

EFEITO DO ENVELHECIMENTO A CURTO E LONGO PRAZOS EM ASFALTOS MODIFICADOS COM BORRACHA DE PNEU E ÓLEO DE XISTO

Adalberto Leandro Faxina
Manoel Henrique Alba Sória

Departamento de Transportes
Escola de Engenharia de São Carlos Universidade de São Paulo

Leni Figueiredo Mathias Leite

Centro de Pesquisas Leopoldo Miguez de Mello (Cenpes), Petrobras

Creusa Sayuri Tahara

Departamento de Engenharia Mecânica, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo

RESUMO

O objetivo deste trabalho é estudar o efeito do envelhecimento a curto e longo prazos, em conformidade com os procedimentos adotados pela especificação Superpave, sobre ligantes asfálticos modificados com borracha de pneus e óleo de xisto. Misturas, contendo teores diversos de borracha e de óleo de xisto, foram confeccionadas em dois níveis de temperatura e tempo de processamento, e envelhecidas em estufa de filme fino rotativo (RTFOT) e em estufa de vaso pressurizado (PAV). Posteriormente, foram submetidas a ensaios de penetração e de ponto de amolecimento. A análise foi complementada com o ensaio de balanço de massa e com o índice de suscetibilidade térmica. A incorporação de borracha e de óleo de xisto, em proporções adequadas, provoca aumento do ponto de amolecimento, da penetração e do IST. O envelhecimento intensifica o efeito positivo dos modificadores. Misturas menos consistentes apresentam valores baixos de penetração retida e perda de massa expressiva, porém, em níveis considerados admissíveis por especificações para asfaltos convencionais.

ABSTRACT

The purpose of this research is to investigate the effect of short and long-term aging of asphalt binders modified with crumb rubber and shale oil, evaluated by the methods adopted by Superpave specification. Mixtures were manufactured with different rubber and oil contents under two levels of temperature and time for processing. The mixtures were submitted to short-term aging (RTFOT) and long-term aging (PAV) and, subsequently, tested for the determination of penetration and softening point. The analysis was complemented with the test for mass change and with thermal susceptibility index. Addition of rubber and shale oil, in appropriate proportions, increases the softening point, penetration and TSI. Aging enhances the positive effects obtained with the modifiers. Softer mixtures show lower values of retained penetration and significant mass loss, but in levels that are acceptable in specifications for non-modified asphalts.

1. INTRODUÇÃO

No decorrer do preparo da mistura asfáltica e da sua vida de serviço, em virtude da diversidade de agressões às quais são submetidos, os cimentos asfálticos sofrem mudanças significativas na sua estrutura química. As consequências sobre suas propriedades físicas são diretas, fazendo com que apresentem um comportamento distinto daquele esperado do ligante virgem, produzido na refinaria.

O envelhecimento, como é denominado este fenômeno de comprometimento progressivo das propriedades físicas do ligante, é um processo de natureza complexa. É influenciado, basicamente, pelas características químicas do próprio ligante, pela forma com que é manuseado e pelo nível de intemperização ao qual está submetido no pavimento. Ocorre durante a estocagem, a usinagem, o transporte, o manuseio, a aplicação e a vida de serviço do ligante, acarretando aumento da sua consistência.

Conhecer as características físicas e químicas do ligante virgem, antes da usinagem, não é suficiente para prever as alterações do seu comportamento físico, ao longo da sua vida de serviço. Para isto, é necessário realizar ensaios de caracterização física em ligantes, submetidos a algum tipo de condicionamento, que simule o nível de agressividade ao qual

estarão sujeitos. Com isso, torna-se possível prever as alterações que os asfaltos sofrerão ao longo do tempo e, assim, selecionar o tipo adequado de material de forma mais racional. A intensidade deste fenômeno pode ser avaliada por meio de ensaios tradicionais, como ponto de amolecimento, penetração, viscosidade e resiliência ou de ensaios reológicos mais recentes, como cisalhamento dinâmico, que fornece valores de módulo complexo e de ângulo de fase.

Modificadores têm sido empregados, atualmente, como forma de conferir aos ligantes maior resistência ao envelhecimento. O asfalto-borracha, particularmente, se configura como alternativa altamente promissora para o aumento da resistência ao envelhecimento das misturas asfálticas. A borracha apresenta, em sua composição, grande quantidade de negro de fumo, substância que atribui resistência à radiação ultravioleta aos pneus, empregado também como antioxidante em misturas asfálticas (Such *et al.*, 1996). O aumento, proporcionado pelo asfalto-borracha, da espessura do filme asfáltico que recobre os agregados contribui, adicionalmente, para o ganho em resistência ao envelhecimento.

Diversos equipamentos, dentre eles a estufa de filme fino rotativo (RTFOT) e a estufa de vaso pressurizado (PAV), têm sido propostos para simulação do envelhecimento de ligantes, especialmente nos Estados Unidos e na Europa. No Brasil, dissertações e teses têm aprofundado o conhecimento deste fenômeno, ainda pouco estudado e entendido. Em 2003, a Associação Brasileira de Concessões Rodoviárias (ABCR) sugeriu a substituição do ensaio de resistência ao envelhecimento de filme fino (TFOT) das especificações dos cimentos asfálticos brasileiros pelo envelhecimento em estufa de filme fino rotativo.

