

Universidade do Minho

[CN-17]

Neto, S.A.D., Farias, M.M., **Pais, J.C.**

“Misturas asfálticas de graduação densa modificadas com borracha granuladas pelo processo seco”

35a reunião anual de pavimentação – 35.^a RAPv, Rio de Janeiro – Brasil,
19 – 21 de Outubro de 2004

35ª REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO – 35.ª RAPv

RIO DE JANEIRO– RJ - BRASIL - 19 a 21 de Outubro de 2004

**Local: Auditório da Petrobras Distribuidora
Rua General Canabarro, 500**

MISTURAS ASFÁLTICAS DE GRADUAÇÃO DENSA MODIFICADAS COM BORRACHA GRANULADA PELO “PROCESSO SECO”

Silvrano Adonias Dantas Neto¹; Márcio Muniz de Farias¹ & Jorge Carvalho Pais²

¹ Universidade de Brasília, Distrito Federal, Brasil

² Universidade do Minho, Guimarães, Portugal

RESUMO

O processo de modificação das misturas asfálticas no qual a borracha granulada é inicialmente misturada ao agregado mineral previamente aquecido para então ser adicionado o ligante asfáltico convencional é conhecido como processo seco. Este processo tem como principais vantagens a utilização de instalações de usinagem simples e a não limitação do teor de borracha incorporada. Este trabalho tem como objetivo estudar a influência do teor de borracha incorporada às misturas de graduação densa (faixa C da especificação DNER-ES 313/97) através de ensaios de resistência à tração, módulo resiliente e resistência às deformações permanentes. As misturas asfálticas estudadas foram confeccionadas com uma borracha granulada obtida pelo processo de moagem a temperatura ambiente e um ligante asfáltico convencional classificado por penetração como CAP 50/70. Os teores de borracha incorporada utilizados variaram de 2% a 6% em relação à mistura de agregados minerais. Para efeitos comparativos também foram estudadas uma mistura asfáltica convencional confeccionada com o ligante CAP 50/70 e outra confeccionada com um asfalto-borracha obtido pelo processo úmido. Os resultados dos ensaios mecânicos realizados mostraram que apesar dos problemas de compactação, que ocorreram para elevados teores de borracha incorporada, as misturas asfálticas modificadas com borracha apresentaram uma melhoria significativa em termos de flexibilidade. Com relação às deformações permanentes, os resultados mostraram que as misturas modificadas com borracha pelo processo seco apresentaram um desempenho equivalente ao da mistura convencional.

PALAVRAS-CHAVE: misturas asfálticas; processo seco; borracha granulada.

ABSTRACT

The dry process for producing rubberized asphalt is characterized by the initial addition of crumb rubber to the mineral aggregates prior to the addition of conventional binder. The main advantages of this process are related to the use of conventional mix plants and the lack of restriction with respect to the amount of rubber which can be added to the aggregates. This paper investigates the influence of the percentage of crumb rubber in dense graded hot mixes (range C of Brazilian Specification DNER-ES 313/97) on mechanical properties such as indirect tensile strength, resilient modulus and rut resistance. Crum rubber, obtained via ambient grinding, and a base binder with penetration grade 50/70 were used to prepare the hot mixes. Rubber contents ranging from 2% to 6%, by weight of mineral aggregates, were tested. Conventional hot mixes with the straight 50/70 binder and with asphalt rubber, produced via the wet process, were also tested for the sake of comparison. The results show that, despite some difficulties during compaction of the mixes produced via the dry process, there is a gain in flexibility when the amount of crumb rubber is increased with reasonable limits. Rut resistance of dry process asphalt rubber mixes were also compatible with those obtained with the conventional hot mix asphalt.

KEY-WORDS: hot asphalt mixes, dry process, crumb rubber.

INTRODUÇÃO

A incorporação de materiais como a borracha granulada reciclada de pneus usados aos materiais asfálticos tem como principal propósito promover a melhoria do comportamento mecânico das misturas asfálticas utilizadas na execução das camadas de revestimento dos pavimentos flexíveis. De uma forma mais específica, estas melhorias correspondem ao aumento de flexibilidade, da vida de fadiga e da resistência ao aparecimento de deformações nas trilhas de roda.

Basicamente, existem dois processos principais de obtenção das misturas asfálticas modificadas com borracha: no primeiro processo, conhecido como processo úmido, as misturas asfálticas são confeccionadas com ligantes asfálticos modificados com borracha granulada sob determinadas condições de tempo e temperatura de mistura; no segundo processo, denominado de processo seco, a borracha granulada é inicialmente misturada ao agregado mineral previamente aquecido para então ser adicionado o ligante asfáltico convencional para a confecção da mistura asfáltica modificada.

