

DESEMPENHO DE MISTURAS BETUMINOSAS COM BETUME MODIFICADO COM BORRACHA ATRAVÉS DO PROCESSO HÚMIDO

Liseane Fontes¹; Glicério Trichês²; Paulo Pereira³; Jorge Pais⁴

¹ Doutoranda, lisefontes@matrix.com.br

² Professor, ecv1gtri@ecv.ufsc.br

^{1,2} Universidade Federal de Santa Catarina, Rua João Pio Duarte Silva s/n – Córrego Grande. Florianópolis/SC 88049-970 Brasil

³ Professor Catedrático, ppereira@civil.uminho.pt

⁴ Professor Auxiliar, jpais@civil.uminho.pt

^{3,4} Universidade do Minho, Campus de Azurém, 4800-058 Guimarães, Portugal

Este trabalho apresenta os resultados da avaliação de desempenho mecânico de misturas betuminosas produzidas com betume modificado com borracha de pneus usados através do processo húmido, utilizando o sistema *terminal blend* e o sistema *continuous blend*. Os betumes modificados com borracha através dos dois sistemas foram caracterizados através dos seguintes ensaios: (i) penetração; (ii) ponto de amolecimento (método anel e bola); (iii) resiliência; (iv) viscosidade Brookfield. A avaliação do comportamento mecânico das misturas betuminosas inclui a resistência à fadiga, através do ensaio de flexão em quatro pontos e da deformação permanente utilizando o ensaio de corte simples repetido à altura constante (RSST-CH). Para este estudo foram produzidas misturas betuminosas com dois tipos de granulometria: (i) granulometria densa (Instituto do Asfalto Faixa IV) com betume borracha *terminal blend*; (ii) granulometria descontínua tipo *gap graded* (Caltrans ARHM-GG), com betume borracha *continuous blend*. As misturas com betume borracha foram comparadas com a mistura de referência denominada concreto asfáltico usinado a quente (DNIT 031/2006), preparada com betume convencional. Os resultados mostraram que a mistura com betume modificado com borracha através do sistema *terminal blend* apresentou o melhor desempenho, com maior vida à fadiga e maior resistência às deformações permanentes.

Palavras chave: betume borracha, fadiga, deformação permanente

1. INTRODUÇÃO

A geração de resíduos sólidos, na qual constam os pneus usados, constitui um grave problema ambiental que afecta a qualidade de vida. A crescente industrialização e o desenvolvimento dos países promoveram o aumento do número de veículos nas estradas, gerando milhões de pneus usados e conseqüentemente o problema do destino final deste resíduo.

A incorporação de granulado de borracha em misturas betuminosas pode ser feita através de dois processos, o húmido (*wet process*) e o seco (*dry process*). No processo húmido, a borracha granulada é adicionada ao betume convencional produzindo um novo tipo de betume denominado betume-borracha. O processo húmido engloba ainda dois sistemas de produção de betume-borracha que são o *continuous blend* e o *terminal blend*. No processo seco, as partículas de borracha são utilizadas em substituição de parte dos agregados pétreos.

Diversos autores ressaltam os benefícios da utilização de misturas betuminosas com betume-borracha em relação ao betume convencional (Roberts et al., 1989; Hicks, 2002; Caltrans, 2003; Baker et al., 2003) proporcionando:

- maior resistência ao fendilhamento;
- melhor resistência ao envelhecimento e oxidação;
- melhoria da resistência à fadiga e propagação de fendas;
- maior resistência à deformação permanente;
- redução do efeitos de projecção de água (*splash* e *spray*) durante as chuvas;
- redução dos custos de conservação considerando o melhor desempenho do pavimento;
- economia de energia e de recursos naturais através da utilização de materiais reaproveitados.

No Brasil, a partir da década de 90, o Centro de Pesquisas da Petrobrás (CENPES) e algumas universidades começaram a investigar o comportamento do betume modificado com borracha. Actualmente, além das investigações conduzidas em universidades e centros de investigação, o Brasil possui uma avançada tecnologia de produção do betume-borracha através do sistema *terminal blend*.

Em 1999, a Administração Rodoviária Portuguesa aprovou o uso de misturas betuminosas utilizando betume-borracha para reabilitação, em estradas nacionais, de camadas de desgaste. O betume modificado foi produzido através do processo *continuous blend*, com misturas betuminosas de granulometria do tipo *gap graded*, aplicadas com diversas espessuras (Antunes et al., 2000).

Este trabalho trata da utilização de borracha de pneus usados como modificador das características do betume para produção de misturas betuminosas através do processo húmido, contemplando os sistemas *continuous blend* e *terminal blend*. As granulometrias utilizadas foram do tipo *dense graded* e *gap graded*. As misturas betuminosas foram avaliadas através de ensaios de desempenho à fadiga e deformação permanente.

Os ensaios foram realizados na Universidade do Minho em Portugal, em cooperação com a Universidade Federal de Santa Catarina. Os materiais betuminosos e a borracha de pneus são de procedência brasileira. Os agregados utilizados na produção das misturas betuminosas são de procedência portuguesa.

2. BORRACHA DE PNEUS USADOS

A obtenção da borracha granulada de pneus utilizada na modificação de betumes é realizada através de dois processos, o ambiente e o criogénico. No processo ambiente, o corte e a moagem dos pneus é realizado à temperatura ambiente, enquanto que no processo criogénico a temperatura de moagem é inferior a 120 °C negativos.

A borracha de pneus utilizada neste trabalho é proveniente do processo ambiente, sendo denominada borracha micronizada.

