

BETUMES MODIFICADOS COM RESÍDUOS PARA APLICAÇÃO EM MISTURAS CONVENCIONAIS E RECICLADAS

Sara Fernandes¹, Hugo M.R.D. Silva² e Joel Oliveira²

¹Universidade do Minho, C-TAC – Centro do Território, Ambiente e Construção, Campus de Azurém, 4800-058 Guimarães, Portugal

email: id4966@alunos.uminho.pt

²Universidade do Minho, C-TAC – Centro do Território, Ambiente e Construção, Campus de Azurém, 4800-058 Guimarães, Portugal

Sumário

O principal objetivo deste trabalho é o desenvolvimento de ligantes que maximizem a utilização de resíduos e reduzam a quantidade de betume novo a utilizar nas misturas betuminosas. Deste modo, diferentes percentagens de óleo de motor usado e polietileno de alta densidade reciclado foram adicionados a um betume convencional e, posteriormente, a 50 % de betume envelhecido. Os betumes modificados e finais foram caracterizados através do ensaio de penetração, temperatura de amolecimento e viscosidade. Concluiu-se que a mistura reciclada com 50 % de material fresado e betume modificado apresenta características mecânicas superiores à mistura convencional e não apresenta riscos a nível ambiental.

Palavras-chave: Óleo de motor usado; Resíduos poliméricos; Modificação de betumes; Caracterização de betumes; Desempenho das misturas.

1 INTRODUÇÃO

A indústria da pavimentação rodoviária emprega grandes quantidades de recursos naturais na construção e conservação das infraestruturas rodoviárias. Para além disso, durante os trabalhos de reabilitação geram-se grandes quantidades de resíduos, nomeadamente material fresado. Deste modo é de extrema importância o estudo de soluções que minimizem a utilização de betume e agregados (recursos naturais) e valorizem a utilização de resíduos industriais.

O betume é um dos materiais mais valiosos utilizados na pavimentação e a minimização do seu consumo, quer pela adição de resíduos, quer pela reutilização de betume envelhecido, apresenta elevadas vantagens ambientais e económicas.

O óleo de motor usado é um resíduo utilizado no rejuvenescimento do betume pois dilui os asfaltenos provenientes do betume envelhecido através da adição de maltenos [1, 2]. Os rejuvenescedores, além de rejuvenescerem o betume, devem ter a capacidade de cobrir o material novo e fresado, dispersar-se facilmente no betume envelhecido e formar uma mistura homogênea [3]. A utilização do óleo de motor usado, como rejuvenescedor, reduz a viscosidade do betume e as temperaturas de produção e compactação [4, 5]. Contudo, quando utilizado em elevadas quantidades pode reduzir a recuperação elástica e a resistência à deformação permanente [1]. Apesar disso, estes problemas podem ser minimizados, ou até mesmo eliminados, através da utilização de resíduos poliméricos.

Os resíduos poliméricos, entre os quais se refere os plásticos e pneus usados, estão disponíveis em elevadas quantidades e, apresentam como principais vantagens o aumento da resistência à deformação permanente e ao fendilhamento das misturas betuminosas [6-8]. O polietileno de alta densidade (HDPE) é um resíduo polimérico, proveniente de embalagens e garrafas de plástico, e que quando utilizado em misturas betuminosas aumenta significativamente a estabilidade e durabilidade [7, 9].

Assim, o principal objetivo deste trabalho consiste no desenvolvimento de ligantes que maximizem a utilização de resíduos, tais como óleo de motor e HDPE reciclado, além do material fresado quando se propõe a utilização destes ligantes em misturas recicladas. Estes ligantes modificados com resíduos têm como finalidade reduzir a quantidade de betume novo nas misturas recicladas e, ao mesmo tempo, aumentar o desempenho mecânico das mesmas. Para atingir estes objetivos, diferentes percentagens de cada resíduo, nomeadamente óleo de motor usado e polietileno de alta densidade (HDPE) foram adicionadas ao betume

novo e avaliadas para determinar os betumes modificados com as melhores características, para aplicação em misturas com 50 % de material fresado. A mistura reciclada desenvolvida neste trabalho e uma mistura betuminosa convencional de referência foram avaliadas e comparadas mecânica e ambientalmente.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais

Os materiais selecionados para este estudo foram um betume convencional e dois tipos de modificadores, nomeadamente um polímero reciclado e óleo de motor usado. Quanto ao betume utilizado, trata-se de um betume convencional 35/50 da Cepsa, devido ao seu baixo valor de penetração (permitindo assim usar maior quantidade de óleo) e por se tratar de um betume corrente na pavimentação rodoviária. Este betume convencional apresenta uma penetração de 35 dmm e uma temperatura de amolecimento de 54 °C. No que concerne aos polímeros a escolha do plastómero polietileno de alta densidade (HDPE) prende-se com o facto de ser um resíduo que existe em grandes quantidades e com o seu baixo custo. O HDPE utilizado é um polímero reciclado, fornecido pela Gintegral Gestão Ambiental, S.A. e que apresenta uma dimensão máxima de 4 mm. No que diz respeito ao óleo, trata-se de um óleo de motor usado proveniente de veículos pesados, sem qualquer tipo de tratamento e cuja viscosidade apresentada é inferior a 0,1 Pa.s, na gama de temperaturas estudadas (entre 30 °C e 180 °C).

Para a produção da mistura betuminosa convencional de referência, produzida apenas com betume 35/50 e sem material fresado, bem como da mistura reciclada com o betume inovador desenvolvido, foram selecionados agregados britados de origem granítica, com a exceção do filer em pó calcário, ambos fornecidos pela empresa Bezerras Lda. Por sua vez, o material fresado utilizado neste estudo foi obtido através da fresagem de camadas de desgaste de uma autoestrada e, posteriormente, dividido em duas frações (fina e grossa) com auxílio de um peneiro de dimensão 8 mm. O betume envelhecido recuperado do material fresado apresenta uma penetração de 9 dmm e uma temperatura de amolecimento de 74 °C, ou seja, trata-se de um betume muito rígido.

Esta escolha de materiais permite que se reduza a quantidade de betume utilizado nas misturas betuminosas, pois o óleo usado e o betume envelhecido do material fresado substituirão uma parte do betume, os polímeros melhorarão as suas propriedades mecânicas, em especial a resistência à deformação, e os agregados do material fresado reduzirão a necessidade de novos agregados. Desta forma, pretende-se obter um betume modificado com boas características térmicas e mecânicas e que possua uma taxa de reciclagem elevada devido à utilização de produtos de diferentes indústrias. De referir que a mistura desenvolvida neste trabalho apenas utilizou 40 % de betume novo em comparação com a mistura de referência.

2.2 Métodos

Os betumes modificados utilizados neste estudo foram produzidos através da adição de dois resíduos (óleo de motor usado e HDPE) num betume convencional, com auxílio de um misturador de alto corte, a uma velocidade entre 6000 e 7200 rpm, durante 20 min, a uma temperatura compreendida entre 170 e 180 °C. Para tal, foram estudadas duas percentagens de óleo de motor usado (15 e 20 %) e uma percentagem de polímero HDPE (6 %), obtendo-se dois betumes modificados denominados BO15P6 e BO20P6. Estes betumes modificados foram caracterizados através do ensaio de penetração a 25 °C (EN 1426), do ensaio de temperatura de amolecimento através do método do anel e bola (EN 1427) e do ensaio de viscosidade dinâmica (EN 13302).

Após a sua caracterização os betumes modificados serão adicionados numa percentagem de 50 % ao betume envelhecido (proveniente do material fresado) num misturador de baixo corte, a 350 rpm, durante 2 min, a uma temperatura compreendida entre 170 e 180 °C. Os betumes finais (RBO15P6 e RBO20P6) serão caracterizados através dos ensaios utilizados na caracterização dos betumes modificados já referidos. O betume final selecionado deverá apresentar uma penetração típica dos betumes mais utilizados na pavimentação rodoviária em Portugal, nomeadamente os betumes 35/50 ou 50/70, e ao mesmo tempo maximizar a utilização de resíduos.