Ao contrário das misturas asfálticas confeccionadas com asfaltos-borracha obtidos pelo processo úmido, o processo seco permite a incorporação de elevados teores de borracha granulada, já que não existem limitações relativas à viscosidade do ligante asfáltico empregado [1]. Além disto, para a confecção das misturas asfálticas com borracha pelo processo seco pode-se utilizar instalações de usinagem simples e equipamentos convencionais para a aplicação e compactação das misturas asfálticas no campo.

Este trabalho tem por objetivo estudar o comportamento mecânico das misturas asfálticas de graduação densa (Faixa C da especificação DNER-ES 313/97) modificadas com borracha granulada pelo processo seco, principalmente no que se refere à incorporação de elevados teores de borracha granulada. Para isto foram realizados ensaios de resistência à tração por compressão diametral, módulo resiliente e ensaios de cisalhamento cíclico a altura constante para a avaliação da resistência às deformações permanentes. Além destes, foram também realizados ensaios complementares (Cantabro) para a avaliação da resistência ao desgaste das misturas asfálticas estudadas neste trabalho.

Os resultados dos ensaios realizados nas misturas asfálticas modificadas com borracha granulada pelo processo seco foram comparados a outros obtidos para misturas asfálticas convencionais e misturas asfálticas confeccionadas com asfalto-borracha obtido pelo processo úmido. Com isto pretende-se avaliar as vantagens e desvantagens em termos de comportamento mecânico em se utilizar misturas asfálticas modificadas tanto pela incorporação a seco da borracha granulada, como pela utilização de asfaltos-borracha obtidos pelo processo úmido, relativamente às misturas asfálticas convencionais.

CONSIDERAÇÕES SOBRE OS PROCESSOS DE OBTENÇÃO DAS MISTURAS ASFÁLTICAS MODIFICADAS COM BORRACHA GRANULADA

Segundo Takallou e Takallou [2], existem três processos para a obtenção dos asfaltos-borracha, sendo eles, os processos úmido, seco e uma variação do processo úmido denominada de "Terminal Blend".

No processo úmido, o ligante asfáltico é aquecido a temperaturas da ordem de 190°C, em um tanque de superaquecimento em condições herméticas, sendo transportado em seguida, para um tanque de mistura apropriado, onde ocorre a adição da borracha granulada ao ligante convencional previamente aquecido. O processo de interação entre o ligante asfáltico convencional e a borracha granulada, ocorre em um período de 1 a 4 horas a uma determinada temperatura. Este processo de mistura é facilitado pela ação de um dispositivo mecânico, geralmente uma palheta giratória horizontal introduzida no tanque de mistura [3].

No processo seco, as partículas secas de borracha granulada são primeiramente adicionadas aos agregados minerais pré-aquecidos, antes da adição do ligante asfáltico convencional. Os agregados são aquecidos a temperaturas de aproximadamente 200°C, quando então, adiciona-se a borracha e realiza-se a mistura por um tempo de aproximadamente 15 segundos, ou até a formação de uma mistura agregados e borracha granulada homogênea. Em seguida, adiciona-se o ligante betuminoso a composição granular (borracha e agregados) por meio de processos convencionais de usinagem [3].

Em geral, as dimensões das partículas de borracha utilizadas no processo seco são maiores do que a dimensão das partículas de borracha utilizadas na confecção dos asfaltos-borracha pelo processo úmido. Além disto, a borracha granulada substitui uma parcela da mistura de agregados minerais, funcionando como um material inerte [4]. Problemas como, dificuldade de compactação das misturas, homogeneidade e conseqüente reprodutibilidade no desempenho em campo, além de ruptura prematura têm sido as principais causas da pouca utilização do processo seco na modificação das misturas asfálticas [5].

O termo asfalto-borracha obtido pelo processo seco parece pouco apropriado, já que a borracha granulada é incorporada inicialmente ao agregado mineral a elevadas temperaturas, para posteriormente ser adicionado o ligante convencional.

Além disto, existem determinadas divergências entre autores sobre ocorrência, ou não, de reações entre a borracha granulada e o ligante asfáltico convencional.

Por exemplo, segundo Visser e Verhaeghe [3], no processo seco não há nenhuma fusão do ligante asfáltico convencional com a borracha granulada incorporada. Esta afirmação é reforçada por Takallou e Takallou [2], para os quais não ocorre reação entre os materiais envolvidos, ou seja, entre o ligante asfáltico convencional e a borracha granulada, funcionando esta última apenas como um aditivo e não um agente modificador.

