

# **SIMULAÇÃO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE MISTURAS ASFÁLTICAS USANDO UM MODELO COMPUTACIONAL MULTI-ESCALA PARTE II: CARREGAMENTO CÍCLICO**

**Flávio Vasconcelos de Souza**

**Jorge Barbosa Soares**

Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes - PETRAN  
Universidade Federal do Ceará

## **RESUMO**

As misturas asfálticas, por serem heterogêneas, possuem comportamento global dependente do comportamento dos constituintes individuais, de suas frações volumétricas e de suas interações físico-químicas, dentre outros fatores. Assim sendo, o uso de metodologias capazes de considerar as características e fenômenos ocorrentes nas escalas menores pode possibilitar uma melhor compreensão do comportamento desses materiais. Os chamados modelos multi-escala, bastante estudados e aplicados na comunidade científica internacional, constituem uma metodologia baseada na micromecânica que pode facilitar tal compreensão. O objetivo do presente trabalho é usar um modelo computacional multi-escala na simulação do comportamento de uma mistura asfáltica sob carregamento cíclico. Os resultados numéricos mostram a capacidade do modelo em simular qualitativamente os fenômenos de trincamento por fadiga e acúmulo de deformações permanentes.

## **ABSTRACT**

Since asphalt mixtures are composite materials, their behavior is fundamentally determined by the local behavior of their constituents, their volume fraction and their physical-chemical interactions, among other factors. Thus, the use of methodologies that accurately consider the characteristics and phenomena that occur in smaller scales can provide a better understanding of the mechanical response of asphalt mixtures. The so-called multi-scale models, which have been studied in the international scientific community, are such a methodology. The aim of this paper is to simulate the mechanical behavior of an asphalt mix under cyclic loading using a computational multi-scale model. Numerical results show that the model can qualitatively simulate both fatigue cracking and accumulation of permanent deformations.

## **1. INTRODUÇÃO**

O uso de materiais compósitos, ou seja, materiais formados a partir da combinação de dois ou mais constituintes individuais, em aplicações estruturais tem crescido de forma significativa nos últimos anos, destacando-se as aplicações nos diversos ramos das engenharias aeroespacial, biomédica, civil e mecânica. Este uso crescente deve-se ao fato de que os materiais compósitos podem oferecer características estruturais ótimas para determinadas aplicações que seus constituintes não podem oferecer individualmente. Por exemplo, no caso dos materiais asfálticos, a combinação do ligante asfáltico com outros materiais, como a brita, a areia ou a cal, produz um novo material com características diferentes dos seus constituintes individuais.

Além disso, observa-se uma preocupação crescente em se minimizar o passivo ambiental provocado por certos materiais aparentemente inservíveis, os quais podem ser aproveitados como constituintes dos materiais asfálticos, como é o caso do asfalto-borracha e do aproveitamento de resíduo da construção civil (entulho) na fabricação de misturas asfálticas. Por outro lado, o acréscimo deste material inservível não deve piorar as características do novo material a ponto deste não poder ser aplicado em campo. Assim sendo, é preciso que se determinem quais os tipos de materiais inservíveis e suas frações volumétricas que podem ser incorporados de modo a não acarretar perdas no desempenho do novo material.

Dado que grande parte dos pavimentos nacionais utiliza revestimento asfáltico, as misturas asfálticas desempenham papel importante no desenvolvimento das regiões e do país. Embora o transporte rodoviário seja um dos principais modos de transporte de bens e passageiros do

Brasil, os pavimentos rodoviários encontram-se em estado de deterioração avançada. A última Pesquisa Rodoviária CNT (CNT, 2004), aponta para uma situação de elevado grau de deficiência nas condições das rodovias nacionais (74,7% da extensão pesquisada apresentaram algum grau de imperfeição, sendo que 23,7% apresentam condições ruins e 14,6% estão em péssimo estado), reduzindo de forma significativa os níveis de desempenho e de segurança do setor transportes, além de comprometer a integração com as demais modalidades, gerando restrições operacionais.

Dentre as principais causas da deterioração precoce dos pavimentos asfálticos, destacam-se o acúmulo excessivo de deformação permanente e o trincamento por fadiga, os quais estão relacionados a fenômenos inerentes às escalas menores. O trincamento está relacionado aos fenômenos de micro-fissuração na mistura asfáltica e concentração de tensões nas interfaces agregados-ligante, enquanto o desenvolvimento de deformações permanentes está associado à dissipação de energia provocada pelo comportamento viscoelástico do ligante e acúmulo de micro-trincas.

