

IAG293-01-2013
VALORACIÓN DE MATERIALES RECICLADOS EN LA FABRICACIÓN
DE BETUNES MODIFICADOS PARA PAVIMENTOS
VALORIZAÇÃO DE MATERIAIS RECICLADOS NA PRODUÇÃO DE
BETUMES MODIFICADOS PARA PAVIMENTOS

Liliana Costa
Universidade do Minho
Guimarães, Portugal
b6100@civil.uminho.pt

Sara Fernandes
Universidade do Minho
Guimarães, Portugal
a54268@alunos.uminho.pt

Hugo M.R.D. Silva
Universidade do Minho
Guimarães, Portugal
hugo@civil.uminho.pt

Joel R.M. Oliveira
Universidade do Minho
Guimarães, Portugal
joliveira@civil.uminho.pt

Paulo Pereira
Universidade do Minho
Guimarães, Portugal
ppereira@civil.uminho.pt

Paulo Fonseca
Elevo Group
Porto, Portugal
paulo.fonseca@elevogroup.com

Resumen

El aumento del tráfico por carretera en las últimas décadas, en combinación con un mantenimiento inadecuado llevó a un deterioro acelerado de la infraestructura vial en varios países. Un método que se destaca en la mejora de las propiedades de las mezclas bituminosas es la modificación del betún con polímeros. Aunque la modificación del polímero virgen cumple el objetivo, la modificación de betún con polímeros reciclados puede proporcionar un resultado equivalente en la mejora de las propiedades de la mezcla, si se realiza una selección adecuada de los polímeros, lo betún y las condiciones de producción. La mayor preocupación ambiental y el aumento conocido en el precio del petróleo, que influye en el precio del betún, aumenta el interés en encontrar ligantes que sustituyen o disminuyen la cantidad de betún en la mezcla bituminosa.

Por lo tanto, además de estudiar la modificación de los bitúmenes con polímeros reciclados, también la sustitución de 10% de betún por aceite usado de motor se ha incluido en este estudio. Los ligantes modificados se han producido entonces con polímeros vírgenes (SBS y EVA) y reciclados (EVA_r y PEAD_r) y también con sustitución de 10% de lo betún por aceite usado, que fueron sometidos a una serie de pruebas como: pruebas de caracterización básica, de estabilidad al almacenamiento y pruebas reológicas, de la que se concluyó que la adición de ambos materiales reciclados puede influir positivamente en el desempeño del ligante causando ventajas ecológicas y económicas.

Resumo

O aumento do tráfego rodoviário durante as últimas décadas em combinação com a insuficiente manutenção levou à degradação acelerada das infraestruturas rodoviárias em vários países. Um método que se destaca na melhoria das propriedades das misturas betuminosas é a modificação do betume com polímeros. Embora a modificação de polímeros virgens cumpra esse objetivo, a modificação do betume com polímeros reciclados poderá apresentar um resultado equivalente na melhoria das propriedades do pavimento, desde que seja realizada uma adequada seleção dos polímeros, do betume e das condições de produção. A maior preocupação ambiental e o conhecido aumento do preço do petróleo, que influencia o preço do betume, aumentam o interesse em encontrar ligantes que substituam ou diminuam a quantidade de betume na mistura betuminosa. Assim sendo, para além do estudo da modificação dos betumes com polímeros reciclados, também a substituição de 10% de betume por óleo usado de motor foi incluído neste estudo. Foram então produzidos ligantes modificados com polímeros virgens (SBS e EVA) e reciclados (EVA_r e PEAD_r), com e sem substituição de 10 % do betume por óleo usado, os quais foram submetidos a uma série de ensaios tais como: ensaios de caracterização básica, de estabilidade ao armazenamento e de caracterização reológica, a partir dos quais foi possível concluir que a adição de ambos os materiais reciclados pode influenciar positivamente o desempenho do ligante acarretando vantagens ecológicas e económicas.