Entretanto, para Momm e Salini [6], baseados em observações realizadas em um microscópio ótico, o granulado de borracha não é inerte e sofre mudanças durante o tempo em que permanece em contato com o ligante asfáltico. Sendo que as reações ocorrem durante o período em que a mistura é transportada da usina ao local de aplicação a elevadas temperaturas.

As possíveis reações entre as partículas de borracha granulada e o ligante convencional que ocorrem no processo seco, possivelmente dependem da granulometria da borracha utilizada. A utilização de um granulado de borracha com elevada superfície específica (partículas de pequenas dimensões) aumenta a área do contato ligante-borracha, favorecendo as reações entre estes materiais durante pequenos intervalos de tempo e sob temperaturas relativamente baixas quando comparadas àquelas utilizadas no processo úmido.

O “Terminal Blend” é o processo que produz a digestão da borracha pelo cimento asfáltico convencional a elevadas temperaturas em uma usina. Este processo tem sido utilizado no estado do Texas, nos Estados Unidos, desde 1989, caracterizando-se por utilizar uma quantidade de borracha geralmente inferior àquela empregada nos processos úmido e seco, descritos anteriormente [2].

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 referida borracha granulada, mostrada na Tabela 1, apresenta tamanhos de grãos variando entre 0,5 a 2,0 mm.

Tabela 1. Granulometria da borracha granulada empregadas e da faixa granulométrica especificada pelo Departamento de Transportes do Arizona (ADOT).

Peneiras		Porcentagem passando em peso		
Pol	mm	Faixa especificada pelo ADOT		Borracha
Nº 4	4,75	100	100	100
Nº 8	2,36	100	99,9	99,9
Nº 10	2,00	100	96,8	96,8
Nº 16	1,18	65	47,7	47,7
Nº 30	0,60	20	18,7	18,7
Nº 50	0,30	0	7,5	7,5
Nº200	0,075	0	0	0

O ligante asfáltico convencional empregado na confecção das misturas asfálticas estudadas neste trabalho consiste num cimento asfáltico de petróleo classificado segundo o 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 filer granítico

Trabalho 35ª RAPv - 050

35ª REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO - 35ª RAPv
Rio de Janeiro - BRASIL - 19 a 21 de Outubro de 2004

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	Filer
Composição da mistura de agregados (%)	10	30	55	5
Peso específico aparente dos grãos (kN/m^3)	26,4	25,8	25,2	25,2
Peso específico real dos grãos (kN/m^3)	26,9	26,8	27,1	27,1
Absorção de água (%)	0,77	1,39	-	-

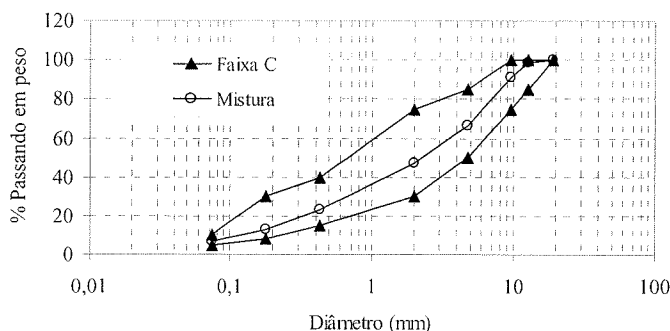


Figura 1. Curvas granulométricas da faixa de projeto e da mistura teórica obtida para a confecção das misturas asfálticas de graduação densa (Faixa C da especificação DNER-ES 313/97).

MISTURAS ASFÁLTICAS MODIFICADAS COM BORRACHA GRANULADA

Definição das misturas asfálticas estudadas

Para o desenvolvimento deste trabalho foram utilizadas as seguintes misturas asfálticas de graduação densa (Faixa C da especificação DNER-ES 313/97):

- Mistura asfáltica convencional (MC): confeccionada com o ligante CAP 50/70;
- Mistura asfáltica confeccionada com asfalto-borracha obtido pelo processo úmido (MU): confeccionada com um asfalto-borracha obtido pela incorporação de 21% da borracha granulada descrita anteriormente ao CAP 50/70, e realizando-se a mistura entre estes materiais durante 60 minutos a 170°C;
- Misturas asfálticas modificadas com borracha pelo processo seco (MS): confeccionadas com o CAP 50/70, e com diferentes teores de incorporação da borracha granulada descrita anteriormente.

