



AVALIAÇÃO DE MÉTODOS DE CARACTERIZAÇÃO DE BETUMES MODIFICADOS

S. FERNANDES

Aluna de doutoramento
CTAC – Universidade do Minho
Guimarães; Portugal
id4966@alunos.uminho.pt

S. PEREIRA

Aluna de mestrado
CTAC – Universidade do Minho
Guimarães; Portugal
a65168@alumni.uminho.pt

H. SILVA

Professor Auxiliar
CTAC – Universidade do Minho
Guimarães; Portugal
hugo@civil.uminho.pt

J. OLIVEIRA

Professor Auxiliar
CTAC – Universidade do Minho
Guimarães; Portugal
joliveira@civil.uminho.pt

C. PALHA

Técnico superior
CTAC – Universidade do Minho
Guimarães; Portugal
cpalha@civil.uminho.pt

RESUMO

Os betumes modificados são usados na pavimentação para minimizar os principais problemas das misturas betuminosas. Contudo estes possuem características diferentes dos betumes convencionais, sendo a caracterização básica utilizada nos betumes convencionais insuficiente para a sua correta/completa caracterização. Assim, o principal objetivo deste estudo é a avaliação de diferentes betumes modificados (com óleo de motor usado e um polímero) e a sua comparação com um betume modificado comercial, através de ensaios de caracterização básica e avançada. Concluiu-se que dois dos betumes modificados com óleo de motor usado e SBS apresentam características iguais e/ou superiores ao betume modificado comercial. Para além disso, os resultados dos ensaios são muito condicionados pelas condições a que são realizados e que a caracterização avançada é essencial para complementar os ensaios de caracterização básica.

1. INTRODUÇÃO

A modificação de betumes tem como principal finalidade melhorar as propriedades termomecânicas (tais como, recuperação elástica, coesão e ductilidade) dos betumes convencionais e, conseqüentemente, das misturas betuminosas. A utilização de betumes modificados minimiza alguns dos principais problemas das misturas betuminosas, tais como a deformação permanente e o fendilhamento por suscetibilidade térmica e/ou pelo envelhecimento do betume [1, 2].

Diversos aditivos ou modificadores podem ser incorporados no betume com vista a melhorar as suas propriedades, nomeadamente polímeros, ácidos e rejuvenescedores [3]. O estireno-butadieno-estireno (SBS) é considerado um dos polímeros mais adequados para a modificação de betumes [4], pois este aumenta a resistência à deformação permanente a elevadas temperaturas e o fendilhamento a baixas temperaturas e, para além disso, melhora a resistência à tração e a recuperação elástica [5]. Por sua vez, o óleo de motor usado pode ser usado para prevenir ou rejuvenescer o betume através da redução da viscosidade do betume, o que resulta numa redução das temperaturas de mistura e compactação [3, 6, 7].

Apesar de melhorarem significativamente as propriedades do betume, a incorporação de aditivos/modificadores podem criar novas ligações químicas e físicas que dificultam uma correta caracterização apenas através dos ensaios básicos utilizados no estudo dos betumes convencionais. Como tal, para estudo dos betumes modificados é crucial aliar os tradicionais ensaios básicos a novos ensaios mais avançados que permitam compreender o comportamento desses betumes modificados a diversas temperaturas e que, para além disso, consigam determinar propriedades que não são avaliadas nos betumes convencionais.

Deste modo, pretende-se avaliar vários betumes modificados com diferentes materiais (óleo de motor usado e um polímero) e um betume modificado comercial (utilizado também como betume de controlo/comparação) através da caracterização básica de betumes e de ensaios de caracterização mais avançados. Desta forma pretende-se comparar os diferentes betumes modificados com o betume comercial através dos diferentes métodos de ensaios e avaliar se estes são válidos e/ou adequados para avaliação dos betumes modificados com diferentes materiais.

2. MATERIAIS E MÉTODOS LABORATORIAIS

2.1 Materiais

Os materiais utilizados para a produção dos betumes modificados utilizados neste estudo foram um betume convencional de penetração 35/50 (BC), um óleo de motor usado (proveniente de veículos pesados) e um polímero denominado estireno-butadieno-estireno (SBS). Para além disso, avaliou-se um betume modificado comercial PMB 45-80/60 (PMB) para efeito de controlo e comparação com os restantes betumes modificados produzidos.

