

# INFLUÊNCIA DO MODO DE PREPARO E DO TIPO DE FÍLER NAS PROPRIEDADES DE MISTURAS ASFÁLTICAS DENSAS

**Ana Paula Furlan**  
**Fabio Issao Iwanaga**  
**Antonio Carlos Gigante**  
**Glauco Tulio Pessa Fabbri**

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

## RESUMO

Este artigo apresenta uma contribuição para o entendimento da influência do modo de preparo de misturas asfálticas em algumas de suas propriedades. Para isso, foi desenvolvido um programa de experimentos considerando as seguintes variáveis: tipo de agregado (*basalto e granito*), tipo de asfalto (*CAP 20 e CAP 40*), tipo de filer (*pó-de-pedra e cal*) e modo de preparo de mistura (*Marshall, ASTM D 4867 e AASHTO T 283*). A avaliação dos efeitos dessas variáveis nas misturas asfálticas abrangeu a absorção, o módulo de resiliência, a resistência à tração, o desempenho à fadiga e a sensibilidade à água. Dentre outras constatações, os resultados indicam que os modos de preparo da *ASTM* e da *AASHTO* produziram melhoras nas propriedades mecânicas e de durabilidade e no desempenho à fadiga das misturas testadas. Além disso, foi possível observar que a cal necessita de período de tempo maior aliado a temperaturas mais altas para atuar melhorando as propriedades avaliadas.

## ABSTRACT

This paper presents a contribution to the comprehension of the influence of the preparing manner in some properties of hot mixture asphalt (*HMA*). An experiment was developed considering the following variables: type of aggregate (*basaltic and granitic*), type of asphalt cement (*CAP 20 and CAP 40*), type of filler (*dust and lime*) and preparing modes of aggregate-asphalt mixtures (*Marshall, ASTM D 4867 and AASHTO T 283*). The effects of variables were evaluated by means of absorption, resilient modulus, tensile strength, fatigue and water sensitivity. Among other observations, the results indicate that the preparing modes of *ASTM* and *AASHTO* produced *HMA* with better mechanical and durability properties and fatigue performance. Furthermore, it is possible to note that the lime requires longer periods of time and higher temperatures to act increasing the evaluated properties.

## 1. INTRODUÇÃO

Entende-se por vida de fadiga o número de aplicações de carga necessário para que uma mistura asfáltica atinja a ruptura sob dado estado de tensões; é a perda de resistência gradual de um material quando submetido a um esforço repetido. Nos revestimentos asfálticos, a fadiga se caracteriza pelo desenvolvimento de trincas devidas a deflexões reversíveis repetidas da estrutura do pavimento decorrentes da ação do tráfego.

O trincamento é o início da deterioração estrutural do pavimento; ele modifica o estado de tensões e de deformações do sistema e o seu desempenho, por isso é importante que já na fase do projeto seja considerada a caracterização dos materiais através de ensaios dinâmicos. Pesquisas sobre o comportamento dinâmico dos materiais empregados em pavimentação têm sido desenvolvidas com o objetivo de selecionar materiais mais adequados e, com isso, minimizar a incidência dos defeitos.

Além da seleção de materiais, outros fatores devem ser considerados, como o modo de preparo, pois sendo as misturas asfálticas suscetíveis à temperatura e ao envelhecimento, é imprescindível a compreensão da ação da exposição à temperatura e ao tempo. Esses agentes proporcionam mudanças nas características químicas, físicas e reológicas do asfalto. Assim, desde que se reconheceram as influências dos envelhecimentos em curto e em longo prazo nas propriedades das misturas, os procedimentos de produção de misturas asfálticas no laboratório têm recebido atenção especial e vêm tentando simular o que ocorre nas usinas e nos pavimentos em serviço; entretanto ainda não se encontrou um método representativo dessas condições.

A combinação dos efeitos do modo de preparo e das variáveis relacionadas aos materiais é capaz de potencializar mudanças significativas nas características e propriedades das misturas asfálticas. Nesse sentido, este artigo avalia a intensidade das mudanças nas propriedades proporcionadas por diferentes modos de preparo, considerando misturas compostas por diferentes tipos de agregado, filer e ligante. Trata-se de um estudo abrangente que toca, praticamente, em todas as propriedades das misturas asfálticas, exceto nas relacionadas à deformação permanente.

## 1. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os ligantes asfálticos são materiais termossensíveis, isto é, sua consistência depende da temperatura a qual está exposto. Essa característica faz com que se apresentem líquidos a altas temperaturas, permitindo que se misturem aos agregados, como ocorre na usinagem; e que apresentem comportamento visco-elástico em temperaturas próximas das de serviço, o que proporciona ao revestimento deformações resilientes em resposta às solicitações dinâmicas do tráfego.

Com o aumento do volume de tráfego, da carga por eixo e da pressão de pneus, muitos pavimentos têm apresentado falência prematura. Além disso, algumas técnicas de manutenção têm empregado misturas com espessuras delgadas compostas de ligantes mais consistentes que apresentam maior resistência à tração estática, maior módulo de resiliência e maior resistência à deformação permanente se comparadas a misturas de mesma distribuição granulométrica e asfaltos menos consistentes; contudo, essas misturas podem ser mais suscetíveis às trincas de fadiga (MARQUES, 2004; FURLAN, 2006).

Para Monismith *et al.* (1990), os principais fatores que afetam a fadiga de misturas asfálticas se relacionam às características dos materiais (tipo e teor de ligante e tipo e distribuição granulométrica do agregado), das misturas (volume de vazios) e à temperatura. Nos ensaios de fadiga à tensão controlada, a variação desses fatores que resultem num aumento da rigidez, consequentemente incidirá no aumento da vida de fadiga.

