

PROCEEDINGS CLME'2008/IICEM

**5º Congresso Luso-Moçambicano de Engenharia
2º Congresso de Engenharia de Moçambique**

**FEUP - FEUEM - OEP - OEM
Maputo, 2-4 Setembro 2008**

Editores

**J.F. Silva Gomes, Carlos C. António
Clito F. Afonso e António S. Matos**

**Edições INEGI
2008
(ISBN: 978-972-8826-20-8)**

ENTER

Artigo REF: 26A022

O COMPORTAMENTO DE MISTURAS BETUMINOSAS COM BETUME MODIFICADO COM BORRACHA

Jorge Pais*¹, Paulo Pereira¹, Dinis Gardete² e Manuel Minhoto³

¹Universidade do Minho, Depart. Eng.^a Civil – Guimarães, Portugal

²Instituto Politécnico de Castelo Branco, Depart. Eng.^a Civil – Castelo Branco, Portugal

³Instituto Politécnico de Bragança, Depart. Eng.^a Civil – Bragança, Portugal

*Email: jpais@civil.uminho.pt

RESUMO

Numa tentativa de melhorar o desempenho dos pavimentos têm sido desenvolvidas as mais diversas soluções, quer visando o desenvolvimento de novas tecnologias rodoviárias quer a procura de produtos betuminosos de superior qualidade, tendo surgido a modificação do betume através da adição de borracha de pneus, normalmente designado por Betume Modificado com Borracha (BMB). O BMB apresenta como principais vantagens a redução da susceptibilidade térmica do betume, melhora a visco-elasticidade e a ductilidade do ligante e melhora as propriedades das misturas betuminosas, principalmente a resistência à fadiga, à deformação permanente e às reflexões de fendas. Este trabalho apresenta um estudo de avaliação do desempenho destas misturas betuminosas com diferentes condições de formulação, nomeadamente em termos de granulometria do agregado. A avaliação do desempenho foi realizada em laboratório recorrendo a ensaios de fadiga por flexão alternada em quatro pontos. Neste trabalho é ainda comparado o desempenho das misturas com BMB em relação às misturas com betume com betume modificado com polímero SBS.

INTRODUÇÃO

A necessidade de otimizar o desempenho das misturas betuminosas perante os principais fenómenos a que estas estão sujeitas quando aplicadas nos pavimentos, devido principalmente ao aumento do tráfego em volume e agressividade, tem conduzido à utilização de betumes modificados com materiais poliméricos, naturais ou sintéticos, tais como o SBS e o EVA, permitindo alargar o campo de aplicação das misturas betuminosas e melhorar as suas propriedades, particularmente em termos de susceptibilidade térmica, de resistência à fadiga, às deformações permanentes e ao envelhecimento.

Numa tentativa de melhorar o desempenho dos pavimentos e o cumprimento de especificações cada vez mais exigentes para as misturas betuminosas, têm sido desenvolvidas as mais diversas soluções, quer visando o desenvolvimento de novas tecnologias rodoviárias, quer a procura de produtos betuminosos de superior qualidade, tendo surgido a modificação do betume através da adição de borracha de pneus, normalmente designado por BMB.

O BMB apresenta como principais vantagens a redução da susceptibilidade térmica do betume, melhora a visco-elasticidade e a ductilidade do ligante e melhora as propriedades das misturas betuminosas, principalmente na resistência à fadiga, à deformação permanente e às reflexões de fendas.

O desempenho de pavimentos com misturas betuminosas com BMB, quando aplicadas na reabilitação de pavimentos, tem permitido a redução da espessura das camadas de reforço em aproximadamente 50% garantindo uma competitividade económica comparativamente às misturas convencionais cujo preço unitário é menor (Neto et al, 2006).

Tendo presente as potencialidades das misturas betuminosas com BMB, este trabalho apresenta um estudo de avaliação do desempenho destas misturas betuminosas com diferentes condições de formulação, em termos de curva granulométrica dos agregados. A avaliação do desempenho das misturas estudadas neste trabalho foi realizado em laboratório através da resistência a fadiga e recorrendo a um modelo empírico-mecanicista de previsão da resistência das misturas betuminosas à reflexão de fendas.

BETUME MODIFICADO COM BORRACHA

O betume modificado com borracha é obtido pela adição de determinada quantidade de granulado de borracha ao betume tradicional, mistura esta produzida em tanques de reacção especiais, junto das centrais betuminosas, produzindo uma adequada e controlada “reacção digestão” da borracha no betume asfáltico, caracterizada por determinadas condições operacionais (Fontes et al, 2007).