Dosagem e confecção das misturas asfálticas

Neste trabalho foi utilizado o método Marshall (DNER-ME 043/94) para o estudo de dosagem das misturas asfálticas convencionais e modificadas com borracha. O procedimento utilizado consistiu na determinação da percentagem ótima de ligante para a mistura asfáltica convencional (MC) e para a mistura asfáltica confeccionada com o asfalto-borracha produzido pelo processo úmido (MU).

Com o conhecimento da percentagem ótima de ligante da mistura MU, foi deduzido a quantidade de ligante asfáltico convencional e de borracha granulada presentes neste tipo de mistura. Estes valores foram utilizados para a definição da percentagem de ligante asfáltico convencional e do teor inicial de borracha a ser incorporado na mistura asfáltica modificada com borracha pelo processo seco (MS). Este procedimento permite comparar o comportamento mecânico de misturas asfálticas modificadas com borracha pelos dois processos de incorporação da borracha, mas apresentando a mesma composição.

A Tabela 4 apresenta os valores das temperaturas do ligante, dos agregados e de compactação para as misturas asfálticas estudadas. Estas temperaturas foram escolhidas levando-se em consideração a trabalhabilidade do ligante asfáltico convencional e do asfalto-borracha empregado na dosagem e confecção da mistura MU. Pode-se observar que as misturas asfálticas modificadas com borracha pelo processo seco (MS) foram confeccionadas nas mesmas condições das misturas asfálticas convencionais (MC).

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

Temperaturas empregadas	MC	MS	MU
Temperatura do ligante para mistura (°C)	160	160	170
Temperatura dos agregados (°C)	177	177	190
Temperatura de compactação (°C)	160	160-170	164

Como o comportamento mecânico das misturas asfálticas depende, dentre outros fatores, de suas propriedades volumétricas [7], as misturas asfálticas estudadas neste trabalho foram confeccionadas com as percentagens de ligante definidas no estudo de dosagem, mas compactadas de forma que apresentassem a mesma percentagem de vazios. No estudo de dosagem, a mistura asfáltica convencional (MC) apresentou uma percentagem de vazios de 4,5% para a percentagem ótima de ligante, sendo este valor adotado como referência na confecção das demais misturas asfálticas estudadas. Com isto, garante-se que o único fator que afeta o comportamento mecânico das misturas asfálticas estudadas seja o tipo de ligante asfáltico empregado, ou o teor de borracha incorporada, no caso das misturas asfálticas modificadas com borracha pelo processo seco.

A Tabela 5 apresenta os valores das propriedades volumétricas da mistura asfáltica confeccionada com o ligante CAP 50/70 (MC) e da mistura asfáltica confeccionada com o asfalto-borracha obtido pelo processo úmido (MU).

Tabela 5. Propriedades volumétricas das misturas asfálticas com graduação densa.

Propriedades volumétricas	MC	MU
Densidade aparente (kN/m ³)	22,5	22,5
Percentagem de vazios (%)	4,5	4,5
Vazios no agregado mineral – VAM (%)	20,08	19,3
Relação betume-vazios – RBV (%)	77,59	76,7
Percentagem ótima de ligante em relação a mistura (%)	7,05	9,61

A partir do conhecimento da proporção entre borracha granulada e o ligante asfáltico convencional existente no asfalto-borracha da mistura asfáltica MU pôde-se deduzir, a partir da percentagem ótima de ligante apresentada na Tabela 5, que esta mistura é composta por 7,95% de ligante asfáltico convencional e 2,0% de borracha granulada. Esta percentagem de borracha, equivale a 2,2% da mistura de agregados minerais, sendo então tomada como referência para a confecção das misturas asfálticas modificadas pelo processo seco.

Além do teor de borracha de 2,2%, em relação à mistura de agregados minerais, foram utilizados também na confecção das misturas asfálticas modificadas pelo processo seco os seguintes teores: 3,6% e 6,0%. Todas estas misturas foram confeccionadas com uma percentagem de ligante asfáltico convencional de 7,95%, conforme o procedimento já descrito anteriormente. Neste caso, o aumento do teor de borracha incorporada às misturas se deu pela correção da granulometria da mistura de agregados, uma vez que a borracha granulada é considerada como parte constituinte do esqueleto sólido da mistura asfáltica.

A Tabela 6, apresentada a seguir, descreve as proporções entre os diferentes materiais envolvidos na confecção das misturas asfálticas modificadas com borracha granulada pelo processo seco. Os valores apresentados na Tabela 6 consideram as correções granulométricas necessárias devido à incorporação da borracha granulada aos agregados minerais. Os números entre parênteses correspondem às percentagens de borracha granulada em relação à mistura de agregados minerais de cada uma das misturas asfálticas estudadas.

