

Universidade do Minho

[CN-35]

**Pais, J.C.**, Pereira, P.A.A., Minhoto, M.J.C.

“Reciclagem de pavimentos utilizando betume modificado com borracha”

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

# RECICLAGEM DE PAVIMENTOS UTILIZANDO BETUME MODIFICADO COM BORRACHA

JORGE PAIS

*PROFESSOR AUXILIAR DA UNIVERSIDADE DO MINHO, GUIMARÃES*

PAULO PEREIRA

*PROFESSOR CATEDRÁTICO DA UNIVERSIDADE DO MINHO, GUIMARÃES*

MANUEL MINHOTO

*PROFESSOR ADJUNTO, INSTITUTO POLITÉCNICO DE BRAGANÇA, BRAGANÇA*

## RESUMO

A reciclagem tem vindo a ser utilizada como uma nova estratégia na reabilitação de pavimentos em que cada vez mais se limitam as quantidades de material a levar a vazadouro por exigências legislativas relacionadas com a preservação do ambiente. Também a escassez de novos materiais leva a que as estratégias de reabilitação de pavimentos utilizem de forma mais premente a reciclagem dos materiais antigos e degradados.

Além da reciclagem dos materiais existentes nos pavimentos, a reciclagem de resíduos também tem sido uma prática corrente da sociedade tendo já chegado aos pavimentos através da reciclagem de pneus usados cuja borracha depois de granulada é utilizada para modificar o betume utilizado nas misturas betuminosas.

Uma das técnicas mais promissoras para a reabilitação de pavimentos faz uso das misturas betuminosas com betume modificado com borracha. O desempenho destas misturas tem mostrado bons resultados, tanto em laboratório como in situ, quando aplicadas na reabilitação de pavimentos.

A utilização de betume modificado com borracha na reciclagem de misturas betuminosas de pavimentos conduz a que o ligante final da mistura betuminosa reciclada seja a mistura de um betume (tendencialmente convencional) envelhecido com um betume de elevado desempenho (betume modificado com borracha). O ligante resultante encontrar-se-á entre estes dois betumes e o desempenho da mistura reciclada será melhor que o das misturas convencionais mas inferior ao das misturas com betume modificado com borracha.

Deste modo, este trabalho apresenta a avaliação do desempenho de uma mistura betuminosa reciclada com betume modificado com borracha em termos de resistência à fadiga correlacionando-se estes resultados com as características do ligante reciclado.

## 1. INTRODUÇÃO

Neste trabalho é apresentado um estudo de reciclagem de misturas betuminosas utilizando como novo ligante um Betume Modificado com Borracha (BMB) de pneus. A parte do projecto resumida neste trabalho apresenta os resultados da formulação da mistura betuminosa reciclada, nomeadamente as características do ligante resultante da reciclagem de mistura betuminosa e as características mecânicas da mistura betuminosa, avaliadas através do seu desempenho à fadiga.

A reciclagem a quente em central de misturas betuminosas é realizada pela adição de novos materiais à mistura betuminosas fresada do pavimento. Esta adição é necessária principalmente para correcção da curva granulométrica dos agregados sendo esta correcção feita com quantidade de material novo da ordem dos 30 a 70%. A mistura betuminosa reciclada apresenta um ligante que corresponde à mistura do ligante existente com um novo ligante.

No caso da reciclagem com BMB, o ligante final será a mistura do ligante envelhecido e duro existente na mistura betuminosa e do BMB a adicionar. As características do ligante final são diferentes das atribuídas ao BMB pelo que a mistura reciclada não terá um desempenho idêntico ao das misturas betuminosas com BMB, às quais se atribui um elevado desempenho à fadiga e à propagação de fendas.

Deste modo, neste trabalho apresenta-se a formulação do BMB a utilizar na reciclagem e as características previsíveis do ligante final da mistura reciclada. Esta caracterização será apenas realizada pela adição do betume recuperado do material fresado com o BMB uma vez que a recuperação do betume da mistura reciclada afigura-se pouco eficiente devido à presença de borracha no betume o que faz com que este material não seja de possível extração.

