

Universidade do Minho

[CN-34]

**Pais, J.C.**, Pereira, P.A.A., Maricato, S., Moura, J.

“Desempenho de misturas betuminosas abertas e fechadas com betume modificado com baixa percentagem de borracha”

5º Congresso Rodoviário Português, Lisboa, 12 – 14 de Março de 2008

# DESEMPENHO DE MISTURAS BETUMINOSAS ABERTAS E FECHADAS COM BETUME MODIFICADO COM BAIXA PERCENTAGEM DE BORRACHA

JORGE PAIS

*PROFESSOR AUXILIAR DA UNIVERSIDADE DO MINHO, GUIMARÃES*

PAULO PEREIRA

*PROFESSOR CATEDRÁTICO DA UNIVERSIDADE DO MINHO, GUIMARÃES*

SUSANA MARICATO

*GALP ENERGIA, LISBOA*

JORGE MOURA

*GALP ENERGIA, LISBOA*

## RESUMO

Tem sido crescente a utilização de betumes modificados com borracha de pneus usados em misturas betuminosas dadas as suas características, principalmente em termos de flexibilidade, o que permite um bom desempenho quando utilizadas para a reabilitação de pavimentos.

Actualmente existem dois tipos distintos de betumes modificados com borracha: os que resultam da incorporação de alta percentagem de borracha e os de baixa percentagem de borracha. Enquanto que os betumes de alta percentagem de borracha são produzidos junto à central de produção de misturas betuminosas dada a sua falta de estabilidade ao armazenamento, os betumes de baixa percentagem de borracha são produzidos tendencialmente na central de produção de betumes e apresentam elevada estabilidade ao armazenamento.

O processo de produção dos betumes modificados com baixa percentagem de borracha permitem a obtenção de um produto com elevado controlo de qualidade cujas características constituem garantia para o elevado desempenho do produto.

Em Portugal é recente a aplicação de misturas betuminosas com betume modificado com baixa percentagem de borracha pelo que o estudo do seu desempenho se apresenta como pertinente principalmente em comparação com os outros tipos de misturas betuminosas utilizadas em Portugal para a reabilitação de pavimentos.

Deste modo, este trabalho apresenta um estudo do desempenho de misturas betuminosas abertas e fechadas com betume modificado com baixa percentagem de borracha. O desempenho foi avaliado em laboratório através da resistência à fadiga e posteriormente comparado com o desempenho de uma mistura betuminosa com características de desgaste com betume convencional.

## 1. INTRODUÇÃO

A utilização de borracha reciclada de pneus em misturas betuminosas remonta aos anos 40 quando nos Estados Unidos se iniciou a comercialização de borracha desvulcanizada a partir da reciclagem de pneus usados. Nos anos seguintes foram realizados estudos laboratoriais para avaliação do efeito da adição da borracha às misturas betuminosas (Caltrans, 2003).

A principal investigação neste domínio foi realizada por Charles H. McDonald durante os anos 60 e 70 que conduziram ao processo húmido de produção de misturas betuminosas com borracha de pneus. As misturas betuminosas com borracha de pneus foram então aplicadas na reparação e manutenção de estradas degradadas no estado do Arizona, estendendo-se numa fase posterior aos estados do sudoeste dos Estados Unidos (Baker et al, 2003).

A borracha reciclada de pneus para utilização em misturas betuminosas apresenta-se sob a forma de um granulado cujas dimensões variam até um máximo de 2 mm dependendo do tipo de equipamento de fragmentação utilizado. Estes variam principalmente pela temperatura a que se processa a moagem da borracha resultando no processo à temperatura ambiente e no processo criogénico. A borracha resultante destes processos apresenta características diferentes principalmente em termos de textura e superfície específica. A borracha resultante da moagem à temperatura ambiente apresenta-se esponjosa e com elevada superfície específica enquanto que a borracha obtida pelo processo criogénico apresenta-se com grãos regulares e reduzida superfície específica (Fontes et al, 2006).