INTRODUÇÃO

As maiores exigências colocadas atualmente aos pavimentos rodoviários conduzem à necessidade de melhorar o seu desempenho. O método que mais se destaca para a melhoria do seu desempenho é a modificação dos betumes com polímeros. A possibilidade de utilização de polímeros reciclados em vez de virgens na modificação de betumes conduz a um conjunto de vantagens ecológicas e económicas. De acordo com estudos anteriores, o desempenho dos ligantes e das misturas betuminosas modificadas com polímeros reciclados é semelhante ao observado com polímeros virgens (Fuentes-Audén *et al.*, 2008), desde que a adequada seleção dos polímeros, do betume e das condições de produção seja assegurada (Pérez-Lepe *et al.*, 2003). O melhor desempenho conseguido com a modificação de betumes com polímeros ou resíduos plásticos tem-se observado através de uma maior resistência à deformação permanente, de uma maior rigidez a temperaturas elevadas e de uma menor suscetibilidade à variação da temperatura (Kalantar *et al.*, 2012, Yildirim, 2007). Em alguns casos também se verificou uma melhor resistência à fadiga, dependendo do tipo de polímeros utilizados, que influencia as propriedades reológicas do betume (García-Morales *et al.*, 2006, García-Morales *et al.*, 2004)

Relativamente aos resíduos plásticos que têm sido utilizados na modificação de betumes para pavimentação, destacam-se os seguintes: o polietileno de baixa densidade (PEBD) (García-Morales *et al.*, 2006), o polietileno de alta densidade (PEAD) (Hınıslıoğlu e Ağar, 2004), o polipropileno (PP) (Casey *et al.*, 2008), o etileno-acetato de vinilo (EVA) (García-Morales *et al.*, 2004, Isacson e Lu, 1999), o acrilonitrila butadieno estireno (ABS) (Casey *et al.*, 2008), o polietileno tereftalato (PET) (Ahmadinia *et al.*, 2012) e o policloreto de vinilo (PVC) (Kalantar *et al.*, 2012). No entanto tem-se verificado que nem todos estes polímeros são muito adequados para modificar betumes.

Apesar da reutilização de resíduos plásticos nas misturas betuminosas por si só já conduzir a vantagens económicas e ambientais, a possibilidade de se conseguir produzir um ligante com uma quantidade inferior de betume, em que parte do seu betume seja substituído por mais um resíduo, neste caso por óleo de motor usado, irá aumentar essas vantagens. Na literatura já se encontram alguns estudos em que se procura substituir o betume na produção de ligantes. Fuentes-Audén *et al.* (2007) estudaram a formulação de ligantes sintéticos obtidos a partir da mistura de polímeros, resinas e óleos nafténicos. Williams e Metwally (2010) apresentaram o estudo de um ligante não oriundo de petróleo, mas proveniente de óleos vegetais. No entanto estes bio-ligantes ainda estão em estudo para terem um comportamento igual aos betumes convencionais e necessitam de tratamentos antes da sua utilização. Na pavimentação rodoviária o óleo lubrificante também já é utilizado como rejuvenescedor (Lesueur, 2009, Silva *et al.*, 2012).

Neste estudo pretende avaliar-se as possíveis vantagens da modificação de betumes com diferentes resíduos plásticos disponíveis, de forma a melhorar as propriedades dos ligantes modificados resultantes para aplicação futura em misturas betuminosas. Também se avalia a possibilidade de substituir 10% do betume por óleo de motor usado.

MATERIAIS E MÉTODOS

Materiais

O betume base utilizado em todo o estudo foi um betume 35/50 com 46 dmm de penetração e com um ponto de amolecimento de 52 °C. Também foi avaliado um betume comercial modificado com polímeros para servir de comparação aos novos betumes modificados produzidos com os diferentes polímeros (virgens e reciclados) e com o óleo de motor usado.