Além disto, o ligante final da mistura reciclada não será uma mistura perfeita do betume do material fresado com o BMB, pelo que a caracterização a obter para o ligante final será apenas indicativa podendo não representar adequadamente o ligante final.

Para a realização deste estudo foram estudadas duas misturas fresadas de pavimentos em serviço e definidos os BMBs a utilizar em cada caso de modo a permitir obter uma mistura betuminosa com características idênticas às misturas com BMB. Os BMBs a utilizar na

reciclagem resultaram da adição de granulado de borracha a dois betumes, um 35/50 e outro 50/70.

Para avaliação do desempenho das misturas recicladas foram realizados ensaios de fadiga a misturas com várias percentagens de ligante de modo a estudar a influência da quantidade de ligante na formulação das misturas betuminosas.

## 2. CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL FRESADO

Para este estudo foram utilizadas duas misturas betuminosas fresadas de pavimento em serviço as quais foram objecto de caracterização física em termos de percentagem de betume e curva granulométricas dos agregados. O betume das misturas foi ainda recuperado e caracterizado de modo a obtenção da sua penetração, temperatura de amolecimento e viscosidade aparente.

As misturas betuminosas fresadas de designação F1 e F2 apresentaram uma percentagem de betume respectivamente de 5.9% e 5.0% enquanto que o betume recuperado destas misturas apresenta as características indicadas no Quadro 1. Apesar dos betumes originais destas misturas serem do tipo 35/50 o envelhecimento a que estiveram sujeitos transformou-os em betumes do tipo 10/20, ou seja, relativamente duros.

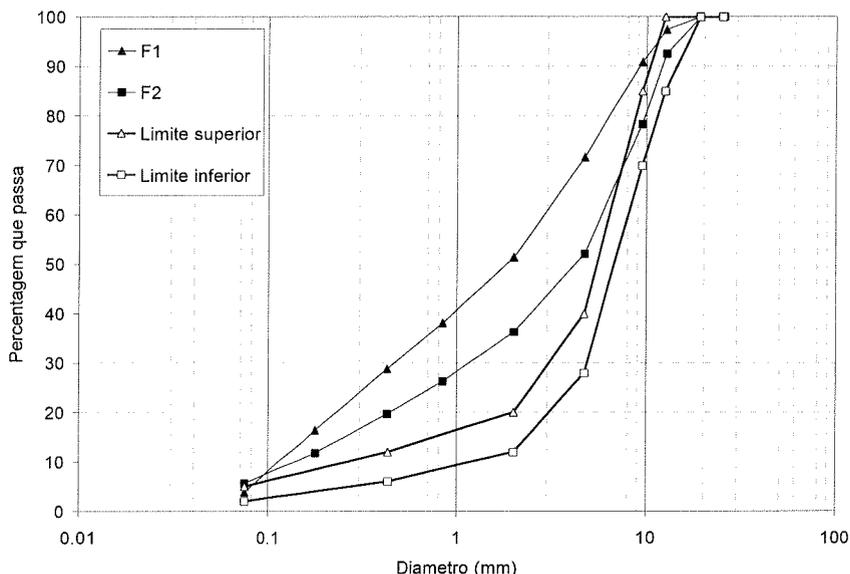
**Quadro 1 – Características do betume recuperado do material fresado**

Fresado	Penetração (mm/10)	Temperatura de amolecimento (°C)	Viscosidade (cP)
F1	12	68	275
F2	18	65	313

