

6º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS



TÍTULO DO TRABALHO:

Modelagem Multi-Escala da Evolução do Dano em Misturas Asfálticas Submetidas a Carregamento Cíclico

AUTORES:

Flávio Vasconcelos de Souza¹; Yong-Rak Kim²

INSTITUIÇÃO:

¹Universidade Federal do Ceará; ²University of Nebraska-Lincoln

Este Trabalho foi preparado para apresentação no 6º Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Petróleo e Gás- 6º PDPETRO, realizado pela a Associação Brasileira de P&D em Petróleo e Gás-ABPG, no período de 09 a 13 de outubro de 2011, em Florianópolis-SC. Esse Trabalho foi selecionado pelo Comitê Científico do evento para apresentação, seguindo as informações contidas no documento submetido pelo(s) autor(es). O conteúdo do Trabalho, como apresentado, não foi revisado pela ABPG. Os organizadores não irão traduzir ou corrigir os textos recebidos. O material conforme, apresentado, não necessariamente reflete as opiniões da Associação Brasileira de P&D em Petróleo e Gás. O(s) autor(es) tem conhecimento e aprovação de que este Trabalho seja publicado nos Anais do 6ºPDPETRO.

Modelagem Multi-Escala da Evolução do Dano em Misturas Asfálticas Submetidas a Carregamento Cíclico

Abstract

This study presents a multiscale computational approach and its application to predicting damage dependent mechanical behavior of bituminous mixtures subject to cyclic loading. Two length scales (global and local) are two-way coupled in the model framework by linking a homogenized global scale to a heterogeneous local scale representative volume element. Based on the unique two-way coupled multiscaling and the use of the finite element technique incorporated with material viscoelasticity and cohesive zone fracture, the model approach can successfully account for the effect of mixture heterogeneity, material inelasticity, and damage accumulation due to cracks in the small scale on the overall performance of larger scale mixtures or structures by requiring only the knowledge of the properties of individual constituents utilizing component properties. To demonstrate the model and its features, the three-point bending beam fatigue testing of a fine aggregate matrix mixture is simulated. The model clearly demonstrates material-specific fatigue damage characteristics. The multiscale model presented herein is expected to drastically reduce time-consuming and expensive fatigue tests, which, when performed in the traditional manner, require many replicates and do not define the cause of microstructural fatigue failure.

Introdução

Dano por fadiga e trincamento em misturas asfálticas estão entre as principais causas de falha estrutural de pavimentos asfálticos. Trincas por fadiga, em geral, se iniciam como micro-trincas que coalescem, se propagam, e formam macro-trincas. Quando um número suficientemente grande de trincas se desenvolvem, o pavimento perde sua funcionalidade por diversos motivos, quais sejam, percolação de água para as camadas inferiores, formação de depressões (trilhas de roda) e panelas (buracos), dentre outros.



Figura 1: Exemplo de formação de (a) trilha de roda e (b) panela (Lutif, 2011)

Um entendimento mais elaborado do comportamento de misturas asfálticas submetido à fadiga é necessário para o melhoramento dos projetos de misturas visando uma melhor performance estrutural dos materiais asfálticos. No entanto, a previsão do dano por fadiga é uma tarefa complicada, não apenas pela natureza complexa do fenômeno de fadiga, visto como um processo de trincamento em meio viscoelástico não-linear, mas também porque misturas asfálticas são materiais heterogêneos, anisotrópicos constituídos de uma mistura de partículas irregulares e distribuídas aleatoriamente dentro de uma matriz de ligante asfáltico. Assim sendo, é comum recorrer-se a métodos empíricos que utilizam testes dispendiosos de fadiga em laboratório. Considerando o grande número de combinações possíveis de tipos e formas de agregados, ligantes e carregamento, o uso exclusivo de métodos empíricos torna-se exageradamente custoso e ineficiente.

Deste modo, vários pesquisadores (Gibson, et al., 2003; Souza et al. 2004; Masad et al. 2005; Souza, 2009b) têm utilizado métodos computacionais considerando-se diversos modos de dano,

heterogeneidade e fratura. No entanto, estes trabalhos consideram uma única escala no problema, de modo que análises de estruturas em escala real, como pavimentos, requereriam um esforço computacional inviável.

