

DESENVOLVIMENTO DE UM BETUME HÍBRIDO PARA APLICAÇÃO EM MISTURAS DE ELEVADO DESEMPENHO

Maria del Mar Colas¹ e Teresa Carvalho²

¹Cepsa Espanha, Departamento Técnico Asfaltos, Carretera Daganzo km 5,5, 28806 Alcalá de Henares, Madrid, Espanha

²Cepsa Portuguesa, Departamento Técnico Asfaltos, Avenida Columbano Bordalo Pinheiro 108 – 3º, 1070-067 Lisboa, Portugal

email: teresa.carvalho@cepsa.com; <http://www.cepsa.pt>

Sumário

Dentro da gama de betumes de borracha foi desenvolvido, há três anos, um betume híbrido, por forma a responder às especificações de projeto para a reabilitação do pavimento da autoestrada A8. Os requisitos deste projeto exigiam características excecionais para a sua utilização em misturas anti fissuras, com elevada resistência à fadiga. Os betumes híbridos são formulados com uma determinada concentração de pó de borracha proveniente de pneus usados e de polímeros elastoméricos, para que a combinação de ambos permita que o produto final cumpra as especificações eleitas para este produto, nomeadamente a consistência, elasticidade e coesão.

Palavras-chave: Betume borracha; elevado desempenho; inovação; alta viscosidade

1 INTRODUÇÃO

Os ligantes betuminosos têm sido utilizados, com bons resultados, na pavimentação de quase de todo o tipo de vias, tanto convencionais como aeroportuárias. Durante os últimos 20 anos, o aumento do tráfego pesado e condições climáticas extremas levaram à necessidade de formular betumes com propriedades melhoradas. Neste contexto, a indústria recorreu à modificação dos ligantes com aditivos poliméricos, entre os quais cabe destacar os copolímeros em bloco (tanto elastoméricos como termoplásticos) e pó de borracha. Estes aditivos melhoram as propriedades viscoelásticas do ligante e conduzem a uma melhoria substancial da resistência à fadiga, à fissuração a baixas temperaturas e à formação de rodeiras [1].

Os fatores ambientais (temperatura, ar, água) têm um importante efeito na durabilidade dos pavimentos. O ligante deve manter as suas propriedades ao longo da sua vida útil e conservar um comportamento com uma rigidez suficiente a altas temperaturas, para evitar a formação de deformações plásticas permanentes, e com uma elasticidade que permita evitar a acumulação de tensões a baixas temperaturas, que podem conduzir à falha por fadiga [2]. Neste contexto, o envelhecimento do ligante é também um fator chave no seu comportamento.

A incorporação de polímeros no betume melhora a resposta elástica do material a temperaturas médias e altas, reduz o módulo complexo (G^*) e o módulo de rigidez a temperaturas baixas, e reduz a suscetibilidade térmica do ligante, conduzindo a um comportamento mais homogéneo em toda a gama de temperaturas. Por outro lado, a elasticidade intrínseca do polímero melhora a resistência do ligante a fenómenos de cargas cíclicas (fadiga) e a resistência à formação de rodeiras [3]. O grau de melhoria das propriedades depende, de forma geral, da quantidade de polímero incorporado. Consequentemente, foram desenvolvidos ligantes de elevado desempenho, aptos para aplicações com requisitos muito estritos, através da incorporação de elevadas concentrações de polímeros.

Os ligantes betuminosos que incorporam na sua composição pó de borracha de pneus usados são uma realidade presente no mercado de ligantes asfálticos. A utilização de borracha é considerada uma alternativa à utilização de polímeros, ainda que proporcione características técnicas mais limitadas [4]. No entanto, estes ligantes apresentam uma vantagem ambiental importante, uma vez que permitem a reutilização de pó de borracha proveniente de pneus usados [5,6].

Tendo em conta que o efeito modificador do pó de borracha é muito menor que o do polímero [7], dever-se-á considerar o seu custo substancialmente inferior. Não obstante, proporciona certas características positivas ao pavimento, como sejam, uma vida de serviço mais longa, menores custos de manutenção e certa redução do ruído em contacto com o rodado [8]. Adicionalmente, tem demonstrado um bom comportamento tanto em misturas abertas como em membranas para absorção de tensões e tratamentos anti fissuras [9].

A interação entre o pó de borracha e o betume é de tipo físico. A borracha absorve parte da fração aromática do betume, para que as partículas aumentem o seu volume por difusão [10]. Estas partículas aumentam a viscosidade do ligante numa extensão muito superior à que é realizada pelo polímero [11,12]. As viscosidades elevadas são uma vantagem em aplicações que requeiram elevadas dotações de ligante, tendo em conta que impedem o escorrimento.