A utilização de borracha de pneus em misturas betuminosas faz-se principalmente através de dois tipos de misturas betuminosas: misturas abertas e misturas rugosas sendo estas granulometrias resultantes da necessidade da mistura betuminosa apresentar espaço para a inclusão da borracha dos pneus (adicionada ao betume) (Neto et al, 2006). No entanto está já disponível no mercado tecnologia que permite fabricar misturas drenantes com betume de baixo teor em borracha.

A modificação do betume com borracha de pneus é realizada através de dois processos: i) continuous blend e ii) terminal blend. O continuous blend conduz a betumes modificados com

alta percentagem de borracha (BMBAP) enquanto o terminal blend conduz a betumes modificados com baixa percentagem de borracha (BMBBP).

Os betumes com alta percentagem de borracha incluem entre 18 e 22% de granulado de borracha dependendo do tipo de betume utilizado e das características da borracha, bem como do tempo e temperatura de digestão. Os betumes com esta quantidade de borracha apresentam-se com elevada viscosidade a qual pode ser reduzida com o uso de aditivos permitindo obter betumes com viscosidades compatíveis com os equipamentos de produção de misturas betuminosas e também com a capacidade que os betumes têm para se ligarem aos agregados.

Os betumes modificados com baixa percentagem de borracha apresentam uma quantidade de borracha inferior a 15% e o processo de modificação do betume ocorre na refinaria. Este tipo de betume tem as mesmas necessidades de armazenagem que um betume modificado com polímeros.

Neste trabalho é estudado o desempenho de misturas betuminosas com betume modificado com baixa percentagem de borracha para aplicação em camadas de desgaste de pavimento. O betume a utilizar é proveniente da Probigalp e tem a designação de Polybetume C2. A sua aplicação foi realizada em misturas abertas e fechadas de acordo com os fusos granulométricos recomendados para este tipo de misturas. A formulação das misturas betuminosas foi realizada recorrendo à metodologia Marshall e a avaliação do desempenho foi obtida recorrendo a ensaios de módulo de deformabilidade e de resistência à fadiga a misturas betuminosas produzidas e compactadas em laboratório. O comportamento destas misturas com betume modificado com borracha foi comparado com o desempenho de uma mistura betuminosa com características de desgaste produzida com betume convencional.

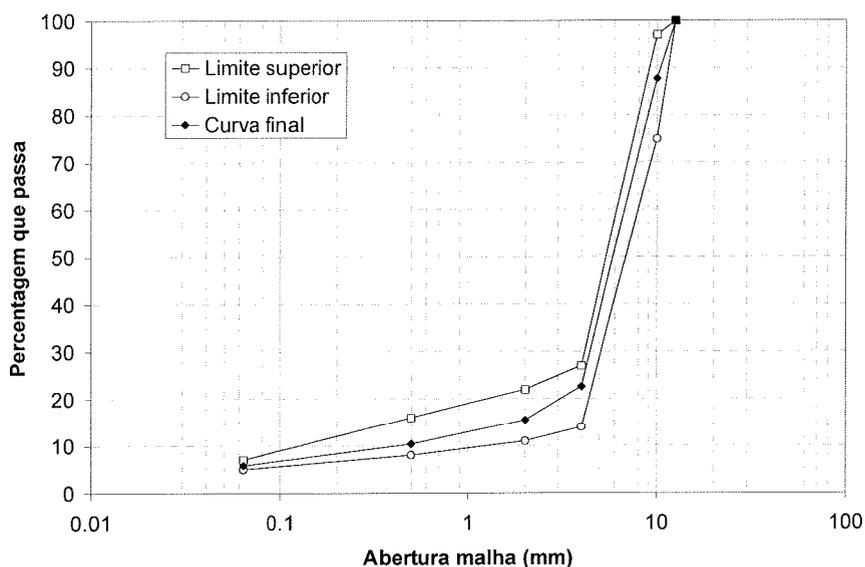
## **2. FORMULAÇÃO DAS MISTURAS BETUMINOSAS**

Para o desenvolvimento deste trabalho foram estudadas duas misturas betuminosas para camada de desgaste de pavimentos com betume modificado com baixa percentagem de borracha, uma delas com uma granulometria aberta e a outra com uma granulometria fechada.