Em geral, as partículas de borracha produzidas no processo ambiente possuem elevada superfície específica, com aparência esponjosa, forma irregular, textura áspera (RRI, 2006; Reschner, 2006).

O ensaio de granulometria à borracha utilizada neste trabalho foi realizado de acordo com a norma ASTM C 136 (1996), adaptada com as recomendações constantes no *Greenbook* (2000), secção 203. A Figura 1 apresenta a curva granulométrica da borracha ambiente e a especificação granulométrica, de acordo com o *Arizona Department of Transportation, Rubber Type B* (ADOT Construction Manual Section 1009, 2005).

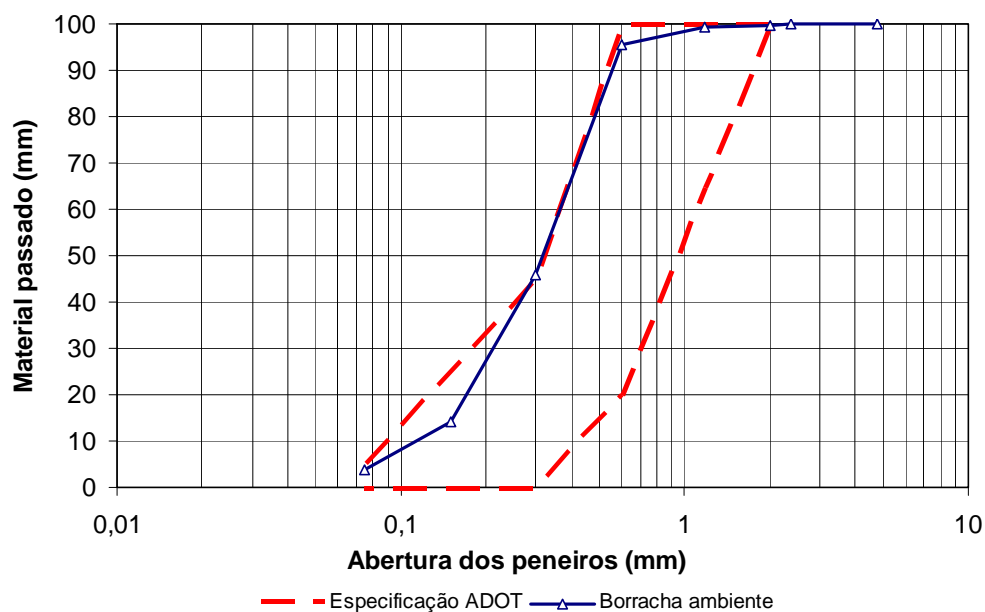
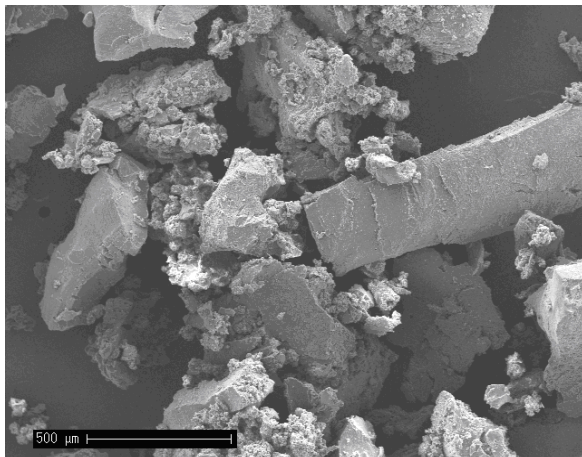


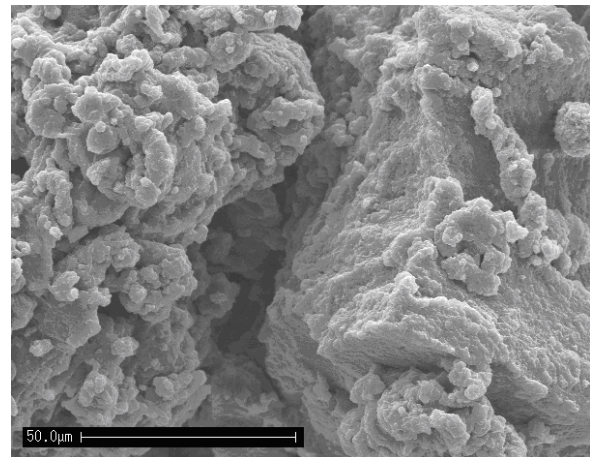
Figura 1 – Curva granulométrica da borracha ambiente

A granulometria da borracha possui um efeito relevante nas propriedades do betume modificado com borracha. As partículas grossas de borracha aumentam a viscosidade do produto final, betume-borracha, enquanto que, partículas finas, principalmente com percentagem de partículas que passam no peneiro nº 50 (0,30 mm), resultam em um menor tempo de digestão (Caltrans, 2005).

A análise da morfologia e da micro-estrutura dos grãos de borracha foi realizada através da microscopia electrónica por varrimento (MEV), como mostra a Figura 2.



(a) aumento de 50 vezes



(b) aumento de 700 vezes

Figura 2 – Morfologia da borracha ambiente através do MEV

3. PROCESSOS *CONTINUOUS BLEND* E *TERMINAL BLEND*

A introdução do granulado de borracha no betume quente faz com que a borracha reaja, e, ao mesmo tempo, absorva e fixe os maltenos que constituem uma das fracções voláteis e aromáticas do betume convencional. A fixação deste constituinte ao betume modificado permite obter um significativo aumento na resistência ao envelhecimento nas misturas betuminosas (Recipav, 2004).