Leite *et al* (2000) acreditam que a relação “*módulo de resiliência / tensão de tração*” indica a flexibilidade da mistura e que, para uma mesma RT, relações da ordem de 3000 representam misturas flexíveis, mas com boa resistência à tração, permitindo o uso de camadas menos espessas para uma mesma vida de fadiga.

Outra medida relacionada ao desempenho à fadiga é a *relação filer-ligante (F/L)*, que é a relação entre as quantidades de filer passante na peneira 200 e do asfalto efetivo. Dependendo da quantidade e/ou de sua atividade, o filer pode contribuir para enrijecimento do mástique e para o aumento da compactação da mistura (e redução do índice de vazios), aumentando sua

rigidez, mas pode, em dada proporção, reduzir a vida de fadiga. O intervalo de  $F/L$  recomendado para curvas granulométricas abaixo da zona de restrição do Superpave é de 0,8 a 1,6. Há um teor de filer adequado para cada tipo de mistura, teor este dependente da distribuição granulométrica dos agregados e do filer. Quanto à granulometria do filer, recomenda-se que quanto mais fino o pó, mais baixo deve ser o valor desta relação (Magalhães, 2004).

Quando a cal hidratada é incorporada ao filer tem-se um efeito muito mais intenso em algumas propriedades das misturas asfálticas; esse efeito é atribuído à sua maior concentração nos mástiques devido à sua maior área superficial, pois 80% das suas partículas têm, em geral, tamanho menor ou igual a 20 $\mu$ m. Como consequência disso, em termos reológicos, há um enrijecimento do mástique e em alguns casos a redução resistência à fadiga (Leite & Motta, 2002)

A relação entre as propriedades dos agregados e o desempenho do pavimento também tem sido estudada por muitos pesquisadores. Para Richards *et al.* (1991), o melhor desempenho de uma mistura asfáltica é atribuído ao efeito combinado da forma cúbica e da textura rugosa dos agregados, em função da maior área superficial dos agregados rugosos, que favorece as ligações adesivas com o asfalto. Esses autores esclarecem que os agregados rugosos podem aumentar a resistência sobremaneira quando comparados aos lisos, mesmo exibindo a tendência de necessidade de uma quantidade adicional de asfalto para superar uma trabalhabilidade supostamente menor.

Kim *et al.* (1992) afirmaram que o tipo do agregado tem efeito significativo na resistência à fadiga de misturas asfálticas, demonstrando, à luz de ensaios de fadiga, a importância da ligação mecânica de melhor qualidade, o que foi observado em misturas compostas por agregados com textura rugosa. O plano de ruptura de corpos-de-prova compostos com agregados polidos apresentou descolamento do asfalto do agregado na interface dessa ligação, enquanto que as misturas asfálticas com agregados rugosos apresentaram agregados fraturados no plano de ruptura, evidenciando uma ligação adesiva mais resistente.

### 3. MATERIAIS

Um programa experimental foi desenvolvido para avaliar a influência de alguns fatores em propriedades mecânicas, de fadiga e de durabilidade de diferentes misturas asfálticas. O fator “*tipo de agregado*” (basalto e granito) pretendeu avaliar como suas características interferem nas propriedades das misturas. O “*tipo de ligante*” (CAP 20 ou CAP 50/60 e CAP 40 ou CAP 30/45) pretendeu responder se ligantes mais consistentes implicam em misturas asfálticas mais resistentes e duráveis. O fator “*tipo de filer*”, representado pela presença ou não de cal na mistura asfáltica, tentou responder se a cal melhorou propriedades relacionadas à resistência e à durabilidade. O “*modo de preparo*” da mistura refere-se à forma de produção da mistura asfáltica antes da sua compactação e buscou explicar como esse fator influencia nas características e propriedades das misturas. Essa combinação resultou em 18 misturas asfálticas empregadas em três programas de estudo que avaliaram a influência dos efeitos:

- do tipo de agregado, asfalto e do modo de preparo;
- da adição de cal em misturas preparadas de formas diferentes, o que foi feito a partir da avaliação de misturas com granito e CAP 20;
- da adição de cal para dois tipos de agregados para um mesmo modo de preparo (ASTM D 4867).

### 3.1. Agregados, fileres e ligantes

Para compor as misturas asfálticas foram utilizados agregados britados de basalto e granito, fornecidos pelas Pedreiras Bandeirantes e São Jerônimo, localizadas, respectivamente, nos municípios de São Carlos e Valinhos, no estado de São Paulo. Os agregados foram enquadrados no centro da faixa C do DNER ES 313/97. As misturas com cal tiveram a adição de uma cal hidratada cálcica tipo CH1 (Supercal®) em substituição de 1% do filer da distribuição granulométrica adotada.

Foram utilizados dois tipos de ligantes asfálticos fornecidos pelo Centro de Pesquisa e Desenvolvimento (Cenpes) da Petrobrás: um asfalto tipo CAP 20 (CAP 50/60) e outro tipo CAP 40 (CAP 30/45).

### 3.2. Métodos

Nesta pesquisa os teores de asfalto das misturas foram determinados a partir dos resultados de dosagens *Marshall* (ABNT NBR 12891/93) fixando-se como teor de projeto o correspondente ao volume de vazios igual a 4,0%. Desta forma, o teor de projeto foi definido em 5,5% para os dois ligantes. Foram determinadas as taxas de absorção de asfalto pelo agregado (ASTM D 2041), que foram utilizadas na correção dos teores de ligantes a fim de manter as características volumétricas das misturas semelhantes às obtidas da moldagem *Marshall*. Como as misturas apresentaram o mesmo teor de asfalto e a mesma faixa granulométrica, o valor da relação filer/ligante foi de 1,37 para todas as misturas testadas.