Os objetivos desta pesquisa são: (a) avaliar o efeito do envelhecimento a curto e longo prazos, em conformidade com os métodos adotados pela especificação Superpave, sobre asfaltos modificados com borracha de pneu e óleo de xisto, adotando como características para comparação os ensaios de penetração, de ponto de amolecimento, de balanço de massa e o índice de suscetibilidade térmica (IST) e (b) avaliar o efeito dos três componentes (asfalto, borracha e óleo) e das variáveis de processo (temperatura e tempo), bem como o efeito das diversas interações entre componentes e variáveis de processo, sobre o comportamento físico das misturas em questão, por meio de características físicas medidas.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA SOBRE ENVELHECIMENTO DE ASFALTOS

A composição química dos asfaltos é alterada pela exposição a oxigênio, a radiação ultravioleta e a variações de temperatura. Como resultado, ocorre o aumento da consistência do ligante e, conseqüentemente, da rigidez da mistura asfáltica, que, por sua vez, pode sofrer fissuração e desagregação. Quatro mecanismos principais (Whiteoak, 1991) explicam o endurecimento ou envelhecimento do asfalto:

- oxidação: é a principal causa do endurecimento. A alta temperatura empregada e a presença do ar, durante a usinagem, tornam a oxidação intensa. Os grupos polares oxigenados tendem a se associar, formando micelas de alto peso molecular, provocando aumento da viscosidade. Embora a estocagem do asfalto também seja feita sob altas temperaturas, a oxidação é minimizada pela pequena superfície exposta ao ar;
- perda de voláteis: parâmetro importante relacionado ao material volátil do ligante;
- endurecimento físico: ocorre à temperatura ambiente e é atribuído à reordenação de moléculas e à cristalização de parafinas. Trata-se de um fenômeno reversível;
- endurecimento exsudativo: resulta da migração de componentes oleosos do ligante para o agregado mineral.

Para temperaturas altas (acima de 120°C) e alta superfície específica, como as que ocorrem durante as operações de usinagem, de espalhamento e de compactação, o grau de oxidação é maior. Para temperaturas altas e baixas superfícies específicas (asfalto em tanque sem circulação) ou para baixas temperaturas e elevada superfície específica (pavimento asfáltico em serviço) o envelhecimento é lento (Tonial, 2001). No caso do pavimento em serviço, o envelhecimento será tanto maior quanto maior for o teor de vazios e menor for a espessura de película que recobre o agregado, uma vez que a presença de elevada superfície específica, sem exposição ao ar, não seja condição suficiente para que o envelhecimento seja evitado.

O tipo de borracha tem efeito expressivo sobre a qualidade do asfalto-borracha, dependendo da quantidade de borracha natural e sintética empregada na confecção dos pneus. Pneus de veículos pesados apresentam maior quantidade de borracha natural, que lhes confere melhores propriedades elásticas. A borracha oriunda de pneus de carros (Verhasselt, 1997) não apresenta benefícios significativos quanto à resistência ao envelhecimento, ao passo que a de pneus de veículos pesados contribui para o retardamento do envelhecimento, podendo, inclusive, melhorar a resistência ao envelhecimento dos ligantes.

3. DELINEAMENTO DO EXPERIMENTO

No delineamento do experimento, foi empregada a técnica estatística “experimentos com misturas” (Cornell, 1994), com restrições nas proporções dos componentes e com variáveis de processo. Chamando x_1 o teor de asfalto, x_2 o teor de borracha e x_3 o teor de agente rejuvenescedor de óleo de xisto, as restrições impostas, em porcentagem, foram: $0 \leq x_1 \leq 100$, $0 \leq x_2 \leq 22$ e $0 \leq x_3 \leq 18$. As variáveis de processo incluídas foram a temperatura e o tempo, nos níveis máximo e mínimo, arbitrados em 170 e 200°C e 90 e 120 min, respectivamente. A energia de cisalhamento foi fixada em 4.000 rpm, como forma de fracionar o experimento. A fim de realizar um mapeamento completo do espaço amostral definido pelas restrições dos componentes, as misturas projetadas foram: 100-0-0, 91-0-9, 82-0-18, 89-11-0, 60-22-18, 69-22-9, 71-11-18, 78-22-0 e 80-11-9, onde o primeiro número corresponde ao teor de asfalto, o segundo ao teor de borracha e o terceiro ao teor de óleo. As variáveis de processo foram aplicadas apenas às misturas que contém borracha.

4. MATERIAIS EMPREGADOS

A borracha, cuja composição granulométrica é mostrada na Tabela 1, foi produzida pela empresa Artgoma S.A., de São Paulo, SP, obtida da trituração de pneus de veículos pesados. O asfalto de base (CAP 40) foi fornecido pela Refinaria Duque de Caxias (Reduc-Petrobras), de Duque de Caxias, RJ, e o óleo de xisto, tipo AR-5 conforme especificação ASTM D 4552, pela Unidade de Negócios da Industrialização do Xisto (SIX-Petrobras), de São Mateus do Sul, PR.