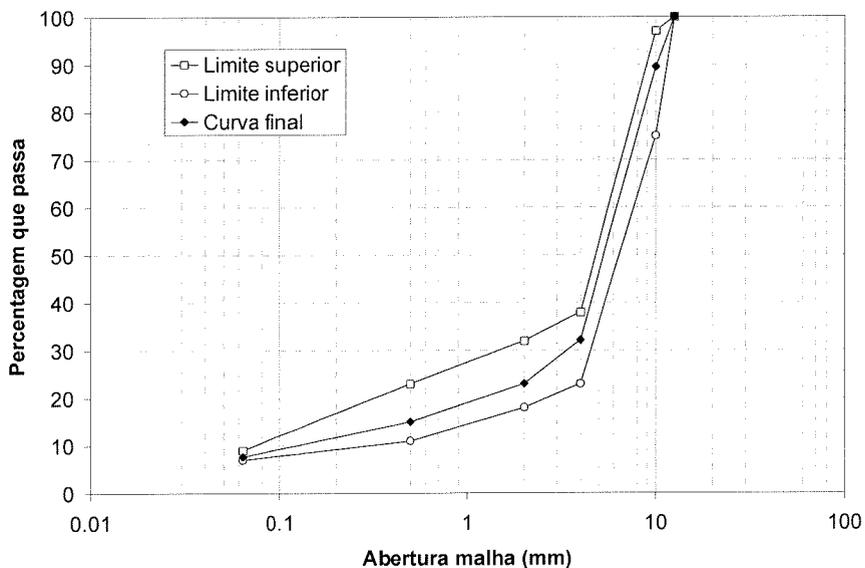
Estas duas misturas apresentam um agregado cuja dimensão máxima está limitada a 12.5 mm sendo o fuso granulométrico dado pelo Quadro 1. Neste quadro é indicado ainda a curva granulométrica utilizada para cada uma das misturas betuminosas estudadas neste trabalho, podendo-se constatar que esta se encontra correctamente enquadrada nos limites definidos. Estes fusos granulométricos e curvas finais utilizadas estão ainda representadas nas Figuras 1 e 2 respectivamente para a mistura aberta e fechada.

**Quadro 1 – Fuso granulométrico das misturas betuminosas**

Mistura	abertura das malhas	(mm)	12.5	10	4	2	0.5	0.063
aberta	Fuso granulométrico	superior	100	97	27	22	16	7
		inferior	100	75	14	11	8	5
	Curva Final			100	87.7	22.6	15.5	10.4
fechada	Fuso granulométrico	superior	100	97	38	32	23	9
		inferior	100	75	23	18	11	7
	Curva Final			100	89.5	32.2	23.1	15.0



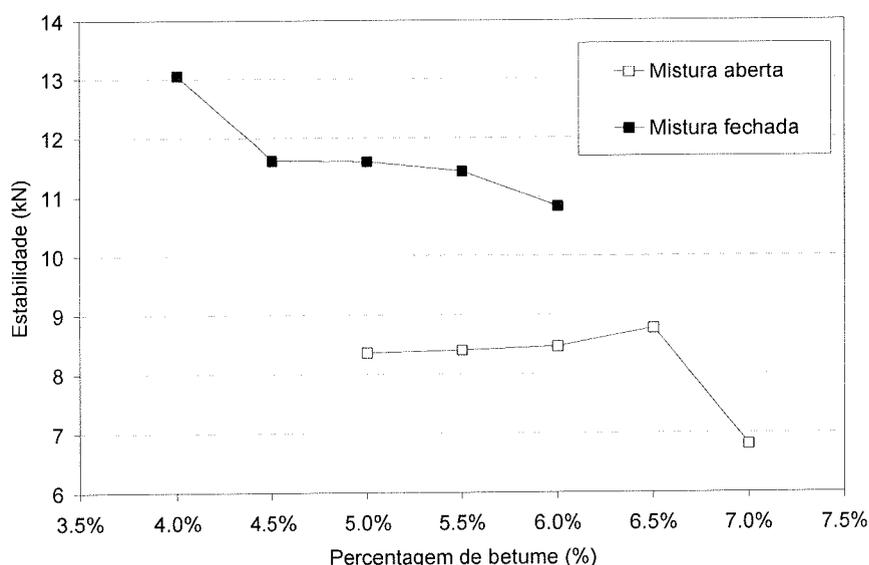
**Figura 1 – Curva granulométrica da mistura aberta**



