

## **EFEITO DA ADIÇÃO DE BORRACHA RECICLADA DE PNEUS PELO PROCESSO SECO À MISTURA ASFÁLTICA TIPO CBUQ**

**Marcelo de Barros Patriota**  
Prefeitura de Recife

**Laura Maria Goretti da Motta**  
COPPE/UFRJ

**Ivaldo Dário da Silva Pontes Filho**  
UFPE

### **RESUMO**

O destino adequado dos resíduos gerados pela sociedade tem sido um dos maiores problemas da atualidade. A reutilização dos rejeitos, através da reciclagem é uma forma de sanar o problema. Um dos materiais mais problemáticos é o pneu usado ou inservível, mas que pode ser útil na melhoria das misturas asfálticas. Mostra-se a utilização da borracha triturada de pneus pelo “processo seco” em misturas asfálticas a quente. Analisam-se as alterações no comportamento mecânico quando parte dos agregados é substituída pela borracha. Foi adotada uma distribuição granulométrica de agregados, e de borracha e a partir destas foram executados quatro traços de concreto asfáltico, um de referência (sem borracha) e três experimentais variando o teor de borracha. Foi utilizada uma borracha proveniente de recauchutagem de pneus entre as peneiras n.º 10 (2,0mm) e n.º 200 (0,075mm). Os resultados mostram que as misturas com borracha apresentam valores menores de resistência à tração e módulo de resiliência e maior vida de fadiga para baixos níveis de tensão, quando comparados com uma mistura convencional.

### **ABSTRACT**

The appropriate destiny of the residues generated by the society has been one of the biggest problems of the present time. The use of the rejects through the recycling is a form of solving this problem. One of the most problematic materials is the tire triturated rubber that can be use in the improvement of the asphalt mixture. The possibility of the usage of tire triturated rubber in asphalt mixtures by the dry process is verified. The changes on mechanical behavior of a conventional asphalt mixture when a part of its aggregates is substituted by tire triturated rubber are also analyzed. It was adopted a same granulometric distribution of aggregate and of rubber and from these four lines of asphalt concrete were executed, one of reference (without rubber) and three experimental varying the rubber content. Rubber from recycling was used between the sieves no. 10 (2.0mm) and no. 200 (0.075mm). The results show that the mixtures with rubber present slower values of tensile strength and resilience module and a larger life of fatigue for low tension levels when compared to a conventional mixture.

### **1. INTRODUÇÃO**

A destinação adequada dos resíduos gerados pela sociedade é um dos maiores problemas da atualidade. Muitas vezes é resultante do desenvolvimento tecnológico que criou materiais não degradáveis e da explosão demográfica, e o problema da disposição ambiental dos detritos é hoje um desafio. A reutilização de alguns destes rejeitos através da reciclagem é uma das formas de sanar o problema.

Estudos e pesquisas são desenvolvidos para promover a utilização de produtos reciclados na pavimentação, tais como: reciclagem da camada asfáltica envelhecida, uso de escória de alto-forno e aciaria, resíduos sólidos da decantação da matéria orgânica dos esgotos em concreto de cimento portland, borra de carbureto como aditivo melhorador de solo e resíduos de construção, entre outros. Procura-se sempre mostrar se é possível a reutilização dos resíduos de forma econômica, técnica e operacional na pavimentação, tendo como parâmetro de avaliação o desempenho mecânico.

Um dos materiais mais problemáticos, mas que pode ter uso em pavimentação pela sua grande quantidade e volume, é o pneu usado ou inservível, uma vez que este material tem em sua composição a borracha que pode ser útil na modificação das misturas asfálticas.

A borracha utilizada nos pneus pode ser natural (látex) ou sintética. De modo geral os pneus são compostos aproximadamente por 30% (em peso) de aço, 20 a 26% de borracha sintética e 21 a 33% de borracha natural. Um pneu com 9kg, geralmente, apresenta de 4,5 a 5,5kg de borracha (ODA, 2000).

O CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente) aprovou em 26 de agosto de 1999 a Resolução nº 258/99, que estabelece o conceito de que o produtor é o responsável pelo destino final do produto. No caso dos pneus, por exemplo, a carcaça voltaria para a montadora. Pela resolução n.º 258/99, a partir de janeiro de 2002, produtores e importadores de pneus estão forçados a coletá-los e colocá-los em locais ambientalmente adequados. Além disso, a partir de 2005 começará a redução do passivo ambiental sendo que a proporção de reciclagem será de 120%, ou seja, para cada quatro pneus produzidos ou importados, cinco terão que ser reciclados, auxiliando, assim na redução do problema ambiental acumulado, existente pelos anos de disposição inadequada deste produto (CONAMA, 1999).