Finalmente, a produção da mistura betuminosa com material fresado (AM-RBO20P6) inicia com a adição dos novos agregados e da fração grossa do material fresado (numa percentagem de 20 %), a uma temperatura de 230 °C, durante 1 minuto, de forma a obter uma mistura homogénea. Em seguida, a fração fina do material fresado, à temperatura ambiente, é introduzida na mistura anterior, durante 2 minutos, para garantir que toda a mistura fica à mesma temperatura. Por último, o betume modificado com resíduos selecionado na fase anterior é adicionado, durante 2 min, a uma temperatura de 170 °C. Este procedimento

é baseado num estudo anterior [10]. A mistura convencional (AM-B) e a mistura reciclada (AM-RBO20P6) apresentam temperaturas de produção de 160 e 170 °C, respetivamente. Importa referir que ambas as misturas em estudo, AM-B e AM-RBO20P6, foram formuladas de forma a apresentarem uma percentagem de betume de 5 % e uma curva granulométrica típica de uma mistura para camada de desgaste AC 14 Surf, tal como se pode verificar na Fig.1.

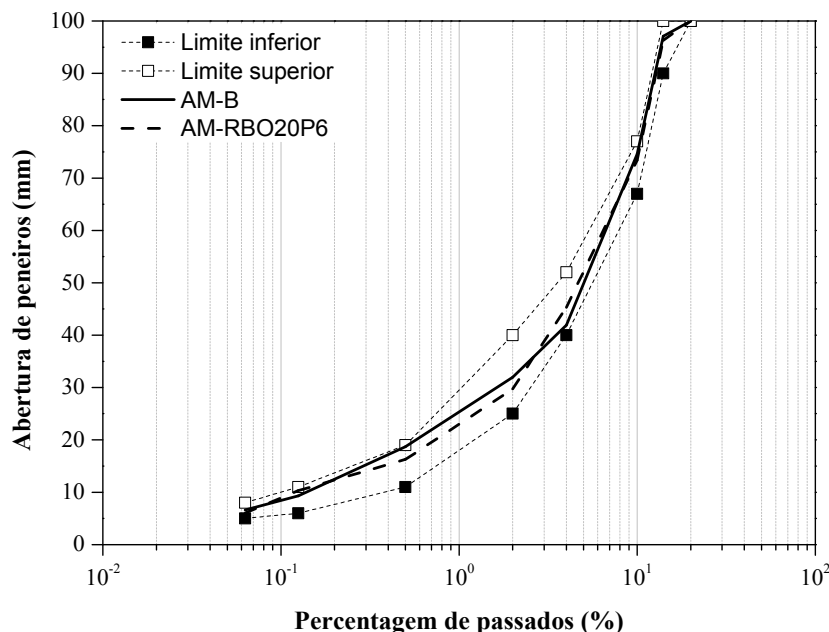


Fig.1. Limites inferior e superior de uma mistura AC 14 surf e fusos granulométricos das misturas em estudo (AM-B e AM-RBO20P6)

As misturas foram caracterizadas através do ensaio de sensibilidade à água (norma EN 12697-23) e do ensaio de pista (de acordo com a norma EN 12697-22) de forma a avaliar o seu desempenho mecânico.

Para além do desempenho mecânico, também é crucial avaliar a aplicação destas misturas recicladas a nível ambiental. Deste modo, realizou-se o ensaio de lixiviação (de acordo com a norma EN 12457-4: 2002) que consiste na colocação de uma amostra de mistura betuminosa de cerca de 90 g, com dimensão inferior a 10 mm, num recipiente fechado com cerca de 900 ml de água destilada. Esta mistura é colocada durante 24 horas em constante movimento (desta forma garante-se que a água passa constantemente pela amostra). Após as 24 horas, realiza-se uma filtragem com recurso a vácuo para remoção da matéria de maior dimensão. O eluato (solução obtida após o processo de filtragem) foi analisado através do ensaio de espectroscopia de absorção atómica para quantificação dos metais pesados, tendo em conta os valores limites de lixiviação impostos no Decreto-Lei nº 183/2009, Anexo IV, Parte B.

3 Resultados

Os resultados das propriedades básicas dos betumes modificados (BO15P6 e BO20P6) e dos betumes finais após adição ao betume recuperado do material fresado (RBO15P6 e RBO20P6) podem ser visualizados na Fig.2 (penetração e temperatura de amolecimento) e Fig.3 (viscosidade).

O aumento da percentagem de óleo de motor usado, tal como esperado, aumenta os valores de penetração e diminui a temperatura de amolecimento. Os elevados valores de temperatura de amolecimento podem estar relacionados com a mudança de fase do betume, ou seja, a concentração de HDPE é suficiente para criar ligações internas com o betume. Contudo, quando o betume envelhecido é adicionado (betumes finais RBO15P6 e RBO20P6) há uma redução dos valores de penetração e dos valores de temperatura de amolecimento. A interação do betume modificado de elevada penetração com o betume envelhecido permite restaurar/repor as propriedades do betume envelhecido, diminuindo a sua penetração e reduzindo a temperatura de amolecimento.

