



Universidade do Minho

[CN-02]

Sousa, J.B., Fonseca, P., Freire, A.C., **Pais, J.C.**

“Comparação da vida à fadiga e deformação permanente entre misturas com betume modificado com borracha reciclada de pneus e convencionais”

10º Congresso Ibero-Latinoamericano del Asfalto, Sevilha, 1999, p. 2089-2101

10º Congreso Ibero-Latinoamericano del ASFALTO

Del
1 al 6 de
noviembre
de 1999
Sevilla
España



III

ORGANIZA
Asociación Española de la Carretera

ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE LA CARRETERA



COMPARAÇÃO DA VIDA À FADIGA E DEFORMAÇÃO PERMANENTE ENTRE MISTURAS COM BETUME MODIFICADO COM BORRACHA RECICLADA DE PNEUS E CONVENCIONAIS

Jorge B. Sousa

Director General da Consulpav, Lda.

Paulo Fonseca

Director Geral da Recipav, Lda.

Ana Freire

Laboratório Nacional de Engenharia Civil

Jorge Pais

Professor Auxiliar

RESUMO

As misturas betuminosas produzidas com betumes modificados com borracha reciclada de pneus tem demonstrado possuir uma maior resistência à fadiga e às deformações permanentes que as misturas tradicionais, levando a uma redução significativa das espessuras de camadas betuminosas. Também é reconhecido que estas misturas permitem retardar a transmissão das fendas das camadas antigas para a superfície dos reforços dos pavimentos.

Neste estudo procuraram-se quantificar em laboratório as diferenças de comportamento entre as misturas betuminosas produzidas com betumes modificados com borracha reciclada de pneus e as convencionais, tendo como base ensaios de desempenho de comportamento, tais como ensaios de fadiga e de deformações permanentes.

A mistura betuminosa com betume-borracha apresenta uma granulometria descontínua (MBD-BMB) enquanto a mistura convencional é o tipo macadame betuminoso, sendo os materiais utilizados no estudo de natureza granítica, aos quais se juntou uma pequena percentagem de cal.

1. INTRODUÇÃO

Por solicitação da RECIPAV - Engenharia e Pavimentos, Lda., a CONSULPAV - Consultores e Projectistas de Pavimentos, Lda., a Universidade do Minho e o Laboratório Nacional de Engenharia Civil efectuaram ensaios de laboratório e demais trabalhos conducentes à caracterização do comportamento à fadiga de duas misturas betuminosas: uma modificada com borra-

cha reciclada de pneus, de granulometria descontínua (MBD-BMB) e outra convencional (macadame betuminoso).

A utilização de misturas com betumes modificados com borracha reciclada de pneus tem demonstrado que estas apresentam uma performance muito superior à das misturas tradicionais. Deste modo, as especificações da Califórnia e Arizona chegam a permitir uma redução de 50% das espessuras de camadas betuminosas quando este produto é utilizado. Neste estudo procuraram-se quantificar algumas destas diferenças com base em ensaios de desempenho de comportamento.

A incorporação de borracha ao betume utilizado nas misturas betuminosas, confere-lhe uma elasticidade tal, que permite retardar a transmissão das fendas à superfície.

Em relação à ruína por fendilhamento —controlada pelo nível de extensão da camada betuminosa— é necessário tecer algumas considerações. Nesta solução construtiva o facto de aparecerem fissuras na base da camada em betume-borracha não implica a ruína do pavimento.

Para além dos aspectos já referidos, este tipo de camadas têm uma enorme capacidade de retardar o mecanismo de propagação de fissuras, essencialmente como resultado dos comportamentos reológicos e mecânicos associáveis ao ligante específico (betume—borracha).

Esta resistência acrescida tem sido largamente comprovada na experiência americana, nomeadamente no Estado do Arizona.

2. MATERIAIS

Os materiais utilizados no estudo foram granitos, aos quais se juntou uma pequena percentagem de cal.

A figura 1 apresenta uma comparação das granulometrias dos agregados utilizados no betume-borracha e no betume convencional.

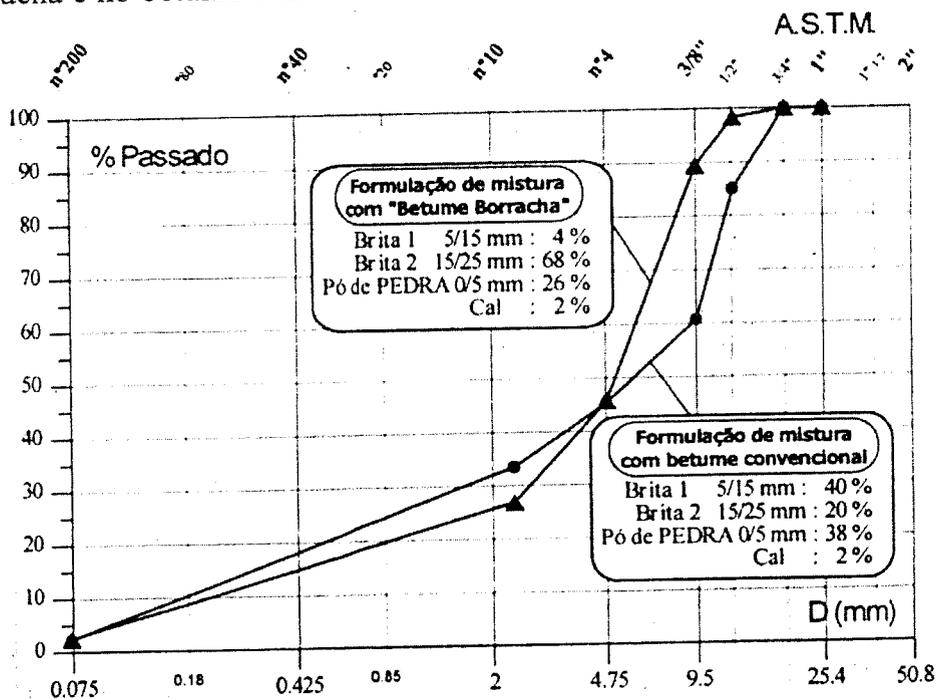


Figura 1. Comparação de granulometrias, no betume-borracha e no betume convencional.

Os betumes utilizados na confecção das misturas derivam basicamente do mesmo betume convencional PEN 35/50. No caso da mistura com betume-borracha, aquele betume foi modificado pela adição de 20% de borracha de pneus. No caso da mistura com betume convencional, foi utilizado aquele tipo de betume sem qualquer modificação.

O betume borracha foi obtido, conforme mencionado atrás, a partir do betume convencional adicionando-lhe 20% de borracha de pneus. Essa adição de borracha foi feita em misturador rotativo, à temperatura de 180 °C, respeitando um tempo de reacção de 60 minutos.

A borracha utilizada na modificação do betume é fornecida sob a forma de um granulado, cuja curva se apresenta na figura 2. Na mesma figura apresenta-se ainda o fuso dentro do qual a granulometria se deve inserir.