Visto que as misturas asfálticas se constituem da combinação de diversos constituintes individuais, o uso de metodologias capazes de considerar as características e fenômenos ocorrentes nas escalas menores, como os modelos multi-escala, pode possibilitar uma melhor visualização e compreensão dos mecanismos de evolução do dano (Yi *et al.*, 1998; Caiazzo e Costanzo, 2001; Haj-Ali e Muliana, 2004; Searcy, 2004; Souza, 2005).

O objetivo do presente trabalho é mostrar a capacidade de um modelo computacional multi-escala em simular os principais fatores de deterioração dos pavimentos asfálticos nacionais, quais sejam, o trincamento por fadiga e o acúmulo de deformações permanentes. Para tanto, simulou-se numericamente o ensaio de flexão em viga bi-apoiada submetida a carregamento cíclico. Por limitação computacional, consideram-se apenas duas escalas. O presente trabalho, o qual trata da simulação do comportamento mecânico de misturas asfálticas sob carregamento cíclico, é uma sequência de um outro artigo o qual aborda simulações sob carregamento monotônico (Souza e Soares, 2005).

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

O modelo computacional multi-escala para análise estrutural de misturas asfálticas apresentado em Souza (2005) se baseia fundamentalmente em quatro teorias, quais sejam: *i*) o Método dos Elementos Finitos (MEF), método numérico usado para implementação do modelo computacional; *ii*) a Teoria da Viscoelasticidade, modelo constitutivo usado para descrever o comportamento dos materiais asfálticos; *iii*) a Mecânica da Fratura, sendo o modelo de zona coesiva micromecânico viscoelástico (MZC-MV) desenvolvido por Allen e Searcy (2001) o modelo usado para simular a formação e propagação de trincas nos materiais asfálticos; e *iv*) as Teorias de Homogeneização, sendo os modelos multi-escala a teoria de homogeneização abordada. Visto que os modelos multi-escala são o foco principal deste trabalho, estes são brevemente revisados a seguir. Maiores detalhes sobre os modelos multi-escala e demais teorias, e algumas de suas principais referências podem ser encontrados em Souza (2005).

Os modelos multi-escala podem ser considerados uma classe das Teorias de Homogeneização, cuja filosofia de previsão do comportamento global do material difere da teoria de homogeneização clássica. Enquanto a teoria de homogeneização clássica procura determinar a relação constitutiva global e as propriedades homogeneizadas do material  $a$

*priori*, sendo a escala global analisada separadamente da escala local, os modelos multi-escala as determinam ao longo da análise global a partir da análise local, ou seja, as análises de ambas as escalas se dão concomitantemente. Em ambos os casos, as análises locais são realizadas sobre o chamado Elemento de Volume Representativo (EVR), o qual pode ser definido como o menor volume capaz de representar adequadamente o comportamento global do material (Allen, 2001).

Neste último caso, a escala global é analisada através de métodos comuns, porém, sempre que necessário, o comportamento constitutivo do material global é determinado através da solução explícita de um problema micromecânico e posterior homogeneização dos seus resultados através dos Princípios de Homogeneização (Caiazzo e Costanzo, 2000; Allen, 2001). Para o caso de a análise global ser realizada através do MEF, uma análise micromecânica correspondente deve ser realizada para cada ponto de integração pré-selecionado da malha de elementos (Caiazzo e Costanzo, 2000; Feyel e Chaboche, 2000).

Dentre as vantagens dos modelos multi-escala, destacam-se a visualização dos fenômenos físicos ocorrentes nas escalas menores durante a simulação da escala global (para a geometria e condições de carregamento específicos de cada problema estrutural) e a possibilidade de avaliação computacional do desempenho do material para diversas combinações e frações volumétricas dos constituintes individuais, sem a necessidade de realização de grandes quantidades de ensaios experimentais.

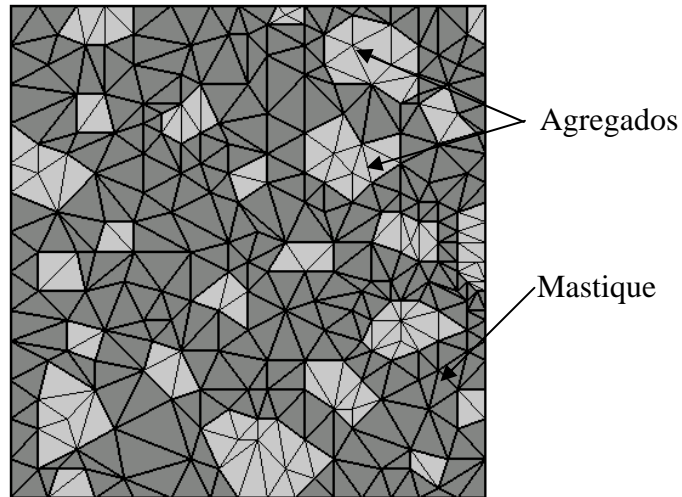
No entanto, os modelos multi-escala convencionais apresentam algumas limitações teóricas e computacionais. Do ponto de vista teórico, a principal limitação é a hipótese simplificadora de que o tamanho da escala local,  $\ell_{\text{local}}$ , é muito menor que o tamanho da escala global,  $\ell_{\text{global}}$  ( $\ell_{\text{local}} \ll \ell_{\text{global}}$ ). Esta hipótese exclui o tamanho da escala local do conjunto de variáveis do modelo e, conseqüentemente, impossibilita a modelagem do chamado efeito de tamanho (*size effect*) (Bazant e Planas, 1998) e da localização de deformações (alto gradiente de deformações) na escala global (Kouznetsova, 2002).

