

EFEITOS DA CAL HIDRATADA E DO ÁCIDO POLIFOSFÓRICO NA SUSCETIBILIDADE TÉRMICA DE MISTURAS ASFÁLTICAS DENSAS

Wilson Ricardo De Grande
Ana Paula Furlan
Antonio Carlos Gigante
Luis Miguel Gutierrez Klinsky
Glauco Tulio Pessa Fabbri
Departamento de Transportes
Escola de Engenharia de São Carlos
Universidade de São Paulo

RESUMO

A busca por misturas asfálticas menos suscetíveis à temperatura tem motivado pesquisas com uso de aditivos em misturas asfálticas e modificadores de asfalto. Nesse sentido, esta pesquisa avaliou a influência na susceptibilidade térmica de misturas asfálticas da adição de cal hidratada à mistura, em três teores, e do ácido polifosfórico ao ligante, também em três teores. Desse modo, o programa fatorial resultou em 9 condições experimentais com 4 réplicas para cada condição, ou seja, 36 corpos-de-prova, nos quais foi realizado o ensaio de módulo de resiliência em três temperaturas, 10, 25 e 40 °C. Para avaliar variações quanto à flexibilidade das misturas asfálticas, foram calculados a rigidez, a recuperação retardada e o atraso. Os valores de módulo de resiliência obtidos indicaram que adição do ácido polifosfórico ao ligante contribui para aumento de rigidez da mistura asfáltica, aliado a um aumento de sua flexibilidade; já a adição de cal à mistura praticamente não aumenta sua rigidez. Entretanto, o uso de ambos os aditivos pode ser vantajoso em certos teores e dadas temperaturas.

ABSTRACT

Additives and asphalt modifiers have been used by researchers in the search of mixes with lower thermal susceptibility. Therefore, this study evaluated the effects of the incorporation of hydrated lime at three levels and poliphosphoric acid, also at three levels, on the thermal susceptibility of asphalt mixes. So, the experimental program resulted in 9 experimental conditions with 4 replicates for each condition, or 36 specimens. The resilient modulus test was performed on specimens at three temperatures, 10, 25 e 40 °C and the delayed recuperation and the delay were evaluated, in order to analyze variations about asphalt mixes recuperation. The resulting values of the resilient modulus showed that the binder modification with poliphosphoric acid increased the mix stiffness and flexibility and it was also noted that the effect of lime addition to the mix has little influence on the mixture stiffness. However, the combination of both modifiers, in certain contents, can be interesting.

1. SUSCETIBILIDADE TÉRMICA DE MISTURAS ASFÁLTICAS

Fatores climáticos influem nas propriedades, no desempenho e na durabilidade do revestimento asfáltico e, dentre eles, a temperatura é um fator preponderante, uma vez que, como material termoplástico, o revestimento apresenta consistências diferentes em função da temperatura a qual é exposto. Na faixa de temperatura de serviço no Brasil, as misturas asfálticas apresentam comportamento visco-elástico, que podem proporcionar ao revestimento deformações permanentes como resposta às solicitações dinâmicas do tráfego.

Asfaltos altamente suscetíveis à temperatura exibem grandes variações de consistência (viscosidade, por exemplo), diante de pequenas variações de temperatura, causando nas misturas asfálticas a tendência de trincamento por retração ou por fadiga devida à exposição a baixas temperaturas e tendência à deformação permanente devida ao amolecimento quando expostas a temperaturas mais elevadas.

A susceptibilidade térmica é entendida a partir de uma taxa que expressa a mudança de uma propriedade associada à consistência em função da variação da temperatura

(Roberts *et al.*, 1991). O estudo da suscetibilidade térmica das misturas asfálticas tem enfocado, principalmente, características relacionadas à consistência do asfalto, como o Índice de Penetração, o Número Penetração-Viscosidade e a VTS (*Viscosity- Thermal Suscetibility*), por exemplo, entretanto, ao inferir a suscetibilidade térmica das misturas asfálticas a partir da do asfalto, pode-se estar preterindo respostas específicas de interações entre os materiais (King *et al.*, 1992).

Gigante (2007) considera que entender a suscetibilidade térmica das misturas asfálticas significa entender como o seu comportamento mecânico é alterado pela ação da temperatura e que a busca por misturas menos suscetíveis à temperatura está ligada à manutenção das propriedades mecânicas em níveis “seguros”, mesmo em condições de temperaturas mais altas; com esse intuito algumas pesquisas têm sido desenvolvidas a fim de avaliar as vantagens de materiais alternativos, tais como agentes modificadores de ligantes asfálticos e aditivos naturais e sintéticos (Taira *et al.*, 2003, Marques, 2004 e Gigante *et al.*, 2006, Pilati *et al.*, 2008).

Taira *et al.* (2003), avaliando a suscetibilidade térmica de misturas asfálticas densas com ligantes convencionais e modificados, concluíram que a temperatura exerce influência significativa nos valores de módulo de resiliência, assim como sua interação com o teor de ligante asfáltico da mistura. Além disso, os autores observaram que a adição do polímero SBS diminuiu a susceptibilidade térmica das misturas asfálticas, principalmente no intervalo de temperaturas próximo ao das de serviço.

No desenvolvimento de um critério de dosagem de mistura asfáltica utilizando o módulo de resiliência, Marques (2004) concluiu que a temperatura é o fator mais importante para a variação da rigidez das misturas asfálticas, e os outros fatores, em ordem decrescente de influência, foram a viscosidade, o teor de ligante e o tipo de compactação.

