
DESVULCANIZAÇÃO DA BORRACHA POR RADIAÇÃO GAMA: UM PROCESSO ALTERNATIVO PARA INCORPORAÇÃO DE PNEU USADO EM PAVIMENTOS

Bruno Summa*
Sonia Braunstein Faldini*
Mauro César Terence*

Resumo

A grande quantidade de descarte de pneumáticos tem se tornado um problema grave em todo o mundo devido à sua dificuldade de reciclagem. Uma alternativa é a utilização da radiação gama como agente de degradação da borracha de pneu usado, o que torna o material interessante para uso em outras aplicações, como no caso da sua incorporação ao cimento asfáltico de petróleo, promovendo, entre outras, características inovadoras como a melhoria na sua absorção de água.

Palavras-chave: Pneus, reciclagem, pavimentos.

* Universidade Presbiteriana Mackenzie (UPM).

1 INTRODUÇÃO

Atualmente no Brasil, existe uma necessidade econômica e social para que haja melhorias nas condições das estradas brasileiras, uma vez que o transporte rodoviário corresponde a mais de 60% do total da circulação nacional de mercadorias no país. Apesar desse dado, boa parte das rodovias brasileiras se encontra em péssimas condições de conservação, o que as torna inseguras e, muitas vezes, intransitáveis, atrapalhando e atrasando assim o sistema logístico que envolve a circulação de mercadorias. Essa situação atinge mais de 77% das estradas de todo o país, sendo as piores localizadas em regiões menos privilegiadas, como Norte e Nordeste (PINHEIRO, 2004).

Os conceitos de pavimentação usando ligantes asfálticos datam de 1829, quando pesquisadores franceses utilizaram uma mistura asfáltica para melhorar as condições de rodagem. A partir de então, o uso de asfalto na construção civil é cada vez mais crescente e já está presente em 97% das estradas pavimentadas brasileiras. O ligante asfáltico é o material mais antigo usado pelo homem na construção civil, devido às suas propriedades impermeabilizantes e aos seus aglutinantes, e foi vastamente utilizado para fabricação de telhados, potes, banheiras, casas, pirâmides e até mumificação no Egito antigo (ODA, 2000).

O ligante asfáltico é um material aglutinante escuro, constituído de misturas complexas de hidrocarbonetos não voláteis de elevada massa molar com propriedades viscoelásticas. Pode ser obtido pela destilação do petróleo cru que passa por uma torre de destilação. O produto encontrado no fundo da torre é denominado cimento asfáltico de petróleo e classificado de acordo com sua viscosidade ou penetração (AMARAL, 2000).

Apesar de ter um papel fundamental nas misturas usadas em pavimentos, o cimento asfáltico de petróleo (CAP) não possui características adequadas para resistir ao tipo de carregamento, ao volume do tráfego e às condições climáticas da região. Com isso, a adição de polímeros (elastômeros) tem melhorado a qualidade das misturas usadas nos asfaltos (GONZALEZ et al., 2004).

O uso de borracha oriunda de pneu em ligantes asfálticos teve impulso em 1963 com o engenheiro Charles H. McDonald, considerado o precursor do asfalto-borracha nos Estados Unidos (FAXINA, 2002). Os principais usos de ligantes asfálticos modificados com borracha são: macadame de penetração, selantes para juntas e trincas, concreto asfáltico usinado a quente, concreto asfáltico poroso. Este último proporciona uma redução do nível de ruído e aumenta a segurança das estradas.

A adição de borracha em asfalto visa também ajudar a resolver problemas ecológicos causados pelo descarte de pneus na natureza (ODA; JUNIOR, 2001). A restauração de pavimentos com esse tipo de asfalto pode usar até mil pneus por quilômetro e também há um aumento da vida útil do pavimento, maior retorno elástico, maior resistência ao envelhecimento precoce e maior resistência às deformações plásticas (DI GIULIO, 2007). Com isso, torna-se evidente a importância do desenvolvimento de métodos de incorporação de borracha em cimento asfáltico de petróleo, visando a alterações na viscosidade e na absorção de água, que poderiam melhorar tanto a já conhecida forma de aplicação como a absorção de água, evitando problemas onde há grandes índices pluviiais (GOUVEIA et al., 2004; ODA, 2000).