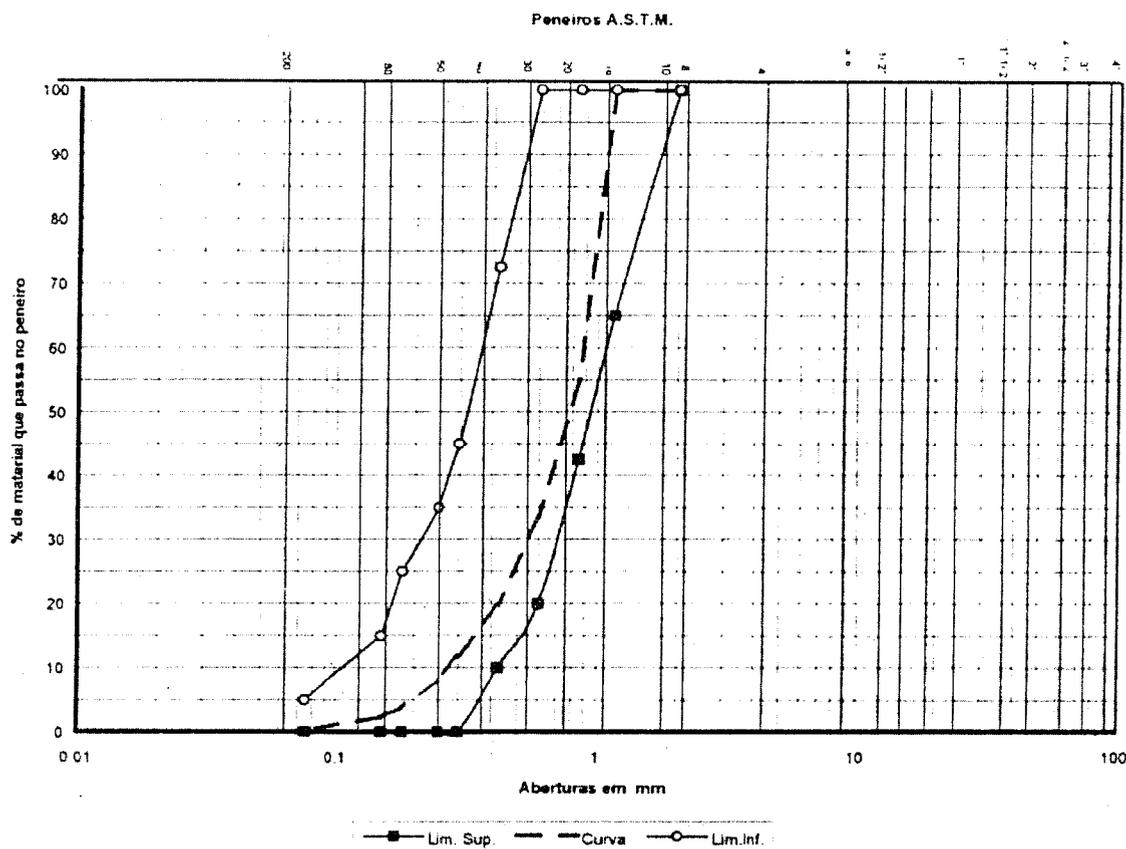


Figura 2. Curva granulométrica de borracha utilizada.

3. FABRICO DOS PROVETES

A confecção de lajes e, conseqüentemente, de provetes, foi feita em várias fases, de forma a aquilatar a repetibilidade dos resultados. Na primeira fase, foram fabricadas lajes com «betume-borracha» e com betume convencional. Na terceira fase, o estudo foi reproduzido unicamente com «betume-borracha». Foram efectuadas outras fases cujos resultados não são aqui apresentados.

É de notar que entre cada Fase mudaram-se os operadores, as lajes de onde foram carotados os provetes. O betume borracha utilizado foi fabricado especificamente para cada

Fase. Todos estes factos podem justificar qualquer variabilidade entre os resultados obtidos. Os teores de betume previstos para cada granulometria foram: 9% no caso do «betume-borracha» e 4,5% no caso do betume convencional.

A mistura dos agregados com o betume efectuou-se, em cada caso, recorrendo aos procedimentos e cuidados específicos a observar nestes trabalhos. Estão aí incluídas as operações de aquecimento prévio dos agregados durante 4 horas e do betume durante 2 horas; bem como a mistura dos componentes à temperatura de mistura e a sua colocação na estufa à temperatura de 135°C durante 4 horas, remexendo a mistura de hora a hora.

A compactação foi feita com cilindro de rasto liso de 1300 Kg de massa, em moldes aquecidos de forma a ser mantida a temperatura de compactação. Após a desmoldagem das lajes, teve lugar o corte de provetes prismáticos, com as dimensões apropriadas para cada tipo de ensaio.

Os provetes foram, de seguida, submetidos a ensaios de determinação de baridades, com e sem parafilme, assim como ao da baridade máxima teórica, por forma a determinar as respectivas porosidades.

De todos os provetes produzidos, seja com «betume-borracha», seja com betume convencional, metade foram submetidos a um processo de envelhecimento que consistiu na sua conservação em estufa, a 85 °C, durante 5 dias. Pretendeu-se com isso determinar a diferença entre o comportamento de misturas aplicadas imediatamente após o fabrico e o comportamento das mesmas misturas ao fim de um determinado tempo de serviço. Essa determinação foi posteriormente feita a partir dos ensaios de vida à fadiga.

4. ENSAIOS À FLEXÃO PARA DETERMINAÇÃO DA VIDA À FADIGA

O ensaio para avaliação do comportamento à fadiga das misturas betuminosas consiste na aplicação de uma deformação imposta a uma viga simplesmente apoiada. Os ensaios são realizados de acordo com a norma de ensaio AASHTO TP 8-94. Estes ensaios pretendem simular as agressões de tráfego a que o pavimento está sujeito durante a sua vida útil. Determina, igualmente, a vida à fadiga, o módulo de deformabilidade e o ângulo de fase de vigas betuminosas sujeitando-as a repetidas deformações, até atingirem a ruína.

O ponto de ruína por fadiga é definido como: o número de ciclos no qual a viga exhibe 50% de redução do valor do seu módulo inicial.

4.1. Resistência à Fadiga

Na figura 3 podem observar-se as rectas à fadiga obtidas para os dois materiais em estudo no Laboratório Nacional De Engenharia Civil em vigas de 100 × 100 × 500 mm³.

Da análise comparativa das rectas à fadiga obtidas para a mistura betuminosa convencional e para a mistura betuminosa do tipo «Mistura Betuminosa Descontinua com betume modificado com borracha MBD - BMB» observa-se que esta mistura apresenta um melhor comportamento à fadiga do que a verificada para a mistura betuminosa convencional.

