

PRINCÍPIOS DE HOMOGENEIZAÇÃO APLICADOS EM UMA MISTURA ASFÁLTICA CONSIDERADA COMO UM COMPÓSITO ELÁSTICO

Felipe Araújo Colares de Freitas

University of Nebraska-Lincoln
College of Engineering and Technology
Engineering Mechanics Department

Jorge Barbosa Soares

Flávio Vasconcelos de Souza

Laboratório de Mecânica dos Pavimentos - LMP
Departamento de Engenharia de Transportes - DET
Universidade Federal do Ceará - UFC

RESUMO

Princípios de homogeneização vêm sendo usados para simplificar metodologias de análise na previsão do comportamento mecânico de meios sólidos compósitos, substituindo um meio heterogêneo por um meio homogêneo macroscopicamente equivalente. Este artigo apresenta a utilização de princípios de homogeneização para uma mistura asfáltica. Na abordagem, utiliza-se o método dos elementos finitos em escalas diferentes (global e local). É mostrado como prever parâmetros elásticos associados à escala global a partir de uma análise local. Os resultados indicam uma grande economia de esforço computacional, tornando mais viável a consideração da heterogeneidade do material.

ABSTRACT

Homogenization techniques are useful to simplify methodologies to predict the response of composite solid media, replacing a heterogeneous medium by a macroscopically equivalent homogeneous one. This paper presents the use of homogenization principles for an asphaltic mixture. The approach used herein is a computational framework based on the finite element method using different scales (global e local). It is shown how to predict global elastic parameters using a local analysis. The results indicate great savings in computational effort, making it possible the consideration of the heterogeneity of the material.

1. INTRODUÇÃO

Misturas asfálticas têm sido tradicionalmente tratadas nos meios técnico e científico como materiais homogêneos (Kandhal e Koehler, 1985; Lytton et al., 1993; Lee e Kim, 1998; Daniel e Kim, 2002), embora seja reconhecido que a heterogeneidade tem um impacto significativo no comportamento macroscópico de materiais multifásicos, incluindo as misturas asfálticas (Chang e Meegoda, 1997; Saad et al., 2003; Soares e Freitas, 2003). Vários fenômenos que ocorrem na macroescala, aqui designada escala global, podem ser originados da microescala (escala local). O comportamento mecânico na escala local depende da forma, tamanho, distribuição espacial e propriedades constitutivas dos materiais constituintes. Portanto, a influência da microestrutura é importante para um melhor entendimento da macroestrutura.

O presente artigo trata da utilização do princípio de homogeneização na análise de misturas em areia-asfalto, que podem ser consideradas heterogêneas a partir de uma determinada escala. Embora seja mais perceptível a importância da técnica para misturas com agregados graúdos, como a analisada em Soares e Freitas (2003), a importância da abordagem aqui apresentada está na utilização de escalas distintas (local e global). A análise local é feita considerando-se a heterogeneidade da mistura através da diferenciação de dois materiais: (i) ligante e (ii) agregado. Entenda-se como ligante o masticado formado pelo cimento asfáltico e a fração fina da areia incorporada ao mesmo. Os resultados da análise na microescala são

homogeneizados e utilizados na escala global. O objetivo é proporcionar uma maior economia no esforço computacional de modo a tornar a consideração da heterogeneidade do material na análise global computacionalmente viável.

A análise numérica realizada utiliza o método dos elementos finitos (MEF) em escalas diferentes. Todos os materiais são considerados elásticos. Dada a importância da consideração do comportamento viscoelástico do ligante asfáltico, estudos estão sendo desenvolvidos com o intuito de incorporar a viscoelasticidade neste tipo de análise (Souza e Soares, 2002; Soares e Souza, 2002; Souza e Soares, 2003).

A fim de avaliar a eficiência do processo de homogeneização, dois tipos de análise são realizados na escala global. Na primeira, utilizam-se os resultados de rigidez homogeneizados como dados de entrada da análise global e na segunda considera-se a heterogeneidade do material usando a abordagem discutida no estudo de Soares e Freitas (2003). No segundo caso, há uma limitação do tamanho do meio a ser analisado uma vez que um esforço computacional muito elevado é exigido para a análise devido ao grande número de elementos envolvidos na discretização. Os resultados alcançados com a técnica de homogeneização e com a técnica da heterogeneidade na escala global são comparados e discutidos.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Princípios ou técnicas de homogeneização são metodologias simplificadoras de previsão do comportamento de meios sólidos compósitos, nas quais um meio heterogêneo é substituído por um meio homogêneo macroscopicamente equivalente. A técnica é essencialmente baseada na construção e resolução adequada de um problema de valor de contorno (*boundary value problem – BVP*) na microescala. As propriedades constitutivas a serem usadas na escala global são obtidas da solução do BVP local.