A incorporação da borracha de pneus às misturas asfálticas pode levar à maior resistência ao desgaste e ao envelhecimento, aumento da resistência à deformação permanente a altas temperaturas, aumento da resistência à fadiga, e aumento da flexibilidade a baixas temperaturas (FHWA, 1993). Os pavimentos que têm esses revestimentos também podem apresentar diminuição dos riscos de derrapagem em pista molhada e a diminuição do ruído de contato entre o pneu e o pavimento (BALLIÉ & ROFFÉ, 2000).

São dois os processos de incorporação da borracha triturada de pneus nas misturas asfálticas: o processo úmido (*wet process*) e o processo seco (*dry process*).

No processo úmido são adicionadas partículas finas de borracha triturada de pneu ao cimento asfáltico, produzindo um novo tipo de ligante denominado “asfalto-borracha”.

No processo seco, objeto deste estudo, as partículas de borracha triturada de pneu substituem parte do agregado pétreo na mistura sendo designado “agregado-borracha”, que logo após a adição do cimento asfáltico, formam um novo produto denominado “concreto asfáltico modificado com adição de borracha” (SALINI, 2000, SPECHT et al. 2002, BERTOLLO, 2002, PINHEIRO et al., 2003).

Este trabalho tem como objetivo verificar, em laboratório, a possibilidade da utilização da borracha triturada de pneus em misturas asfálticas a quente pelo processo seco, procurando analisar as alterações no comportamento mecânico de uma mistura asfáltica convencional quando parte de seus agregados é substituída por borracha triturada de pneus. Foram analisados os fatores: teor e granulometria da borracha, teor de ligante adicionado e tempo

de digestão da borracha pelo envelhecimento a curto prazo, nos parâmetros mecânicos módulo de resiliência, resistência à tração e fadiga das misturas produzidas em laboratório.

## **2. METODOLOGIA**

Faz-se a análise de laboratório de algumas propriedades mecânicas de misturas asfálticas com incorporação de borracha triturada de pneus pelo processo seco., oriunda de recauchutagem, comparando-os com os resultados de uma mistura convencional típica das utilizadas pela Prefeitura de Recife, PE, detalhada em Patriota (2004).

Para todas as misturas foi usada uma única curva granulométrica de agregados. A incorporação da borracha foi feita considerando-a como mais um agregado da mistura, substituindo, em peso, parte do agregado miúdo (pó-de-pedra) na mesma proporção da adição de borracha, não levando em conta a diferença de densidade uma vez que se procurou incorporar a borracha mantendo-se o mesmo arranjo granulométrico da dosagem de referência. A granulometria da mistura de agregados pétreos com a borracha adicionada manteve o mesmo enquadramento que satisfaz tanto a faixa “B” quanto a faixa “C” da especificação DNER-ES 313/97.

PATRIOTA (2003) mostra que as dosagens de CBUQ realizadas em Recife nos últimos dez anos, utilizando materiais com as mesmas características e procedência dos materiais utilizados nesta pesquisa, apresentam um teor médio de CAP de 6,0%. EMLURB (2003) indica que na composição do custo da mistura asfáltica, na cidade do Recife, o teor de CAP é tomado como 6,0% e representa 50% do custo total da mistura. Com base nestes dados, buscou-se com esta pesquisa avaliar qual mistura experimental dentre três designadas B1 (dosagem com 1% de borracha), B2 (dosagem com 2% de borracha) e B3 (dosagem com 3% de borracha)., apresentaria melhor comportamento mecânico quando comparada com a mistura de referência e manteria o custo comparável ao da mistura convencional, ou seja, tentando não modificar o teor de ligante.

Foram realizados ensaios de estabilidade e fluência Marshall (DNER, 1995), resistência à tração por compressão diametral, RT (DNER, 1994a), módulo de resiliência, MR (DNER, 1994b), vida de fadiga, cantabro (DNER, 1999) e resistência ao dano por umidade induzida (AASHTO, 1989). O ensaio de fadiga foi realizado, em corpos-de-prova cilíndricos a 25°C, por compressão diametral a tensão controlada com níveis de tensão de 10%, 20%, 30%, 40% e 50% da RT. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Engenharia da EMLURB em Recife e na COPPE/UFRJ sendo que detalhes dos mesmos estão apresentados em Patriota (2004).

