

ARTIGO

AVALIAÇÃO LABORATORIAL DE MISTURA ASFÁLTICA Densa MODIFICADA COM ADIÇÃO DE BORRACHA

Sandra A. Margarido Bertollo
José Leomar Fernandes Júnior

Escola de Engenharia de São Carlos
Universidade de São Paulo

Liedi Bariani Bernucci
Edson de Moura

Escola Politécnica
Universidade de São Paulo

RESUMO

Este trabalho apresenta os resultados de um estudo laboratorial que teve como objetivo avaliar o efeito produzido pela granulometria da borracha reciclada de pneumáticos e pelo envelhecimento de curto prazo sobre as propriedades de uma mistura asfáltica densa. Foram preparadas misturas asfálticas com duas granulometrias de borracha, substituindo parte dos agregados pétreos em algumas frações da curva granulométrica (“processo seco”). Essas misturas foram comparadas a uma mistura de controle, sem borracha. Para avaliação das propriedades mecânicas, as misturas foram submetidas ao ensaio de compressão diametral cíclico por cargas repetidas para determinação do módulo de resiliência, ao ensaio de resistência à tração por compressão diametral e ao ensaio de trilha de roda em equipamento simulador de tráfego em laboratório. Os resultados mostram que a diminuição do tamanho das partículas de borracha influencia positivamente no desempenho do material e que as relações MR/RT encontradas para as misturas com borracha sugerem, em princípio, uma maior flexibilidade.

ABSTRACT

This paper presents the findings of a laboratory study that aimed to evaluate the effects of recycled tire rubber gradation and short-term aging on the properties of dense asphalt mixtures. It was considered two ranges of rubber particle sizes which substituted part of mineral aggregates in the mixture gradation. The rubber modified asphalt mixtures ("dry process") were compared to a control mixture without rubber. For the evaluation of mechanical properties, the asphalt mixtures were submitted to three laboratory tests: dynamic indirect tension for the determination of the resilient modulus; tensile strength under indirect tension; and resistance to rutting in a repeated load device. The results show that smaller rubber particles are better for the mixture performance and the ratio between resilient modulus and tensile strength indicates that asphalt mixtures containing recycled tire rubber present higher flexibility.

1. INTRODUÇÃO

Embora seja significativo o aumento da frota de veículos no Brasil, a magnitude do efeito ambiental causado pelos milhões de pneus inservíveis gerados a cada ano não se percebe tão facilmente. A disposição final dos pneus representa um problema de difícil solução, pois são objetos volumosos que precisam ser armazenados em condições apropriadas para evitar riscos de incêndio e proliferação de insetos e roedores. A disposição em aterros sanitários se torna inviável, pois os pneus inteiros apresentam baixa compressibilidade e degradação muito lenta.

Alternativas devem ser encontradas no sentido de equacionar a questão desses resíduos no país. A Resolução nº 258 do Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA, publicada no Diário Oficial de 02 de dezembro de 1999, determina que as empresas fabricantes e as importadoras de pneumáticos ficam obrigadas a coletar e dar destinação final, ambientalmente adequada, aos pneus inservíveis existentes no território nacional, na proporção relativa às quantidades fabricadas e/ou importadas.

Nos Estados Unidos, país que mais produz pneus inservíveis no mundo (mais de um pneu por habitante por ano), existem leis que regulamentam a aquisição, armazenagem e processamento de pneus, impõem restrições para armazenagem em aterros sanitários e oferecem incentivos para o desenvolvimento de novas alternativas de uso, como por exemplo, a incorporação em misturas asfálticas (FHWA, 1993).

A análise da utilização de borracha triturada de pneus nas misturas asfálticas deve considerar os benefícios em termos ambientais e de engenharia. Enquanto é indiscutível o benefício da reciclagem para esse tipo de resíduo, não existe consenso se a utilização de borracha triturada traz benefícios significativos às propriedades de engenharia, com a obtenção de um pavimento com melhor desempenho em longo prazo, superando os pavimentos tradicionais. Dentre os potenciais benefícios que a incorporação de borracha de pneus usados pode acarretar às misturas asfálticas, destacam-se: aumento da flexibilidade a baixas temperaturas, aumento da resistência à deformação permanente a altas temperaturas, aumento da resistência à fadiga, maior resistência ao desgaste e ao envelhecimento.

Existem dois métodos de incorporação dos pneus nas misturas asfálticas. No processo úmido são adicionadas partículas finas de borracha ao cimento asfáltico, produzindo um novo tipo de ligante denominado *asfalto-borracha*. No processo seco, as partículas de borracha substituem parte dos agregados pétreos na mistura. Após a adição do ligante, formam um produto denominado *concreto asfáltico modificado com adição de borracha*.

Este trabalho avaliou, em laboratório, o processo seco de reutilização de borracha de pneus em obras de pavimentação asfáltica. Buscou-se, dessa forma, contribuir para o equacionamento do grave problema ambiental que é a disposição de resíduos sólidos, pois a reutilização de pneus em larga escala no Brasil vai depender do conhecimento profundo dos aspectos econômicos e técnicos, relacionados ao meio ambiente e ao desempenho como material de construção.

