

**37<sup>a</sup> REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO  
11<sup>o</sup> ENCONTRO NACIONAL DE CONSERVAÇÃO RODOVIÁRIA  
37<sup>a</sup> RAP<sub>v</sub> / 11<sup>o</sup> ENACOR**

**GOIÂNIA/GO - BRASIL - 08 a 11 de agosto de 2006**

**Local: Centro de Convenções de Goiânia**

**INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA DE DIGESTÃO NO  
COMPORTAMENTO DOS ASFALTOS-BORRACHA OBTIDOS PELO  
PROCESSO ÚMIDO**

*Silvrano Adonias Dantas Neto<sup>1</sup>; Márcio Muniz de Farias<sup>2</sup> & Jorge Carvalho Pais<sup>3</sup>*

---

<sup>1</sup> Universidade Federal do Ceará, Campus do Pici, Bloco 713, Fortaleza, Ceará, CEP 60.455-760, e-mail: [silvrano@ufc.br](mailto:silvrano@ufc.br)

<sup>2</sup> Universidade de Brasília, Campus Darcy Ribeiro, Bloco SG-12, Asa Norte, Brasília, Distrito Federal, CEP 70.910-900, e-mail: [muniz@unb.br](mailto:muniz@unb.br)

<sup>3</sup> Universidade do Minho, Campus de Azurém, Departamento de Engenharia Civil, 4800, Guimarães, Portugal, e-mail: [jpais@civil.uminho.pt](mailto:jpais@civil.uminho.pt)

## RESUMO

Os asfaltos-borracha são materiais obtidos pela incorporação de uma borracha granulada reciclada de pneus usados a um ligante asfáltico convencional. O processo de mistura entre estes dois materiais ocorre sob determinadas condições de tempo e temperatura que influenciam diretamente o comportamento do produto obtido, ou seja, do asfalto-borracha. Em geral não existem parâmetros pré-definidos para a escolha do tempo, e principalmente da temperatura empregada na fabricação dos asfaltos-borracha, sendo estes parâmetros normalmente adotados em função da experiência de cada produtor de asfalto-borracha, ou em função das limitações dos equipamentos disponíveis. Sendo assim, este trabalho tem por objetivo apresentar um estudo sobre a influência da temperatura de digestão empregada na fabricação dos asfaltos-borracha obtidos pelo processo úmido [1], tanto nas propriedades físicas dos asfaltos-borracha, medidas por meio de ensaios laboratoriais convencionais (penetração, viscosidade rotacional, ponto de amolecimento e resiliência), como nas propriedades mecânicas (resistência à tração, módulo resiliente, vida de fadiga e resistência às deformações permanentes) das misturas asfálticas produzidas com estes materiais. Os resultados mostraram que em geral o aumento da temperatura tende a produzir ligantes com maior capacidade de recuperação elástica e maior ponto de amolecimento, resultando em uma melhoria das propriedades relacionadas à flexibilidade, resistência ao trincamento por fadiga e resistência às deformações permanentes das misturas asfálticas produzidas.

**PALAVRAS-CHAVE:** asfalto-borracha, processo úmido, temperatura de digestão.

## ABSTRACT

Asphalt rubber binders are obtained incorporating crumb rubber recycled from ground used tires into a straight binder. The process of manufacturing of asphalt rubber binders occurs under conditions of time e temperature that influenced the properties of these materials. In general, there aren't criteria for the choice of time and temperature to be used on the manufacturing of asphalt rubber binders, being these parameters defined in function of experience of each manufacturer, or in function of equipments used to produce these modified binders. The aim of this paper is to present a study about the influence of temperature of digestion used in the manufacturing process of asphalt rubber binders, obtained by the wet process [1], such on their physical properties (penetration, rotational viscosity, softening point and resilience), as on the mechanical properties (tension strength, fatigue life, resilient modulus, permanent deformations) of asphalt rubber hot mixes. The results obtained show that, in general, the increase of temperature of digestion produce modified binders with higher elastic recovery and softening point, improving the mechanical properties of asphalt hot mixes produced related to flexibility, resistance to cracking and permanent deformations.

**KEY WORDS:** asphalt rubber, wet process, temperature of digestion.

## INTRODUÇÃO

No Brasil, é crescente a deterioração da rede rodoviária existente, constituída na sua grande maioria por pavimentos flexíveis com revestimentos betuminosos. Entre as principais causas da ruína dos pavimentos flexíveis estão a fadiga das misturas betuminosas, que levam ao trincamento excessivo da camada de revestimento, e o acúmulo de deformações permanentes que se apresentam na forma dos afundamentos excessivos nas trilhas de roda. Assim sendo, torna-se cada vez mais necessária a utilização de materiais que confirmam melhores características de resistência e durabilidade aos pavimentos flexíveis das rodovias brasileiras.

A melhoria das características das misturas asfálticas empregadas nas camadas de revestimento pode ser obtida de diversas maneiras, podendo-se destacar, a utilização de granulometrias alternativas e a modificação dos ligantes asfálticos empregados na confecção destas misturas. Os processos de modificação dos ligantes asfálticos, tema este tratado neste trabalho, tem sido bastante empregado na engenharia rodoviária brasileira consistindo na incorporação aos ligantes asfálticos convencionais de polímeros (EVA, SBS, etc), ou de outros produtos, como por exemplo, a borracha granulada reciclada de pneus usados.

