor intermédio, e permite aumentar a capacidade resiliente do ligante BM1 em relação ao betume B1 (dado que nos ligantes BM2 e BM3 a adição do betume B0 fazia baixar esta propriedade). Já a penetração segue a mesma tendência e apresenta um valor intermédio entre os dois betumes utilizados na mistura, embora seja um valor mais próximo do betume B0.

Finalmente, a Figura 6 permite comparar as propriedades básicas dos vários ligantes em estudo com as de um ligante de referência BR (ligante com rejuvenescedor). Assim, verifica-se que todas as misturas apresentam uma temperatura de amolecimento maior que o betume BR, e a penetração dos ligantes apresentam valores próximos da mistura BR, com exceção do ligante BM1 que exhibe um valor mais baixo. O ligante de referência não apresenta qualquer capacidade resiliente, sendo esta uma propriedade adicional que é provida pela adição dos polímeros.

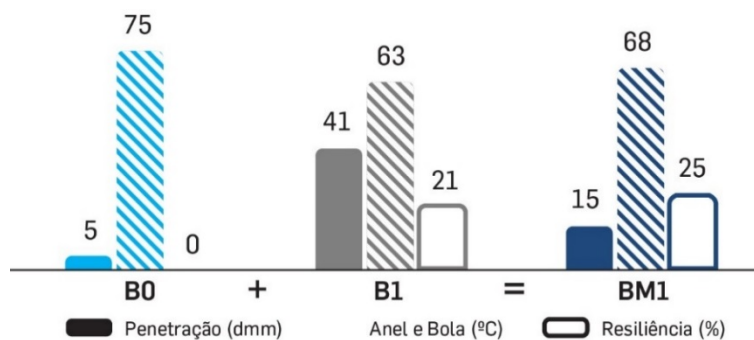


Figura 5 – Produção do ligante BM1

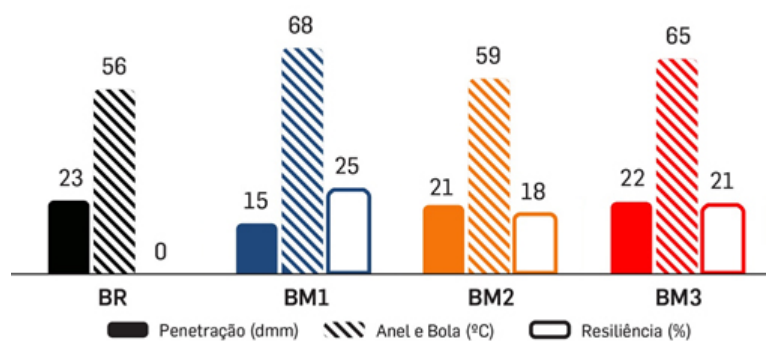


Figura 6 – Características base dos vários ligantes em estudo

### 3.2 Caracterização reológica

A análise reológica procura avaliar, para uma gama de temperaturas que ocorre entre os 19 °C e os 180 °C, propriedades dos betumes tais como o módulo complexo ( $G^*$ ), o ângulo de fase ( $\delta$ ) e a viscosidade (CP). O DSR permite obter esses parâmetros para as temperaturas compreendidas entre os 19 °C e os 90 °C. A partir dos 100 °C apenas é medido o parâmetro da viscosidade, através do viscosímetro rotacional.

Tendo em conta os principais fenómenos de degradação dos pavimentos rodoviários, poderá ser interessante procurar perceber de que forma se podem comportar as misturas nas temperaturas baixas de serviço, pelo que se adotou como temperatura de referência 20 °C, sabendo que um betume com menores módulos elásticos a esta temperatura poderá resistir melhor à fadiga. Por sua vez, a deformação permanente, que ocorre normalmente para a gama de temperaturas elevadas (superiores a 50 °C), obriga a que o ligante obtenha uma componente elástica mais alta de modo a resistir a este fenómeno. Assim, deve-se ter em consideração estas temperaturas na análise reológica dos ligantes.

A viscosidade medida entre os 100 °C e 180 °C permite definir as temperaturas de mistura e compactação, tendo em consideração o tipo de ligante.