A reciclagem de pneus ocorre em centrais que promovem o corte e trituração dos pneus usados com vista à sua redução a granulado de dimensões muito pequenas, de acordo com uma de duas possíveis tecnologias básicas de reciclagem: a tecnologia ambiental e a tecnologia criogénica. A tecnologia ambiental consiste na dilaceração de pneus à temperatura ambiente enquanto que a tecnologia criogénica de reciclagem consiste na trituração de pneus usados, previamente congelados criogenicamente por imersão da borracha em nitrogénio líquido, até se atingir a granulometria desejada.

Na tecnologia ambiental resulta um granulado de partículas com superfícies mais rugosas, enquanto que do processo criogénico resultam partículas com superfícies relativamente lisas, ou polidas. Esta propriedade das partículas de borracha tem influência na reacção entre a borracha e o betume, constatando-se que a reacção resulta melhor com partículas mais regulares devido à quantidade de betume absorvida pela superfície da borracha (Baker et al, 2003).

A “reacção de digestão” consiste numa interacção entre o solvente orgânico betume asfáltico e o granulado de borracha, tratando-se de um processo físico de difusão com a consequente dilatação polimérica, ou seja, de um processo de absorção de fracções aromáticas do betume por parte das cadeias poliméricas do granulado de borracha até que a concentração destas fracções seja uniforme e que seja conseguido o equilíbrio na dilatação das partículas. Este processo é muito influenciado pelo tempo de reacção, temperatura de reacção e grau de agitação betume-borracha (Amirkhanian e Shen, 2005).

Esta reacção causa, por um lado, o amolecimento e a dilatação das partículas de borracha, passando grande parte do ligante a ser constituído por borracha amolecida e dilatada, e por outro lado, o endurecimento do betume puro por perda de óleos aromáticos, provocando uma redução da distância inter-partículas de borracha e traduzindo-se num aumento da viscosidade do BMB. Neste processo dá-se também a dissolução de borracha no betume através da acção dos ácidos carboxílicos presentes no betume que impede que os maltenos desapareçam do betume por acção da temperatura, radiação solar, acção do tráfego e da oxidação, reduzindo a fragilização do betume com o tempo. Assim, aumenta-se significativamente a resistência ao envelhecimento das misturas betuminosas com BMB, relativamente às misturas convencionais (Way, 2006).

Em geral o BMB é composto, em peso, por aproximadamente 20% de borracha reciclada de pneus, 78% a 80% de betume e 0% a 2% de óleos aromáticos. A produção do BMB é realizada a temperaturas da ordem dos 180 °C para um tempo de digestão entre 30 a 120 minutos.

MISTURAS BETUMINOSAS COM BMB

A produção de misturas betuminosas com BMB é produzida da forma convencional. Neste processo podem ser adicionados solventes no sentido de conferir trabalhabilidade à mistura. Normalmente a percentagem de ligante (BMB) nestas misturas varia de acordo com o tipo de mistura que se pretenda adoptar, variando normalmente entre 6.5% e 10% (em peso de mistura).

O melhor desempenho de misturas com BMB consegue-se com granulado de borracha obtido pelo processo criogénico. De um modo geral, as misturas densas são mais susceptíveis às mudanças de teor de ligante e de dimensões das partículas de borracha do que as misturas abertas. Comparativamente às misturas betuminosas convencionais, a presença da borracha no ligante melhora a susceptibilidade térmica da mistura de modo a que, a altas temperaturas se comporte com mais viscosidade e a baixas temperaturas se apresente mais flexível (Pereira et al, 2007).

As misturas com BMB apresentam capacidade estrutural superior à das misturas convencionais, ao fim do mesmo período de vida, crendo-se que esta reserva estrutural se deve sobretudo à capacidade de retardar a reflexão de fendas e à boa resistência ao fendilhamento por fadiga, atribuída às misturas com BMB.

Verifica-se que o módulo resiliente das misturas BMB apresentam valores um pouco mais baixos do que os valores normalmente obtidos nas misturas convencionais, indicando uma grande flexibilidade. Constata-se também que as misturas com BMB apresentam menos sensibilidade ao envelhecimento do que as misturas convencionais, verificando-se que o envelhecimento das misturas com BMB se processa a uma taxa mais baixa.

O uso de BMB nas misturas betuminosas, como qualquer material usado na construção, acarreta vantagens e limitações. Por um lado o BMB apresenta vantagens competitivas relativamente aos betumes convencionais, sob o ponto de vista do desempenho, nomeadamente no aumento da vida em serviço dos pavimentos; diminuição do ruído de circulação do tráfego; custos de manutenção reduzidos. Além disto apresenta vantagens ecológicas pela utilização de pneus em fim de vida, os quais têm habitualmente como destino final a incineração, permite reabilitar pavimentos com espessuras reduzidas reflectindo-se na redução do uso de novos materiais.

