

DESENVOLVIMENTO E ESTUDO DE LIGANTES MODIFICADOS INOVADORES PARA INFRAESTRUTURAS DE TRANSPORTE

Hugo Silva^{1(*)}, Joana Peralta², Liliana Costa², Sara Fernandes², Joel Oliveira¹, Paulo Pereira¹

¹ Universidade do Minho, Centro do Território Ambiente e Construção (UM/C-TAC) - Guimarães, Portugal

² Universidade do Minho, Departamento de Eng^a Civil (UM/DEC) - Guimarães, Portugal

(*) Email: hugo@civil.uminho.pt

RESUMO

Este trabalho apresenta alguns projetos desenvolvidos pela presente equipa de investigação relativos ao desenvolvimento de novos materiais para aplicação em pavimentos rodoviários, utilizando resíduos que podem ser valorizados como uma nova matéria-prima. Desta nova abordagem devem resultar pavimentos betuminosos com melhor desempenho, conjugando ainda vantagens ecológicas e económicas. Assim, apresentam-se três estudos distintos: o primeiro focado na substituição parcial de betume por bio-óleo proveniente da pirólise rápida de resíduos de materiais orgânicos, modificado com granulado de borracha de pneus usados; o segundo consiste na utilização de resíduos plásticos para produção de ligantes modificados, em vez de polímeros virgens, para melhorar o desempenho dos pavimentos; o terceiro também utiliza um resíduo plástico, mas tem como principal objetivo explorar a substituição de parte do betume por outro resíduo, o óleo de motor usado. Neste trabalho são apresentados os principais resultados de desempenho das misturas betuminosas produzidas com estes novos ligantes mais sustentáveis.

Palavras-chave: Betumes modificados com resíduos, bio-óleo, borracha, resíduos plásticos, óleo de motor, desempenho de misturas betuminosas.

1. INTRODUÇÃO

A preocupação ambiental com a valorização de resíduos e conservação de recursos naturais, aliada à diminuição gradual das reservas de petróleo e do seu crescente preço, têm sido o mote para estudos sobre ligantes inovadores que substituam parcialmente ou na totalidade o betume (Raouf, 2010; Peralta et al., 2012a, b; Peralta et al., 2013a, b), bem como o desenvolvimento de novos ligantes betuminosos modificados com resíduos plásticos (Hınıslioğlu e Açar, 2004; García-Morales et al., 2006). A utilização de resíduos plásticos, ao invés de polímeros virgens, apresenta-se como uma solução ambiental e economicamente sustentável, mas que obriga a um estudo mais cuidado destes materiais para garantir um desempenho adequado (García-Morales et al., 2004).

A modificação de betumes, bem como o conhecimento dos aditivos ou modificadores ideais para cada mistura a desenvolver é atualmente uma mais-valia que permite obter misturas e pavimentos com durabilidades muito diferentes das obtidas com betumes convencionais. Neste sentido, a possibilidade de utilizar resíduos plásticos na modificação dos betumes também está a ser alvo de um estudo aprofundado a nível económico e de desempenho, com o objetivo de incentivar o investimento na valorização de resíduos plásticos na pavimentação (Silva et al., 2011; Costa et al., 2013).

Também se procurou estudar uma outra forma de obter um ligante proveniente em parte de resíduos, e que ao mesmo tempo diminuísse a quantidade de betume novo utilizado nas

misturas betuminosas. Assim, desenvolveu-se um ligante betuminoso alternativo pela adição a um betume convencional de óleo de motor usado e de diferentes polímeros, um plastômero e um elastômero, o qual apresentou propriedades semelhantes ou superiores às de um betume convencional (Fernandes et al., 2013). Quando aplicados nas misturas, estes novos ligantes melhoraram significativamente o seu desempenho em comparação com a mistura convencional, apesar de apresentarem um menor módulo de rigidez.

Nos próximos pontos do documento serão então apresentados os três estudos mencionados, que se encontram em desenvolvimento, com o objetivo de apresentar alguns dos métodos de caracterização e os seus principais resultados.

2. ESTUDO DA SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DE BETUME POR BIO-ÓLEO NA CONSTRUÇÃO DE PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS FLEXÍVEIS

O bio-óleo de pirólise rápida é, principalmente, o produto da reciclagem de resíduos de materiais orgânicos. Este é um material viscoelástico, e após tratamento térmico tem uma viscosidade semelhante a muitos tipos de betume utilizado em pavimentação. Estas duas características indicam que este poderia ser um bom material para substituir o betume asfáltico. Apesar de o bio-óleo apresentar muito bom desempenho a temperaturas elevadas, a baixas temperaturas é necessário um aumento da elasticidade deste ligante.

Estudos prévios (Peralta et al., 2012b; Peralta et al., 2013a, b) demonstraram que a adição de granulado de borracha de pneus usados (GBP) ao bio-óleo lhe poderia conferir maior elasticidade, à semelhança do que acontece aos betumes modificados com GBP, também denominados de betume-borracha (Peralta et al., 2009a, b, c; Peralta et al., 2010a, b, c, d; Peralta et al., 2012c; Peralta et al., 2013c). Assim, dois tipos de GBP de diferentes processos de fabrico (moagem criogénica e ambiental) foram utilizados para modificar o bio-óleo. Dois lotes de ligante foram produzidos, combinando 20% (p/p) de bio-ligante (bio-óleo modificado com GBP) com dois betumes diferentes, um PG58-28 e um PG64-22.

Os ligantes combinados resultantes (betume mais bio-ligante) foram envelhecidos a 140 °C com um ensaio de RTFOT (*Rolling Thin Film Oven Test*, ASTM D 2872-04) modificado, tendo também sido determinada a estabilidade ao armazenamento (ASTM D 7173-05). O betume, o GBP, o bio-óleo, o bio-ligante e os ligantes combinados (antes e após o envelhecimento), foram ensaiados por meio de espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier (FTIR). A reologia de todos os materiais foi avaliada com um reómetro dinâmico de corte (DSR, ASTM D 7175-08). Além disso, o comportamento no pavimento das misturas produzidas com este material foi avaliado em relação à suscetibilidade à água (AASHTO T 283-07), fendilhamento por fadiga (AASHTO T 321-07), módulo de rigidez (ASTM D 3497-79 e AASHTO T 342-11), e resistência ao fendilhamento a temperaturas baixas (AASHTO TP 105-13).

2.1 Caracterização dos ligantes

Os ensaios mostraram que a viscosidade inicial do bio-óleo (42,5 cP), pode ser aumentada com uma tendência exponencial [$Visc.(cP) = 37,629 * e^{0,0032 * t(\text{min})}$], mediante tratamento térmico, obtendo-se uma viscosidade final de 207,5 cP após 8h 30min no viscosímetro Brookfield, a 95 °C, que é a viscosidade adequada de ligantes para produção de misturas de pavimentação.

Os diferentes materiais foram analisados utilizando a Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier - FTIR (Figura 1).

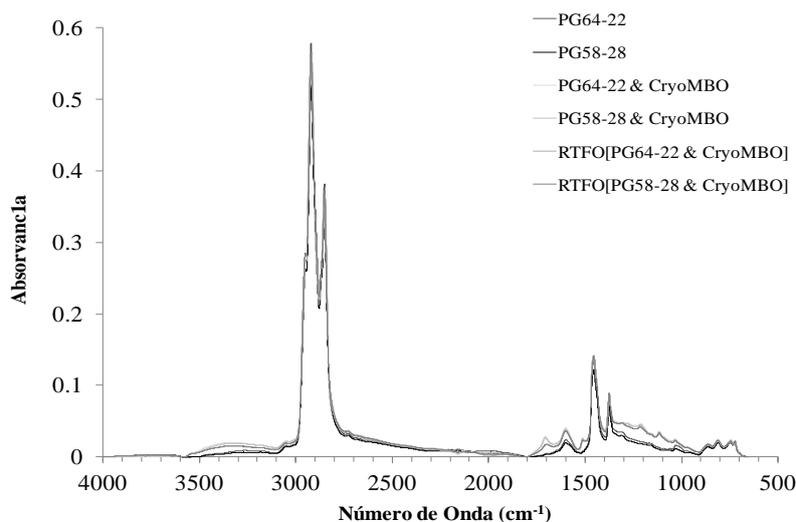


Figura 1. Espectros FTIR dos betumes convencionais e dos ligantes combinados antes e após envelhecimento.