## **3. MATERIAIS UTILIZADOS**

Foram utilizados nesta pesquisa agregados britados: brita 3/4” (19,0mm), brita 1/2” (12,7mm) e pó-de-pedra, de natureza granítica, provenientes da Pedreira Líder localizada na Muribeca, no município de Jaboatão dos Guararapes/PE. A Tabela 1 apresenta as características granulométricas dos agregados utilizados.

Os resultados dos ensaios de desgaste por abrasão Los Angeles (LA) dos agregados e de equivalente de areia (EA) do pó-de-pedra, atendem aos valores indicados na especificação

DNER-ES 313/97, que são  $LA \leq 40 \%$  e  $EA \geq 55 \%$ . A Tabela 2 apresenta os resultados de de massa específica, LA, EA e adesividade dos agregados utilizados nesta pesquisa.

O filler de natureza calcária é proveniente da Beccal, localizada em Gravatá/PE. A Tabela 3 apresenta as características do material de enchimento (filer).

**Tabela 1:** Granulometrias dos agregados utilizados nesta pesquisa.

Análise Granulométrica (DNER-ME 083/98)			
Abertura das Peneiras	% Passando, em peso		
	Brita 3/4" (19mm)	Brita 1/2" (12,7mm)	Pó-de-pedra
3/4" (19,1mm)	100,00	100,00	100,00
1/2" (12,7mm)	57,00	100,00	100,00
3/8" (9,52mm)	31,20	76,70	100,00
N.º 4 (4,8mm)	3,00	5,30	97,20
N.º 8 (2,4mm)	0,50	0,80	68,70
N.º 10 (2,0mm)	0,50	0,80	68,50
N.º 16 (1,18mm)	0,40	0,60	54,70
N.º 30 (0,6mm)	0,30	0,50	42,70
N.º 40 (0,42mm)	0,20	0,50	36,80
N.º 50 (0,30mm)	0,20	0,40	27,30
N.º 80 (0,18mm)	0,20	0,40	18,40
N.º 200 (0,075mm)	0,10	0,20	8,70

**Tabela 2:** Resultados dos ensaios densidade real, abrasão Los Angeles, equivalente de areia e adesividade, dos agregados utilizados na pesquisa.

Ensaio	Materiais		
	Brita 3/4" (19mm)	Brita 1/2" (12,7mm)	Pó-de-pedra
Densidade Real (DNER-ME 081/94 e 084/95)	2,738	2,721	2,703
Los Angeles (DNER-ME 035/98)	32,5	38,5	-
Equivalente de Areia (DNER-ME 054/97)	-	-	95,0
Adesividade (DNER-ME 078/94 e 079/94)	Não Satisfatória		

**Tabela 3:** Características do material de enchimento (filer) utilizado nesta pesquisa.

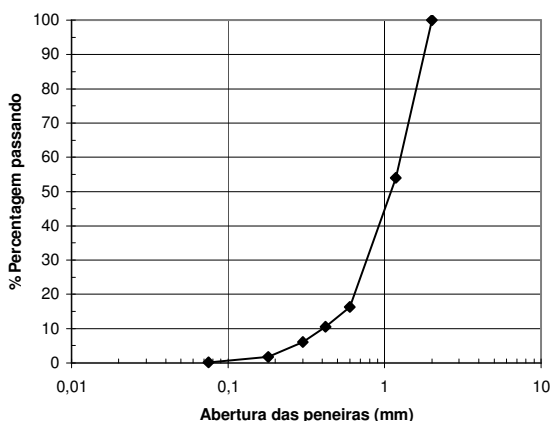
Abertura das Peneiras	Porcentagem Passando (em peso)	Densidade Real (DNER-ME 085/94)
N.º 80 (0,18mm)	100,00	2,920
N.º 200 (0,075mm)	83,00	

O ligante asfáltico utilizado neste trabalho é classificado como CAP 50/60 e tem uso rotineiro na região nordeste do Brasil e particularmente no estado de Pernambuco. Foi fornecido pela LUBNOR (Fortaleza/CE) e atende as especificações brasileiras indicadas na Tabela 4.