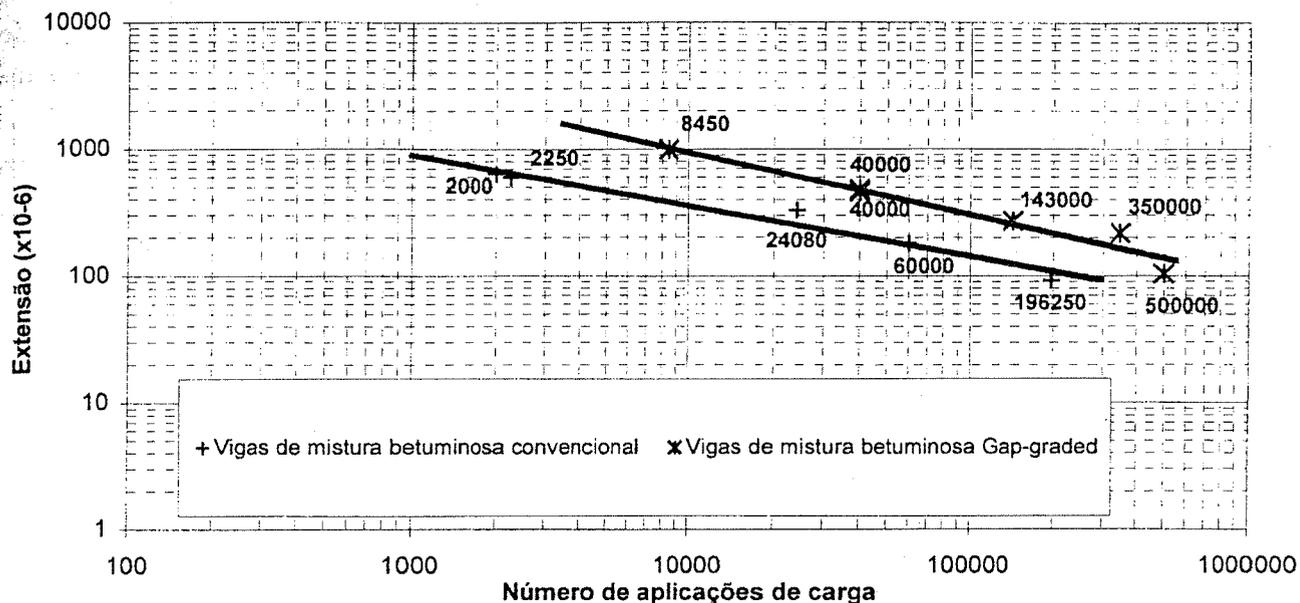


Figura 3. Rectas de fadiga obtidas para os dois materiais em estudo.

As misturas betuminosas utilizadas nos ensaios de fadiga, ensaiadas a 22 °C, foram previamente envelhecidas em laboratório, através da sua colocação em estufa a 85 °C durante 5 dias, tal como recomendado pelo programa SHRP.

Assim, para valores de extensão entre 100 e 300 × 10⁻⁶, obtêm-se, para a mistura betuminosa MBD-BMB um número de aplicações de carga cerca de 3 a 5 vezes superior ao observado para a mistura betuminosa convencional. Para extensões acima de 300 × 10⁻⁶ verifica-se que o número de aplicações de carga, para a mistura betuminosa MBD-BMB é cerca de 5 a 10 vezes superior.

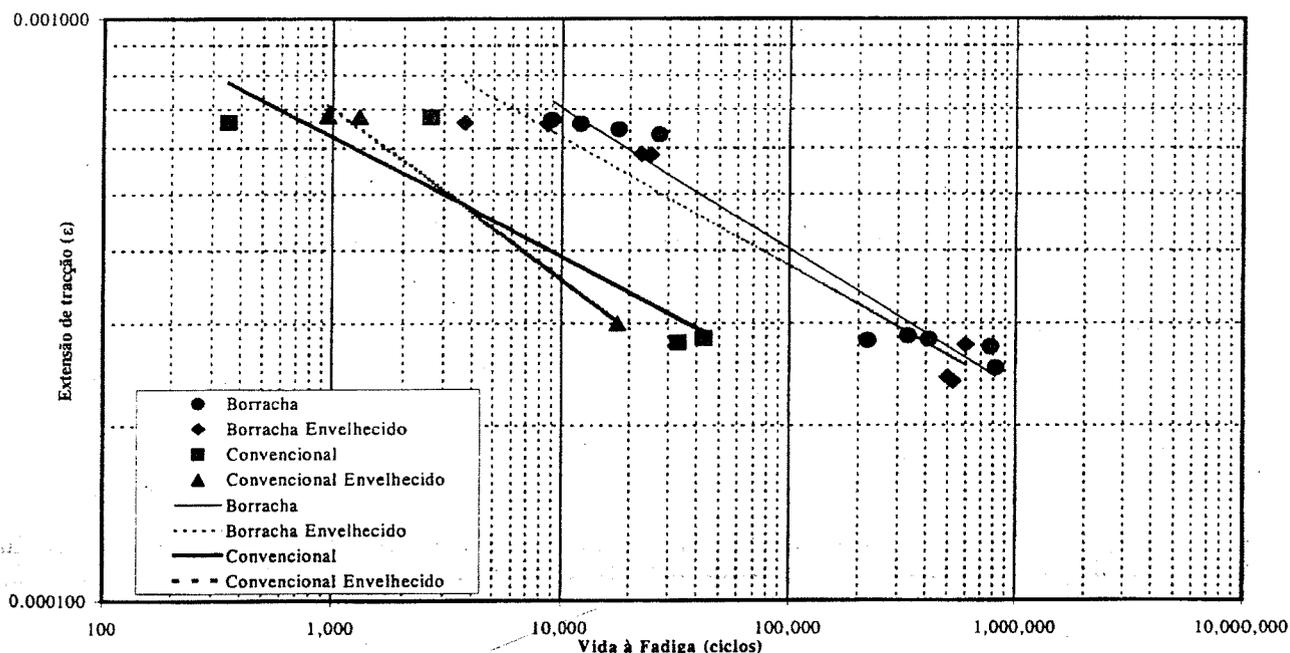


Figura 4. Comparação da performance à fadiga entre misturas com «betume -borracha» e betume convencional - Com e sem envelhecimento - 1ª Fase, efectuados a 20 °C.

Na figura 4 são apresentados os resultados obtidos nos ensaios de vida à fadiga de misturas com betume convencional e modificado, obtidos na primeira fase do estudo, utilizando misturas envelhecidas e não envelhecidas efectuados na CONSULPAV $6.3 \times 5.0 \times 380 \text{ mm}^3$.

Na figura é visível que a resistência à fadiga da mistura MBM-BMB é cerca de 10 vezes superior à da mistura de macadame betuminoso. Se bem que os ensaios tenham sido executados em flexão, com extensões controladas, os resultados são indicativos das diferenças de performance que se podem esperar para a resistência à reflexão de fendas.