**Figura 2 – Curva granulométrica da mistura fechada**

A formulação das misturas betuminosas com baixa percentagem de BMB foi realizada recorrendo à metodologia Marshall tendo-se utilizado 5 percentagens de betume para cada tipo de mistura estudada (aberta e fechada). Para a mistura aberta, em que granulometria se apresenta com mais material grosso que a mistura fechada, foram utilizadas as percentagens de betume de 5.0%, 5.5%, 6.0%, 6.5% e 7.0%, enquanto que para a mistura fechada foram utilizadas as percentagens de betume de 4.0%, 4.5%, 5.0%, 5.5% e 6.0%.

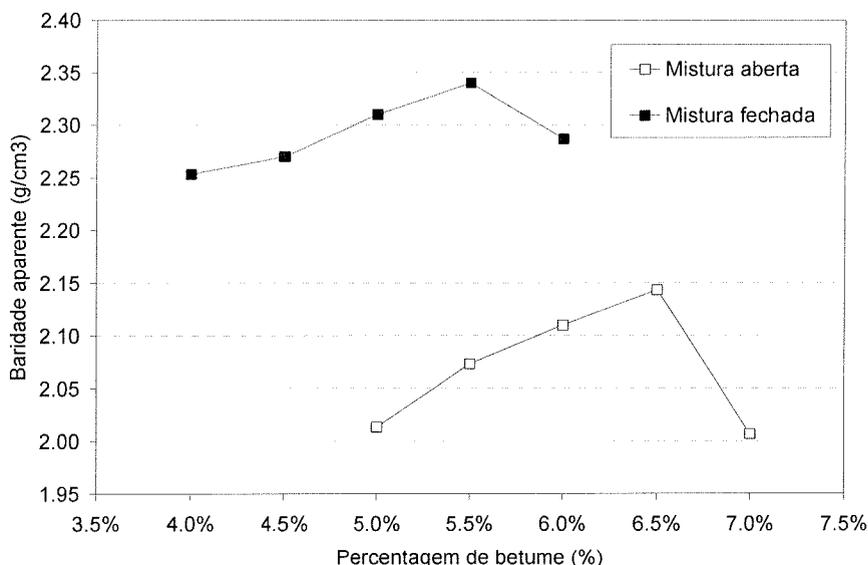
Na Figura 3 apresenta-se a evolução da estabilidade Marshall obtida para a formulação duas misturas betuminosas. Pela análise da evolução da estabilidade pode verificar-se que as misturas betuminosas com BMB com baixa percentagem de borracha apresentam uma reduzida variação da estabilidade com a percentagem de betume. No caso da mistura betuminosa aberta, a estabilidade é praticamente independente da percentagem de betume verificando-se apenas para a percentagem máxima utilizada uma variação significativa da estabilidade. Para a mistura betuminosa verifica-se que para as três percentagens médias utilizadas, a estabilidade é praticamente igual, verificando-se apenas alguma variação da estabilidade para as percentagens extremas de betume utilizadas.



**Figura 3 – Evolução da estabilidade para as misturas estudadas**

Na Figura 4 é apresentada a evolução da baridade dos provetes Marshall utilizados para a formulação das misturas betuminosas. Ao contrário do que aconteceu com a estabilidade Marshall, a baridade aparente dos provetes produzidos com BMB de baixa percentagem de borracha é claramente influenciada pela percentagem de betume. Para cada mistura estudada pode ser identificada uma percentagem de betume que maximiza a baridade aparente da mistura, a qual pode ser considerada como a percentagem óptima para a mistura betuminosa.