Gigante (2007) observou a influência de diversos fatores (tipo de agregado, tipo e teor de ligante) na suscetibilidade térmica. Os resultados indicaram que as misturas com CAP 40 apresentaram menor sensibilidade às temperaturas de serviço que as com CAP 20, e que nas temperaturas baixas, as misturas apresentaram comportamentos similares, com aumentos de rigidez semelhantes.

Pilati *et al.* (2008), estudando o módulo de resiliência de misturas compostas com ligantes modificados com borracha e óleo extensor, em três temperaturas, concluíram que o efeito da variação da temperatura foi o mais importante na redução da rigidez e que as misturas com ligantes com adição de resíduo de óleo de xisto (óleo extensor) apresentaram rigidezes menores que a com ligante convencional, sendo que a influência desse modificador na redução da rigidez é mais intensa com o aumento de sua concentração no ligante asfáltico. Contudo, a combinação da borracha com o óleo extensor pode ser mais vantajosa para intervalos de temperaturas específicos.

A interdependência dos efeitos dos fatores influentes nas características e propriedades das misturas asfálticas faz da sua dosagem uma tarefa muito complexa. Ao se selecionar um teor de asfalto, dito “ótimo” ou “de projeto”, espera-se que a mistura asfáltica apresente rigidez e flexibilidade, a fim de resistir às solicitações do tráfego sem acumular deformações plásticas, ofereça conforto e segurança ao rolamento e, se possível, por um período longo de tempo.

A busca por materiais que melhorem a qualidade das misturas asfálticas é uma preocupação recorrente na pavimentação, no intuito de conter ou evitar problemas associados à sua deterioração. Dentre as tentativas, estão a incorporação de aditivos e a modificação, de agregados ou ligantes, por agentes naturais ou sintéticos como, por exemplo, o pó-de-pedra, o cimento Portland, a cal, os agentes melhoradores de adesividade, os polímeros, a borracha moída de pneus, os óleos extensores, os modificadores ácidos, etc.

Nas misturas asfálticas, a adição de fíleres é uma das formas de modificação mais populares que se pratica, principalmente, em casos em que se dispõe de agregados que não produzem finos em quantidade suficiente para o enquadramento em dada faixa granulométrica, ou ainda, em substituição de areias finas muito arredondadas, cuja presença pode contribuir para a redução da resistência ao cisalhamento.

Os fíleres podem desempenhar diferentes papéis numa mistura asfáltica, um como material inerte, preenchendo os vazios entre as partículas de agregados graúdos, e outro como material ativo, interagindo físico-quimicamente com o asfalto. Em ambos os casos o fíler produz mudanças de propriedades volumétricas, mas a condição de fíler ativo implica mudanças das propriedades do asfalto efetivo (pela formação de mástique), das propriedades mecânicas e, conseqüentemente, do desempenho das misturas asfálticas.

Quando se altera a quantidade de fíler num mástique observam-se alterações de comportamentos e propriedades em intensidades particulares, mas que, de forma geral, tendem a contribuir para o enrijecimento dos mástiques, o que pode também reduzir a sua resistência à fadiga. Particularmente, fíleres de maior superfície específica potencializam a perda maior de resistência à fadiga do ligante asfáltico, e a cal hidratada é um bom exemplo deste comportamento.

Neste sentido, Leite e Motta (2002), avaliando parâmetros reológicos de mástiques produzidos com diferentes tipos de fíleres, observaram que a resistência à fadiga é afetada negativamente em comparação com a do ligante original, na medida em que se aumenta o teor de fíler, e que, dentre os fíleres estudados, o mástique com cal hidratada foi o que apresentou a menor resistência à fadiga. Contudo, a avaliação dos efeitos da cal em misturas asfálticas, normalmente considerada à luz do comportamento mecânico, tem mostrado que ela reduz o potencial do asfalto de se deformar em altas temperaturas, especialmente nos primeiros anos da vida útil da mistura asfáltica, quando esta é mais susceptível à deformação permanente, reduz sua tendência à oxidação, melhora a resistência à fadiga, além de ser um eficiente agente melhorador de adesividade (Majidzadeh e Brovold, 1968, Epps e Little, 2001; Sebaaly *et al.*, 2003, Hicks, 1991, Moura, 2001, Furlan *et al.*, 2008).

Diversos tipos de modificadores têm sido testados, como os polímeros, a borracha moída de pneus, asfaltita, óleos extensores, modificadores ácidos, etc. Tem sido observado que a modificação do asfalto por polímeros e/ou borracha gera um ganho expressivo de flexibilidade. O ácido polifosfórico é um produto novo, que vem sendo utilizado como agente melhorador de adesividade, catalisador para modificadores poliméricos de asfalto e, além disso, há indícios de que esse produto atue melhorando a susceptibilidade térmica dos CAP (Leite *et al.*, 2004).

Esse artigo apresenta uma contribuição para o entendimento dos efeitos de um aditivo e de um modificador de ligante asfáltico na suscetibilidade térmica de misturas asfálticas densas à luz de seu comportamento resiliente. Para isso, foi desenvolvido um planejamento fatorial que contemplou o estudo de misturas asfálticas com cal e/ou ácido polifosfórico a partir dos módulos de resiliência em temperaturas diferentes.

2. MATERIAIS

2.1. Agregados

Foram utilizados agregados britados de granito, fornecidos pela pedreira São Jerônimo, localizada em Valinhos, no estado de São Paulo. Os agregados foram manipulados e enquadrados na granulometria da Faixa Mix IV-B do *Asphalt Institute*.