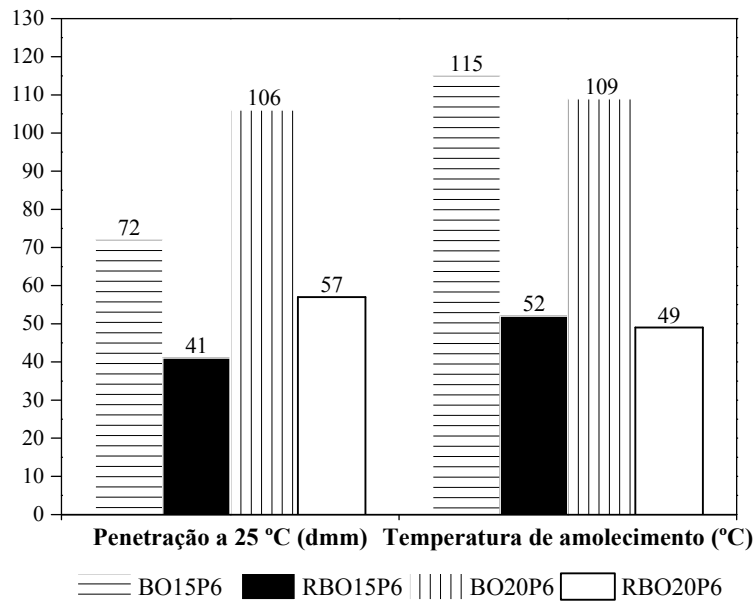


Fig.2. Resultados de penetração e temperatura de amolecimento dos betumes em estudo

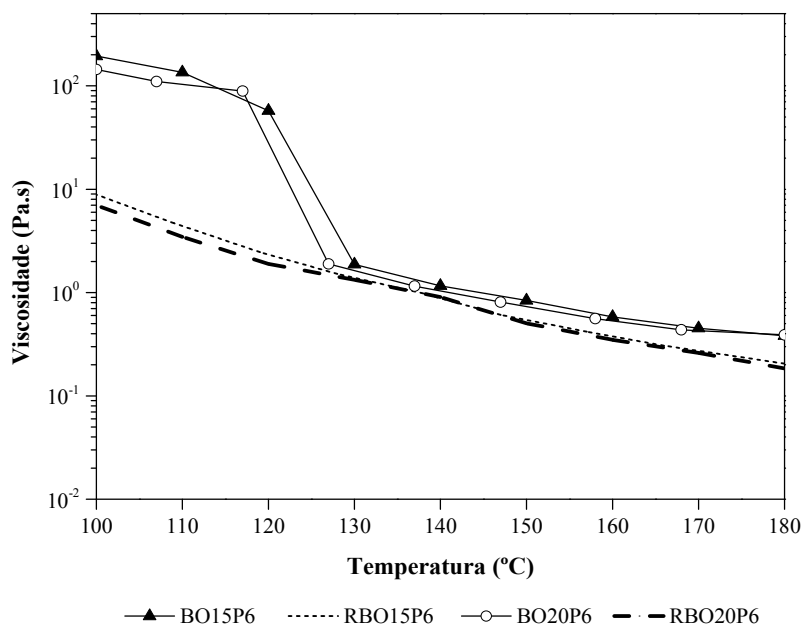


Fig.3. Resultados de viscosidade dos betumes em estudo

Em relação à viscosidade (Fig.3), os betumes modificados com óleo e polietileno de alta densidade exibem uma viscosidade muito elevada a temperaturas mais baixas (inferiores a 130 °C, que corresponde aproximadamente à temperatura de fusão do polímero HDPE), seguindo-se uma viscosidade ligeiramente superior aos betumes finais (betume modificados com resíduos e betume envelhecido). Este resultado demonstra a importância que o polímero HDPE (e respetiva concentração) desempenha no comportamento do ligante. Importa salientar que os betumes com maior percentagem de óleo de motor usado apresentam uma viscosidade ligeiramente inferior aos betumes com menor quantidade de óleo de motor usado.