**Tabela 4:** Características do CAP 50/60 utilizado neste estudo.

Características	Método	Especificação	Resultado
Penetração (0,1mm)	ASTM D 5	50 a 60	60
Ductilidade a 25°C, cm	ASTM D 113	60 mín.	>150
ECA - % da penetração original	X 021	50 mín.	63
ECA - Variação de massa (%)	ASTM D 1754	1,0 máx.	0,2
Índice de suscetibilidade térmica	X 018	(-1,5 a +1,0)	-1,3
Ponto de Fulgor (°C)	ASTM D 92	235 mín.	298
Solubilidade em tricloroetileno (%)	ASTM D 2042	99,5 mín.	100
Viscosidade Saybolt Furol a 135°C, s	ASTM E 102	110 mín.	208 SSF
Aquecimento a 175°C	X 215	Não Espuma	Não Espuma

Tendo em vista que a região Nordeste não dispõe de trituradores de pneus, a borracha utilizada neste estudo foi raspa de pneus oriunda de recauchutagem, coletada na RSE Renovadora, localizada na Av. Recife, 5538C, Recife/PE. O material coletado apresentava partículas maiores que 9,5 mm (3/8") e foi separado na peneira de N.º 10 (2,00mm), para ser utilizada como agregado miúdo, como mostrado na Figura 1 e apresentava densidade de 1,123.



**Figura 1:** Curva granulométrica da borracha de pneu utilizada neste estudo.

#### 4 MISTURAS

A Tabela 5 e as Figuras 2 e 3 apresentam o enquadramento das granulometrias da mistura de referência e experimentais com adição de borracha B1, B2 e B3 de acordo com a faixa C do DNER (1995) e critérios do SUPERPAVE.

O teor de projeto do ligante das misturas de referência e experimentais com borracha foi baseado no método Marshall (DNER, 1995), porém, como citado anteriormente, as dosagens de CBUQ realizadas em Recife, utilizando materiais com as mesmas características e procedência dos materiais utilizados nesta pesquisa, apresentam um teor de

projeto médio de CAP de 6,0% e que este teor representa 50% do custo total da mistura, buscou-se com esta pesquisa avaliar qual mistura experimental B1, B2 ou B3, apresentaria melhor comportamento mecânico quando comparado com a mistura de referência com o mesmo teor de CAP. Detalhes das moldagens e parâmetros volumétricos estão em Patriota (2004).

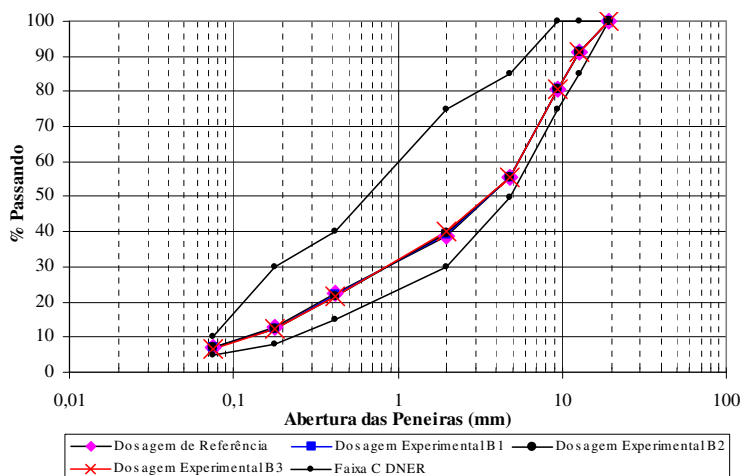
Na Tabela 6 são apresentadas as temperaturas para o ligante, os agregados e a compactação da mistura, determinadas a partir do ensaio de viscosidade Saybolt-Furol do CAP utilizado.

**Tabela 5:** Composições granulométricas da dosagem de referência (sem adição de borracha) e experimentais (com adição de borracha).