Neste trabalho foi desenvolvido um ligante híbrido (BMC AV) com uma boa componente ambiental, devido à utilização de pó de borracha proveniente de pneus usados. Para além disso, o ligante final desenvolvido permite o fabrico de misturas de elevado desempenho, com resistência à fissuração por fadiga, e por isso indicado para misturas de elevada duração. O BMC AV combina o pó de borracha (que permite aumentar a viscosidade e alcançar elevadas dosagens de ligante nas misturas) com copolímeros elastoméricos (que proporcionam elevada coesão e um excelente comportamento elástico do ligante).

O desenvolvimento do BMC AV surge da necessidade de reabilitar um pavimento de betão muito envelhecido e altamente fissurado numa via de elevada intensidade de tráfego (autoestrada A8). O elevado grau de fissuração do pavimento faz com que a reparação com soluções baseadas em ligantes convencionais não seja adequada devido à fácil reflexão das fissuras nas novas camadas de mistura betuminosa aplicada, que induziria a falha do pavimento num curto espaço de tempo.

Foi, então, proposta uma solução baseada na execução de três camadas (Fig.1).

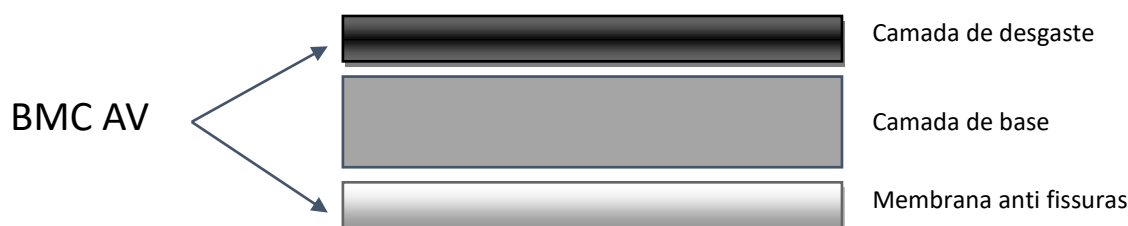


Fig.1. Solução proposta

- 1) Membrana anti fissuras: A sua função é selar e absorver as tensões da camada de betão, evitando a penetração de água e a reflexão e propagação vertical de fissuras. O ligante a utilizar para a membrana deve ser de elevado desempenho, apresentando uma elevada elasticidade e uma elevada viscosidade, que gerar uma camada suficientemente espessa (dotação de 1,8 a 2 l/m²).
- 2) Camada de base: Propõe-se uma camada de 6 cm de espessura com betume modificado com borracha convencional, do tipo BBM 35/50 (incorporação > 8%).
- 3) Camada de desgaste: Espessura de 4 cm. Devido às características de tráfego e às condições do pavimento de betão a reabilitar, a execução desta camada requer um ligante de elevado desempenho, com uma recuperação elástica superior a 80% e uma boa coesão (energia > 2 Jcm⁻²). Por outro lado, com a finalidade de proporcionar uma elevada durabilidade do pavimento reabilitado, o ligante deve apresentar uma elevada viscosidade que permita empregar elevadas dotações do ligante na mistura (>5,5%).

Os betumes convencionais modificados com borracha apresentam viscosidades adequadas para este tipo de aplicações, no entanto não são capazes de satisfazer os requisitos exigentes de recuperação elástica ou de coesão que são necessários a este tipo de aplicação. Por outro lado, a modificação do betume com polímeros conduz a propriedades excelentes, com muito boa resistência à fadiga e com uma boa coesão, ainda que a obtenção de viscosidades adequadas, para permitir elevadas dotações do ligante na mistura, implique a incorporação de

elevada percentagem de polímero, traduzindo-se num impacto no custo do produto. Neste contexto, propôs-se o desenvolvimento do BMC AV, que combina a utilização de pó de borracha com a incorporação de copolímeros elastoméricos, a fim de conseguir alcançar um ligante de elevada viscosidade, elevada coesão e boas propriedades elásticas, que permita a execução de misturas anti fissuras, duráveis e a um preço acessível aliado à reciclagem de pneus usados.

Neste trabalho são apresentadas as características empíricas e reológicas deste novo ligante híbrido, que suportam o seu excelente comportamento às temperaturas de serviço, assim como os resultados obtidos com as misturas utilizadas no projeto real.

2 RESULTADOS

2.1 Propriedades do BMC AV

Tendo em conta os requisitos da aplicação, foram definidos os parâmetros da formulação do novo ligante (denominado BMC AV) que se resumem no Quadro 1. Os parâmetros críticos considerados para o desenvolvimento do ligante foram a viscosidade a 175 °C, a recuperação elástica e a coesão a 5 °C.

Cabe destacar que os betumes de borracha alcançam, no melhor dos casos, valores de recuperação elástica entre 60 e 70%, que são manifestamente insuficientes para a aplicação considerada. Desta forma, a incorporação de borracha não é suficiente para cumprir as especificações. Por outro lado, os betumes modificados com polímeros, por si sós, não permitem alcançar os valores de viscosidade e temperatura de amolecimento requeridos, salvo à custa da incorporação de elevadas percentagens de polímero.