A incorporação de borracha de pneu usado pode ser realizada pelo processo seco ou úmido (SPECHT, 2004).

O processo seco consiste na mistura da borracha com o agregado antes da adição do ligante asfáltico. A borracha adicionada substitui no máximo 5% do agregado que é misturado com o cimento asfáltico, e a mistura obtida por esse processo é geralmente conhecida como agregado-borracha. Diferentemente do processo úmido, os inibidores de ultravioleta e os antioxidantes presentes na borracha não são transmitidos para o asfalto, havendo por isso preferência pelo processo úmido.

O processo úmido dá origem ao asfalto-borracha, que é uma mistura de cimento asfáltico com pelo menos 15% em massa de borracha de pneu reciclada, além de aditivos. Na obtenção do asfalto-borracha, faz-se a adição da borracha moída ao cimento asfáltico de petróleo (CAP) em alta temperatura (por exemplo, 200°C), resultando numa mistura chamada de ligante asfalto-borracha, com propriedades diferentes do ligante inicial. A reação entre a borracha e o CAP se dá mediante a absorção de óleos aromáticos do CAP à cadeia de polímeros da borracha natural ou sintética, formando um gel viscoso e aumentando a viscosidade do material (SPECHT, 2004; ABDELRAHMAN; CARPENTE, 1999). Para temperaturas muito elevadas ou longos tempos de reação, a absorção continua até que a borracha esteja totalmente dispersa no CAP. Deve-se ter cuidado especial com a temperatura de reação, pois temperaturas elevadas podem provocar o envelhecimento precoce do CAP, mudando suas características por processo termo-oxidativo, originado na perda de voláteis ou frações de baixa massa molecular e na formação de ligações de hidrogênio (LUCENA; SOARES; SOARES, 2002).

O aquecimento da mistura favorece a interação entre o ligante asfáltico e a borracha com inchamento da última (SPECHT, 2004). O inchamento é o resultado da difusão de líquidos em direção ao interior das partículas de borracha; esse movimento é controlado pela compatibilidade química entre o cimento asfáltico e a borracha, o tempo de imersão e a viscosidade do cimento asfáltico.

Estudos para melhorar a porosidade do asfalto-borracha, viabilizando seu uso em regiões com problemas de alta densidade pluviial, foram realizados com a borracha de

pneu, antes mesmo de sua aplicação ao ligante, por meio de tratamentos químicos (GOUVEIA et al., 2004; SEGRE, 1999).

Apesar de algumas evidências de que misturas betuminosas executadas com adição de pó de borracha têm suas propriedades melhoradas, o que pode ser verificado nos vários trabalhos realizados desde a década de 1970, o assunto não está esgotado. Assim, no presente trabalho, foi estudado o efeito da radiação gama em pó de pneu usado antes de sua incorporação ao cimento asfáltico, visando ao desenvolvimento de um novo método de obtenção de asfalto-borracha, além de tornar interessantes a reciclagem e o reúso da borracha.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais

Para realização dos ensaios, foi usado pó de borracha de malha N10 proveniente de pneu usado e cimento asfáltico CAP 20 (classificação por viscosidade Saybolt-Furol) da Ipiranga Petróleo Ltda.

2.2 Métodos

Para a obtenção de asfalto-borracha, o pó de borracha foi irradiado e, em seguida, misturado com o cimento asfáltico na proporção em massa: 20% pó de borracha/80% CAP 20.

2.2.1 Preparação das amostras

O cimento asfáltico, depois de retirado da lata, foi talhado com o uso de uma talhadeira e separado em porções de 80 g cada, que foram aquecidas com bico de Bunsen até 120°C, temperatura máxima para uma operação sem risco devido à liberação de gases tóxicos. O controle da temperatura foi realizado com o uso de termômetro misturador da Termosolo®.