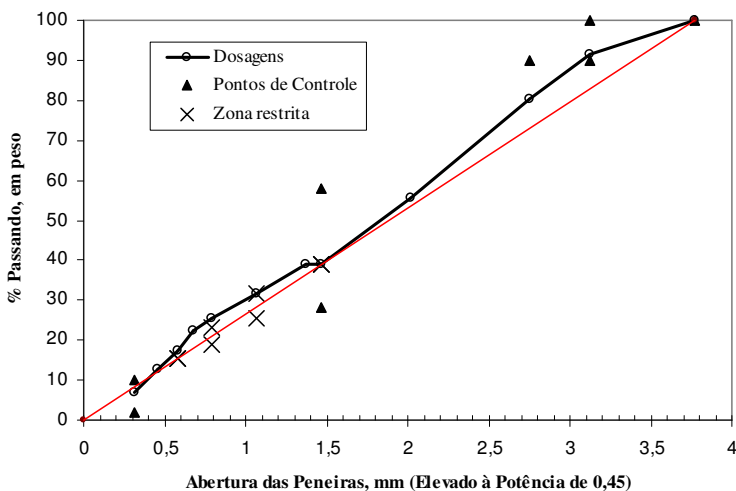
Granulometrias					
Abertura das Peneiras	Dosagens				Faixa "C" da Especificação DNER ES 313/97
	Referência (sem borracha)	Experimentais (Teor de borracha)			
		1%	2%	3%	
		Percentagem Passando (em peso)			
1" (25,4mm)	100,0	100,0	100,0	100,0	100
3/4" (19,1mm)	100,0	100,0	100,0	100,0	100
1/2" (12,7mm)	91,4	91,4	91,4	91,4	85 - 100
3/8" (9,52mm)	80,4	80,4	80,4	80,4	75 - 100
N.º 4 (4,8mm)	55,5	55,5	55,5	55,6	50 - 85
N.º 8 (2,4mm)	39,0	39,3	39,7	40,0	-
N.º 10 (2,0mm)	38,9	39,2	39,6	39,9	30 - 75
N.º 16 (1,18mm)	31,7	31,7	31,7	31,7	-
N.º 30 (0,60mm)	25,4	25,1	24,9	24,6	-
N.º 40 (0,42mm)	22,3	22,0	21,8	21,5	15 - 40
N.º 50 (0,30mm)	17,3	17,1	16,9	16,7	-
N.º 80 (0,18mm)	12,7	12,5	12,4	12,2	8 - 30
N.º 200 (0,075mm)	7,1	7,0	6,9	6,8	5 - 10

**Tabela 6:** Temperaturas do ligante e do agregado para mistura, da mistura para digestão da borracha e para compactação.

Material	Temperatura
Ligante (CAP 50/60)	160°C
Agregados	170°C
Mistura (Digestão da borracha)	150°C
Mistura (Compactação)	146°C



**Figura 2:** Distribuições granulométricas das dosagens de referência e experimentais B1, B2 e B3 deste estudo e limites da especificação DNER-ES 313/97.



**Figura 3:** Enquadramento na especificação SUPERPAVE das granulometrias das dosagens de referência e experimentais B1, B2 e B3 deste estudo.

A incorporação da borracha foi feita considerando-a como mais um agregado da mistura, substituindo parte do agregado miúdo (pó-de-pedra) na mesma proporção da adição de borracha, não levando em conta a diferença de densidade uma vez que se procurou

incorporar a borracha mantendo-se o mesmo arranjo granulométrico da dosagem de referência. A granulometria da mistura agregado pétreo com a borracha adicionada manteve o mesmo enquadramento na faixa (Figuras 2 e 3). A borracha, a temperatura ambiente, foi incorporada após o aquecimento dos agregados, sendo misturados por aproximadamente um (1) minuto, seguindo-se a adição do CAP. Após a usinagem foi considerado um tempo de digestão de 2h a 150°C em estufa, antes da compactação, para as misturas com borracha, conforme sugerido por GALLEGOS et al. (1999). Cabe ressaltar que a mistura de referência não sofreu o envelhecimento de curto prazo recomendado pelo SHRP, por se ter seguido a prática corrente brasileira dada pelo DNER (1995).

A densidade máxima teórica (DMT), utilizada para o cálculo dos parâmetros volumétricos, foi determinada algebricamente pela ponderação das densidades reais dos materiais que compõem a mistura, prática comum nos organismos rodoviários do Brasil.

## 5. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

A Tabela 7 apresenta os parâmetros volumétricos das misturas estudadas, e representam a média de no mínimo 30 corpos-de-prova, que foram utilizados para a realização dos ensaios mecânicos.

**Tabela 7:** Parâmetros volumétricos das misturas estudadas.

Misturas	Teor de Ligante %	Densidade Aparente Média	Densidade Máxima Teórica	% de Vazios	VCB %	VAM %	RBV %
Referência	6,0	2,370	2,475	4,2	13,8	18,0	76,5
Experimental B1	6,0	2,303	2,449	6,0	13,4	19,4	69,2
Experimental B2	6,0	2,242	2,416	7,2	13,1	20,3	64,5
Experimental B3	6,0	2,159	2,388	9,6	12,6	22,2	56,7

Os volumes de vazios ( $V_v$ ) das misturas com agregado-borracha ficaram acima daquele apresentado pela mistura convencional, confirmando alguns estudos (BERTOLLO, 2002 e SPECHT et al. 2002) que mostram  $V_v$  com mais de 2 pontos percentuais acima do  $V_v$  de misturas convencionais.