Tabela 1: Composição granulométrica da borracha empregada

abertura da peneira, mm	1,19	0,59	0,42	0,297	0,175	0,150	0,074	fundo
% passada	100,00	99,24	59,74	44,99	15,84	11,31	2,46	0,00

5. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

A fim de avaliar o efeito do envelhecimento sobre as misturas projetadas, a rotina de laboratório foi dividida em quatro ações distintas: confecção das misturas, envelhecimento a curto prazo, envelhecimento a longo prazo e realização dos ensaios de caracterização física. Foram preparadas 27 misturas, em conformidade com o delineamento do experimento,

realizados 54 ensaios de penetração, sendo 27 relativos às misturas na condição virgem e 27 às misturas envelhecidas a curto prazo, totalizando 168 determinações, e 131 ensaios de ponto de amolecimento, sendo 53 relativos às misturas virgens, 40 às misturas envelhecidas a curto prazo e 38 às envelhecidas a longo prazo, totalizando 262 determinações.

5.1. Confeção das misturas

As misturas contendo apenas asfalto e borracha e aquelas contendo asfalto, borracha e óleo de xisto foram preparadas em misturador de alto cisalhamento (marca Silverson, modelo L4RT) sob rotação fixa de 4.000 rpm, nas temperaturas e tempos de mistura especificados no delineamento do experimento. As misturas contendo apenas asfalto e óleo de xisto foram preparadas em misturador de baixo cisalhamento (marca Ika Labortechnik, modelo RW20) sob rotação de 300 rpm, temperatura de 135°C e tempo de 20 min.

5.2. Envelhecimento das misturas a curto e longo prazos

O condicionamento das misturas foi efetuado por meio dos ensaios de envelhecimento de filme fino em estufa rotativa (RTFOT) e de envelhecimento em vaso pressurizado (PAV), em conformidade com as normas ASTM D 2872-97 e ASTM D 6521-03a, respectivamente. As estufas RTFOT utilizadas foram a da marca Despatch modelo RTFOT e a da marca James Cox & Sons modelo CS 325-A. A estufa PAV empregada foi a da marca Prentex modelo 9300.

O primeiro condicionamento se dá pela exposição de uma película fina de asfalto, com massa total de $35 \pm 0,5$ g, em frasco padronizado, a um jato de ar com vazão de 4.000 ± 200 l/s, durante 85 min, à temperatura de $163 \pm 0,5$ °C. Na seqüência, o resíduo obtido dos frascos foi coletado e homogeneizado para ser empregado nos ensaios e no condicionamento posterior. Paralelamente ao condicionamento das amostras, procede-se o ensaio de balanço de massa (ASTM D 2872-97). O envelhecimento a longo prazo é realizado por meio da exposição do resíduo do RTFOT, acondicionado em pratos metálicos preenchidos com $50 \pm 0,5$ g, a uma pressão de $2,1 \pm 0,1$ MPa, sob temperatura de $100 \pm 0,5$ °C, durante o período de 20 h \pm 10 min. Em seguida, o resíduo foi coletado e acondicionado em estufa a vácuo, à 170 ± 5 °C e pressão de $15 \pm 2,5$ kPa, durante 30 \pm 10 min, para posterior realização dos ensaios.

5.3. Ensaios de caracterização física

O ensaio de penetração foi realizado conforme norma ASTM D 5-97. As misturas foram ensaiadas a 25°C, com carga de 100 g aplicada durante 5 s. O equipamento utilizado é o da marca Humboldt. O ensaio de ponto de amolecimento foi executado segundo a norma ASTM D 36-95 e os equipamentos utilizados foram o da marca ISL modelo RB36 e o da marca Herzog modelo HRB 754. O ensaio de penetração foi realizado nas amostras virgens e envelhecidas a curto prazo. Foram efetuadas 3 determinações em um único corpo-de-prova, para cada uma das misturas estudadas. O ensaio de ponto de amolecimento foi realizado nas amostras virgens, envelhecidas a curto prazo e envelhecidas a longo prazo, sendo efetuadas três ou quatro determinações para as misturas com três componentes e duas determinações para misturas com um ou dois componentes.

6. RESULTADOS OBTIDOS E ANÁLISE

Na Figura 1, são apresentados os valores de penetração, em amostras virgens e envelhecidas a curto prazo. Na Figura 2, é indicado o efeito do envelhecimento na penetração, na forma de penetração retida, que corresponde à razão entre as penetrações virgem e após RTFOT. O limite indicado corresponde ao especificado pelo Regulamento Técnico DNC, nº 01/92, Rev. 02,

para asfaltos convencionais. Na Figura 3, são mostrados os valores de ponto de amolecimento, em amostras virgens e envelhecidas a curto e longo prazos. Na Figura 4, estão indicados os valores da variação do ponto de amolecimento, obtidos como a diferença entre os valores antes e após RTFOT. O limite indicado é especificado pela norma européia EN 12591-99, para asfaltos convencionais.