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

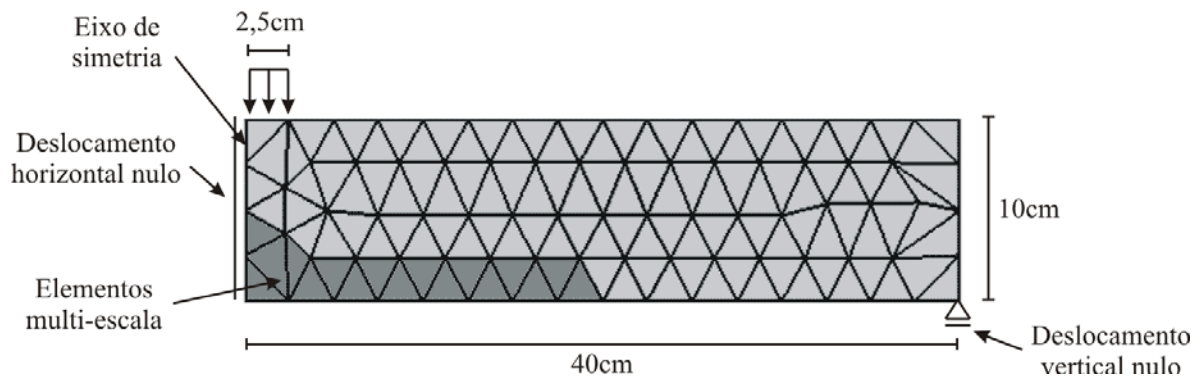
No presente trabalho, embora a simulação numérica seja ilustrativa, não havendo comparação com resultados experimentais, as propriedades dos materiais usadas como dados de entrada no programa multi-escala foram obtidas experimentalmente. Os materiais usados, suas propriedades constitutivas e a metodologia adotada na confecção dos corpos de prova, na obtenção das propriedades constitutivas, na determinação do EVR e na geração das malhas de elementos finitos podem ser encontrados resumidamente na primeira parte deste trabalho (Souza e Soares, 2005) e de forma mais completa em Souza (2005).

A Figura 1 mostra a malha de elementos finitos com elementos de interface (linhas mais espessas) usada para o EVR. Note-se que há elementos de interface entre todos os elementos da matriz viscoelástica (mastique) e nas interfaces mastique-agregados.

Nas simulações realizadas no presente trabalho, utilizaram-se duas malhas para o problema global, uma sem elementos de interface e outra com elementos de interface dispostos ao longo de toda a malha, mantendo-se em ambos os casos a mesma geometria e número de elementos T3. A Figura 2 mostra a geometria do problema e a malha usada, a qual possui 126 elementos T3, 338 elementos de interface (entre os elementos T3) e 17 elementos multi-escala (em destaque).



**Figura 1:** Malha de elementos finitos com elementos de interface para o EVR



**Figura 2:** Malha usada nas simulações em viga com elementos de interface

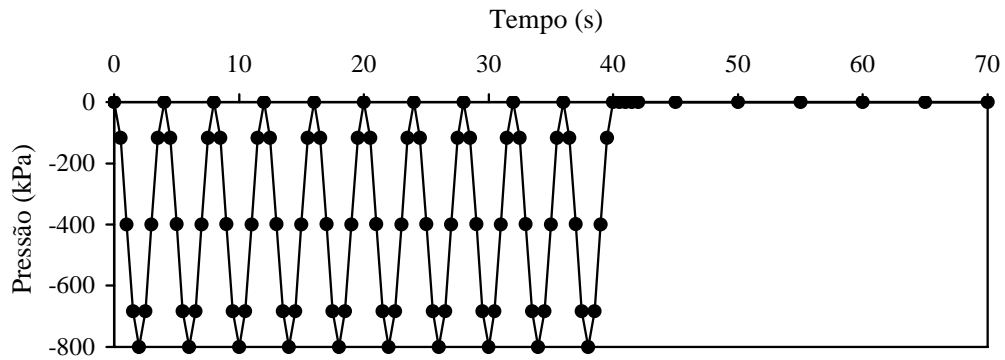
Note-se que, objetivando reduzir o esforço computacional, a análise multi-escala é realizada apenas nos elementos mais suscetíveis à evolução do dano. Também com o objetivo de reduzir o esforço computacional e dada a simetria do problema, apenas metade da viga foi modelada.