Quadro 1. Propriedades do BMC AV e valores tipo

Característica	Unidade	Norma	Min.	Máx.	Valor tipo
<u>Ligante original</u>					
Penetração (25 °C; 100g; 5 s)	0,1 mm	EN 1426	35	50	45
Temperatura de amolecimento	°C	EN 1427	67	-	72
Estabilidade ao armazenamento		EN 13399			
- Variação da Temp. amolecimento	°C	EN 1427	-	5	4
- Variação Penetração	0,1 mm	EN 1426	-	9	4
Recuperação elástica (25 °C)	%	EN 13398	80	-	86
Coesão (Força/ductilidade), 5 °C	J/cm ²	EN 13589	2	-	4,9
Viscosidade (175 °C)	mPa.s	EN 13302	450	600	500
<u>Ligante envelhecido (RTFOT)</u>					
Variação em massa	%	EN 12607-1	-	1,0	0,3
Penetração retida	% p.o.	EN 1426	60	-	78
Aumento da T _{AB}	°C	EN 1427	-	8	5
Diminuição T _{AB}	°C	EN 1427	-	5	-

A penetração definida para o BMC AV é equivalente à dos betumes modificados e melhorados com borracha do tipo BBB 35/50 e BBM 35/50, ainda que os valores de temperatura de amolecimento sejam inferiores (>67 °C face a >58 °C e > 65 °C respetivamente), e a recuperação elástica muito maior (>80% face a 10-15% a 25 °C, que apresentam tipicamente os betumes melhorados e modificados com borracha).

Na Figura 2 são mostrados os resultados dos ensaios de controlo de qualidade considerados como críticos para este ligante por aplicação, que permitem observar o cumprimento das especificações definidas no Quadro 1.

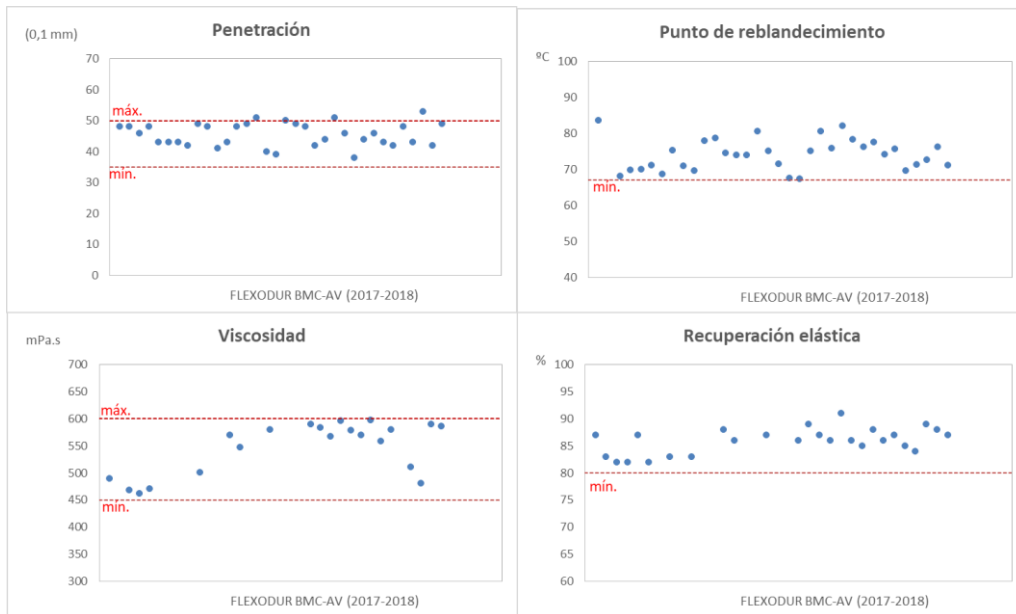


Fig.2. Ensaio de controlo de qualidade

Na Figura 3 é mostrada a curva de viscosidade do BMC AV em função da temperatura, assim como a gama de temperaturas adequadas para a mistura e a compactação. Para a aplicação que é objeto deste estudo, são requeridos valores elevados de viscosidade, semelhantes aos de um betume modificado com borracha (450-600 mPa.s a 175 °C) para garantir um bom comportamento em misturas com elevado conteúdo de ligante. Pode-se observar que através da combinação de polímero e borracha é possível alcançar um valor médio de 500 mPa.s a 175 °C.