A reacção entre o betume e a borracha é influenciada pelos seguintes factores: (i) temperatura da mistura; (ii) tempo de digestão; (iii) quantidade de borracha incorporada; (iv) tipo do misturador mecânico; (v) tamanho e textura da borracha (TFHRC, 2005).

O tempo de digestão ou de reacção é o termo utilizado para descrever o tempo necessário para promover a interacção entre o betume e o agente modificador, a borracha, quando misturadas a elevadas temperaturas (Caltrans, 2003).

O betume-borracha do tipo *continuous blend* é produzido em um sistema projectado para este fim junto à central de produção de misturas betuminosas, onde o produto é utilizado imediatamente após a sua produção, podendo ser armazenado até no máximo por um período de quatro horas após a sua produção.

No tipo *terminal blend*, a modificação física, reológica e química do betume convencional é realizada através de um adequado processo de fusão por meio de agitação mecânica e digestão térmica em moinhos de corte devidamente controlada que resulta em um produto uniforme e estável. Os betumes-borracha *terminal blend* possuem estabilidade ao armazenamento, podendo ser transportados para a obra, sem perda das suas características.

4. AGREGADOS E GRANULOMETRIAS

Os agregados pétreos, graníticos britados, utilizados neste trabalho foram provenientes de uma pedreira localizada no norte de Portugal. Um filer calcário calcítico foi adicionado à mistura para satisfazer às exigências granulométricas. Os resultados da caracterização dos agregados (ensaios físicos e mecânicos) são apresentados no Quadro 1. Os valores entre parêntesis referem-se ao valor máximo definido nas especificações para o ensaio em questão.

Quadro 1 – Ensaios físicos e mecânicos dos agregados

Ensaio	Norma	Resultado	
		Brita 4/10	Brita 6/12
Ensaio Los Angeles (%)	ASTM C 131/89	-	26 (30)
Índice de Lamelação (%)	BS 812	23 (25)	12 (25)
Índice de Alongamento (%)	BS 812	23 (25)	17 (25)
Massa específica (g/cm ³)	NP EN 581	2,65	2,66
Absorção de britas (%)	NP EN 581	1,24	0,88
Massa específica de areias (g/cm ³)	NP EN 954	2,61	
Absorção de água das areias (%)	NP EN 954	0,41 (2,0)	
Valor do Azul-de-metileno	NP EN 933-9	0,2 (0,8)	
Equivalente de areia (%)	NP EN 933-8	60 (60)	

A mistura *dense graded* com betume-borracha do tipo *terminal blend* foi produzida de acordo com a especificação *Asphalt Institute* tipo IV (AI, 1989). A mistura *gap graded*, na qual foi utilizado o betume do tipo *continuous blend* foi a especificada pelo *California Department of Transportation* (Caltrans), tipo ARHM-GG mix (*Asphalt Rubber Hot Mix Gap Graded*), de acordo com o *Standard Special Provisions, SSP 39-400* (Caltrans, 2003).

A mistura convencional de referência, usualmente utilizada no Sul Brasil, seguiu as especificações do DNIT, como sendo o Concreto Asfáltico Usinado a Quente Faixa “C” (DNIT 031/2006 – ES).

A Figura 3 apresenta as curvas granulométricas Caltrans, DNIT e AI utilizadas neste trabalho.

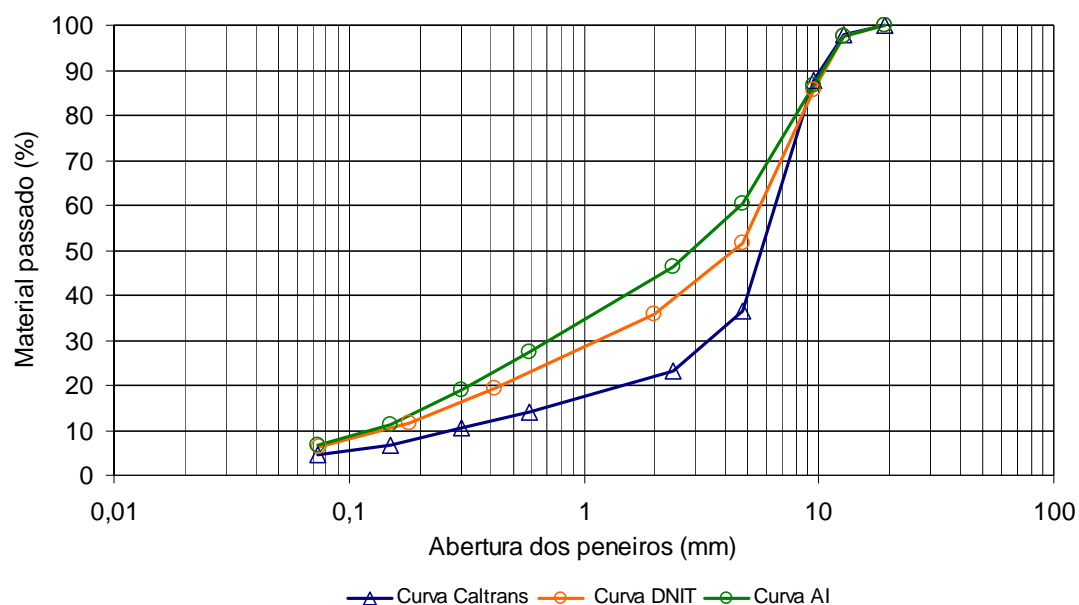


Figura 3 – Curvas granulométricas estudadas

5. BETUMES CONVENCIONAL E COM BORRACHA

O betume convencional de procedência brasileira utilizado para produção do betume-borracha *continuous blend* e *terminal blend* foi o CAP-50/70, de acordo com a especificação do Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes do Brasil (DNIT 095/2006 – EM). O Quadro 2 apresenta a caracterização deste ligante, encontrando-se entre parêntesis os valores máximos/mínimos definidos nas especificações para o ensaio em questão.