Vale ressaltar que foram inseridos elementos de interface ao longo de toda a malha da viga (exceto no contorno da viga) para ilustrar a evolução simultânea do dano tanto na escala local como na escala global. Além disso, é importante salientar que as simulações em viga são apenas ilustrativas, uma vez que não foram realizados ensaios experimentais em viga, sendo o objetivo destas simulações mostrar a capacidade do modelo em simular os fenômenos de acúmulo de deformação permanente e de trincamento por fadiga.

#### **4. SIMULAÇÃO DE CARREGAMENTO CÍCLICO DE FLEXÃO EM VIGA**

O objetivo das simulações em viga é ilustrar a capacidade do modelo multi-escala em simular os fenômenos de deformação permanente e de trincamento por fadiga, os quais constituem os principais tipos de falha observados nos pavimentos asfálticos. Para todas as simulações em viga, considerou-se o estado plano de tensão. O carregamento cíclico semi-senoidal (hipotético) constitui-se de dez ciclos com pico de 800kPa e período de 4s seguidos de um

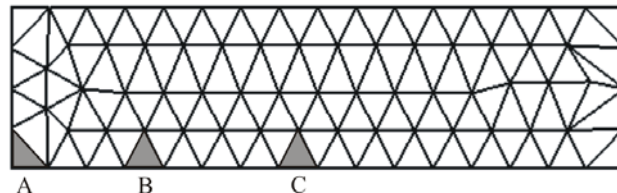
intervalo de repouso de 30s (Figura 3). O incremento de tempo usado nas simulações numéricas foi de 0,5s.



**Figura 3:** Carregamento usado nas simulações em viga

Basicamente, duas situações distintas foram consideradas. Na primeira (situação 1) não se considerou a evolução do dano para ambas as escalas global e local, mas todos os elementos T3 que constituem a viga foram considerados multi-escala. O intuito é modelar a deformação permanente produzida pelo comportamento viscoelástico do mastique.

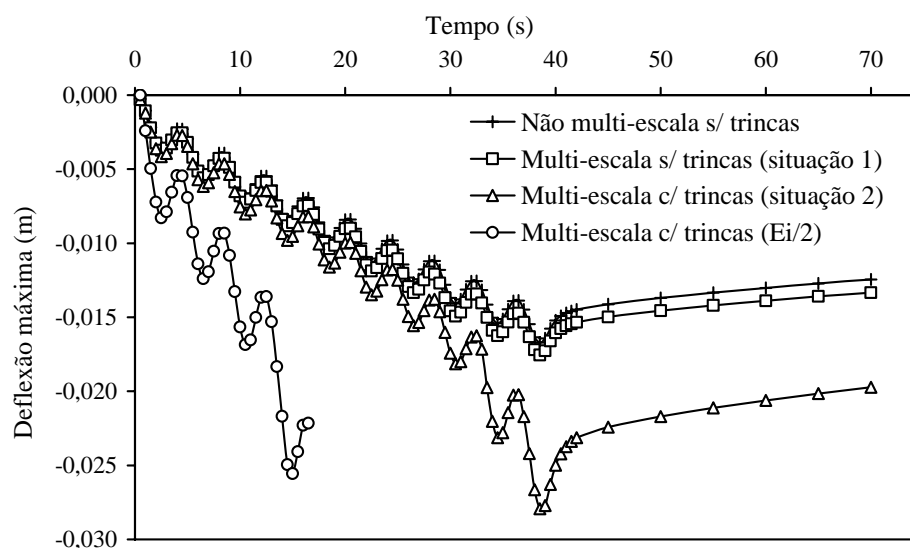
Na segunda análise (situação 2), considerou-se a evolução do dano na forma de trincas em ambas as escalas através de elementos de interface dispostos ao longo das malhas de elementos finitos. Neste caso, apenas os elementos mais solicitados foram considerados multi-escala, conforme mostra a Figura 2. Dentre os elementos multi-escala mostrados na Figura 2, escolheram-se três elementos em regiões distintamente solicitadas para analisar-se suas respectivas estruturas locais (Figura 4).



**Figura 4:** Elementos multi-escala escolhidos para a análise da estrutura local

A Figura 5 apresenta o histórico da deflexão máxima observada abaixo do carregamento no centro da viga para os casos analisados. A Figura 5 mostra ainda os resultados para o caso de um mastique hipotético menos consistente, com módulo de relaxação duas vezes menor que o mastique original, ou seja, sendo os coeficientes  $E_i$ 's da série de Prony do mastique original divididos por dois ( $E_i/2$ ). Os resultados obtidos para este mastique hipotético serão discutidos mais adiante.