2.2 Métodos laboratoriais

2.2.1 Produção dos betumes modificados com SBS

De forma a obter betumes modificados relacionáveis entre si e com diferentes características, optou-se por estudar duas percentagens de óleo de motor (10,0% e 12,5%) e duas percentagens de SBS (5% e 6%). Deste modo é possível estudar betumes modificados com a mesma percentagem de polímero e crescente quantidade de óleo de motor e, também avaliar para a mesma percentagem de óleo de motor diferentes quantidades de polímero. Como tal, produziram-se três betumes modificados, com a seguinte nomenclatura e percentagens dos diferentes modificadores:

- Betume modificado A: betume 35/50 + 10,0% de óleo de motor + 5% de SBS;
- Betume modificado B: betume 35/50 + 12,5% de óleo de motor + 5% de SBS;
- Betume modificado C: betume 35/50 + 10,0% de óleo de motor + 6% de SBS.

Estes betumes foram produzidos num misturador de alto corte, a uma temperatura de 170 a 180 °C, com uma velocidade compreendida entre 6000-7200 rpm e avaliados através de uma caracterização básica e de uma caracterização avançada.

2.2.2 Caracterização básica dos betumes modificados

Na caracterização básica estão contemplados os ensaios de penetração a 25 °C (norma EN 1426), temperatura de amolecimento pelo método anel e bola (norma EN 1427) e viscosidade dinâmica (norma EN 13302). No caso dos ensaios de caracterização avançada, como se poderá ver em seguida, inserem-se os ensaios de reologia, de determinação da energia de deformação e de determinação da recuperação elástica e não elástica dos betumes modificados.

2.2.3 Caracterização reológica dos betumes modificados

O ensaio de reologia (norma EN 14770) permite caracterizar o comportamento viscoelástico do betume, a temperaturas de serviço baixas, intermédias e elevadas, fornecendo características intrínsecas do material, tais como o módulo de rigidez, o módulo elástico e viscoso e o ângulo de fase, para várias condições de carga (temperatura e frequência). Uma amostra de 1 mm de espessura é colocada entre dois pratos paralelos, com 40,0 mm de diâmetro, aquecidos a uma determinada temperatura. Para cada patamar de temperatura estipulado (30, 45, 60, 70 e 80 °C), a amostra fica sujeita a uma extensão fixa, enquanto é aplicado um torque que oscila numa gama de frequências de 10 Hz a 0,1 Hz, segundo a norma EN 14770. Contudo, e uma vez que o reómetro utilizado AR-G2 (Figura 1) permite uma maior gama de frequências, adotou-se uma gama de frequências superior compreendida entre 0,1 e 20 Hz. Este ensaio permite ainda realizar uma sobreposição tempo-temperatura das curvas, através da translação das curvas com base numa curva de referência (curva da temperatura de 60 °C). Importa salientar que para esta sobreposição ser considerada válida, as várias curvas com temperaturas diferentes devem ser iguais ao longo de uma gama de frequências e, ao mesmo tempo, o fator de translação deve garantir que todos os parâmetros viscoelásticos se sobreponham.

2.2.4 Caracterização da energia de deformação dos betumes modificados

No caso do ensaio para a determinação da energia de deformação (EN 13703) realizado através do método força de ductilidade (EN 13589), este pretende determinar a energia convencional (obtida através do quociente entre a energia de

deformação e a área da secção transversal inicial) utilizada como critério de especificação para avaliação da coesão de betumes modificados. O ensaio consiste em tracionar amostras de betume num ductilómetro (Figura 2), à temperatura de ensaio (neste caso 5 °C), a uma velocidade constante de 50 mm/min até fraturar ou até atingir um deslocamento de pelo menos 400 mm. Este ensaio também permite determinar a força máxima de tração ocorrida ao longo do mesmo.