2.2. Aditivo e modificador

As misturas com cal tiveram a adição de uma cal hidratada cálcica tipo CH1 (Supercal[®]) em substituição a parte do fíler da distribuição granulométrica adotada. Esta cal apresenta 72,69% de CaO e 0,48% de MgO.

O modificador utilizado nesta pesquisa é um ácido polifosfórico (Innovalt[®] E200) fornecido pela Innophos, localizada em Nashville, TN, EUA.

2.3 Asfalto

O ligante asfáltico utilizado é um CAP 50-70 fornecido pela Refinaria Henrique Lage (REVAP), localizada em São José dos Campos. A partir deste ligante asfáltico foram produzidos dois outros ligantes, um com 0,6% de ácido polifosfórico e outro com 1,2%, em peso. As curvas da viscosidade *versus* temperatura dos ligantes são apresentadas na Figura 1. Nela se pode observar que a adição do ácido polifosfórico (PPA) alterou a viscosidade do ligante asfáltico original (CAP 50-70), sendo seu efeito mais intenso com o aumento de sua concentração no ligante.

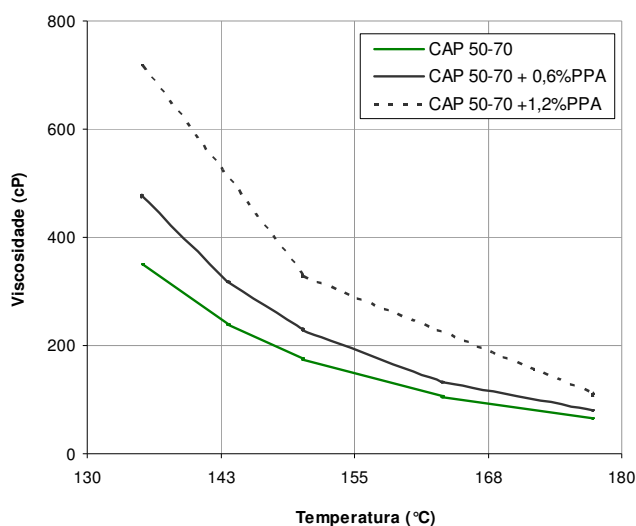


Figura 1: Características dos asfaltos

As temperaturas de usinagem e compactação (TUC) foram determinadas de acordo com a ASTM D 2493. A adoção da temperatura de usinagem observou a faixa de viscosidade de 150

a 190 cP e, para a compactação, 250 a 310 cP (ASTM D 4402). As temperaturas de trabalho dos três ligantes utilizados nesta pesquisa são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1: Características dos asfaltos

| Operação | Faixa de Viscosidade (cP) | Temperatura (°C) | | |
|-------------|---------------------------|----------------------|---------------------|---------------------|
| | | CAP 50-70 (CAP Puro) | CAP 50-70 + 0,6 PPA | CAP 50-70 + 1,2 PPA |
| Usinagem | 170±20 | 152 | 159 | 169 |
| Compactação | 280±30 | 140 | 146 | 156 |

A partir das TUC pode-se observar o impacto importante da adição do PPA, de modo que, em relação ao ligante asfáltico original, as temperaturas de usinagem e de compactação aumentaram em, aproximadamente, 6°C com a adição de 0,6% de PPA e 16°C para a adição de 1,2% de PPA, exibindo um aumento da ordem de 1,1 a 1,3 °C para cada 0,1% de PPA adicionado ao ligante asfáltico original.

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

Esta pesquisa estudou a influência de alguns fatores na susceptibilidade térmica de misturas asfálticas. Os fatores considerados foram o *aditivo*, cal hidratada, variando em três níveis e o *modificador*, ácido polifosfórico, variando em três níveis. Nesta configuração (3x3), o programa experimental resultou em nove condições experimentais com quatro réplicas para cada condição, ou seja, 36 corpos-de-prova que foram ensaiados em três temperaturas, resultando em 108 resultados de módulos de resiliência (MR).

O procedimento experimental envolveu as seguintes etapas:

- Caracterização e preparação dos ligantes asfálticos modificados, considerando duas concentrações de ácido polifosfórico (0,6 e 1,2%);
- Preparação da distribuição granulométrica dos agregados, com eventual substituição de pó-de-pedra por cal, em dois teores (1,5 ou 3,0%);
- Definição do teor de projeto das misturas asfálticas, conforme a metodologia Superpave[®], AASHTO T 312, para tráfego de médio a pesado (100 giros e Vv de 4%);
- Moldagem das réplicas para ensaio de determinação de módulo de resiliência (AASHTO TP 31) em três diferentes temperaturas (10, 25 e 40°C).

O ensaio de módulo de resiliência consistiu da aplicação de 100 ciclos de carregamento de magnitude fixa com 1,0s de duração, sendo cada ciclo constituído por um período carregamento de 0,1s e um período de repouso de 0,9s, com aquisição de 1000 leituras por ciclo. Como recomenda a norma ASTM D 7369, foi utilizado um aparato centralizador para a fixação do apoio do leitor de deslocamento (LVDT). A leitura de deslocamento foi feita somente na direção horizontal e, por isso, não foi possível determinar o coeficiente de Poisson, que adotado como sendo igual a 0,30. O cálculo dos valores dos módulos de resiliência total e instantâneo (MR_T e MR_I) obedeceram à recomendação dessa mesma norma.