Para cada condição experimental foram moldados 14 corpos-de-prova, dos quais 3 foram utilizados para a determinação da resistência à tração, 8 para os ensaios de fadiga por compressão diametral que, aos pares, foram ensaiados em 4 diferentes níveis de tensão em relação à de ruptura estática, e 3 corpos-de-prova na avaliação do dano por umidade. O ensaio de módulo de resiliência (MR) foi executado em todos os corpos-de-prova.

Os ensaios para determinação das resistências à tração das misturas asfálticas foram realizados segundo o método DNER-ME 138/94, na temperatura de 25° C. Essas resistências definiram as cargas para os ensaios de módulo de resiliência e fadiga. Os ensaios de módulo de resiliência foram realizados a 25°C, utilizando um equipamento pneumático com aplicação de cargas cíclicas com período de carregamento de 0,1s e 0,9s de recuperação. O procedimento consistiu de um condicionamento composto de 30 ciclos de carregamento, seguido do ensaio com 70 ciclos de carregamento, ininterruptamente.

Os ensaios de fadiga foram executados à tensão controlada em quatro níveis de tensões equivalentes a 10, 20, 30 e 40% da resistência à tração. Os valores de deslocamento vertical acumulado no corpo-de-prova foram registrados em função do tempo, juntamente com as cargas aplicadas. O término do ensaio foi estabelecido para um deslocamento vertical acumulado (“deformação” vertical permanente) no corpo-de-prova igual a 6 mm, ou para sua ruptura completa, sendo registrado automaticamente o número de aplicações efetuadas.

Na avaliação da suscetibilidade ao dano por umidade foram utilizados os métodos *ASTM D 4867* e *AASHTO T 283*. Para o caso das misturas preparadas segundo o procedimento *Marshall*, com compactação imediatamente após a mistura, foi adotada a avaliação da *ASTM D 4867*. Em conformidade com as referidas normas, a saturação dos corpos-de-prova ficou entre 55 e 80% e, em seguida, procedeu-se o condicionamento térmico. O condicionamento térmico da *ASTM D 4867* consiste da imersão do corpo-de-prova em água

a 60°C por 24 horas. Para a AASHTO T 283, o condicionamento é composto por um ciclo de congelamento (-18°C por 16 horas) e um por um de descongelamento (imersão em água a 60°C por 24 horas).

#### 4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

##### 4.1. Absorção de asfalto pelo agregado

O efeito do *modo de preparo* na absorção de ligante pelo agregado foi avaliado a partir de ensaios Rice (ASTM D 2041). Na Tabela 1 são apresentados os resultados (em termos médios) para as condições testadas; nela se observa que variação das taxas de absorção:

- *Em função do tipo de agregado*: foi significativa para os agregados de basalto, mas não para os de granito. Isso pode ser explicado pelas porosidades dos agregados, que foram 2,2 e 0,6%, respectivamente;
- *Em função do tipo de ligante*: não foi significativa. Esse efeito pode ser entendido com auxílio das relações de temperatura *versus* viscosidade dos dois ligantes, ou seja, nas temperaturas trabalhadas as viscosidades são muito próximas, proporcionando um nível de absorção também muito próximo;
- *Em função do modo de preparo*: foi significativa, principalmente para os agregados de basalto. Esse comportamento depende da temperatura e do período de tempo a que as misturas são expostas. Assim sendo, a combinação de tempos maiores de exposição, temperaturas altas e a porosidade do agregado pode aumentar a tendência do ligante “fluir” através dos poros dos agregados.

**Tabela 1:** Absorção de asfalto pelos agregados para os três procedimentos de preparo de mistura

| Preparo da mistura | Basalto                            |              |        | Granito                            |              |        |
|--------------------|------------------------------------|--------------|--------|------------------------------------|--------------|--------|
|                    | Massa Esp.<br>(g/cm <sup>3</sup> ) | Absorção (%) |        | Massa Esp.<br>(g/cm <sup>3</sup> ) | Absorção (%) |        |
|                    |                                    | CAP 20       | CAP 40 |                                    | CAP 20       | CAP 40 |
| MARSHALL           | 2,808                              | 0,0          | 0,0    | 2,593                              | 0,0          | 0,0    |
| ASTM D 4867        |                                    | 0,6          | 0,6    |                                    | 0,1          | 0,2    |
| AASHTO T283        |                                    | 0,8          | 0,8    |                                    | 0,2          | 0,3    |

Partindo dessas observações e com o objetivo de manter as propriedades volumétricas compatíveis com as da dosagem *Marshall*, foi adotada uma correção no teor de asfalto baseada na taxa de absorção de cada modo de preparo; por exemplo, a mistura *BAS-CAP20-ASTM* exibiu uma taxa de absorção de 0,6%, então, a quantidade de CAP 20 adicionada na mistura foi de 5,5% mais 0,6%, resultando em 6,1% de asfalto em massa.

##### 4.2. Propriedades mecânicas

Na Tabela 2 são apresentados os resultados, em termos médios, dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral (RT), de módulo de resiliência (MR) e as relações MR/RT, para os diferentes tipos de preparo, com o intuito de se avaliar as tendências de variação dessas propriedades em função dos tipos de agregado, de asfalto e de filer utilizados nas misturas e do modo de preparo. Cabe ressaltar que a taxa de desvio dos resultados dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral para os grupos de corpos-de-prova foi inferior a 10%, apresentando valores de 4%, em média. Para os grupos destinados ao ensaio de módulo de resiliência, essas taxas foram em torno de 10%, em média.