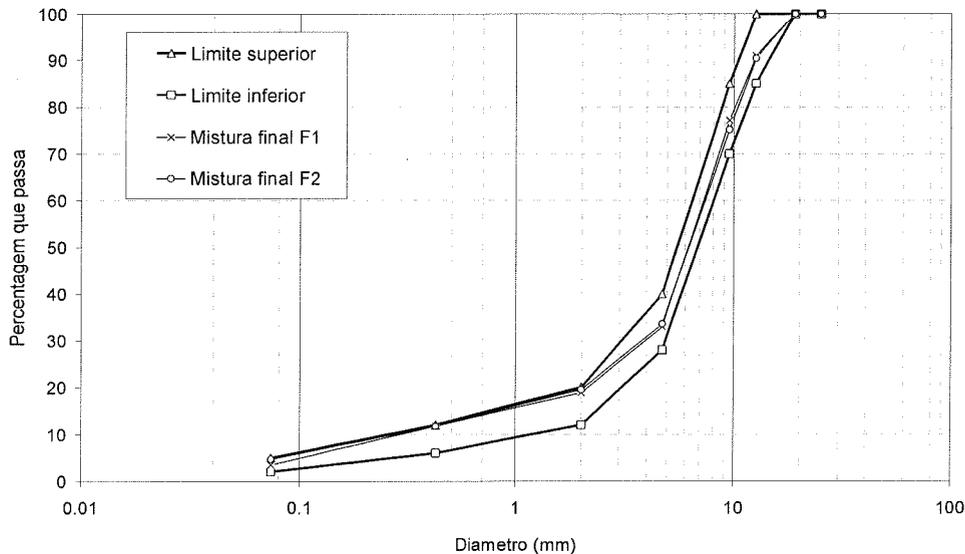
A granulometria dos agregados dos dois fresados em estudo foi obtida após incineração do betume da mistura betuminosa tendo-se obtido as curvas granulométricas indicadas na Figura 1, apresentando-se nesta figura o fuso utilizado para as misturas betuminosas com BMB a que a mistura betuminosa reciclada deve respeitar. Pela análise das curvas granulométricas pode observar-se que o material fresado apresenta uma quantidade de material fino muito superior ao limite máximo do fuso da mistura com BMB pelo que o agregado de correcção deverá ser principalmente grosso.

O cálculo da taxa de reciclagem permitiu concluir que o material F1 pode ser utilizado numa percentagem de 30% e o material F2 pode ser usado numa percentagem de 45% na mistura

reciclada. Com estas taxas de reciclagem, as misturas recicladas apresentam as curvas granulométricas apresentadas na Figura 2, as quais se enquadram no fuso especificado.



**Figura 1 – Curva granulométrica das misturas fresadas e fusos a utilizar**



**Figura 2 – Curva granulométrica das misturas recicladas**

### 3. PREVISÃO DO COMPORTAMENTO DO LIGANTE RECICLADO

O betume a utilizar na reciclagem das misturas betuminosas será um betume modificado com borracha produzido em laboratório utilizando como betume base betumes do tipo 35/50 e