Com o objetivo de observar variações quanto à recuperação das misturas asfálticas, em particular com relação ao emprego da cal e do ácido polifosfórico, foram calculados a recuperação retardada (RR) e o atraso. A RR corresponde à recuperação no período de descarregamento e é obtida como mostra as expressões 1, e expressa em porcentagem (Furlan *et al.*, 2006).

$$RR = \frac{(MR_i - MR_T)}{MR_i} \times 100 \quad RR = \frac{\frac{\sigma}{\epsilon_i} - \frac{\sigma}{\epsilon_T}}{\frac{\sigma}{\epsilon_i}} \times 100 = \frac{\frac{\epsilon_T - \epsilon_i}{\epsilon_T \epsilon_i}}{\frac{\epsilon_T - \epsilon_i}{\epsilon_T}} \times 100 = \frac{\epsilon_T - \epsilon_i}{\epsilon_T} \times 100 \quad (1)$$

Onde: MR_i = módulo instantâneo
 MR_t = módulo total
 σ = tensão aplicada
 ϵ_T = deformação total
 ϵ_i = deformação elástica instantânea

O outro parâmetro determinado é o *atraso*, que é a medida da defasagem (em segundos) entre os picos dos pulsos de carga e os de deslocamento. O atraso foi calculado com base na diferença de tempo entre o ponto de máximo de deslocamento e o tempo no ponto de carga máxima. Com os valores destes parâmetros tenta-se observar alterações na forma da recuperação resiliente e se um aumento do valor de MR implicou em misturas asfálticas mais elásticas.

4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A Tabela 2 apresenta os valores de MR, RR e atraso, em termos médios, para as condições experimentais testadas.

Observando-se os valores da Tabela 2, nota-se que a temperatura é o fator responsável pelo principal efeito da variação das propriedades avaliadas, seguido pelo *aditivo* e pelo *modificador*. Considerando a média de todas as condições experimentais, observa-se que na faixa de temperaturas de 10 a 25°C, a perda de rigidez foi mais severa que na faixa de 25 a 40°C, da ordem de 38 e 30%, respectivamente. Quanto aos parâmetros de rigidez, pode-se dizer que o aumento da temperatura causou o aumento tanto de RR quanto do Atraso, isto é, as misturas asfálticas, de forma geral, tendem a apresentar respostas mais lentas frente ao carregamento e ao descarregamento. Em termos médios, os valores de RR foram 13, 23 e 25% e do Atraso, 4,0, 4,4 e 4,8×10⁻²s para as temperaturas de 10, 25 e 40°C, respectivamente.

Tabela 2: Módulos de resiliência das misturas testadas a diferentes temperaturas

| Temperatura (° C) | 10 | | | 25 | | | 40 | | |
|---------------------------|-------------|-----------|--------------------------------|-------------|-----------|--------------------------------|-------------|-----------|--------------------------------|
| Propriedades | MR (MPa) | RR (%) | Atraso (10 ⁻² s) | MR (MPa) | RR (%) | Atraso (10 ⁻² s) | MR (MPa) | RR (%) | Atraso (10 ⁻² s) |
| CAP Puro | 16248 | 13.1 | 4.0 | 5087 | 26.4 | 4.6 | 1109 | 25.5 | 4.9 |
| CAP + 0,6% PPA | 16741 | 12.8 | 4.0 | 5948 | 22.0 | 4.4 | 2234 | 21.0 | 4.8 |
| CAP + 1,2% PPA | 17120 | 11.6 | 4.0 | 7850 | 18.1 | 4.4 | 2429 | 21.3 | 4.5 |
| CAP + 1,5% cal | 15771 | 13.4 | 4.0 | 5070 | 23.2 | 4.4 | 1394 | 27.5 | 4.9 |
| CAP + 3,0% cal | 15936 | 12.6 | 4.0 | 7013 | 22.5 | 4.4 | 2120 | 23.7 | 4.7 |
| CAP + 0,6% PPA + 1,5% cal | 16089 | 14.5 | 4.0 | 6355 | 24.0 | 4.5 | 1587 | 26.2 | 4.8 |
| CAP + 1,2% PPA + 1,5% cal | 14372 | 13.1 | 4.1 | 5714 | 23.1 | 4.5 | 1569 | 26.4 | 4.8 |
| CAP + 0,6% PPA + 3,0% cal | 13707 | 13.8 | 4.0 | 5765 | 26.6 | 4.6 | 1207 | 25.8 | 4.9 |
| CAP + 1,2% PPA + 3,0% cal | 17535 | 12.4 | 4.0 | 5788 | 20.7 | 4.3 | 2166 | 24.5 | 4.7 |

A mistura de referência (CAP Puro) apresentou as maiores perdas de rigidez em função do aumento da temperatura e os maiores ganhos nos parâmetros RR e Atraso.

Os valores de MR indicaram que a adição de PPA propicia aumento da rigidez e esse efeito é mais intenso com o incremento de sua concentração nas misturas asfálticas. A partir dos valores de RR e Atraso, nota-se que as misturas com PPA exibiram comportamento mais elástico, ou seja, houve redução desses parâmetros em função do aumento de MR resultante da redução da temperatura.

Para melhor visualização do comportamento da propriedade e dos parâmetros apresentados na Tabela 2, a Figura 2 apresenta os gráficos com os resultados de todos os corpos-de-prova ensaiados nas três temperaturas. O gráfico da Figura 2a apresenta os valores do módulo total versus o instantâneo e tem a finalidade de evidenciar a alta qualidade da relação entre eles, o que é propiciado pelo método de cálculo (ASTM D 7368). O gráfico da Figura 2b apresenta a tendência de comportamento da RR e do Atraso em função de MR, lembrando que a variação de seus valores absolutos é decorrente principalmente da variação da temperatura.