Com base nos resultados obtidos, o betume selecionado para produção da mistura reciclada, e consequente avaliação do seu desempenho, foi o betume modificado BO20P6. Este betume quando adicionado ao betume envelhecido alia a penetração típica de um dos betumes mais utilizados na pavimentação rodoviária (betume 50/70), com a maximização da utilização de resíduos.

Em seguida serão apresentados os resultados de sensibilidade à água, deformação permanente e de lixiviados da mistura convencional, ou mistura de referência, e da mistura reciclada com o betume

modificado com 20 % de óleo de motor usado e 6 % de HDPE, de forma a avaliar se a nova mistura desenvolvida neste trabalho consegue ter um desempenho superior ao convencional, maximizando a reutilização de resíduos sem originar produtos de lixiviação nocivos para o ambiente.

O ensaio de sensibilidade à água permite avaliar a resistência das misturas betuminosas às ações climáticas, nomeadamente à água. A ação da água pode alterar a durabilidade da mistura, uma vez que esta desencadeia mecanismos de degradação, tais como perda de adesividade betume-agregado e perda de coesão do betume.

De acordo a Fig.4 é possível verificar que a mistura convencional (AM-B) e a mistura reciclada (AM-RBO20P6) apresentam valores de resistência à tração indireta (ITS) bastante similares. Relativamente aos valores de deformação, a mistura convencional apresenta uma menor deformação comparativamente à mistura reciclada, em princípio devido à maior penetração do betume final existente na mistura reciclada, que apesar disso não levou a uma redução do valor de ITS.

Ao analisar o rácio da resistência à tração indireta dos provetes secos e molhados, ou seja, o ITSR, e uma vez que este fornece a indicação da sensibilidade à água das misturas, é possível verificar que ambas as misturas apresentam baixa sensibilidade à água (Fig.5), com valores de ITSR superiores a 70 %. No entanto, importa salientar que a mistura reciclada com o novo betume desenvolvido apresenta menor sensibilidade à água comparativamente à mistura convencional.