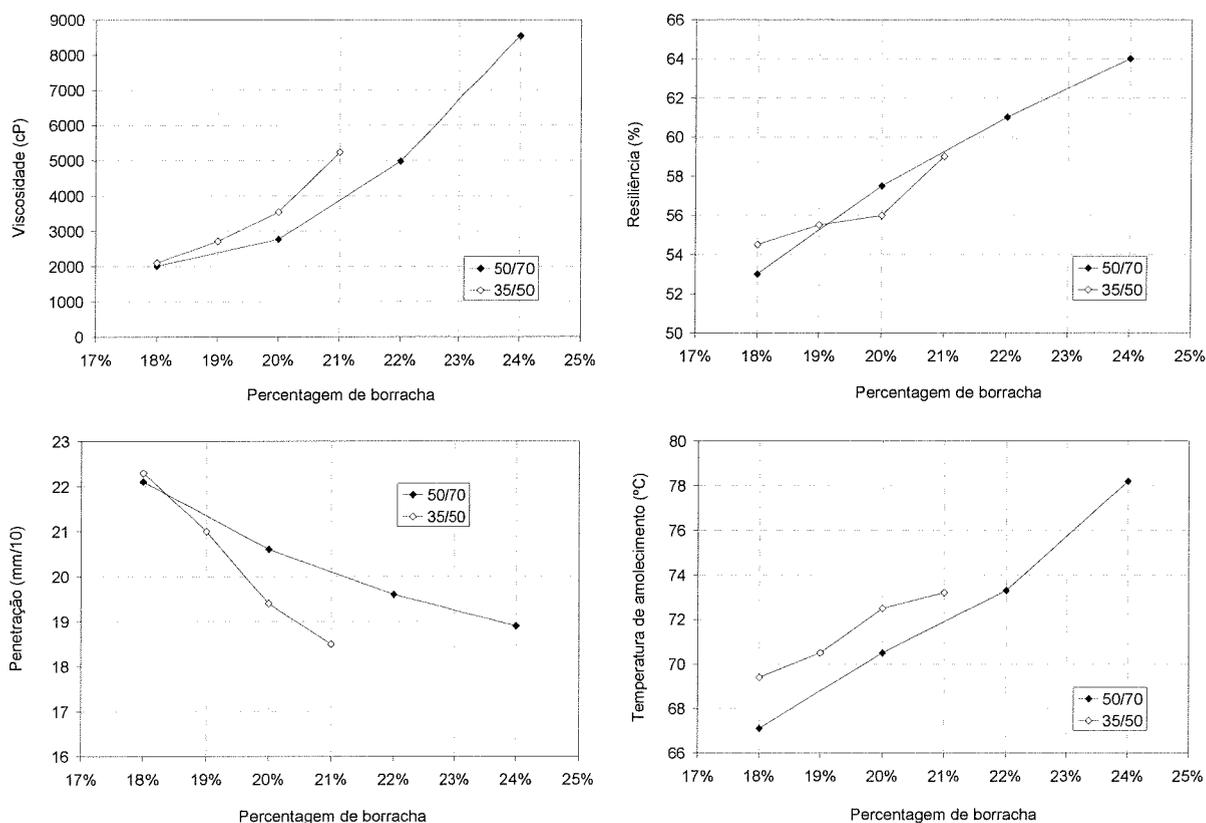
50/70. A borracha de pneus a utilizar na produção do BMB é do tipo criogénica com dimensões entre 0.18 e 0.6 mm.

A formulação do BMB a utilizar na reciclagem foi realizada para os dois betumes em estudo e para as percentagens de 18, 20, 22 e 24% para o betume 50/70 e para as percentagens 18, 19, 20 e 21% para o betume 35/50.

A formulação do BMB é realizada variando a percentagem de borracha até se obter um BMB cujas características (penetração, temperatura de amolecimento, resiliência e viscosidade) se encontrem dentro dos limites especificados para este produto. A principal limitação prende-se com a viscosidade que por questões de utilização nas centrais de misturas betuminosas deve estar limitada a 5000 cP.

De acordo com os resultados da formulação de BMB (Figura 3) é possível concluir que ao betume 50/70 pode ser adicionado 22% de borracha e ao betume 35/50 pode ser adicionado 20% de borracha, obtendo-se respectivamente os betumes com a designação A3 e B3.