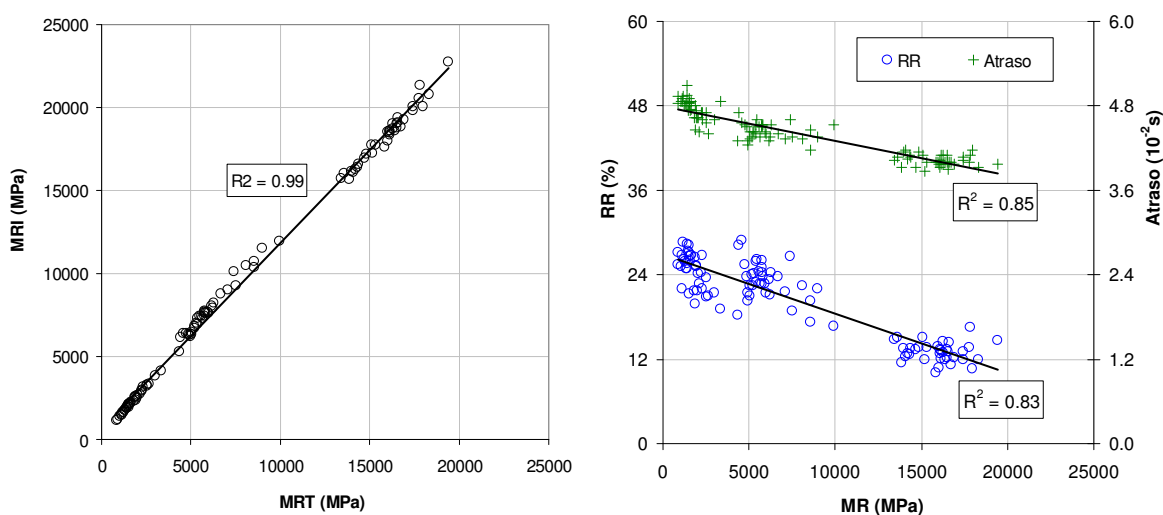


Figura 2: (a) Relação entre módulos instantâneo e total e (b) Comportamento dos parâmetros de rigidez em função de MR

A avaliação de resultados em termos médios confunde como cada mistura asfáltica sofre o efeito da temperatura, assim como as vantagens e desvantagens da adição e concentração de dado produto. Assim, é feita uma análise considerando o efeito de cada fator e sua interação. Esta análise contempla as curvas de MR e RR em diferentes temperaturas, ou seja, somente a resposta da mistura na fase de descarregamento. Para o entendimento do efeito da adição de cal na suscetibilidade térmica das misturas asfálticas, a Figura 3 apresenta as curvas de MR e RR das misturas com CAP Puro, CAP + 0,6% PPA e CAP + 1,2% PPA.

Nota-se que a rigidez das misturas aumenta com o aumento da concentração de PPA (0,6 para 1,2%), e esse aumento de rigidez é acompanhado por uma mudança na inclinação das curvas; há um achatamento da curva da mistura com CAP + 1,2% PPA, indicando que a influência da temperatura nessas misturas tem efeito praticamente constante no intervalo de 10 a 40°C, diferentemente do que ocorre na mistura com CAP + 0,6% PPA, que apresentou ganho de rigidez, mas manteve certo paralelismo com a curva de referência.

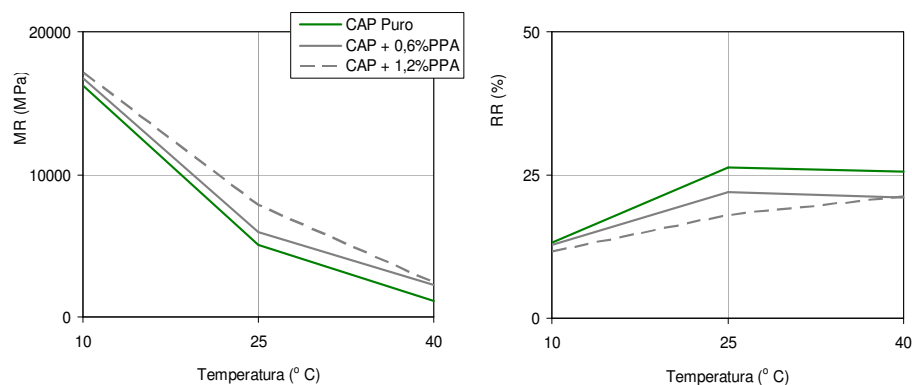


Figura 3: Efeito do PPA no MR e na RR em diferentes temperaturas

O comportamento das curvas de RR mostrado na Figura 3 concorda com o que se observou em termos de rigidez, uma vez que as misturas mais rígidas foram as que se apresentaram mais elásticas (redução de RR). Para ambas as concentrações de PPA adotadas, há redução do parâmetro RR. As misturas com PPA apresentaram os menores valores de RR dentre as testadas, atingindo valores próximos de 20% na temperatura de 40°C e uma variação de inclinação mais constante em todo o intervalo de temperatura; sendo assim, pode-se dizer que o PPA, nestas concentrações, contribuiu para a redução da suscetibilidade térmica das misturas asfálticas.