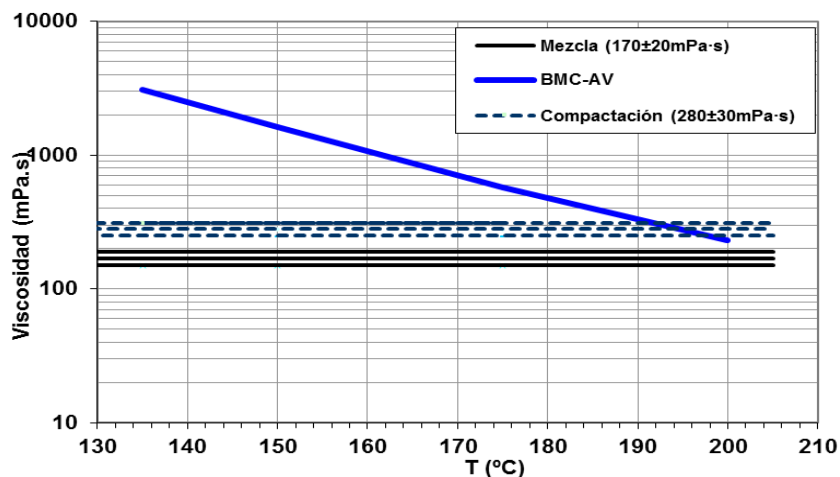


Fig.3. Curva viscosidade do BMC AV

No que se refere à Energia de coesão, o valor objetivo foi alcançado introduzindo polímero no ligante em causa. Na Figura 4 são mostrados gráficos correspondentes ao ensaio de Força-ductilidade de provetes de BMC AV, nos quais se pode observar o comportamento típico de um ligante modificado, em que a energia é superior a 2 J/cm².

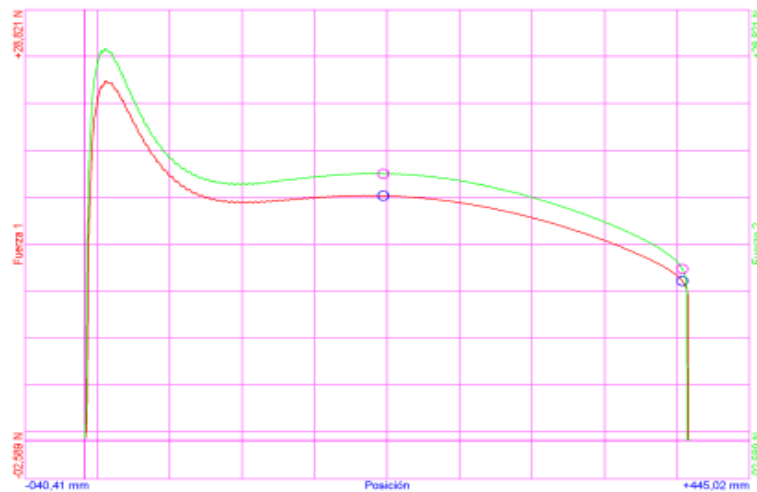


Fig.4. Resultado ensaio de Força-ductilidade do BMC AV

2.2 Reologia do BMC AV

O comportamento viscoelástico do ligante desenvolvido foi caracterizado através de um reómetro de corte dinâmico (DSR) de deformação controlada, segundo a Norma EN 14770. Este método de ensaio permite determinar o módulo complexo (G^*), que indica a relação entre o esforço aplicado e a deformação experimentada pelo material, assim como o ângulo de fase (δ) que permite diferenciar a parte da deformação que é do tipo elástico da que é permanente. O ensaio consiste em colocar uma pequena quantidade de amostra entre os pratos paralelos e submetê-la a um movimento oscilatório a diferentes frequências e temperaturas. São realizados dois varrimentos de temperaturas: um para caracterizar o comportamento do ligante a temperaturas de serviço intermédias (40 °C a 10 °C) e outro para temperaturas de serviço elevadas (40 °C a 80 °C). Estes ensaios são realizados sobre o ligante original e o envelhecido através do ensaio RTFOT (Rolling Thin Film Oven Test) e PAV (Pressure Age Vessel) com a finalidade de obter informação sobre o envelhecimento que o ligante sofre durante o processo de mistura com os agregados e durante a sua vida de serviço.

Na Figura 5 são mostradas as isócronas à frequência de 1,59 Hz para o BMC AV original, após o RTFOT e após o PAV. Esta frequência simula as condições reais da passagem de veículos pesados a uma velocidade de 90 km/h.