2. PROCESSO SECO DE INCORPORAÇÃO

O processo seco de incorporação foi desenvolvido originalmente nos anos 60, na Suécia, sendo patenteado com o nome Rubit®. Nos EUA o método foi patenteado com o nome PlusRide®. A preocupação crescente com os aspectos ambientais, manifestada inclusive por leis que regulamentam o uso de pneus em misturas asfálticas, trouxe uma nova motivação para estudos sobre o tema. Novas tecnologias surgiram desde então, como por exemplo, a tecnologia genérica (*generic system*), desenvolvida em 1989 (Epps, 1994).

O sistema PlusRide® permite a incorporação de 3 a 4% (em relação ao peso total da mistura) de borracha com diâmetros que variam de 2 a 6,35 mm. As especificações de graduação do agregado pétreo, para diferentes níveis de tráfego, apresentam descontinuidade na faixa entre 3,18 mm (1/8") e 6,35 mm (1/4"). As partículas de borracha substituem a porção de agregado que normalmente ocuparia este espaço. As misturas requerem uma quantidade maior de ligante asfáltico, cerca de 1,5 a 2% a mais em relação às misturas convencionais. O volume de vazios deve variar entre 2 e 4%, dependendo do nível de tráfego. Estudos conduzidos por Takallou *et al.* (1986) e Takallou e Hicks (1988) indicam que as misturas modificadas com borracha pelo sistema PlusRide® apresentam maior resistência à fadiga do que as misturas convencionais. Também apresentam maior resistência ao trincamento térmico, pois as partículas de borracha absorvem as tensões, retardando a propagação de trincas.

Diferentemente do sistema PlusRide®, o sistema genérico de adição de borracha utiliza curvas granulométricas tradicionais (densas) onde são incorporadas partículas de borracha com diâmetro nominal máximo de 2,00 mm (#10) e menores teores de borracha (1, 2 e 3%). Enquanto as partículas finas de borracha reagem com o ligante, as partículas maiores atuam como "agregados elásticos" no concreto asfáltico, proporcionando um pavimento resistente à fadiga e ao trincamento a baixas temperaturas (FHWA, 1993).

Estudos laboratoriais conduzidos por Oliver (2000) e Gallego *et al.* (2000) indicaram o excelente desempenho de misturas modificadas

com adição de borracha, em termos de resistência à deformação permanente e vida de fadiga, quando comparada a uma mistura convencional. Gallego *et al.* (2000) ressaltam a importância do tempo de digestão (tempo necessário para que ocorra a interação entre ligante e borracha) como parâmetro de maior influência sobre o desempenho de misturas preparadas pelo processo seco.

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

A Figura 1 apresenta o método de trabalho utilizado nos experimentos realizados. Para caracterizar as misturas asfálticas foram preparadas amostras com duas granulometrias de borracha, uma grossa (G) e outra fina (F), substituindo parte dos agregados pétreos em algumas frações da curva granulométrica. Utilizou-se uma quantidade de borracha equivalente a 2% do peso total da mistura. Essas misturas foram comparadas a uma mistura convencional, sem borracha (mistura de controle).

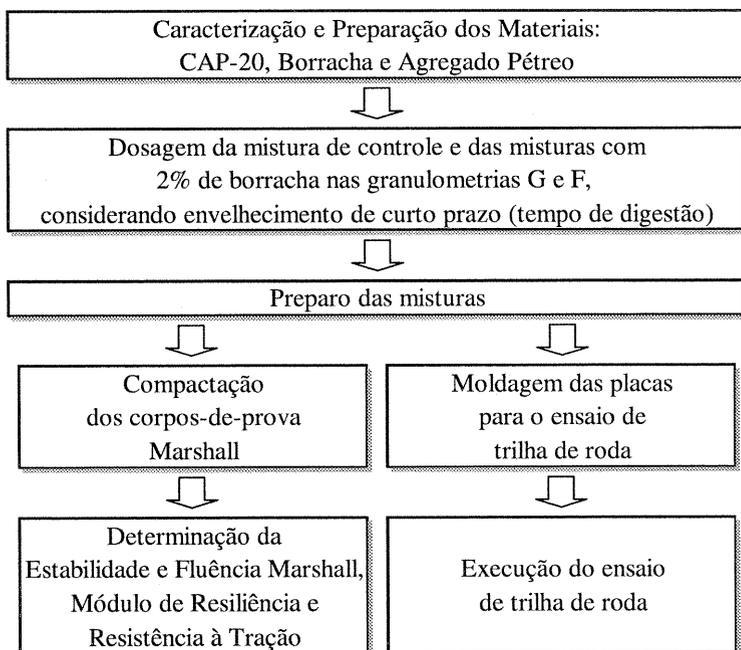


Figura 1: Diagrama de blocos do método de trabalho experimental

Anteriormente à compactação, as misturas foram submetidas a uma simulação de envelhecimento em estufa por períodos de duas e quatro horas a 150°C. Procurou-se analisar o efeito do tempo de digestão e da granulometria da borracha sobre as propriedades volumétricas das misturas.