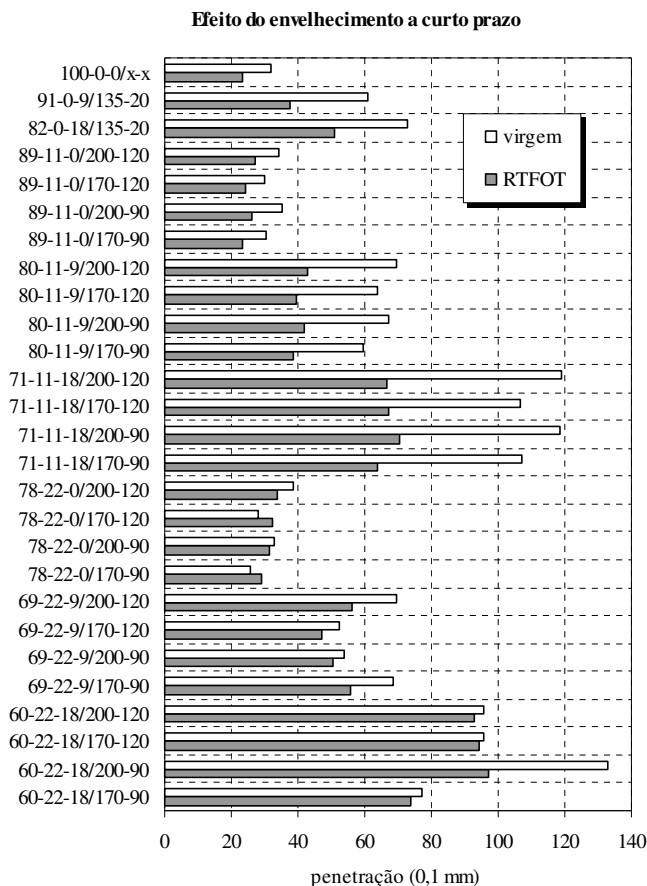


Figura 1: Comparativo da penetração em amostras virgens e envelhecidas a curto prazo

Na Figura 5, são apontadas as diferenças entre valores do índice de suscetibilidade térmica, para misturas virgens e envelhecidas a curto prazo, obtidos com base nos resultados de penetração e de ponto de amolecimento. Os limites indicados correspondem aos especificados pelo Regulamento Técnico DNC, nº 01/92, Rev. 02, para asfaltos convencionais. Na Figura 6, estão indicados os valores de balanço de massa. A variação de massa de 1% é o limite máximo especificado pelo Regulamento Técnico DNC, nº 01/92, Rev. 02, para asfaltos convencionais, e a variação de 0,5% é o limite máximo especificado, para asfaltos convencionais, pelas normas européia (EN 12591-99) e americana (revisão da AASHTO MP1, de 2002, que inclui requisitos adicionais de perda de massa). O limite de 0,5% é o que

deve ser adotado pelas especificações brasileiras, na revisão atualmente em curso. Em todos os gráficos, as colunas representam valores médios das determinações para cada mistura. Como não se dispõe de especificações para asfalto-borracha, no que se refere às características aqui avaliadas, foram adotados, para efeito de comparação, os limites de normas brasileiras, européias e americanas, para asfaltos convencionais.

A análise de dados, aqui apresentada, se limita a uma análise qualitativa, realizada com base nos gráficos. Uma análise estatística completa, baseada no estudo de modelos estatísticos, está ainda em andamento, a fim de verificar os efeitos das interações estabelecidas entre os componentes e as variáveis de processo. Acredita-se que o fenômeno em questão seja bastante complexo e, para seu entendimento, será necessária a realização de outros ensaios de caracterização física das misturas e um estudo cuidadoso de modelos, cujos termos apresentem significado físico satisfatório.

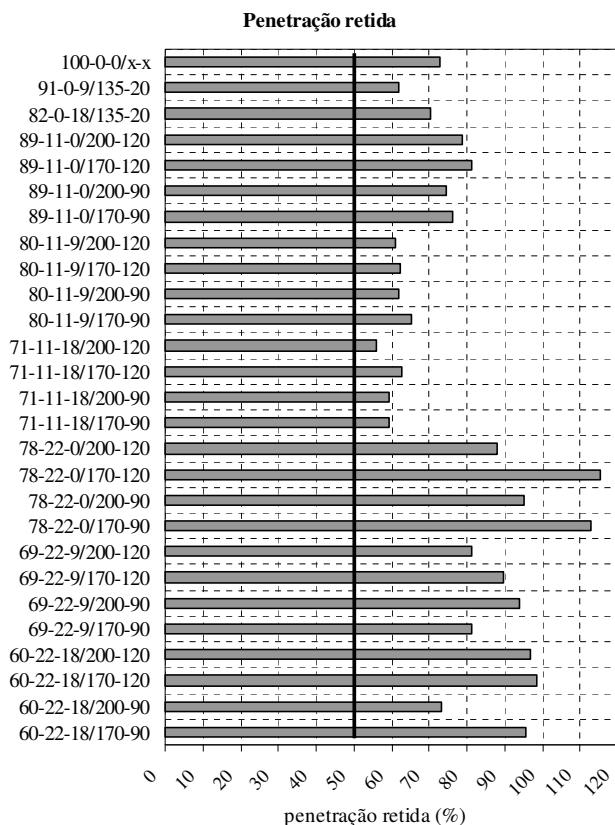


Figura 2: Valores de penetração retida

É necessário considerar que asfaltos com valores altos de penetração e de ponto de amolecimento são desejados na pavimentação, por conferirem maior resistência à fadiga, relacionada com valores maiores de penetração, e maior resistência à deformação permanente,

associada a valores maiores de ponto de amolecimento. O efeito nocivo do envelhecimento é notado pela redução da penetração e pelo aumento do ponto de amolecimento, em associação com a variação de massa. A influência do envelhecimento sobre a suscetibilidade térmica é avaliada pelo aumento do valor de IST. Asfaltos modificados normalmente apresentam valores positivos altos de IST.