Assim como o betume convencional CAP-50/70, o betume-borracha do tipo *terminal blend* também é proveniente do Brasil. Estes ligantes foram transportados para

Portugal em latas de 20 litros. O betume-borracha *continuous blend* foi otimizado e produzido em laboratório, com materiais brasileiros (betume e borracha).

Quadro 2 – Características do CAP-50/70 (classificação por penetração)

Ensaio	Norma	Resultado
Penetração* (0,1 mm)	ASTM D 5	51,5 (50 a 70)
Ponto de amolecimento** (°C)	ASTM D 36	51,5 (50 mín.)
Viscosidade Brookfield*** (cp) a 135 °C	AASHTO TP 48	580 (mín. 274)
Viscosidade Brookfield*** (cp) a 150 °C	AASHTO TP 48	150 (mín. 112)
Viscosidade Brookfield*** (cp) a 177 °C	AASHTO TP 48	112 (57 a 285)
Resiliência (%)	ASTM D 5329	0 (0 a 4)

* 100g, 5s, 25 °C; ** Método anel e bola; *** Viscosímetro Brookfield, spindle 27, 20 rpm

O betume-borracha do tipo *continuous blend* (CB) foi otimizado em laboratório com o objectivo de estabelecer a percentagem de borracha, o tempo de digestão e a temperatura de fabrico com o melhor desempenho, com base nos ensaios de caracterização, para produção de misturas betuminosas.

Considerando que as principais características que afectam a modificação do betume são a percentagem de borracha, a granulometria das partículas de borracha, o tempo de digestão e a temperatura, foram estabelecidas as seguintes variáveis para estudo neste trabalho:

- percentagens de borracha de 19, 21, 23, 25%;
- tempos de digestão de 30, 45, 60, 90, 120, 150, 180 e 210 minutos;
- temperaturas de digestão de 180, 190 e 200 °C.

A digestão em laboratório foi efectuada em um equipamento que consiste em um forno, equipado com um controlador de temperatura e um conjunto motor/hélice para facilitar a incorporação e as interações entre o betume convencional e a borracha e proporcionar uma mistura homogénea sem a ocorrência de segregação ou sedimentação das partículas de borracha.

A análise dos resultados conduziu à escolha da percentagem de borracha de 21 % com um tempo de digestão de 90 minutos para uma temperatura de 180 °C, como as características de produção do betume modificado *continuous blend*.

O betume-borracha do tipo *terminal blend* (TB) foi produzido em uma central industrial no Brasil com incorporação de 15% de borracha ambiente granulada.

O Quadro 3 apresenta as características dos betumes modificados com borracha, de acordo com as especificações ASTM D 6114 (1997).

Quadro 3 – Resultados dos ensaios de caracterização dos betumes-borracha

Ensaio	Norma	ASTM D 6114	CB	TB
Penetração* (0,1 mm)	ASTM D 5	25 a 75	26,0	42,0
PA** (°C)	ASTM D 36	55 mín.	65,0	67,7
Viscosidade*** (cp) 175 °C	AASHTO TP 48	1500 mín.	2826	1644
Resiliência (%)	ASTM D 5329	15 mín	40	33
RTFOT 163 °C, 85 minutos	ASTM D2872			
Varição em massa (%)		0,6 máx.	0,3	0,3
Aumento do PA (°C)		-	8,5	2,9
Penetração* (0,1 mm)		-	18,5	25,3
Penetração retida (%)		-	71,1	60,2
Resiliência (%)		-	46	36

* 100g, 5s, 25 °C; ** Método anel e bola; *** Viscosímetro Brookfield, spindle 27, 20 rpm

6. MISTURAS BETUMINOSAS E PRODUÇÃO DE PROVETES

O teor ótimo de betume e os parâmetros volumétricos das misturas foram determinados através da metodologia Marshall. O Quadro 4 apresenta os resultados obtidos (entre parêntesis estão os valores das especificações). A temperatura de aquecimento dos agregados foi de 160 °C para a mistura DNIT e 170 °C para as misturas com betume-borracha. A temperatura de compactação de todas as misturas foi de 160 °C.

Quadro 4 – Teor de betume ótimo e porosidade

Mistura	Tipo de betume	Teor de betume (%)	Porosidade (%)
DNIT Faixa "C"	CAP-50/70	5,5	4,0 (3,0 a 5,0)
AI tipo IV	TB	6,0	5,0 (3,0 a 5,0)
Caltrans ARHM-GG	CB	8,0 (7 a 9)	6,0 (4,0 a 6,0)

Após a formulação Marshall foram moldadas duas placas, por tipo de mistura, para a obtenção de provetes para ensaios de desempenho. As placas possuem as dimensões 75 cm de comprimento, 50 cm de largura e 8 cm de espessura. O corte das placas resulta em nove provetes prismáticos com dimensões de 38,0x5,0x6,3 cm, para os ensaios de fadiga, e de 8 provetes cilíndricos de 5 cm de altura e 15 cm de diâmetro para ensaios de deformação permanente.