No entanto constata-se que o armazenamento em “condições estáticas” (4 dias a 130°C) afecta negativamente as propriedades do BMB, podendo produzir-se, nestas condições, uma segregação entre o betume puro e o granulado de borracha. Nestas condições verifica-se um mau desempenho do BMB em termos de deformações permanentes.

Outro aspecto negativo relativo à aplicação de misturas com BMB está associado aos períodos de tempo de espera para a abertura de passagem de veículos após colocação. Não cumpridos estes tempos, as misturas descontínuas com BMB apresentam a tendência para formação de rastos, necessitando de maiores períodos de arrefecimento comparativamente às misturas tradicionais. O espalhamento e compactação das misturas com BMB devem revestir-se de algum cuidado devido à sensibilidade à temperatura que estas misturas apresentam. Abaixo de determinada temperatura, função do tipo de betume utilizado e da quantidade de

borracha, a mistura torna-se de difícil compactação originando porosidades elevadas que no caso das misturas abertas favorecem a sua desagregação superficial (Minhoto et al, 2005).

FORMULAÇÃO DAS MISTURAS BETUMINOSAS

A formulação das misturas betuminosas com BMB contempla a definição da curva granulométrica dos agregados, a formulação do BMB (definição da percentagem de borracha e temperatura de digestão) e a definição da percentagem de BMB na mistura betuminosa.

A formulação das misturas betuminosas com BMB apresenta algumas diferenças comparativamente às misturas convencionais, principalmente devido ao tipo de ligante utilizado. O BMB por ser um betume mais viscoso que os betumes convencionais e por ser aplicado em maiores percentagens que os betumes convencionais obriga a que a curva granulométrica dos agregados apresente uma descontinuidade por volta dos 2 mm.

Para as misturas betuminosas com BMB utilizam-se principalmente dois tipos de granulometria para os agregados, correspondendo estas a misturas descontínuas e a misturas abertas como se indica no Quadro 1 e representa na Figura 1.

Quadro 1 – Fusos granulométricos dos agregados para misturas betuminosas com BMB

Peneiro	Mistura descontínua		Mistura aberta	
	Limite inferior	Limite superior	Limite inferior	Limite superior
19.0 mm (3/4 in.)	100	100	100	100
12.5 mm (1/2 in.)	85	100	100	100
9.5 mm (3/8 in.)	70	85	90	100
4.75 mm (No. 4)	28	40	35	50
2.00 mm (No. 10)	12	20	6	10
0.425 mm (No. 40)	6	12	3	7
0.075 mm (No. 200)	2	5	2	3

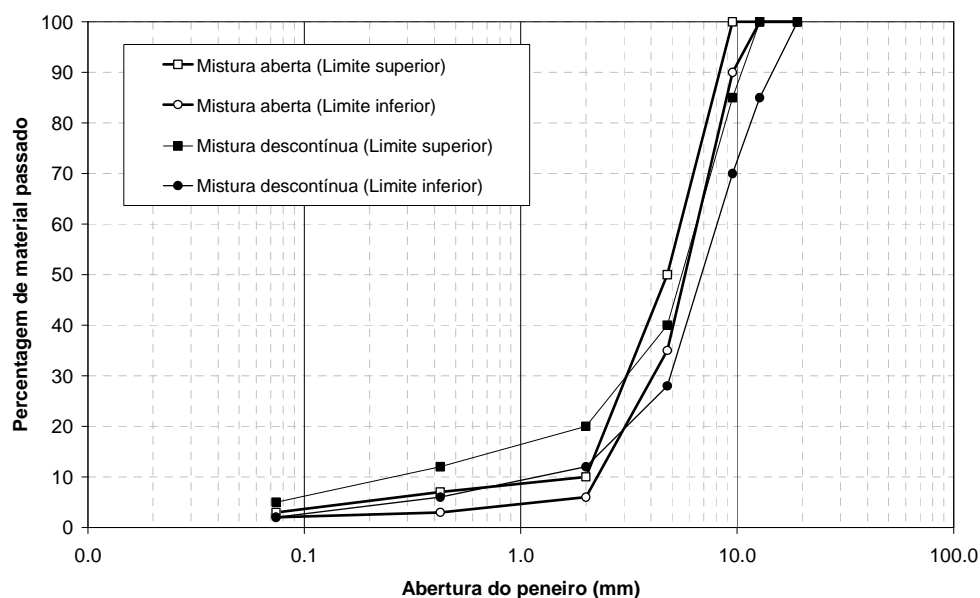


Figura 1 – Fusos granulométricos dos agregados para misturas com BMB

Os fusos granulométricos apresentam-se quase coincidentes verificando-se apenas pequenas diferenças tanto nos agregados grossos como nos finos. Até ao peneiro de 2 mm (parte mais fina dos agregados das misturas betuminosas) as misturas abertas apresentam menor quantidade de material de modo a garantir a porosidade pretendida. Na parte mais grossa das misturas betuminosas, a mistura aberta apresenta menor quantidade de material comparativamente à mistura descontínua.