Para seleção do teor ótimo de asfalto considerou-se um volume de vazios de 4% e, para as misturas contendo borracha, utilizou-se também a mesma quantidade de ligante da mistura de controle. Procurou-se analisar o efeito da granulometria da borracha sobre o teor de asfalto e, principalmente, sobre o módulo de resiliência e a resistência à tração. A avaliação da capacidade das misturas em resistir às deformações permanentes foi feita através do ensaio de trilha de roda em equipamento simulador de tráfego em laboratório.

4. MATERIAIS

4.1. Agregado Pétreo

Foram utilizados agregados britados, de natureza basáltica, provenientes da Pedreira INDERP localizada no município de Ribeirão Preto - SP. O fíler utilizado foi extraído por peneiramento a seco do pó-de-pedra oriundo da mesma pedreira. A Tabela 1 apresenta algumas das propriedades dos agregados pétreos utilizados.

Tabela 1: Características dos agregados pétreos utilizados

Ensaio	Material	
	Agregado Graúdo	Agregado Miúdo
Desgaste de agregado por Abrasão Los Angeles (%)	14,1 (≤ 40)	
Densidade real das partículas	2,858	2,860
Adesividade a ligante betuminoso	Não satisfatória	

Os ensaios de adesividade para agregados graúdos e miúdos apresentaram resultado não satisfatório para o agregado utilizado. Esses métodos não apresentam correlação com o que acontece no campo, podendo gerar resultados enganosos. Assim, foram realizados ensaios complementares utilizando misturas compactadas

(ensaio de umidade induzida - AASHTO, 1989). O resultado indicou que a mistura compactada não apresenta problemas de adesividade entre agregado e ligante.

Trabalhou-se com uma granulometria correspondente ao centro da faixa "C" do DNER (1997) adaptada às especificações SUPERPAVE® (FHWA, 1995), conforme Figura 2. O diâmetro máximo nominal é de 12,5 mm.

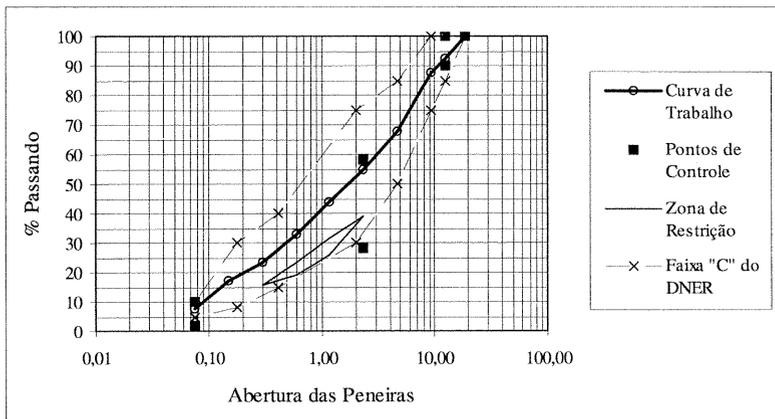


Figura 2: Curva granulométrica da mistura estudada

4.2. Borracha

A borracha utilizada foi fornecida pela BORCOL Indústria de Borracha Ltda, localizada no município de Sorocaba – SP. Foram utilizadas duas granulometrias de borracha triturada: uma denominada "G" (grossa), contendo partículas com diâmetros variando de 9,5 mm (3/8") até 0,60 mm (#30) e outra, denominada "F" (fina), contendo partículas com diâmetros variando de 1,18 mm (#16) até 0,15 mm (#100).

A borracha triturada foi caracterizada por ensaios de massa específica das partículas (obtida por picnometria de hélio), porosidade (em mercúrio) e análise termogravimétrica (TGA). A Tabela 2 apresenta os resultados desses ensaios para quatro frações granulométricas de borracha.

Tabela 2: Características da borracha utilizada

Ensaio	Borracha			
	G		F	
	3/8" - #4	#16 - #30	#16 - #30	#50 - #100
Massa específica das partículas (g/cm ³)	1,1334 ± 0,0010	1,1547 ± 0,0007	1,1607 ± 0,0016	1,1934 ± 0,0012
Perda de massa a 170°C (%)	0,7410	0,7877	-	0,6025
Porosidade em mercúrio (%)	9,65	16,08	-	68,94

A análise termogravimétrica (TGA) permite que sejam analisadas as mudanças no peso da amostra, resultante de transformações químicas, em função da temperatura (taxa de aquecimento) ou intervalo de tempo. Empregou-se uma taxa de aquecimento de 10°C/min., no intervalo de temperatura de 50 a 600°C.