Observando-se os dados da Tabela 2, pode-se dizer que o ensaio de *módulo de resiliência* conseguiu aferir o efeito das variáveis consideradas com exceção da variável *tipo de*

*agregado*, pois a intensidade das variações no MR proporcionadas pela mudança do tipo de agregado, de basalto para granito, não foram significativas (de 4 a 23%), podendo ser resultado do desvio do ensaio e da heterogeneidade do grupo de corpos-de-prova. Ainda assim, foi possível observar que as misturas com granito apresentaram MR sempre maiores que os das misturas com basalto, com exceção da mistura com granito e CAP 40 da condição *Marshall*, que apresentou módulo menor.

**Tabela 2:** Propriedades mecânicas das misturas asfálticas testadas

| Preparo  | Ligante      | Misturas com basalto |          |       | Misturas com granito |          |       |
|----------|--------------|----------------------|----------|-------|----------------------|----------|-------|
|          |              | MR (MPa)             | RT (MPa) | MR/RT | MR (MPa)             | RT (MPa) | MR/RT |
| MARSHALL | CAP 20       | 6670                 | 1,5      | 4447  | 7083                 | 1,8      | 4047  |
|          | CAP 20 + cal | 6211                 | 1,6      | 3834  | 7022                 | 1,6      | 4389  |
|          | CAP 40       | 11853                | 2,9      | 4073  | 11402                | 2,2      | 5183  |
| ASTM     | CAP 20       | 5862                 | 1,6      | 3619  | 7217                 | 1,7      | 4246  |
|          | CAP 20 + cal | 6971                 | 1,7      | 4149  | 7633                 | 1,6      | 4654  |
|          | CAP 40       | 13117                | 2,8      | 4652  | 15564                | 2,5      | 6225  |
| AASHTO   | CAP 20       | 4765                 | 1,5      | 3177  | 7123                 | 1,7      | 4291  |
|          | CAP 20 + cal | 6374                 | 1,4      | 4457  | 8472                 | 1,6      | 5262  |
|          | CAP 40       | 10340                | 2,3      | 4496  | 12890                | 2,3      | 5509  |

O efeito da variável *tipo de agregado* nos valores do MR é influenciado pela variável *modo de preparo*. As mudanças nos valores de MR aumentam em função do modo de preparo adotado, exibindo taxas de aumentos médios de 1, 21 e 37% para os preparos tipo *Marshall*, *ASTM* e *AASHTO*, respectivamente. Como se vê, o efeito da variável *tipo de agregado* é maior nas misturas *AASHTO* cujos valores dos módulos aumentaram em 49, 33 e 25% para as misturas com CAP 20, CAP 20 com cal e CAP 40, respectivamente.

O efeito da variável *tipo de ligante* permite avaliar o ganho de rigidez das misturas quando utilizado um CAP 20 ou um CAP 40. A variação do MR observada em função da mudança do CAP 20 para o CAP 40 foi significativa, aumentando os valores de MR de 60 a 120%. Uma vez mais, a intensidade das variações de MR sofre influência da forma como a mistura foi preparada; considerando a variação do MR em função da variação do tipo de ligante (CAP 20-CAP 40), as misturas *ASTM* exibiram maiores aumentos de rigidez, seguidas pelas misturas *AASHTO* e *Marshall*, devendo-se destacar que esses aumentos foram maiores nas misturas com agregados basálticos.

O efeito da variável *tipo de filer* foi avaliado a partir da adição de 1% de cal em substituição do filer mineral. A cal promoveu variações de intensidades diferentes, mas foi possível notar que a variação do MR em função da adição de cal foi menor para as misturas compostas por agregados graníticos. Quando preparadas segundo os procedimentos *Marshall*, a adição de cal não teve efeito significativo na variação dos valores de MR. Ao contrário, as misturas preparadas conforme *ASTM* e *AASHTO* exibiram uma tendência de ganho de rigidez, sendo que as *AASHTO* foram as que apresentaram maior ganho, 34% para as misturas com basalto e 19% para as misturas com granito. Aparentemente, o efeito da cal se destaca mais quando o preparo combina temperaturas diferenciadas e períodos mais longos de tempo de exposição.

O ensaio de *resistência à tração por compressão diametral* não se mostrou sensível aos efeitos das variáveis *tipo de agregado* e *tipo de filer*. Nesses dois casos, a variação de RT não foi significativa, apresentando valores inferiores a 10% e sem tendência clara de aumento ou

redução da propriedade. Somente as variáveis *tipo de ligante* e *modo de preparo* causaram variações de RT consideráveis.

A mudança do *tipo de ligante*, de CAP 20 para CAP 40, culminou em aumentos da RT da ordem de 75% nas misturas com basalto e de 38% nas misturas com granito. Contudo, esse aumento se dá de forma diferenciada em função do *modo de preparo*, sendo que as misturas basálticas exibem uma tendência de redução da RT para os modos de preparo *Marshall* e *ASTM para o AASHTO*. As misturas graníticas exibiram tendência de aumento de RT do modo *Marshall* para o *ASTM* e discreta redução de RT deste para o modo *AASHTO*, como observado para MR.

A *relação MR/RT* é um importante parâmetro na comparação de misturas asfálticas e indica que relações da ordem de 3000 representam materiais que são flexíveis enquanto possuem uma boa resistência à tração, com resistência à fadiga adequada. Avaliando-se MR/RT das misturas testadas foi notado que as misturas com granito exibiram, em geral, valores maiores desse parâmetro com exceção da mistura com CAP 20 tipo *Marshall*. Em termos médios, a variação de MR/RT para todas as misturas do grupo foi de 9% para as *Marshall*, 26% para as *ASTM* e 29% para as *AASHTO*.