Algumas das vigas foram previamente sujeitas a um envelhecimento acelerado do ligante betuminoso, para ambas as misturas. O efeito do envelhecimento das misturas é maior nas misturas convencionais do que nas misturas com betume-borracha.

Na figura 5 mostra-se o desempenho à fadiga da mistura com «betume-borracha», durante a terceira fase do estudo. Nela se pode observar uma diminuição da vida à fadiga, nos provetes submetidos a envelhecimento (como seria de esperar, e como aconteceu, de resto, durante a primeira fase do estudo).

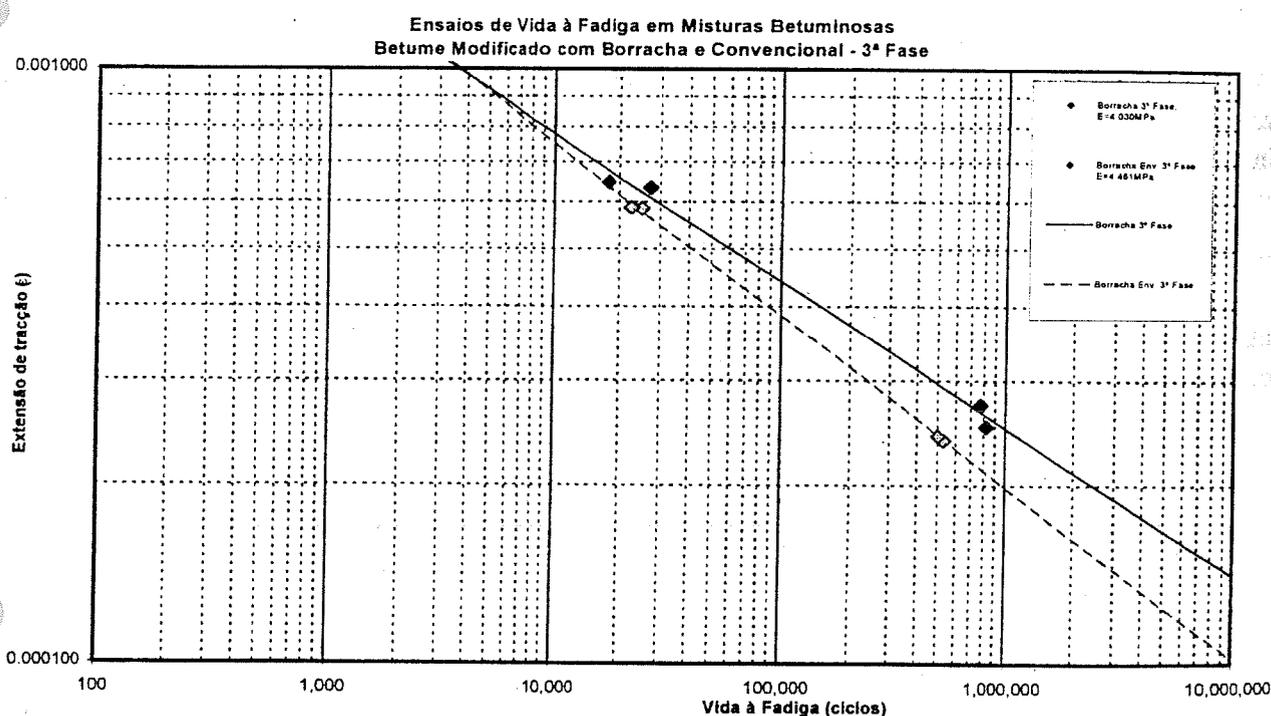


Figura 5. Comparação da performance à fadiga entre misturas com «betume-borracha», envelhecidas e não envelhecidas – 3ª Fase, efectuados a 20 °C.

4.2. Módulo de Rigidez

Nas figuras 6 e 7 dá-se conta da evolução do módulo de rigidez em função da extensão de tracção, para os casos da primeira e terceira fases resultantes dos ensaios realizados pela CONSULPAV.

Nas figuras acima é notório um ligeiro aumento do módulo de rigidez associado aos provetes que sofreram envelhecimento. Por outro lado, as misturas confeccionadas com betume

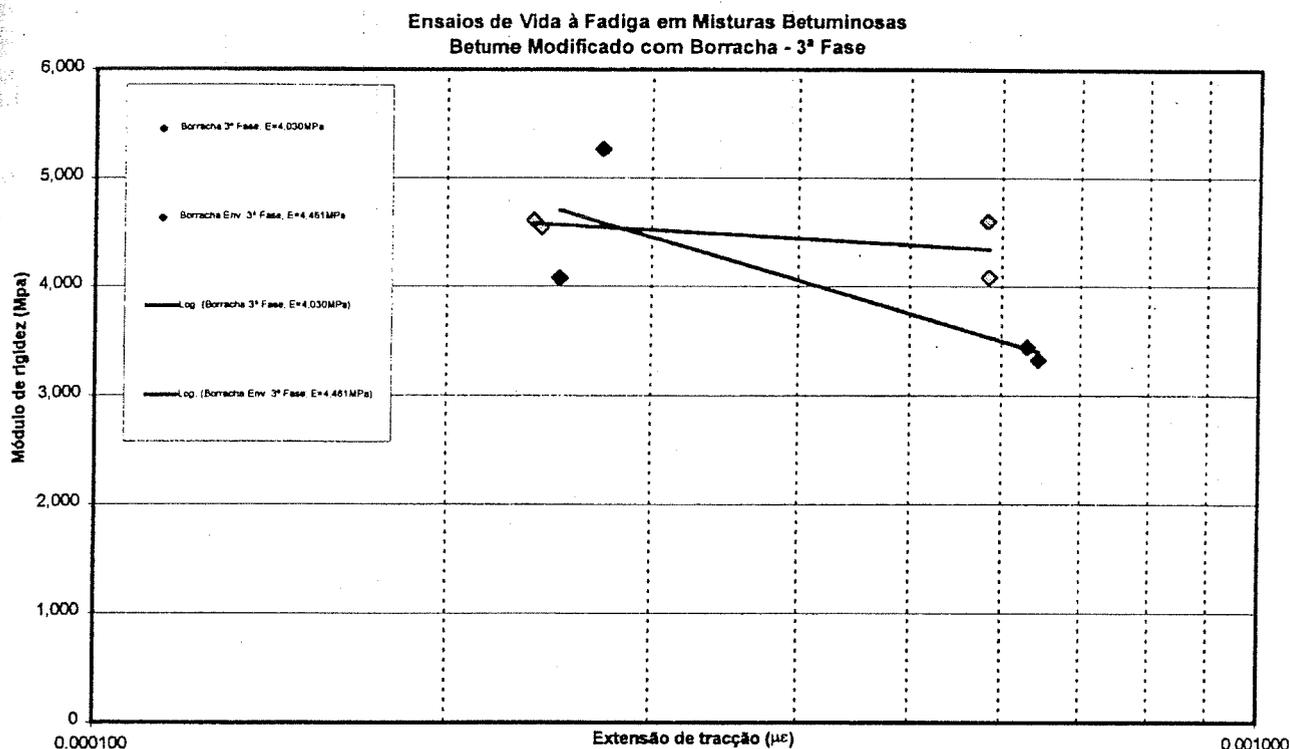


Figura 6. Evolução dos valores do módulo de rigidez. 1.ª fase, efectuados a 20 °C.