As amostras de borracha mais grossa (G) apresentaram uma perda de massa, em função da liberação dos óleos voláteis do pneu, de 0,7410% a 0,7877% em torno de 170°C, enquanto a borracha mais fina (F) apresentou uma perda de massa de 0,6025% a 170°C.

4.3. Ligante Asfáltico

O ligante asfáltico utilizado foi o CAP-20, por ser um material de uso rotineiro e comercialmente disponível em todo o Brasil. As propriedades do CAP-20 utilizado são apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3: Propriedades do CAP-20 utilizado no preparo das misturas

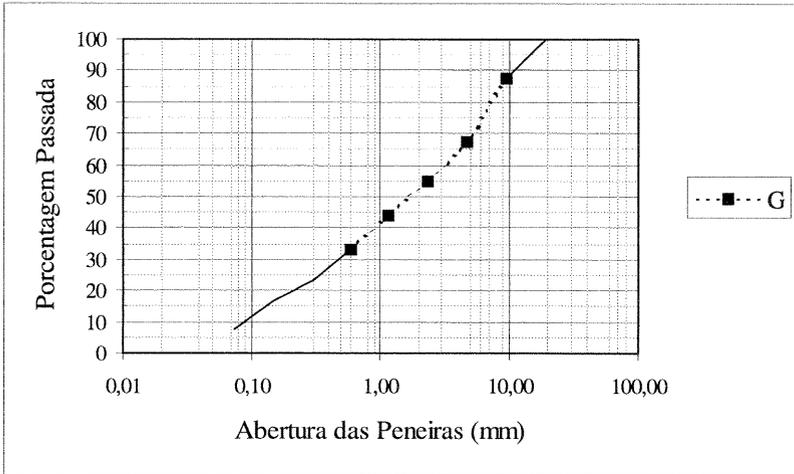
Ensaio	Resultado	Exigência DNC 01/92	Método
Viscosidade absoluta a 60°C (poise)	3317	2000 a 3500	NBR 5847
Viscosidade Saybolt Furol a 135°C (s)	180	120 mín.	MB-517
Viscosidade Saybolt Furol a 177°C (s)	30,3	30 a 150	
Efeito do calor e do ar:			
Variação em massa (%)	0,044	1,0 máx.	MB-425
Relação de viscosidade	1,7	4,0 máx.	-
Ductilidade a 25°C (cm)	> 100	20 mín.	NBR 6293
Índice de suscetibilidade térmica	-1,0	-1,5 a 1,0	-
Penetração, 25°C, 100g, 5s (0,1mm)	59	50 mín.	NBR 6576
Ponto de fulgor (°C)	300	235 mín.	NBR 11341
Solubilidade em tricloroetileno (% em massa)	99,7	99,5 mín	MB-166
Massa específica (g/cm ³)	1,020	-	-

4.4. Misturas

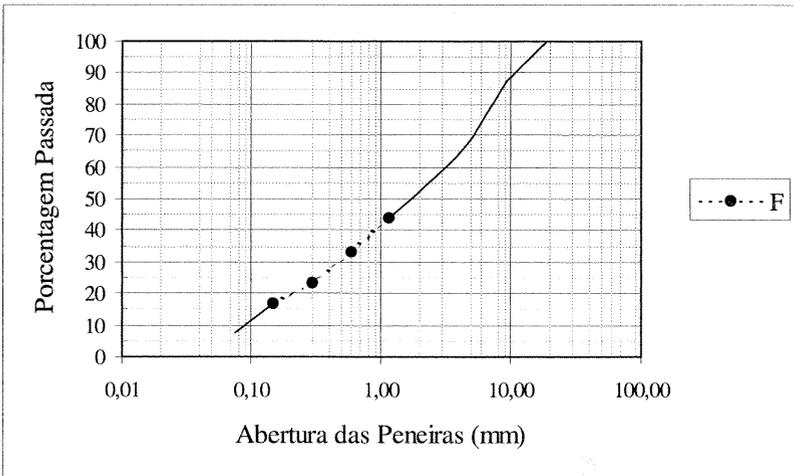
Procurou-se incorporar a borracha buscando manter o mesmo arranjo granulométrico da mistura de controle. Para tanto, criou-se uma lacuna na curva granulométrica do agregado pétreo (excluindo parte dos agregados) para possibilitar a adição da borracha triturada. Na substituição, considerou-se que a borracha triturada possui formato semelhante ao agregado pétreo e, portanto, mesma área superficial. Deste modo, o ajuste na granulometria do agregado pétreo considerou apenas os pesos específicos da borracha e do agregado. As duas granulometrias de borracha (G e F) foram distribuídas na curva granulométrica dos agregados pétreos, acompanhando a faixa C do DNER, conforme Figura 3.