Note-se que a Figura 5 também mostra a deflexão máxima para o caso onde nenhum elemento é considerado multi-escala, sendo o comportamento constitutivo destes regido pelo módulo de relaxação determinado numericamente para a AAUQ. Observe que os resultados deste caso se mostraram em concordância com os resultados obtidos para a situação 1.

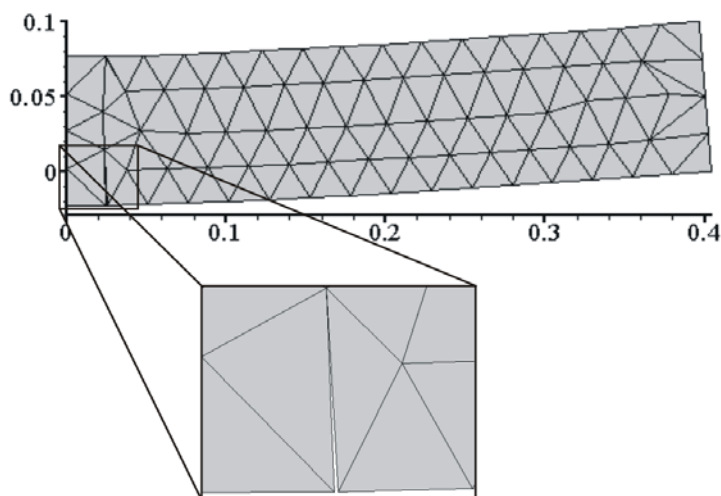


**Figura 5:** Histórico da deflexão máxima no centro da viga

Note-se ainda que, devido ao comportamento viscoelástico do mastique e, conseqüentemente, da AAUQ, existe uma defasagem no tempo das deflexões com relação ao carregamento aplicado. No caso desta simulação, os picos da deflexão máxima ocorreram 0,5s após os picos do carregamento aplicado.

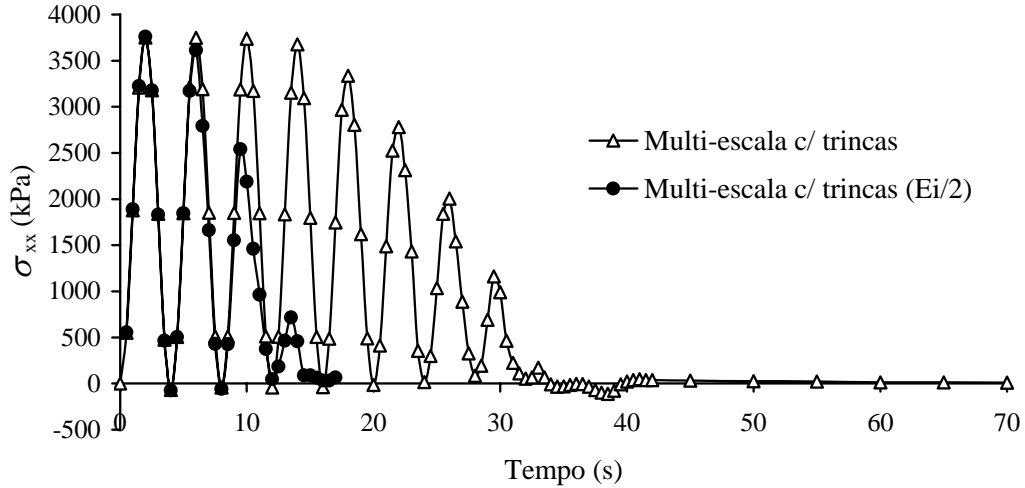
A partir da análise multi-escala sem a consideração da propagação de trincas, pode-se perceber o acúmulo de deformações permanentes provocado pelo comportamento viscoelástico do mastique. Note-se que, embora se acumulem deformações permanentes, a amplitude da deflexão se mantém constante para todos os ciclos.

Para o caso com trincas em ambas as escalas, observam-se deflexões maiores, conforme a Figura 5, provocadas inicialmente pela redução da rigidez na escala local (micro-trincas) e, posteriormente, pela redução da rigidez na escala global (macro-trincas). Note-se, a partir da Figura 5, que há um aumento brusco na amplitude das deflexões no nono ciclo, o qual é produzido pela propagação de uma trinca na escala global, conforme mostra a Figura 6.