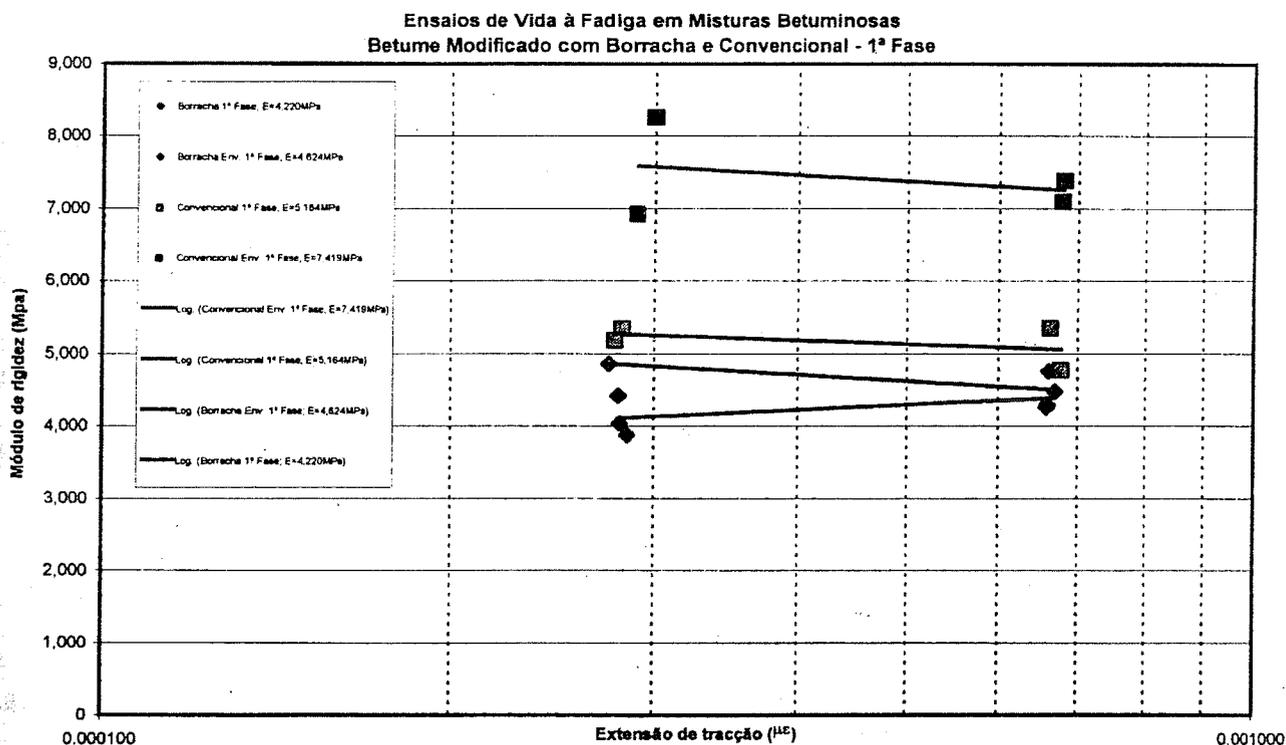


Figura 7. Evolução dos valores do módulo de rigidez. 3.ª fase, efectuados a 20 °C.

convencional aparentam uma maior constância do valor do módulo, em função da extensão de tracção, do que as misturas confeccionadas com «betume-borracha».

4.3. Ângulo de Fase

As figuras 8 e 9 mostram o comportamento do ângulo de fase em relação à extensão de tracção imposta durante o ensaio.

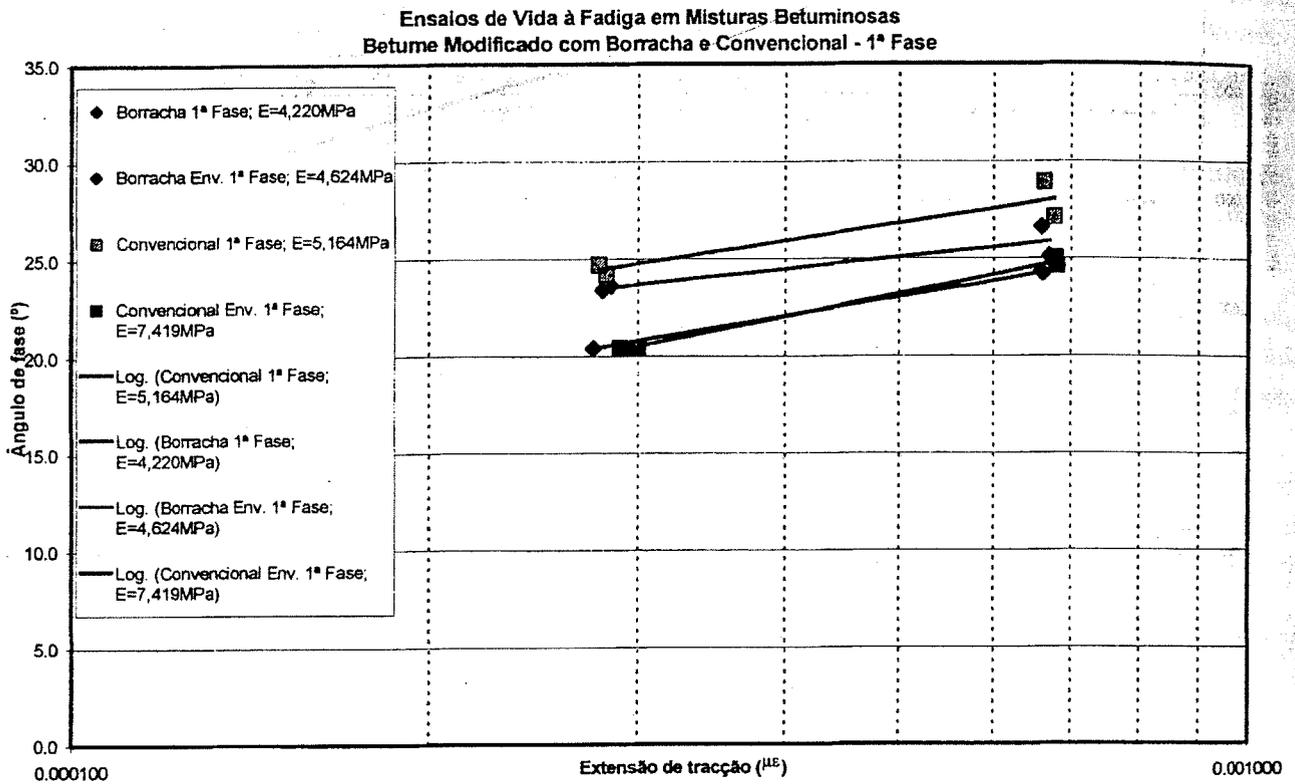


Figura 8. Evolução dos valores do ângulo de fase – 1ª Fase, efectuados a 20 °C.