Apesar das diferenças evidenciadas, os fusos granulométricos para ambas as misturas apresentam-se extremamente estreitos requerendo um elevado controlo de qualidade dos agregados de modo a que a mistura apresente a qualidade desejada.

Os critérios para estabelecer a percentagem de borracha adequada e o tempo e a temperatura de digestão são baseados geralmente em ensaios físicos realizados ao BMB, isto é: penetração, ponto amolecimento, resiliência e, a mais importante, viscosidade. A adição da borracha ao betume puro aumenta a viscosidade significativamente devido ao gel e ao inchamento das partículas de borracha (Pais e Pereira, 2007).

Na Figura 2 são apresentados os gráficos da formulação do BMB, os quais apresentam ainda a influência da percentagem de borracha nas propriedades do BMB. Para a formulação do BMB foram utilizados dois betumes base (35/50 e 50/70). Estes BMBs foram produzidos utilizando um tempo de digestão de 45 minutos à temperatura do 175 °C.

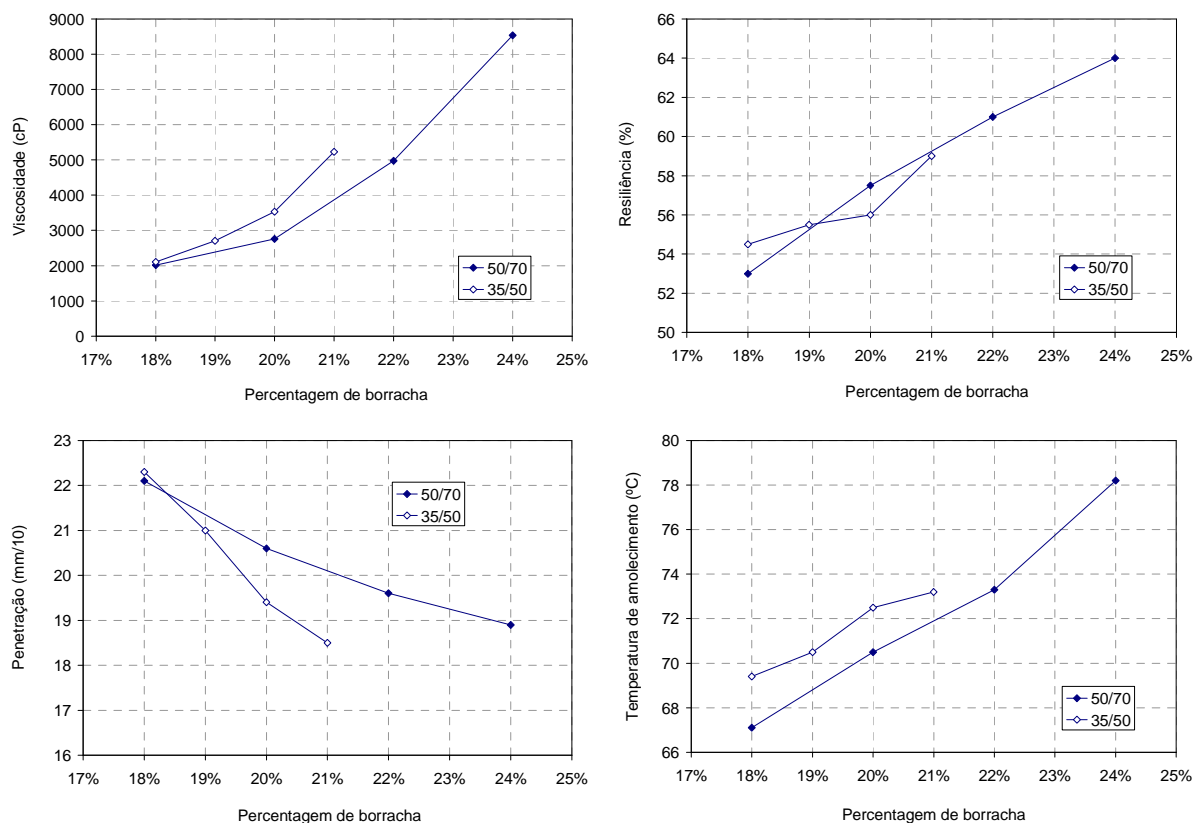


Figura 2 – Influência da percentagem de borracha nas propriedades do BMB

Os resultados da formulação do BMB permitiram observar que o aumento da percentagem de borracha reduz a penetração verificando-se que quanto maior a quantidade de borracha mais duro se torna o BMB. Em termos de temperatura de amolecimento verifica-se que o aumento da percentagem de borracha faz aumentar esta propriedade, o que se traduz na obtenção de