Embora, os espectros de todos os materiais se assemelhem ao dos betumes convencionais, é visível a redução do conteúdo de água (o número de onda rondando os 3300 cm^{-1}) nos materiais envelhecidos. Ao analisar os espectros entre 1800 e 900 cm^{-1} verifica-se uma interação entre os bio-óleos modificados (cryoMBO e ambMBO) e os betumes (PG64-22 e PG58-28). Para além da redução da quantidade de água presente no ligante, o envelhecimento não produz mudanças significativas na constituição química dos ligantes combinados.

As curvas mestras dos materiais (Figura 2) mostraram que a adição dos bio-ligantes modificados com os granulados de borracha criogénica (cryoMBO) e ambiental (ambMBO) ao betume convencional (PG64-22 e PG58-28) não altera significativamente o seu comportamento reológico.

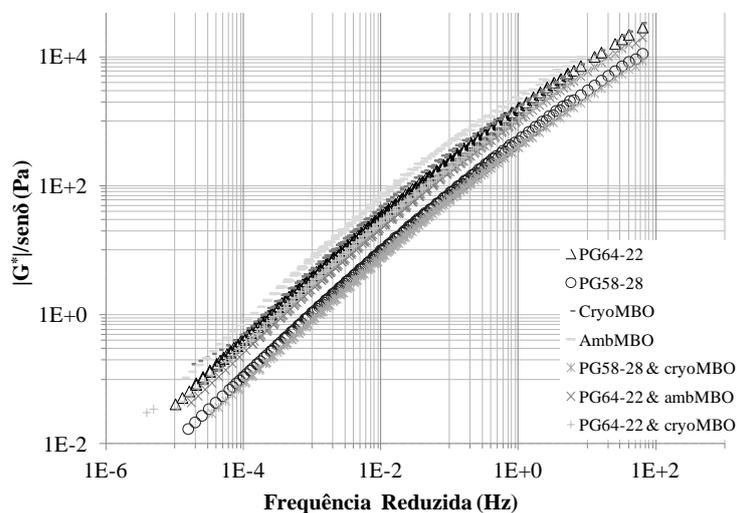


Figura 2. Curvas mestras comparativas dos diferentes ligantes.

Em regiões climáticas temperadas a quentes o betume mais indicado será um PG64-22. Conforme se verifica pela análise da figura anterior, o ligante combinado com características reológicas mais semelhantes ao PG64-22 foi o PG64-22 & cryoMBO.

Os ensaios de estabilidade ao armazenamento indicam que ambos os ligantes combinados (PG64-22 & ambMBO e PG64-22 & cryoMBO) apresentam alguma separação de fases. No entanto, com uma diferença entre o topo e a base de 8,8%, o PG64-22 & cryoMBO passou os critérios de aceitabilidade ($<10\%$), sendo selecionado para produção de misturas.

2.2 Caracterização das misturas

Na fase de produção de misturas foi apenas usado o ligante combinado PG64-22 & cryoMBO. Assim, foram formuladas misturas para um nível de tráfego entre 3 e 30 milhões de eixos-padrão (EP), utilizando o método de formulação SuperPave. Com o intuito de simular as condições do pavimento após compactação, e posterior pós-compactação devido ao tráfego, foram produzidos provetes de ensaio com 7% e 4% de vazios, respectivamente.

A água é um dos fatores climáticos com maior influência na durabilidade de um pavimento. Assim, o ensaio de sensibilidade à água é indicado pelo SuperPave para que uma mistura passe os critérios de formulação. Este ensaio consiste em comparar a resistência à tração indireta entre provetes secos e condicionados em água. Os valores aceitáveis para a razão da resistência à tração indireta (TSR) variam em função do local de estudo (0,7 ou 0,8), correspondendo a unidade (1,0) à absoluta insensibilidade à água. As misturas estudadas apresentam um valor de TSR de 0,84, indicando baixa sensibilidade à humidade.

O estudo do comportamento dinâmico das misturas foi determinado através de ensaios de módulo de rigidez a três temperaturas (4, 21 e 37 °C) e seis frequências entre 0,1 e 100 Hz, que possibilitaram a construção das curvas mestras do módulo dinâmico ($|E^*|$) e da tangente do ângulo de fase ($\text{tg } \delta$), conforme apresentado na Figura 3.

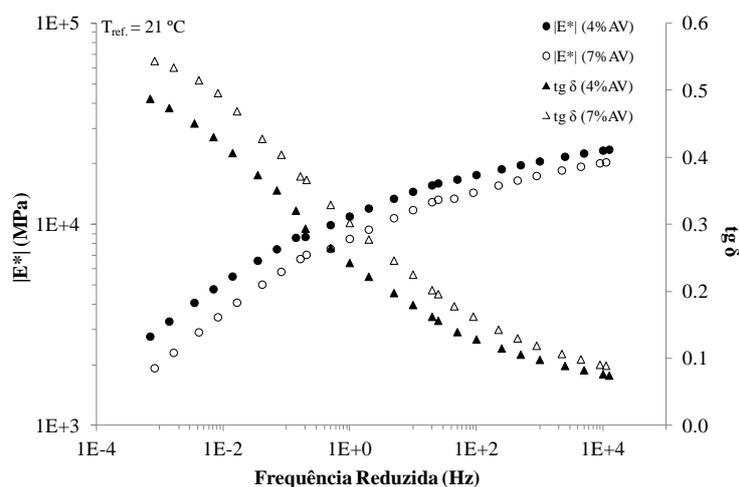


Figura 3. Módulo dinâmico ou de rigidez e ângulo de fase das misturas com 4 e 7% de vazios.

As curvas mestras mostram que os provetes com 4% de vazios têm maior módulo do que aqueles com 7% de vazios, tal como esperado. No entanto, os valores do módulo de elasticidade dinâmica a 37 °C para as duas misturas, com 4% e 7% de vazios, são mais elevados do que os das misturas convencionais (West et al., 2013; Williams et al., 2011). O comportamento reológico das misturas para ambos os níveis de compactação (4% e 7% de vazios) converge a frequências mais elevadas, ou temperaturas mais baixas, próximos da rigidez máxima ou vítrea, e diverge com o aumento da temperatura ou redução da frequência. Estes resultados indicam que esta mistura origina materiais muito rígidos após compactação, tanto para 4% como 7% de vazios, não sendo portanto pensadas a desenvolver rodeiras.

A resistência ao fendilhamento por fadiga foi determinada através do ensaio de flexão em quatro pontos (AASHTO T321-07). Na Figura 4 são apresentadas as curvas de fadiga resultantes com a determinação dos coeficientes de fadiga K_1 e K_2 .

As leis de fadiga para as misturas com 4% e 7% de vazios indicam uma vida fadiga semelhante ou ligeiramente maior do que a das misturas convencionais.

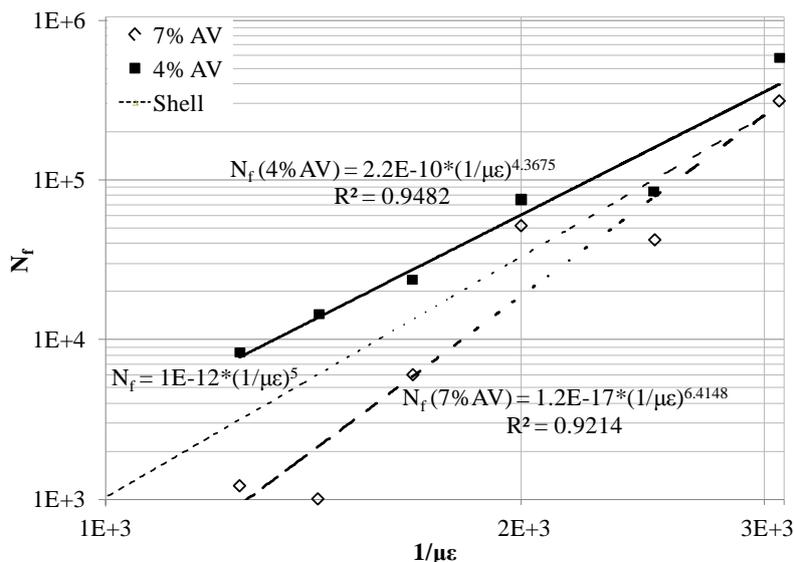


Figura 4. Variação da vida à fadiga (N_f) com o inverso da micro-extensão ($\mu\epsilon$) aplicado às misturas com 4% e 7% de vazios (AV).