Esta análise compara o desempenho dos ligantes produzidos com betumes regeneradores relativamente ao ligante de referência BR. Desta forma, na Figura 7 (a) e (b) é exibido o comportamento dos diferentes ligantes. Para a temperatura de 20 °C pode-se observar que o módulo ( $G^*$ ) de todos os ligantes apresenta um valor próximo. No que diz respeito ao ângulo de fase verifica-se que o ligante BM1 apresenta o valor mais baixo, seguido do ligante BM3 e do ligante BM2 com o resultado mais elevado. Por sua vez, o ligante BR apresenta o maior valor de ângulo de fase. Estes valores demonstram que a componente viscosa do módulo dos novos betumes regeneradores não deve ser superior à do ligante BR para a temperatura considerada. No entanto, deve-se ter em atenção que a capacidade resiliente dos ligantes modificados podem contribuir de forma significativa para um melhor desempenho destas misturas no que diz respeito à fadiga.

Nas temperaturas elevadas destaca-se ligante BM1 que demonstra um aumento significativo da rigidez a partir dos 50 °C, ao mesmo tempo que apresenta o valor de ângulo de fase mais baixo (resultados essenciais para um bom desempenho da mistura à deformação permanente).

Por sua vez, o ligante BR apresenta os valores mais baixos do módulo complexo ao longo de toda a gama de temperaturas e o valor mais alto do ângulo de fase. Assim, esta mistura poderá apresentar menor resistência à deformação permanente quando comparada com as misturas modificadas.

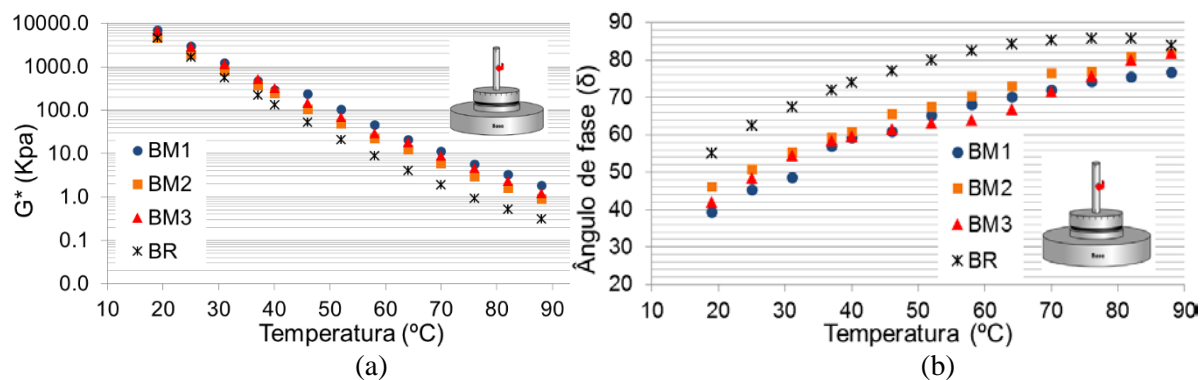


Figura 7 – Reologia dos vários ligantes: (a) módulo complexo e (b) ângulo de fase

A viscosidade é exibida na Figura 8 (a) e (b), onde se verifica um comportamento idêntico ao módulo complexo para temperaturas entre os 19 °C e os 90 °C. Para as temperaturas acima dos 100 °C, e por comparação com o ligante BR, efetivamente percebe-se que os polímeros conferem maior viscosidade ao ligante, implicando o uso de temperaturas de produção um pouco mais altas.

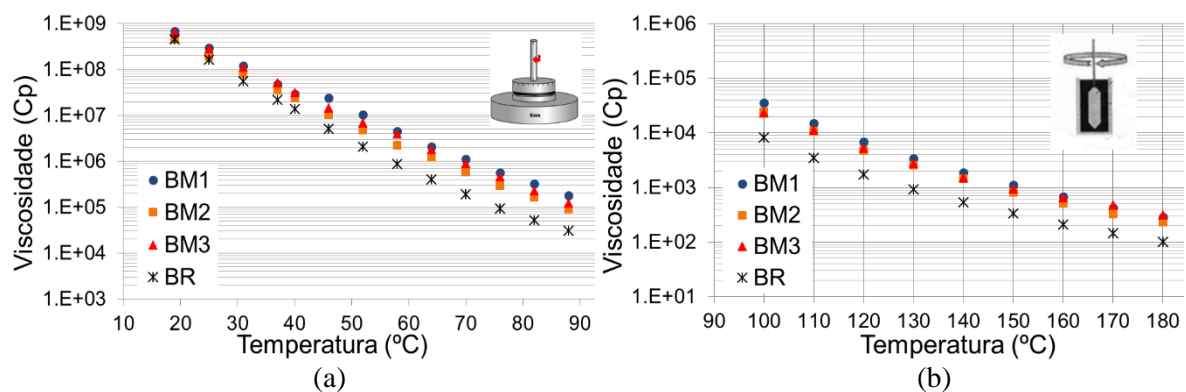


Figura 8 – Viscosidades dos vários ligantes no (a) DSR e no (b) viscosímetro rotacional