A dosagem das misturas asfálticas foi feita pelo método Marshall de acordo com os padrões estabelecidos pela NBR 12891/93 da ABNT (1993). A energia de compactação foi de 75 golpes por face do corpo-de-prova. A borracha, na temperatura ambiente, foi misturada ao agregado pétreo previamente aquecido a 175°C. Em seguida, foi adicionado o ligante asfáltico na temperatura de 160°C. A mistura entre agregados, borracha e asfalto foi realizada durante aproximadamente 2 minutos, até que o ligante tivesse envolvido todo o material granular. Antes da compactação, parte das misturas foi levada para uma estufa na temperatura de 150°C, onde permanecia durante duas ou quatro horas para simular o envelhecimento durante as fases de preparação, transporte e lançamento da mistura na pista.

A massa específica das misturas compactadas foi determinada pelo método AASHTO T-166 (AASHTO, 1993), utilizando amostras saturadas secas superficialmente. As misturas destinadas à determinação do módulo de resiliência e resistência à tração por compressão diametral foram moldadas com um teor de asfalto necessário para a obtenção de um volume de vazios em torno de 4%. Para verificar a influência do teor de asfalto nas propriedades das misturas que contêm borracha, também foram moldados corpos-de-prova com a mesma quantidade de ligante da mistura de controle.



(a) Mistura com borracha na granulometria G: 9,5 mm (3/8") até 0,60 mm (#30)



(b) Mistura com borracha na granulometria F: 1,18 mm (#16) até 0,15 mm (#100)

Figura 3: Frações granulométricas onde foram incorporadas as amostras de borracha G e F

5. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

5.1. Envelhecimento de Misturas Asfálticas

O envelhecimento de misturas asfálticas é um termo usado para descrever as mudanças nas propriedades com o passar do tempo, incluindo alterações nas propriedades dos ligantes asfálticos e a absorção de ligante pelo agregado.

Uma característica importante dos cimentos asfálticos diz respeito ao envelhecimento, que se inicia durante a fase de preparação da mistura, quando o cimento asfáltico é aquecido para facilitar os trabalhos de mistura com os agregados pétreos, que também são aquecidos. Durante essa fase ocorrem alterações significativas nas propriedades reológicas do ligante, como a diminuição da penetração (ou aumento da consistência) e o aumento da viscosidade.

O envelhecimento de curto prazo é causado, principalmente, devido à perda dos componentes voláteis e oxidação durante a fase de construção. Acredita-se que o envelhecimento de longo prazo seja consequência da progressiva oxidação durante a vida em serviço do pavimento. Embora, em geral, o envelhecimento possa resultar no enrijecimento da mistura, o que pode ser benéfico do ponto de vista da distribuição das cargas e da deformação permanente, poderá também resultar num pavimento com tendências ao trincamento e desintegração e na perda de durabilidade em termos de resistência ao desgaste e suscetibilidade à umidade.

Nas misturas preparadas com borracha, ocorre um processo chamado de “digestão” da borracha, ou seja, a interação asfalto-borracha durante o tempo de preparação e transporte da mistura. Buscando analisar o efeito do envelhecimento na mistura de controle e do tempo de digestão nas misturas preparadas com borracha, fez-se a simulação do envelhecimento em estufa, a 150°C, por períodos de 2 e 4 horas, antes da compactação. A Figura 4 ilustra a relação entre teor de ligante e volume de vazios para as misturas com borracha (fina, 2F, e grossa, 2G), ambas com 2% de borracha. A mistura de controle não apresentou variação significativa do volume de vazios com o tempo de envelhecimento.

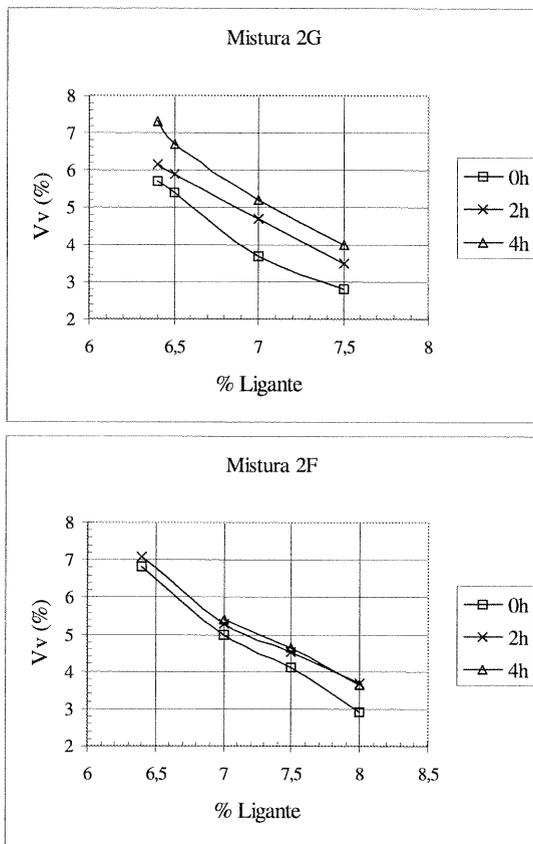


Figura 4: Efeito do envelhecimento (tempo de digestão) para as misturas com borracha