A Figura 4 apresenta as curvas de MR e RR *versus* temperatura para as misturas com cal e a mistura de referência. Nota-se que o efeito da adição de cal é particularmente dependente da temperatura e é menos intenso do que se observou nas misturas com adição de PPA. Contudo, em termos de rigidez, vale destacar que a mistura com CAP + 3,0% cal exibiu valores menores de MR que as outras misturas na temperatura de 10 °C, e que ambas as misturas com cal apresentam valores de MR que convergem para o da mistura de referência na temperatura de 40 °C.

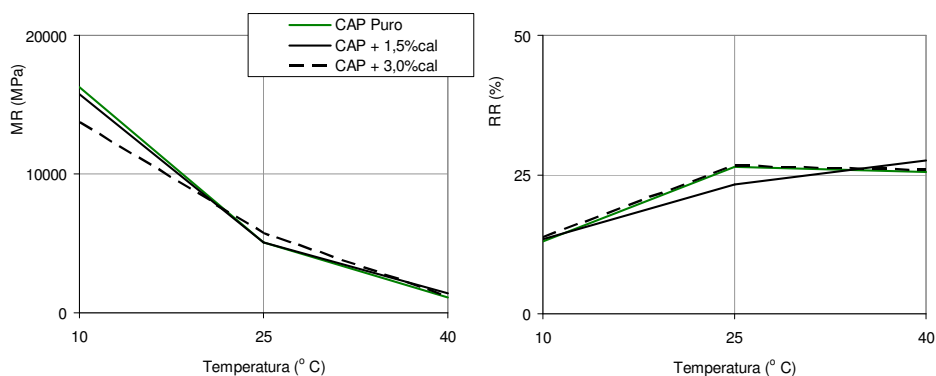


Figura 4: Efeito da cal no MR e na RR em diferentes temperaturas

Quanto à RR, percebe-se que há uma discreta tendência de redução desse parâmetro para a mistura com CAP + 1,5% cal e uma redução da sensibilidade desse parâmetro ao efeito da temperatura (dada pela mudança da inclinação da curva). Já a mistura com CAP + 3,0% cal exibiu uma manutenção dos valores desse parâmetro em relação à mistura de referência.

As tendências das curvas de MR e RR da mistura com cal sugerem três observações interessantes:

- a cal não propicia variação importante na rigidez da mistura asfáltica;
- o “achatamento” das curvas de MR e RR da mistura CAP + 1,2 % cal pode ser interpretado como uma redução da suscetibilidade térmica do material, principalmente nas temperaturas 10 a 25°C;
- a diferença entre tendências de comportamento apresentadas pela misturas com 1,5 e 3,0% de cal parece sinalizar uma concentração mais indicada (ponto ótimo) para faixas específicas de temperaturas.

Para visualizar o efeito combinado das misturas contendo PPA e cal, a Figura 5 apresenta os gráficos de MR e RR das misturas com CAP + 0,6% PPA e CAP + 1,2% PPA e as duas concentrações de cal (1,5 e 3,0%) em relação à mistura de referência. Com relação às misturas com CAP + 0,6% PPA + 1,5%cal, observa-se a predominância do efeito (mais intenso) da presença e do aumento da concentração de PPA expressa pelo aumento da rigidez e pela redução da RR e esse efeito é mais evidente na mistura com 3,0% de cal; já nas misturas com CAP + 1,2% PPA + 1,5%cal, o predomínio dos efeitos do PPA na rigidez e na RR foi mais discreto.

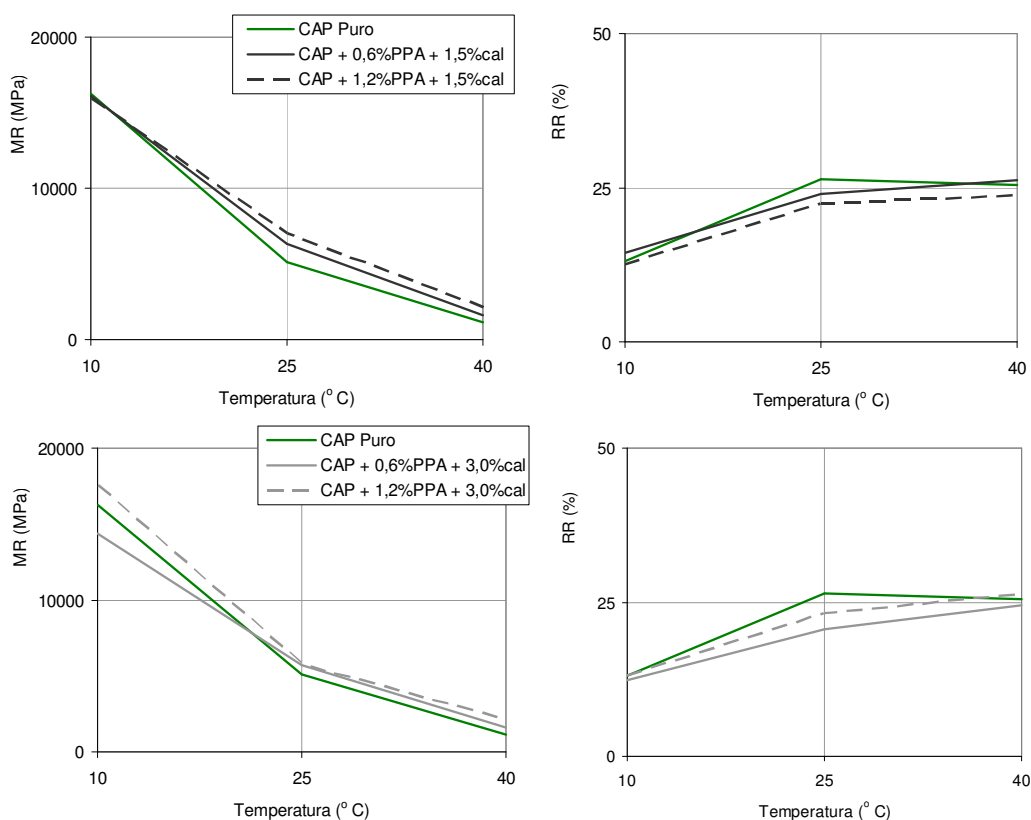


Figura 5: Efeito da interação entre o PPA e a cal no MR e na RR em diferentes temperaturas