Tabela 6. Correções nas composições dos materiais empregados na confecção das misturas modificadas com borracha pelo processo seco

Materiais empregados	MS (2,2%)	MS (3,6%)	MS (6,0%)
Borracha granulada	2,0%	3,3%	5,5%
Brita 1	10,0%	9,6%	8,3%
Brita 0	28,7%	28,7%	27,7%
Pó-de-pedra	48,1%	47,1%	47,1%
Filer	3,7%	3,6%	3,7%
Percentagem de ligante asfáltico em relação à mistura	7,95%	7,95%	7,95%

Com relação aos procedimentos de confecção e compactação das misturas asfálticas modificadas com borracha granulada pelo processo seco destacam-se:

- Aquecimento dos agregados: os agregados minerais, devidamente proporcionados e pesados, foram previamente aquecidos à temperatura de 177°C, permanecendo em estufa por um período mínimo de 2 horas;
- Obtenção da mistura borracha-agregado: a borracha granulada foi adicionada aos agregados previamente aquecidos, sem a adição do filer, sendo realizada a mistura por um período de 15 segundos, ou até a obtenção de uma mistura homogênea. Em seguida foi adicionado o filer, também previamente aquecido, de modo que não ocorresse perda de finos durante a realização da mistura entre a borracha granulada e os agregados minerais;
- Adição do ligante asfáltico convencional e realização da mistura: após o ligante asfáltico convencional ter atingido a temperatura ideal de mistura, o mesmo foi adicionado à mistura homogênea composta pelos agregados minerais, borracha granulada e filer, realizando esta mistura por um período não superior a 3 minutos;
- Compactação: a compactação das misturas asfálticas obtidas foi realizada logo após a operação de mistura entre os seus diferentes componentes.

Resistência à tração indireta das misturas asfálticas modificadas com borracha granulada

Para a realização dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral das misturas asfálticas estudadas neste trabalho foram seguidas as recomendações da norma DNER-ME 138/94, sendo realizados todos os ensaios a uma temperatura de 20°C. A Figura 2 apresenta os resultados da resistência à tração das misturas de graduação densa confeccionadas com o CAP 50/70 (MC), e das misturas modificadas com borracha pelo processo seco (MS) e pelo processo úmido (MU).

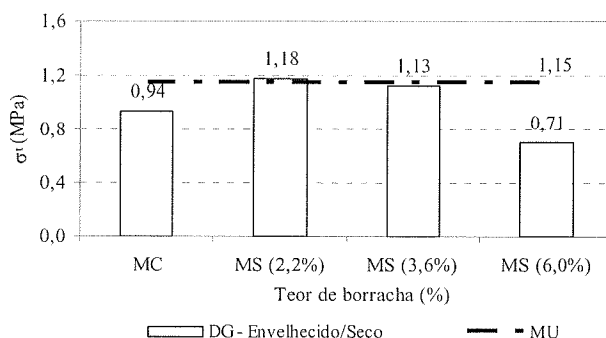


Figura 2. Resistência à tração por compressão diametral das misturas asfálticas de graduação densa.

Os resultados apresentados na Figura 2 mostram que, de uma forma geral, a incorporação da borracha granulada produziu um aumento da resistência à tração, tanto nas misturas asfálticas modificadas pelo processo seco (MS), como naquelas confeccionadas com o asfalto-borracha obtido pelo processo úmido (MU). Comparando-se ainda os resultados obtidos para as misturas asfálticas MS com aqueles obtidos para a mistura asfáltica MU, verifica-se que a incorporação a seco da borracha granulada não acarretou nenhum prejuízo na resistência à tração das misturas asfálticas.

Com relação às misturas asfálticas modificadas com borracha pelo processo seco, pode-se observar que o aumento do teor da borracha incorporada não afetou de forma significativa a resistência à tração das misturas, excetuando-se o caso da mistura MS (6,0%). A redução da resistência à tração da mistura MS com 6,0% de borracha pode ser atribuída ao aumento da percentagem de vazios da mistura devido às dificuldades de ser atingida a densidade aparente especificada durante a compactação da mesma.

Módulo resiliente e ângulo de fase das misturas asfálticas modificadas com borracha granulada

Neste trabalho, os ensaios de módulo resiliente foram realizados sob deformação controlada, segundo recomendações da AASHTO TP8/96, 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. 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.