A incorporação de borracha granulada reciclada de pneus usados aos ligantes asfálticos convencionais tem como produto final um ligante asfáltico modificado conhecido como asfalto-borracha. Os asfaltos-borracha são normalmente obtidos por dois processos [1]: o processo úmido, em que a mistura entre o ligante asfáltico convencional e a borracha ocorre ao longo de um determinado período de tempo a elevadas temperaturas; e o processo seco, no qual a borracha granulada é inicialmente misturada aos agregados minerais, sendo posteriormente adicionado o ligante asfáltico convencional à mistura agregado-borracha.

Em geral, não existem parâmetros pré-definidos para a escolha do tempo, e principalmente da temperatura empregada na fabricação dos asfaltos-borracha pelo processo úmido, sendo estes parâmetros normalmente adotados em função da experiência de cada produtor de asfalto-borracha, ou em função das limitações dos equipamentos empregados no processo de produção. Por esta razão, este trabalho se propõe a apresentar um estudo sobre a influência da temperatura de digestão empregada na fabricação dos asfaltos-borracha obtidos pelo processo úmido nas propriedades físicas (penetração, viscosidade rotacional, ponto de amolecimento e resiliência) dos asfaltos-borracha, e nas propriedades mecânicas (resistência à tração, módulo resiliente, vida de fadiga e resistência às deformações permanentes) de misturas asfálticas confeccionadas com os asfaltos-borracha produzidos em laboratório.

Os resultados obtidos a partir dos ensaios de laboratório realizados mostraram que em geral o aumento da temperatura empregada no processo de fabricação dos asfaltos-borracha contribui para o aumento da capacidade de recuperação elástica e aumento do ponto de amolecimento dos ligantes modificados estudados, resultando assim em uma melhoria das suas propriedades relacionadas à flexibilidade, resistência ao trincamento por fadiga e resistência às deformações permanentes das misturas asfálticas produzidas.

## MATERIAIS UTILIZADOS

### Borracha granulada e ligante asfáltico convencional empregado

Neste trabalho, foi utilizada uma borracha granulada obtida pelo processo de moagem a temperatura ambiente [1], sendo constituída por aproximadamente 20% de pneus de caminhões e 80% de pneus de carros de passeio de diferentes tipos e origens. A Tabela 1 apresenta a descrição da distribuição granulométrica da borracha e a faixa granulométrica especificada pelo Departamento de Transportes do Arizona (ADOT) para borracha a ser empregada na produção dos asfaltos-borracha pelo processo úmido.

Tabela 1. Borracha granulada reciclada de pneus usados.

Peneiras		Porcentagem passando em peso		
Pol	mm	Faixa especificada pelo ADOT		Borracha
Nº 4	4,75	100	100	100
Nº 10	2,00	100	100	96,8
Nº 16	1,18	65	100	47,7
Nº 30	0,60	20	100	18,7
Nº 50	0,30	0	45	7,5
Nº200	0,075	0	5	0

Artigo 37ª RAPv/11ª ENACOR - nº. 101

**Os Caminhos da Integração**  
**Goiania/GO - BRASIL - 08 a 11 de agosto de 2006**

O ligante asfáltico convencional empregado na fabricação das amostras de asfalto-borracha e na confecção das misturas asfálticas estudadas neste trabalho consiste num cimento asfáltico de petróleo classificado pelo critério de penetração como CAP 50/70. A Tabela 2 apresenta os resultados dos ensaios de caracterização das propriedades físicas do ligante asfáltico convencional CAP 50/70 empregado.

Tabela 2. Caracterização do ligante asfáltico convencional empregado.

Propriedades físicas	CAP 50/70
Penetração, ASTM D 5-95 (1/10 mm)	52,0
Ponto de amolecimento, ASTM D36-97 (°C)	50,6

### Agregados minerais

Neste trabalho foram empregados os seguintes materiais granulares, de natureza granítica, na confecção das misturas asfálticas estudadas: brita 1, brita 0 e pó-de-pedra. Como material de enchimento foi utilizado um fíler granítico existente no laboratório de pavimentação da Universidade do Minho em Portugal, onde foram confeccionadas e ensaiadas todas as misturas asfálticas estudadas neste trabalho. A mistura dos agregados apresenta uma graduação contínua, denominada pela especificação DNER-ES 313/97 como faixa C, indicada para utilização como faixa de rolamento nos pavimentos flexíveis.

Na Tabela 3 é apresentada a composição da mistura de agregados, para atender à faixa granulométrica escolhida e os resultados dos ensaios de caracterização dos agregados descritos anteriormente. A Figura 1 apresenta as curvas granulométricas da faixa de projeto utilizada para as misturas de graduação densa (Faixa C) e da mistura teórica obtida a partir da composição descrita na Tabela 3 para os agregados minerais empregados.

Tabela 3. Caracterização dos agregados graníticos utilizados.