Estas misturas devem exceder a vida à fadiga para a qual foram formuladas (30 milhões de EP), pois considerando que cada carga de um eixo-padrão (EP) produz uma deformação de 100 $\mu\epsilon$, as misturas suportariam 65 e 540 milhões de EP para as misturas com 4 e 7% de vazios, respectivamente. Aplicando a Lei da Shell para misturas convencionais, a vida à fadiga para o mesmo nível de extensão seria inferior. Estes valores mostram que as novas misturas desenvolvidas neste trabalho têm um comportamento à fadiga adequada.

Duas constantes (K_1 e K_2) podem ser obtidas a partir de uma análise estatística, e correspondem à interceção e declive da linha de fadiga na escala log-log (Pais et al., 2009). O coeficiente K_1 caracteriza o módulo de flexão, e o coeficiente K_2 indica a taxa de acumulação de danos na amostra. Ao usar esta relação como critério de ruína do pavimento, um valor mais baixo de K_2 é mais conservador, uma vez que assume a acumulação mais rápida de danos por fadiga. Os coeficientes de fadiga experimentais K_1 e K_2 foram determinados como sendo 2,2E-10 e 4,3675, respectivamente, para a mistura com 4 % de vazios. A mistura com 7% de vazios apresenta coeficientes de fadiga $K_1 = 1,2E-17$ e $K_2 = 6,4148$. Ambas as misturas mostram um desempenho semelhante ao das misturas convencionais (Williams et al., 2011; Ghuzlan & Carpenter, 2003; Pais et al., 2009).

A determinação da resistência ao fendilhamento a baixas temperaturas foi realizada seguindo a norma ASHTO TP 105-13, e os resultados estão apresentados na Figura 5.

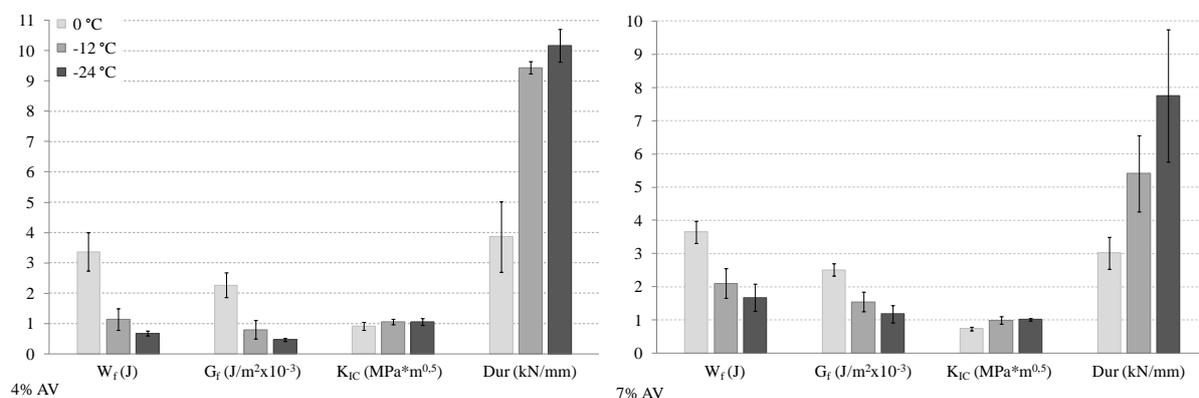


Figura 5. Mecanismos de fratura a temperaturas baixas.

Os parâmetros que caracterizam a mecânica da fratura apresentam valores mais elevados do que os obtidos para misturas convencionais, indicando um melhor desempenho respeitante à resistência ao fendilhamento a baixas temperaturas.

Assim, em suma pode concluir-se que é possível produzir novos ligantes em que o betume é substituído parcialmente por bio-óleo modificado com borracha, e que têm um desempenho igual ou superior às misturas betuminosas convencionais.

3. ESTUDO DE BETUMES MODIFICADOS COM RESÍDUOS PLÁSTICOS

Este estudo em desenvolvimento consiste na produção de ligantes betuminosos inovadores e ecológicos, utilizando os já conhecidos polímeros na modificação dos betumes, mas aqui enquanto resíduos. Esta técnica permite a diminuição dos custos da modificação do betume com polímeros, processo que tradicionalmente pode duplicar o preço do ligante (Becker et al., 2001) e ainda valoriza os resíduos plásticos, diminuindo assim a sua eliminação em aterro onde atualmente milhões de toneladas são desperdiçadas.

Relativamente a este estudo serão apresentados alguns resultados das principais propriedades dos betumes modificados avaliados, onde será avaliada a influência dos diferentes resíduos plásticos e das condições de produção nas propriedades físicas, morfológicas e reológicas.

Vários resíduos plásticos foram inicialmente utilizados neste estudo, mas os que se destacaram foram os resíduos de PEAD e de EVA. O betume base utilizado neste estudo foi um betume 35/50 fornecido pela Cepsa. De modo a facilitar a comparação entre os ligantes produzidos neste estudo e o betume modificado que se usa comercialmente, também foi avaliado um ligante comercial modificado com polímero (STYRELF[®]).

Os novos ligantes foram produzidos com uma percentagem de 5% de resíduo plástico, em peso do betume, no misturador IKA RW20, para uma interação de 1 hora a 180 °C. O HDPE foi adicionado em forma de pó para a facilitar o seu processo de digestão no betume, já que este apresenta um ponto de fusão relativamente alto (134,4 °C), este avaliado através do ensaio de DSC (Figura 6). Já o EVA foi adicionado nas suas dimensões iniciais (≤ 4 mm), pois este atinge a fusão a temperaturas bastante inferiores às de produção do ligante, apresentando fácil digestão nas condições de produção definidas nas suas dimensões iniciais.

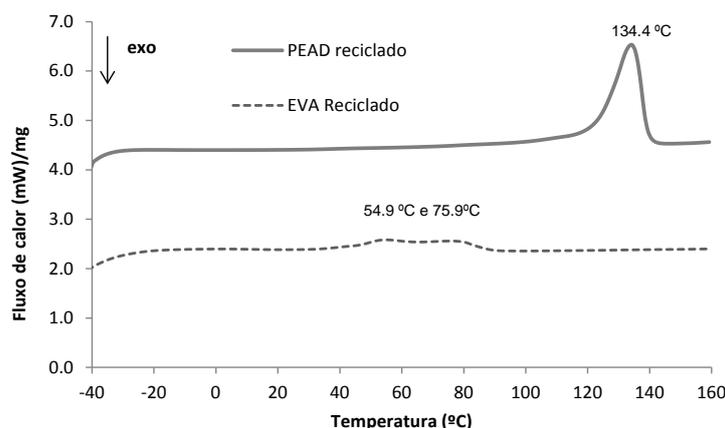


Figura 6. Resultados da calorimetria diferencial de varrimento dos resíduos plásticos em estudo.

Relativamente aos métodos de caracterização utilizados, para além da caracterização granulométrica e calorimétrica dos resíduos plásticos, já apresentada, serão também apresentados em seguida os resultados de caracterização física, reológica e morfológica dos vários ligantes betuminosos produzidos.