um BMB que necessita de maior temperatura para se tornar plástico. O aumento da percentagem de borracha aumenta a componente elástica do BMB como se observa no gráfico da resiliência. Em termos de viscosidade, o aumento da percentagem de betume aumenta a viscosidade tornando-o mais viscoso. Esta é a principal variável a ser controlada na formulação do BMB uma vez que condiciona o processo de produção, espalhamento e compactação da mistura betuminosa. Além disto, os actuais equipamentos para produção de misturas betuminosas e BMB apenas conseguem trabalhar com betumes de viscosidade inferior a 5000 cP, sendo este o limite máximo que o BMB pode apresentar.

A influência do tipo de betume verifica-se de uma forma mais significativa no comportamento da viscosidade, permitindo a que ao betume mais mole (50/70) possa ser adicionada uma maior quantidade de borracha, aproximadamente mais 1%. Nas outras variáveis, a influência da quantidade de borracha apenas é significativa na penetração do betume.

Tendo por base os resultados obtidos na formulação do BMB, é possível utilizar até uma percentagem de borracha da 22% com o betume base 50/70 e 20% com o betume 35/50.

Utilizando o betume 35/50 com 19% de borracha foram produzidas duas misturas betuminosas com BMB, uma de granulometria aberta e outra de granulometria descontínua que foram caracterizadas mecanicamente em termos de resistência à fadiga. O comportamento destas misturas foi comparado com o comportamento de uma mistura betuminosa de granulometria descontínua com betume modificado com SBS utilizada em camada de desgaste e uma mistura betuminosa aberta também com betume modificado com SBS. Em simultâneo foi avaliado o módulo de deformabilidade destas misturas betuminosas.

COMPORTAMENTO DAS MISTURAS BETUMINOSAS

O módulo de deformabilidade das misturas betuminosas foi obtido através do ensaio de flexão em 4 pontos, com carregamento sinusoidal repetido, sobre provetes com a dimensão de 5.1 x 6.3 x 38.0 cm, de acordo com o preconizado na norma AASHTO TP8-94, tendo-se aplicado uma extensão máxima de tracção na base dos provetes de 100×10^{-6} . Os ensaios foram conduzidos em ordem decrescente de frequência tendo-se aplicado 10, 5, 2, 1, 0.5, 0.2 e 0.1 Hz, à temperatura de ensaio de 20 °C. Os módulos de deformabilidade e o ângulo de fase das misturas estudadas são apresentados no Quadro 2.

Nas Figuras 3 e 4 encontram-se representados, respectivamente o módulo de deformabilidade e ângulo de fase, em função da frequência de aplicação de cargas, podendo-se observar que para a mistura com SBS não se verificam diferenças significativas do módulo de deformabilidade função da frequência da aplicação das cargas. Para a mistura com BMB, esta diferença é significativa e constante, em escala logarítmica, para a gama de frequências aplicadas.

Em termos de módulo de deformabilidade, a mistura aberta com BMB apresenta menor módulo que a mistura aberta com SBS, verificando-se ainda que a mistura descontínua com BMB apresenta maior módulo que a mistura descontínua com SBS.

Quanto ao ângulo de fase verifica-se que nas misturas com BMB apresentam menores valores deste parâmetro que as misturas com SBS evidenciando uma melhor propensão para resistir às deformações permanentes, principalmente para cargas com elevados tempos de aplicação (frequências baixas).

Quadro 2 – Módulo de deformabilidade das misturas betuminosas

Mistura	Frequência (Hz)	Mistura aberta		Mistura descontínua	
		Módulo (MPa)	Ângulo de fase (graus)	Módulo (MPa)	Ângulo de fase (graus)
BMB	10	1784	25.1	3146	18.9
	5	1533	25.6	2750	21.1
	2	1225	27.0	2201	23.6
	1	983	28.7	1827	25.8
	0.5	791	28.5	1502	27.4
	0.2	609	30.6	1162	29.9
	0.1	497	31.4	923	31.3
SBS	10	3162	27.9	3507	32.4
	5	2532	30.6	2689	37.1
	2	1845	33.2	1779	42.9
	1	1432	34.7	1268	46.4
	0.5	1104	35.7	889	48.7
	0.2	790	36.4	540	51.0
	0.1	620	37.1	366	53.2