Deste modo, pela análise da Figura 4 definiu-se a percentagem de betume de 6.5% para a mistura betuminosa aberta e a percentagem de 5.5% para a mistura betuminosa fechada. Em termos de estabilidade, estes valores correspondem à zona onde a estabilidade é máxima, à excepção da mistura betuminosa fechada que apresentou uma estabilidade elevada para a menor percentagem de betume utilizada.

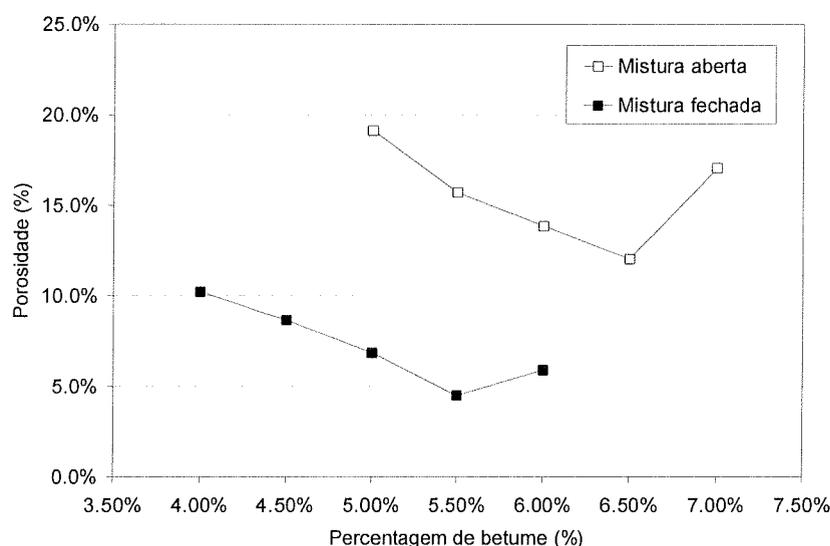


**Figura 4 – Evolução da baridade aparente para as misturas estudadas**

As percentagens de betume definidas para as misturas betuminosas permitem obter porosidades dos provetes Marshall de acordo com as exigências destas misturas, nomeadamente superior a 4% para a mistura fechada e 12% para a mistura aberta, como se pode constatar pela análise da Figura 5. As percentagens óptimas de betume definidas são também as que conduzem às misturas com menor quantidade de vazios, nomeadamente 12.1% para a mistura aberta e 4.5% para a mistura fechada.

### 3. MÓDULO DE DEFORMABILIDADE

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  $100 \times 10^{-6}$ . 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.



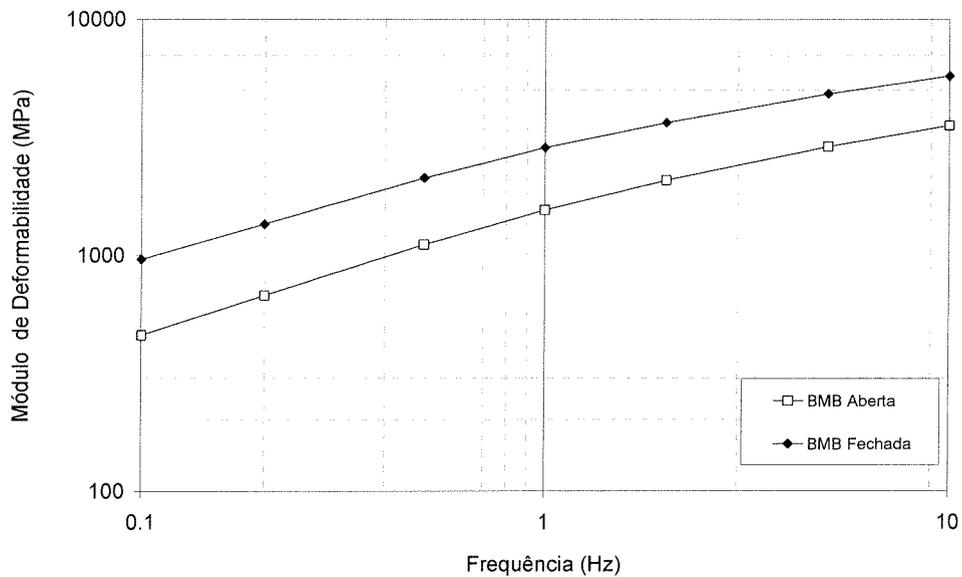
**Figura 5 – Evolução da porosidade das misturas estudadas**