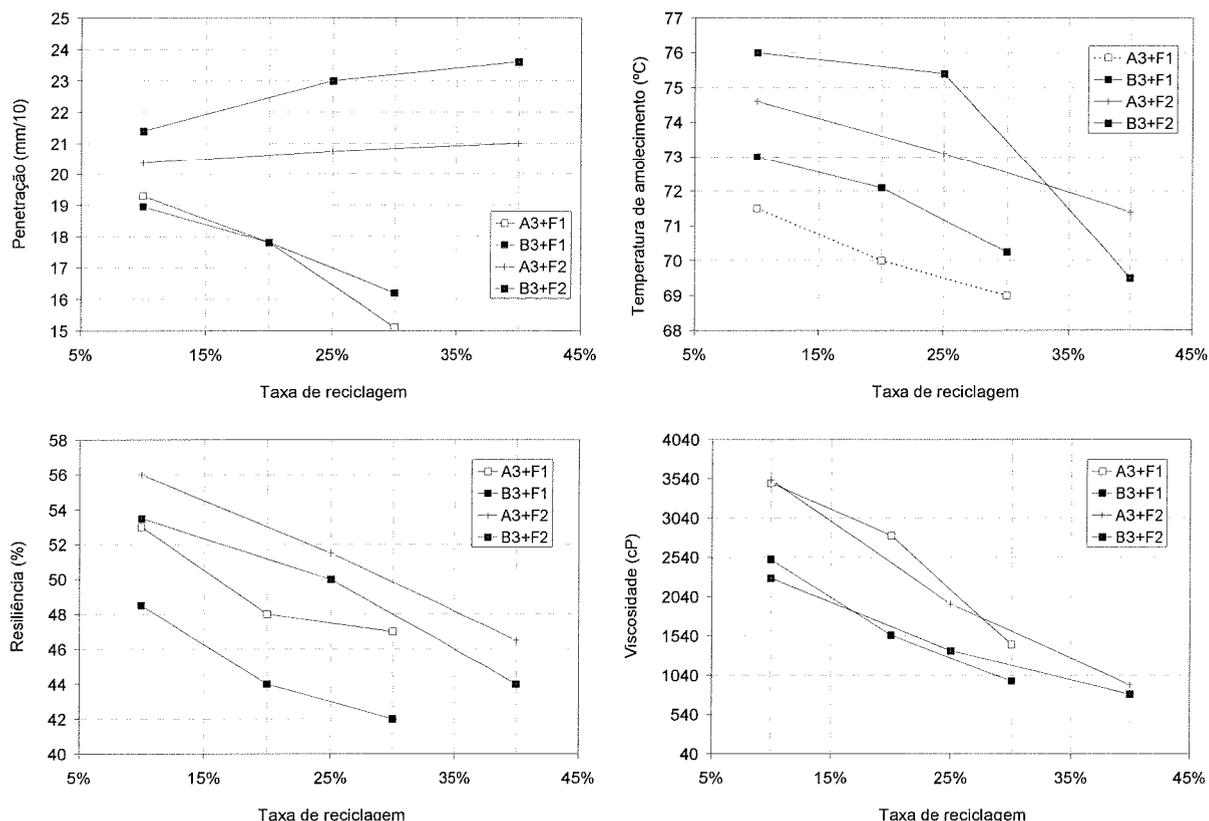
Estes dois betumes (A3 e B3) apresentam uma viscosidade inferior a 5000 cP, uma penetração ligeiramente superior a 20 mm/10, o que o torna num betume relativamente duro enquanto que a temperatura de amolecimento se encontra acima dos 70 °C.



**Figura 3 – Formulação do BMB**

A utilização destes BMBs (A3 e B3) na reciclagem das misturas betuminosas produzirá um betume que é a mistura deste BMB com o betume existente no material fresado. A taxa de reciclagem influenciará as características do betume final como se observa na Figura 4 em que se apresenta as características do betume final função da taxa de reciclagem.

A análise da caracterização do betume reciclado permite concluir que apesar do betume existente no fresado ser mais duro que o BMB a adicionar ao fresado, a temperatura de amolecimento, a resiliência e a viscosidade do betume reciclado diminui com o aumento da taxa de reciclagem. Em relação à penetração, o aumento da taxa de reciclagem do fresado F1 torna o betume final mais duro, não se verificando influência no fresado F2 uma vez que este apresenta uma penetração semelhante à do BMB. Estes factos podem ser justificados pela interação (digestão) que se verifica quando o betume do fresado é adicionado ao BMB.



**Figura 4 – Características do betume das misturas recicladas**

Tendo por base os resultados obtidos, o estudo do comportamento mecânico das misturas betuminosas recicladas foi realizado para o caso do fresado F1, o qual foi utilizado com uma

taxa de reciclagem de 30%, tendo-se utilizado como betume de correcção o BMB B3, produzido com betume 35/50 e 20% de borracha.