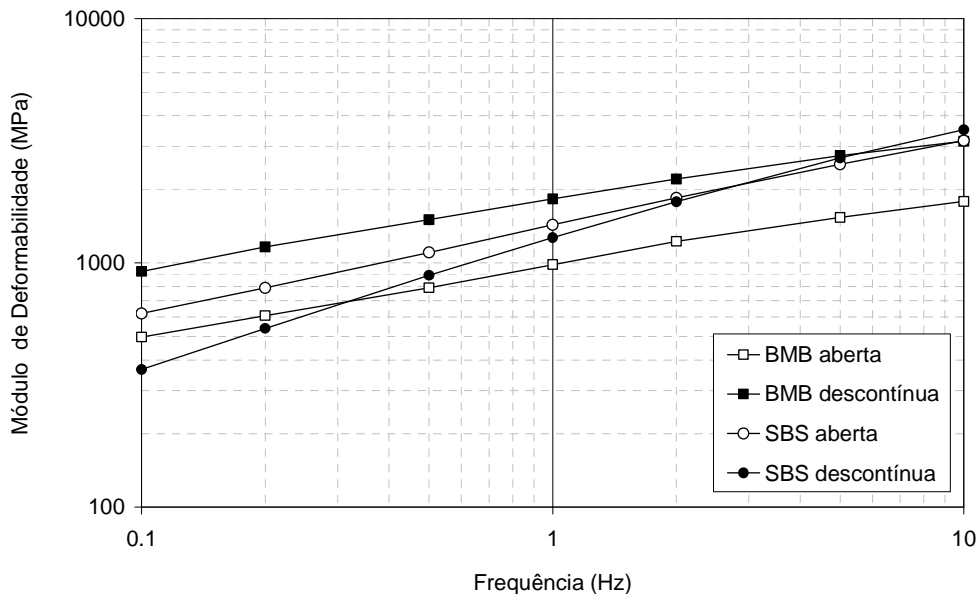


Figura 3 – Módulo de deformabilidade das misturas betuminosas

A variação do ângulo de fase com o módulo de deformabilidade é apresentada na Figura 5 em que é visível a maior tendência das misturas com SBS para apresentarem maiores deformações permanentes.

A resistência à fadiga das misturas betuminosas foi obtida recorrendo a ensaios de fadiga por flexão em quatro pontos com carregamento sinusoidal repetido, sobre provetes com a dimensão de 5.1 x 6.3 x 38.0 cm, de acordo com a norma AASHTO TP8-94, conduzidos a 20 °C, sendo a frequência de aplicação de cargas de 10 Hz. Os ensaios foram desenvolvidos em controlo de deslocamento tendo-se realizado 3 repetições para cada um dos 2 níveis de níveis de extensão ensaiados, (300×10^{-6} e 700×10^{-6}), obtidos através de um carregamento sinusoidal sem período de repouso.