Figura 1: Reómetro AR-G2 utilizado no ensaio de reologia



Figura 2: Amostras de betume a serem tracionadas no ductilómetro

2.2.5 Caracterização da recuperação elástica e não elástica dos betumes modificados

Para a determinação da recuperação elástica utilizou-se o ensaio de penetração e recuperação (EN 13880-3), o ensaio de recuperação elástica (com ductilómetro de acordo com a norma EN 13398) e o ensaio de fluência e relaxamento (AASHTO TP 70-11). O ensaio de resiliência (penetração e recuperação) consiste na aplicação de um deslocamento de compressão de 10 mm numa amostra de betume, a uma temperatura de 25 °C, através de uma esfera de metal com 17 mm de diâmetro, a uma taxa de 1 mm/s (Figura 3). Após 20 segundos é medida a recuperação elástica da amostra, através da redução percentual da penetração. Por sua vez, no ensaio de determinação da recuperação elástica realizado no ductilómetro, a amostra é esticada à temperatura de ensaio (neste caso 25 °C), a uma velocidade constante de 50 mm/min até atingir o deslocamento de 200 mm. Em seguida a amostra é cortada na secção central, obtendo duas metades e, após 30 min, é medida a distância recuperada entre as duas metades.

O ensaio de fluência e relaxamento, realizado num outro reómetro de pratos paralelos (Figura 4), para além de avaliar a recuperação elástica, permite determinar a recuperação não elástica, através do indicador de deformação não recuperada J_{nr} (fornece uma estimativa da resistência à deformação permanente sob cargas repetidas). O ensaio consiste em colocar uma amostra de betume com 1 mm de espessura, num prato de 22 mm à temperatura de 64 °C (considerando a temperatura máxima do grau de comportamento (PG) em Portugal) e aplicar à amostra dois níveis de tensão de torção de 100 Pa e de 3200 Pa. No ciclo de tensão/recuperação a carga é aplicada durante 1 segundo, a que se segue uma recuperação de 9 segundos, e este ciclo é realizado 10 vezes para cada nível de tensão.

3. RESULTADOS

Em seguida serão apresentados os resultados da caracterização básica e avançada do betume modificado comercial (PMB), betume convencional (BC) e dos betumes modificados com óleo e SBS (A, B e C). Adicionalmente serão apresentadas as relações estabelecidas entre os diferentes ensaios de caracterização. Importa salientar que o betume convencional não será caracterizado ao nível da energia de deformação e de recuperação elástica (através dos ensaios de resiliência e ductilómetro) pois estes ensaios apenas são utilizados na caracterização dos betumes modificados.

3.1 Caracterização básica dos betumes modificados

Tal como se pode verificar na Figura 5, o aumento da percentagem de óleo de motor para a mesma percentagem de polímero (betumes modificados A e B) aumenta de forma significativa a penetração do betume, comparativamente ao betume convencional. Contudo, para a mesma percentagem de óleo, o aumento da quantidade de polímero provoca uma

redução do valor de penetração (betume C), aproximando-se do valor de penetração do betume convencional (BC) usado na modificação.



Figura 3: Equipamento utilizado no ensaio de resiliência (penetração e recuperação)



Figura 4: Reómetro de pratos paralelos utilizado no ensaio de fluência e relaxamento

Comparativamente ao betume comercial (PMB), o betume A tem uma penetração similar, demonstrando ser uma solução equivalente efetuada com óleo usado e SBS (ao efetuar apenas a caracterização básica). Por outro lado, os betumes B e C exibem valores de penetração muito superior e inferior, respetivamente, em relação ao betume comercial (PMB), o que demonstra que esta propriedade é bastante sensível à quantidade de óleo e polímero usado.

No que concerne aos valores de temperatura de amolecimento, estes apresentam valores muito similares, ou seja, a quantidade de polímero e óleo de motor usado não tem grande influência na temperatura de amolecimento. Quando comparados com o betume modificado comercial (PMB) e betume convencional (BC), estes betumes apresentam temperaturas de amolecimento muito superiores, ou seja, menor suscetibilidade térmica (em princípio devido à quantidade elevada de polímero utilizada nos três betumes em estudo).