### 3. COMPORTAMENTO DA MISTURA RECICLADA

A mistura betuminosa reciclada obtida a partir de 30% de fresado F1 e BMB B3, o qual tem como betume base o betume 35/50 e 20% de borracha, foi caracterizada avaliando-se o módulo de deformabilidade e a resistência à fadiga para 5 percentagens de betume (8.5, 9.0, 9.5, 10.0 e 10.5%). Este estudo foi realizado de forma idêntica a um estudo Marshall substituindo o ensaio Marshall por ensaios de desempenho (módulo de deformabilidade e resistência à fadiga).

O módulo de deformabilidade da mistura betuminosa 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.

Os resultados em termos de módulo de deformabilidade e ângulo de fase são apresentados nas Figuras 5 e 6 onde se pode observar a diminuição do módulo de deformabilidade com o aumento da percentagem de betume da mistura betuminosa. O ângulo de fase segue uma tendência inversa à do módulo de deformabilidade.

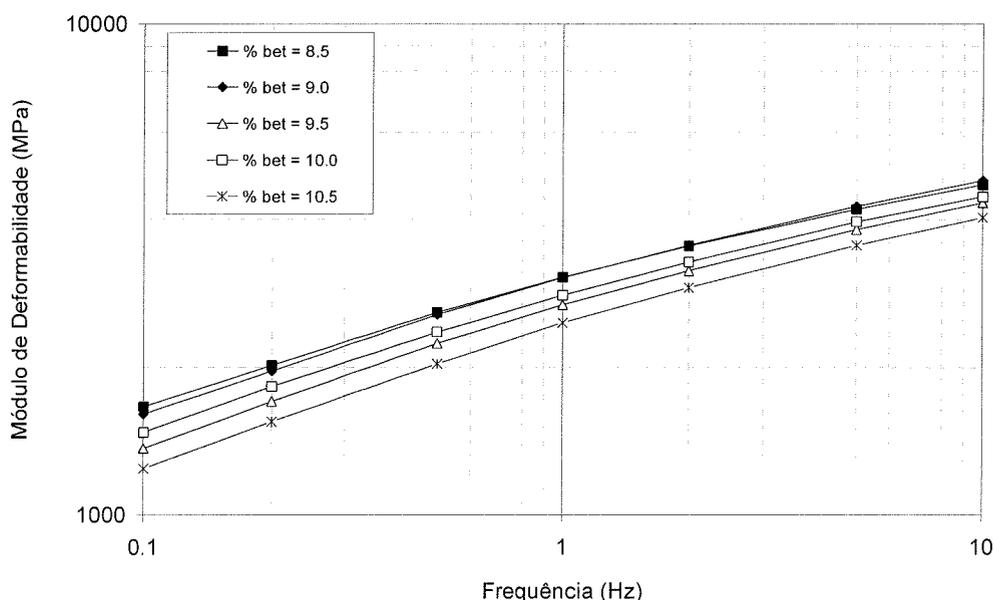
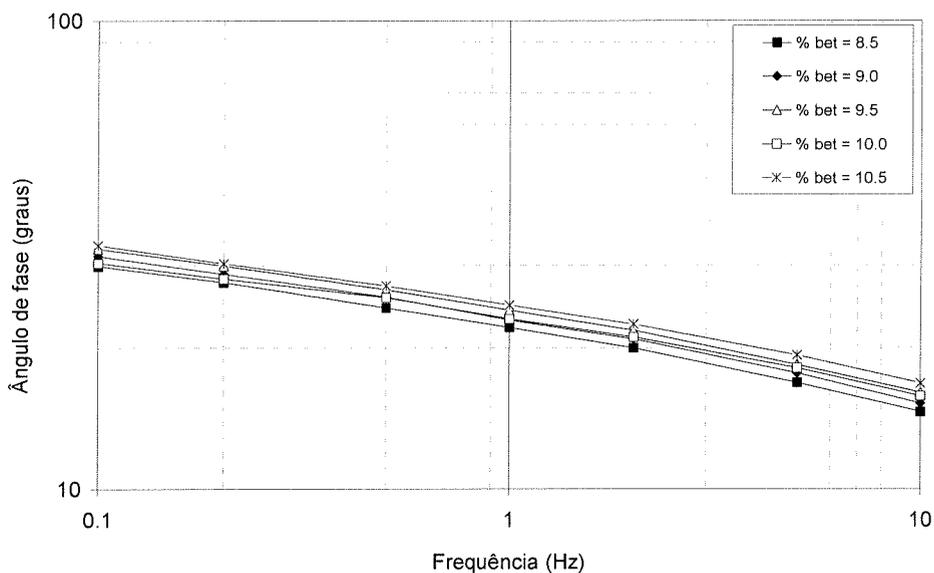