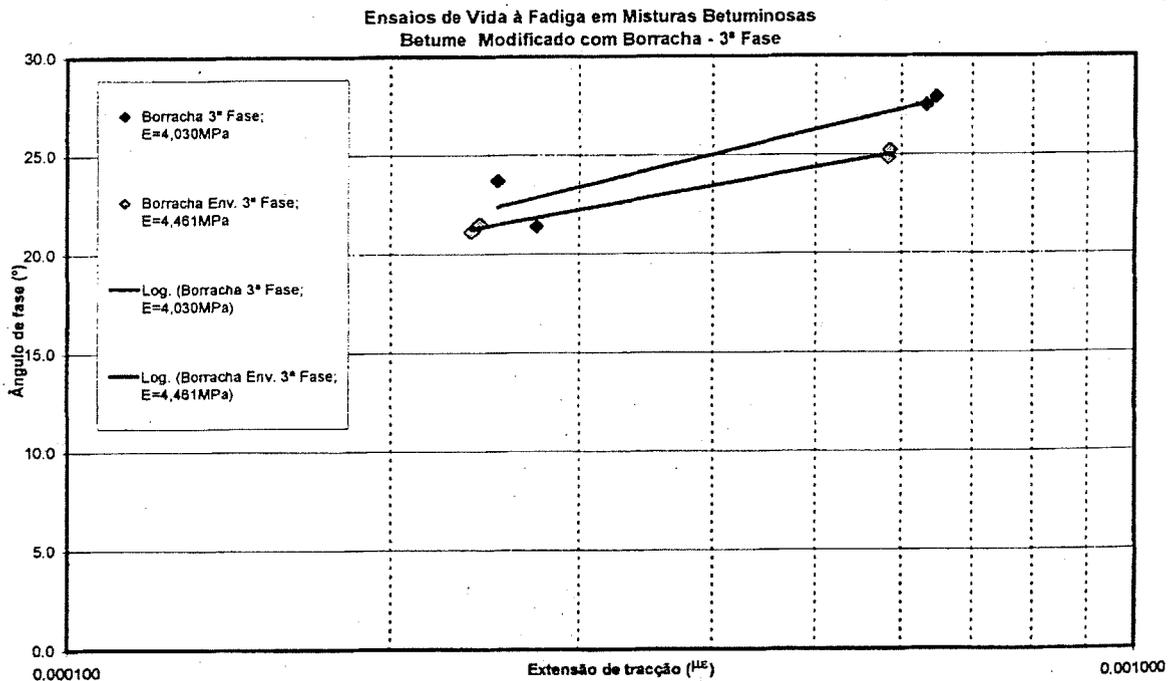


Figura 9. Evolução dos valores do ângulo de fase – 3ª Fase, efectuados a 20 °C.

Nestas figuras observa-se um abaixamento dos valores assumidos pelo ângulo de fase, nas misturas sujeitas ao processo de envelhecimento relativamente às misturas não envelhecidas.

As leis de variação do parâmetro apresentam comportamentos sensivelmente semelhantes, independentemente do facto de se tratar de misturas com «betume-borracha» ou com betume convencional, envelhecidas ou não envelhecidas.

5. ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DA RESISTÊNCIA À DEFORMAÇÃO PERMANENTE

5.1. Ensaio de Simulação de Tráfego

O procedimento de ensaio adoptado é o constante da Norma de ensaio NLT-173/84 - *Resistencia a la deformación plástica de las mezclas bituminosas mediante la pista de ensayo de laboratorio*. Estes ensaios foram efectuados no LNEC.

O provete, com $300 \times 300 \times 50$ mm, compactado por vibro-compressão superficial durante 4,75 s, estando colocado dentro do molde é, posteriormente, inserido na máquina de ensaio, a qual está dentro de uma câmara de temperatura controlada.

O ensaio inicia-se após o condicionamento da câmara e do provete durante 4 horas a 60°C .

Procede-se à aplicação do carregamento, a velocidade constante, e medição do valor do cavado de rodeira após 1, 3, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 60, 75, 90, 105, e 120 minutos.

Os resultados apresentados neste estudo correspondem a velocidades de deformação verificadas entre os 120 e os 105 ($v_{105/120}$) minutos.

No presente estudo procedeu-se à moldagem de dois conjuntos de três provetes, sendo um dos conjuntos com a mistura betuminosa convencional (com a identificação CLTPi) e o outro com a mistura betuminosa MBD-BMB (com a identificação RLTPi).

Os valores das baridades obtidos para o conjunto de provetes de mistura betuminosa convencional (CLTP1, CLTP2, CLTP3), variam de 2,289 a 2,292 g/cm^3 . Aos valores da baridade máxima teórica obtidos para esta mistura (2,429 g/cm^3), correspondem valores de porosidade de cerca de 5,7%.

No que respeita à mistura betuminosa MBD-BMB, os valores das baridades variam de 2,151 a 2,160 g/cm^3 , tendo-se obtido porosidades médias de 5,6%.

De acordo com a Norma de ensaio NLT-143/74, o grau de compactação dos provetes para ensaio deve ser, no mínimo, 97% do valor da baridade de referência obtida no Ensaio Marshall. Em virtude de, no presente estudo, não se ter aquele valor, efectuou-se a comparação com o valor da baridade máxima teórica das duas misturas betuminosas em estudo (sendo de aceitar valores superiores a 92%), tendo-se obtido, para a mistura betuminosa convencional um grau de compactação de 94,3%, e para a mistura betuminosa MBD - BMB um valor de 94,0%.

No quadro 1 podem observar-se os resultados obtidos no ensaio de simulação dos seis provetes ensaiados.

Quadro 1: Resultados dos ensaios de simulação

Identificação das amostras		Resultados obtidos	
Mistura betuminosa tradicional	CLTP1	V105/120=4x10 ⁻³ mm/min	Valor médio 5,3x10 ⁻³ mm/min
	CLTP2	V105/120=4x10 ⁻³ mm/min	
	CLTP3	V105/120=8x10 ⁻³ mm/min	
Mistura betuminosa MBD - BMB	RLTP1	V105/120=7x10 ⁻³ mm/min	Valor médio 8,6x10 ⁻³ mm/min
	RLTP2	V105/120=10x10 ⁻³ mm/min	
	RLTP3	V105/120=9x10 ⁻³ mm/min	

A figura 10 apresenta a variação de deformação obtida no decorrer dos vários ensaios realizados.