Após contactos com empresas de reciclagem de plásticos, verificou-se que o plástico que existe em maior quantidade para reciclagem e que poderá ser adequado para a modificação de betumes é o polietileno de alta densidade tendo por isso maior potencial de valorização. Entretanto, através de pesquisa bibliográfica, verificou-se que entre os polímeros mais utilizados comercialmente na modificação de betumes destacam-se o SBS e o EVA (Casey *et al.*, 2008). Devido a isso o estudo também prosseguiu com a modificação de betumes com esses polímeros no seu estado virgem. Para o polímero EVA também foi possível obter material reciclado, sendo assim possível comparar as diferenças de comportamento verificadas quando se aplica este polímero no ligante nas suas duas fases (virgem/reciclado). Os diferentes polímeros, virgens ou reciclados, foram fornecidos em forma granulada e com dimensão máxima de aproximadamente

4,00 mm. Como houve alguma dificuldade em conseguir assegurar a digestão do SBS e do PEAD foi necessário definir uma solução alternativa para garantir uma modificação mais eficaz dos betumes pelos polímeros. A solução foi transformar estes materiais em pó, com uma dimensão inferior a 0,45 mm. Este processo foi realizado num moinho do Departamento de Engenharia de Polímeros da Universidade do Minho, após congelação dos polímeros com azoto líquido.

O óleo utilizado neste estudo, para reduzir a quantidade de betume no ligante, é proveniente duma empresa de recolha de resíduos e trata-se de óleo usado de motor automóvel.

Métodos

Os ligantes foram todos preparados nas mesmas condições, sendo a mistura realizada durante 60 minutos a 180 °C, num misturador IKA RW20 a uma velocidade de agitação de 350 rpm. Foi utilizada uma percentagem de 5% de polímero em relação ao peso de betume, e no caso dos ligantes com óleo, os 5% de polímero foram adicionados ao ligante composto por 90% de betume e 10% de óleo.

De modo a classificar os betumes usados neste estudo, foi levada a cabo a sua caracterização física de acordo com a norma EN 12591. A caracterização incluiu ensaios para determinação do ponto de amolecimento e ensaios de penetração a 25 °C dos ligantes em estudo. Visto que foram utilizados alguns elastómetros, também foram realizados ensaios de resiliência. A viscosidade dinâmica a temperaturas mais elevadas também foi quantificada, bem como a estabilidade ao armazenamento dos betumes modificados. Por fim, foram determinadas as propriedades reológicas dos vários ligantes betuminosos.

Ponto de amolecimento e penetração

O ponto de amolecimento (EN 1427) é a temperatura à qual um betume começa a fluir, e tem influência direta sobre a resistência à deformação permanente das misturas. Este indica a temperatura máxima que se prevê que uma mistura betuminosa com esse ligante consiga suportar na estrada sem que o processo de formação de rodeiras ocorra tendencialmente muito rápido. O ponto de amolecimento de um betume modificado pode indicar então a melhoria do desempenho dos ligantes em termos de sensibilidade a temperaturas elevadas de serviço, que pode ser conseguida através da adição do polímero.

A penetração (EN 1426) é uma medida da consistência de um betume à temperatura de referência de 25 °C e é o ensaio mais comum na caracterização de ligantes betuminosos na Europa. Este representa a resistência de um determinado betume à penetração por parte de uma agulha, propriedade que se relaciona indiretamente com a rigidez destes materiais às temperaturas mais comuns de projeto.

Resiliência

A caracterização dos betumes modificados em estudo também incluiu ensaios de resiliência (penetração e recuperação elástica) a uma temperatura de 25 °C, de acordo com a EN 13880-3. Este valor deverá ser um indicador do comportamento elástico do ligante, nomeadamente da deformação recuperável por parte do ligante. Para as misturas betuminosas, quanto maior a sua recuperação, maior a resistência às deformações permanentes.

Viscosidade dinâmica a temperaturas elevadas

A viscosidade dinâmica pode servir para avaliar se as propriedades dos diversos ligantes às temperaturas às quais as misturas betuminosas são produzidas e aplicadas são adequadas para o correto envolvimento dos agregados e compactação. A viscosidade dinâmica foi determinada às temperaturas de 130, 150 e 180 °C usando um viscosímetro rotacional *Brookfield* (EN 13302).

Estabilidade ao armazenamento dos betumes modificados

Para evitar a necessidade de gastos elevados em equipamentos de modificação de betumes junto à central, é fundamental que o betume modificado seja satisfatoriamente estável ao armazenamento. O ensaio de estabilidade ao armazenamento foi realizado de acordo com a norma EN 13399, sendo os betumes modificados armazenados a 180 °C durante 72 horas.