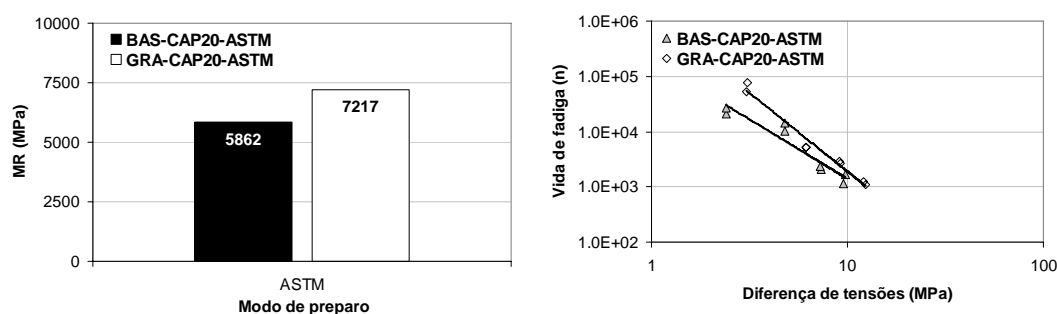
O efeito do *tipo de ligante* na relação MR/RT tem forma diferenciada para os diferentes *modos de preparo*. As misturas com basalto, por exemplo, apresentaram aumento do parâmetro de 28% para as *ASTM* e 42% para as *AASHTO*; já as misturas *Marshall* apresentaram redução de MR/RT de 8%. Nas misturas com granito a tendência de aumento de MR/RT é clara e concorda com o ganho de rigidez observado no MR, onde as misturas *ASTM* exibiram maior aumento, seguidas pelas misturas *AASHTO* e *Marshall*.

De forma similar ao observado no comportamento do MR, efeito do *tipo do filer* na relação MR/RT tem forma diferenciada em função do *modo de preparo*, tendo maiores valor e intensidade de aumento nas misturas tipo *AASHTO*, com ganhos de 40% nas misturas com basalto e de 23% nas misturas com granito. O efeito da cal no parâmetro MR/RT encontra na condição de preparo *Marshall* seus menores valores e uma tendência de redução nas misturas basálticas, particularmente.

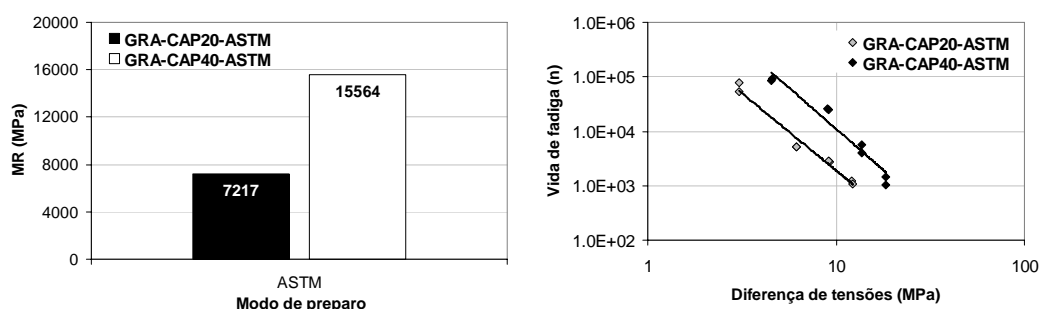
#### **4.3. MODELOS DE FADIGA**

A título de exemplo, a Figura 1 apresenta os valores dos módulos de resiliência e as curvas de fadiga das misturas com CAP 20 com os dois agregados testados. Nela se observa que o desempenho da mistura com granito foi superior ao da mistura com basalto, isso também foi observado para misturas com CAP 40. Esse comportamento pode ser explicado em função do MR das misturas com granito que, de forma geral, apresentou valores maiores que os das misturas basálticas. Nota-se também que as curvas se cruzam, sendo que as curvas mais inclinadas apresentam maior sensibilidade ao aumento das diferenças de tensões.

O ligante tipo CAP 40 teve efeito destacado no aumento das propriedades mecânicas das misturas, refletindo-se em maior desempenho à fadiga quando comparadas às com CAP 20, como mostra o exemplo das misturas graníticas *ASTM* da Figura 2. Em geral, misturas com mesmos agregado e modo de preparo, mas com diferentes ligantes, apresentaram curvas de fadiga paralelas para a maioria dos modos de preparo, excetuando as misturas *Marshall* com basalto.