Propriedades físicas	Brita 1	Brita 0	Pó-de-pedra	Fíler
Composição da mistura de agregados (%)	10	30	55	5
Peso específico aparente dos grãos (kN/m <sup>3</sup> )	26,4	25,8	25,2	25,2
Peso específico real dos grãos (kN/m <sup>3</sup> )	26,9	26,8	27,1	27,1
Absorção de água (%)	0,77	1,39	-	-

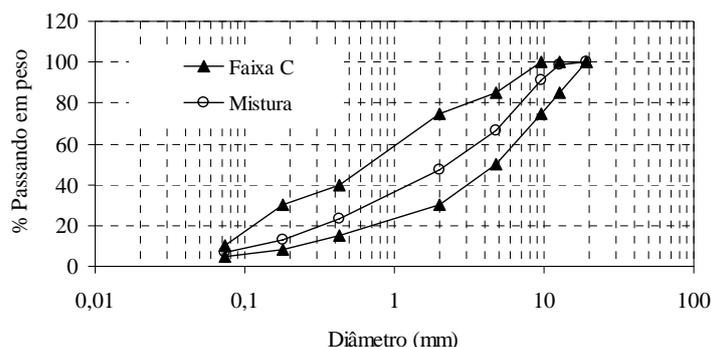
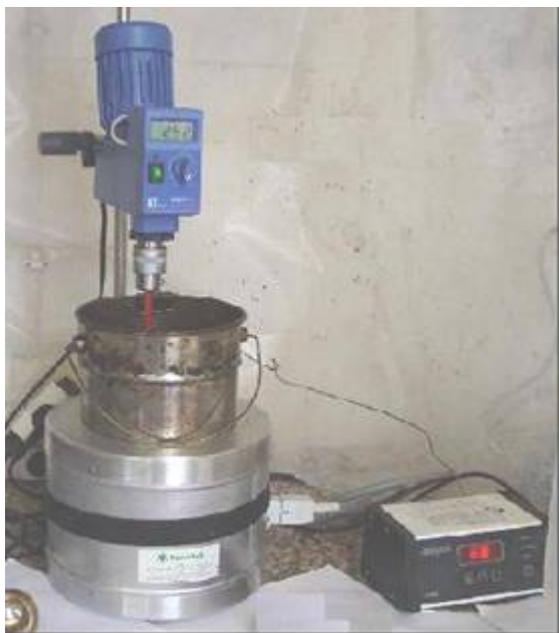


Figura 1. Curvas granulométricas da faixa de projeto e da mistura teórica obtida para a confecção das misturas asfálticas de graduação densa (Faixa C da especificação DNER-ES 313/97).

## PROCEDIMENTOS LABORATORIAIS

### Confecção das amostras de asfalto-borracha

A Figura 2 mostra os equipamentos utilizados para a fabricação das várias amostras de asfalto-borracha estudadas neste trabalho. Estes equipamentos consistem em um forno, equipado com um controlador de temperatura e um conjunto motor/hélice para facilitar a mistura e as interações entre o ligante asfáltico convencional e a borracha granulada.



(a)



(b)

Figura 2. Equipamentos empregados para produção dos asfaltos-borracha em laboratório

A velocidade de rotação escolhida para a hélice foi aquela que promovesse uma mistura homogênea entre a borracha granulada e o ligante asfáltico, sem segregação e sedimentação das partículas. Os valores utilizados para a velocidade da hélice variaram de 250-300 rpm.

#### Confecção e dosagem das misturas asfálticas

Neste trabalho, o processo de mistura entre os agregados minerais e os ligantes asfálticos foi realizado utilizando-se uma misturadora mecânica com capacidade de misturar 50 kg de materiais em cada operação. O procedimento adotado para a confecção das misturas asfálticas consistiu basicamente das seguintes etapas:

- Secagem dos agregados minerais em estufa nas temperaturas descritas na Tabela 4;
- Pesagem dos agregados minerais e do ligante asfáltico (convencional ou asfalto-borracha) numa quantidade tal que a mistura final apresentasse após a compactação a densidade aparente de projeto determinada no estudo de dosagem;
- Colocação da mistura asfáltica no estado solto em estufa à temperatura de compactação, descrita na Tabela 4, durante 1 hora;
- Compactação da mistura asfáltica.

Tabela 4. Temperaturas empregadas na dosagem e confecção das misturas asfálticas.

Temperaturas empregadas	Ligante convencional	Asfalto-borracha
Temperatura do ligante para mistura (°C)	160	170
Temperatura de aquecimento dos agregados (°C)	177	190
Temperatura de compactação (°C)	160	164

A compactação das misturas asfálticas foi realizada em um molde metálico com dimensões 7,3 x 49,2 x 75,2 cm, utilizando-se um rolo liso, até atingir a densidade aparente de projeto especificada para cada tipo de mistura. O procedimento que foi utilizado para a compactação das misturas asfálticas estudadas foi baseado na norma AASHTO PP3/94, e apresenta como principais vantagens: rapidez e facilidade de se atingir a densidade de projeto (previamente definida), boa uniformidade do material após a compactação e baixo número de perdas de placas devido a problemas de compactação, além da realização de uma compactação mais próxima daquela que ocorre no campo.

Neste trabalho foi utilizado o método Marshall (DNER-ME 043/94) para o estudo de dosagem das misturas asfálticas convencionais e modificadas com borracha.

### PROPRIEDADES FÍSICAS DOS ASFALTOS-BORRACHA PRODUZIDOS

Para o estudo da influência da temperatura de fabricação nas propriedades físicas dos asfaltos-borracha foram empregados os resultados dos ensaios realizados em amostras confeccionadas a partir da incorporação de 21%, em peso, da borracha anteriormente descrita, no ligante asfáltico convencional. As Figuras 3 a 8 apresentam os resultados dos ensaios de penetração, viscosidade rotacional medida pelo viscosímetro Brookfield, ponto de amolecimento e resiliência realizados nas amostras fabricadas a 170°C, 190°C e 210°C.