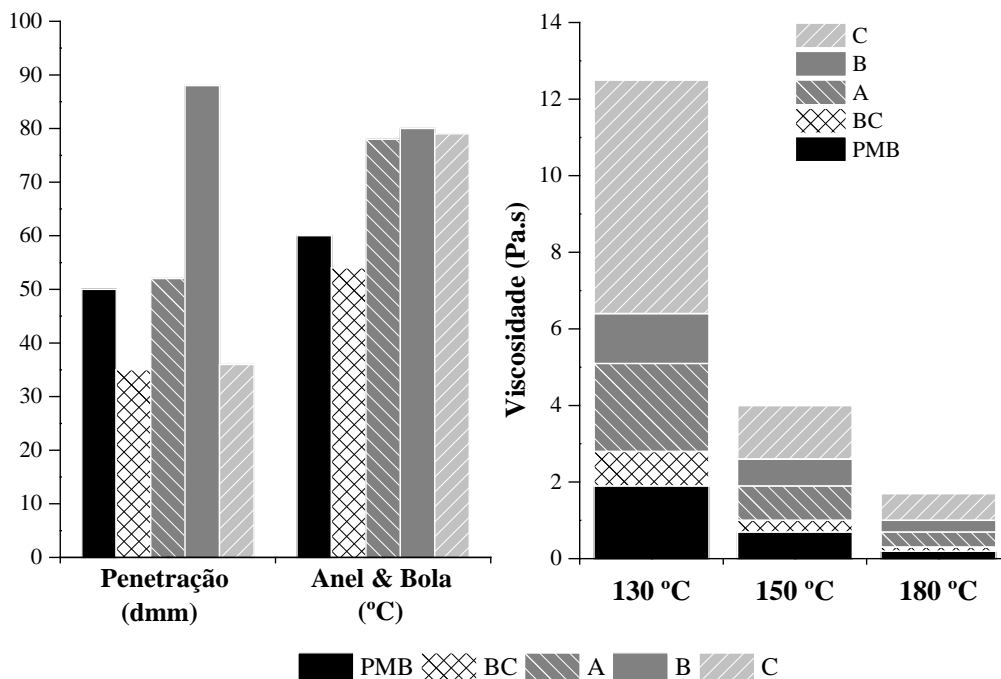


Figura 5: Valores de penetração, temperatura de amolecimento e viscosidade dos betumes em estudo

Através dos resultados do ensaio de viscosidade (Figura 5) é possível visualizar que os betumes modificados apresentam viscosidades superiores ao betume modificado comercial, com exceção do betume B à temperatura de 130 °C. Para além disso, todos os betumes modificados exibem uma viscosidade superior, em toda a gama de temperaturas estudada, ao betume convencional usado para na modificação (BC). Tal como seria de esperar o betume com maior percentagem de polímero apresenta maior viscosidade em toda a gama de temperaturas estudada. Para além disso, o betume com maior percentagem de óleo de motor (B) apresenta a menor viscosidade quando comparado com os betumes modificados A e C.

3.2 Caracterização avançada dos betumes modificados

3.2.1 Reologia dos betumes modificados

Na avaliação das curvas mestras do módulo elástico (Figura 6) verifica-se que a elevadas temperaturas e baixas frequências os betumes modificados apresentam maior módulo elástico do que o betume modificado comercial. Para além disso, a temperaturas baixas e elevadas frequências os betumes A e C exibem módulos elásticos muito próximos do betume comercial. Como tal, verifica-se que os betumes modificados A e C apresentam uma maior flexibilidade a baixas temperaturas (onde há maior facilidade de ocorrência de fendilhamento), contrariando o facto de que um betume com menor penetração (tal como o betume C) tende a ter uma menor resistência à fadiga. Quando comparados com o betume convencional, os betumes modificados apresentam um módulo elástico muito superior a baixas frequências e elevadas temperaturas e um módulo semelhante a elevadas frequências e baixas temperaturas. Deste modo verifica-se uma acentuada melhoria da resistência à deformação e da flexibilidade dos betumes modificados em estudo relativamente ao betume convencional.