Figura 5 – Módulo de deformabilidade das misturas betuminosas

Em termos numéricos verifica-se que para 10 Hz o módulo de deformabilidade varia desde 4000 MPa para a mistura com 10.5% de betume até 4700 MPa para a mistura com 8.5% de betume, conforme se observa no Quadro 2.



**Figura 6 – Ângulo de fase das misturas betuminosas**

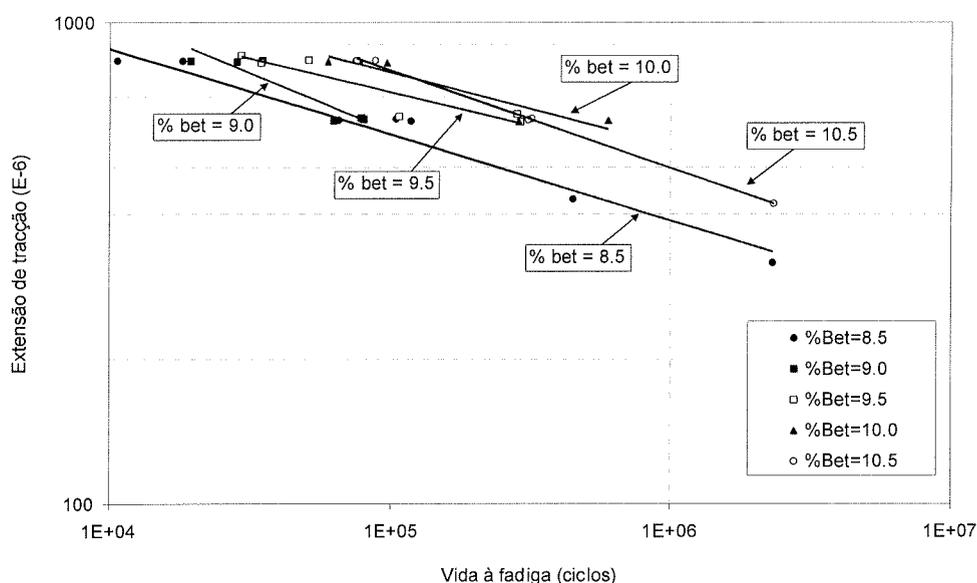
**Quadro 2 – Módulo de deformabilidade e ângulo de fase para 10 Hz**

% betume	Módulo de deformabilidade (MPa)	Ângulo de fase (°)
8.5	4703	14.6
9.0	4794	15.2
9.5	4326	16.0
10.0	4450	15.8
10.5	4035	16.8

A resistência à fadiga da mistura betuminosa 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 até 3 repetições para cada um dos 3 níveis de níveis de extensão ensaiados ( $400 \times 10^{-6}$ ,  $600 \times 10^{-6}$  e  $800 \times 10^{-6}$ ), obtidos através de um carregamento sinusoidal sem período de repouso.

Para as misturas com 9.0%, 9.5% e 10.0% de betume apenas foram aplicados dois níveis de extensão, os quais permitiram obter uma lei de fadiga com elevada precisão como se pode observar na Figura 7. A análise desta figura permite concluir que, como seria de esperar, o aumento da percentagem de betume da mistura betuminosa aumenta a resistência à fadiga.