Os resultados da Figura 3 mostram que o aumento da temperatura de fabricação não afeta a penetração das amostras de asfalto-borracha. Isto significa que a incorporação da borracha diminui a tendência de endurecimento dos ligantes convencionais com o aumento da temperatura a que estão submetidos [1]. Entretanto, este processo de endurecimento ainda pode ser observado com o aumento do tempo de mistura.

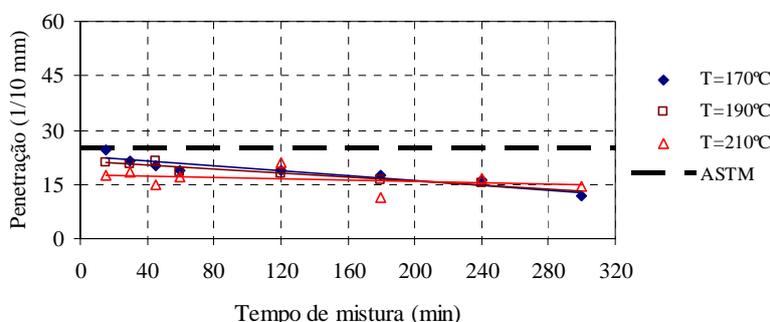


Figura 3. Variação da penetração das amostras com o tempo e a temperatura de mistura.

Como os ensaios de viscosidade rotacional realizados neste trabalho foram conduzidos na mesma temperatura de fabricação dos asfaltos-borracha, não se pode comparar quantitativamente os resultados apresentados na Figura 4. Em termos de valores absolutos esta comparação não pode ser realizada pois nestes resultados estão implícitas duas variáveis diferentes: a temperatura de ensaio e a temperatura de fabricação das amostras. Entretanto, os resultados dos ensaios de viscosidade apresentados na Figura 4 podem ser analisados segundo o comportamento das amostras ao longo do tempo de mistura. Estes resultados mostram que para baixas temperaturas de fabricação, como por exemplo, 170°C, ocorre um aumento indefinido da viscosidade com o decorrer do processo de mistura, ao contrário do que é observado nas amostras fabricadas a 190°C e 210°C. A diminuição da viscosidade para tempos de mistura superiores a 120 minutos, nas amostras confeccionadas a 190°C e 210°C, reforça a suspeita de que esteja ocorrendo algum processo de desvulcanização da borracha a elevadas temperaturas de fabricação [1].

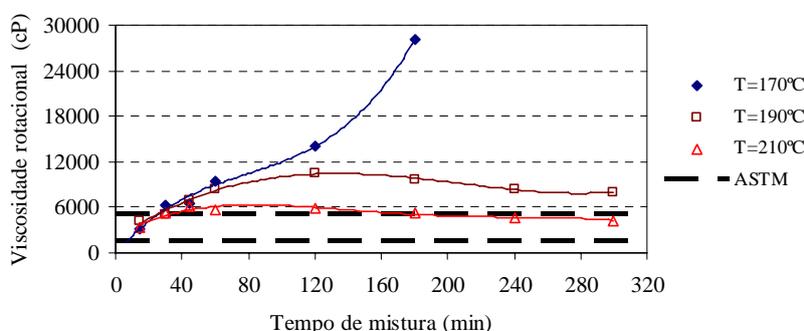


Figura 4. Variação da viscosidade rotacional das amostras com o tempo e a temperatura de mistura.

Os resultados apresentados na Figura 5 mostram que há um aumento do ponto de amolecimento com o aumento da temperatura de fabricação, principalmente para tempos de mistura de até 180 minutos. Este aumento do ponto de amolecimento pode ser atribuído à perda dos compostos voláteis do ligante convencional que ocorre tanto pela evaporação das frações leves da fase asfáltica a elevadas temperaturas, como pela absorção destas frações pelas partículas de borracha. Pelos resultados obtidos para o ligante convencional pode-se imaginar que o aumento do ponto de amolecimento dos asfaltos-borracha com a temperatura de fabricação seja apenas devido à evaporação das frações leves da fase asfáltica. Se isto acontecesse, o aumento do ponto de amolecimento com a temperatura nos asfaltos-borracha ocorreria na mesma proporção que o aumento verificado no ligante convencional. Por esta razão, o ganho do ponto de amolecimento com o aumento da temperatura foi calculado tanto para as amostras de asfalto-borracha, como para as amostras do ligante asfáltico convencional.

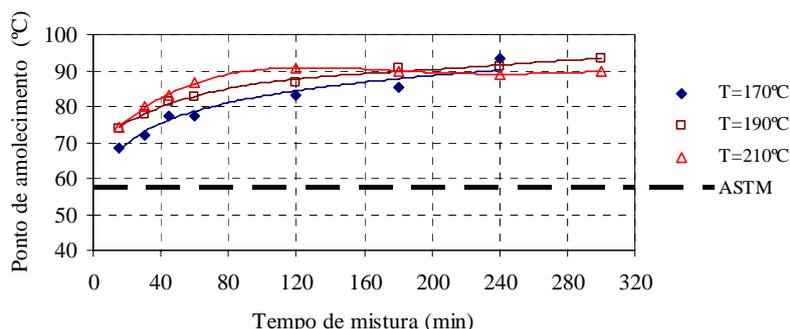


Figura 5. Variação do ponto de amolecimento das amostras com o tempo e a temperatura de mistura.