No caso das curvas mestras do módulo viscoso os betumes A e C apresentam um comportamento semelhante ao betume modificado comercial, contrariamente ao betume B que exhibe uma curva de módulo viscoso inferior aos restantes betumes em estudo em toda a gama de frequências e temperaturas. O módulo viscoso relaciona-se essencialmente com o desempenho à deformação permanente das misturas na medida em que quanto maior o módulo viscoso, maior a resistência desse ligante à deformação permanente. Como tal, os betumes A, C e PMB deverão apresentar uma resistência à deformação permanente superior ao betume B e ao betume convencional, o que demonstra a influência negativa do óleo (quando é utilizado em quantidades mais altas) relativamente a esta propriedade. Salienta-se ainda que a reologia permite uma distinção do betume B em relação aos restantes que não era notória no ensaio básico de anel e bola.

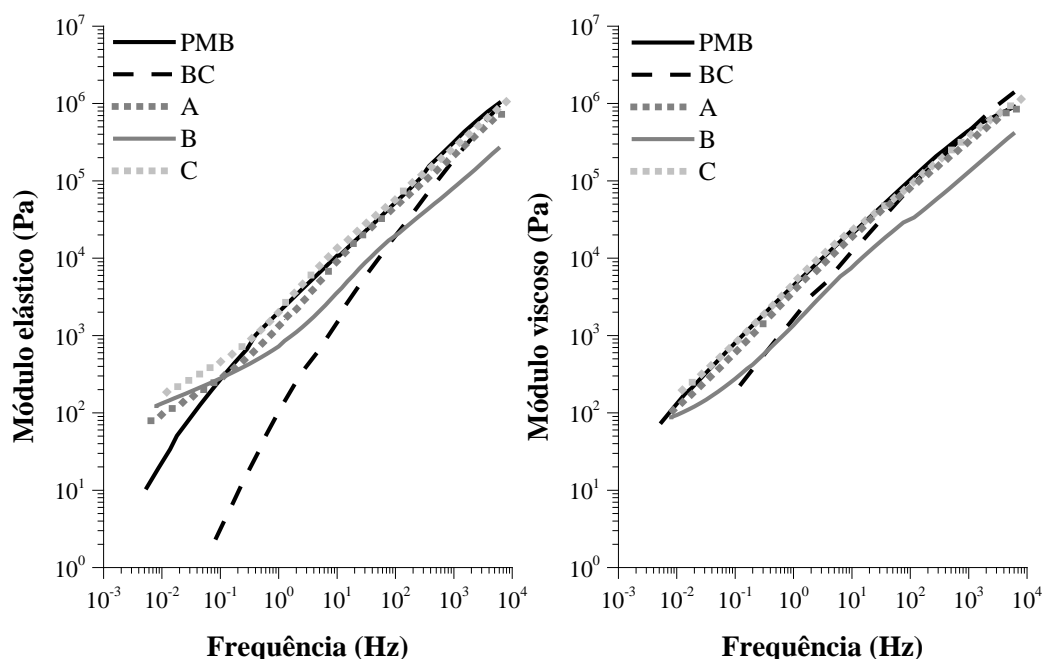


Figura 6: Curvas mestras do módulo elástico e viscoso dos betumes em estudo

3.2.2 Energia de deformação dos betumes modificados

De acordo com o Caderno de Encargos da Infraestruturas de Portugal os betumes modificados com penetração compreendida entre 25/55 e 45/80 devem apresentar uma força de ductilidade, para a temperatura de 5 °C, igual ou superior a 3 e 2 J/cm², respetivamente.

Tal com se pode verificar na Figura 7, o betume modificado comercial usado neste estudo (PMB) apresenta uma força de ductilidade superior à especificação. O mesmo se verifica para os betumes A e C que apresentam forças de ductilidade superiores às especificadas para a gama de penetrações a que pertencem. No caso do betume B, apesar de para a penetração que apresenta não existir um valor mínimo de força de ductilidade, este apresenta uma força de ductilidade semelhante a um betume modificado PMB 25/55. Para além disso verifica-se que apenas o betume C apresenta uma força de ductilidade superior ao betume modificado comercial e, que o betume B apresenta o menor valor de força de ductilidade. O mesmo tipo de comportamento é verificado na força máxima de tração de cada um dos betumes em estudo. Como tal, verifica-se que o betume C exibe uma maior flexibilidade do que os restantes betumes à temperatura de 5 °C, o que poderá ser indicador de uma maior resistência ao fendilhamento térmico ou por fadiga (em princípio devido à maior quantidade de SBS utilizado neste betume).