A mistura dos materiais foi realizada numa misturadora mecânica e para a compactação das misturas foi utilizado um rolo liso de médio porte (750 kg). O processo de compactação durou até que fosse alcançada a massa específica aparente obtida na formulação Marshall.

7. ENSAIOS MECÂNICOS DE DESEMPENHO

7.1. Módulo de Rigidez e Resistência à Fadiga

A determinação do módulo de rigidez e do ângulo de fase foi realizada através de ensaios de flexão em 4 pontos, aplicando um carregamento sinusoidal correspondente a uma deformação específica de tracção na base do provete de 100xE-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 20 °C, de acordo com o preconizado na norma ASTM 3497 (1995).

O número de ciclos de carga foi de 100 para as três primeiras frequências e de 10 para as restantes. O ensaio de módulo de rigidez é realizado no mesmo dispositivo no qual são conduzidos os ensaios de fadiga. Além disto, também é obtido o ângulo de fase.

A lei de fadiga define a relação entre a deformação ou tensão aplicada e o número de ciclos de aplicação de uma determinada carga até a ruptura.

De um modo geral, o critério de ruptura adoptado nos ensaios de fadiga em misturas betuminosas corresponde ao decréscimo de 50% da rigidez inicial do provete.

Nestes ensaios é de fundamental importância o controlo da temperatura e a frequência da aplicação do carregamento.

A Figura 4 mostra o dispositivo de flexão em 4 pontos utilizado na pesquisa. O equipamento está inserido numa câmara climática que permite o controle da temperatura entre -20 °C a +70 °C e com precisão de $\pm 0,5$ °C.

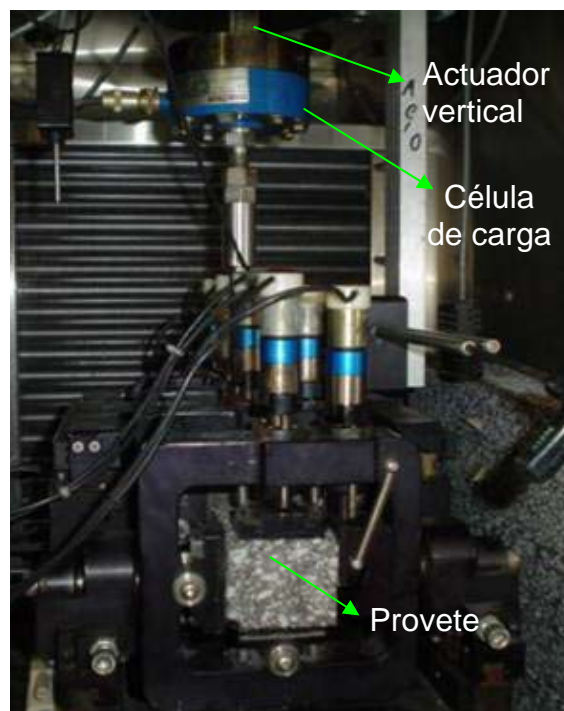


Figura 4 – Dispositivo para ensaio de fadiga de flexão em 4 pontos

Os ensaios foram conduzidos em deformação controlada, à temperatura constante de 20 °C e com a aplicação de um carregamento repetido cíclico sinusoidal (frequência de 10 Hz). Para cada mistura foram ensaiados 9 provetes em 3 níveis de deformação específica: 200×10^{-6} , 400×10^{-6} e 800×10^{-6} .

Com base no número de ciclos que origina a rotura do provete (quando se verifica uma redução de 50% da rigidez inicial) e na extensão aplicada, obtém-se uma série de pontos. A recta que melhor se ajusta a estes pontos corresponde à lei de fadiga da mistura betuminosa.

7.2. Deformação Permanente

A resistência às deformações permanentes das misturas betuminosas foi avaliada através do ensaio de corte simples a altura constante RSST-CH (*Repetitive Simple Shear Test at Constant Height*), padronizado pela AASHTO TP7-01. Este ensaio é realizado sobre provetes cilíndricos, 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. Os ensaios foram conduzidos a 60 °C, tendo em conta as peculiaridades do clima tropical do Brasil.

Os provetes são colados aos pratos do equipamento de modo a evitar movimentos laterais e as conseqüentes variações de volume. Durante o ensaio um actuador é mantido estático enquanto que o outro efectua movimentos horizontais pulsatórios. O actuador horizontal controla a magnitude das tensões de corte, enquanto que o actuador vertical garante que o provete, ensaiado sob uma condição de tensão controlada, mantenha a altura constante durante o ensaio. A Figura 5 ilustra o equipamento utilizado.