O módulo de deformabilidade e respectivo ângulo de fase para as várias frequências, apresentados no Quadro 2, resultam da média dos 9 ensaios realizados para cada condição de ensaio. Estes valores estão representados nas Figuras 6 e 7, respectivamente para o módulo de deformabilidade e para o ângulo de fase.

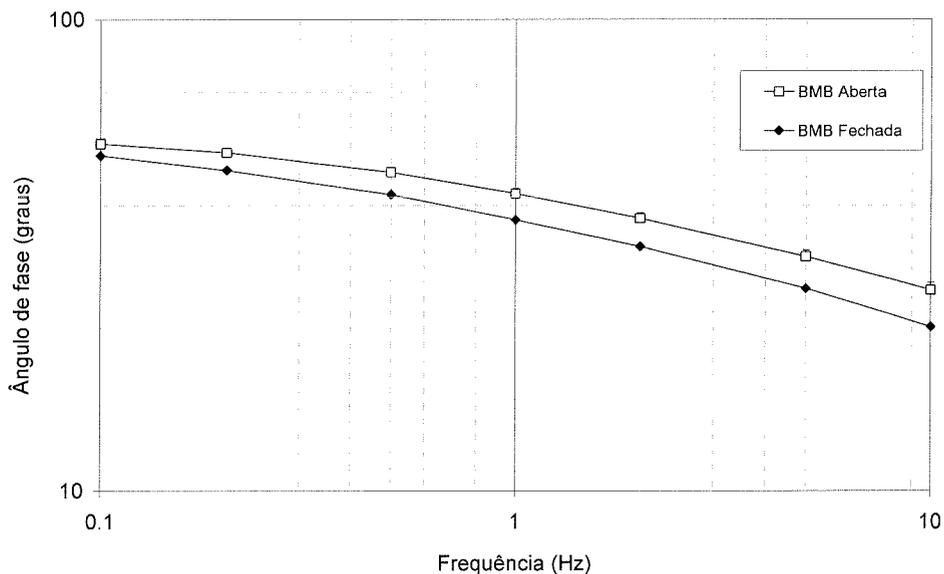
O módulo de deformabilidade obtido para as misturas betuminosas varia entre 3500 MPa (10 Hz) para a mistura betuminosa aberta e os 5700 MPa (10 Hz). À frequência de 1 Hz, característica de tráfego muito lento, o módulo de deformabilidade varia entre 1500 MPa para a mistura aberta e os 2800 MPa para a mistura fechada.

**Quadro 2 – Módulo de deformabilidade e ângulo de fase das misturas betuminosas**

Mistura	Frequência (Hz)	Módulo (MPa)	Ângulo de fase (graus)
Aberta	10	3530	26.5
	5	2880	31.2
	2	2070	37.6
	1	1551	42.4
	0.5	1107	47.1
	0.2	673	51.9
	0.1	457	54.2
Fechada	10	5723	22.2
	5	4811	26.7
	2	3629	32.8
	1	2846	37.3
	0.5	2119	42.2
	0.2	1347	47.6
	0.1	959	51.1



**Figura 6 – Módulo de deformabilidade das misturas estudadas**



**Figura 7 – Ângulo de fase das misturas estudadas**

#### 4. RESISTÊNCIA À FADIGA

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, ( $300 \times 10^{-6}$  e  $700 \times 10^{-6}$ ), obtidos através de um carregamento sinusoidal sem período de repouso.