Ao término do amolecimento do material, este foi misturado com 20 g de borracha em pó, e fez-se a homogeneização com o uso de uma espátula de alumínio, realizando movimentos circulares. Na sequência, a mistura foi levada a uma estufa a 120°C, por um período de 75 minutos, para que houvesse total agregação da borracha ao CAP.

Após o resfriamento, as misturas destinadas aos ensaios de absorção de água e densidade foram mantidas no refrigerador, para maior facilidade de manipulação do material.

Para a verificação do efeito da radiação, foram realizados ensaios de viscosidade, absorção de água e densidade aparente.

2.2.2 Irradiação

Amostras de pó de borracha de pneu usado (malha N10) foram irradiadas no Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (Ipen).

A radiação gama foi aplicada ao pó de borracha nas doses: 500 kGy e 2.000 kGy a uma taxa de dose de 2,5 kGy/h.

2.2.3 Obtenção do asfalto-borracha

Após a irradiação, o pó de borracha foi misturado ao cimento asfáltico de petróleo na proporção: 20% em massa de pó de borracha e 80% em massa de CAP, seguindo o procedimento descrito em 2.2.1.

2.2.4 Viscosidade Saybolt-Furol

O ensaio foi realizado com o viscosímetro Saybolt-Furol da SoloTest[®] (Figura 1).

Esse viscosímetro opera segundo as normas americanas ASTM D-88 e ASTM E-120 e segundo a norma brasileira NBR-14950. A viscosidade Saybolt-Furol é definida como o tempo em segundos para que 60 mL (Figura 2) da amostra escorram através do orifício Saybolt (Figura 3), numa determinada temperatura padrão. Para esse ensaio, a mistura asfalto-borracha, após a total homogeneização e com uma consistência totalmente líquida, foi introduzida no viscosímetro Saybolt-Furol.

Devido ao aumento de viscosidade com a adição da borracha, foi necessário escolher uma temperatura adequada de trabalho, sendo ensaiadas amostras de CAP puro e de CAP com pó de borracha N10 sem tratamento. Cada amostra com volume igual a 100 mL foi introduzida no viscosímetro e foram medidos os tempos de escoamento nas diferentes temperaturas que constam da norma (121°C, 135°C, 149°C, 163°C, 177°C, 204°C ou 232°C). O tempo que cada material levou para escoar uma quantidade de 60 mL no vaso receptor foi anotado para a escolha da melhor temperatura de ensaio.



Figura 1 Viscosímetro Saybolt-Furol.

Fonte: Acervo dos autores.

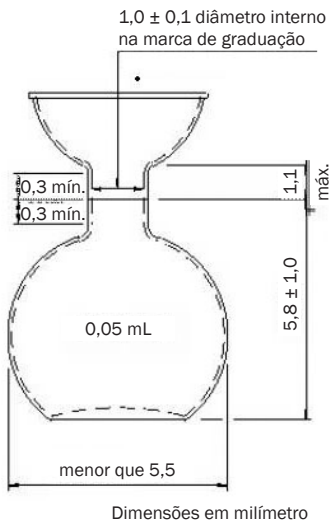


Figura 2 Vaso receptor 60 mL.

Fonte: Elaborada pelos autores.

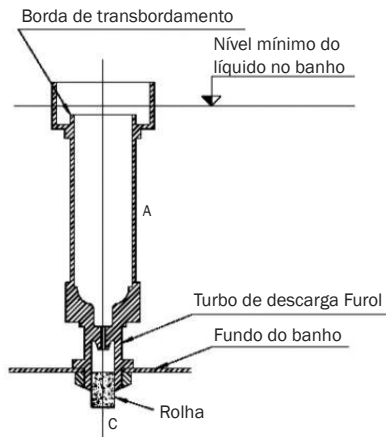


Figura 3 Orifício Furol.

Fonte: Elaborada pelos autores.

Uma vez determinada a temperatura de ensaio, foram preparadas oito amostras, sendo duas para cada mistura, segundo a Tabela 1.