Comportamento reológico

As propriedades reológicas de ligantes foram medidas às temperaturas de 30, 45, 60, 70 e 80 °C, através do ensaio de varrimento de frequências entre 0.01 e 100 Hz no reómetro rotacional AGR2, da *TA instruments*. As amostras foram ensaiadas em pratos de 40,0 mm de diâmetro, com um afastamento entre pratos de 1 mm. Aplicado o princípio de sobreposição tempo-temperatura foi possível a construção de curvas mestras.

ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS REALIZADOS PARA CARACTERIZAÇÃO DOS LIGANTES

A Figura 1 apresenta o resumo de todos resultados de caracterização dos ligantes modificados com os diferentes polímeros (virgens e reciclados) e dos ligantes produzidos com óleo e modificados também com polímeros, no que diz respeito às propriedades básicas (ponto de amolecimento e penetração), à resiliência e à viscosidade dinâmica a diferentes temperaturas (130, 150 e 180 °C). Também se apresentam as propriedades do betume base utilizado para preparação de todos os ligantes modificados, bem como as de um ligante modificado com polímero comercial utilizado como referência (por ser um dos mais utilizados em Portugal) para compreender a eficácia dos vários polímeros em estudo.

Ponto de amolecimento e penetração dos ligantes

Todos os polímeros aumentaram o ponto de amolecimento do betume base. Mesmo os ligantes produzidos com 10% de óleo e polímero apresentaram maior ponto de amolecimento que o ligante base. Entre os mais eficazes em termos de aumento do ponto de amolecimento está o elastómero SBS para os ligantes sem óleo. No caso dos ligantes com 10% em óleo, o PEAD apresentou um maior ponto de amolecimento, e com uma diferença acentuada dos restantes ligantes com óleo. Não existiu diferença entre o valor do ponto de amolecimento do ligante modificado com EVA virgem e com EVA reciclado.