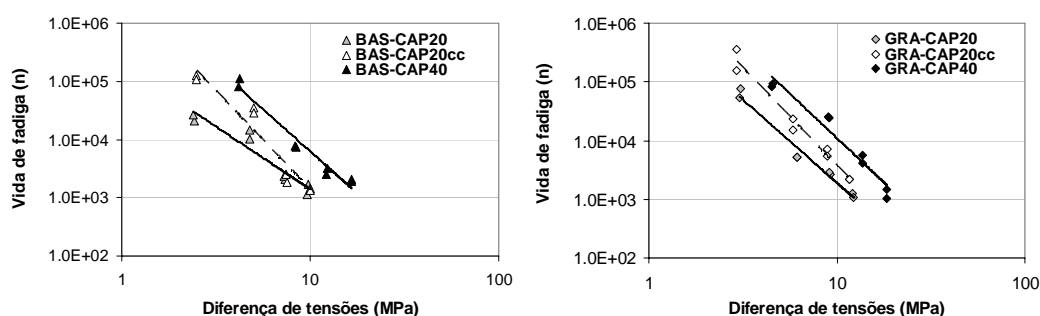


**Figura 1:** Módulos de resiliência e modelos de fadiga das misturas *ASTM* em função do tipo de agregado



**Figura 2:** Módulos de resiliência e modelos de fadiga das misturas *ASTM* em função do tipo de ligante

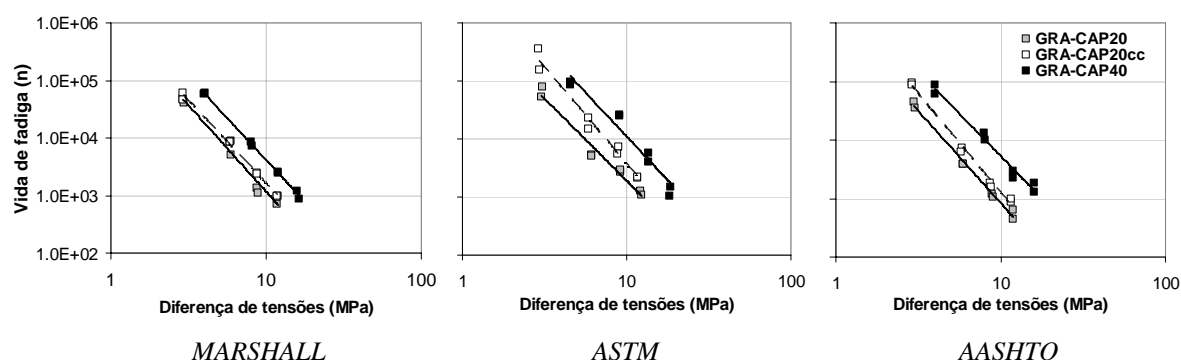
A figura 3 apresenta a representação dos modelos de fadiga para a observação do efeito do filer em função do tipo de agregado das misturas tipo *ASTM*. Pode-se notar para as misturas com os dois tipos de agregados que há uma tendência da cal melhorar seus desempenhos à fadiga, aproximando-se do comportamento e da inclinação das misturas com CAP 40.



**Figura 3:** Representação dos modelos de fadiga das misturas asfálticas preparadas conforme a *ASTM* em função da presença de cal

O efeito do tipo do filer em função do modo de preparo das misturas graníticas testadas pode ser observado na Figura 4, onde se nota que a cal atua de forma diferenciada. A mistura *Marshall* com cal, por exemplo, apresentou a menor variação de comportamento quando comparada à mistura sem cal. Já no caso das misturas *ASTM* e *AASHTO*, as misturas com cal mostraram desempenho superior, como observado a partir do aumento do número de ciclos, além disso, as curvas dessas misturas apresentam-se mais inclinadas, tendo no modo de preparo *ASTM* seu melhor desempenho.





**Figura 4:** Representação dos modelos de fadiga das misturas asfálticas com granito dos diferentes modos de preparo

## 5. AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO

Para avaliar as melhores misturas do ponto de vista de fadiga, e em que condições de preparo isso se deu, foi simulada uma estrutura de pavimento composta de revestimento, base, sub-base e reforço assentadas sobre o subleito. Optou-se por um pavimento invertido por se tratar de uma estrutura relativamente comum nas rodovias brasileiras e por caracterizar uma situação de grande incidência de fadiga nos revestimento asfálticos.

O pavimento foi previamente dimensionado pelo método do DNER (DNER, 1966) para um tráfego de  $10^7$  solicitações de eixos equivalentes, para o CBR do subleito igual a 5%; as espessuras obtidas para as camadas foram 10 cm para o revestimento e 10, 15 e 30 cm para base, sub-base e reforço respectivamente. Usando o programa ELSYM5 para as simulações, foram adotados módulos de resiliência iguais a 25 MPa para o subleito (referentes aos valores de CBR de 5%), 50 MPa para o reforço, 6000 MPa para a sub-base e 150 MPa para a base; para o revestimento foram utilizados os módulos de resiliência das misturas testadas. Os coeficientes de Poisson foram arbitrados em 0,35 para a capa asfáltica, e em 0,45 para a base, sub-base e subleito.

Das simulações foram extraídos os valores das diferenças de tensões e das deformações atuantes no revestimento e, com esses valores, foram calculadas, através dos modelos, as “vidas de fadiga” para o pavimento arbitrado. Esses resultados são apresentados na Tabela 4.

Observando-se a Tabela 3, comparando os resultados em função do tipo de agregado, nota-se que as misturas com basalto exibiram as maiores vidas de fadiga. Quanto ao tipo de ligante, nota-se que as misturas com CAP 40 apresentam, em geral, vidas de fadiga da ordem de 2 a 3 vezes maiores que as misturas com CAP 20, com exceção da mistura *Marshall* basáltica e da mistura *AASHTO* granítica.

A presença da cal como parte do filer aumentou sobremaneira a vida de fadiga das misturas *ASTM* com ambos os agregados, variando seu valor em 4 a 30 vezes. Se comparadas às misturas com CAP 40, as misturas *ASTM* com cal apresentaram N de 2 a 10 vezes maiores que as misturas com CAP 40. Na mistura *AASHTO* a adição de cal compatibilizou as vidas de fadiga de misturas com CAP 20 e cal e com CAP 40. Já a mistura *Marshall* foi pouco sensível à adição de cal.

Comparando-se os expoentes dos modelos para condições similares de diferenças de tensões, de certa forma, é possível inferir os melhores desempenhos a partir da regra quanto maior o valor do expoente maior a vida de fadiga “N”; por isso, guardadas as similaridades de módulo e de estrutura, é importante observar e comparar as inclinações dos modelos, uma vez que representam a suscetibilidade à diferença de tensões das misturas asfálticas.