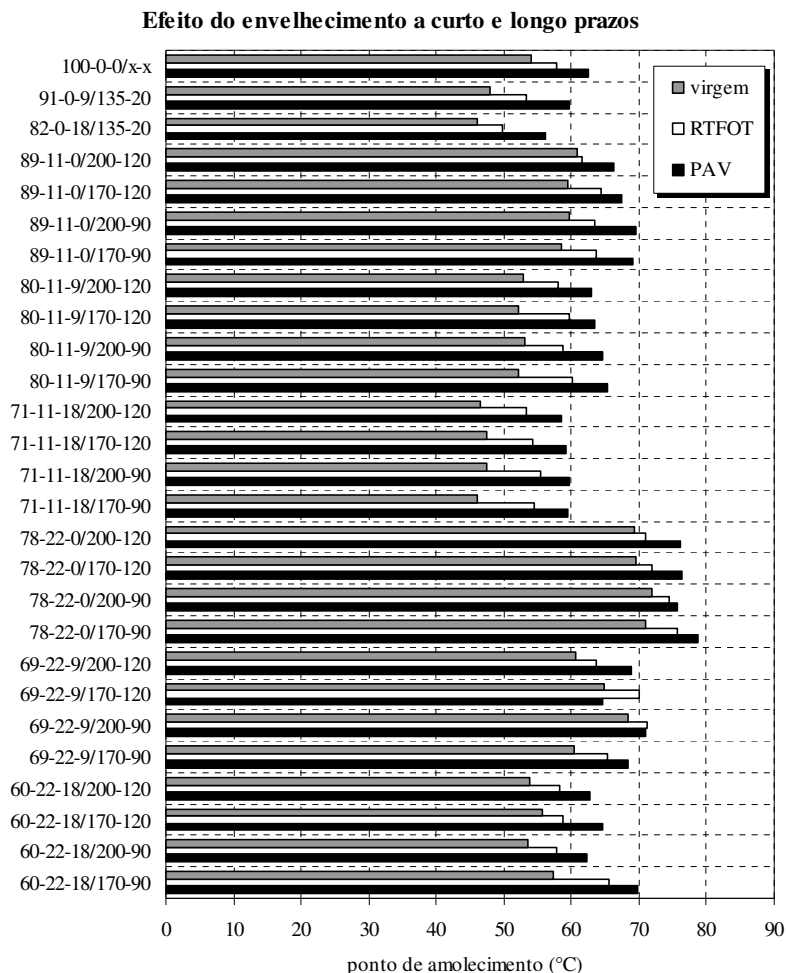


Figura 3: Ponto de amolecimento em amostras virgens e envelhecidas a curto e longo prazos

Com base na Figura 1, constata-se que, de forma geral, o envelhecimento a curto prazo provoca diminuição da penetração. O efeito do óleo se expressa no aumento da penetração das misturas asfalto-óleo e asfalto-borracha-óleo, tanto na condição virgem quanto na envelhecida. A borracha tende a reduzir a penetração nas misturas asfalto-borracha na condição virgem, porém, é verificado aumento da penetração com o aumento do teor de borracha em algumas misturas (89-11-0/200-90, 89-11-0/200-120 e 78-22-0/200-120). Após

envelhecimento a curto prazo, a tendência geral é de aumento da penetração com o aumento do teor de borracha. A interação asfalto-borracha-óleo tende a aumentar a penetração, tanto na condição virgem quanto na envelhecida a curto prazo; o aumento do teor de óleo tende a intensificar o efeito desta interação e o aumento do teor de borracha não apresenta uma influência clara, no caso das amostras virgens (há indícios de ponto de ótimo), e tende a intensificar o efeito desta interação, no caso das amostras envelhecidas a curto prazo.