A fim de se compreender melhor a influência da concentração dos modificadores no MR e na RR, as Figura 6 e 7 apresentam, respectivamente, as curvas de variação de MR e RR em função do aumento da concentração de cal e de PPA nas diferentes temperaturas. Este tipo de gráfico mostra a forma como cada modificador atua na rigidez e na recuperação da mistura

asfáltica. Da Figura 6 é possível dizer que o PPA propicia um incremento de rigidez nas misturas para todas as temperaturas testadas. Já a cal tende a imprimir um efeito mais discreto e, no caso da temperatura de 10°C, esse efeito é contrário, ou seja, o aumento da concentração de cal causa redução de MR. O distanciamento entre as curvas evidencia, mais uma vez, que a suscetibilidade térmica é maior na faixa de temperaturas mais amenas (de 10 a 25°C).

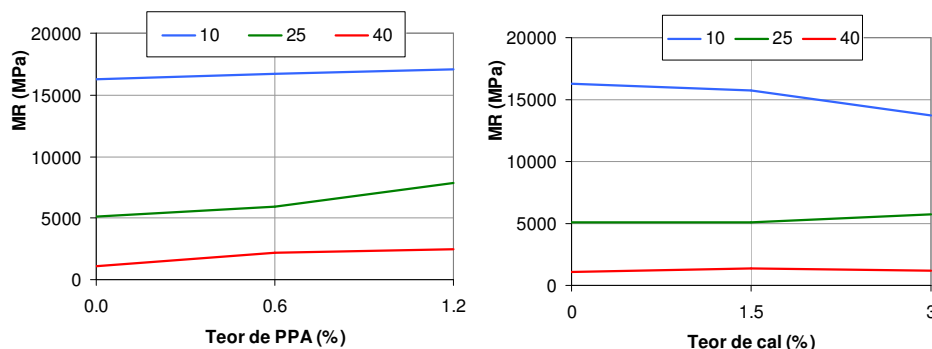


Figura 6: Efeito do aumento da concentração de cal e PPA no MR em diferentes temperaturas

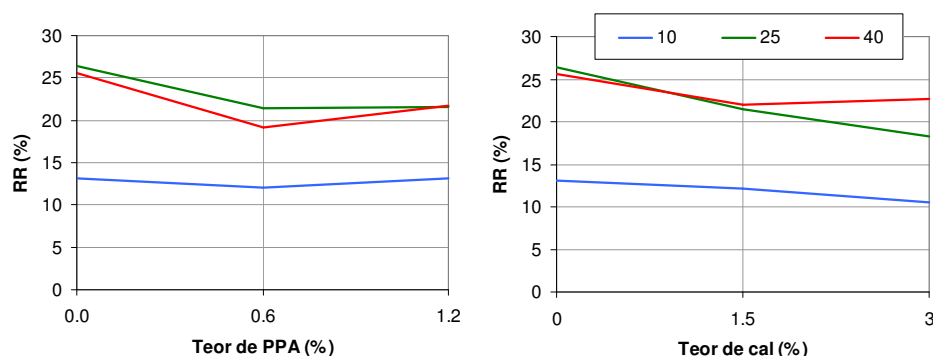


Figura 7: Efeito do aumento da concentração de cal e PPA na RR em diferentes temperaturas

Da figura 7, observa-se que a flexibilidade das misturas asfálticas pode ser melhorada com a adição de PPA, mas essa vantagem está associada a temperaturas entre 25 e 40°C e a um teor de, aproximadamente, 0,6%. No caso das misturas com cal, o aumento da sua concentração e a ocorrência do ganho de flexibilidade é mais dependente da temperatura, de tal forma que na faixa de temperatura de 10 a 25°C, independentemente do teor de cal adicionado, há um corresponde aumento de flexibilidade, enquanto que na faixa de 25 a 40°C, o efeito da adição de cal só se dá para teores de até 1,5%, sugerindo um teor máximo de cal a ser utilizado em misturas asfálticas.

5. CONCLUSÕES

Neste trabalho, foram avaliadas as influências da adição de cal à mistura asfáltica e da modificação do ligante asfáltico com ácido polifosfórico e suas interações na suscetibilidade térmica de misturas asfálticas densas. Foram monitorados os módulos de resiliência, calculados através protocolo do NCHRP, e a recuperação retardada, de nove misturas asfálticas, empregando ligantes asfálticos modificados com 0,6 e 1,2% de PPA e misturas asfálticas com 1,5 e 3,0 de cal.

De acordo com os dados analisados, podem-se fazer as seguintes considerações:

Quanto à rigidez das misturas asfálticas:

- independente do tipo de mistura, a variação da temperatura foi o fator mais importante na redução da rigidez;
- misturas com ligantes modificados com PPA apresentam rigidezes maiores que a com ligante convencional, sendo que a influência desse modificador na redução da rigidez é mais intensa com o aumento de sua concentração no ligante asfáltico;
- misturas com cal apresentam variações pequenas ou manutenção da rigidez da mistura com ligante convencional, exceto na temperatura de 10°C;
- a mistura com ligantes contendo concentrações, tanto de PPA quanto de cal, apresentam tendência de aumento de rigidez, com predomínio de efeito do PPA, ou seja, há aumento de rigidez das misturas asfálticas quando comparadas com a que contem ligante convencional.