**Tabela 3:** Modelos de fadiga, diferenças de tensões e “vidas de fadiga” do pavimento simulado em função dos tipos de agregados, asfaltos, filer e modo de preparo

| Misturas com basalto |              |   |                         |                      | Misturas com granito                    |                         |                      |
|----------------------|--------------|---|-------------------------|----------------------|---|-------------------------|----------------------|
| Preparo              | Ligante      | Modelo                                  | $\Delta\sigma$<br>(MPa) | N ( $\Delta\sigma$ ) | Modelo                                  | $\Delta\sigma$<br>(MPa) | N ( $\Delta\sigma$ ) |
| MARSHALL             | CAP 20       | $7 \times 10^6 (1/\Delta\sigma)^{3,79}$ | 1,43                    | 1.806.381            | $1 \times 10^6 (1/\Delta\sigma)^{3,00}$ | 1,47                    | 315.186              |
|                      | CAP 20 + cal |   |                         |                      | $1 \times 10^6 (1/\Delta\sigma)^{2,87}$ | 1,47                    | 331.246              |
|                      | CAP 40       | $1 \times 10^7 (1/\Delta\sigma)^{3,48}$ | 1,82                    | 1.245.942            | $3 \times 10^6 (1/\Delta\sigma)^{2,91}$ | 1,79                    | 552.626              |
| ASTM                 | CAP 20       | $1 \times 10^6 (1/\Delta\sigma)^{3,07}$ | 1,36                    | 388.874              | $1 \times 10^6 (1/\Delta\sigma)^{2,74}$ | 1,49                    | 334.954              |
|                      | CAP 20 + cal | $6 \times 10^7 (1/\Delta\sigma)^{4,78}$ | 1,46                    | 9.836.496            | $6 \times 10^6 (1/\Delta\sigma)^{3,22}$ | 1,51                    | 1.590.265            |
|                      | CAP 40       | $5 \times 10^6 (1/\Delta\sigma)^{2,91}$ | 1,89                    | 783.024              | $1 \times 10^7 (1/\Delta\sigma)^{3,42}$ | 2,03                    | 888.780              |
| AASHTO               | CAP 20       | $3 \times 10^6 (1/\Delta\sigma)^{3,67}$ | 1,26                    | 1.285.412            | $3 \times 10^6 (1/\Delta\sigma)^{3,37}$ | 1,48                    | 801.747              |
|                      | CAP 20 + cal |   |                         |                      | $3 \times 10^6 (1/\Delta\sigma)^{3,37}$ | 1,59                    | 629.852              |
|                      | CAP 40       | $2 \times 10^7 (1/\Delta\sigma)^{3,77}$ | 1,72                    | 2.582.986            | $4 \times 10^6 (1/\Delta\sigma)^{2,88}$ | 1,88                    | 647.354              |

Observação: os ensaios de fadiga das misturas basálticas e cal não foram realizados.

## 6. SUSCETIBILIDADE AO DANO POR UMIDADE

O estudo da suscetibilidade ao dano por umidade foi realizado com intuito de entender a melhora proporcionada pela cal na vida de fadiga das misturas em função adesão ou perda dela nas misturas testadas, identificando, por exemplo, as misturas mais sensíveis à ação da água (com ligações adesivas mais frágeis) e relacionando ao seu desempenho à fadiga.

A Tabela 4 apresenta as relações de resistências à tração (RRT), em termos médios, das misturas com CAP 20 e CAP 20 com cal. Os métodos adotados preconizam valores limites de RRT que definem as misturas como sensíveis à ação da água, que para a *ASTM D 4867* é 70%, e para a *AASHTO T 283*, 80%. Os resultados indicam que as misturas basálticas, tanto as convencionais quanto as com cal, foram bastante resistentes e estáveis à ação do condicionamento; usualmente esse comportamento é atribuído à boa adesão desenvolvida entre esse tipo de agregado e os ligantes asfálticos.

Já as misturas com granito sem cal apresentaram alguma redução da resistência à tração devida à ação do condicionamento. Na condição *AASHTO*, apresentou retenção de somente 43% da resistência à tração original após o condicionamento, sendo por isso considerada suscetível ao dano por umidade. Na condição *Marshall* a mistura apresentou RRT de 61% e, se fosse considerado limite de 70% da *ASTM D 4867*, essa mistura seria considerada sensível à umidade. Já a mistura *ASTM* não seria considerada sensível à umidade, pois apresentou variação de  $RRT \geq 70\%$ .

É importante destacar a importância do modo de preparo no desenvolvimento da adesão das misturas asfálticas com granito; o modo de preparo *Marshall* tornou a mistura suscetível à ação do condicionamento térmico da *ASTM*. A adição de cal nessas misturas foi responsável pela manutenção ou aumento de RRT após o condicionamento térmico.

Observando-se conjuntamente os valores de N e de RRT (Tabelas 3 e 4) pode-se dizer que a cal proporcionou a retenção de propriedades quando expostas a ação da água. Essa melhor

resistência ao descolamento da película asfáltica pela ação da água é uma particularidade da ligação adesiva desenvolvida entre agregado e asfalto que se refletiu nos resultados de fadiga.

Tabela 4: Relação de resistência à tração das misturas com CAP 20 e CAP 20 com cal

| Preparo  | Misturas com | Basalto | Granito |
|----------|--------------|---------|---------|
|          | Ligante      | RRT (%) | RRT (%) |
| MARSHALL | CAP 20       | 106     | 61      |
|          | CAP 20 + cal | 101     | 92      |
| ASTM     | CAP 20       | 97      | 82      |
|          | CAP 20 + cal | 98      | 114     |
| AASHTO   | CAP 20       | 107     | 43      |
|          | CAP 20 + cal | 101     | 103     |

A boa adesão das misturas com basalto observada nos ensaios de danos por umidade, refletiu-se em desempenhos superiores dessas misturas à fadiga quando comparadas às misturas graníticas. Com a adição de cal às misturas graníticas foi possível observar um aumento da vida de fadiga, exceto na mistura *AASHTO*.

## 7. CONCLUSÕES

O efeito do *tipo do agregado* nas propriedades mecânicas foi pouco significativo na variação do módulo de resiliência e da resistência à tração, entretanto na vida de fadiga fica claro o melhor desempenho das misturas basálticas em relação às graníticas para as condições de valores de módulo e estrutura de pavimento arbitrados neste estudo. Com a avaliação da suscetibilidade aos danos por umidade foi possível observar que as misturas com basalto apresentam menores perdas de resistência devidas à ação da água.