Os ensaios de fadiga conduziram aos resultados que se apresentam no Quadro 3, dados pela extensão de tracção aplicada e respectiva vida à fadiga.

**Quadro 3 – Resultados dos ensaios de fadiga**

Mistura	Provete	Extensão ( $10^{-6}$ )	Vida à fadiga (ciclos)
Aberta	A	830	2.07E+04
	B	828	2.62E+04
	C	793	3.21E+04
	D	321	1.97E+06
	E	624	1.11E+05
	F	625	1.12E+05
	G	415	4.23E+05
	H	621	8.99E+04
	I	418	5.50E+05
Fechada	A	805	3.14E+04
	B	820	2.92E+04
	C	794	3.53E+04
	D	519	2.66E+05
	E	511	2.78E+05
	F	510	4.14E+05
	G	415	7.63E+05
	I	414	1.04E+06

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 e representadas na Figura 8.

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

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

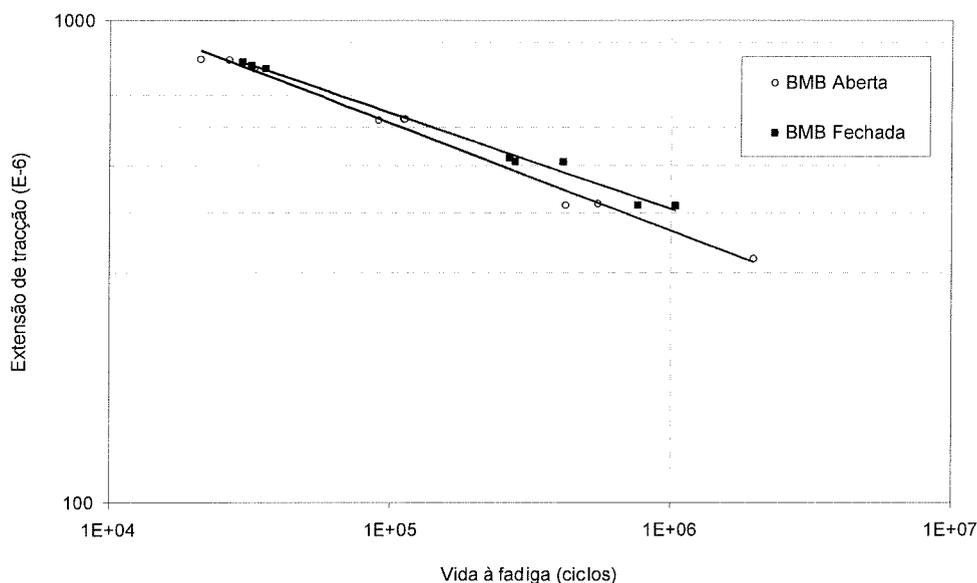
$\varepsilon$  = extensão de tracção ( $10^{-6}$ );

a, b = coeficientes determinados experimentalmente.

Para descrever o comportamento das misturas betuminosas são ainda utilizadas as variáveis  $N_{100}$  (resistência à fadiga para a extensão de  $100 \times 10^{-6}$ ) e  $\varepsilon_6$  (extensão para uma resistência à fadiga igual a  $1 \times 10^6$ ), variáveis estas incluídas também no Quadro 4.

#### Quadro 4 – Coeficientes das leis de fadiga das misturas betuminosas

Mistura	a	b	R <sup>2</sup>	N <sub>100</sub>	ε <sub>6</sub>
Aberta	2.826E+17	4.469	0.988	3.27E+08	365
Fechada	1.240E+19	5.019	0.991	1.13E+09	406