3.1 Caracterização física dos ligantes

A caracterização física inclui a caracterização básica de acordo com a norma EN 12591. Tal caracterização inclui a avaliação do ponto de amolecimento dos betumes (também conhecido como temperatura anel e bola, ou A&B) de acordo com a norma EN 1427, e os ensaios de penetração a 25 °C, realizada de acordo com a norma EN 1426.

Depois, e em especial para os ligantes modificados com elastómeros, foram realizados ensaios de resiliência de acordo com a norma EN 13880-3 para avaliar a capacidade de recuperação elástica dos ligantes após deformação causada pela aplicação de uma carga específica.

A viscosidade dinâmica (EN 13302) dos ligantes nas temperaturas de produção e de compactação mais elevadas também foi avaliada, principalmente porque alguns ligantes modificados são muito viscoso nesta gama de temperaturas e necessitam de uma avaliação cuidadosa das temperaturas produção.

Os resultados destas quatro propriedades, para os diferentes ligantes em estudo, estão representados na Figura 7.

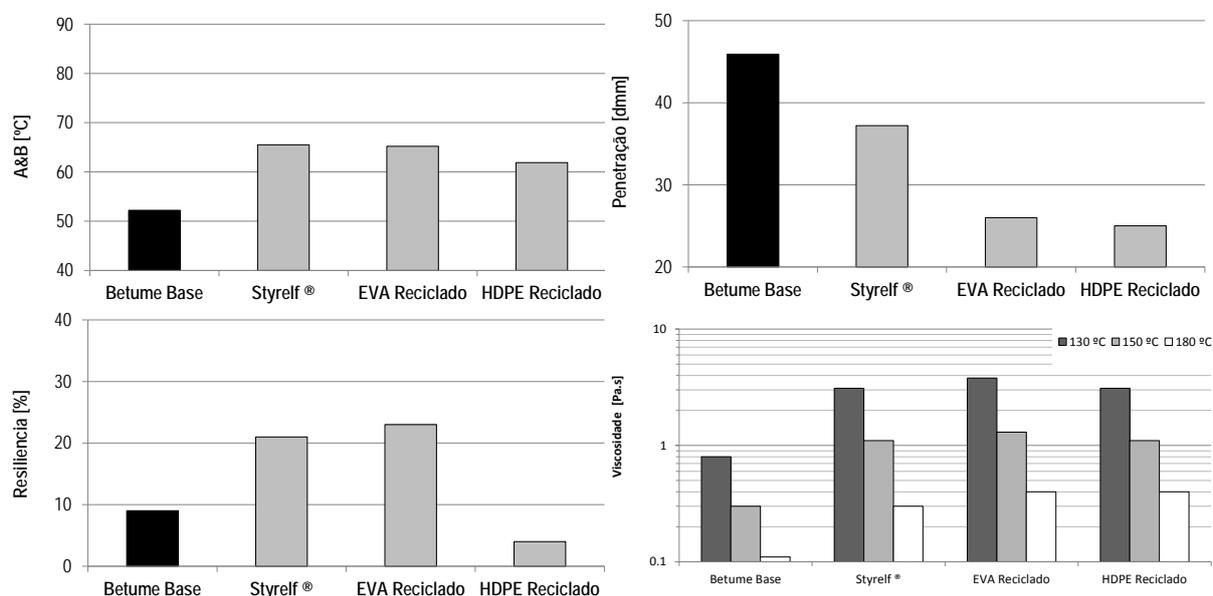


Figura 7. Resultados relativos á caracterização física dos ligantes em estudo.

Relativamente às propriedades básicas, nomeadamente a temperatura de amolecimento e a penetração, poderá concluir-se que ambos os polímeros influenciam positivamente estas propriedades quando comparados com o betume base. Comparando com o ligante modificado comercial, e em termos de temperatura de amolecimento, estes apresentam resultados semelhantes, o que é bastante positivo. Quanto aos resultados de penetração, estes revelam que os ligantes produzidos com os plásticos/polímeros reciclados são mais consistentes a 25 °C, pois apresentam valores bastante inferiores aos do ligante comercial.

Já no que se refere aos resultados de resiliência, o EVA reciclado conferiu ao ligante uma maior recuperação percentual da deformação (devido às suas propriedades elastómeras), superior até á do ligante modificado comercial, apresentando-se este resultado como bastante positivo para utilização deste resíduo.

Os resultados de viscosidade revelam que o Styrelf® tem uma viscosidade semelhante à dos restantes betumes modificados, o que potencia a utilização dos polímeros reciclados na modificação de betumes na fase de produção.

3.2 Determinação dos parâmetros reológicos

Na produção das amostras para os ensaios de reologia recorreu-se a moldes de borracha, nas quais se verteram os diferentes ligantes betuminosos. O reómetro utilizado para caracterizar o comportamento térmico foi o TA instrumentos AGR2 (reómetro rotacional), que opera sob controlo de tensão. A geometria de ensaio foi a de pratos paralelos (40 mm de diâmetro e 1 mm de espessura).

Durante o ensaio dinâmico a temperatura variou entre 30 e 80 °C ou entre 45 e 90 °C (visto a viscosidade de alguns betumes modificados ser mais elevada), e a frequência entre 100 e 0,01 Hz, com o propósito de construir as curvas mestras. A gama de temperaturas foi ajustado para o comportamento do material, a fim de ser adequado para a geometria usada. A tensão máxima foi mantida abaixo do limite da região viscoelástica linear. A validade do princípio da sobreposição tempo-temperatura (TTSP) possibilita a produção das curvas mestras à temperatura de referência (60° C), deslocando os resultados dos varrimentos de frequência medidos a diferentes temperaturas ao longo do eixo das frequências até formar uma curva contínua (Anderson et al., 1994). Os resultados referentes às curvas mestras do módulo complexo dos diferentes ligantes betuminosos em estudo estão apresentados na Figura 8.

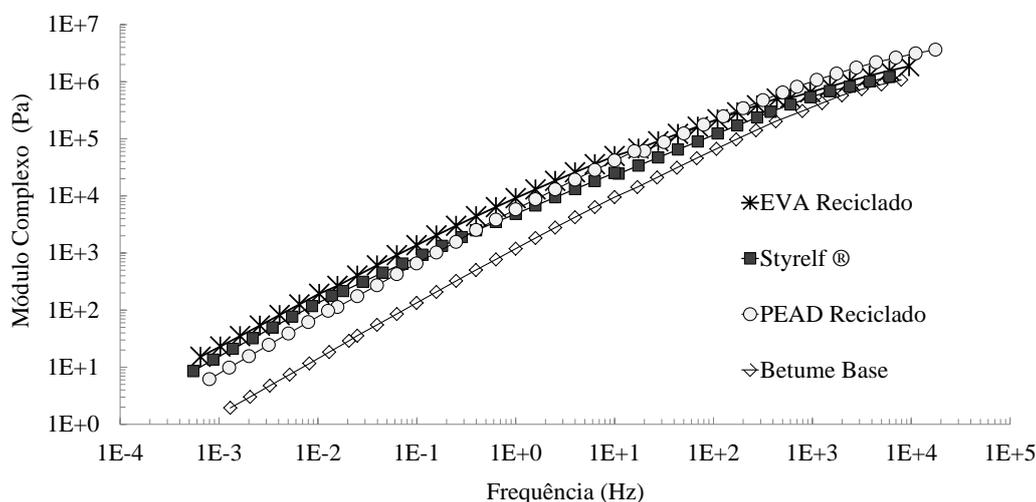


Figura 8. Curvas mestras do módulo complexo dos ligantes betuminosos em estudo.

Observando estes resultados, poderá ver-se que o betume base tem o menor módulo em todo o largo intervalo de frequências, e que a este apresenta maior variação entre o seu valor a baixas e altas frequências, o que demonstra o seu pior desempenho. Esta maior variação de módulo entre frequências também se verifica em menor escala para o PEAD, embora este apresente um módulo superior ao do ligante base, o que para baixas frequências ou altas temperaturas poderá ser vantajoso (mas para a situação oposta de altas frequências ou baixas temperaturas já não se verifica). Relativamente aos outros dois ligantes, o EVA e o Styrelf®, estes apresentam um desempenho semelhante entre si, que se pode considerar o mais adequado para toda a gama de frequências (quando comparados com os outros dois ligantes).