TABELA 1

Misturas e seus tratamentos

Mistura	Tratamento do pó de borracha
100% CAP + 0% pó de borracha	-
80% CAP + 20% pó de borracha	Sem tratamento
80% CAP + 20% pó de borracha	Radiação gama: 500 kGy
80% CAP + 20% pó de borracha	Radiação gama: 2.000 kGy

As amostras preparadas foram levadas ao viscosímetro preaquecido na temperatura escolhida e procedeu-se como descrito anteriormente.

2.2.5 Absorção de água

A determinação da massa de água absorvida objetivou verificar mudanças na absorção de água pelo asfalto-borracha, em virtude da adição do pó de borracha irradiado.

A massa de água absorvida foi determinada por pesagem em balança analítica, após 24 horas de imersão, e, em seguida, o asfalto-borracha contendo água foi deixado em repouso por mais 24 horas para verificar a massa de água liberada. As misturas asfalto-borracha ensaiadas são as mesmas apresentadas na Tabela 1.

Para a realização desse ensaio, foram separados seis béquer de 150 mL contendo cada um 100 mL de água desmineralizada. Cada mistura (em temperatura ambiente) foi pesada (P_1) e mantida imersa na água durante 24 horas com o béquer vedado com parafilme. Ao término das 24 horas, as amostras foram secas cuidadosamente com papel absorvente e imediatamente pesadas em balança analítica (P_2). A diferença entre P_2 e P_1 forneceu a massa de água absorvida.

Além da medida de massa absorvida, verificou-se a liberação de água após o ensaio. Para esse propósito, as amostras foram deixadas ao ar livre, em temperatura ambiente por mais 24 horas, secas e pesadas novamente (P_3). A diferença entre P_2 e P_3 forneceu a massa de água cedida ao ambiente.

2.2.6 Ensaio de densidade aparente

Para esse ensaio, foram preparadas três misturas conforme descrito na Tabela 2.

TABELA 2

Misturas para o ensaio de densidade

Asfalto-borracha	Tratamento
80% CAP + 20% borracha	Sem tratamento
80% CAP + 20% borracha	Irradiação gama a 500 kGy
80% CAP + 20% borracha	Irradiação gama a 2.000 kGy

No ensaio de densidade, pesaram-se as misturas secas (massa seca), procedimento repetido depois de elas foram imersas em água (massa úmida).



Figura 4 Balança para medida de densidade.

Fonte: Acervo dos autores.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Viscosidade Saybolt-Furol

O ensaio de viscosidade foi feito em duas etapas. Na primeira, determinou-se a melhor temperatura de trabalho, uma vez que pela norma seriam possíveis as seguintes temperaturas: 121°C, 135°C, 149°C, 163°C, 177°C, 204°C ou 232°C. Foram descartadas as temperaturas 121°C, 135°C, 149°C, 163°C, 204°C e 232°C: a primeira devido à dificuldade de se misturar o CAP com a borracha, a segunda, terceira e quarta temperaturas pela dificuldade de a mistura de CAP com borracha

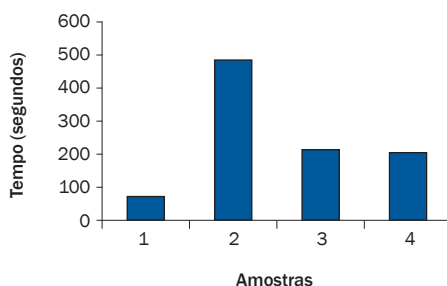
(sem tratamento) escoar pelo orifício Saybolt e as outras duas por serem as misturas muito fluidas.

Na segunda etapa, mediu-se o tempo de escoamento a 177°C do CAP puro e das misturas com e sem tratamento. Observou-se que tanto a adição ao CAP do pó de borracha não tratado como a adição do pó de borracha irradiado têm influência na viscosidade da mistura, sendo responsáveis pelo seu aumento. Enquanto o tempo de escoamento das amostras não irradiadas é praticamente sete vezes maior que o tempo de escoamento do CAP puro, esse fator cai para aproximadamente três vezes para as misturas com borracha irradiada (Tabela 3 e Gráfico 1). Como o tempo de escoamento para a borracha irradiada com dose 500 kGy foi cerca de 5% superior ao da dose 2.000 kGy, um aumento da dose de cerca de quatro vezes não tem um efeito relevante sobre a viscosidade da mistura, sendo necessário averiguar melhor esse comportamento, fazendo medidas em doses intermediárias e determinando o grau de vulcanização.