Uma solução alternativa para este problema é o uso de modelos multi-escala (Souza, 2005; Souza, 2009a; Souza e Allen, 2010a, Souza e Allen, 2010b), os quais se baseiam em princípios físicos de separação de escalas e homogeneização (Nemat-Nasser e Hori, 1993) para reduzir a microestrutura a volumes estatisticamente representativos da mistura como um todo, considerando assim os detalhes da microestrutura do material, porém reduzindo assim o tempo computacional da análise.

Modelos Multi-Escala

A Figura 2 mostra uma representação esquemática do conceito de modelagem multi-escala. Neste caso, tem-se um objeto considerado estatisticamente homogêneo representando a escala global, o elemento de volume representativo (EVR – escala local), o qual contém heterogeneidades na forma de partículas e micro-trincas idealizadas como zonas coesivas. No presente trabalho, utiliza-se o modelo de zona coesiva viscoelástica não-linear desenvolvido por Allen e Searcy (2001). Note-se que as propriedades da escala global são determinadas através de homogeneização da escala local.

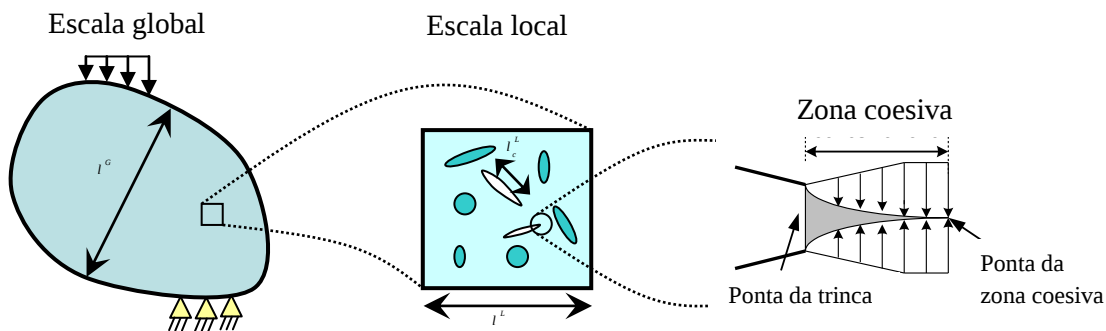


Figura 2: Representação esquemática do modelo multi-escala em três escala: global, local e zona coesiva.

O processo de homogeneização baseia-se em médias volumétricas de quantidades-chave do problema. No caso do problema mecânico, a quantidade-chave é a energia do sistema. O processo de homogeneização é aplicável sempre que o meio heterogêneo satisfaz a condição de homogeneidade estatística (Nemat-Nasser e Hori, 1993; Allen, 2001).

Recentemente, Souza e Allen (Souza, 2009a; Souza e Allen, 2010a) mostraram que os tensores constitutivos viscoelásticos anisotrópicos homogeneizados podem ser calculados de forma precisa e completa resolvendo-se o problema de valor de contorno apenas uma vez, o que reduz drasticamente o esforço computacional. Para materiais viscoelásticos, a seguinte forma incremental das relações constitutivas foram obtidas:

$$\Delta \sigma_{ij}^G = C_{ijkl}^G(t) \cdot \Delta \varepsilon_{kl}^G + \Delta \sigma_{ij}^{RG}$$

$$C_{ijkl}^G = \frac{1}{V} \int_V \left\{ C_{ijkl}'^L + C_{ijpq}'^L \left[\frac{1}{2} (\lambda_{pkl}^L \cdot q + \lambda_{qkl}^L \cdot p) \right] \right\} dV$$

$$\Delta \sigma_{ij}^{RG} = \frac{1}{V} \int_V (C_{ijkl}'^L \Delta \varepsilon_{kl}^{RL} + \Delta \sigma_{ij}^{RL}) dV$$

onde $\Delta \sigma_{ij}^G$ é o incremento no tensor de tensões, $\Delta \varepsilon_{kl}^G$ é o incremento no tensor de deformações, $C_{ijkl}^G(t)$ é o tensor constitutivo tangent avaliado no tempo t , e $\Delta \sigma_{ij}^{RG}$ é um tensor que guarda informações sobre a dependência viscoelástica no histórico do carregamento. Note que $C_{ijkl}^G(t)$ é função do tempo através de sua dependência no estado de dano acumulado na escala local (EVR), produzindo assim um comportamento não-linear na escala global. O leitor é aqui direcionado para os trabalhos de Souza (2009) e Souza e Allen (2010a, 2010b) para maiores detalhes a respeito do modelo multi-escala aqui utilizado, e de sua implementação pelo método dos elementos finitos.