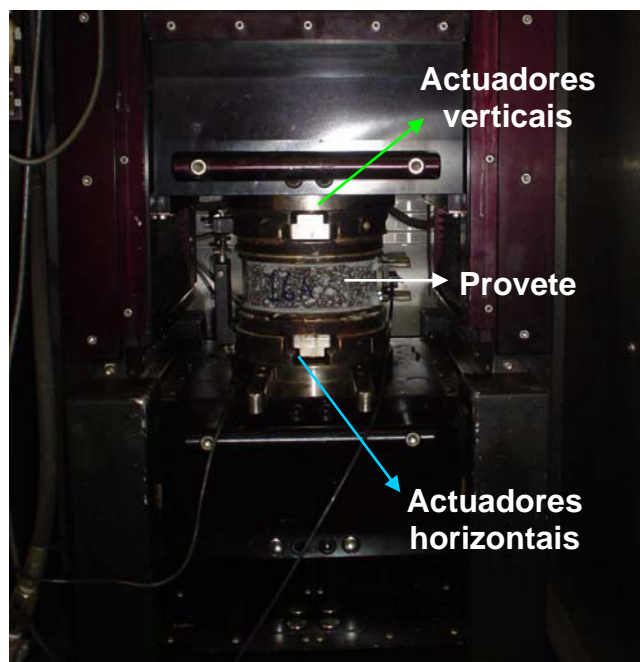


Figura 5 – Equipamento para realização dos ensaios de deformação permanente

O ensaio RSST-CH permite estabelecer uma lei de deformação permanente das misturas betuminosas em função da temperatura à qual a mistura estará submetida no pavimento. A relação entre o número máximo de ciclos do eixo padrão de 80 kN ($ESAL_{mrd}$) em função do número de ciclos de carga aplicados no ensaio (N_{mpss}), de modo que o provete atinja a deformação de corte limite de 0,4545, é representada pela Equação 1:

$$ESAL_{mrd} = 10^{\frac{4,36 + \log N_{mpss}}{1,24}} \quad (1)$$

onde:

$ESAL_{mrd}$ = número de ciclos do eixo padrão de 80 kN para atingir a máxima rodeira de 12,7 mm;

N_{mpss} = número de ciclos do ensaio RSST-CH para atingir a deformação máxima de 0,4545.

8. RESULTADOS

8.1. Módulo de Rigidez e Ângulo de Fase

A Figura 6 apresenta os valores do módulo de rigidez obtidos para a gama de frequências aplicadas. A nomenclatura adoptada para as misturas betuminosas foi a seguinte: (i) mistura DNIT Faixa "C" com betume convencional (**DBC**); (ii) mistura Al com betume-borracha *terminal blend* (**ITB**); (iii) mistura Caltrans com betume-borracha *continuous blend* (**CCB**).

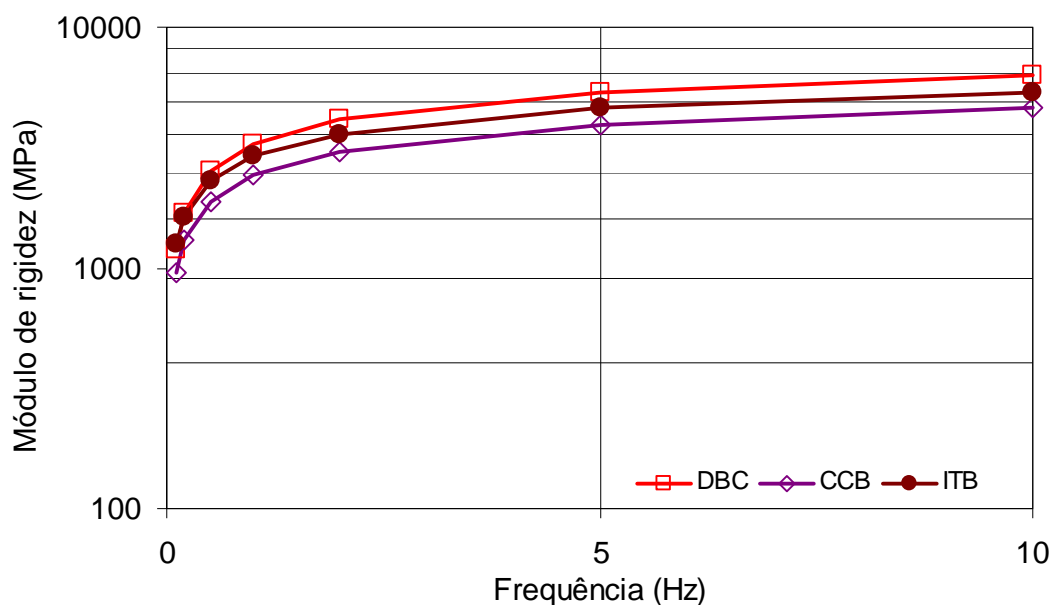


Figura 6 – Módulo de rigidez a 20 °C

Para todas as misturas, o módulo de rigidez aumenta com o aumento da frequência aplicada. As misturas com betume-borracha apresentaram um módulo inferior em relação à mistura convencional, o que demonstra que a incorporação da borracha granulada ao betume convencional aumenta a flexibilidade das misturas. A mistura betuminosa com betume-borracha *dense graded* apresentou o valor mais elevado de módulo de rigidez em relação à mistura *gap graded*.

Além do tipo de granulometria influenciar o valor do módulo (quanto mais densa, mais rígida) foi verificado também que o aumento do teor de betume diminuiu o valor do módulo de rigidez.

Os valores do ângulo de fase obtidos para a frequência de 10 Hz à temperatura de 20 °C mostraram que a mistura ITB apresentou um menor valor deste parâmetro (18,88°) em relação às outras misturas: CCB (19,58°) e DBC (19,61°)

Assim, relativamente ao ângulo de fase, indicador das propriedades elásticas e viscosas dos materiais betuminosos, considerando que os valores das misturas (com betume-borracha e convencional) foram muito semelhantes, não foi possível distinguir as misturas betuminosas.

8.2. Resistência à Fadiga

A Figura 7 apresenta as leis de fadiga das misturas estudadas, onde cada ponto do gráfico corresponde à média obtida de três provetes aos três níveis de deformação aplicados.