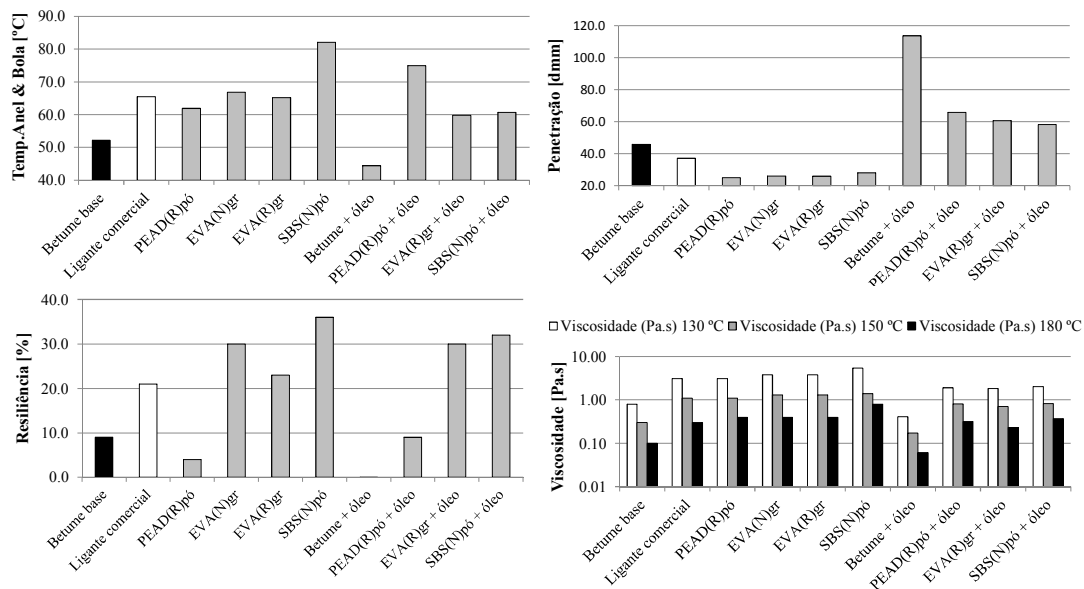


Figura 1: Caraterização dos ligantes em estudo

Relativamente ao efeito dos polímeros no valor da penetração do betume base, pode observar-se que em todos os casos os polímeros conduzem a uma redução do valor da penetração. No entanto, ao contrário do que aconteceu com o ponto de amolecimento, neste caso os ligantes com óleo modificados com polímeros obtiveram valores de penetração superiores aos do betume base, embora bastante inferiores aos do betume mais óleo sem polímeros. Entre os ligantes modificados com polímeros, o polímero mais eficaz na redução do valor da penetração foi o PEAD, enquanto para os ligantes com óleo modificados com polímero, o polímero mais eficaz foi o elastómero SBS. Mais uma vez, os ligantes modificados com EVA virgem ou reciclado também apresentaram resultados semelhantes entre si, o que potencia a utilização de EVA reciclado. Outra análise que deve ser feita diz respeito ao facto do ligante modificado comercial ter uma penetração superior a todos os betumes só com polímero. Esse facto poderá significar que a percentagem de polímero utilizado no ligante modificado comercial deve ser inferior aos 5% utilizados neste estudo, ou que o ligante comercial contém aditivos que aumentem a penetração. Em relação os betumes com óleo modificados com polímero, todos apresentaram uma penetração superior à do ligante comercial e até do betume base, o que indica que o teor em óleo deve ser ajustado caso se pretenda melhorar este aspeto.

Em relação aos resultados do ensaio de resiliência, que estão relacionados com a recuperação elástica percentual dos ligantes após penetração, os polímeros com melhores resultados, tal como esperado devido ao seu comportamento mais elástico, foram o SBS e o EVA, tanto para os ligantes só com betume como para os ligantes com 10% de óleo. À exceção dos ligantes modificados com o PEAD, todos apresentaram resiliência superior à verificada para o ligante modificado comercial, em princípio pela maior quantidade de polímero usado.

Viscosidade dinâmica

A relação entre a viscosidade e a temperatura do ligante é muito importante para a identificação do intervalo de temperaturas para a produção e compactação das misturas betuminosas. A viscosidade normalmente recomendada para a mistura é cerca de 0,3 Pa.s e os ligantes modificados com polímeros virgens são normalmente misturados a uma temperatura entre 170 e 190 °C. Usando os dados apresentados na Figura 1 pode concluir-se que é possível obter a viscosidade adequada para a produção de misturas betuminosas perto dos 180 °C, e em alguns ligantes deveria utilizar-se até uma temperatura superior (betume modificado com SBS).

Estabilidade ao armazenamento

Em relação aos resultados de estabilidade (Figura 2) pode ser visto que os níveis de dissociação foram evidentes em todos os ligantes produzidos, visto que houve diferenças significativas nas propriedades na base e no topo dos tubos de armazenamento.