O comportamento observado é o característico dos ligantes betuminosos. O módulo complexo apresenta valores elevados a temperaturas moderadas e diminui de forma contínua à medida que aumenta a temperatura. Este comportamento indica que o ligante a temperaturas moderadas é resistente à deformação e à medida que aumenta a temperatura vai perdendo o seu comportamento de sólido comportando-se de uma forma mais viscosa. As curvas obtidas para o ligante original e para o envelhecido por RTFOT são muito semelhantes, indicando que o envelhecimento que o ligante sofre durante o processo de mistura é mínimo. Por outro lado, o envelhecimento a longo prazo (simulado através do envelhecimento combinado RTFOT e PAV) conduz a uma rigidização do material que se manifesta como valores de G^* mais elevados. Em relação à elasticidade do BMC AV, observa-se o comportamento característico dos betumes modificados com polímeros: uma região plana onde o comportamento dominante é o do polímero (que atua como um sólido elástico) e que se traduz numa melhor resistência à fadiga. O envelhecimento do ligante traduz-se num aumento do módulo e numa diminuição do ângulo de fase. Este comportamento reflete uma capacidade de deformação plástica do material menor, associada à sua rigidização.

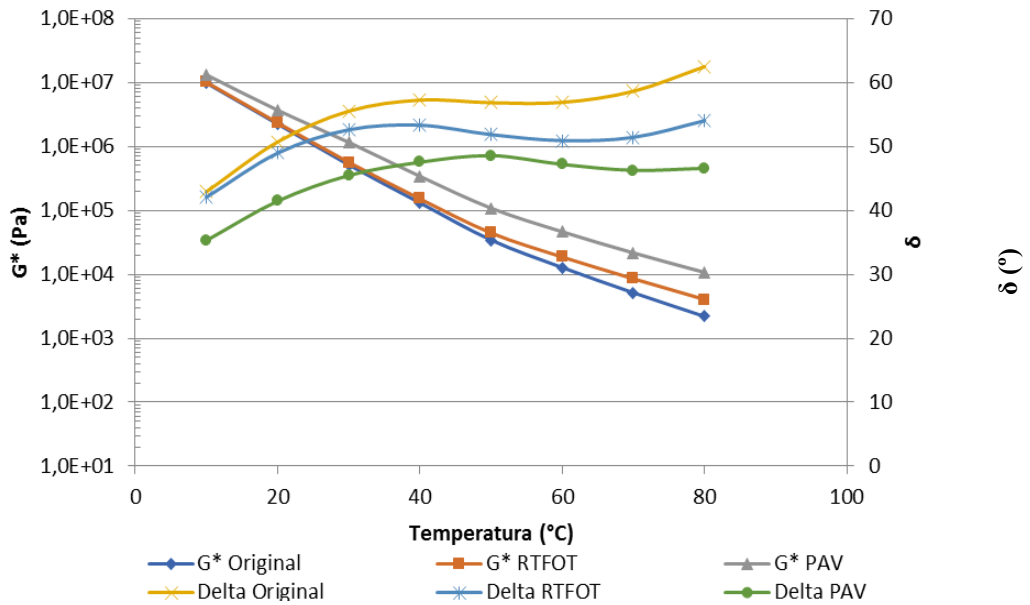


Fig.5. Curvas de DSR do BMC AV original, envelhecido por RTFOT e RTFOT+PAV

O comportamento do BMC AV reflete as vantagens do que a borracha introduz nos ligantes modificados com polímeros. O diagrama de Black representa as características viscoelásticas do material independentemente dos efeitos da temperatura e da frequência. Na Figura 6 são mostrados os diagramas da Black (G^* vs δ) do BMC AV, de um betume modificado com polímeros (PMB 45/80-65) e um modificado com borracha (PMB 45/80-60c).

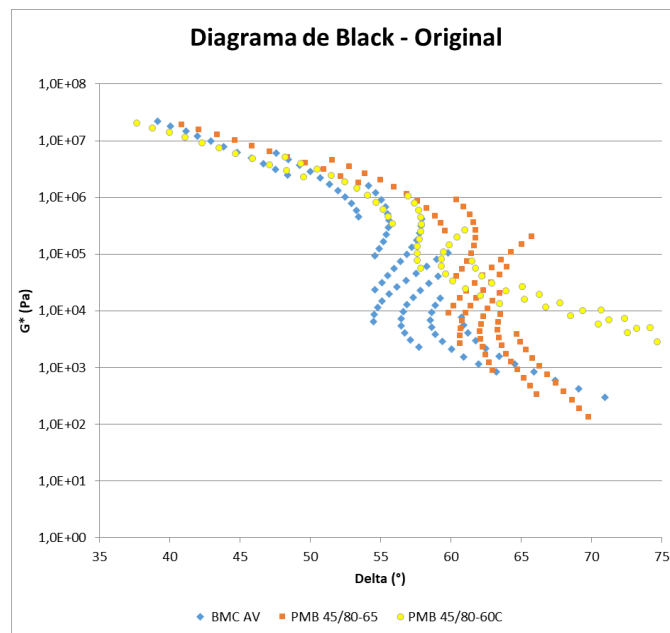


Fig.6. Diagrama de Black do BMC AV, PMB 45/80-65 e PMB 45/80-60c

Nos três ligantes analisados observa-se o comportamento sigmoidal característico dos betumes modificados, se bem que no caso do BMC AV este comportamento é mais agudo que no PMB 45/80-60c. Salienta-se que para

um mesmo valor de G^* , o ângulo de fase do BMC AV é menor que o do betume modificado com borracha correspondente e com o modificado com polímeros, indicando que o seu comportamento elástico é melhor.