Para a determinação dos parâmetros mecânicos das misturas estudadas foi tirada a média de no mínimo 3 corpos-de-prova. cujos resultados são apresentados na Tabela 8.

Verifica-se que os parâmetros RT e MR das misturas modificadas com borracha mostraram tendência de diminuição em relação à mistura de referência (convencional). Como as misturas de referência e experimentais B1, B2 e B3 estudadas possuem o mesmo teor de ligante (6,0%), a redução do módulo de resiliência das misturas experimentais (agregado-borracha) indica que ocorre uma flexibilidade do material devido à incorporação da borracha. Os valores dos parâmetros mecânicos encontrados neste estudo estão na mesma ordem de grandeza dos obtidos por outros autores brasileiros tais como SALINI, 2000; SPECHT et al., 2002; BERTOLLO, 2002 e PINHEIRO et al., 2003.



**Tabela 8:** Parâmetros mecânicos das misturas estudadas.

Mistura	MR a 25°C (MPa)	RT a 25°C (MPa)	MR/RT (MPa)
Referência	3.205	1,07	2.995
Experimental B1	2.953	0,90	3.281
Experimental B2	2.302	0,80	2.878
Experimental B3	1.539	0,72	2.138

Segundo PINHEIRO et al. (2003) a redução da RT pode indicar perda da capacidade estrutural das misturas com borracha. Porém, há que se considerar este parâmetro associado ao módulo de resiliência em conjunto para melhor interpretar o comportamento mecânico de qualquer material. O decréscimo da RT e do MR das misturas asfálticas modificadas com borracha e as com agregado-borracha, tem sido confirmado pela literatura (SALINI, 2000; SPECHT et al., 2002; BERTOLLO, 2002; PINHEIRO et al., 2003).

A média dos valores para a relação MR/RT, de aproximadamente 3.000, está de acordo com os valores obtidos por SOARES et al. (2000). Segundo BENEVIDES (2000) esta relação é favorável porque indica que os pavimentos têm boa resistência à tração, apresentando alta flexibilidade e capacidade de deformação.

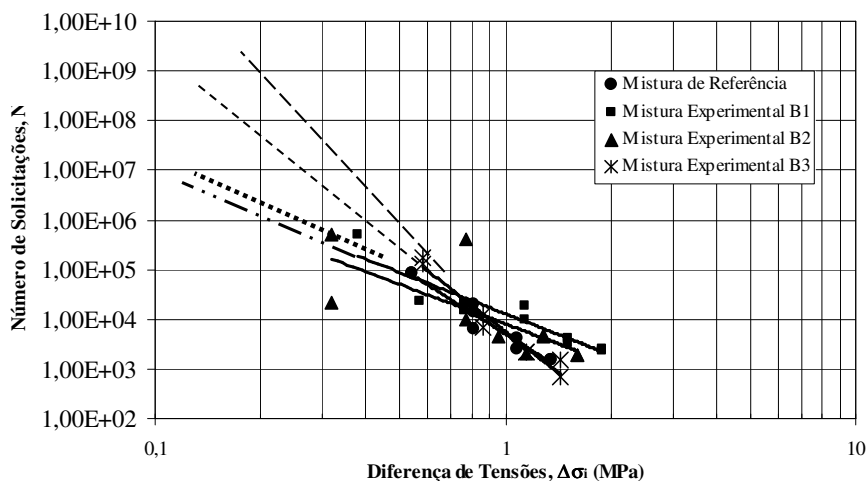
O ensaio de vida de fadiga foi realizado a tensão controlada com corpos-de-prova cilíndricos, moldados de acordo com o método Marshall (DNER, 1995), a 25°C com níveis de tensões de 10%, 20%, 30%, 40% e 50% da RT. As curvas de fadiga para as misturas experimentais de agregado-borracha apresentaram maior dispersão do que a mistura convencional, especialmente a Experimental B2. Uma forma de diminuir esta dispersão poderia ser a mistura de uma quantidade maior de massa asfáltica de cada vez e não a preparação das porções individuais por corpo-de-prova, que foi o procedimento utilizado nesta pesquisa.