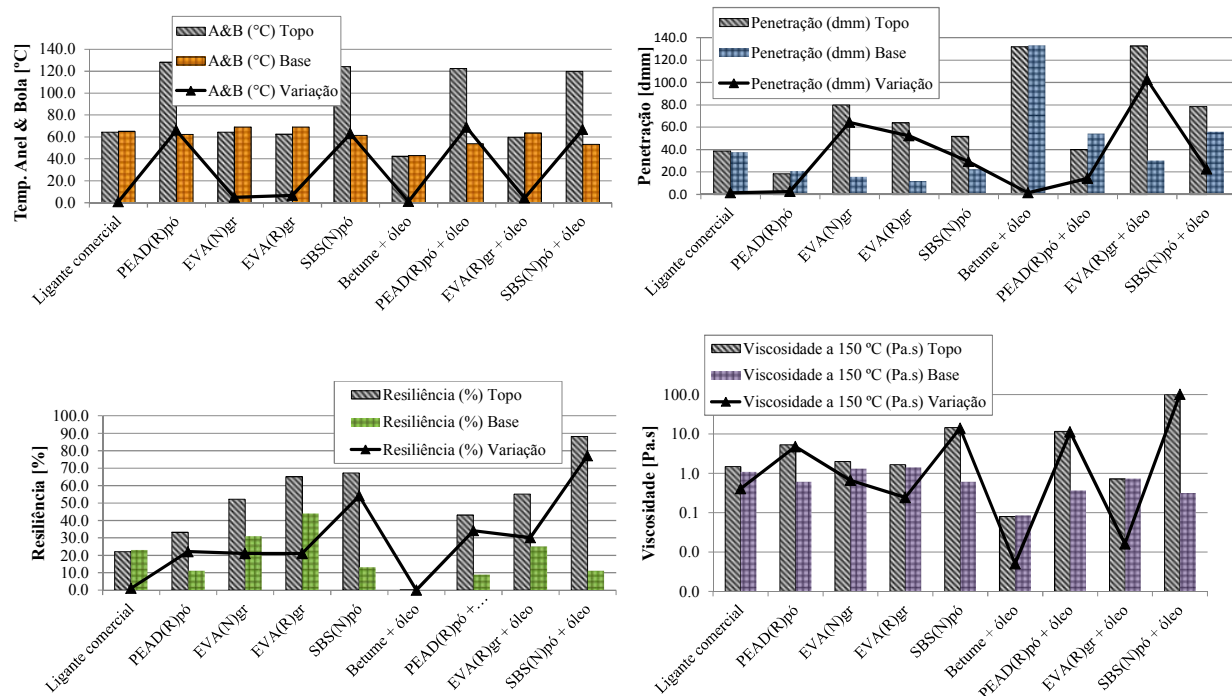


Figura 2: Estabilidade dos ligantes em estudo

Esse facto é ainda mais evidente quando o betume modificado comercial apresentou resultados excelentes, sendo uma referência em relação a esta propriedade que não foi atingida de forma satisfatória por nenhum dos polímeros em estudo. Verificou-se ainda algumas diferenças na forma como os diferentes polímeros manifestaram a sua má estabilidade ao armazenamento. As principais diferenças entre as propriedades da base e do topo dos betumes modificados com polímeros PEAD foram observadas na temperatura de amolecimento e na viscosidade (por serem as propriedades mais influenciadas por estes polímeros). Por outro lado, o polímero EVA apresentou mais diferenças nos resultados de penetração e de resiliência. O polímero SBS, sendo aquele que mais influência tem na modificação de betumes, demonstrou uma má estabilidade ao armazenamento em quase todas as propriedades. Em relação à influência do óleo nesta propriedade, poderá concluir-se que este prejudica a estabilidade ao armazenamento, resultado que poderá justificar-se pelo facto de a sua incorporação aumentar a diferença de viscosidades entre os polímeros e o ligante, facilitando a separação de fase. Presentemente já estão a ser utilizadas condições de produção dos ligantes (tempo, temperatura e velocidade de mistura, menor quantidade de polímero, uso de aditivos) para melhorar a estabilidade ao armazenamento.

Comportamento reológico

Em relação ao comportamento reológico (Figura 3), a adição de polímero mostrou aumentar a rigidez do ligante, o que promove um melhor comportamento a altas temperaturas de serviço. A rigidez de todos os ligantes é visivelmente dependente da frequência. A utilização de óleo como parte do betume, tal como esperado, diminuiu a rigidez dos ligantes. Os ligantes que apresentaram maior rigidez foram o modificado com PEAD e o modificado com SBS. Todos os betumes modificados apresentaram valores de rigidez superiores aos do ligante modificado comercial, indicando que a percentagem de polímero do ligante comercial é inferior à utilizada neste estudo. O comportamento reológico entre os ligantes modificados com EVA virgem e reciclado continuou a apresentar resultados semelhantes.