Os resultados obtidos para o ensaio de simulação de tráfego permitem tecer as seguintes considerações:

- i) Os valores de velocidade de deformação obtidos para a mistura betuminosa convencional (CLTP1, CLTP2 e CLTP3) variam entre 4 e 8 × 10⁻³ mm/min;
- ii) A velocidade de deformação verificada nos três provetes de mistura betuminosa MBD - BMB são bastante similares, variando entre 7 e 10 × 10⁻³ mm/min;
- iii) O valor médio de v105/120 obtido para a mistura betuminosa MBD-BMB é superior ao verificado para a mistura betuminosa convencional;

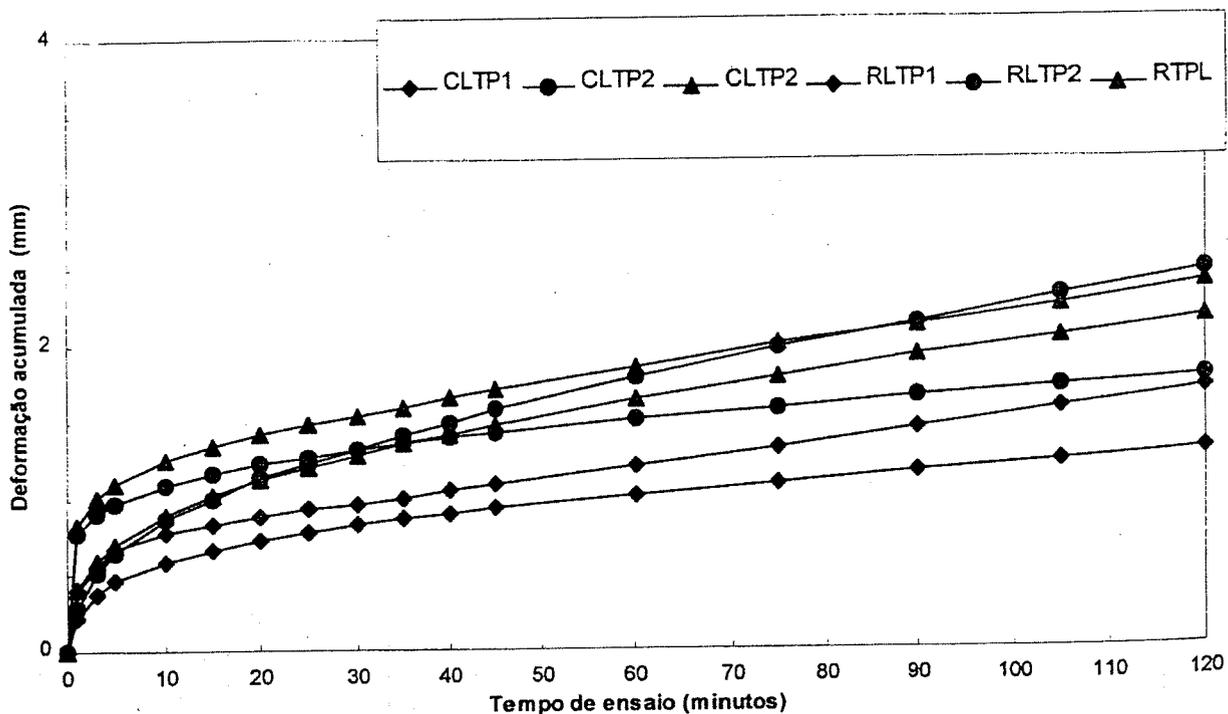


Figura 10. Evolução da deformação em ensaio de simulação.

- iv) Os valores limites propostos pela D.G. Carreteras (Espanha), para análise dos resultados deste ensaio, dependem da intensidade do tráfego e da zona climática. Para as condições mais desfavoráveis, correspondentes a classes de tráfego T0, T1 e zona climática quente, o valor limite considerado para $v_{105/120}$ é de 15×10^{-3} mm/min. Observa-se assim que os resultados obtidos para as duas misturas em estudo cumprem aquele valor.

5.2. Ensaio de Corte a Altura Constante

Foram realizados, pelo Laboratório de Engenharia Civil da Universidade do Minho, ensaios para avaliação do comportamento às deformações permanentes de duas misturas betuminosas, uma com um betume convencional e outra com um betume-boracha.

Para obtenção do comportamento às deformações permanentes das misturas betuminosas referidas, foram entregues à Universidade do Minho 8 provetes cilíndricos com 15 cm de diâmetro e 5 cm de espessura, 4 referentes a cada mistura, para ensaios de corte.

As deformações permanentes dos materiais utilizados nos pavimentos resultam da aplicação repetida das cargas, resultando em depressões longitudinais nas rodeiras dos veículos, acompanhadas normalmente por elevações laterais. Estas rodeiras podem ser de pequeno raio, quando resultam principalmente da contribuição das camadas betuminosas, ou de grande raio, no caso de resultarem da contribuição das camadas granulares, incluindo a fundação.

Este fenómeno ocorre devido à densificação (diminuição de volume à custa da redução do volume de vazios e re-arranjo do esqueleto sólido) e às deformações por corte que ocorrem nas camadas do pavimento, incluindo a fundação. As deformações por corte verificam-se após a densificação total dos materiais e ocorrem sem alteração do volume de material. A resistência das misturas betuminosas às deformações permanentes pode ser avaliada pela resistência exibida a esforços de corte sem variação de volume.

Este ensaio é realizado sobre provetes cilíndricos com 15 cm de diâmetro por 5 cm de espessura, aplicando-se, de uma forma repetitiva, um esforço de corte de 70 kPa durante 0.6 s seguido de um período de repouso de 0.1 s. O ensaio é realizado à temperatura média das 7 maiores temperaturas diárias verificadas no pavimento a uma profundidade de 5 cm.

O ensaio permite obter a lei constitutiva do material, em termos de resistência ao corte, ou seja, a lei de variação da extensão plástica de corte com o número de ciclos de carga, tal como se apresenta na Equação 1.

$$EPC = a * Ciclos^b \quad [1]$$

sendo: EPC = Extensão Plástica de Corte;

$Ciclos$ = Número de ciclos de carga;

a, b = Coeficientes função da mistura betuminosa.

A resistência da mistura betuminosa às deformações permanentes é obtida utilizando as Equações 2 e 3 que relacionam, respectivamente, a profundidade de rodeira com a extensão

plástica de corte e o número de eixos de 80 kN que a mistura suporta com o número de ciclos necessários à obtenção da extensão plástica de corte.

$$\text{Profundidade de Rodeira (mm)} = 294 * \text{Extensão Plástica de Corte} \quad [2]$$

$$\log (\text{Ciclos}) = - 4.36 + 1,24 \log (\text{Eixos de 80 kN}) \quad [3]$$

O valor da resistência da mistura betuminosa às deformações permanentes é obtida pela média dos valores dos ensaios realizados.

Os ensaios para avaliação da resistência às deformações permanentes das misturas betuminosas foram realizados recorrendo a ensaios de corte, a altura constante, sobre provetes cilíndricos. Os ensaios foram realizados a 53 °C tendo-se ensaiado 4 provetes para cada mistura.