A Tabela 9 mostra as equações geradas pelas curvas de fadiga expressas como uma função da diferença de tensões inicial ( $\Delta\sigma$ ) em MPa e seus coeficientes ( $k_2$  e  $n_2$ ), e da deformação específica resiliente inicial ( $\epsilon_i$ ) e seus coeficientes ( $k_1$  e  $n_1$ ). A Figura 4 mostra as curvas de fadiga determinadas em laboratório, mostrando que são concorrentes em um certo nível de tensões. A análise destas curvas é desenvolvida com mais propriedade quando associada a uma avaliação estrutural de um pavimento. PATRIOTA (2004) faz esta consideração para duas estruturas típicas de pavimentos usuais da região e conclui que todas as misturas de agregado - borracha poderiam ser utilizadas sem nenhum aumento de espessura em relação à mistura convencional, sendo até possível uma pequena diminuição da capa, eventualmente.

Considerando o fato da mistura Experimental B1 (com 1% de borracha incorporada) ter apresentado bom comportamento nos critérios volumétricos, mecânicos e estruturais, com o mesmo teor de ligante de uma mistura típica das usualmente empregadas na região, considerando que para cada quilômetro de um pavimento de sete metros de largura, com revestimento em concreto asfáltico modificado com adição de borracha (via seca) com um teor de 1% de borracha adicionada, seriam reciclados 1540 pneus inservíveis e que a a maioria dos autores consultados também obtiveram valores parecidos para a mesma condição de mistura, os autores do presente trabalho recomendam o prosseguimento dos estudos com trecho experimental nesta condição, a ser implantado em Recife.

**Tabela 9:** equações geradas pelas curvas de fadiga expressas como uma função da diferença de tensões inicial ( $\Delta\sigma$ ) em MPa e da deformação específica resiliente inicial ( $\epsilon_i$ ).

Misturas	$N = k_2 \left( \frac{1}{\Delta\sigma} \right)^{n_2}$			$N = k_1 \left( \frac{1}{\epsilon_i} \right)^{n_1}$		
	$k_2$	$n_2$	$R^2$	$k_1$	$n_1$	$R^2$
Referência	5076	4,46	0,95	$2.10^{-15}$	4,46	0,95
Experimental B1	12845	2,75	0,86	$8.10^{-8}$	2,75	0,86
Experimental B2	8035	2,64	0,55	$3.10^{-7}$	2,64	0,55
Experimental B3	5677	5,48	0,96	$8.10^{-18}$	5,48	0,96



**Figura 4:** Gráfico de vida de fadiga versus diferença de tensões das misturas estudadas.

## 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O critério de dosagem fixando o volume de vazios em 4% para misturas asfálticas tipo CBUQ deve ser reavaliado quando da dosagem de misturas asfálticas modificadas com

adição de borracha uma vez que é um material que apresenta variabilidade na mistura, e sofre influência do tipo, tamanho e quantidade de borracha adicionada.

Considerando ser a mistura asfáltica com agregado borracha um novo produto, com desempenho diferente da mistura densa convencional, o critério de dosagem das misturas asfálticas modificadas com adição de borracha (via seca) deve levar em consideração o comportamento mecânico da mistura associado ao volume de vazios sem a rigidez dos limites fixados na especificação para CBUQ, desde que o teor de vazios mais elevado não seja gerado por má compactação.

As misturas asfálticas modificadas com adição de borracha (via seca) dosadas para um volume de vazios de 4% necessitariam de teores de ligantes elevados, o que encareceria a mistura e poderia aumentar a chance de deformação permanente excessiva.

As misturas asfálticas modificadas com adição de borracha triturada de pneus apresentaram menores valores de resistência à tração e de módulo de resiliência quando comparadas com a mistura de referência, indicando uma menor rigidez da mistura, maior flexibilidade e resistência à fadiga, levando a menores tensões absorvidas pelo revestimento. Quanto ao ensaio de fadiga, as misturas com borracha B1 e B2 apresentaram comportamento superior para baixos níveis de tensão em relação à mistura convencional.

## **AGRADECIMENTOS**

A Cláudio Viana, Eider de Souza Lima, José Alves de Santana Neto, Gabriel A. Alves e ao Estagiário Gustavo Magalhães da equipe do Laboratório de Engenharia da EMLURB.  
A Ana Maria Sousa pelo apoio e Álvaro Dellê, pela realização dos ensaios de módulo de resiliência e fadiga, ambos do Laboratório de Geotecnia da COPPE/UF RJ.