A Figura 3 apresenta os resultados dos ensaios de módulo resiliente realizados sobre corpos-de-prova obtidos a partir das misturas asfálticas confeccionadas com o CAP 50/70 (MC), com o asfalto-borracha fabricado pelo processo úmido (MU) e modificadas com borracha pelo processo seco para diferentes teores de borracha incorporada (MS). Os resultados mostram que, excetuando-se a mistura asfáltica modificada com borracha pelo processo seco com um teor de borracha de 6,0% em relação à mistura de agregados minerais, a incorporação da borracha granulada produziu um aumento no módulo resiliente das misturas. Este aumento do módulo resiliente pode indicar menores deflexões do pavimento quando solicitados pelas cargas do tráfego.

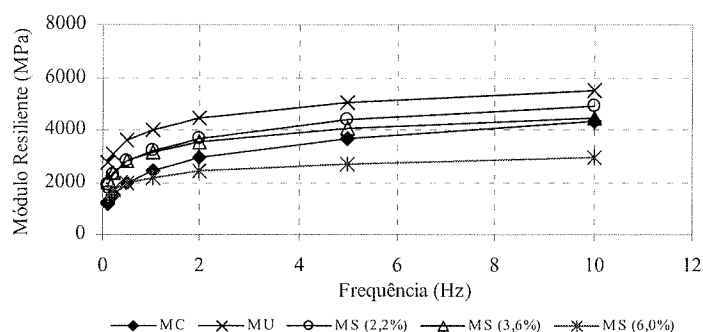


Figura 3. Resultados dos ensaios de módulo resiliente das misturas asfálticas de graduação densa confeccionadas com o CAP 50/70 e modificadas com borracha granulada de pneus.

A comparação entre os resultados dos ensaios de módulo resiliente das misturas MU e MS (2,2%) mostra que a utilização de asfaltos-borracha fabricados pelo processo úmido produz um aumento do módulo resiliente das misturas em relação às aquelas modificadas com quantidades equivalentes de borracha pelo processo seco. Estes resultados podem indicar que realmente ocorre uma maior interação entre as partículas de borracha e o ligante asfáltico convencional quando misturados sob condições de tempo e temperatura mais severas do que aquelas existentes no processo de fabricação das misturas asfálticas pelo processo seco.

Com relação aos resultados obtidos para as misturas asfálticas modificadas com borracha pelo processo seco, pode-se observar que o aumento do teor de borracha incorporada produz uma diminuição no módulo resiliente destas misturas. Esta diminuição do módulo resiliente pode ser atribuída ao aumento da flexibilidade da mistura pela adição de maiores quantidades de borracha granulada, em substituição a uma parcela dos agregados minerais.

O ângulo de fase das misturas asfálticas, determinado durante a realização dos ensaios de módulo resiliente, é calculado em função do tempo de defasagem entre a aplicação de uma determinada carga F e o deslocamento produzido no corpo-de-prova, sendo empregado na avaliação do comportamento viscoelástico das misturas asfálticas. A Figura 4 apresenta os resultados dos ângulos de fase das misturas asfálticas de graduação densa estudadas neste trabalho.

Estes resultados mostram que a incorporação da borracha granulada melhora as propriedades elásticas das misturas asfálticas produzidas, tanto com o asfalto-borracha obtido pelo processo úmido, como pela incorporação da borracha granulada pelo processo seco. Esta melhoria é indicada pela diminuição do ângulo de fase das misturas asfálticas modificadas com borracha (MU e MS) em relação aos valores obtidos para a mistura asfáltica confeccionada com o ligante asfáltico convencional CAP 50/70.

Os resultados calculados para o ângulo de fase das misturas asfálticas modificadas com borracha pelo processo seco mostram que o aumento do teor de borracha incorporado provoca uma diminuição do ângulo de fase destas misturas. Esta diminuição do ângulo de fase indica que o aumento do teor de borracha incorporada torna as misturas asfálticas mais flexíveis, estando portanto coerentes com os resultados dos ensaios de módulo resiliente apresentados na Figura 3.

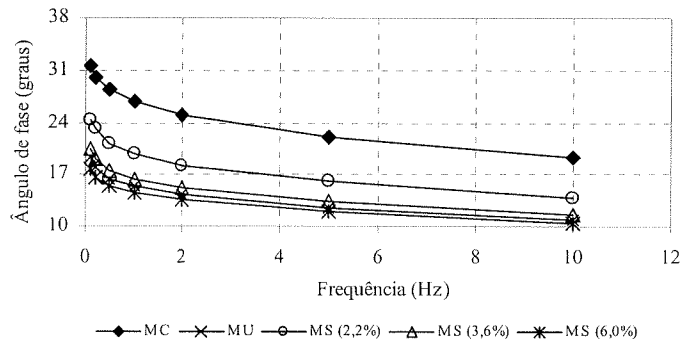


Figura 4. Ângulo de fase das misturas asfálticas de graduação densa confeccionadas com o CAP 50/70 e modificadas com borracha granulada de pneus.