Depois de se estudar as características dos ligantes, e visto que várias soluções se apresentaram como sendo bastante promissoras, optou-se por fazer um estudo adicional da sensibilidade à água e da resistência à deformação permanente de misturas recicladas produzidas com esses ligantes.

### 3.3 Sensibilidade à água

O gráfico da Figura 9 relaciona o valor da resistência à tração indireta (ITS) com a deformação de cada mistura. Duma forma geral verifica-se que todos os valores de ITS são elevados, e a deformação reduzida (devido ao efeito do material fresado). Quando comparadas com a mistura MR, verifica-se que a mistura M2 apresentam um valor de ITS e deformação semelhante. Por sua vez a mistura M1 exibe o maior valor de ITS e deformação ligeiramente superior. Já a mistura M3 é a que



apresenta o valor mais baixo de ITS, e a maior deformação neste ensaio, quando comparada com todas as outras misturas. Com base nestes resultados é previsível a obtenção dum menor módulo para a mistura M3, e provavelmente uma maior resistência à fadiga tendo em conta a temperatura a que é realizado este ensaio (15 °C).

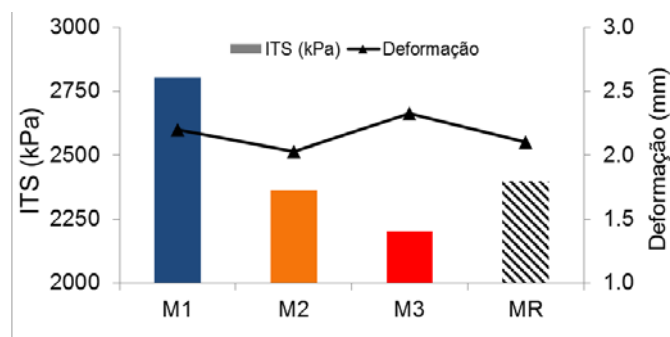


Figura 9 – Valores de ITS e deformação dos provetes das misturas ensaiados a seco

Já o gráfico da Figura 10 permite relacionar o ITSR (rácio da resistência à tração indireta dos provetes condicionados e não condicionados) com o volume de vazios. Habitualmente quanto maior o volume de vazios, mais sensível é a mistura à ação da água, dado que maiores volumes de vazios facilitam a penetração de água no interior da mistura.

A mistura M3 apresenta o melhor desempenho, embora não tenha o menor volume de vazios. Este facto pode dever-se a um melhor revestimento dos agregados, tendo em conta a modificação do betume, o que permite diminuir a perda de resistência provocada pela ação da água na ligação betume-agregado.

Já a mistura M2 demonstra ser a mistura mais sensível à ação da água, mesmo apresentando um volume de vazios mais baixo que a mistura MR. O tipo de polímero (EVA reciclado) utilizado nesta mistura pode condicionar o valor deste parâmetro.

A mistura MR apresenta o maior volume de vazios quando comparada com as misturas que utilizam os ligantes modificados. Deste modo, verifica-se que com a utilização da mesma energia e com uma temperatura aproximada de compactação (em relação à mistura MR), a utilização de betumes regeneradores com polímeros conduz a um menor volume de vazios, o que demonstra um melhor adensamento e uma melhor trabalhabilidade.

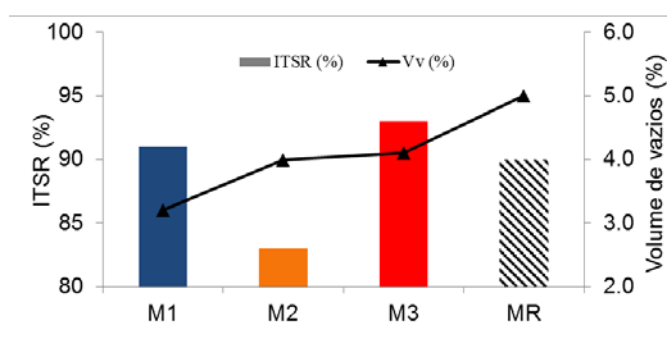


Figura 10 – Valores de ITSR e volume de vazios das misturas

### 3.4 Deformação permanente

A avaliação da deformação permanente através do ensaio de pista é outros dos ensaios que permite avaliar o desempenho de uma mistura betuminosa. Nesta fase avaliou-se apenas o desempenho das misturas que ofereceram melhor garantia de desempenho no ensaio de sensibilidade

à água. Uma vez que a mistura M2 foi a que apresentou pior desempenho no ensaio de sensibilidade à água seguiu-se com apenas com a avaliação deste parâmetro na mistura M1, M3 e MR.