O efeito do *tipo do ligante* (de CAP 20 para CAP 40) foi significativo na variação de todas as propriedades mecânicas testadas, levando a ganhos de resistência e rigidez da ordem de 2 a 3 vezes, assim como aumentos das vidas de fadiga da mesma ordem.

O efeito do *tipo do fíler* (*sem cal e com cal*) foi significativo, mas atuou de forma diferenciada nas propriedades testadas em função do modo de preparo. A presença da cal aumentou a rigidez, mas não a resistência à tração das misturas, principalmente aquelas cujo modo de preparo combinou condições de tempo e temperatura variados como observado nas condições de preparo *AASHTO* e *ASTM*. Nesses casos o ganho de propriedade mecânica se refletiu no melhor desempenho das misturas à fadiga (exceto as misturas *AASHTO* com granito), além disso, em geral, as propriedades e vidas de fadiga das misturas CAP 20 e cal tendem a se aproximar das misturas com CAP 40, ou ainda, mostrando nos casos das misturas *ASTM*, desempenhos à fadiga superiores em 4 a 30 vezes.

O efeito da variável *modo de preparo* (*Marshall, ASTM, AASHTO*) foi importante na mudança de todas as propriedades medidas e, em alguns casos, foi decisivo para o ganho de resistência, rigidez e de vida de fadiga das misturas testadas. Na avaliação de desempenho, a condição de preparo *Marshall* foi a que levou aos menores valores de N, seguidas pelas misturas *AASHTO* e *ASTM*.

A avaliação dos danos por umidade permitiu relacionar indiretamente a adesão e a vida de fadiga das misturas testadas, e notar que a boa adesão dos basaltos com os asfaltos refletiu-se em desempenhos superiores à fadiga das misturas com este tipo de agregado. Contrariamente,

a adesão pobre do granito com o asfalto resultou em vidas de fadiga menores. Também sob o prisma da adesão, é razoável acreditar que a cal atue enrijecendo o mástique das misturas culminando no aumento das vidas de fadiga, o que só não foi observado nas misturas AASHTO com granito e mantendo, e/ou aumentando a resistência ao descolamento das misturas em consequência da ação da água.

O estudo da absorção de asfalto pelo agregado das diferentes misturas mostrou que a natureza do agregado foi importante na taxa de asfalto absorvida, indicando que agregados mais porosos podem ser mais absorventes que os menos porosos, para uma mesma consistência de ligante, e que o tipo do ligante pode não influenciar na absorção, já que nas temperaturas de trabalho as viscosidades dos asfaltos são muito próximas, levando a taxas de absorção próximas. Entretanto, dependendo da forma como a mistura agregado-asfalto for preparada, a absorção pode ser bastante influenciada e esse comportamento depende da combinação depende da temperatura e do período de tempo a que as misturas são expostas.

Ressalta-se que um dos propósitos desse trabalho foi comparar o desempenho de misturas asfálticas à luz de resultados de ensaios de laboratório e que, por conseguinte, os modelos não devem ser utilizados para a previsão da vida de fadiga de misturas em serviço, devido à ausência de fatores de ajuste laboratório / campo.

#### Referências

- AASHTO T 283. *Standard Method of Test Resistance of Compacted Bituminous Mixture to Moisture Induced Damage*. American Association of State Highway Transportation Officials, Washington, 1999.
- ABNT NB 12891. *Dosagem de Misturas Betuminosas pelo Método Marshall*, Associação Brasileira de Normas Técnicas Rio de Janeiro, 1993.
- ASTM D 4021, 1995. *Standard Test Method for Theoretical Maximum Specific Gravity and Density of Bituminous Paving Mixtures*. American Society for Testing and Materials, Philadelphia.
- ASTM D 4867. *Standard Test Method for Effect of Moisture on Asphalt Concrete Paving Mixtures*. American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1984.
- DNER ME 138, 1994. *Misturas Betuminosas – Determinação da Resistência à Tração por Compressão Diametral*. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Rio de Janeiro.
- KIM, Y. R., KHOSLA, N. P. KIM, N., 1992. *Effects of aggregate type and gradation on fatigue and permanent deformation of asphalt concrete*. Effects of Aggregates and Mineral Fillers on Asphalt Mixture Performance. Special Technical Publication STP 1147, American Society of Materials (ASTM), p. 310-328. Meininger, R. C., editor, Philadelphia.
- LEITE, L.F.M.; MOTTA, L.M.G., 2002. *O efeito do filler nas características do ligante asfáltico*. In: Anais do XVI Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes (ANPET), p. 183-194. Natal.
- MAGALHÃES, S. T., 2004. *Misturas asfálticas de módulo elevado para pavimentos de alto desempenho*. Tese de doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, 184 p.
- MARQUES, G.L.O., 2004. *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, Brasil.
- MONISMITH, C.L., DEACON, J.A., CRAUS, J., TANGELLA, S.C.S.R., 1990. *Summary report on fatigue response of asphalt mixtures*. Prepared for Strategic Highway Research Program, Project A-003-A. Institute of Transportation Studies, University of California, Berkeley, USA.

[afurlan@sc.usp.br](mailto:afurlan@sc.usp.br), [fabioiwanaga@yahoo.com.br](mailto:fabioiwanaga@yahoo.com.br), [gigante@sc.usp.br](mailto:gigante@sc.usp.br), [glauco@sc.usp.br](mailto:glauco@sc.usp.br)

Escola de Engenharia de São Carlos (STT-EESC-USP)

Av. Trabalhador São-carlense, 400, São Carlos, SP, CEP 13.560-970