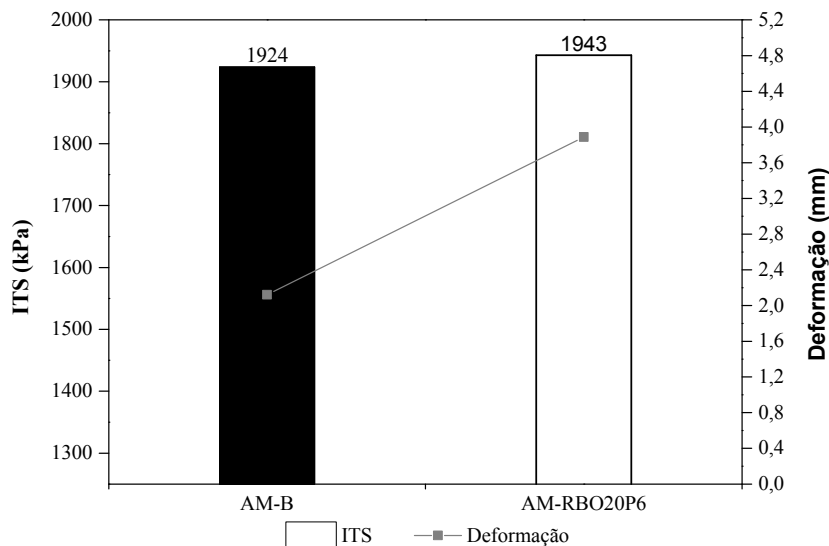


Fig.4. Valores de ITS e deformação dos provetes secos das misturas em estudo

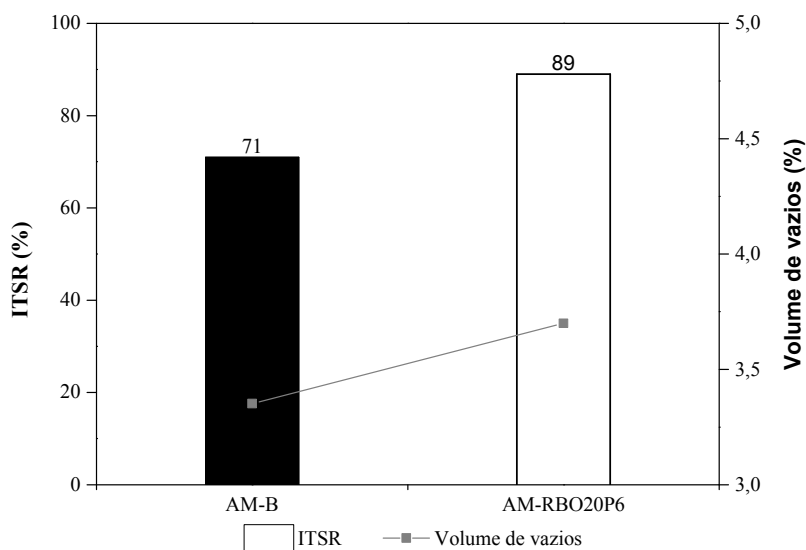


Fig.5. Valores de ITSR e volume de vazios das misturas em estudo

Habitualmente, quanto maior o volume de vazios numa mistura betuminosa, mais sensível costuma ser a mesma à ação da água. Contudo, apesar da mistura AM-RBO20P6 apresentar um maior volume de vazios, a sua sensibilidade à água é menor do que a mistura convencional (Fig.5). Este comportamento pode dever-se a um melhor revestimento do betume modificado nos agregados diminuindo a perda de coesão interna e na ligação betume-agregado provocada pela água.

O ensaio de deformação permanente, conhecido por ensaio de pista ou *Wheel Tracking Test*, permite avaliar a suscetibilidade das misturas betuminosas à deformação sob cargas repetidas, a temperaturas de serviço mais altas. A deformação resultante da contínua passagem de um rodado sobre a mistura betuminosa aumenta com o aumento do número de ciclos, tal como se pode observar na Fig.6, para ensaios realizados a uma temperatura de 50 °C. Para além disso, é possível verificar que a mistura reciclada (AM-RBO20P6) apresenta uma deformação permanente claramente inferior à mistura betuminosa de referência (AM-B).

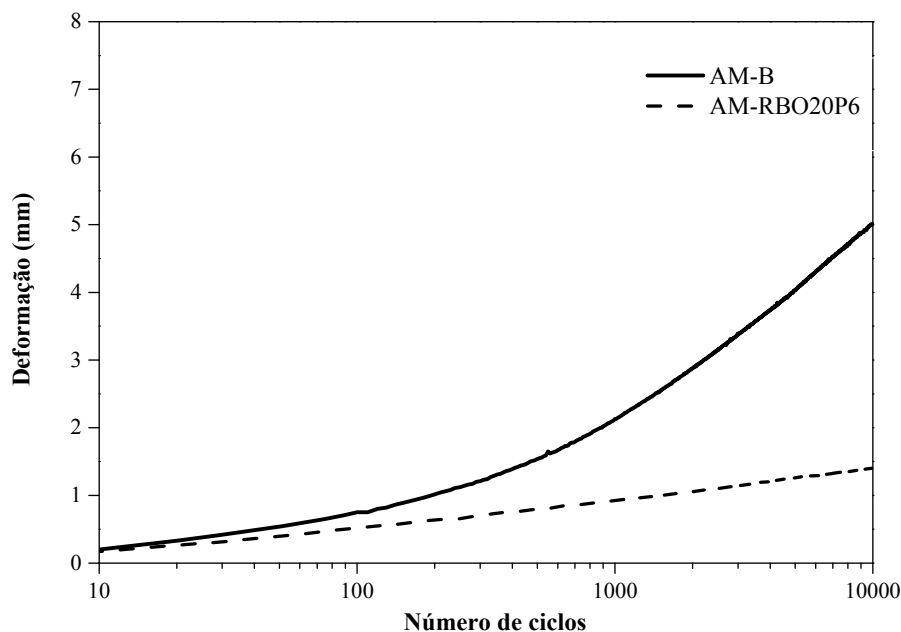


Fig.6. Deformação em função do número de ciclos de carga obtida no ensaio de pista

Para além da análise da deformação em função do número de ciclos, o ensaio de pista também permite obter a taxa de deformação (WTS_{AIR}), a percentagem da profundidade da rodeira máxima (PRD_{AIR}) e a profundidade máxima da rodeira (RD_{AIR}). De acordo com os dados do Quadro 1, a mistura AM-RBO20P6 apresenta a menor taxa de deformação, bem como a menor percentagem da profundidade da rodeira máxima. Apesar da introdução numa elevada quantidade de óleo de motor usado, a resistência à deformação permanente não ficou comprometida, uma vez que quer o polímero reciclado, quer o betume envelhecido do material fresado, contribuem para o bom desempenho final do ligante e da mistura.