Os resultados apresentados na Figura 11 demonstram que todas as misturas M1 e M3 desenvolvidas neste trabalho apresentam um melhor desempenho à deformação permanente do que a mistura de referência (MR). A mistura M1 destaca-se ainda através de uma análise visual, sendo possível verificar que a deformação final é bastante menor do que a observada em cada uma das restantes misturas estudadas. Os resultados permitem validar análise prévia efetuada através do estudo de betumes que indicava um melhor resultado da misturas modificados relativamente à mistura de referência (MR).

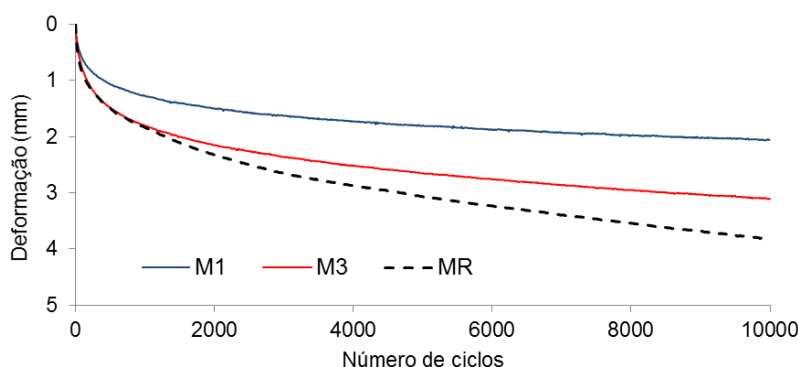


Figura 11 – Evolução da deformação das misturas em estudo

#### 4 Conclusões

O principal objetivo deste estudo foi desenvolver misturas betuminosas com elevadas taxas de reciclagem, que tirem proveito das propriedades que os betumes modificados podem conferir a estas novas misturas.

O estudo de betumes demonstrou que a utilização de polímeros pode ser efetivamente uma alternativa aos rejuvenescedores comerciais, no que se refere a misturas com elevadas taxas de reciclagem. A maior capacidade resiliente que os betumes regeneradores conferem ao ligante permite melhorar significativamente o seu comportamento na gama habitual de temperaturas de serviço. Assim, um estudo de betumes demonstra ser uma ferramenta importante numa análise prévia à utilização de elevadas taxas de reciclagem em misturas betuminosas, pois permite prever o comportamento do ligante na produção, compactação e em serviço.

De um modo geral, no que se refere à produção das misturas betuminosas, verificou-se que os betumes regeneradores produzidos neste trabalho permitem melhorar a flexibilidade das misturas, garantindo melhor qualidade da mistura reciclada durante a compactação e em serviço.

As misturas apresentam baixa sensibilidade à água, com valores de ITSR acima de 80%. No entanto, a mistura M2 revelou ter pior desempenho que a mistura MR, sendo que as misturas M1 e M3 destacam-se por terem uma menor sensibilidade à ação água.

No que se refere ao ensaio de pista verificou-se que as misturas M1 e M3 apresentam melhor resistência à deformação permanente do que a mistura de referência MR, como previsto pela análise efetuada no estudo de betumes deste trabalho. A mistura M1 revela o melhor resultado em relação às misturas M3 e MR. Este resultado deve-se essencialmente às características diferenciadoras deste betume comercial em relação aos restantes betumes produzidos. Segundo o fabricante, a reação química na produção confere grande elasticidade, resistência ao envelhecimento, boa adesividade aos agregados e baixa suscetibilidade térmica.

Considera-se que de uma forma geral os resultados obtidos neste trabalho trouxeram novas perspetivas no que respeita ao processo de regeneração dos betumes presentes no material fresado e na reciclagem de misturas betuminosas.