Para caracterizar o comportamento de fluência dos ligantes às temperaturas de serviço elevadas (64 °C), foi realizado o ensaio de *Multiple Stress Creep recovery* (MSCR) de acordo com o procedimento de ensaio e de análise de dados definido na AASHTO TP70. O reómetro utilizado para caracterizar o comportamento de fluência foi o StressTech RH, também com uma geometria de pratos paralelos (40 mm de diâmetro e 1 mm de espessura). Os resultados deste ensaio estão representados na Figura 9.

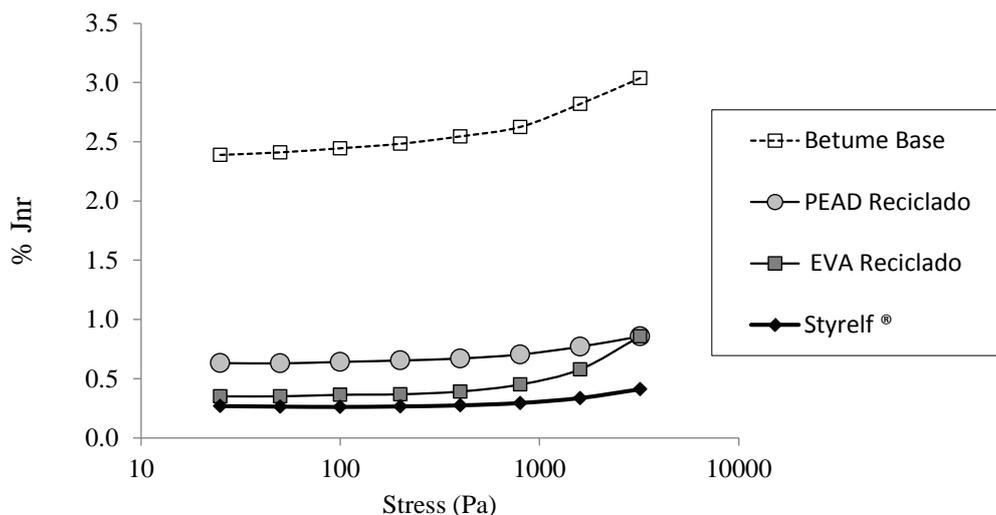


Figura 9. Deformação não recuperável (% Jnr) dos ligantes, obtida no ensaio de fluência MSCR a 64 °C.

Relativamente a este ensaio, mais uma vez o betume base apresentou o pior desempenho, sendo o que apresenta maior percentagem de deformação não recuperada pelo ensaio de fluência. Os ligantes modificados com resíduo plástico apresentam menor percentagem de deformação não recuperável, sendo que entre si o melhor resultado foi atingido pelo ligante modificado com EVA reciclado, que apresenta valores muito próximos do resultado do Styrelf® para ciclos de menor carga, embora essa diferença aumente para cargas mais altas.

3.3 Análise da estrutura morfológica

De modo a conhecer a forma como se dispersam os diferentes resíduos plásticos no betume base recorreu-se à microscopia de fluorescência com recurso ao microscópio Olympus BH2-RFCA. Para a preparação de amostras, uma pequena gota do betume modificado foi colocada numa lâmina de vidro de microscópio aquecida para formar uma película fina com a ajuda de uma espátula quente. Na Figura 10 está representada a morfologia dos dois ligantes produzidos.

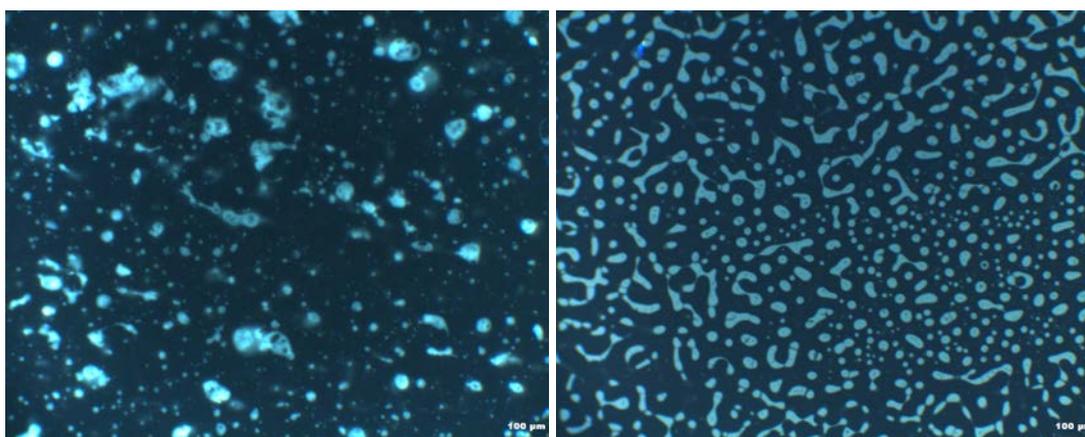


Figura 10. Morfologia dos ligantes produzidos com PEAD (esquerda) e EVA (direita) reciclados.

Observando as diferentes formas com os dois polímeros se dispersam poderá comprovar-se a mais uniforme e fácil dispersão do EVA no ligante, que se previa pela baixa temperatura de fusão, e pela boa trabalhabilidade que se verificou no manuseamento do ligante aquando a produção das amostras.

As principais conclusões são as seguintes:

- Ambos os resíduos plásticos aumentam a temperatura de fusão;
- Ambos diminuem a penetração;
- Ambos aumentam a viscosidade do ligante às temperaturas de produção e aplicação;
- Ambos aumentam o módulo complexo.

No entanto em termos de percentagem de recuperação após deformação, o EVA (devido às suas propriedades de elastómero) apresenta uma maior percentagem de recuperação no ensaio de resiliência do que o PEAD, e até melhor desempenho do que o ligante comercial. Em termos dos resultados do ensaio MSCR, também aqui o EVA reciclado apresenta um ótimo desempenho, com menor deformação não recuperável do que o PEAD e muito próxima da obtida pelo betume comercial Styrelf®.

4. DESENVOLVIMENTO DE UM BETUME MODIFICADO COM ÓLEO DE MOTOR USADO E RESÍDUOS PLÁSTICOS

O objetivo deste último estudo consiste no desenvolvimento de um ligante com características semelhantes, ou até mesmo superiores, a um betume convencional. Este novo ligante deverá permitir diminuir a quantidade de betume usado nas misturas através da introdução de resíduos (óleo de motor usado e plástico reciclado) e ainda obter um bom desempenho mecânico quando utilizado nas misturas betuminosas.

O betume utilizado neste estudo foi o 35/50 devido ao seu baixo valor de penetração e por ser um dos betumes mais utilizados na pavimentação rodoviária em Portugal. No que concerne aos polímeros, a escolha do plastómero polietileno de alta densidade (HDPE ou PEAD) deve-se ao facto de se tratar do resíduo plástico que existe em grandes quantidades e porque possui um ponto de fusão abaixo das temperaturas de produção. Por sua vez o elastómero estireno-butadieno-estireno (SBS) foi selecionado por se tratar do polímero virgem mais utilizado na modificação de betumes, pois fornece significativas alterações no betume.

Relativamente aos materiais utilizados na produção das misturas betuminosas, para além dos betumes modificados a seleccionar, são necessários agregados britados de origem granítica, com a exceção do filer em pó de origem calcária. Esses agregados encontram-se divididos em frações, cujas proporções são as indicadas na Tabela 1.

Tabela 1. Quantidade de agregados de cada fração utilizados na produção das misturas betuminosas.