Na Figura 6 estão apresentados os valores absolutos dos desvios ( $\Delta^{\circ}\text{C}$ ) calculados entre o ponto de amolecimento dos asfaltos-borracha (AB) e do CAP 50/70 obtidos a 190°C e a 170°C. A Figura 7 apresenta estes mesmos valores calculados para as temperaturas de 210°C e 170°C. Conforme pode ser observado em cada uma destas figuras, o aumento da temperatura de fabricação produz uma variação no ponto de amolecimento dos asfaltos-borracha maior do que no ligante asfáltico convencional.

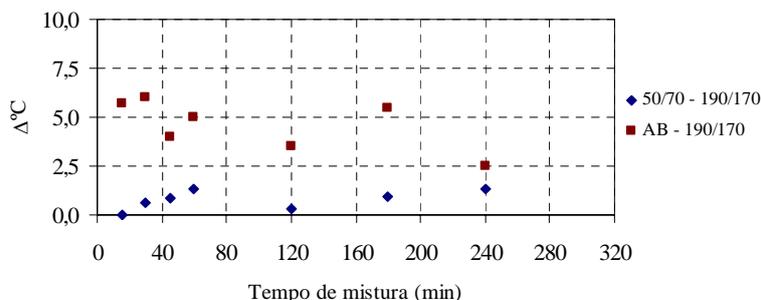


Figura 6. Desvio absoluto entre o ponto de amolecimento dos asfaltos-borracha (AB) e do ligante convencional (CAP 50/70) obtidos nas temperaturas de 190°C e 170°C.

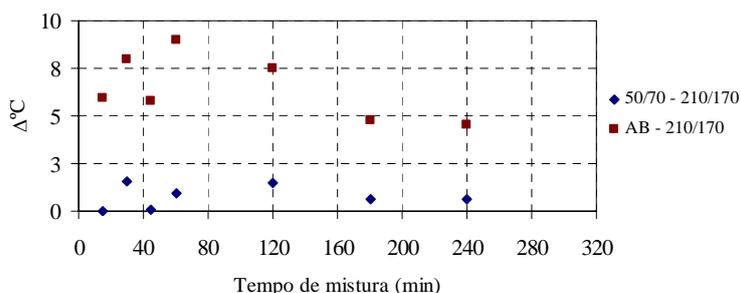


Figura 7. Desvio absoluto entre o ponto de amolecimento dos asfaltos-borracha (AB) e do ligante convencional (CAP 50/70) obtidos nas temperaturas de 210°C e 170°C.

A partir destes resultados, pode-se concluir que o aumento produzido nos valores do ponto de amolecimento dos asfaltos-borracha pela temperatura de fabricação não ocorre devido apenas a evaporação das frações leves da fase asfáltica existente. Logo, pode-se imaginar que a absorção das frações leves do ligante convencional pela borracha realmente ocorra, e que esta absorção é tanto maior, quanto maior for a temperatura de fabricação dos asfaltos-borracha, já que os desvios apresentados na Figura 7 são superiores àqueles apresentados na Figura 6.

Com relação ao estudo da resiliência, os resultados apresentados na Figura 8 mostram que o aumento da temperatura de fabricação produz uma diminuição na resiliência dos asfaltos-borracha. Esta diminuição da resiliência pode ser atribuída à maior intensidade de um provável processo de desvulcanização das partículas de borracha existentes nos asfaltos-borracha quando são empregadas elevadas temperaturas de fabricação [1]. Mesmo assim, pode-se observar que a resiliência de todas as amostras de asfalto-borracha estudadas atende ao valor mínimo especificado pela ASTM D6114/97.

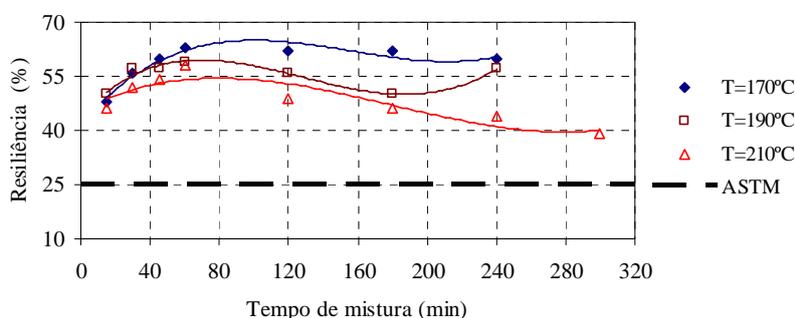


Figura 8. Variação da resiliência das amostras com o tempo e a temperatura de mistura.

### PROPRIEDADES MECÂNICAS DAS MISTURAS ASFÁLTICAS ESTUDADAS

Para o estudo da influência da temperatura de fabricação dos asfaltos-borracha nas propriedades mecânicas das misturas asfálticas foram estudadas as misturas asfálticas confeccionadas com o ligante asfáltico convencional e com as seguintes configurações de asfalto-borracha:

- Asfalto-borracha 1 (AB-1): confeccionado com 21% de borracha, a 170°C, durante 60 minutos;
- Asfalto-borracha 2 (AB-2): confeccionado com 21% de de, a 190°C, durante 60 minutos;
- Asfalto-borracha 3 (AB-3): confeccionado com 21% de borracha, a 210°C, durante 60 minutos;

As misturas asfálticas, confeccionadas com o ligante asfáltico convencional (CAP 50/70), e com os asfaltos-borracha (AB), foram confeccionadas com os parâmetros volumétricos apresentados na Tabela 5, obtidos a partir do estudo de dosagem realizado. Convém salientar que as misturas feitas com os asfaltos-borracha AB-1, AB-2 e AB-3 foram confeccionadas com os mesmos parâmetros volumétricos de forma que as variações no seu comportamento mecânico ocorressem apenas devido às variações nas características dos ligantes modificados empregados, e não em função de variações volumétricas dos seus materiais constituintes.