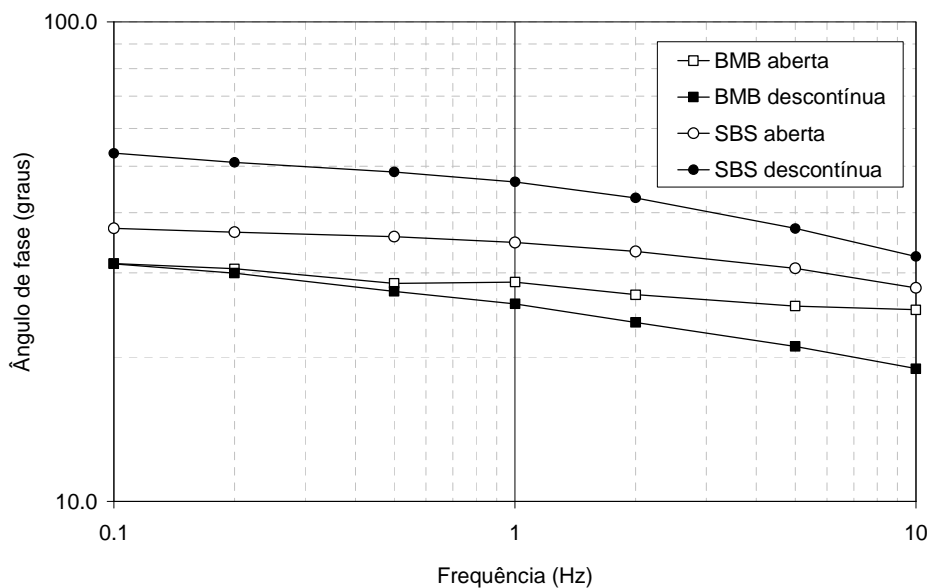


Figura 4 – Ângulo de fase das misturas betuminosas

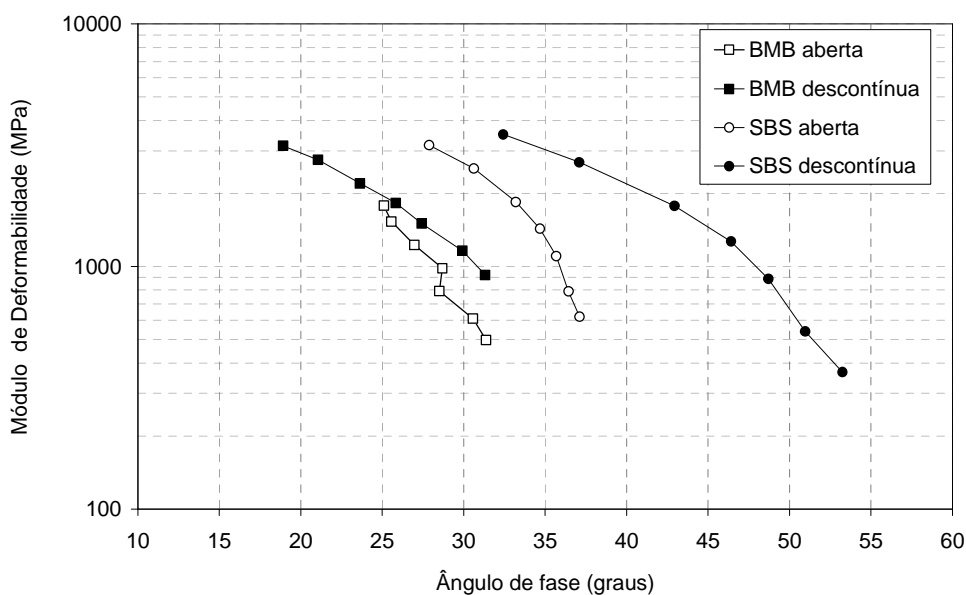


Figura 5 – Black diagram das misturas betuminosas

Os ensaios de fadiga conduziram aos resultados que se apresentam no Quadro 3, expressos pela extensão de tracção aplicada e respectiva vida à fadiga. Os resultados dos ensaios de fadiga foram também expressos em termos de lei de fadiga, de acordo com a Equação 1, tendo-se obtido as leis indicadas no Quadro 4.

$$N = a * \left(\frac{1}{\varepsilon} \right)^b \quad (1)$$

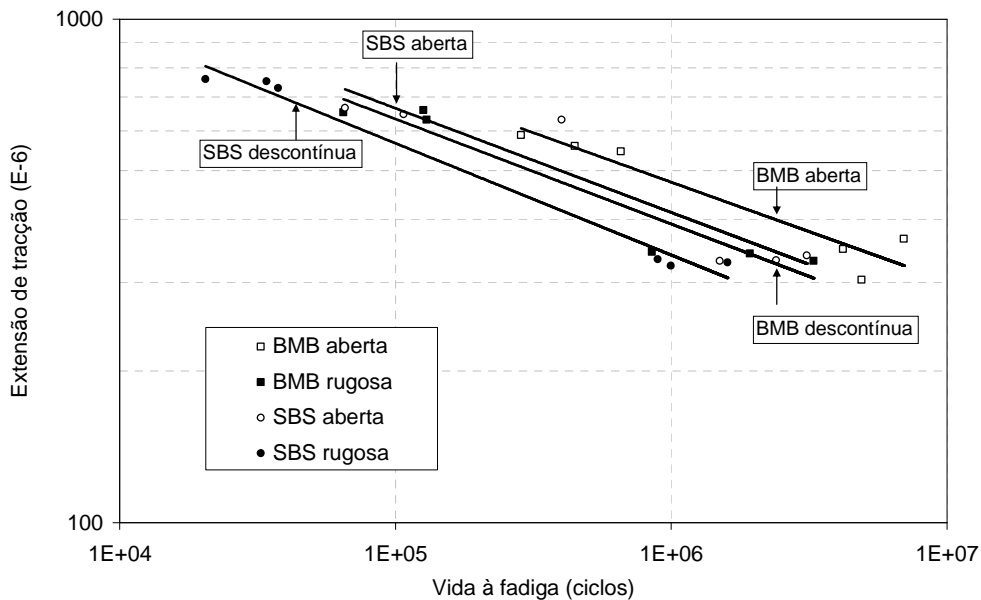
sendo: N = número de aplicações de carga até à rotura;

ε = extensão de tracção (10^{-6});

a, b = coeficientes determinados experimentalmente.