Agregados	Fração 0/4	Fração 4/6	Fração 6/14	Filer
Quantidade (%)	41	10	47	2

Relativamente à produção dos betumes modificados utilizaram-se inicialmente duas percentagens de óleo de motor usado, 10% e 20%, adicionadas ao betume convencional. Em seguida, para o ligante com 10% de óleo de motor, adicionou-se 2,5% e 5% dos diferentes polímeros, enquanto para o ligante com 20% de óleo se utilizou maiores quantidades de polímero (5% e 10%). No que diz respeito ao processo de modificação, este foi executado num misturador de alto corte (IKA ULTRA TURRAX T65) durante 20 minutos a 180 °C.

Após a seleção dos betumes modificados com melhor desempenho, seguiu-se a produção das misturas betuminosas com esses ligantes modificados. Todas as misturas betuminosas foram produzidas com 5% de betume, com a quantidade de agregados presente na Tabela 1, e com as temperaturas de produção e compactação de 180 °C e 160 °C, respetivamente. Posteriormente as misturas betuminosas foram sujeitas a ensaios para avaliar a sensibilidade à

água, o módulo de rigidez, a resistência ao fendilhamento por fadiga e à deformação permanente (de acordo com a normalização existente), de forma a avaliar o seu desempenho.

Deste modo, foram produzidas três misturas betuminosas com a mesma quantidade de betume e com a seguinte nomenclatura:

- Mistura AM-B: mistura convencional com 5% de betume 35/50;
- Mistura AM-BO10P5: mistura modificada com 5% de betume modificado com 10% de óleo de motor usado e 5% de HDPE;
- Mistura AM-BO10E5: mistura modificada com 5% de betume modificado com 10% de óleo de motor usado e 5% de SBS.

Relativamente ao desempenho das misturas betuminosas, algumas das suas principais propriedades serão aqui apresentadas, entre os quais as referentes aos ensaios anteriormente apresentados: sensibilidade à água, módulos de rigidez, resistência ao fendilhamento por fadiga e a resistência às deformações permanentes.

4.1 Propriedades básicas dos ligantes produzidos

O betume convencional e os betumes modificados produzidos foram caracterizados através do ensaio de penetração a 25 °C, de acordo com a norma EN 1426, e através do ensaio de temperatura de amolecimento, de acordo com a norma EN 1427 (Figura 11).

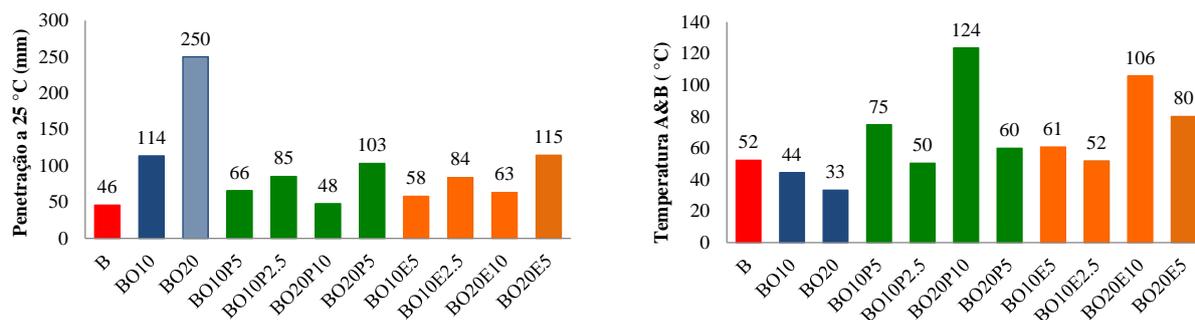


Figura 11. Resultados dos ensaios de penetração e temperatura de amolecimento (A&B) do betume convencional e betumes modificados com óleo de motor usado e polímeros.

Relativamente às propriedades dos ligantes pode verificar-se que os betumes modificados apenas com óleo (BO10 e BO20) apresentam elevada penetração e baixos pontos de amolecimento. Contudo, com a introdução dos diferentes polímeros (PEAD e SBS) os valores de penetração diminuem e, por sua vez, os valores de temperatura de amolecimento aumentam. Os betumes BO10P5 e BO10E5 apresentam boas propriedades a temperaturas intermédias, pois os valores de penetração e temperatura de amolecimento são ligeiramente superiores aos do betume convencional (35/50). Deste modo, os betume BO10P5 e BO10E5 foram selecionados para a produção e análise do desempenho das misturas betuminosas modificadas na fase seguinte do trabalho.

4.2 Sensibilidade à água

O ensaio de sensibilidade à água, de acordo com a norma EN 12697-12, consiste em separar seis provetes em dois grupos semelhantes que serão sujeitos a diferentes ambientes, seco e imerso, durante um dado período de tempo. Em seguida, os provetes secos e imersos serão ensaiados à tração indireta, de forma a obter a respetiva resistência à tração indireta (ITS) seca e imersa. O rácio entre a resistência à tração indireta imersa e seca corresponde à sensibilidade à água da mistura betuminosa (ITSR). Para além destes resultados, a

deformação dos provetes imersos, bem como o volume de vazios determinado de acordo com a norma EN 12697-8 (método A) também foram obtidos. Estes resultados estão apresentados na Figura 12.

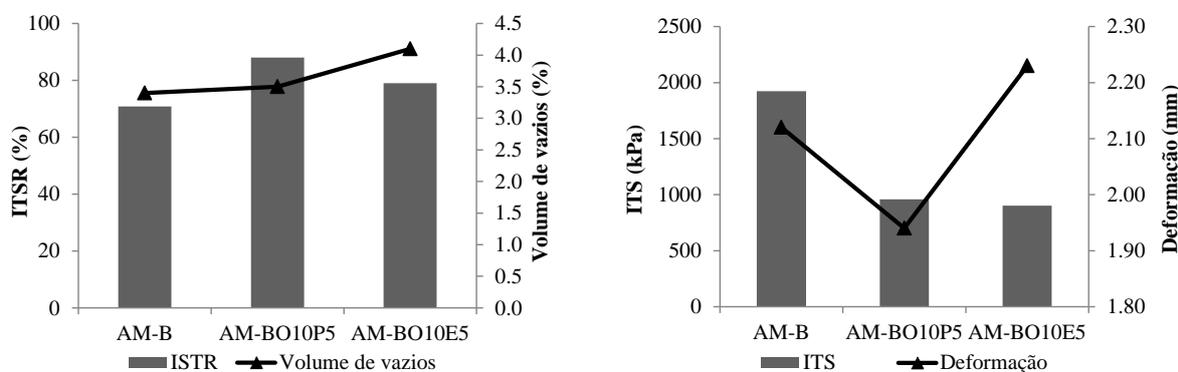


Figura 12. Resultados da sensibilidade à água da mistura convencional e misturas modificadas.

A mistura com 10% de óleo de motor usado e 5% de HDPE (AM-BO10P5) apresenta menor sensibilidade à água do que as misturas convencional e AM-BO10E5 (com SBS), embora a três misturas apresentem baixa sensibilidade à água. Relativamente ao volume de vazios, normalmente quanto maior o seu valor, mais sensível à água é a mistura betuminosa. Todavia, as misturas modificadas (AM-BO10P5 e AM-BO10E5) exibem maior volume de vazios do que a mistura AM-B, mas a sua sensibilidade à água é menor. Este facto pode dever-se ao melhor revestimento dos agregados pelos betumes modificados, diminuindo a desagregação provocada pela água. Observa-se ainda que as misturas modificadas apresentam valores de ITS inferiores aos da mistura convencional, o que poderá estar relacionado com a maior penetração dos betumes modificados, pois parte do betume foi substituída por óleo de motor usado. Por outro lado, a deformação das várias misturas é semelhante, o que aliado aos valores de ITS pode indicar que as misturas modificadas têm uma maior flexibilidade a temperaturas intermédias do que a mistura convencional.

4.3 Módulo de rigidez

O módulo de rigidez de uma mistura betuminosa depende da temperatura e do tempo de carregamento. Com base neste pressuposto, e com base na norma EN 12697-26, os provetes são ensaiados às temperaturas de 0, 10, 20 e 30 °C, e para cada temperatura efetua-se um varrimento de frequências entre 0,1 e 10 Hz. As curvas mestras relativas à variação do módulo de rigidez e ângulo de fase das misturas em estudo com a frequência e a temperatura, para uma temperatura de referência de 20 °C, podem ser observadas na Figura 13.