**Figura 6:** Configuração da viga para o caso multi-escala com trincas em ambas as escalas em  $t = 34,5$  s

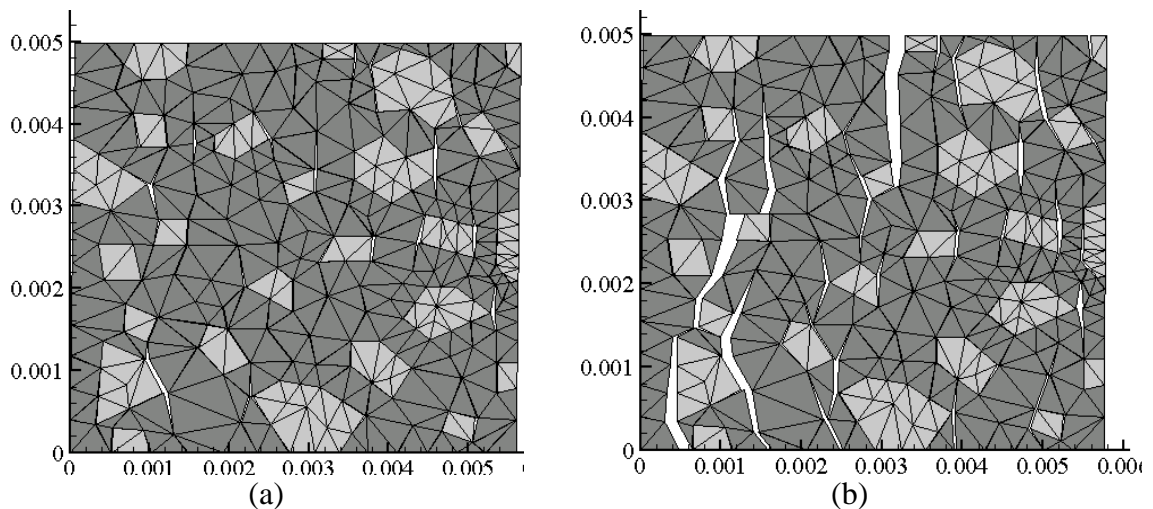
A propagação de trincas na escala local, embora não produza um aumento brusco na deflexão global, produz uma redução na rigidez do material na escala global, o que provoca um aumento gradativo na deflexão da escala global (Figura 5). Além disso, essa redução de rigidez produz uma queda também gradativa na tensão horizontal máxima resistida pelo material na escala global, como mostra a Figura 7.



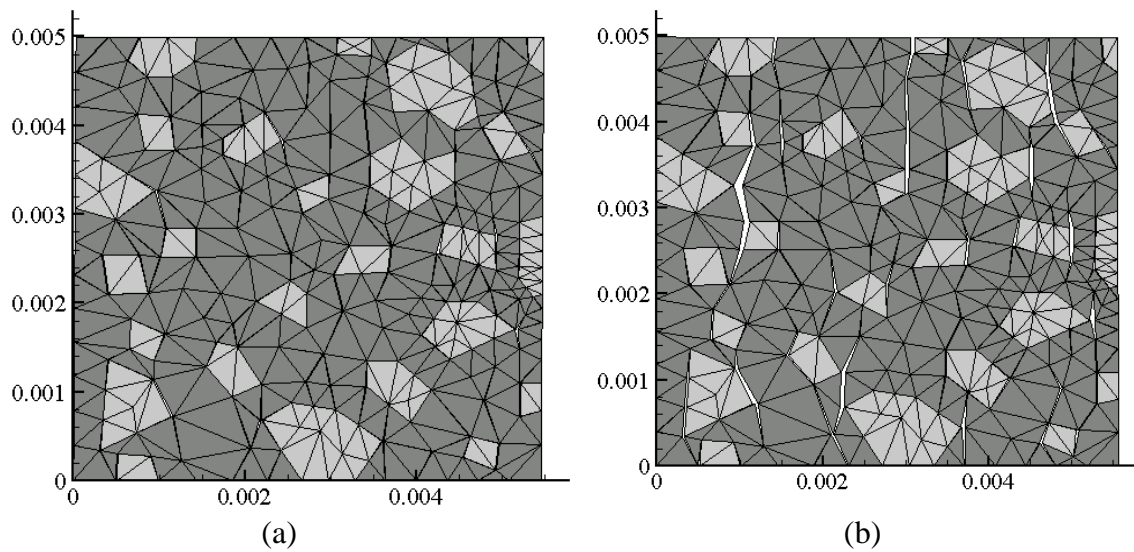
**Figura 7:** Histórico da tensão horizontal observada no elemento global A

A partir das Figuras 5 e 7, as quais mostram o acúmulo de deformações permanentes e a perda da resistência do material, respectivamente, ao longo dos ciclos de carga, pode-se verificar a capacidade do modelo em simular os fenômenos de trincamento por fadiga e de acúmulo de deformação permanente (tanto devido ao comportamento viscoelástico do mastique como devido à formação e propagação de micro-trincas).