Quadro 1. Resultados de ensaio de pista para avaliação da deformação permanente nas misturas betuminosas em estudo

Mistura	WTS_{AIR} (mm/10 ³ ciclos)	PRD_{AIR} (%)	RD_{AIR} (mm)
AM-B	0,20	11,9	5,0
AM-RBO20P6	0,03	3,5	1,4

Finalmente procedeu-se à avaliação ambiental de ambas as misturas. Os lixiviados provenientes de resíduos poluentes podem afetar os solos e as linhas de água, com efeitos tóxicos para o ecossistema e com potenciais riscos para a saúde humana. Como tal, é de extrema importância identificar e quantificar a presença de alguns metais pesados e compará-los com as imposições legais mencionadas anteriormente.

Através da análise química dos eluatos das misturas AM-B e AM-RBO20P6 (Quadro 2) é possível verificar que estas cumprem os limites impostos pela especificação para a totalidade dos metais pesados em estudo. Importa salientar que quando os resultados aparecem com o símbolo de inferior (<) indica que o próprio equipamento não tem rigor suficiente para a sua quantificação por se tratar de um valor inferior ao limite de quantificação desse parâmetro, pelo método indicado.

Quadro 2. Análise química dos eluatos das misturas em estudo

Parâmetros	Especificação	Resultados	
		AM-B	AM-RBO20P6
Cádmio (mg/kg)	0,04	<0,04	<0,04
Crómio (mg/kg)	0,5	<0,5	<0,5
Cobre (mg/kg)	2	0,42	0,64
Níquel (mg/kg)	0,4	<0,3	<0,3
Chumbo (mg/kg)	0,5	<0,3	<0,3
Zinco (mg/kg)	4	0,12	0,46

Não obstante da comparação da análise química dos eluatos com os limites impostos pela especificação, é importante perceber se a introdução de resíduos influencia os resultados da análise de lixiviados. Como tal, optou-se por seleccionar os metais pesados onde foi possível determinar, quer para a mistura convencional, quer para a mistura reciclada a sua concentração para posterior comparação entre os mesmos. Esta comparação foi realizada a nível percentual para permitir a comparação entre ambas as misturas e a sua relação com os limites impostos, tal como se pode observar na Fig.7.

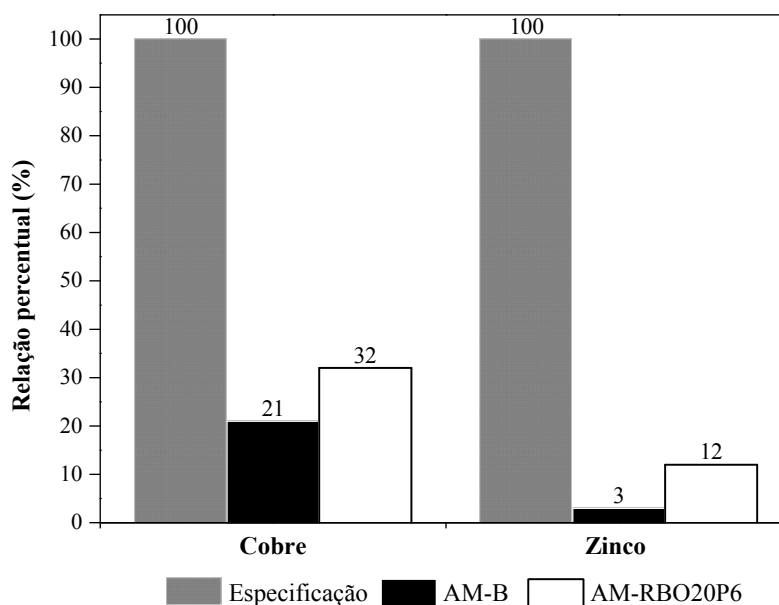


Fig.7. Relação percentual entre as misturas em estudo e os limites especificados

Da análise da Fig.7 é possível constatar que a mistura reciclada apresenta, para os dois metais pesados em estudo (cobre e zinco), uma maior concentração de metais pesados do que a mistura convencional. Este facto seria de esperar uma vez que ao longo da sua vida útil alguns dos resíduos utilizados (material fresado e óleo de motor) estão sujeitos à contaminação originada por desgaste dos pneus, desgaste de sistemas de travagem, pelos combustíveis e óleos de motor, entre outros. Contudo, a presença do cobre nos lixiviados

é no máximo 32 % do limite imposto pela especificação. Por sua vez, a presença de zinco é bastante inferior atingindo no máximo 12 % do limite exigido para este metal.