Tabela 5. Propriedades volumétricas das misturas asfálticas confeccionadas com o ligante asfáltico convencional e com asfalto-borracha.

Propriedades volumétricas das misturas	CAP 50/70	AB
Densidade aparente (kN/m <sup>3</sup> )	22,5	22,5
Porcentagem de vazios (%)	4,5	4,5
Vazios no Agregado Mineral – VAM (%)	19,3	19,2
Relação Betume-Vazios – RBV (%)	76,7	76,7
Porcentagem de ligante em relação à mistura (%)	7,05	9,61

## Resistência à tração

Os ensaios de resistência à tração indireta por compressão diametral foram conduzidos à temperatura de 20°C, sobre corpos-de-prova submetidos ao envelhecimento na estufa a 85°C por 5 dias, e também sobre corpos-de-prova não-envelhecidos. Este processo simula o envelhecimento a longo prazo que ocorre nas misturas asfálticas em campo, sendo normalizado pela AASHTO PP2/94 [2]. Os ensaios foram realizados segundo as recomendações da norma DNER-ME 138/94 [3].

Para se ter maior confiabilidade nas análises realizadas neste trabalho, os resultados dos ensaios de resistência à tração, apresentados nesta seção e nas seguintes, foram submetidos a uma análise de variância (ANOVA) [4]. Este tipo de análise permite determinar se as diferenças observadas nos resultados dos ensaios são provenientes da variabilidade própria do ensaio de resistência à tração, ou se correspondem ao emprego de materiais diferentes na confecção das misturas asfálticas estudadas.

Os resultados apresentados neste trabalho para as análises de variância foram obtidos com a ferramenta de análise ANOVA do programa Statistica 6.0. Uma das vantagens deste programa é que ele permite a determinação de grupos homogêneos quanto à média amostral do parâmetro estudado, isto é, conjuntos formados pelas misturas asfálticas com mesma resistência à tração. Estatisticamente, isto significa que as variáveis pertencentes a um mesmo grupo, mas com diferentes médias amostrais para o parâmetro estudado, fazem parte da mesma população, sendo as diferenças entre as suas médias decorrentes da variabilidade própria do ensaio realizado.

A Tabela 6 apresenta o resumo da análise de variância realizada a partir dos resultados de resistência à tração apresentados na Figura 9, para um nível de confiança de 95%. Os resultados apresentados nesta tabela devem ser interpretados considerando que para as misturas asfálticas pertencentes a um mesmo grupo homogêneo, as diferenças entre os resultados da resistência à tração não podem ser consideradas significativas. A determinação dos grupos homogêneos foi feita a partir do emprego da Distribuição de Fisher [4].

Tabela 6. Grupos homogêneos determinados pela análise de variância dos resultados dos ensaios de resistência à tração das misturas asfálticas empregadas no estudo da temperatura de fabricação dos asfaltos-borracha.

Envelhec. S/N	Ligante	$\sigma_t$ MÉDIA (MPa)	Grupos homogêneos												
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11		
N	CAP 50/70	0,94		**	**										
N	AB-3	0,95		**	**	**									
S	AB-3	1,10					**	**	**	**					
S	CAP 50/70	1,13						**	**	**	**				
N	AB-1	1,15							**	**	**				
N	AB-2	1,16							**	**	**	**			
S	AB-1	1,30													**
S	AB-2	1,31													**

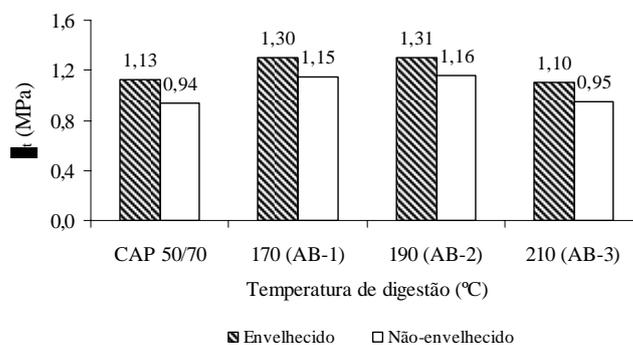


Figura 9. Influência da temperatura de fabricação dos asfaltos-borracha na resistência à tração das misturas asfálticas.

Os resultados indicam que, em geral, a resistência à tração das misturas asfálticas não é afetada pelo aumento da temperatura empregada para a fabricação dos asfaltos-borracha. Apenas para as misturas asfálticas confeccionadas com o asfalto-borracha AB-3, produzido com uma temperatura de 210°C, é que foi observada uma redução na resistência à tração com o aumento da temperatura empregada na fabricação do ligante, como também em relação à mistura asfáltica convencional.