Em relação aos resultados apresentados na Figura 7, a mistura *gap graded* do *Asphalt Institute* (ITB), com betume-borracha do tipo *terminal blend* apresentou uma maior resistência à fadiga em relação às demais. Em relação à mistura convencional (DBC), as duas misturas com betume-borracha (ITB e CCB) possuem vida à fadiga superior, o que demonstra que a adição de borracha melhora a resistência à fadiga das misturas betuminosas.

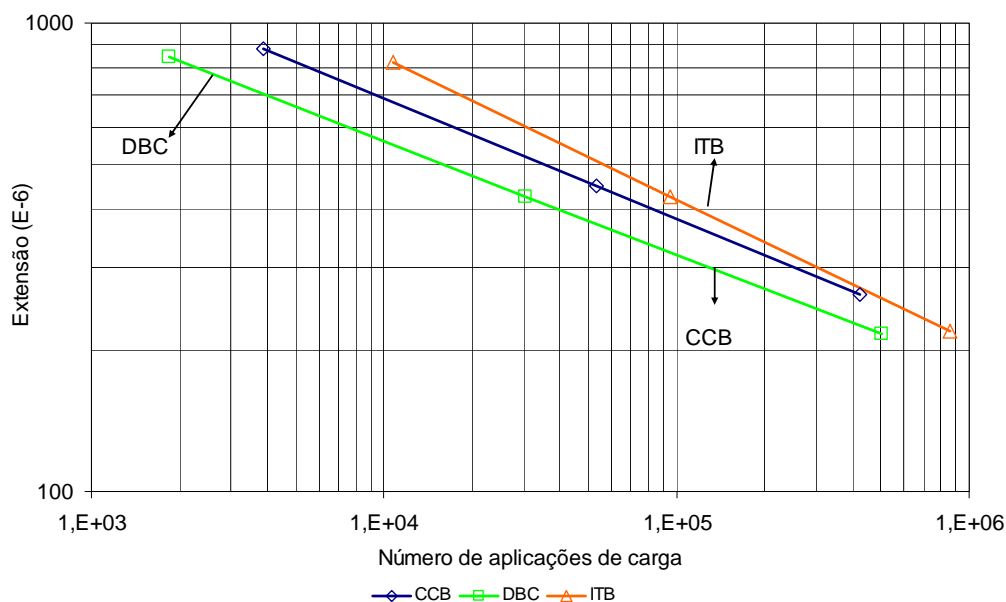


Figura 7 – Curvas de fadiga

A mistura ITB com betume-borracha do tipo *terminal blend*, mesmo com um teor de betume (6,0%) inferior à mistura CCB (8,0%) apresentou uma maior resistência à fadiga, facto atribuído à qualidade do betume-borracha *terminal blend*.

8.3. Deformação Permanente

A Figura 8 apresenta os resultados de corte repetido, relacionando o ESAL estimado que gera uma rodeira de 12,7 mm nas misturas. Os valores de ESAL foram obtidos através da Equação 1.

Da Figura 8, pode observar-se que a mistura produzida com o betume convencional CAP-50/70 (DBC) apresentou um desempenho inferior quando comparada às misturas com betume-borracha, indicando menor susceptibilidade térmica destas misturas no que se refere à resistência às deformações permanentes.

Relativamente ao tipo de betume-borracha utilizado, pode afirmar-se que a mistura produzida com betumes do tipo *terminal blend* (ITB) apresentou um desempenho superior em relação à mistura com betume *continuous blend* (CCB). O desempenho da mistura CCB foi considerado satisfatório quando comparado à mistura convencional.

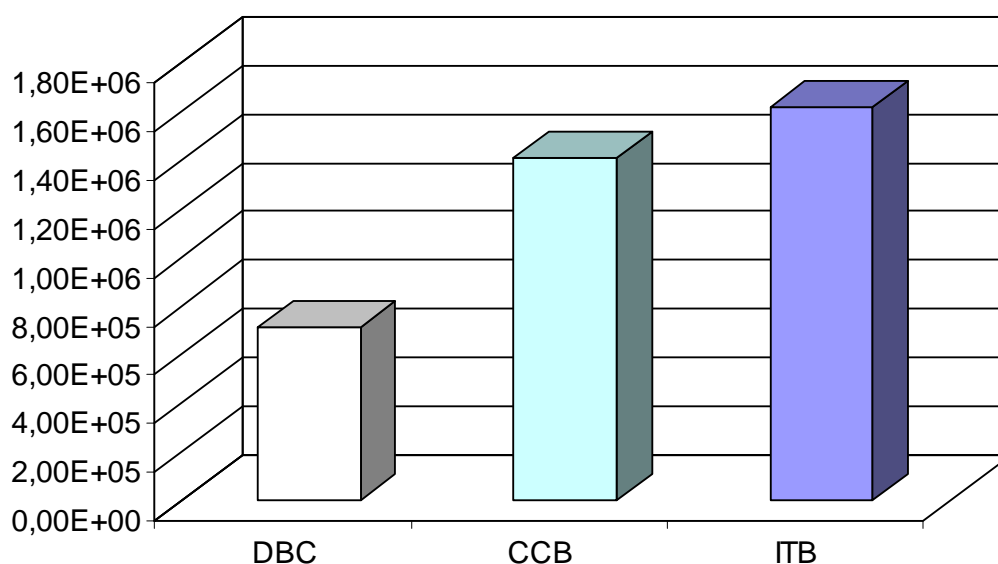


Figura 8 – ESAL que origina uma rodeira de 12,7 mm nas misturas a 60 °C

A melhoria no comportamento das misturas betuminosas produzidas com betume-borracha relativamente à resistência ao desenvolvimento de deformações permanentes pode ser explicada também pela elevada recuperação elástica

apresentada pelos betumes-borracha (Quadro 3) em relação ao betume convencional CAP-50/70 (Quadro 2).