## 5 Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer o apoio financeiro e material. Este trabalho é financiado por fundos FEDER através do Programa Operacional de Competitividade (COMPETE) e por fundos nacionais através da Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT) no âmbito do projeto PLASTIROADS (PTDC/ECM/119179/2010 ou FCOMP-01-0124-FEDER-020335), sendo ainda suportado pela Elevo Group (material fresado e agregados), CEPISA (betume) e GIntegral (polímeros).

## 6 Referências

- [1] Batista, F.A. (2004). Novas técnicas de reabilitação de pavimentos. Misturas betuminosas densas a frio, Tese de Doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto e Laboratório Nacional de Engenharia Civil (2004), Porto, Portugal.
- [2] EAPA (2007). Environmental Guidelines on Best Available Techniques for the Production of Asphalt Paving Mixes, European Asphalt Pavement Association, Brussels, Belgium.
- [3] Fonseca, P. (2004). Reciclagem se Pavimentos Rodoviários, RECIPAV - Engenharia e Pavimentos, Lda. ed, RECIPAV - Engenharia e Pavimentos, Lda, Disponível em: <http://www.recipav.pt/imagens/reciclagem.pdf>; Acedido em 17 de Fevereiro de 2014.
- [4] Abreu, L.P.F., Oliveira, J.R.M., Silva, H.M.R.D. (2013b). Formulação e caracterização de ligantes numa mistura betuminosa com uma taxa de reciclagem elevada, 7º Congresso Rodoviário Português, Lisboa.
- [5] Johansson, L.S., Lu, X., Isacson, U. (1998). Ageing of road bitumens. State of de art, Department of Infrastructure and Planning, Royal Institute of Technology.
- [6] Antunes, M.L. (2005). Exigências funcionais e estruturais de pavimentos, Ação de Formação: Conservação e reabilitação de pavimentos rodoviários Fundação para a Formação Contínua em Engenharia Civil Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Novembro de 2005.
- [7] Abreu, L., Oliveira, J., Palha, D., Fonseca, P. (2013a). The Role of Rejuvenating Agents in the Recycling of Asphalt Mixtures, 2nd International Conference - WASTES: Solutions, Treatments and Opportunities, Braga.
- [8] Brownridge, J. (2010). The Role of an Asphalt Rejuvenator in Pavement Preservation: Use and Need for Asphalt Rejuvenation, Compendium of Papers, the First International Conference on Pavement Preservation, Newport Beach, CA, April 13–15.
- [9] Becker, Y.M., Maryro, P., Méndez, P.M., Rodríguez, Y. (2001). Polymer Modified Asphalt, Vision Tecnologia, Vol. 9, pp. 39-50.
- [10] Becker, Y.M., Muller, A.J., Rodriguez, Y. (2003). Use of Rheological Compatibility Criteria to Study SBS Modified Asphalts, Journal of Applied Polymer Science, Vol. 90, pp. 1772-1782.
- [11] García-Morales, M., Partal, P., Navarro, F.J., Martínez-Boza, F., Gallegos, C., González, N., González, O., Muñoz, M.E. (2004). Viscous properties and microstructure of recycled eva modified bitumen, Fuel, Vol. 83 (1), pp. 31-38.
- [12] Branco, F., Pereira, P., Santos, L.P. (2005). Pavimentos Rodoviários, Coimbra.
- [13] Fonseca, P., Guimarães, C., Gomes, V., Palha, D., Silva, H.M.R.D., Oliveira, J.R.M., Abreu, L.P.F. (2013). Estudo de Material Fresado para Incorporação em Misturas Betuminosas a Quente com Altas Taxas de Reciclagem, 7º Congresso Rodoviário Português, Lisboa.
- [14] Palha, D., Fonseca, P., Abreu, L.P.F., Oliveira, J.R.M., Silva, H.M.R.D. (2013). Solutions to improve the recycling rate and quality of plant produced hot mix asphalt, 2nd International Conference - WASTES: solutions, treatments, opportunities, Braga.
- [15] Costa, L.M.B. (2013). Projeto de Tese - Estudo e Otimização de Ligantes Modificados e Misturas Betuminosas Inovadoras com Resíduos Plásticos, Universidade do Minho.
- [16] Palha, D., Fonseca, P., Guimarães, C., Abreu, L., Silva, H., Oliveira, J., Pereira, P. (2014). Avaliação do desempenho de misturas betuminosas recicladas com elevadas taxas de material fresado, 7º Congresso Luso-Moçambicano de Engenharia, Inhambane/Moçambique.