Na isócrona a 1,59 z (Figura 7) observa-se que as propriedades viscoelásticas globais do BMC AV são melhores que as dos ligantes que incorporam unicamente borracha (PMB 45/80-60c) ou exclusivamente polímero (PMB 45/80-65). O BMC AV combina uma maior elasticidade (ângulo de fase menor em todo o intervalo de temperaturas) e valores de módulo mais elevados.

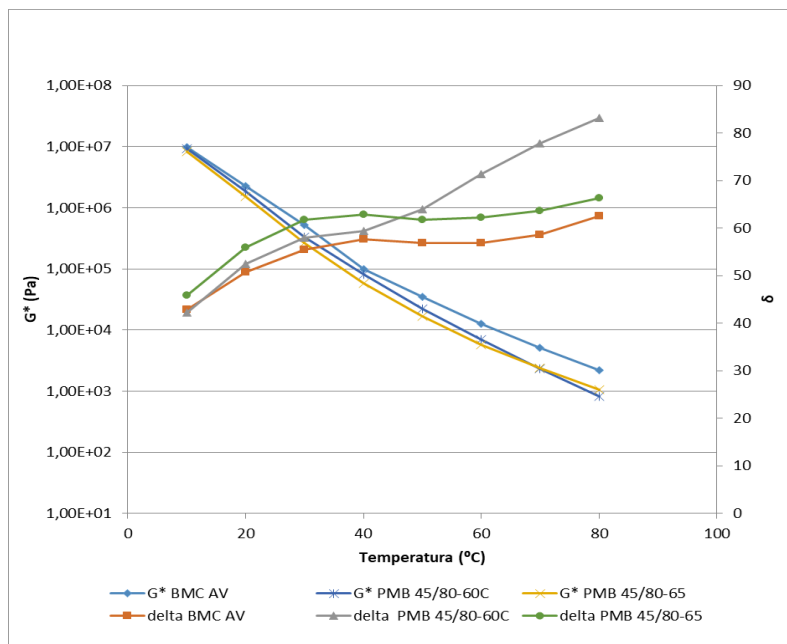


Fig.7. Isócronas a 1,59 Hz do BMC AV, PMB 45/80-65 e PMB 45/80-60c

2.3 Classificação segundo os critérios SHRP

Com o intuito de classificar os ligantes e permitir uma seleção adequada para cada aplicação concreta, considerando as condições climáticas do lugar, o programa SHRP critérios americano desenvolveu especificações para betumes SUPERPAVE. Estas especificações relacionam as propriedades físicas dos asfaltos com princípios de engenharia de forma a permitir relacionar as características reológicas do ligante com o seu desempenho em serviço. Desta forma, são estabelecidos critérios que permitem avaliar a resistência às falhas que predominam nas distintas gamas de temperatura de serviço:

- Deformações plásticas: o critério para avaliar a resistência às deformações plásticas (rodeiras) consiste em determinar a temperatura a que $G^*/\text{sen}\delta$ a 1,59 Hz supera 1 kPa no ligante original e 2,2 kPa no envelhecido através de RTFOT.
- Fadiga: A resistência à fadiga é avaliada no resíduo envelhecido através de PAV. O fator de fadiga é definido como $G^*\text{sen}\delta$ e deve ser o menor possível. Para um comportamento à fadiga bom o módulo deve apresentar um valor elevado, que reflita uma elevada capacidade para dissipar energia, enquanto o ângulo de fase deve ser baixo (indicando uma capacidade elástica elevada no comportamento do ligante). O critério SHRP consiste na determinação da temperatura a que $G^*\text{sen}\delta$ é inferior a 5000 kPa.
- Fissuração térmica: a resistência à fissuração térmica depende da rigidez do material a temperaturas baixas. Este parâmetro é determinado também sobre o resíduo PAV através da técnica de BBR (Bending Beam Rheometry). O SHRP estabelece como critério a determinação da temperatura à qual o módulo de rigidez é inferior a 300 MPa e a pente inferior a 0,3.

Os resultados obtidos com o BMC AV para os três parâmetros SHRP encontram-se resumidos no Quadro 2.