### Módulo resiliente e ângulo de fase

Neste trabalho, os ensaios de módulo resiliente foram realizados sob deformação controlada, segundo recomendações da AASHTO TP8/96 [5], em corpos-de-prova prismáticos em forma de viga com as seguintes dimensões:  $381 \pm 6,35$  mm de comprimento,  $50,8 \pm 6,35$  mm de altura e  $63,5 \pm 6,35$  mm de largura. Todos os corpos-de-prova ensaiados foram submetidos a um processo de envelhecimento, permanecendo em estufa a 85°C por um período de 5 dias. Este processo simula o envelhecimento a longo prazo que ocorre nas misturas asfálticas em campo, sendo normalizado pela AASHTO PP2/94 [2]. Os ensaios de módulo resiliente foram realizados a 20°C sob frequências de carregamento de 10, 5, 2, 1, 0,5 0,2, 0,1.

As Figura 10 e 11 apresentam os resultados dos ensaios de módulo resiliente e os valores dos ângulos de fase das misturas asfálticas confeccionadas com os asfaltos-borracha AB-1, AB-2 e AB-3, obtidos com temperatura de fabricação de 170°C, 190°C e 210°C, respectivamente.

Estes resultados mostram que o aumento da temperatura de fabricação dos asfaltos-borracha resulta em uma diminuição dos valores de módulo resiliente das misturas asfálticas confeccionadas com estes ligantes modificados. Com relação aos valores do ângulo de fase das misturas asfálticas, não são verificadas diferenças significativas devido ao aumento da temperatura de fabricação dos asfaltos-borracha com os quais estas misturas foram confeccionadas. De qualquer forma, para todas as misturas estudadas, independentemente da temperatura empregada na fabricação dos asfaltos-borracha, ocorre uma diminuição considerável dos valores do ângulo de fase em relação aos valores apresentados para as misturas asfálticas confeccionadas com o ligante asfáltico convencional CAP 50/70, indicando uma melhoria do comportamento elástico das misturas asfálticas com asfalto-borracha.

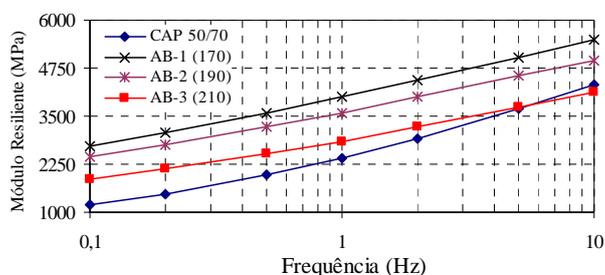


Figura 10. Módulo resiliente das misturas asfálticas.

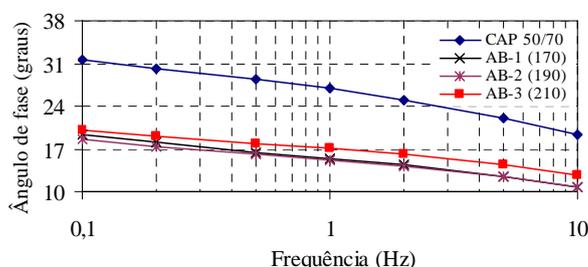


Figura 11. Ângulo de fase das misturas asfálticas.

### Resistência ao trincamento por fadiga

Os resultados dos ensaios de fadiga realizados para o estudo da influência da temperatura de fabricação dos asfaltos-borracha estão apresentados na Figura 12. Estes resultados mostram que não há grande influência da temperatura de

fabricação dos asfaltos-borracha na resistência ao trincamento por fadiga das misturas confeccionadas com estes materiais.

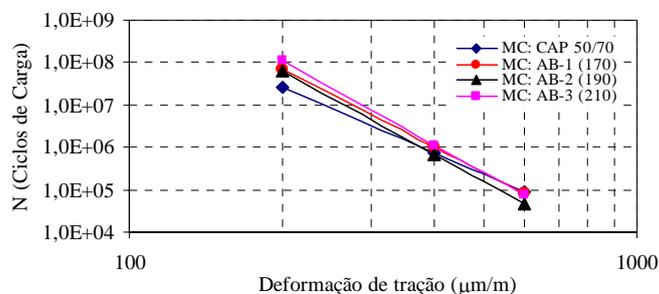


Figura 12. Vida de fadiga das misturas asfálticas estudadas.

Pode-se ainda verificar que todas as misturas asfálticas confeccionadas com asfalto-borracha apresentaram vida de fadiga superior às misturas asfálticas convencionais. Isto mostra que apesar da redução verificada na resiliência dos ligantes modificados com borracha com o aumento da temperatura de fabricação, existe ainda uma melhoria no comportamento elástico destes ligantes, expresso por meio da redução do ângulo de fase e aumento da vida de fadiga das misturas asfálticas estudadas.

As curvas de fadiga apresentadas na Figura 12 podem ser expressas analiticamente na forma:

$$N = k_1 \varepsilon_i^{k_2} \quad (1)$$

Onde:

$N$ : número de ciclos de carga que provoca a ruptura por fadiga das misturas asfálticas;

$\varepsilon_i$ : deformação de tração ( $\mu\text{m/m}$ );

$k_1$  e  $k_2$ : constantes obtidas experimentalmente.

A Tabela 7 apresenta as constantes experimentais  $k_1$  e  $k_2$  para as curvas de fadiga, expressas pela equação (1), das misturas asfálticas confeccionadas com os asfaltos-borracha AB-1, AB-2 e AB-3 e com o ligante asfáltico CAP 50/70.

Tabela 7. Constantes experimentais das curvas de fadiga das misturas asfálticas.