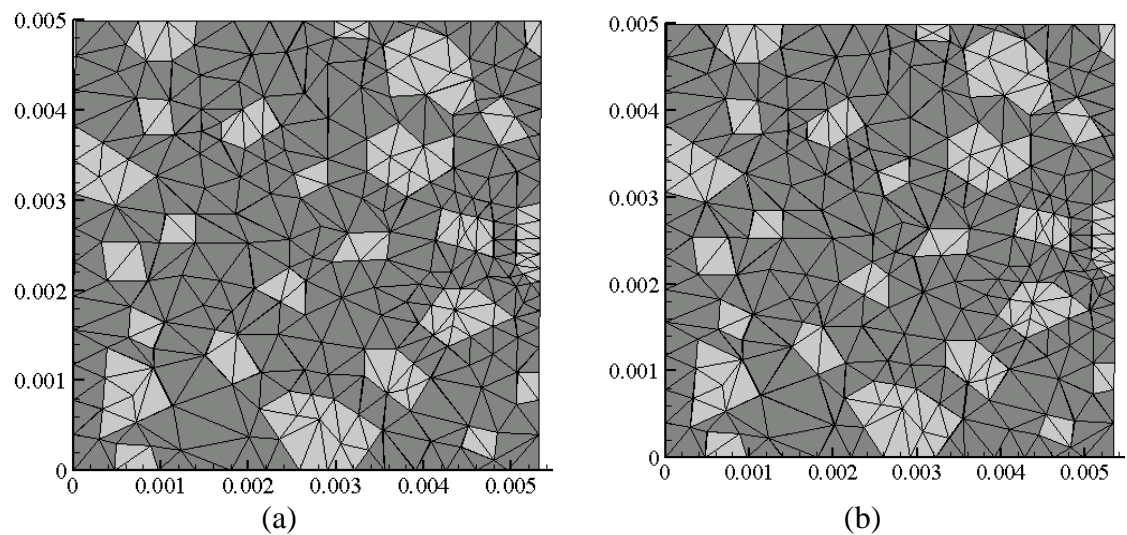
As Figuras 8, 9 e 10 apresentam as estruturas locais (para a situação 2) em tempos distintos para os elementos A, B e C da Figura 4, respectivamente. Os tempos escolhidos correspondem ao pico de deflexão do sexto ciclo e ao final da simulação. Os deslocamentos horizontais foram ampliados em dez vezes para permitir uma melhor visualização.



**Figura 8:** Estrutura local do elemento A para (a)  $t = 22,5$  s e (b)  $t = 70$  s



**Figura 9:** Estrutura local do elemento B para (a)  $t = 22,5$  s e (b)  $t = 70$  s



**Figura 10:** Estrutura local do elemento C para (a)  $t = 22,5$  s e (b)  $t = 70$  s

A partir das Figuras 8, 9 e 10, pode-se perceber que a estrutura local da região mais solicitada (Figura 8) se apresentou mais danificada que as demais, o que era esperado. Note-se que é justamente para este tipo de problema, onde há um gradiente de deformações ao longo da estrutura, que os modelos multi-escala se mostram mais atraentes, especialmente quando a evolução do dano depende do histórico do carregamento.

Para ilustrar a capacidade do modelo multi-escala em avaliar o desempenho de misturas asfálticas para diferentes constituintes, considerou-se hipoteticamente um novo EVR constituído pela mesma fração de agregados, porém com um mastique com módulo de relaxação duas vezes menor. Para tanto, dividiram-se todos os coeficientes  $E_i$ 's da série de Prony do mastique original por dois e recalculou-se o módulo de relaxação da AAUQ para este novo mastique usando o mesmo procedimento descrito em Souza (2005). Neste caso, o novo mastique apresenta uma fluência maior e corresponderia, por exemplo, a um mastique fabricado com um CAP menos consistente.

As Figuras 5 e 7 apresentam os resultados para este novo mastique. Observa-se da Figura 5 que, neste caso, a viga deforma mais rapidamente, como esperado, de modo que o dano também evolui mais rapidamente (Allen e Searcy, 2001), fazendo com que a falência estrutural da viga ocorra nos primeiros ciclos (quarto ciclo de carga), conforme Figura 7. É importante ressaltar a versatilidade do modelo computacional multi-escala na avaliação do desempenho dos dois mastiques diferentes, bastando, para tanto, recalcular o módulo de relaxação da nova AAUQ, modificar as propriedades do novo mastique e da nova AAUQ no arquivo de entrada e executar o programa novamente.