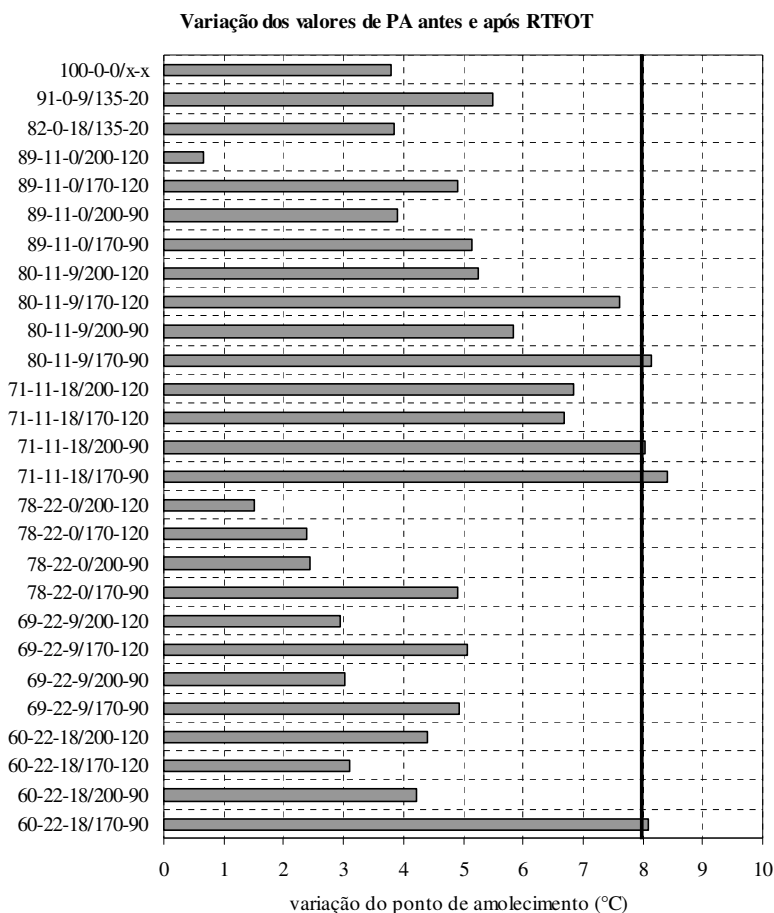


Figura 4: Variação do ponto de amolecimento antes e após RTFOT

Ainda com base na Figura 1, observa-se que as amostras que apresentam maiores teores de voláteis livres (amostras asfalto-óleo e as dos blocos 80-11-9 e 71-11-18) são mais sensíveis ao efeito do envelhecimento a curto prazo; as misturas mais consistentes (amostras dos blocos 89-11-0, 78-22-0, 69-22-9 e 60-22-18) por apresentarem menores teores de voláteis livres, são menos sensíveis ao envelhecimento, indicando benefício da presença da borracha. O óleo aumenta ligeiramente esta sensibilidade, especialmente no caso das amostras 69-22-9/170-90, 60-22-9/200-120 e 60-22-18/200-90. As demais misturas do bloco 60-22-18 surpreendem,

pois apresentam baixa sensibilidade ao efeito do envelhecimento, embora apresentem altos teores de óleo e de borracha. As amostras 78-22-0/170-90 e 78-22-0/170-200 são as únicas a apresentar aumento da penetração após o envelhecimento a curto prazo. Dentre as amostras virgens, apenas quatro misturas apresentam penetração abaixo da 100-0-0/x-x; dentre as envelhecidas, todas as amostras apresentam penetração igual ou maior que a 100-0-0/x-x, o que indica o efeito positivo dos modificadores sobre a consistência após o envelhecimento.

Observa-se, na Figura 2, que as misturas com 11% de borracha e a 91-0-9 são as mais próximas do limite de penetração retida de 50% ou 47%, dependendo do tipo de ligante, especificado pelo Regulamento Técnico ANP 01/92, Rev. 02, indicando o efeito expressivo do envelhecimento. Porém, todas as misturas se mantêm dentro destes limites, sugerindo que o envelhecimento não as compromete excessivamente. O óleo tende a reduzir a penetração retida, nas amostras asfalto-óleo e asfalto-borracha-óleo, porém, esta redução não é diretamente proporcional ao teor de óleo, em todos os casos. A borracha tende a aumentar a penetração retida, o que aumenta a resistência ao envelhecimento, porém, seu efeito é amenizado pelo óleo.

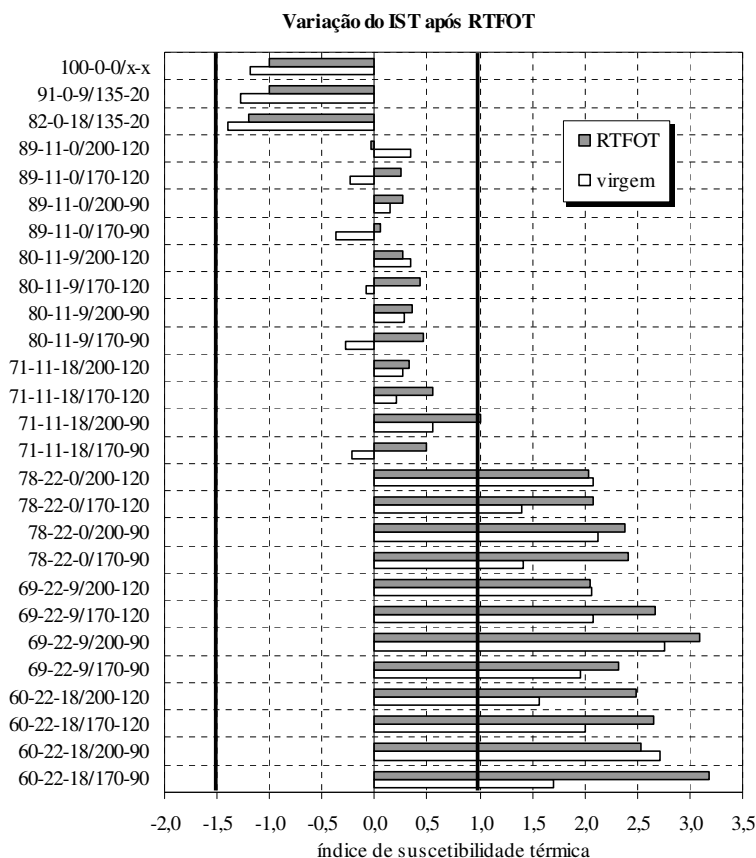


Figura 5: Comparativo de IST das amostras virgens e envelhecidas a curto prazo

Observa-se, na Figura 3, que o óleo reduz o ponto de amolecimento, tanto nas misturas asfalto-óleo, quanto nas misturas asfalto-borracha-óleo, nos três condicionamentos. A borracha tende a aumentar o ponto de amolecimento, nos três condicionamentos. A interação asfalto-borracha-óleo, nos teores praticáveis, promove aumento do ponto de amolecimento, cuja intensidade é produto da capacidade do óleo em reduzi-lo e da borracha em aumentá-lo. O óleo ameniza a ação da borracha em aumentar o ponto de amolecimento. O envelhecimento, em linhas gerais, provoca aumento do ponto de amolecimento, porém, as misturas mais consistentes são mais resistentes ao seu efeito. Nota-se, na Figura 4, que a grande maioria das misturas apresentou variação de ponto de amolecimento, após RTFOT, abaixo de 8°C, valor máximo recomendado pela norma europeia EN 12591-99. Na prática, todas as misturas atendem a esta especificação, uma vez que a variação máxima foi de 8,4°C.