TABELA 3

Tempos de escoamento a 177°C das diferentes misturas asfalto-borracha

Amostras	Temperatura (°C)	Tempo (s)	Desvio padrão
CAP puro	177	70,5	0,71
CAP com borracha sem tratamento	177	486,9	8,1
CAP com borracha 500 kGy	177	212,3	2,1
CAP com borracha 2.000 kGy	177	203,4	1,7



1 = CAP puro; 2 = CAP + borracha; 3 = CAP + borracha (500 kGy); 4 = CAP + borracha (2.000 kGy).

Gráfico 1 Tempos médios do ensaio de viscosidade.

3.2 Absorção de água

Os ensaios de imersão em água permitiram determinar a capacidade de absorção de água pelo asfalto-borracha sem tratamento e irradiado (Gráfico 2 e Tabela 4). As

misturas de CAP com borracha irradiada se mostraram mais eficazes na absorção de água se comparadas com o asfalto com borracha não irradiada. Quanto maior a dose aplicada na borracha, maior a capacidade de absorção de água pela mistura, porém esse efeito (sobre a capacidade de absorção de água) é baixo, com diferença de absorção de aproximadamente 2%. Verificou-se ainda que toda a água absorvida foi eliminada em 24 horas.

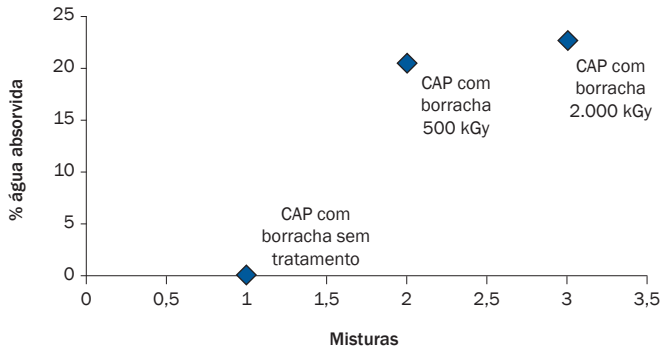


Gráfico 2 Comparação de água absorvida pelo compósito.

TABELA 4

Porcentagem de água absorvida pelo compósito

Compósito	% absorvida
CAP com borracha sem tratamento	0,0
CAP com borracha 500 KGy	20,5
CAP com borracha 2.000 KGy	22,6

A borracha vulcanizada, por ser um material totalmente impermeável, gera uma mistura com dificuldades de absorção de água, o que é ocasionado pela presença de triplas ligações em sua cadeia e pelo fato de o espaço entre os reticulados da borracha SBR ser menor que as moléculas de água. O aumento da absorção de água sugere que a irradiação do pó de borracha proveniente de pneus usados foi capaz de romper as triplas ligações nas cadeias, aumentando os vazios que há entre os reticulados, proporcionando um espaço para passagem das moléculas de água.

3.3 Densidade aparente

O valor da densidade aparente do asfalto-borracha com borracha irradiada sofreu uma pequena redução se comparado ao valor da densidade do asfalto-borracha sem tratamento (Tabela 5). Esses resultados sugerem a quebra das ligações na cadeia com aumento do espaço entre os reticulados e, conseqüentemente, do volume.

O aumento da radiação gama de 500 kGy para 2.000 kGy não teve efeito sobre a densidade.

TABELA 5

Densidade das diferentes misturas asfalto-borracha

Compósito	Densidade aparente
CAP com borracha não tratada	1,07
CAP com borracha 500 KGy	1,01
CAP com borracha 2.000 KGy	1,01

4 CONCLUSÃO

Com este estudo foi possível chegar às conclusões expostas a seguir.

A irradiação do pó de borracha pode ser uma opção para modificar algumas propriedades do asfalto-borracha como sua viscosidade, sua densidade aparente e sua absorção de água.