3.2.3 Recuperação elástica e não elástica dos betumes modificados

Para além disso, a mesma especificação (Caderno de Encargos da Infraestruturas de Portugal) contempla um valor mínimo de recuperação elástica (ensaio ductilómetro) de 70%. Da análise dos resultados da Figura 7 pode constatar-se que todos os betumes em estudo, incluindo o betume modificado comercial, apresentam valores de recuperação elástica superiores a 70%. Aliado a isso, os betumes modificados com óleo e SBS ainda evidenciam recuperação elástica superior ao betume modificado comercial.

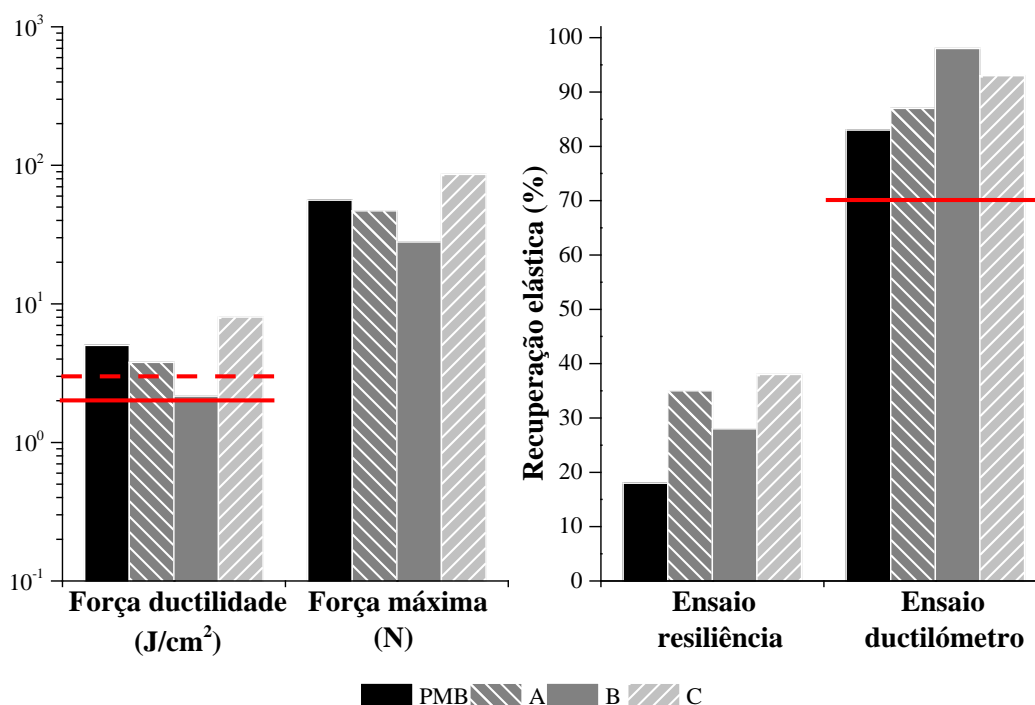


Figura 7: Valores de força de ductilidade, força máxima e recuperação elástica dos betumes em estudo

O mesmo se verifica no caso dos resultados do ensaio de resiliência. Contudo, o betume B no ensaio de resiliência tem o menor valor (quando comparado com o betume A e C), mas no ensaio com ductilómetro este exibe o valor mais elevado. Apesar de ambos medirem a mesma propriedade, o ensaio de resiliência é realizado em compressão, enquanto o ensaio com ductilómetro é realizado à tração. Este facto pode indicar que o aumento da quantidade de óleo de motor condiciona o comportamento elástico à compressão mas beneficia o comportamento à tração.