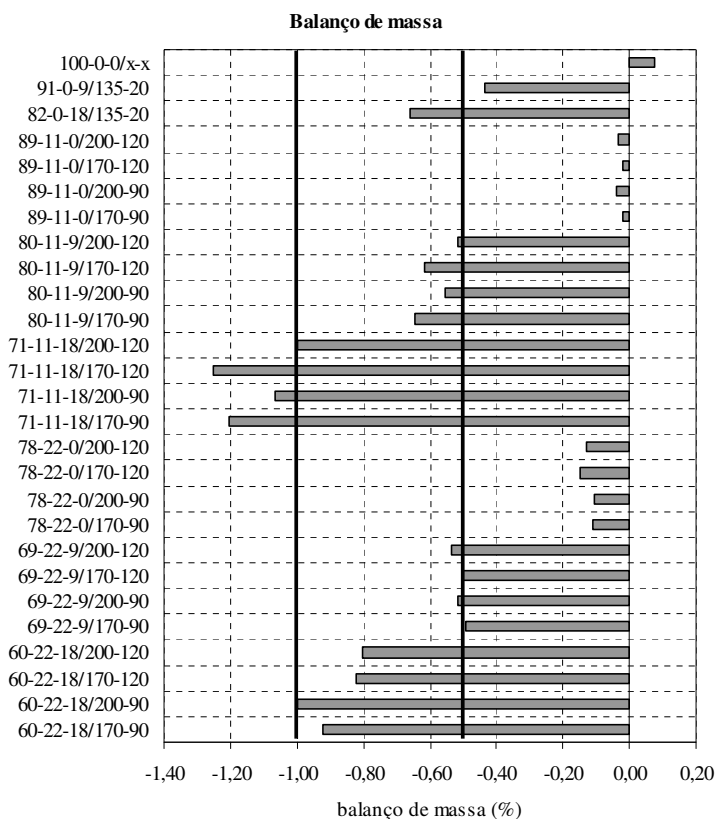


Figura 6: Comparativo do balanço de massa das amostras envelhecidas a curto prazo

Na Figura 5, verifica-se que o CAP puro e as misturas asfalto-óleo têm pior suscetibilidade térmica. As misturas asfalto-borracha e asfalto-borracha-óleo apresentam altos valores positivos de IST, indicando o efeito positivo destes modificadores. O óleo reduz o IST das misturas asfalto-óleo virgens e envelhecidas a curto prazo, no entanto, a borracha aumenta os valores de IST, nas duas condições. Na interação asfalto-borracha-óleo, o efeito da borracha

predomina, elevando IST, porém, algumas misturas indicam que o óleo contribui para o aumento do IST. Na maioria dos casos, o envelhecimento aumenta os valores de IST. As amostras com maior grau de modificação fornecem valores de IST acima dos limites (-1,5 e +1) especificados pelo Regulamento Técnico ANP 01/92, Rev. 02, tanto na condição virgem quanto na envelhecida. Porém, asfaltos modificados comumente apresentam valores altos de IST.

Como indicado na Figura 6, o CAP puro foi a única mistura a apresentar oxidação. Nas misturas asfalto-óleo, a perda de massa é proporcional ao teor de óleo. Nas misturas asfalto-borracha, a perda é proporcional ao teor de borracha, talvez em razão dos fenômenos de despolimerização e de desvulcanização, que podem ter ocorrido pelo aquecimento e pela agitação a alto cisalhamento. As amostras asfalto-borracha-óleo apresentam perda de massa com o aumento do teor de óleo, no entanto, o consumo de voláteis na incorporação de teores altos de borracha ao asfalto promove redução da perda. Apenas as misturas 100-0-0/x-x, 89-11-0 e 80-11-9 apresentam valores de perda de massa abaixo do limite de 0,5% e apenas as misturas 71-11-0 apresentam perda acima de 1%.

Por meio da seleção de um teor alto de borracha (22%), foi possível analisar o efeito do envelhecimento em amostras com alto grau de modificação. Porém, dificuldades surgiram durante a efetuação das práticas de envelhecimento nestas amostras, que, provavelmente, comprometeram a sua efetividade. A alta consistência, decorrente do alto teor de borracha e do grande consumo de voláteis na interação asfalto-borracha, não permitiu um espalhamento adequado do ligante nos recipientes do RTFOT e do PAV. Ocorreu aumento da espessura dos filmes asfálticos, diminuindo a superfície do ligante exposta aos agentes de envelhecimento. Por conta disto, o grau de envelhecimento destas amostras pode ter sido diferente das demais. É prudente avaliar os bons resultados obtidos com estas amostras com certa ressalva, embora não se possa descartar o efeito positivo do alto grau de modificação.

Não foi possível, por meio da análise qualitativa, estabelecer uma regra geral do efeito das variáveis de processo. Isto ocorre em virtude de alguns fatores: grande variedade de casos estudados, grande variabilidade de comportamento das misturas, complexidade das interações entre componentes e variáveis de processo, grande sensibilidade das interações aos efeitos das variáveis de processo, dificuldade de controlar os níveis das variáveis de processo e interferência de outras variáveis de processo, desconhecidas ou conhecidas e não passíveis de controle adequado.