Os resultados dos ensaios laboratoriais, em termos de número de eixos-padrão de 80 kN, necessários para produzir uma profundidade de rodeira de 12.5 mm, encontram-se figura 11.

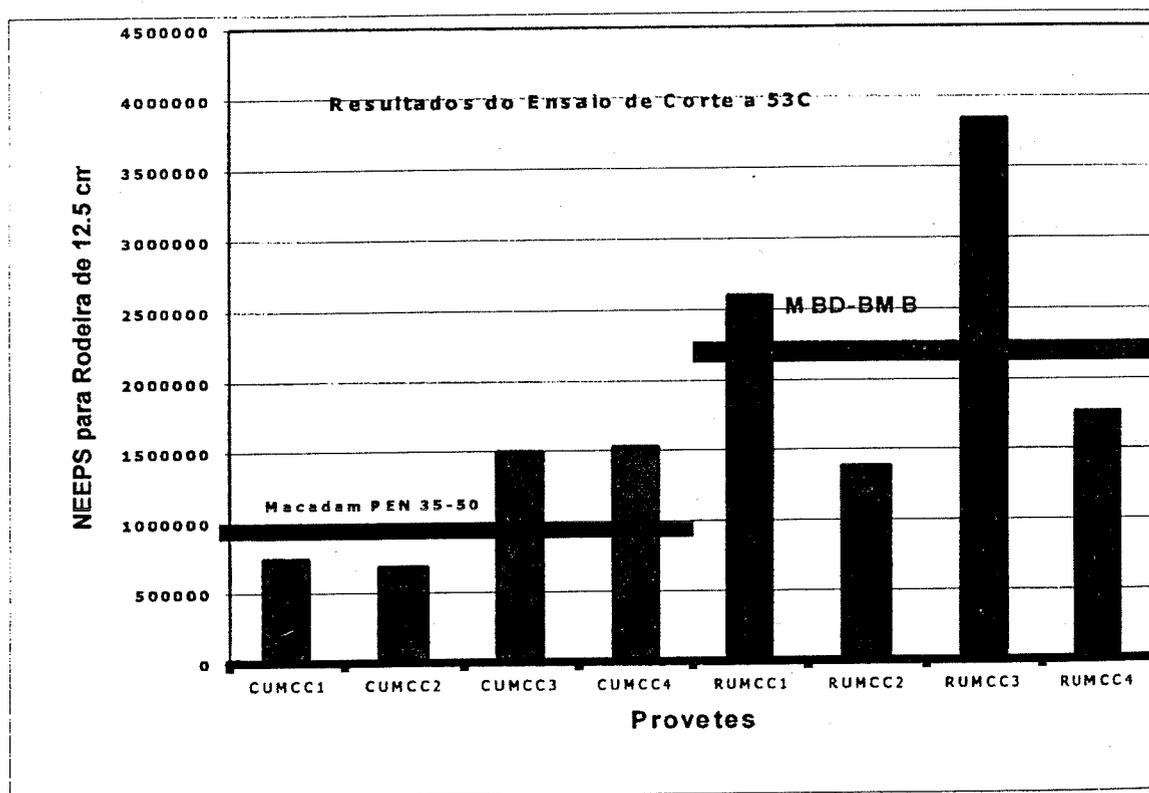


Figura 11. Comparação da resistência ao corte da mistura convencional e com betume borracha.

O valor médio dos ensaios, em escala logarítmica, permite concluir que a mistura betuminosa com betume convencional apresenta uma deformação permanente de 12.5 mm para 1.1E + 06 eixos-padrão de 80 kN, enquanto que, a mistura betuminosa com betume-borracha apresenta uma deformação permanente de 12.5 mm para 2.4E + 06 eixos-padrão de 80 kN,

6. CONCLUSÕES

Após a realização de ensaios laboratoriais de caracterização do módulo de deformabilidade, do comportamento à fadiga e às deformações permanentes de duas misturas betumino-

sas, uma convencional (macadame betuminoso) com um betume do tipo 50/70 e outra do tipo MBD - BMB, onde o ligante é constituído por um betume modificado com borracha BMB podem apresentar-se as seguintes considerações:

- A realização de ensaios de flexão de provetes prismáticos, simplesmente apoiados, permitiu avaliar o módulo de deformabilidade das duas misturas betuminosas os módulos de deformabilidade médios, obtidos nos ensaios à flexão efectuados à mistura convencional, são ligeiramente superiores aos verificados para as vigas com mistura betuminosa com Betume-Borracha.
- O comportamento à fadiga da mistura «betume borracha» é superior ao obtido para a mistura betuminosa convencional, para certas condições de ensaio chega a ser até 10 vezes superior.
- O comportamento da mistura betuminosa «betume-borracha» às deformações permanentes, avaliado através do ensaio de simulação de tráfego, é ligeiramente inferior ao observado para a mistura betuminosa convencional: o valor médio de $v_{105/120}$ obtido para a mistura betuminosa MBD - BMB ($8,6 \times 10^{-3}$ mm/min) é superior ao verificado para a mistura betuminosa convencional ($5,3 \times 10^{-3}$ mm/min); as duas misturas betuminosas estudadas cumprem o valor limite de $v_{105/120}$ considerado pela D.G. Carreteras (15×10^{-3} mm/min).
- O valor médio em escala logarítmica dos ensaios de corte a altura constante permite concluir que a mistura betuminosa com betume convencional apresenta uma deformação permanente de 12,5 mm para $1,1E + 06$ eixos-padrão de 80 kN, enquanto que, a mistura betuminosa com betume-borracha, apresenta uma deformação permanente de 12,5 mm para $2.4E + 06$ eixos-padrão de 80 kN.

Pode-se pois, de um modo geral, concluir que as misturas com borracha reciclada de pneus apresentam resistências á fadiga e envelhecimento muito superiores às misturas convencionais. Os ensaios de deformação permanente efectuados indicam diferentes ordenamentos consoante o tipo de ensaio.

BIBLIOGRAFÍA

- Ana Cristina, F. O. R.: Freire e Luís M. Quaresma, Ensaio para caracterização de uma mistura betuminosa com o producto BMB, laboratório nacional de engenharia civil, Departamento de Vias de Comunicação, Núcleo de Pavimentos Rodoviários, Proc. 92/72/11067, agosto de 1999.
- Jorge, B. S., e Bastos Diniz: Caracterização laboratorial de «Asphalt rubber» com borracha de pneus relatório n.º est 90-07, Consulpav, Consultores e Projectistas de Pavimentos, setembro de 1999.
- Jorge, C. P., e Paulo A. A. Pereira: Estudo Comparativo do Comportamento às Deformações Permanentes de uma Mistura Betuminosa Convencional com uma Mistura Contendo Borracha, Universidade do Minho, Guimarães, 3 de setembro de 1999.