Vale ainda ressaltar que o modelo multi-escala desenvolvido por Souza e Allen (2010a) é duplamente acoplado. Isto é, o carregamento (deformação) observado em um ponto da escala global é aplicado ao contorno do EVR (acoplamento global-local), o qual poderá desenvolver micro-trincas e cujas propriedades homogeneizadas, considerando a viscoelasticidade, anisotropia e dano, são transferidas de volta para a escala global (acoplamento local-global).

Materiais e Métodos

Afim de demonstrar a aplicabilidade do modelo multi-escala na análise de misturas asfálticas, simulações do ensaio de flexão com carregamento cíclico em vigas foram realizadas. Dadas as dimensões reduzidas do ensaio, a mistura asfáltica consiste apenas de agregados finos (passando na peneira de 1.19mm), vazios e ligante asfáltico de modo a satisfazer a condição de homogeneidade estatística. Neste estudo, dois tipos de ligante asfáltico foram considerados: AAM-1 e AAD-1. Para reduzir o número de nós nas malhas de elementos finitos da escala global, define-se como mastique o material oriundo da mistura do ligante asfáltico com agregados menores que 0.30 mm. As propriedades viscoelásticas (módulo de relaxação) dos mastiques determinadas em laboratório para uma temperatura de referência de 25°C são apresentadas na Figura 3. Para as partículas de agregado, considerou-se um módulo elástico de 10GPa. Quanto ao coeficiente de Poisson, utilizou-se 0.15 e 0.35 para os agregados e mastiques, respectivamente. Os parâmetros do modelo de zona coesiva aqui utilizado são dados na Tabela 1.

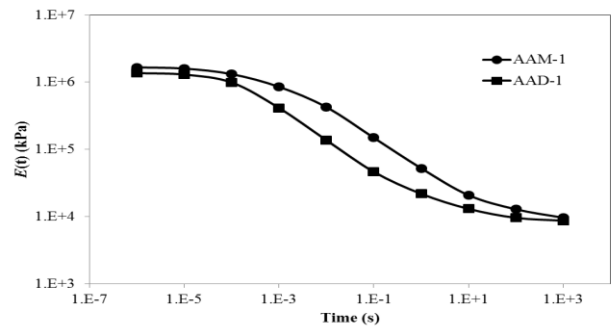


Figura 3: Módulo de relaxação dos mastiques para temperatura de referência de 25°C.

Tabela 1: Parâmetros do modelo de zona coesiva

	AAD-1		AAM-1	
	mastique-mastique	mastique-agregado	mastique-mastique	mastique-agregado
δ_i^L (mm)	0.5	0.25	0.5	0.25
$\sigma_n^{\beta L}$ (kPa)	1,000	1,000	1,000	1,000
A	1.0	1.0	2.0	2.0
m	1.2	1.2	1.2	1.2

* E(t) para as zonas coesivas é o mesmo do mastique correspondente

É importante notar que embora os agregados e o mastique tenham sido considerados materiais isotrópicos, a escala global pode apresentar anisotropia devido à disposição dos agregados, sendo este efeito levado em consideração naturalmente pelo processo de homogeneização (Souza, 2009; Souza e Allen, 2010a).

As malhas de elementos finitos utilizadas tanto para a viga como para o EVR são mostradas na Figura 4. Devido à simetria do problema, apenas metade da viga é considerada no processo de discretização. No total, 210 elementos triangulares foram usados para discretizar a viga, sendo que para cada ponto de integração, existe um EVR anexado o qual definirá o comportamento constitutivo daquele ponto de integração. Inicialmente, cada EVR possui 1400 elementos triangulares e 749 nós. Porém, o processo de fratura é modelado através de um algoritmo adaptativo de inserção automática de elementos de zona coesiva (Souza, 2009; Souza e Allen, 2010b), onde o nós da malha são duplicados para permitir a formação e propagação de trincas.