Quadro 2. Critérios SHRP para o BMC AV

Técnica	Critério	Valor
---------	----------	-------

Resistência a deformações plásticas	DSR ligante original	T @ G*/sen $\delta > 1$ kPa	83.4°C
	DSR ligante RTFOT	T @ G*/sen $\delta > 2.2$ kPa	82.7°C
Resistência à fadiga	DSR ligante PAV	T @ G*sen $\delta < 5000$ kPa (°C)	12°C
Resistência à fissuração térmica	BBR ligante PAV	T @ S<300 Mpa y m>0.3	-18°C

Estes resultados indicam que o BMC AV conserva as suas propriedades originais numa ampla gama de temperaturas. Cumpre os requisitos de resistência a deformações plásticas, até uma temperatura de 83 °C e adicionalmente sofre um baixo grau de envelhecimento durante o processo de mistura. O ligante formulado apresenta uma boa resistência à fadiga e é resistente à fissuração térmica até uma temperatura de 12 °C.

2.4 Comportamento das misturas

Estudou-se o comportamento do BMC AV nas misturas de um projeto real executado entre 2015 e 2016 numa via de elevado tráfego (autoestrada A8), que poderá ser visualizada na Figura 8. Para a reabilitação do pavimento em betão existente (muito envelhecido e altamente fissurado) foi proposta uma solução composta por três camadas:

1ª) Membrana anti fissuras: a sua função é selar e absorver as tensões da camada de betão, evitando a penetração de água e a reflexão e propagação vertical de fissuras. Deve atingir uma dotação de 1,8 – 2,0 l/m², pelo qual é necessário aplicar um ligante de elevada viscosidade. Este requisito combinado com a necessidade de excelentes propriedades elásticas, determinam que o ligante a utilizar seja o BMC AV.

2ª) Camada de base: uma camada de 6 cm de espessura, com um betume modificado com borracha do tipo BBM 35/50 (borracha <8%).

3ª) Camada de desgaste: uma camada de 4 cm de espessura. É requerida uma elevada rugosidade. Esta camada foi executada com o BMC AV numa mistura com 5,3% de ligante.

A mistura foi preparada numa central descontínua equipada com tanques com aquecimento, agitadores verticais e recirculação. A temperatura de armazenamento foi de 170 °C e o tempo médio de armazenamento foram 72 horas. O espalhamento foi efetuado com equipamento convencional, se bem que a compactação foi necessária realizar a temperaturas ligeiramente superiores às habituais (165 – 170 °C) devido à elevada viscosidade do ligante.



Fig.8. Obra de reabilitação A8

a) Troço realizado com o BMC AV; b) Detalhe da camada de desgaste executada com o BMC AV

Observa-se que a camada de desgaste apresenta uma rugosidade adequada. No Quadro 3 e na Figura 9 são mostradas a composição e curva granulométrica dos agregados utilizados respetivamente.

Quadro 3. Composição da mistura

Material	Quantidade (%)
Brita Basalto RM N°1 (8/12.5 mm)	32.1
Brita Basalto RM N°0.5 (4/6.3 mm)	30.2
Pó calcário FA (0/4 mm)	8.5
Pó basalto RM (0/4 mm)	17.0
Cal hidráulica	7.0
Betume BMC AV	5.3

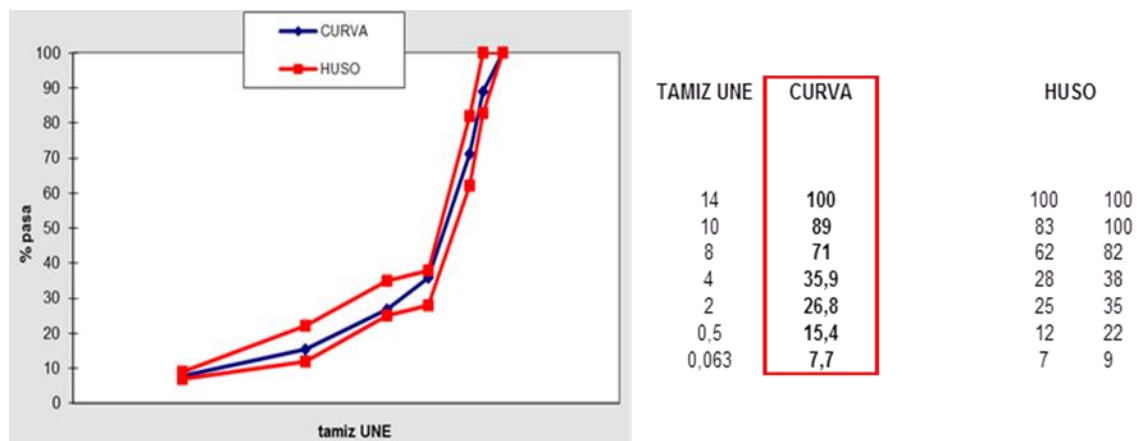


Fig.9. Curva granulométrica e composição dos agregados utilizados

Quadro 4. Propriedades da mistura com o BMC AV

Propiedades	Unidade	Norma	Resultado
% Ligante	%	-	5,3
Densidade	Mg/m3	EN 12697-6	2.504
Resistência Marshall	kN	EN 12697-34	14,2
Índice de resistência conservada (IRC)	%	-	94,7
Vazios da mistura	%	EN 12697-8	4,7
Vazios agregados	%	EN 12697-8	17,6