Observa-se o efeito do tempo de digestão nas misturas que contém borracha: as misturas envelhecidas requerem maiores teores de ligante para a obtenção de um volume de vazios de 4%. Uma parcela do ligante requerido pode estar sendo absorvida pela borracha, que apresenta elevada porosidade. A borracha triturada deve ser considerada como um agregado, entretanto, a parcela de borracha mais fina, que passa na peneira de abertura 0,84 mm (# 20), reage parcialmente com o ligante. Essa ocorrência ficou evidente quando, após a mistura, verificou-se "aumento de volume", principalmente na mistura 2F. Para a mistura 2G ocorreu reação, pois também apresenta

partículas que passam na peneira de 0,84 mm, só que de forma menos eficiente (ou seja, exigindo um maior tempo de reação). Logo, a quantidade de borracha fina introduzida na mistura irá determinar o grau de modificação do ligante asfáltico.

5.2. Determinação das Propriedades Mecânicas

Procurou-se avaliar a influência do teor de asfalto e da granulometria da borracha sobre as propriedades mecânicas das misturas envelhecidas em estufa por 2 horas. Para tanto, foram confeccionados corpos-de-prova contendo 2% de borracha (em peso da mistura) nas granulometrias G (9,5 mm - 0,60 mm) e F (1,18 mm - 0,15 mm). As misturas 2F', 2G' e de controle foram dosadas para a obtenção de um volume de vazios de 4%. As misturas 2F e 2G foram moldadas utilizando a mesma quantidade de ligante da mistura de controle.

A Tabela 4 apresenta a composição das misturas, os valores de teor de asfalto, volume de vazios (V_v), massa específica aparente (D_{ap}), relação betume/vazios (RBV), fluência (F) e estabilidade Marshall (E). Esses valores representam a média de três corpos-de-prova. O valor mínimo estabelecido para a estabilidade Marshall e a faixa de fluência variam de acordo com o órgão que faz a especificação. Todas as misturas apresentam valor de estabilidade superior ao mínimo estabelecido pelo DER-SP (750 kg) e pela NBR 12891/93. Entretanto, somente as misturas de controle e 2F possuem valor de fluência dentro das especificações.

Deve-se destacar que o ensaio Marshall, apesar de questionado porque as tensões que ocorrem durante a determinação da estabilidade e fluência são de difícil interpretação e por apresentar elevada dispersão de resultados, ainda é uma referência no Brasil, motivo pelo qual foi incluído neste trabalho. Complementarmente, foram realizados ensaios para determinação do módulo de resiliência (DNER, 1994a) e resistência à tração por compressão diametral (DNER, 1994b).

Tabela 4: Resultados dos ensaios Marshall

Parâmetro	Misturas					Especificação NBR 12891: Camada de Rolamento
	2G'	2G	2F'	2F	Controle	
Composição:						
Agregado (g)	1140	1140	1141,7	1141,7	1200	-
Borracha (g)	24	24	24	24	-	-
CAP-20 (g)	91,7	79,3	98,6	79,3	79,3	-
CAP-20 (%)	7,3	6,4	7,8	6,4	6,2	-
D _{ap}	2,365	2,344	2,356	2,325	2,469	-
V _v (%)	4	6,1	4	7,1	4	3 a 5
RBV (%)	80	69	83	67	79	75 a 82
E (kgf)	937	978	872	1059	1399	350
F (mm)	5,2	4,7	5,1	4,5	3,2	2,0 a 4,6

O módulo de resiliência (MR) é um fator importante para o dimensionamento racional dos pavimentos, estando intimamente ligado ao projeto da mistura, enquanto que a resistência à tração (RT) é associada ao comportamento estrutural adequado ou não das misturas quanto à vida de fadiga.

Para a avaliação da capacidade das misturas em resistir às deformações permanentes foi utilizado um equipamento simulador de tráfego em laboratório, idealizado pelo *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées* – LCPC. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Tecnologia de Pavimentação, do Departamento de Engenharia de Transportes da Escola Politécnica da USP, em São Paulo. Os procedimentos do ensaio são descritos nas normas francesas NF P 98-253-1 (AFNOR, 1991a) e NF P 98-250-2 (AFNOR, 1991b).

Para a realização deste ensaio foram moldadas placas de 180 mm de largura por 500 mm de comprimento e 50 mm de altura. O processo de compactação se desenvolve por amassamento, através de um roda dotada de um pneu de borracha. A pressão do pneu, a carga do eixo e a quantidade de passadas da roda são controladas. Para cada mistura foram moldadas duas placas.

No equipamento simulador de tráfego são colocadas duas placas de cada vez. O ensaio se realiza mediante a aplicação de uma carga

através de uma roda dotada de pneus lisos. A pressão dos pneus e a carga dos eixos são controladas. A passagem das rodas sobre as placas se faz através de ciclos de ida e volta do pneu (cada ciclo tem a duração de 1 segundo). As medidas das deformações foram feitas em 15 pontos distintos da trilha de roda, sendo realizadas no decorrer do ensaio, após 100, 300, 1.000, 3.000, 10.000 e 30.000 ciclos. Os ensaios foram realizados em temperatura controlada de 60°C.