Importa ainda salientar que o facto de um dado betume exercer menor força de tração (como no caso do ensaio de força de ductilidade) não implica necessariamente que este possua menor recuperação ao ser ensaiado no ductilómetro. Isto

porque a baixas temperaturas (como no caso do ensaio de força de ductilidade, realizado a 5 °C) o betume com maior percentagem de óleo (betume B) é mais deformável e, como tal, necessita de uma menor força de tração para alcançar a mesma deformação de um betume menos deformável, embora possa o mesmo betume apresentar a 25 °C uma maior recuperação elástica da deformação que lhe foi imposta. De novo, salienta-se que a configuração e a temperatura utilizada nos ensaios influencia muito os resultados obtidos, e por isso a sua seleção deve ser criteriosa.

No caso do ensaio de fluência e relaxamento é possível fazer uma avaliação do betume a temperaturas elevadas (64 °C), quer da recuperação elástica, quer da deformação não recuperada (através do indicador de deformação permanente). Nesse ensaio, e tal como se pode verificar na Figura 8, para o nível de tensão mais baixo os betumes modificados com óleo e polímero apresentam maior percentagem de deformação recuperada do que o betume modificado comercial, sendo que o betume B apresenta o maior valor. Por sua vez, para o nível de tensão mais elevado o betume C exibe a maior percentagem recuperada, enquanto o betume B apresenta o menor valor. No caso do betume convencional, tal como seria de esperar, este apresenta um valor muito reduzido de percentagem de deformação recuperada, quer para o nível de tensão mais baixo, quer para o nível de tensão mais elevado.

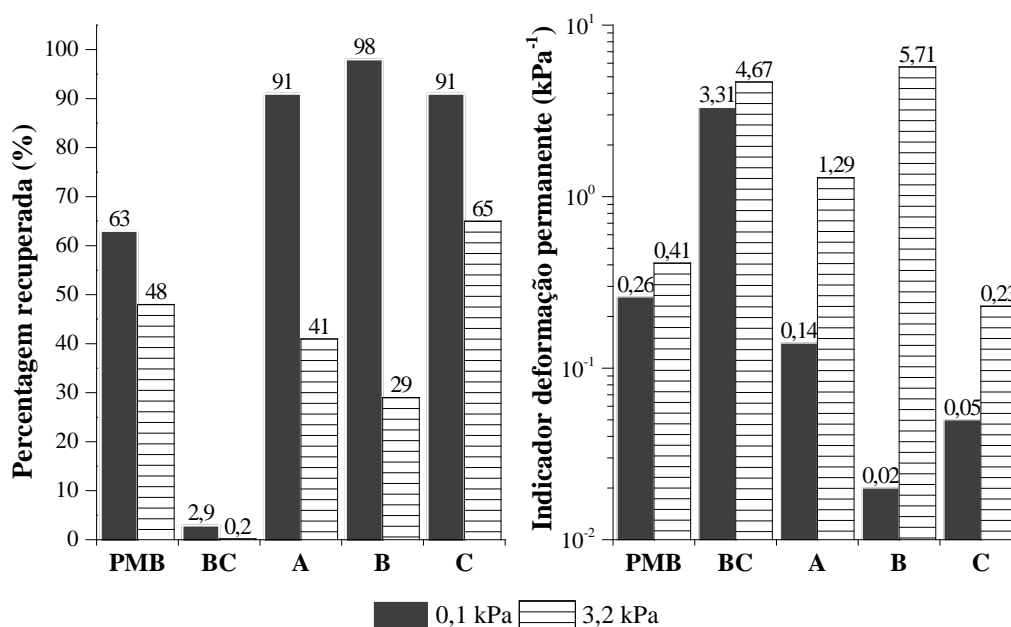


Figura 8: Percentagem recuperada e indicador de deformação permanente dos betumes em estudo a 64 °C