## **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- AASHTO T 283 (1989). "Resistance of Compacted Bituminous Mixture to Moisture Induced Damage", American Association of State Highway and Transportation Officials.
- BALLIÉ, M.; ROFFÉ, J. (2000). "Low-Noise Asphalt Concrete for Wearing Course Using Crumb Rubber Powder from Used Tires". Proceedings of the Asphalt Rubber 2000 Conference. Portugal, pp.485-494.
- BENEVIDES, S. A. S. (2000). "Análise Comparativa dos Métodos de Dimensionamento de Pavimentos Asfálticos: Empírico do Dner e da Resiliência da Coppe/UF RJ em Rodovias do Estado do Ceará. Tese de Mestrado, COPPE/UF RJ, Rio de Janeiro.
- BERTOLLO, S. A. M. (2002). "Avaliação Laboratorial de Misturas Asfálticas Densas Modificadas com Borracha Reciclada de Pneus". Tese, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- CONAMA (1999). "Resolução n.º 258/99 do Conselho Nacional do Meio Ambiente".
- DNER-ME 043/95 (1995). "Misturas betuminosas a quente - Ensaio Marshall". Departamento Nacional de Estradas de Rodagem - Método de Ensaio, Rio de Janeiro.
- DNER-ME 133/94 (1994a). "Misturas Betuminosas - Determinação do módulo de resiliência". Departamento Nacional de Estradas e Rodagem - Método de Ensaio, Rio de Janeiro.
- DNER-ME 138/94 (1994b). "Misturas Betuminosas - Determinação da resistência à tração por compressão diametral". Departamento Nacional de Estradas de Rodagem - Método de Ensaio, Rio de Janeiro.
- DNER-ME 383/99 (1999). "Desgaste por abrasão de misturas betuminosas com asfalto polímero - ensaio Cantabro". Departamento Nacional de Estradas de Rodagem - Método de Ensaio, Rio de Janeiro.
- EMLURB (2003). "Tabela para Contratação de Serviços de Engenharia. Empresa de Manutenção e Limpeza Urbana da Cidade do Recife". Recife.

- FHWA (1993). "Background of Superpave Asphalt Mixture Design and Analysis". National Asphalt Training Center. Demonstration Project 101. U. S. Department of Transportation. Federal Highway Administration. Publication N.º FHWA-SA- 95-003.
- GALLEG0, J., M.A.; DEL VAL e RAZ, R.T (1999). "Digestión del Caucho de Neumáticos Incorporado Por Vía Seca a Las Mezclas Asfálticas". XII Congreso Ibero-Latinoamericano. Madrid, pp. 2065-2074.
- ODA, S. (2000). "Análise da Viabilidade Técnica do Uso de Ligante Asfalto-Borracha em Obras de Pavimentação". Tese, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo.
- PATRIOTA, M.B. (2003). "Caracterização de Misturas Asfálticas Utilizadas na Cidade do Recife". 12.ª Reunião de Pavimentação Urbana – RPU, Associação Brasileira de Pavimentação - ABPv, Aracaju.
- PATRIOTA, M.B. (2004). *Análise Laboratorial de concreto betuminoso usinado a quente modificado com adição de borracha reciclada de pneus – processo seco* – Dissertação Departamento de Engenharia Civil – Universidade Federal de Pernambuco.
- PINHEIRO, J.H.M., SOARES, J.B. e LEITE, L.F.M. (2003). "Caracterização de Misturas Asfálticas com Borracha Produzidas pelos Processos Úmido e Seco". Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes - 17.º ANPET, pp. 116-129, Rio de Janeiro.
- SALINI, R.B. (2000). "Utilização de Borracha Reciclada de Pneus em Misturas Asfálticas". Tese de Mestrado, UFSC, Florianópolis.
- SPECHT, L.P., CERATTI, J.A. e PALUDO, I. (2002). "Utilização de Borracha Reciclada como Agregado de Concreto Asfáltico: Avaliação Laboratorial". 16.º Encontro de Asfalto, IBP, Rio de Janeiro.
- SOARES, J. B., MOTTA, L.M.G., PAIVA, J.A e CASTELO BRANCO, J. V. (2000). "Propriedades mecânicas de misturas asfálticas preparadas com vários ligantes e granulometrias" – 15º Encontro de Asfalto - IBP – Rio de Janeiro.

Marcelo de Barros Patriota

Rua João, 22 – IPSEP

Recife – PE

[patriota@recife.pe.gov.br](mailto:patriota@recife.pe.gov.br)

Laura Maria Goretti da Motta

Rua Vitor Meireles, 518 – Riachuelo

Rio de Janeiro – RJ

[laura@geotec.coppe.ufri.br](mailto:laura@geotec.coppe.ufri.br)

Ivaldo Dário da Silva Pontes Filho

Rua Antônio Falcão, 504 - Apto. 1004 - Boa Viagem

Recife – PE

[ivaldo@ufpe.br](mailto:ivaldo@ufpe.br)