Para cada conjunto de placas obtém-se uma equação de regressão do tipo $y = a \cdot N^b$, onde “y” representa o valor do afundamento na trilha de roda, “N” é o número de ciclos e “a” e “b” são obtidos de análise de regressão. A Figura 5 apresenta o resultado das regressões para as misturas analisadas, destacando-se que o coeficiente “b” representa a taxa de deformação com o número de ciclos.

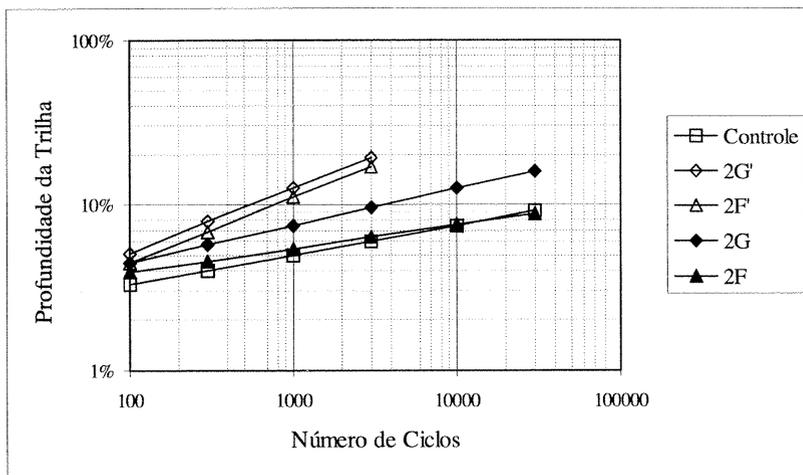


Figura 5: Resultados dos ensaios de trilha de roda

A Tabela 5 apresenta o resumo dos resultados (média de 3 corpos-de-prova) obtidos para MR e RT, a relação MR/RT e os resultados do ensaio de trilha de roda (média entre duas placas ensaiadas).

Tabela 5: Resumo dos resultados obtidos nos ensaios mecânicos

Parâmetro	Misturas				
	2G'	2G	2F'	2F	Controle
MR (MPa, 25°C)	1942	1634	2687	2104	3637
RT (MPa, 25°C)	1,09	1,02	1,12	0,99	1,29
MR/RT	1782	1602	2399	2125	2819
Def. Permanente:					
Afundamento (30.000 ciclos)	*	16%	*	9%	9%
Coef. Angular	0,3960	0,2234	0,3950	0,1451	0,1789

*O ensaio foi finalizado após 3.000 ciclos devido à deformação excessiva

Pelos resultados apresentados na Figura 5 e Tabela 5, a mistura que apresentou melhor desempenho quanto à resistência ao acúmulo de deformação permanente nas trilhas de roda foi a com granulometria fina e teor de ligante igual ao da mistura de controle (2F), seguida pela mistura de controle. A mistura com pior desempenho foi a com granulometria grossa e teor de ligante correspondente a um volume de vazios de aproximadamente 4% (2G'), seguida pela 2F' (granulometria fina, teor para $V_v = 4\%$) e 2G (granulometria grossa e teor igual ao da mistura de controle).

A mistura 2F apresentou menor taxa de deformação (curva menos inclinada) quando comparada à mistura de controle, ou seja, a mistura 2F apresenta o menor potencial de desenvolver deformação permanente nas trilhas de roda. Os resultados dos ensaios de trilha de roda indicam, nas misturas modificadas e dosadas para um volume de vazios de 4%, problemas no travamento da estrutura granular, com formação um esqueleto menos estável e menos resistente.

Na Tabela 5 observa-se que ocorre uma diminuição do valor do módulo de resiliência das misturas modificadas, sendo essa redução maior nas misturas que contêm borracha na granulometria grossa (G). O módulo de resiliência cai significativamente com a adição da borracha, mas não proporcionalmente à redução da resistência à tração, sugerindo, em princípio, uma maior flexibilidade e resistência à fadiga.

6. CONCLUSÕES

O tempo de digestão da borracha é um fator que deve ser considerado no projeto de misturas modificadas com adição de borracha (processo seco). Uma particularidade dessas misturas está relacionada à expansão do corpo-de-prova após o término do processo de compactação. Este aumento de volume é um fenômeno dependente do tempo de digestão, cuja magnitude está relacionada à complexa interação entre os fatores tipo e graduação da borracha, porcentagens de borracha e ligante e temperatura durante a produção em usina, transporte, lançamento e compactação. O tempo de digestão permite que ocorra reação entre as partículas de borracha e o ligante asfáltico, sendo que a quantidade de partículas menores introduzida na mistura determina o grau de modificação do ligante. Estudo complementar, já em desenvolvimento pelos autores deste trabalho, procura avaliar como o tempo de digestão influencia as propriedades das misturas asfálticas compactadas.