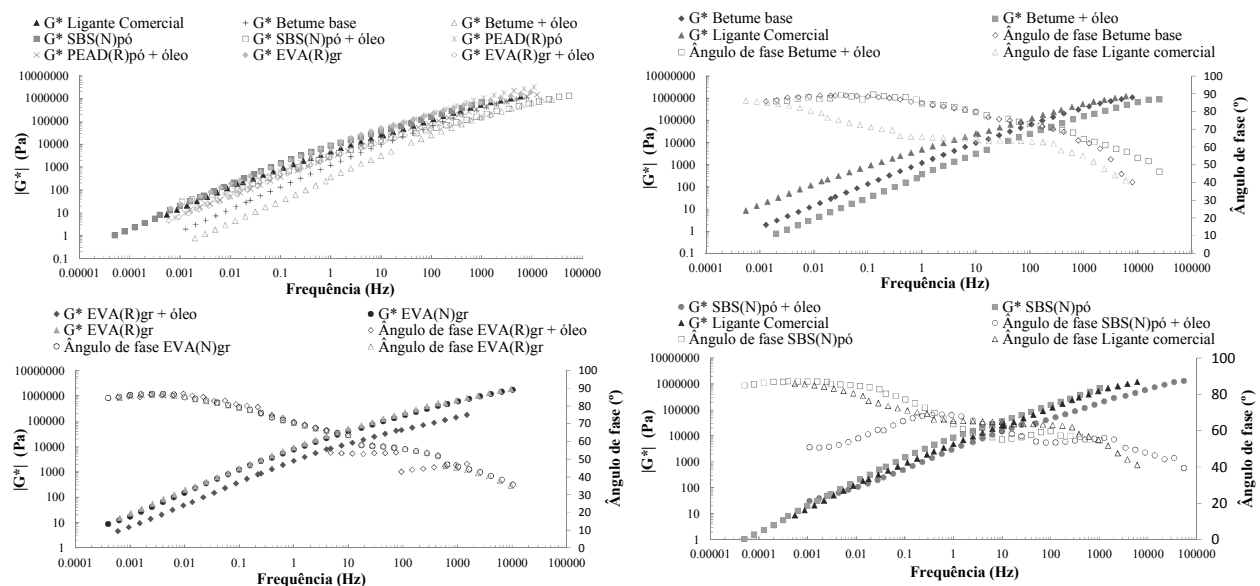


Figura 3: Propriedades reológicas dos ligantes em estudo

Relativamente ao ângulo de fase (δ) é possível avaliar a frequência de transição ($\delta = 45^\circ$) que corresponde frequência para a qual a componente elástica (G') do módulo é aproximadamente igual à componente viscosa (G''). Observando este resultado foi possível concluir que os ligantes produzidos com óleo apresentam um comportamento mais viscoso que os ligantes só com betume. Em termos de ângulo de fase também se verifica que o comportamento do ligante comercial aproxima-se mais do comportamento do betume modificado com SBS. O ângulo de fase do betume base é semelhante ao do betume produzido com óleo a frequências baixas e intermédias, mas nas altas frequências tal já não se verifica, tendo nesta fase o ligante produzido com óleo um comportamento mais viscoso.

CONCLUSÕES

Neste trabalho foram avaliados polímeros virgens e reciclados quanto à sua adequação na modificação de betumes, e em especial para a avaliação do potencial de substituição de 10% de betume por óleo de motor usado na produção desses ligantes modificados.

Em relação aos resultados de desempenho dos betumes modificados com os diferentes polímeros em estudo (5%) e com o óleo (10%) verificou-se que é possível obter propriedades semelhantes, ou até superiores, às do betume modificado comercial. Relativamente ao ponto de amolecimento, estes apresentaram-se muito promissores, pois todos apresentaram melhor desempenho que o ligante base. De acordo com os resultados de penetração, os ligantes apenas com polímeros apresentaram valores inferiores aos do ligante comercial utilizado como referência, mas os ligantes com óleo apresentaram valores superiores aos do ligante comercial de referência (sendo em princípio necessário ajustar a percentagem de óleo ou de polímero). Relativamente aos resultados da resiliência, como expectável o PEAD reciclado apresentou o pior desempenho, tendo os restantes polímeros apresentado maior recuperação que o ligante comercial. Os ligantes só com polímero apresentaram viscosidade adequada para produção de misturas perto dos 180 °C, enquanto os ligantes com óleo podem ser utilizados a uma temperatura inferior. Em termos de estabilidade, todos os ligantes produzidos apresentam separação de fase, ainda mais evidente com a introdução de óleo. Relativamente ao comportamento reológico, os polímeros aumentam a rigidez, ao inverso do que acontece com o óleo. O comportamento do ligante modificado com SBS é o mais próximo do comportamento do ligante comercial, embora o ligante comercial apresente valores de rigidez inferiores.