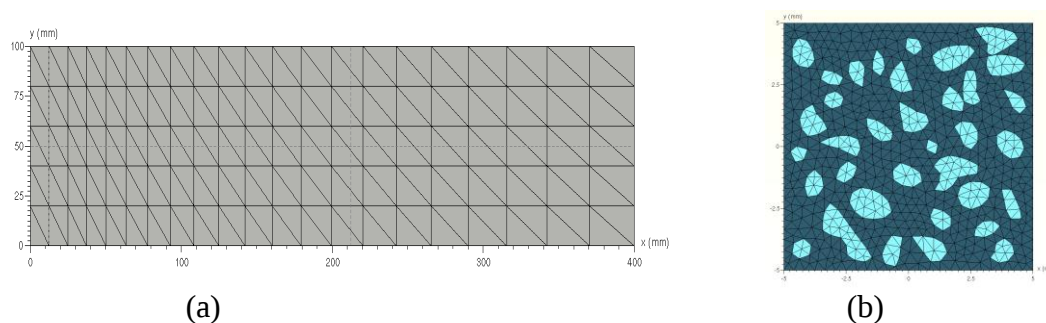


Figura 4: Malha de elementos finitos usadas para (a) viga e (b) EVR (escala local)

A magnitude da carga sinusoidal aplicada à viga é de 150kPa com duração do ciclo de 5 s, de modo que um dano considerável seja imposto ao material. Como muitas das propriedades aqui utilizadas, especialmente os parâmetros de dano, não puderam ser obtidos experimentalmente, os resultados aqui apresentados devem ser considerados de forma qualitativa apenas.

Resultados e Discussão

Para investigar a sensibilidade do modelo com relação as propriedades dos constituintes da escala local, quatro casos são considerados: Casos 1 e 2 consideram apenas a viscoelasticidade dos masquitques AAD-1 e AAM-1, respectivamente; enquanto os Casos 3 e 4 consideram tanto a viscoelasticidade como a formação e propagação de trincas na escala local.

Cada simulação consistiu de 33 ciclos de carga, com 0.5s de incremento de tempo, e um total de 330 incrementos. O algoritmo iterativo não-linear de Newton-Raphson foi usado para garantir a convergência dos resultados. As simulações com dano levaram cerca de 45 minutos, enquanto aquelas sem dano foram resolvidas em menos de 25 minutos. Todas as simulações foram realizadas usando 8 processadores Intel Xeon 3.0 GHz. Note que o modelo computacional aqui utilizado funciona em paralelo (Souza, 2009a; Souza e Allen, 2010a) e que a utilização de 8 processadores reduz o tempo computacional em aproximadamente 7.5 vezes, o que mostra a eficiência da implementação em paralelo.

A Figura 5 apresenta a componente vertical do vetor de deslocamento observado no fundo da viga ao longo do eixo de simetria. Note a partir da Figura 5 que o modelo multi-escala usado é capaz de prever mudanças no comportamento global provocadas mudanças dos constituintes da escala local, neste caso o tipo de mastique. Note que substituindo-se o mastique AAD-1 pelo AAM-1 resulta numa maior rigidez da mistura. Pode-se também notar a evolução de deformações permanentes causadas pela viscoelasticidade do mastique. Uma comparação entre os casos com e sem dano, observa-se que a formação e propagação de micro-trincas induz perda de rigidez e maiores deformações permanentes.