Em suma, verificou-se um excelente desempenho da mistura betuminosa reciclada desenvolvida neste trabalho, com melhorias no desempenho à sensibilidade à água e à deformação permanente. Para além disso, a mistura reciclada com 50 % de material fresado e betume modificado com resíduos, na análise efetuada, não apresenta nenhum risco ambiental em termos de contaminação de lençóis freáticos.

4 CONCLUSÕES

Este estudo permitiu concluir que a incorporação de elevadas quantidades de resíduos pode melhorar as características do betume final e consequentemente das misturas betuminosas. Para além disso, este novo betume modificado com resíduos apresenta características semelhantes a um betume comercial tipicamente usado na pavimentação rodoviária.

A mistura reciclada com 50 % de material fresado e com o betume modificado com resíduos (20 % de óleo usado e 6 % de HDPE reciclado) apresenta uma melhoria do desempenho, quer na sensibilidade à água, quer na deformação permanente, comparativamente à mistura de referência.

Deste modo, a utilização deste betume modificado com óleo de motor e HDPE em misturas com elevadas taxas de reciclagem pode ser uma solução viável para o desenvolvimento sustentável da indústria da pavimentação, ao combinar o seu desempenho técnico com vantagens ambientais, nomeadamente a maximização da utilização de resíduos e a correspondente minimização da utilização de recursos naturais, aparentemente sem riscos ambientais associados.

5 AGRADECIMENTOS

Este trabalho é financiado por fundos FEDER através do Programa Operacional de Competitividade – COMPETE e por fundos nacionais através da FCT – Fundação para a Ciência e Tecnologia no âmbito da bolsa de doutoramento (SFRH/BD98379/2013).

6 REFERÊNCIAS

1. X. Jia, B. Huang, B.F. Bowers, S. Zhao, Infrared spectra and rheological properties of asphalt cement containing waste engine oil residues, *Construction and Building Materials*, 50 (0) 683-691, 2014.
2. D. Lesueur, The colloidal structure of bitumen: Consequences on the rheology and on the mechanisms of bitumen modification, *Advances in Colloid and Interface Science*, 145 (1-2) 42-82, 2009.
3. N.H.M. Kamaruddin, M.R. Hainin, N.A. Hassan, M.E. Abdullah, Rutting Evaluation of Aged Binder Containing Waste Engine Oil, *Advanced Materials Research*, 911 405-409, 2014.
4. H.M.R.D. Silva, J.R.M. Oliveira, C.M.G. Jesus, Are totally recycled hot mix asphalts a sustainable alternative for road paving?, *Resources, Conservation and Recycling*, 60 38-48, 2012.
5. R. Romera, A. Santamaría, J.J. Peña, M.E. Muñoz, M. Barral, E. García, V. Jañez, Rheological aspects of the rejuvenation of aged bitumen, *Rheologica Acta*, 45 (4) 474-478, 2006.
6. J. Peralta, H.M.R.D. Silva, L. Hilliou, A.V. MacHado, J. Pais, R. Christopher Williams, Mutual changes in bitumen and rubber related to the production of asphalt rubber binders, *Construction and Building Materials*, 36 557-565, 2012.
7. E. Ahmadiania, M. Zargar, M.R. Karim, M. Abdelaziz, P. Shafigh, Using waste plastic bottles as additive for stone mastic asphalt, *Materials & Design*, 32 (10) 4844-4849, 2011.
8. D. Casey, C. McNally, A. Gibney, M.D. Gilchrist, Development of a recycled polymer modified binder for use in stone mastic asphalt, *Resources, Conservation and Recycling*, 52 (10) 1167-1174, 2008.
9. Z.N. Kalantar, M.R. Karim, A. Mahrez, A review of using waste and virgin polymer in pavement, *Construction and Building Materials*, 33 55-62, 2012.
10. D. Palha, P. Fonseca, L. Abreu, H. Silva, J. Oliveira, Solutions to improve the recycling rate and quality of plant produced hot mix asphalt, *WASTES: Solutions, Treatments and Opportunities*, Braga, Portugal, 11-13 Setembro 2013.