Tipo de mistura asfáltica	$k_1$	$k_2$
Mistura asfáltica confeccionada com AB-1 (MC: AB-1)	$1,0 \times 10^{22}$	-6,1477
Mistura asfáltica confeccionada com AB-2 (MC: AB-2)	$1,0 \times 10^{23}$	-6,6012
Mistura asfáltica confeccionada com AB-3 (MC: AB-3)	$2,0 \times 10^{23}$	-6,6288
Mistura asfáltica confeccionada com CAP 50/70	$2 \times 10^{19}$	-5,6131

### Resistência às deformações permanentes

A resistência às deformações permanentes das misturas asfálticas estudadas neste trabalho foi avaliada por meio do ensaio de cisalhamento cíclico a altura constante. Para a realização destes ensaios foram seguidas as recomendações do método de ensaio AASHTO TP7/01 [6]. O ensaio de cisalhamento cíclico a altura constante consiste em aplicar a um corpo-de-prova cilíndrico, com deformação volumétrica restringida, um carregamento cisalhante cíclico determinando-se as deformações cisalhantes plásticas produzidas. Estas deformações cisalhantes podem ser correlacionadas com as deformações permanentes das misturas asfálticas, podendo-se determinar o número de aplicações de carga do eixo padrão de 82 kN ( $ESAL_{mrd}$ ) necessário para produzir um afundamento na trilha de roda de 12,7 mm [7].

De acordo com os resultados apresentados na Figura 13, pode-se afirmar que o aumento da temperatura de fabricação dos asfaltos-borracha produz um aumento na resistência às deformações permanentes das misturas asfálticas estudadas. Este aumento da resistência às deformações permanentes segue a mesma tendência do aumento do ponto de amolecimento dos asfaltos-borracha a 170°C, 190°C e 210°C.

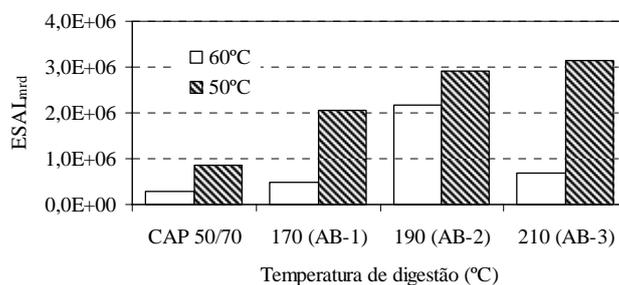


Figura 13. Influência da temperatura de fabricação dos asfaltos-borracha na resistência às deformações permanentes das misturas asfálticas.

## CONCLUSÕES

Os resultados apresentados neste trabalho mostram o tempo e a temperatura empregados no processo de fabricação dos asfaltos-borracha influenciam as propriedades físicas dos asfaltos-borracha, e conseqüentemente, o comportamento mecânico das misturas asfálticas confeccionadas com estes ligantes modificados. Isto pode ser verificado, nos resultados dos ensaios realizados nas amostras de asfalto-borracha e nas misturas asfálticas estudadas.

Os principais efeitos verificados nas propriedades mecânicas das misturas foram relacionados ao módulo resiliente e à resistência às deformações permanentes. Os resultados mostraram que o aumento da temperatura de fabricação dos asfaltos-borracha produziu uma diminuição nos valores do módulo resiliente das misturas e um aumento na sua resistência às deformações permanentes. A resistência ao trincamento das misturas asfálticas confeccionadas com asfalto-borracha não foi afetada pela variação da temperatura de fabricação destes materiais.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Dantas Neto, S. A. (2004). Avaliação das Propriedades dos Ligantes e das Misturas Asfálticas Modificadas com Borracha Granulada de Pneus Usados. Tese de Doutorado, Publicação G.TD - 024/04, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 265p..
- [2] AASHTO (1994). AASHTO PP2 – Standard Practice for Mixture Conditioning of Hot-Mix Asphalt (HMA). American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington D.C., United States of America, p. 34-36.
- [3] DNER (1994). DNER – ME 138 – Misturas betuminosas – determinação da resistência à tração por compressão diametral. Método de Ensaio, Departamento Nacional de Estradas e Rodagem, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 4p.
- [4] Assis, A.P., Espósito, A.P, Gardoni, T.J. & Silva, M.G (2001). Métodos Estatísticos e Probabilísticos em Geotecnia. Apostila, Publicação G.AP-002/01, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF.
- [5] AASHTO (1994). AASHTO TP8 – Standard Test Method for Determining the Fatigue Life of Compacted Hot-Mix Asphalt (HMA) Subjected to Repeated Flexural Bending. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington D.C., United States of America, p. 157-168.
- [6] AASHTO (2001). AASHTO TP7 – Standard Test Method for Determining the Permanent Shear Strain and Stiffness of Asphalt Mixtures Using the Superpave Shear Tester (SST). American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington D.C., United States of America, p. 146-156.
- [7] Sousa J.B., Solamian, M. & Weissman, L. (1994). Development and use of the Repeated Shear Test (Constant Height): an optional Superpave mix design tool. Strategic Highway Research Program, National Research Council, Washington, 78p.

## AGRADECIMENTOS

Este trabalho fez parte de uma pesquisa de doutorado desenvolvida no programa de Pós-graduação em Geotecnia da Universidade de Brasília e com apoio do Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho. Contribuíram para a realização do trabalho a CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) e o CNPQ (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico), além de diversas empresas portuguesas (Consulpav, Recipav, Biosafe, Pedreira Bezerra, Cepsa, Petrogal). Os autores agradecem a contribuição de todos.