A mistura utilizada apresenta uma elevada rugosidade devido a uma granulometria descontínua. Esta rugosidade confere uma grande aderência entre o veículo e o pavimento, sobretudo em condições de pavimento molhado. Também devido ao seu elevado conteúdo em ligantes e baixo conteúdo em areia, a mistura apresenta uma grande flexibilidade e resistência à fadiga, pelo que é muito resistente à reflexão de fissuras, apresentando uma grande durabilidade, tal como indica o ensaio de sensibilidade à água (IRC). A durabilidade é notavelmente melhorada pela elevada espessura da película de ligante que cobre os agregados. A elevada espessura da película é possível graças à elevada viscosidade que BMC AV apresenta.

3 CONCLUSÕES

Neste trabalho foi desenvolvido um ligante híbrido (BMC AV) que combina a incorporação de pó de borracha proveniente de pneus usados e polímeros elastoméricos. A sinergia entre ambos os componentes conduz a um ligante com propriedades melhores que as conseguidas habitualmente em betumes modificados com borracha.

De acordo com os dados reológicas, é de esperar que este betume híbrido apresente um excelente comportamento no pavimento devido às suas propriedades elásticas, que são muito semelhantes às das dos betumes modificados com polímeros e que adicionalmente apresente um bom comportamento anti fissuras devido ao seu alto módulo. A sua viscosidade elevada permite utilizar conteúdos de ligante maiores, o que levará a uma maior durabilidade da misturas.

As principais vantagens do BMC AV são então: maior elasticidade, alto módulo e baixa suscetibilidade térmica, o que torna a sua utilização especialmente recomendada para aplicação em misturas resistentes à fadiga e com elevada durabilidade.

Este ligante pode, assim, ser considerado como uma alternativa a utilizar no fabrico de misturas de elevado desempenho para a construção ou reabilitação de pavimentos de estradas. As características do BMC AV permitem a sua utilização em camadas delgadas e ultra delgadas, assim como em misturas formuladas para resistir a elevadas solicitações.

4 REFERÊNCIAS

1. Zhang, J. Yu, S. Wu, “Effect of ageing on rheological properties of storage stable SBS/sulfur-modified asphalts”. *J. Hazard. Mater.* 182 (1–3) (2010) 507–517.
2. Moghadas, F., Pedrm, N., Aghajani, A.M., Firoozifar, H, “Investigating the properties of crumb rubber modified bitumen using classic and SHRP testing methods”, *Construction and Building Materials Volume 26, Issue 1, January 2012, Pages 481-489*
3. Alatas, T., Yilmaz, M., Kuloglu, N., Cakiroglu, M., Geckil, T. “Investigation of shear complex modulus and phase angle values of short- and long-term aged polymer modified bitumens at different frequencies”, *KSCE J. Civil Eng.* 18 (7) (2014) 2093–2099
4. Wang, H., Zhang, C., Li, L., You, Z., Diab, A. “Characterization of low temperature crack resistance of crumb rubber modified asphalt mixtures using semi-circular bending tests” *J. Test. Eval.*, 44 (2) (2016), 847–855
5. Perez, V., Perez, I., Garcia, A., Sierra, M., Colás, M.M, “Betún mejorado con caucho de NFU para mezclas de alto módulo” *Rutas: Revista de la Asociación Técnica de Carreteras* 160 (2014) 26-31.
6. Gogoi, R., Biligiri, K.P., Das, N.P., “Performance prediction analyses of styrene-butadiene rubber and crumb rubber materials in asphalt road applications” *Mater. Struct.*, 49 (9) (2016), 3479–3493
7. Kök, B.V., Çolak, H., “Laboratory comparison of the crumb-rubber and SBS modified bitumen and hot mix asphalt”, *Constr. Build. Mater.* 25 (8) (2011) 3204–3212.
8. Baker, R.F., Connolly, E. “Mix designs and air quality emissions tests of crumb rubber modified asphalt concrete”. *Transp. Res. Rec.*, 1515 (1995), 18–27
9. Shen, J., Amirkhanian, S., Lee, S.J., “Effects of rejuvenating agents on recycled aged rubber modified binders” *Int. J. Pavement Eng.*, 6 (4) (2005), pp. 273–279
10. Putman, B.J., Amirkhanian, S.N., “The interaction and particle effects of rubber” *Road Mater Pavement Des* (2006)
11. Navarro, F.J., Patal, P., Martínez-Boza, P., Valencia, C., Gallegos, C. “Rheological characteristics of ground tire rubber-modified bitumens”, *Chemical Engineering Journal*, Volume 89, Issue 1, (2002) 53-61