7. CONCLUSÕES

O envelhecimento a curto prazo provocou, em linhas gerais, aumento do ponto de amolecimento, redução da penetração, aumento do índice de suscetibilidade térmica e impôs perda de massa a todas as misturas modificadas. Por sua vez, o envelhecimento a longo prazo também promoveu aumento do ponto de amolecimento.

A borracha tende a aumentar o ponto de amolecimento e o óleo a diminuí-lo, porém, combinações em que predominem o efeito da borracha provocam aumento do ponto de amolecimento. O aumento do ponto de amolecimento, proporcionado pelos modificadores, quando adequadamente combinados, e pelo envelhecimento, é positivo sobre a resistência à deformação permanente. Embora a borracha, na maioria das amostras virgens, reduza a penetração, certas combinações de borracha e óleo contribuem com o seu aumento. Após o envelhecimento, a borracha passa também a contribuir para diminuir a consistência dos

ligantes. Todas as amostras envelhecidas a curto prazo apresentam penetração maior que a do CAP puro, o que reforça o efeito positivo dos modificadores sobre a consistência dos ligantes após o envelhecimento. O efeito do envelhecimento e dos modificadores proporciona aumento do IST, o que contribui para a melhoria da suscetibilidade térmica dos ligantes.

O efeito negativo destes modificadores se manifesta nas misturas com baixa consistência. O envelhecimento é mais severo nas misturas com maior teor de voláteis livres, provocando redução da penetração retida e aumento da perda de massa. Porém, todas as amostras apresentam penetração retida superior e variação do ponto de amolecimento inferior aos limites das especificações para asfaltos convencionais. A maioria das misturas apresenta perda de massa inferior a 1%, com exceção das misturas 71-11-18, que são as menos consistentes.

Os modificadores, quando combinados em proporções adequadas, afetam positivamente as características avaliadas. O envelhecimento acentua o efeito positivo da interação asfalto-borracha-óleo sobre a penetração, o ponto de amolecimento e a suscetibilidade térmica. As perdas de massa, nos níveis obtidos, indicam que a adição dos modificadores não compromete excessivamente a consistência dos ligantes após o envelhecimento. Porém, todas as conclusões obtidas são parciais, pois representam o estudo isolado do ligante, por meio de um número limitado de ensaios de laboratório. Ensaios de cisalhamento dinâmico podem auxiliar no estabelecimento de conclusões mais consistentes e serão publicados posteriormente. Estudos de envelhecimento em misturas asfálticas também devem ser realizados, como um meio de tratar o assunto do envelhecimento de ligantes de forma mais próxima do que efetivamente ocorre no pavimento.

Agradecimentos

Os autores agradecem à SIX-Petrobras, pelo fornecimento do óleo de xisto, à Reduc-Petrobras, pelo fornecimento do asfalto, ao Cenpes-Petrobras pela disponibilização do laboratório para a preparação das amostras e realização dos ensaios, à Artgoma S.A. pelo fornecimento da borracha moída, ao professor John Cornell, da Universidade da Florida, Estados Unidos, pela orientação no delineamento do experimento e à FAPESP pela concessão de bolsa de doutorado ao primeiro autor.

BIBLIOGRAFIA

- Cornell, J. A. (1990) *Experiments with Mixtures: Design, Models, and the Analysis of Mixture Data*. 2nd. ed., John Wiley & Sons, New York.
- Such, C.; M. Ballié; B. Lombardi; F. Migliori; G. Ramond, J. Samanos e J. Simoncelli (1996) Susceptibilité au Vieillissement des Bitumes Bilan de l'Expérimentation sur Chantier Autoroutier. *Anais do 1º Eurasphalt & Eurobitume Congress*, Strasbourg, Alemanha, p. 1-13.
- Tonial, I. A. (2001) *Influência do Envelhecimento do Revestimento Asfáltico na Vida de Fadiga de Pavimentos*. Dissertação (Mestrado) - COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.
- Verhasselt, A. (1997) Possibilité d'Utilization de Podrettes de Caoutchouc dans les Liants Bitumineux. *Anais do Congrès Belge de la Route*, Brugge, Bélgica, p. 200-205.
- Whiteoak, D. (1990) *Shell Bitumen Handbook*, Inglaterra.

Endereço dos autores:

Adalberto Leandro Faxina (doutorando) e **Manoel Henrique Alba Sória** (professor associado)

Departamento de Transportes, EESC-USP, Av. Trabalhador São-carlense, 400, 13 560-970, São Carlos, SP, (16) 3373 9601, fax (16) 3373 9602, alfaxina@sc.usp.br e mane@sc.usp.br

Leni Figueiredo Mathias Leite (engenheira química e pesquisadora)

Centro de Pesquisas Leopoldo A. M.de Mello (Cenpes-Petrobras), Ilha do Fundão, Quadra 7, Cidade Universitária, 21 949-900, Rio de Janeiro, RJ, (21) 3865 6736, fax (21) 3865 6771, leniml@cenpes.petrobras.com.br

Creusa Sayuri Tahara (estatística e pós-doutoranda)

Departamento de Engenharia Mecânica, EESC-USP, Av. Trabalhador São-carlense, 400, 13 560-970, São Carlos, SP, (16) 3373 9432, fax (16) 3373 9402, tahara@sc.usp.br