Resistência às deformações permanentes das misturas asfálticas modificadas com borracha granulada

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.

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 (Sousa et al., 1994).

Os ensaios de cisalhamento cíclico a altura constante realizados neste trabalho nas misturas asfálticas confeccionadas com o CAP 50/70 (MC), com o asfalto-borracha produzido pelo processo úmido (MU) e nas misturas modificadas com borracha pelo processo seco foram conduzidos a uma temperatura de ensaio de 60°C. Este valor pode ser considerado como representativo da máxima temperatura atuante nos pavimentos flexíveis para as condições climáticas brasileiras.

A Figura 5 apresenta os valores do número de eixos padrão ($ESAL_{mrd}$) necessário para produzir o afundamento nas trilhas de roda de 12,7 mm, calculados a partir dos resultados obtidos nos ensaios de cisalhamento cíclico a altura constante realizados nas misturas asfálticas estudadas neste trabalho. Estes resultados mostram que a mistura asfáltica confeccionada com o asfalto-borracha produzido pelo processo úmido apresentou uma resistência ao desenvolvimento de deformações permanentes superior às demais misturas asfálticas analisadas. Isto se deve ao aumento do ponto de amolecimento do ligante modificado com borracha no processo úmido [1].

Os resultados apresentados na Figura 5 mostram ainda que não houve prejuízo no comportamento das misturas asfálticas modificadas com borracha pelo processo seco, em relação à mistura asfáltica confeccionada com o CAP 50/70. Além disto, nenhum efeito pôde ser observado com o aumento do teor de borracha incorporada, excetuando-se a mistura MS (6,0%), pelas razões já discutidas anteriormente.

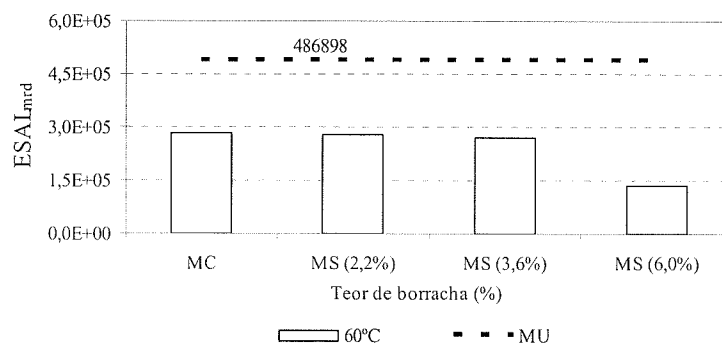


Figura 5. Avaliação da resistência às deformações permanentes das misturas asfálticas estudadas.

Avaliação da resistência ao desgaste das misturas asfálticas modificadas com borracha pelo processo seco

Uma importante característica a ser considerada para as misturas asfálticas modificadas com borracha pelo processo seco é a sua resistência ao desgaste. A incerteza existente sobre a ocorrência ou não das reações entre a borracha granulada e o ligante asfáltico convencional neste tipo de mistura, também levantam dúvidas referentes à eficiência da ligação entre os materiais inertes promovida pelo ligante.

A Figura 6 apresenta os resultados obtidos nos ensaios realizados para a avaliação da resistência ao desgaste das misturas asfálticas modificadas com borracha granulada pelo processo seco por meio do ensaio Cantabro. Estes resultados mostram que o desgaste por abrasão das misturas asfálticas aumenta com o teor de borracha incorporada. Entretanto, mesmo para os teores de borracha mais elevados, os valores obtidos podem ser considerados satisfatórios.

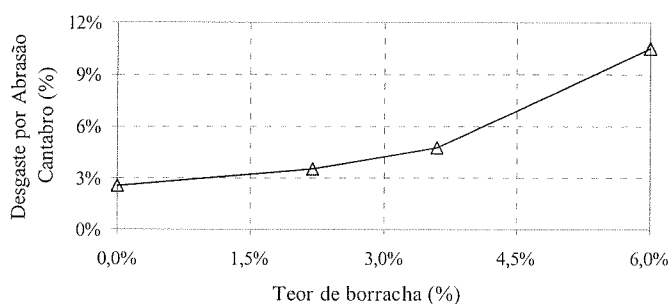


Figura 6. Resistência ao desgaste das misturas asfálticas modificadas com borracha pelo processo seco.