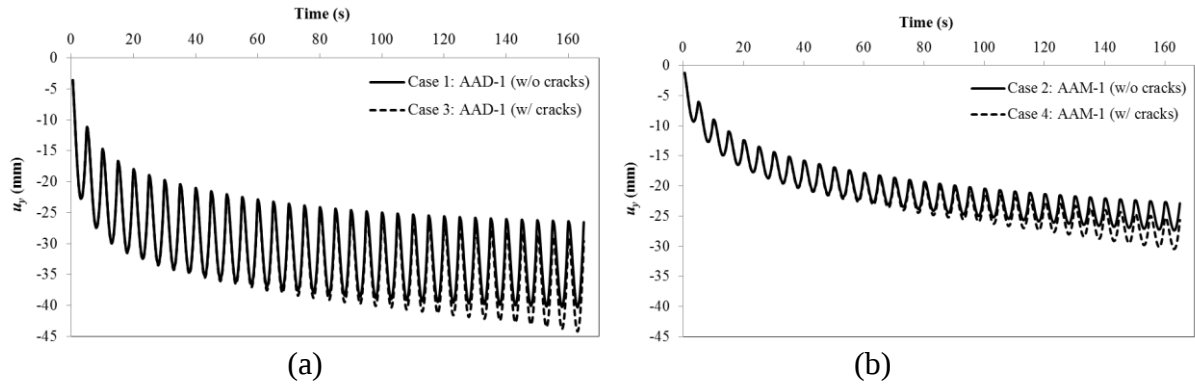


Figura 5: Componente vertical do deslocamento observado no fundo da viga ao longo do eixo de simetria. Simulações para (a) AAD-1 com e sem dano; e para (b) AAM-1 com e sem dano.

A Figura 6 apresenta a história do componente xx do tensor de tensões no fundo da viga ao longo do eixo de simetria. Pode-se observar que o acúmulo do dano na escala local além de reduzir a tensão máxima a cada ciclo, também reduz a amplitude da componente xx do tensor de tensões. Além disso, tensões de compressão se desenvolvem ao final dos ciclos enquanto o dano se acumula.

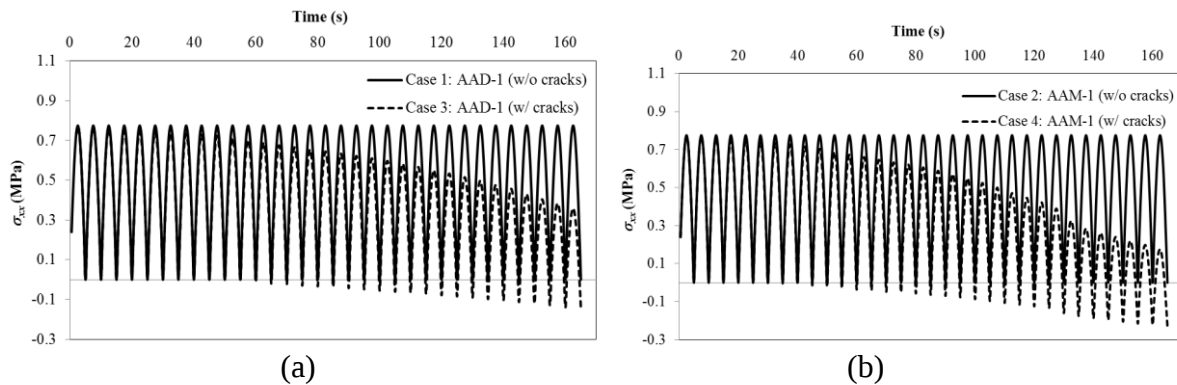


Figura 6: Evolução do component xx do tensor de tensões observado no fundo da viga sob o eixo de simetria. Simulações para (a) AAD-1 com e sem dano; e para (b) AAM-1 com e sem dano.

Os resultados das simulações com dano para os mastiques AAD-1 e AAM-1 são apresentados na Figura 7. As imagens mostradas na Figura 7 foram geradas usando o programa de pós-processamento gmsh (Geuzaine and Remacle, 2009).

Vale salientar a distribuição espacial do dano nos EVR's de acordo com suas posições na viga (escala global), como mostrado na Figura 7. A habilidade de capturar a dependência espacial e temporal do dano é uma das características mais atrativas do modelo multi-escala aqui utilizado. Note-se que diferentes regiões da viga estão submetidas a diferentes condições de deformação e diferentes taxas de deformação. Como o comportamento de materiais asfálticos é bastante influenciado pela história do carregamento, a metodologia multi-escala duplamente acoplada é vista como maneira eficiente de modelagem de misturas asfálticas, a qual pode reduzir significativamente o número de experimentos laboratoriais dispendiosos necessários para caracterizar um mistura, uma vez que as importantes variáveis microestruturais de projeto são incluídas no modelo computacional de forma explícita.