No que concerne ao resultado do valor de deformação permanente, quanto maior o valor do indicador de deformação permanente (J_{nr}), menor será a resistência à deformação permanente desse betume. Como tal, para nível de tensão mais baixo e, tal como aconteceu na avaliação da recuperação elástica supracitada, os betumes modificados com óleo e polímero apresentam os menores valores de J_{nr} . Para além disso, o betume B apresenta o menor valor do indicador de deformação permanente. Quando o nível de tensão é superior, apenas o betume C apresenta valor de J_{nr} inferior ao betume modificado comercial, enquanto o betume B apresenta o maior valor (contrariamente à tensão mais baixa). Importa realçar que é a tensão mais elevada (3,2 kPa), aliada à elevada temperatura, que melhor simula as condições mais desfavoráveis a que um pavimento está sujeito. Para além disso, as cargas provocadas pelos veículos pesados (que provocam maior deformação no pavimento e são as utilizadas para o seu dimensionamento) são mais próximas do valor de tensão superior. Deste modo, verifica-se que o betume com melhores características, quer de recuperação elástica, quer de indicador de deformação permanente é o betume C, ou seja, o betume com maior quantidade de polímero, sendo o betume B (com maior quantidade de óleo) e o betume convencional os que apresentam pior desempenho. Este resultado vai de encontro aos resultados de reologia (módulo viscoso), resiliência e força de ductilidade anteriormente apresentados.

4. CONCLUSÕES

Os betumes modificados com óleo e polímero cumprem os requisitos de temperatura de amolecimento, força de ductilidade e recuperação elástica imposta pela especificação para a gama de penetração em que estão inseridos. Para além disso, os betumes A e C apresentam maior flexibilidade a baixas temperaturas e uma resistência à deformação

permanente semelhante ao betume modificado comercial (devido aos valores da curva mestra do módulo viscoso). No ensaio de fluência e relaxamento o betume C apresenta maior flexibilidade e menor indicador de deformação permanente do que o betume modificado comercial, para o nível de tensão mais elevado (mais desfavorável). Contudo, o facto destes betumes modificados conterem diferentes materiais (um dos quais é resíduo) torna a sua caracterização e análise mais difícil e complexa, sendo necessário a realização dos ensaios mais avançados para melhor compreender a interação destes materiais.

Importa ainda salientar deste estudo que apesar de existirem relações entre os ensaios realizados, os resultados são muito dependentes das condições a que são realizados, tais como o efeito da temperatura e a forma como o ensaio é realizado (à tração, à compressão ou corte/torção).

Para além disso, neste estudo verificou-se que por vezes os ensaios básicos, como é o caso do ensaio de penetração e temperatura de amolecimento, apresentam resultados que podem levar a conclusões precipitadas se não forem acompanhados de uma caracterização mais avançada. Isto porque um betume com menor penetração poderá indicar uma rigidez elevada e uma menor resistência ao fendilhamento térmico, o que pode não se verificar ao avaliar a reologia dos betumes modificados. Deste modo é crucial perceber que, quer os ensaios de caracterização básica, quer os ensaios de caracterização avançada, são complementares e que a sua escolha depende da utilização que vai ser dada ao betume modificado (local e camada onde vai ser aplicado) que influenciam as características a avaliar para cada betume em estudo.

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] Zhu, J. *et al*, "Polymer modification of bitumen: Advances and challenges", *European Polymer Journal*, 2014, n.º 54, 0, pp. 18-38.
- [2] Kalantar, Z.N. *et al*, "A review of using waste and virgin polymer in pavement", *Construction and Building Materials*, 2012, n.º 33, pp. 55-62.
- [3] Lesueur, D., "The colloidal structure of bitumen: Consequences on the rheology and on the mechanisms of bitumen modification", *Advances in Colloid and Interface Science*, 2009, n.º 145, 1–2, pp. 42-82.
- [4] Yildirim, Y., "Polymer modified asphalt binders", *Construction and Building Materials*, 2007, n.º 21, 1, pp. 66-72.
- [5] Ahmedzade, P., "The investigation and comparison effects of SBS and SBS with new reactive terpolymer on the rheological properties of bitumen", *Construction and Building Materials*, 2013, n.º 38, pp. 285-291.
- [6] Zargar, M. *et al*, "Investigation of the possibility of using waste cooking oil as a rejuvenating agent for aged bitumen", *Journal of Hazardous Materials*, 2012, n.º 233–234, pp. 254-258.
- [7] Silva, H.M.R.D. *et al*, "Are totally recycled hot mix asphalts a sustainable alternative for road paving?", *Resources, Conservation and Recycling*, 2012, n.º 60, pp. 38-48.