Quanto à recuperação retardada das misturas asfálticas:

- o aumento da temperatura propicia o aumento da parcela visco-elástica na recuperação das misturas asfálticas;
- a adição de PPA torna a mistura mais flexível e esse efeito também se mostra dependente da concentração de modificador, uma vez que apresentam menores valores de recuperação retardada com o aumento de 0,6 para 1,2% de PPA
- a adição de cal tem efeito discreto sobre a flexibilidade das misturas, mas esse efeito pode ser potencializado com o uso de teores mais adequados (1,5%)
- as adições de cal e PPA reduziram os valores da recuperação retardada, sendo que a intensidade do efeito do PPA predomina sobre a da cal.

REFERÊNCIAS

- EPPS, J.A.; LITTLE, D.N. *The benefits of Hydrated Lime in Hot Mix Asphalt*. Prepared for National Lime Association. 2001. 48p.
- FURLAN, A.P.; GIGANTE, A.C.; FABBRI, G.T.P. Estudo comparativo do módulo de resiliência de misturas asfálticas densas determinado a partir dos procedimentos de cálculo da AASHTO e da NCHRP. *Anais do XX Congresso Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes*, Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes (ANPET), Brasília/DF, 2006
- FURLAN, A.P.; GIGANTE, A.C.; FABBRI, G.T.P.; BERNUCCI, L.L.B. *Considerações sobre o efeito da cal na resiliência de misturas asfálticas densas*. 19º Encontro de Asfalto, Rio de Janeiro. 2008.
- GIGANTE, A.C.; FURLAN, A.P.; FABBRI, G.T.P. *Avaliação da susceptibilidade térmica de misturas asfálticas densas à luz de seus comportamentos resilientes*. Anais do XX Congresso Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes, Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes (ANPET), Brasília/DF, 2006
- GIGANTE, A.C. *Avaliação da susceptibilidade térmica e do efeito das condições ambientais no enrijecimento de misturas asfálticas densas à luz de seus comportamentos resilientes*. Dissertação de mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos, p. 169. 2007.
- HICKS, G.H. Moisture damage in asphalt concrete- *National Cooperative of Highway Research Program (NCHRP)*, n. 175. 1991.
- KING, G.N.; KING, H.W.; HARDERS, O.; ARAND, W.; PLANCHE, P.P. Influence of Asphalt Grade and Polymer Concentration on the High Temperature Performance of Polymer Modified Asphalt. *Journal of Association of Asphalt Paving Technologists*, v. 61. 1992.
- LEITE, L.F.M.; MOTTA, L.M.G. Efeito do fíler nas características do ligante asfáltico. Anais do XVI Congresso Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes, Associação Nacional de Pesquisa em Transportes (ANPET), Rio de Janeiro. 2002.
- LEITE, L.F.M. *Efeito do ácido polifosfórico no desempenho dos ligantes*. XVIII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, Florianópolis. 2004.

- MAJIDZADEH, K. e BROVOLD, F.N. State of the art: Effect of water on bitumen-aggregate mixtures, *Highway Research Board*, Special Report No. 98, 77p., 1968.
- MARQUES, G.L.O. *Utilização do módulo de resiliência como critério de dosagem de mistura asfáltica; efeito da compactação por impacto e giratório*. Tese de doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ. 2004.
- MOURA, E. *Estudo do efeito de aditivos químicos e da cal como melhoradores de adesividade em misturas asfálticas densas*. Dissertação de mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP), 122p. São Paulo, 2001.
- PILATI, F.; FURLAN, A.P.; FAXINA, A.L., FABBRI, G.T.P.; GIGANTE, A.C.; *Estudo da flexibilidade de misturas asfálticas modificadas com asfalto-borracha e óleo extensor*. Anais do XXII Congresso Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes, Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes (ANPET), Brasília/DF, 2008
- ROBERTS, F.L., KANDHAL, P.S., BROWN, E.R., LEE, D.Y., KENNEDY, T.W. *Hot mix asphalt materials mixture design and construction*. NAPA Education Foundation. 1991
- SEBAALY, P.E.; TOHME, P.; HITTI, E.; STANSBURY, K.; EPPS, J. Asphalt concrete anti-stripping techniques. *Report No. SD 99-10-F. Department of Transportation – South Dakota*, 2003.
- TAIRA, C; FURLAN, A.P.; FABBRI, G.T.P. *Efeito do asfalto modificado com polímero nas propriedades mecânicas de misturas asfálticas densas*. Anais do XVII Congresso Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes, Associação Nacional de Pesquisa em Transportes (ANPET), Rio de Janeiro. 2003.

Wilson Ricardo De Grande, wilson.grande@usp.br

Ana Paula Furlan, afurlan@sc.usp.br,

Antonio Carlos Gigante, gigante@sc.usp.br

Luis Miguel Gutierrez Klinsky, chiligk@hotmail.com

Glauco Tulio Pessa Fabbri, glauco@sc.usp.br

Departamento de Transportes, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo.

Av. Trabalhador São-carlense, 400, Centro, São Carlos, SP.

CEP 13560-970, tel. (16) 3373 9609, fax (16) 3373 9602.