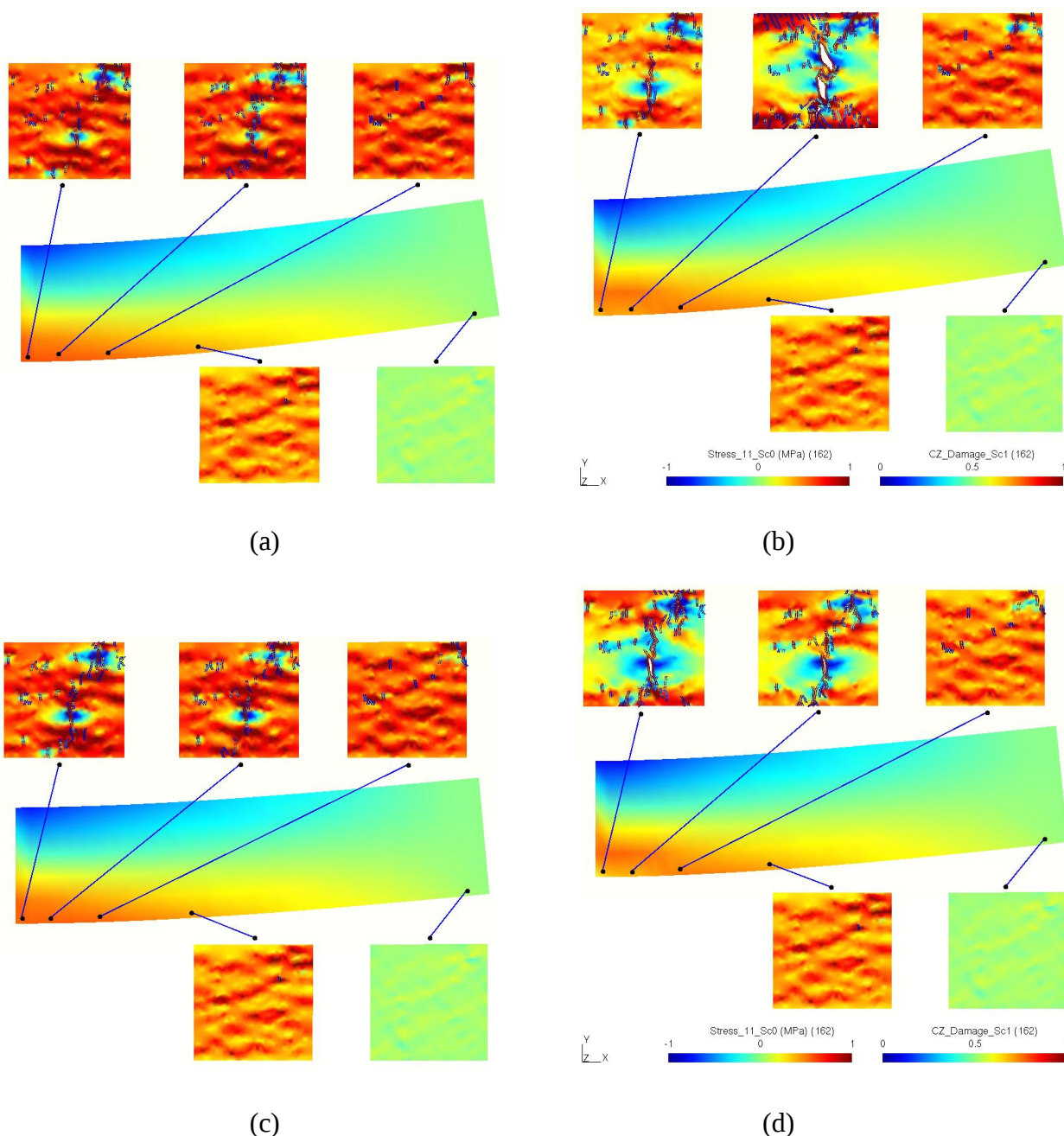


Figura 7: Resultados da simulações com dano, mostrando alguns EVR's e suas respectivas posições na viga (escala global). As dimensões do EVR e o campo de deslocamentos foram magnificados por um fator de 10. (a) AAD-1, ao fim do 20º ciclo; (b) AAD-1, ao fim do 33º ciclo; (c) AAM-1, ao fim do 20º ciclo; (d) AAM-1, ao fim do 33º ciclo.