Os resultados dos ensaios de trilha de roda indicam que a diminuição das partículas de borracha proporciona uma melhora de desempenho em termos de resistência à deformação permanente. As misturas modificadas com adição de borracha dosadas para um volume de vazios de 4% apresentaram deformação permanente excessiva e precoce. Isso indica que os teores de ligante utilizados são extremamente elevados para essas misturas, fato constatado no ensaio Marshall em razão dos elevados valores de fluência. Esse fato indica que o valor de volume de vazios não deve ser usado como critério na determinação do teor ótimo de ligante para essas misturas.

As misturas modificadas com borracha apresentaram menores valores de módulo de resiliência (MR) e de resistência à tração (RT) quando comparadas à mistura de controle. A granulometria da borracha e o teor de ligante tiveram pequena influência nos resultados de resistência à tração. As misturas com borracha na granulometria grossa se mostraram mais resilientes, indicando que as partículas maiores de borracha atuam como “molas” na mistura. As relações MR/RT para as misturas modificadas com borracha sugerem uma maior flexibilidade quando comparadas à mistura de controle.

AGRADECIMENTOS

Esta pesquisa conta com o apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), através da concessão de uma bolsa de doutorado. Os autores também agradecem ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) pela realização dos ensaios de caracterização do ligante asfáltico.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AASHTO (1989) T-283 - *Resistance of Compacted Bituminous Mixture to Moisture Induced Damage*. American Association of State Highway Transportation Officials.
- AASHTO (1993) T-166 - *Bulk Specific Gravity of Compacted Bituminous Mixtures Using Saturated Surface-Dry Specimens*. American Association of State Highway Transportation Officials.
- ABNT (1993) NBR 12891/93 - *Dosagem de Misturas Betuminosas pelo Método Marshall*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.
- AFNOR (1991a) *Deformation Permanente des Mélanges Hydrocarbonés – Partie 1: Essai d'orniérage*. NF P 98-253-1. Association Française de Normalisation, Paris, França.
- AFNOR (1991b) *Preparation des Mélanges Hydrocarbonés – Partie 2: Compactage des plaques*. NF P 98-250-2. Association Française de Normalisation, Paris, França.
- DNER (1994a) ME 133/94 – *Misturas Betuminosas – determinação do módulo de resiliência*. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Rio de Janeiro.
- DNER (1994b) ME 138/94 – *Misturas Betuminosas – determinação da resistência à tração por compressão diametral*. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Rio de Janeiro.
- DNER (1997) *Especificação de serviço DNER-ES 313/97, Pavimentação – Concreto betuminoso – Norma Rodoviária*. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Rio de Janeiro.
- Epps, J. A. (1994) *NCHRP Synthesis of Highway Practice 108: Uses of Recycled Rubber Tires in Highways*. TRB, National Research Council, Washington, D.C., 162p.
- FHWA (1993) *Crumb Rubber Modifier – Design Procedures and Construction Practices*. Workshop Notes. U.S. Department of

- Transportation. Federal Highway Administration. Publication Nº. FHWA-SA-93-011.
- FHWA (1995) *Background of Superpave Asphalt Mixture Design and Analysis*. National Asphalt Training Center. Demonstration Project 101. U. S. Department of Transportation. Federal Highway Administration. Publication Nº. FHWA-AS-95-003. 159p.
- Gallego, J.; M.A. del Val e R. Tomás (2000) A Spanish Experience with Asphalt Pavements Modified with Tire Rubber. *Proceedings of the Asphalt Rubber 2000 Conference*. Portugal, p.673-687.
- Oliver, J. W. H. (2000) Rutting and Fatigue Properties of Crumbed Rubber Hot Mix Asphalts. *Proceedings of the Asphalt Rubber 2000 Conference*. Portugal, p.221-239.
- Takallou, H. B. e R. G. Hicks (1988) Development of Improved Mix and Construction Guidelines for Rubber-Modified Asphalt Pavements. *Transportation Research Record 1171*. TRB. National Research Council. Washington, D.C., p.113-120.
- Takallou, H.B.; R.G. Hicks e D.C. Esch (1986) Effect of Mix Ingredients on the Behavior of Rubber-Modified Asphalt Mixtures. *Transportation Research Record 1096*. TRB. National Research Council. Washington, D.C., p.68-80.

Endereço dos autores:

Sandra A. Margarido Bertollo
José Leomar Fernandes Júnior
Departamento de Transportes
Escola de Engenharia de São Carlos – USP
Avenida Trabalhador São-Carlense, 400
13566-590 - São Carlos - SP - Brasil
E-mail: sandra.bertollo@bol.com.br
leomar@sc.usp.br

Liedi Bariani Bernucci
Edson de Moura
Departamento de Transportes
Escola Politécnica – USP
Av. Prof. Almeida Prado, Travessa 2, s/n
05508-900 - São Paulo – SP – Brasil
E-mail: liedib@usp.br
edmoura@usp.br