CONCLUSÕES

Os resultados apresentados neste trabalho permitem concluir que, tanto a incorporação da borracha granulada ao ligante asfáltico convencional pelo processo úmido, como a modificação das misturas asfálticas com borracha granulada pelo processo seco, contribui para a melhoria do comportamento mecânico das misturas asfálticas em relação à utilização dos ligantes asfálticos convencionais. Estas melhorias estão relacionadas basicamente ao aumento da capacidade elástica das misturas e da resistência ao desenvolvimento dos afundamentos nas trilhas de roda a elevadas temperaturas.

Os resultados mostraram ainda que as misturas asfálticas produzidas com asfalto-borracha obtido pelo processo úmido apresentam maiores valores de módulo resiliente e maior resistência às deformações permanentes que as misturas asfálticas modificadas com borracha pelo processo seco.

Nas misturas asfálticas modificadas com borracha granulada pelo processo seco observou-se que o aumento do teor de borracha incorporada contribui para o aumento da flexibilidade e elasticidade, conforme indicado pela diminuição do módulo resiliente e do ângulo de fase destas misturas. De uma maneira geral, pode-se considerar que o aumento do teor de borracha granulada incorporada ao ligante não produziu diferenças no comportamento às deformações das misturas asfálticas modificadas com borracha pelo processo seco.

Com relação à resistência ao desgaste, os resultados dos ensaios Cantabro seco, mostraram que o desgaste das misturas asfálticas aumenta com o teor de borracha incorporada, mas mesmo para os teores de borracha mais elevados, este desgaste encontra-se dentro de um nível aceitável.

Além das propriedades analisadas neste trabalho é fundamental avaliar a resistência ao trincamento por fadiga das misturas. Resultados preliminares indicam que a incorporação de teores de borracha superiores a 2,2% implica em uma redução na vida de fadiga das misturas confeccionadas pelo processo seco em relação às misturas convencionais. Por outro lado, as misturas de asfalto-borracha produzidas pela via úmida apresentaram significativo ganho na resistência ao trincamento.

Além dos resultados apresentados neste trabalho, a escolha do processo de modificação das misturas asfálticas com borracha granulada reciclada de pneus usados deve ser feita levando-se em consideração outros fatores, como facilidades de confecção e aplicação das misturas em campo, disponibilidade de equipamentos, principais características mecânicas desejadas para as misturas, etc.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Dantas Neto, S.A., Farias, M.M, Pais, J.C, Pereira, P.A.A e Santos, L.P. (2003). Properties of Asphalt-Rubber Binders Related to Characteristics of the Incorporated Crumb Rubber. Asphalt Rubber 2003 - Proceedings, Brasília, Brasil, p. 297-310.
- [2] Takallou, H.B. e Takallou M.B. (2003). Effects of mixing time and temperature on the visco-elastic properties of asphalt rubber binder. Asphalt Rubber 2003 – Proceedings, Brazilia, Brazil, 2003, p. 589-602.
- [3] Visser, A.T. e Verhaeghe, B. (2000). Bitumen Rubber: Lessons Learned in South Africa. Asphalt Rubber 2000 - Proceedings, Vilamoura, Portugal, p. 33-50.
- [4] Mohammad, L.N., Huang, B., Roberts, F., Rasoulilian, M. (2000). Accelerated Loading Performance and Laboratory Characterization of Crumb Rubber Asphalt Pavements. Asphalt Rubber 2000 - Proceedings, Vilamoura, Portugal, p. 189-220.
- [5] Airey, G., Rahman, M., Collop, A. (2003). Absorption of Bitumen into Crumb Rubber Using the Basket Drainage Method. The International Journal of Pavement Engineering, Vol. 4, nº 2, p. 105-119.
- [6] Momm, L. e Salin, R. (2000). Study of Recycled in Asphalt Concrete Mixtures. Asphalt Rubber 2000 - Proceedings, Vilamoura, Portugal.
- [7] Neto, S.A.D., Farias, M.M, Pais, J.C. e Pereira, P.A.A. (2003). Optimization of Asphalt Rubber Hot Mixes Based on Performance Laboratory Tests, Third International Symposium on Maintenance and Rehabilitation of Pavements and Technological Control, Guimarães, Portugal, p. 515-524.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho faz 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). Os autores agradecem, ainda, às empresas portuguesas fornecedoras dos materiais utilizados nesta pesquisa, entre elas, a Cepsa, como fornecedora do ligante asfáltico, a Biosafe, como a fornecedora da borracha granulada empregada e a Pedreiras Bezerras LTDA pelo fornecimento dos agregados minerais.