Como conclusão considera-se que a utilização de polímeros virgens ou reciclados apresenta resultados muito promissores para melhoria do desempenho dos pavimentos. No entanto, deve solucionar-se o problema de estabilidade ao armazenamento para os ligantes com ou sem óleo, nomeadamente através da utilização de aditivos para esse fim. Um outro aspeto que deve ser ajustado é a relação entre a quantidade de polímeros e óleo, ou a sua compatibilidade.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi financiado por Fundos FEDER através do Programa Operacional Fatores de Competitividade – COMPETE e por Fundos Nacionais através da FCT – Fundação para a

Ciência e a Tecnologia no âmbito do projeto PLASTIROADS (PTDC/ECM/119179/2010) e do projeto estratégico UI 4047 – 2011-2012 do Centro do Território Ambiente e Construção.

REFERÊNCIAS

- Ahmadinia, E., Zargar, M., Karim, M.R., Abdelaziz, M., Ahmadinia, E. (2012). Performance evaluation of utilization of waste Polyethylene Terephthalate (PET) in stone mastic asphalt, *Construction and Building Materials*, Vol. 36, pp. 984-989.
- Casey, D., McNally, C., Gibney, A., Gilchrist, M.D. (2008). Development of a recycled polymer modified binder for use in stone mastic asphalt, *Resources Conservation and Recycling*, Vol. 52 (10), pp. 1167-1174.
- Fuentes-Audén, C., Martínez-Boza, F.J., Navarro, F.J., Partal, P., Gallegos, C. (2007). Formulation of new synthetic binders: Thermo-mechanical properties of recycled polymer/oil blends, *Polymer Testing*, Vol. 26 (3), pp. 323-332.
- Fuentes-Audén, C., Sandoval, J.A., Jerez, A., Navarro, F.J., Martínez-Boza, F.J., Partal, P., Gallegos, C. (2008). Evaluation of thermal and mechanical properties of recycled polyethylene modified bitumen, *Polymer Testing*, Vol. 27 (8), pp. 1005-1012.
- García-Morales, M., Partal, P., Navarro, F.J., Gallegos, C. (2006). Effect of waste polymer addition on the rheology of modified bitumen, *Fuel*, Vol. 85 (7-8), pp. 936-943.
- García-Morales, M., Partal, P., Navarro, F.J., Martínez-Boza, F., Gallegos, C., González, N., González, O., Muñoz, M.E. (2004). Viscous properties and microstructure of recycled eva modified bitumen, *Fuel*, Vol. 83 (1), pp. 31-38.
- Hınıslioğlu, S., Açar, E. (2004). Use of waste high density polyethylene as bitumen modifier in asphalt concrete mix, *Materials Letters*, Vol. 58 (3-4), pp. 267-271.
- Isacsson, U., Lu, X. (1999). Characterization of bitumens modified with SEBS, EVA and EBA polymers, *Journal of Materials Science*, Vol. 34, pp. 3737-3745.
- Kalantar, Z.N., Karim, M.R., Mahrez, A. (2012). A review of using waste and virgin polymer in pavement, *Construction and Building Materials*, Vol. 33, pp. 55-62.
- Lesueur, D. (2009). The colloidal structure of bitumen: Consequences on the rheology and on the mechanisms of bitumen modification, *Advances in Colloid and Interface Science*, Vol. 145 (1-2), pp. 42-82.
- Pérez-Lepe, A., Martínez-Boza, F.J., Gallegos, C., González, O., Muñoz, M.E., Santamaría, A. (2003). Influence of the processing conditions on the rheological behaviour of polymer-modified bitumen, *Fuel*, Vol. 82 (11), pp. 1339-1348.
- Williams, C., Metwally, M. (2010). Development of Non-Petroleum Based Binders for Use in Flexible Pavements, Institute for Transportation Iowa State University.
- Yildirim, Y. (2007). Polymer modified asphalt binders, *Construction and Building Materials*, Vol. 21 (1), pp. 66-72.
- Silva, H.M.R.D., Oliveira, J.R.M., Jesus, C.M.G. (2012). Are totally recycled hot mix asphalts a sustainable alternative for road paving? *Resources, Conservation and Recycling*, 60, 38-48.