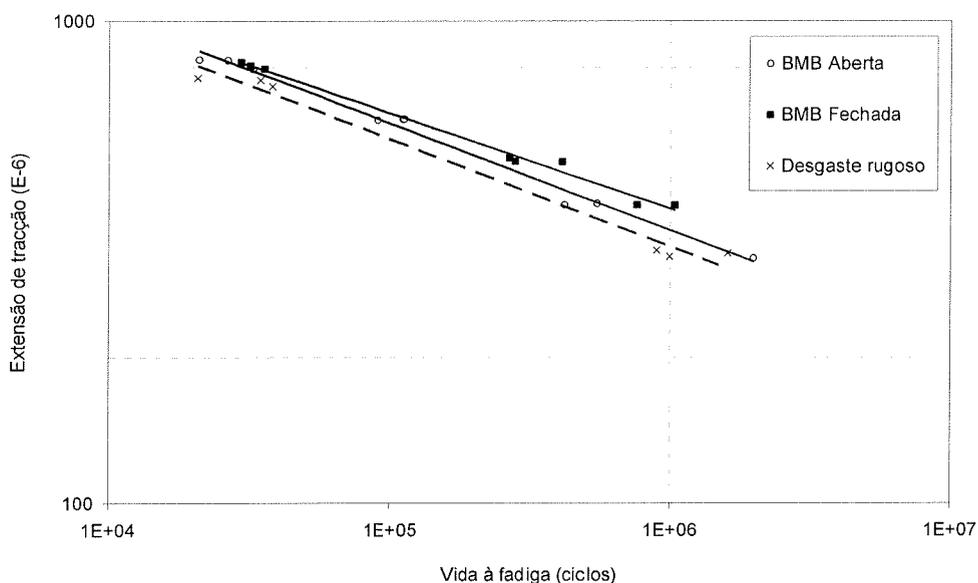


**Figura 8 – Leis de fadiga das misturas estudadas**

A análise das leis de fadiga das duas misturas betuminosas estudadas (Figura 8) permite concluir que as misturas betuminosas têm um comportamento à fadiga muito idêntico, apenas verificando-se diferença para níveis baixos de extensão em que a mistura fechada apresenta uma maior resistência à fadiga comparativamente à mistura aberta.

Na Figura 9 é apresentada uma comparação entre o comportamento à fadiga das misturas betuminosas com BMB de baixa percentagem de borracha e o comportamento à fadiga de uma mistura betuminosa com características de desgaste com betume convencional. Esta mistura convencional apresenta uma percentagem de betume de 5%, uma porosidade de 4% e uma baridade aparente de 2.54 g/cm<sup>3</sup>. O módulo de deformabilidade a 20 °C e a 10 Hz desta mistura é de 3500 MPa, valor semelhante ao da mistura betuminosa aberta com BMB.

Em termos de comportamento à fadiga verifica-se que as misturas com BMB apresentam melhor desempenho sendo de destacar que entre misturas com curvas granulométricas semelhantes (desgaste rugoso e BMB aberta) a mistura com BMB apresenta melhor desempenho.



**Figura 9 – Comparação entre mistura tradicional e as misturas com BMB estudadas**

## 5. CONCLUSÕES

O presente trabalho pretendeu avaliar o desempenho de misturas betuminosas com betume modificado com baixa percentagem de borracha através da avaliação do módulo de deformabilidade e da resistência à fadiga. Para este estudo foram utilizadas duas misturas betuminosas (aberta e fechada), as quais foram comparadas com uma mistura betuminosa com características de desgaste produzida com betume convencional.

Em termos de comportamento à fadiga verificou-se que as misturas com BMB apresentam melhor desempenho sendo de destacar que entre misturas com curvas granulométricas semelhantes (desgaste rugoso e BMB aberta) a mistura com BMB apresenta melhor desempenho.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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.

Caltrans, “ Maintenance Technical Advisory Guide (TAG)”, Caltrans, State of California Department of Transportation, Sacramento, California, 2003.

Neto, S.A.D., Farias, M.M., Pais, J.C., Pereira, P.A.A., "Influence of crumb rubber Gradation on Asphalt-Rubber Properties", Asphalt Rubber 2006 Conference, Palm Springs, USA, 2006, p. 679-692.

Fontes, L.P.T.L., Pereira, P.A.A., Pais, J.C., Trichês, G., "Performance of wet process method alternatives: Terminal or continuous blend", Asphalt Rubber 2006 Conference, Palm Springs, USA, 2006, p. 473-486.