Este facto permite que em termos de formulação da mistura betuminosa se defina a percentagem de betume de modo a que a mistura betuminosa tenha uma resistência à fadiga compatível com o tráfego que vai solicitar o pavimento. No entanto, esta escolha deve também ser baseada na resistência à deformação permanente da mistura betuminosa para assegurar que esta não apresentará cavado de rodagem excessivos para o tráfego de projecto.



**Figura 7 – Lei de fadiga das misturas betuminosas**

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 3.

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

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

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

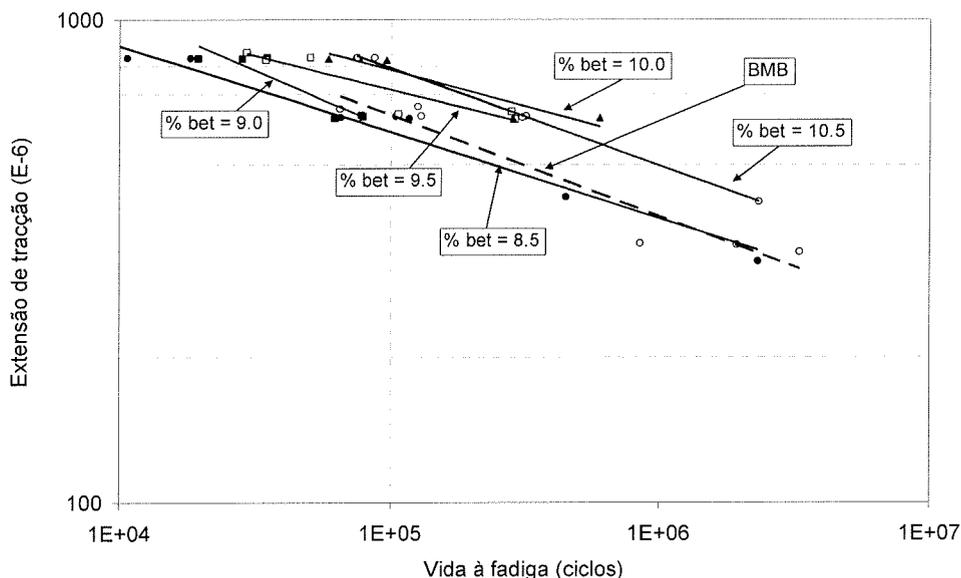
a, b = coeficientes determinados experimentalmente.

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 3.

**Quadro 3 – Coeficientes das leis de fadiga das misturas betuminosas**

% betume	a	b	R <sup>2</sup>	N <sub>100</sub>	$\varepsilon_6$
8.5	9.764E+19	5.419	0.966	1.42E+09	382
9.0	7.246E+14	3.574	0.865	5.16E+07	302
9.5	3.834E+22	6.163	0.859	1.81E+10	491
10.0	1.653E+22	5.940	0.895	2.18E+10	537
10.5	2.130E+19	4.941	0.998	2.79E+09	498

O desempenho da mistura reciclada com várias percentagens de betume foi ainda comparado com o desempenho típico das misturas com BMB verificando-se que a reciclagem permitiu obter uma mistura betuminosa com desempenho idêntico, ou até superior, ao obtido nas misturas com BMB, tal como se observa na Figura 8.



**Figura 8 – Comparação do desempenho da mistura reciclada com o típico das misturas com BMB**

## 5. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou o estudo da reciclagem de misturas betuminosas utilizando como betume de correcção um betume modificado com borracha de pneus. Durante este trabalho foram apresentados os resultados da formulação do BMB a adicionar ao fresado e das características previsíveis do ligante final da mistura reciclada.

A mistura reciclada foi caracterizada recorrendo à avaliação do módulo de deformabilidade e da resistência à fadiga para várias percentagens de betume correspondentes à formulação da mistura betuminosa reciclada.

O desempenho da mistura betuminosa reciclada apresentou-se tendencialmente melhor que o desempenho típico das misturas com BMB potenciando este tipo de reciclagem. No entanto, um estudo da resistência à deformação permanente deverá ser realizado para limitar a percentagem de betume correspondente à formulação da mistura betuminosa reciclada.