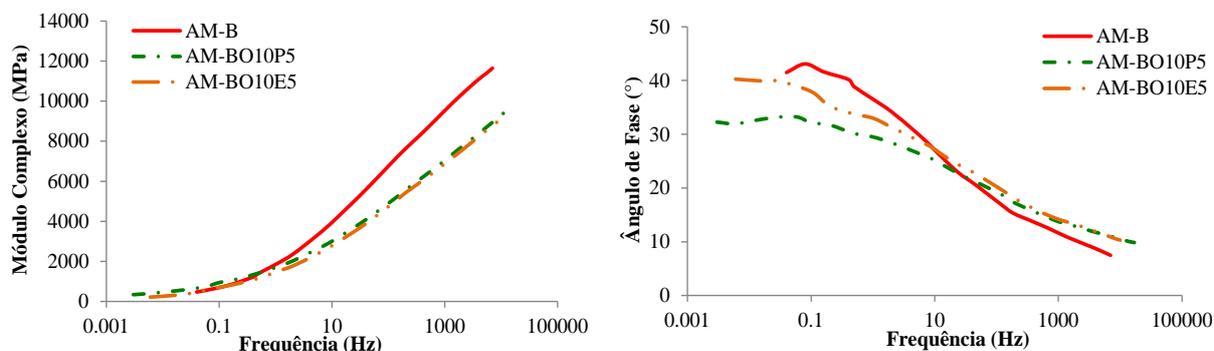


Figura 13. Curvas mestras do módulo de rigidez e ângulo de fase das misturas convencional e com betumes modificados (temperatura de referência de 20 °C).

A mistura convencional (AM-B) exibe maior rigidez do que as misturas com betume modificado. Os baixos módulos de rigidez apresentados pelas misturas modificadas devem-se à introdução do óleo de motor usado que aumenta a penetração do betume. Contudo, as misturas com betume modificado revelam menores ângulos de fase a baixas temperaturas e/ou altas frequências e maiores valores de ângulos de fase a elevadas temperaturas e/ou reduzidas frequências. Estes valores poderão indicar uma melhor resistência à fadiga por parte destes betumes, uma vez que apresentam uma boa capacidade de recuperação sem fendilhar (melhoria do comportamento elástico).

4.4 Resistência ao fendilhamento por fadiga

O ensaio de fadiga permite determinar a capacidade de uma mistura betuminosa resistir a esforços de flexão repetidos sem atingir a rotura ou fendilhamento, denominada de resistência à fadiga. O ensaio realizou-se tendo por base a norma AASTHO TP 8-94, que consiste em sujeitar os provetes a uma carga contínua sinusoidal a uma frequência de 10 Hz, a 20 °C, numa configuração de ensaio de flexão em 4 pontos. Este ensaio foi realizado com controlo de extensão, e como tal, a rotura por fadiga ocorre ao fim dum dado número de aplicações de carga, nomeadamente quando o valor inicial do módulo de rigidez se reduz para metade.

As leis de fadiga com a variação do número de ciclos de carga até à rotura por fadiga em função da extensão aplicada são apresentadas na Figura 14. Verifica-se que as misturas betuminosas modificadas exibem uma maior resistência ao fendilhamento por fadiga do que a mistura convencional, como consequência da sua maior flexibilidade e da modificação com os polímeros. Apesar da mistura AM-BO10E5 ser constituída por um elastómero (SBS), o que confere às misturas propriedades elásticas, a mistura com o plastómero HDPE (AM-BO10P5) apresentou um comportamento à fadiga muito semelhante.

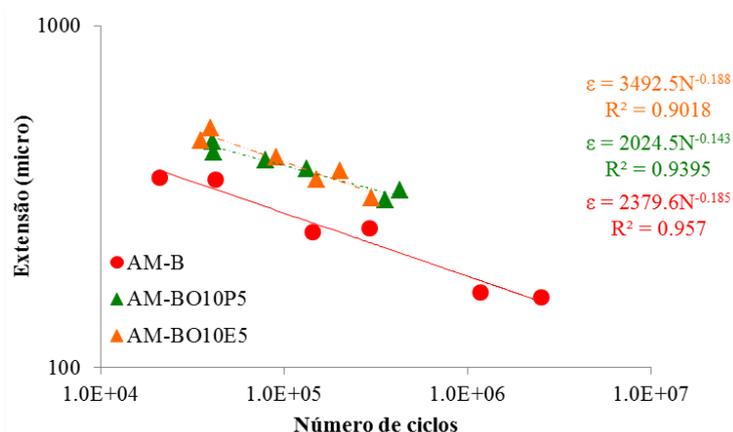


Figura 14. Leis de fadiga das misturas convencionais e com betumes modificados.

4.5 Resistência à deformação permanente

O ensaio de deformação permanente, ensaio de pista ou *Wheel-tracking Test*, de acordo com a norma EN 12697-22, permite determinar a suscetibilidade das misturas betuminosas à deformação a temperaturas elevadas e sob cargas repetidas. A resistência à deformação permanente é obtida através da medição da deformação formada pela passagem sucessiva de uma roda, à temperatura de 50 °C. Para além da evolução da deformação com o número de ciclos, o ensaio de pista permite determinar a taxa de deformação em ensaio de pista (WTS_{AIR}) utilizada para classificar o desempenho das misturas betuminosas à deformação permanente. Os resultados referentes às misturas em estudo estão representados na Figura 15.

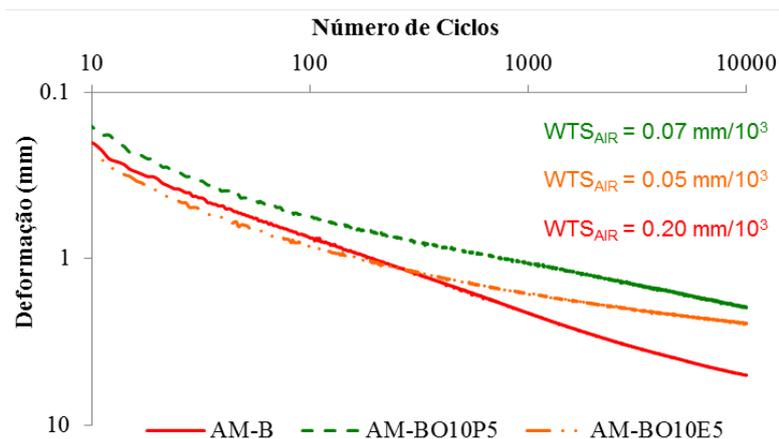


Figura 15. Variação da deformação permanente com o número de ciclos das misturas em estudo.

Da análise dos resultados anteriores pode concluir-se que as misturas modificadas (AM-BO10P5 e AM-BO10E5) apresentam maior resistência à deformação permanente do que a mistura convencional. Apesar da mistura AM-BO10P5 exibir uma menor deformação, é a mistura AM-BO10E5 que apresenta o melhor desempenho à deformação permanente, devido ao baixo valor de WTS_{AIR} .

Em suma, e após análise de todos os ensaios realizados nesta parte do trabalho, as principais conclusões deste estudo são as seguintes:

- É possível a substituição de parte do betume com a introdução de óleo de motor usado e polímeros, obtendo um betume com características promissoras (maior temperatura de amolecimento e maior penetração do que o betume convencional);
- A utilização de 10% de óleo de motor usado e 5% de polímero (HDPE e SBS) provou ser uma solução viável, quer em termos das características do ligante, quer em termos do desempenho das misturas betuminosas;
- As misturas modificadas exibem baixa sensibilidade à água e uma melhoria da resistência à fadiga e deformação permanente.