Quando se comparam as propriedades do asfalto-borracha sem tratamento com o asfalto-borracha irradiado, nota-se que a irradiação favorece não apenas a absorção de água pelo asfalto-borracha, mas também sua expulsão, tornando possível a obtenção de pavimento permeável.

A adição de pó de borracha sem tratamento e com tratamento aumenta a viscosidade do CAP, entretanto, para misturas com borracha irradiada, a viscosidade é bem menor.

A densidade observada com as amostras com borracha irradiada é inferior à densidade com borracha sem tratamento, sugerindo um aumento de volume da mistura.

A modificação dessas propriedades sugere que houve desvulcanização do pó de borracha com cisão nas triplas ligações da borracha e aumento do espaço entre o reticulado.

DEVULCANIZATION OF RUBBER WITH GAMMA RADIATION: AN ALTERNATIVE PROCESS TO INCORPORATION OF USED TIRE IN PAVEMENTS

Abstract

The large amount of discarded tires has become a serious problem worldwide due to its difficulty in recycling. An alternative is the use of gamma radiation as an agent of degradation of tire rubber, making the material interesting for use in other applications, such as the incorporation into the asphalt, promoting innovative features such as improvement in their water absorption among others.

Keywords: Tires, recycling, pavements.

REFERÊNCIAS

- ABDELRAHMAN, M. A.; CARPENTE, S. H. Mechanism of interaction of asphalt cement with crumb rubber modifier. *Transportation Research Record*, v. 1661, n. 295, p. 106-113, 1999.
- AMARAL, S. C. *Estudo de misturas densas com agregados do estado do Pará, utilizando asfalto convencional (CAP-40) e asfalto modificado com polímero SBS (Betuflex B 65/60)*. 2000. Dissertação (Mestrado em Transportes)—Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000.
- DI GIULIO, G. Vantagens ambientais e econômicas no uso de borracha em asfalto. *Inovação Uniemp*, Campinas, v. 3, n. 3, jun. 2007. Disponível em: <http://inovacao.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1808-23942007000300008&lng=pt&nrm=iso>. Acesso em: 10 set. 2012.
- FAXINA, A. L. *Estudo em laboratório do desempenho de concreto asfáltico usinado a quente empregando ligante tipo asfalto-borracha*. 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)—Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002.
- GONZALEZ, O. et al. Rheology and stability of bitumen/EVA blends. *European Polymer Journal*, v. 40, p. 2365-2372, 2004.
- GOUVEIA, L. T. et al. *Considerações acerca da absorção de asfalto pelos agregados e sua influência na suscetibilidade à umidade*. 2004. Disponível em: <www.ljsenger.net/ltgouveia/files/Anpet-ltgouveia2004.pdf>. Acesso em: mar. 2009.
- LUCENA, M. C. C.; SOARES, S. A.; SOARES, J. B. Caracterização e comportamento térmico do asfalto modificado por polímero. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DE MATERIAIS, 15., 2002, Natal. *Anais...* Natal: CBECIMAT – UFRN, 2002.

ODA, S. *Análise da viabilidade técnica da utilização do ligante asfalto-borracha em obras de pavimentação*. 2000. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes)–Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000.

ODA, S.; JUNIOR, J. L. F. Borracha de pneu como modificador de cimentos asfálticos para uso em obras de pavimentação. *Acta Scientiarum*, v. 23, n. 6, p. 1598-1599, 2001. Disponível em: <www.periodicos.uem.br/ActaScie>. Acesso em: mar. 2009.

PINHEIRO, J. H. M. *Incorporação de borrachas de pneu em misturas asfálticas de diferentes granulometrias*. 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes)–Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2004.

SEGRE, N. C. *Reutilização de borrachas de pneus usados como adição em pasta de cimento*. 1999. Tese (Doutorado em Química)–Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1999.

SPECHT, L. P. *Avaliação de misturas asfálticas com incorporação de borracha reciclada de pneu*. 2004. Tese (Doutorado em Engenharia)–Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

Contato

Mauro César Terence
e-mail: mauroterence@yahoo.com.br