## 5. CONCLUSÕES

O presente trabalho mostrou a capacidade do modelo computacional multi-escala apresentado por Souza (2005) em simular os principais fatores de deterioração dos pavimentos asfálticos, quais sejam, o trincamento por fadiga e o acúmulo de deformações permanentes. O programa multi-escala usado se baseia no Método dos Elementos Finitos, o que o torna bastante versátil e de fácil aplicação na solução de problemas com diversas geometrias. O programa realiza a análise em apenas duas escalas (global e local).

Além da heterogeneidade do material, pode-se ainda considerar a formação e propagação de trincas ao longo do mastique e nas interfaces mastique-agregados durante as análises locais. Desta forma, o modelo torna-se capaz de considerar a anisotropia na microestrutura produzida pela distribuição interna e orientação dos agregados e das trincas formadas.

Dentre as vantagens dos modelos multi-escala, pode-se destacar a visualização, por parte do analista, das interações entre os constituintes do compósito, o que permite um melhor entendimento do comportamento do material e dos fenômenos de deterioração que ocorrem nas escalas menores e que determinam o comportamento da estrutura na escala maior. A partir deste entendimento mais esclarecido, pode-se, então, projetar materiais mais adequados para cada tipo de aplicação estrutural de modo a possibilitar maior segurança, confiabilidade e economia aos projetos estruturais e permitir um melhor aproveitamento dos materiais.

Uma outra vantagem importante está no fato de que, por se basearem nas propriedades fundamentais dos materiais constituintes individuais, os modelos multi-escala permitem que várias combinações de constituintes diferentes e de suas respectivas frações volumétricas sejam testadas computacionalmente sem a necessidade de realização de grande quantidade de ensaios.

## Agradecimentos

À equipe do Laboratório de Mecânica dos Pavimentos, LMP/DET/UFC. Os autores agradecem à Agência Nacional do Petróleo e ao CNPq pelas suas respectivas bolsas.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Allen, D. H. (2001) Homogenization Principles and their Application to Continuum Damage Mechanics. *Composites Science and Technology*, v. 61, p. 2223-2230.
- Allen, D. H. e C. R. Searcy (2001) A Micromechanical Model for a Viscoelastic Cohesive Zone. *International Journal of Fracture*, v. 107, p. 159-176.
- Bazant, Z. P. e J. Planas (1998) *Fracture and Size Effect in Concrete and Other Quasibrittle Materials*. CRC Press, EUA.
- Caiazzo, A. A. e F. Costanzo (2000) On the Constitutive Relations of Materials with Evolving Microstructure due to Microcracking. *International Journal of Solids and Structures*, v. 37, p. 3375-3398.
- Caiazzo, A. A. e F. Costanzo (2001) Modeling the Constitutive Behavior of Layered Composites with Evolving Cracks. *International Journal of Solids and Structures*, v. 38, p. 3469-3485.

- CNT (2004) Pesquisa Rodoviária Nacional. Confederação Nacional do Transporte. [www.cnt.org.br](http://www.cnt.org.br).
- Feyel, F. e J-L. Chaboche (2000) FE<sup>2</sup> Multiscale Approach for Modelling the Elastoviscoplastic Behavior of Long Fibre SiC/Ti Composite Materials. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, v. 183, p. 309-330.
- Haj-Ali, R. M. e A. H. Muliana (2004) A Multi-scale Constitutive Formulation for the Nonlinear Viscoelastic Analysis of Laminated Composite Materials and Structures. *International Journal of Solids and Structures*, v. 41, p. 3461-3490.
- Kouznetsova, V. G. (2002) *Computational homogenization for the multi-scale analysis of multi-phase materials*. Ph.D. Dissertation, TU-Eindhoven, Eindhoven, Holanda.
- Searcy, C. R. (2004) *A Multi-scale model for Predicting Damage Evolution in Heterogeneous Viscoelastic Media*. Ph.D. Dissertation, Texas A&M University, College Station, EUA.
- Souza, F. V. (2005) *Modelo Multi-Escala para Análise Estrutural de Compósitos Viscoelásticos Suscetíveis ao Dano*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.
- Souza, F. V. e J. B. Soares (2005) Simulação do Comportamento Mecânico de Misturas Asfálticas usando um Modelo Computacional Multi-Escala - Parte I: Carregamento Monotônico. *Submetido ao XIX ANPET*.
- Yi, Y-M.; S-H. Park e S-K. Youn (1998) Asymptotic Homogenization of Viscoelastic Composites with Periodic Microstructures. *International Journal of Solids and Structures*, v. 35, n. 17, p. 2039-2055.

**Endereço dos autores:**

Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia – Campus do Pici, S/ N°, Departamento de Engenharia de Transportes, Bloco: 703 CEP: 60.455-760, Fortaleza/CE - Brasil. e-mail: [flaviovs@gmail.com](mailto:flaviovs@gmail.com), [jsoares@det.ufc.br](mailto:jsoares@det.ufc.br)