5. CONCLUSÕES GERAIS

Observando os resultados destes estudos podemos concluir genericamente que, no que respeita à substituição parcial do betume por bio-óleo, os ensaios mostraram que os ligantes combinados têm características semelhantes às dos betumes convencionais. As misturas produzidas com o ligante combinado PG64-22 & cryMBO mostraram, em geral, um desempenho melhor do que os ligantes convencionais, garantindo assim um maior tempo de serviço no pavimento, sem aparecimento de rodadeiras relacionadas com deformação permanente das misturas, ou fendilhamento precoce por fadiga ou a baixas temperaturas. Além disso, de acordo com os resultados, estas misturas não deverão apresentar problemas de durabilidade relativos à sensibilidade à água.

Os resíduos plásticos demonstraram ser uma opção muito interessante para a produção de ligantes modificados mais económicos e ecológicos, entre os quais se destaca o EVA reciclado. O PEAD revela também bons resultados em termos de penetração e ponto de amolecimento, mas este material apresenta piores resultados de resiliência e MSCR.

Relativamente às misturas com parte do betume substituído por óleo de motor usado e modificado com resíduo de PEAD e SBS, apresentam-se como uma solução muito promissora, em especial para utilização em regiões com baixas temperaturas.

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 do Projeto PLASTIROADS (PTDC/ECM/119179/2010). Agradecimentos também às empresas Gintegral (pelo fornecimento dos resíduos plásticos) e à CEPSA (pelo fornecimento do betume base e comercial modificado).

REFERÊNCIAS

- Anderson D.A., Christensen D.W., Bahia H.U., Dongré R., Sharma M.G. e Antle C.E., 1994. Binder Characterization and Evaluation, Volume 3: Physical Characterization. SHRP A-369. Washington, DC 1: National Research Council.
- Becker Y.M., Maryro P., Méndez P.M. e Rodríguez, Y., 2001. Polymer Modified Asphalt, *Vision Tecnologia*, Vol. 9 (1), pp. 39-50.
- Costa L., Silva H., Oliveira J. e Fernandes S., 2013. Incorporation of Waste Plastic in Asphalt Binders to Improve their Performance in the Pavement, *Int. J. Pavement Research and Technology*, 6 (4), pp.457-464.
- Fernandes S., Silva H., Oliveira J. e Costa L., 2013. Development of a novel modified bitumen with waste materials. 2nd International Conference WASTES: Solutions, Treatments and Opportunities. Braga, September 11–13.
- García-Morales M., Partal P., Navarro F. e Gallegos C., 2006. Effect of waste polymer addition on the rheology of modified bitumen, *Fuel*, 85 (7-8), pp.936-943.
- García-Morales M., Partal P., Navarro F., Martínez-Boza, F., Gallegos C., González N., González O. e Muñoz M, 2004. Viscous properties and microstructure of recycled eva modified bitumen, *Fuel*, Vol. 83 (1), pp.31-38.
- Ghuzlan K.A. e Carpenter S.H., 2003. Traditional fatigue analysis of asphalt concrete mixtures. In: Transportation Research Board (ed.) TRB 2003 Annual Meeting, Washington D.C., USA.
- Hınıslioğlu S. e Açar E., 2004. Use of waste high density polyethylene as bitumen modifier in asphalt concrete mix, *Materials Letters*, 58 (3-4), pp.267-271.
- Pais J.C., Pereira P.A.A., Minhoto M.J.C., Fontes L.P.T.L., Kumar D.S.N.V.A. e Silva, B.T.A., 2009. The prediction of fatigue life using the K_1 - K_2 relationship. In: Pais, J.C. (ed.) 2nd Workshop on Four Point Bending, University of Minho, Guimarães, Portugal.
- Peralta J, Silva H.M.R.D., Williams R.C., Rover M. e Machado A.V., 2013a. Development of an Innovative Bio-Binder Using Asphalt-Rubber Technology, *Int. J. Pavement Research and Technology*, 6(4), pp.447-456.
- Peralta J., Raouf M.A., Tang S. e Williams C., 2012a. Bio-renewable asphalt modifiers and asphalt substitutes. In: Sustainable Bioenergy and Bioproducts: Value Added Engineering Applications, Edit by Gopalakrishnan, K., van Leeuwen, J. & Brown, R.C., Springer-Verlag, London, pp. 89-116.
- Peralta J., Silva H.M.R.D., Hilliou L., Machado A., Pais J.C. e Williams R.C., 2012c. Mutual changes in bitumen and rubber related to the production of asphalt rubber binders. *Construction and Building Materials*, Vol. 36, pp.557-565.

- Peralta J., Silva H.M.R.D., Machado A.V. e Pais J.C., 2009b. Rheological Changes in Bitumen Caused by Aging and by the Interaction with Rubber. Asphalt Rubber 2009 Conference, Nanjing, China.
- Peralta J., Silva H.M.R.D., Machado A.V. e Pais J.C., 2010b. Changes in the Rubber Morphology Caused by the Interaction with Bitumen. International Conference on Transport Infrastructures - ICTI2010, S. Paulo, Brazil.
- Peralta J., Silva H.M.R.D., Machado A.V. e Pais, J.C., 2009a. Rheological and Functional Evaluation of the Interactions between Bitumen and Rubber. 7th Inter. RILEM Symposium on Advanced Testing and Characterization of Bituminous Materials, Rhodes, Greece.
- Peralta J., Silva H.M.R.D., Machado A.V. e Pais, J.C., 2010d. Monitoring Rubber Swelling and De- and Re-vulcanization through AR Elastic Recovery. International Conference on Transport Infrastructures - ICTI2010, S. Paulo, Brasil.
- Peralta J., Silva H.M.R.D., Machado A.V., e Pais J.C., 2009c. Influence of the Bitumen Properties on the Functional and Rheological Behaviour of Asphalt Rubber Binders. Asphalt Rubber 2009 Conference, Nanjing, China.
- Peralta J., Silva H.M.R.D., Machado A.V., Pais J.C., Pereira P.A.A. e Sousa J.B., 2010a. Changes in Rubber Due to its Interaction with Bitumen when Producing Asphalt Rubber. International Journal of Road Materials and Pavement Design, 11(4), pp.1009-1031.
- Peralta J., Silva H.M.R.D., Pais J.C., 2010c. New Experimental Methods to Monitor and Characterize Asphalt Rubber Binders. International Conference on Transport Infrastructures - ICTI2010, S. Paulo, Brasil.
- Peralta J., Williams R.C., Rover M., Silva H.M.R.D. 2012b. Development of a Rubber Modified Fractionated Bio-oil for Use as a Non-Crude Petroleum Binder in Flexible Pavements. TRB Circular E-C165, pp. 23-36.
- Peralta, J., Hilliou, L., Silva, H.M.R.D., Machado, A.V., Williams, R.C., 2013c. Rheological Changes in the Bitumen Caused by Heating and Interaction with Rubber during Asphalt-Rubber Production. Rheologica Acta, DOI 10.1007/s00397-013-0748-9.
- Peralta, J., Williams, R.C., Silva, H.M.R.D. and Machado, A.V., 2013b. Combining Asphalt-rubber (AR) and Fast-pyrolysis Bio-oil to Create a Binder for Flexible Pavements. 2nd Inter. Conference WASTES: Solutions, Treatments and Opportunities, Braga, Portugal.
- Raouf, M.A., 2010. Development of Non-Petroleum Based Binders for Use in Flexible Pavements, Tese de Doutorado, Iowa State University.
- Silva H.M.R.D., Machado A.V., Oliveira J., Costa L., 2011. Waste Polymers Recycling in High Performance Asphalt Mixtures. 1st International Conference WASTES: Solutions, Treatments and Opportunities. Guimarães, September 12–14.
- West R., Willis J.R. e Marasteanu M.O., 2013. Improved mix design, evaluation, and materials management practices for hot mix asphalt with high reclaimed asphalt pavement content, NCHRP, Transportation Research Board of The National Academies.
- Williams R.C., Cascione A., Haugen D.S., Buttlar W.G., Bentsen R.A. e Behnke J., 2001. Characterization of hot mix asphalt containing post-consumer recycled asphalt shingles and fractionated reclaimed asphalt pavement. Illinois State Toll Highway Authority.