Conclusões

O presente trabalho apresenta a aplicação de um modelo computacional multi-escala duplamente acoplado na modelagem do dano por fadiga em misturas betuminosas. O modelo considera heterogeneidade da mistura, viscoelasticidade do ligante asfáltico, micro-trincas através de um model de zona coesiva viscoelástica não-linear e anisotropia na escala global. O modelo multi-escala demonstra grande potencial, especialmente devido ao fato de que apenas as propriedades dos constituintes individuais da mistura e suas características geométricas são necessárias para a análise de misturas. Deste modo, diversas combinações de materiais podem ser previamente testadas numericamente antes de se realizar qualquer experimento laboratorial, reduzindo-se o custo do projeto da misturas. Modelos computacionais avançados, como o utilizado neste trabalho, podem ainda ser

utilizadas como ferramentas eficientes de previsão de comportamento, análise e projeto de misturas asfálticas

Agradecimentos

O primeiro autor agradece o apoio financeiro recebido através do Programa de Recursos Humanos da ANP para o Setor Petróleo e Gás – PRH31-ANP/MCT.

Referências Bibliográficas

Allen, D.H. (2001) Homogenization principles and their application to continuum damage mechanics. *Composites Science and Technology*, Vol. 61(15), pp. 2223–2230.

Allen, D.H. e Searcy, C.R. (2001) A micromechanical model for a viscoelastic cohesive zone. *International Journal of Fracture*, v. 107, p. 159-176.

Geuzaine, C., Remacle, J.F. (2009) Gmsh: A 3-D finite element mesh generator with built-in pre- and post-processing facilities. *International Journal for Numerical Methods in Engineering* 79, 1309–1331.

Gibson, N. H., Schwartz, C. W., Schapery, R. A., and Witczak, M. W. (2003) Viscoelastic, viscoplastic, and damage modeling of asphalt concrete in unconfined compression. *Journal of the Transportation Research Board*, 1860, pp. 3-15.

Lutif, J.E.S. (2011) Computational micromechanics modeling of damage-dependent bituminous composites based on two-way coupled multiscale. Tese de Doutorado. University of Nebraska-Lincoln. EUA.

Masad, E.; Tashman, L.; Little, D.; e Zbib, H. (2005) Viscoplastic modeling of asphalt mixes with the effects of anisotropy, damage and aggregate characteristics. *Journal of Mechanics of Materials*, Vol. 37(12), pp. 1242-1256.

Nemat-Nasser, S., and Hori, M. (1993) *Micromechanics: Overall Properties of Heterogeneous Materials*. North Holland, New York.

Souza, F.V. (2005) Modelo multi-escala para análise estrutural de compósitos viscoelásticos suscetíveis ao dano. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Ceará, Brasil.

Souza, F.V. (2009a) Multiscale modeling of impact on heterogeneous viscoelastic solids with evolving microcracks. Tese de Doutorado, University of Nebraska–Lincoln, EUA.

Souza, F.V. e Allen, D.H. (2010a) Multiscale modeling of impact on heterogeneous viscoelastic solids containing evolving microcracks. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 82(4):464–504. doi: 10.1002/nme.2773.

Souza, F.V. e Allen, D.H. (2010b). Modeling failure of heterogeneous viscoelastic solids under dynamic/impact loading due to multiple evolving cracks using a two-way coupled multiscale model. *Mechanics of Time-Dependent Materials* 14, 125–151.

Souza, F. V., Soares, J. B., Allen, D. H., Evangelista, F. (2004) Model for predicting damage evolution in heterogeneous viscoelastic asphalt mixtures. *Transportation Research Record*, 1891, pp. 131-139.

Souza, L.T. (2009b) Investigation of aggregate angularity effects on HMA mixture performance using experimental and virtual asphalt samples. Dissertação de Mestrado. University of Nebraska-Lincoln. EUA.