Quadro 3 – Resultados dos ensaios de fadiga

Mistura	Provete	Mistura aberta		Mistura descontínua	
		Extensão (10 ⁻⁶)	Vida à fadiga (ciclos)	Extensão (10 ⁻⁶)	Vida à fadiga (ciclos)
BMB	A	560	4.47E+05	653	6.47E+04
	B	546	6.56E+05	660	1.26E+05
	C	588	2.85E+05	631	1.30E+05
	D	366	6.98E+06	331	3.28E+06
	E	350	4.20E+06	345	8.51E+05
	F	304	4.90E+06	342	1.93E+06
SBS	A	332	2.40E+06	730	3.76E+04
	B	331	1.50E+06	760	2.05E+04
	C	340	3.10E+06	753	3.40E+04
	D	667	6.56E+04	334	8.93E+05
	E	631	4.00E+05	329	1.60E+06
	F	648	1.07E+05	324	9.97E+05



Duas variáveis importantes para avaliar a resistência à fadiga de uma mistura betuminosa, que serão utilizadas conjuntamente com as leis de fadiga para avaliar o desempenho das misturas estudadas, são:

- N_{100} – resistência à fadiga para a extensão de 100×10^{-6} ;
- ϵ_6 – extensão para uma resistência à fadiga igual a 1×10^6 .

Quadro 4 – Coeficientes das leis de fadiga das misturas betuminosas

Mistura	Granulometria	a	b	R ²	N ₁₀₀	ϵ_6
BMB	Aberta	2.390E+18	4.619	0.908	1.38E+09	478
	Descontínua	2.996E+17	4.437	0.926	4.01E+08	386
SBS	Aberta	9.954E+16	4.216	0.872	3.68E+08	406
	Descontínua	1.591E+17	4.430	0.984	2.20E+08	338

Os resultados dos ensaios de fadiga permitem concluir que as misturas abertas apresentam maior resistência à fadiga que as misturas descontínuas e em cada um destes tipos de granulometria, as misturas com BMB apresentam maior resistência à fadiga que as misturas com SBS. Se o comportamento à fadiga for avaliado em termos de número de ciclos que a mistura suporta a uma extensão de tracção de 100×10^{-6} , então a mistura BMB com granulometria aberta apresenta uma vida aproximadamente 4 vezes maior que a correspondente mistura com SBS. Em relação às misturas de granulometria descontínua, a mistura com BMB apresenta aproximadamente 2 vezes mais vida que a mistura com SBS.

CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou a avaliação do comportamento de misturas betuminosas com Betume Modificado com Borracha (BMB) e comparo-o com o comportamento de misturas betuminosas com polímero SBS. Foram utilizadas duas granulometrias típicas para estes tipos de misturas quando aplicadas em camadas de desgaste de pavimento, a granulometria aberta e a granulometria descontínua.

Os resultados dos ensaios laboratoriais de avaliação do comportamento, nomeadamente recorrendo ao ensaio de flexão em 4 pontos para avaliação do modulo de deformabilidade e da resistência à fadiga permitiram concluir que as misturas com BMB apresentam comportamento superior às misturas com SBS e em relação às duas granulometrias utilizadas, a utilização de uma granulometria aberta permite obter maior resistência à fadiga que as misturas descontínuas.

REFERÊNCIAS

- Amirkhanian, S., Shen, J. "The Influence of Crumb Rubber Modifier (CRM) Microstructures on the High Temperature Properties of CRM Binders". The International Journal of Pavement Engineering, Vol. 6, 2005.
- Baker, T. E., Allen, T.M., Jenkins, D.V., Mooney, T., Pierce, L.M., Christie, R.A., Weston, J.T., "Evaluation of the Use of Scrap Tires in Transportation Related Applications in the State of Washington", Washington State Department of Transportation, Washington, D.C., 2003.
- Fontes, L.P.T.L., Trichês, G., Pereira, P.A.A., Pais, J.C., "Desempenho de misturas betuminosas com betume modificado com borracha através do processo húmido", XIVº Congresso Ibero-Latinoamericano del Asfalto, Havana, Cuba, 2007.
- Minhoto, Manuel J.C., Pais, Jorge C., Pereira, Paulo A.A., Picado-Santos, Luís G., "Predicting Asphalt Pavement Temperature with a Three-Dimensional Finite Element Method", Journal of the Transportation Research Board, nº 1919, 2005, pp. 96-110.
- Neto, S.A.D., Farias, M.M., Pais, J.C., Pereira, P.A.A., "Influence of Crumb Rubber and Digestion Time on the Asphalt Rubber Binders", Road Materials and Pavement Design, vol 7, nº 2, 2006, p. 131-148.
- Pais, J.C., Pereira, P.A.A., "The improvement of pavement performance using asphalt rubber hot mixes", International Symposium on Highway and Bridge Engineering, Roménia, 2007.
- Pereira, P.A.A., Pais, J.C., Fontes, L.P.T.L., Trichês, G., "Rehabilitation alternatives using new asphalt rubber mixtures with brazilian materials", Fifth International Symposium on Maintenance and Rehabilitation of Pavements and Technological Control, 2007.
- Way, G.B. "OGFC meets CRM: Where the rubber meets the rubber: 15 years of durable success". Proceedings of the Asphalt Rubber 2006 Conference. Palm Springs, USA. 2006.