9. CONCLUSÕES

Os betumes modificados com borracha apresentaram valores de viscosidade superiores em relação ao betume convencional, sendo este um atributo desejável, considerando que conduz a um melhor desempenho à deformação permanente, redução da propagação de fendas, redução da desagregação, melhor susceptibilidade térmica e maior durabilidade.

Além do aumento da viscosidade, os betumes-borracha apresentaram um ponto de amolecimento mais elevado do que o betume convencional, que se traduz num aumento da resistência às deformações permanentes. A modificação do betume com a borracha melhorou também as características elasticidade das misturas betuminosas.

Os betumes-borracha foram mais resistentes aos efeitos do envelhecimento, conforme os resultados apresentados nos ensaios RTFOT.

Relativamente aos ensaios de desempenho mecânico, é possível afirmar que:

- o decréscimo do módulo de rigidez das misturas com betume-borracha em relação à mistura convencional evidencia que o domínio do comportamento do módulo deixa de ser representado pelo betume convencional e passa ser ditado pela borracha e suas características elásticas a partir do betume modificado, conduzindo a um menor módulo de rigidez;
- as misturas com betume-borracha estudadas apresentaram uma resistência à fadiga superior à mistura convencional, sendo que a mistura com betume-borracha do tipo *terminal blend* apresentou uma maior resistência à fadiga em relação às outras misturas estudadas;
- os resultados obtidos no ensaio de deformação permanente mostraram-se satisfatórios, considerando que o teor de betume utilizado na produção das

misturas betuminosas com betume-borracha foi superior àquele utilizado na produção da mistura convencional.

Em conclusão, as misturas betuminosas com betume-borracha estudadas apresentaram as melhores características que a mistura convencional. Relativamente ao tipo de betume-borracha, para as misturas estudadas, o betume *terminal blend* apresentou um desempenho superior.

AGRADECIMENTOS

Ao Programa ALβAN (Programa de Bolsas de Alto Nível da União Europeia para a América Latina), pela bolsa nº E04D040507BR que o 1ª autor recebeu.

Ao CNPQ (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pela bolsa do CNPQ.

Os autores agradecem à empresa GRECA Distribuidora de Asfaltos, fabricante do betume-borracha *terminal blend*, pelo fornecimento dos materiais betuminosos de da borracha de pneus.

10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ADOT, 2005. ADOT Construction Manual. Arizona Department of Transportation, Intermodal Transportation Division, Arizona, USA.
2. Asphalt Institute, 1989. The Asphalt Handbook, Manual Series nº 4 (MS-4), 1989 Edition, Kentucky, USA.
3. Antunes, M.L.; Baptista, F.; Eusébio; M.I.; Costa, M.S.; Miranda, C.V., 2000. Characterization of Asphalt Rubber Mixtures for Pavement Rehabilitation Projects in Portugal. Asphalt Rubber 2000, Proceedings. Vilamoura, Portugal.
4. Baker, T.E.; Allen, T.M.; Jenkins, D.V.; Mooney, T.M.; Pierce, L.M.; Christie, R.A.; Weston, J.T., 2003. Evaluation of the Use of Scrap Tires in Transportation Related Applications in the State of Washington. Report to the Legislature as Required by SHB 2308. Washington State Department of Transportation. Olympia, Washington, USA.
5. Caltrans, 2003. Asphalt Rubber Usage Guide. State of California Department of Transportation. Materials and Testing Services. Office of Flexible Pavement Materials. Sacramento, California, USA.
6. Caltrans, 2005. Use of Scrap Tire Rubber. State of California Department of Transportation. Materials and Testing Services. Office of Flexible Pavement Materials. Sacramento, California, USA.
7. Greenbook, 2000. Standard Specifications for Public Works Construction, 2000 Edition. Public Works Standards, Inc. Anaheim, California, USA.
8. Hicks, R.G., 2002. Asphalt Rubber Design and Construction Guidelines, Volume I Design Guidelines. Northern California Rubberized Asphalt Concrete Technology Center (NCRCTC) and California Integrated Waste Management Board (CIWMB). Sacramento, California, USA.
9. Recipav, 2004. A Utilização do Betume Modificado com Borracha Reciclada de Pneus em Portugal. Recipav Engenharia e Pavimentos, Ltda. Grupo Águas de Portugal. Cartaxo, Portugal.
10. Recycling Research Institute, 2006. Rubber Recycling. Scrap Tire News. Leesburg, Virginia, USA.

11. Reschner, K., 2006. Scrap Tire Recycling – A Summary of Prevalent Disposal and Recycling Methods. Berlin, Germany.
12. Roberts, F.L.; Kandhal, P.S.; Brown, E.R.; Dunning, R.L., 1989. Investigation and Evaluation of Ground Tire Rubber in Hot Mix Asphalt. National Center for Asphalt Technology n° 89-3. Auburn, Alabama, USA.
13. Sousa, J.B.; Solaimanian, M.; Weissman, S.L., 1994. Development and Use of the Repeated Shear Test (Constant Height): An Optional Superpave mix Design Tool. SHRP-A-698. Strategic Highway Research Program. National Research Council. Washington, DC, USA.
14. TFHRC, 2005. Scrap Tires. Use Guidelines for Waste and Byproduct Materials in Pavement Construction. Turner-Fairbank Highway Research Center. Federal Highway Administration. McLean, Virginia, USA.