Primeiramente, se formula e resolve o BVP para a microestrutura (análise local). Em seguida, por meio de médias (*averaged theorems*), é possível se obter a relação entre as estruturas global e local. Princípios de homogeneização têm sido usados em diversas aplicações de materiais compósitos (Allen et al., 1987a, 1987b; Lee et al., 1989, 1991; Phillips et al., 1999). Nessa abordagem, os detalhes físicos que ocorrem nas escalas menores não são perdidos e podem ser observados na escala local. Assim, este tipo de análise também pode ser usado para determinar o efeito da distribuição de microfissuras em uma dada escala nos parâmetros macroscópicos da escala subsequente. Isto não é possível quando da utilização de outras abordagens como, por exemplo, o modelo de dano contínuo que considera leis constitutivas determinadas fenomenologicamente assumindo-se a homogeneidade do material (Kim e Little, 1990; Park et al., 1996; Lee e Kim, 1997; Daniel e Kim, 2002; Chebad et al., 2002).

2.1. Preliminares da homogeneização

A hipótese básica quando se utiliza a técnica de homogeneização é de que o material é macroscopicamente homogêneo e microscopicamente heterogêneo. A Figura 1 ilustra esquematicamente a microestrutura heterogênea associada a macroestrutura homogênea num ponto P. Outra hipótese é que a microestrutura é periodicamente repetida na macroestrutura. Desta forma, a macroestrutura pode ser microscopicamente representada por um único Elemento de Volume Representativo (EVR). Caso a segunda hipótese não seja válida, diferentes EVR's podem ser considerados em diferentes locais da estrutura global. Outro aspecto importante é a diferença de tamanho entre as escalas. Uma grande separação entre as

escalas garante uma melhor consideração das propriedades físicas e geométricas (Auriault, 1991). Ou seja, a dimensão do EVR (l_1) deve ser muito inferior à dimensão (l_2) da macroescala ($l_2 \gg l_1$). Um esquema simplificado da técnica de homogeneização também é apresentado na Figura 1. Após a formulação e resolução do BVP para um EVR, os resultados homogeneizados são usados como dados de entrada na análise global.

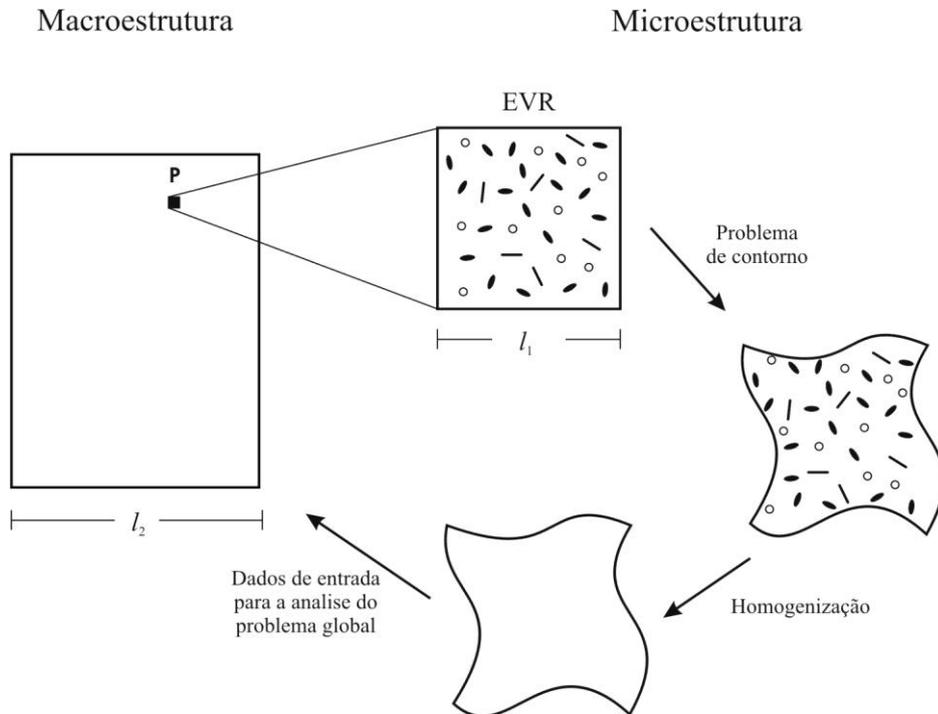


Figura 1: Esquema de homogeneização

2.2. Micromecânica local

Um dos pontos mais importantes, e talvez de maior complexidade, é a determinação do EVR. Uma escolha apropriada do EVR é fundamental para uma melhor precisão na análise global. Drugan e Willis (1996) definem a determinação do EVR de duas formas: o EVR deve ser (i) estatisticamente representativo da macroestrutura, e (ii) a menor estrutura possível que representa as características da macroestrutura.

Na formulação do BVP local, podem ser usadas condições de carregamento e de deslocamento no contorno. Neste artigo optou-se por utilizar condições de deslocamento pelo fato de se estar adotando uma formulação de deformações (*strain formulation*) para a escala macroscópica. Deslocamentos uniformes no contorno externo (u_i) são dados pela Equação 1 para um tensor de deformação uniforme (ε_{ij}).

$$u_i = \varepsilon_{ij} x_j \quad (1)$$

onde ε_{ij} é o tensor de deformação microscópico para deformações infinitesimais (Equação 2) e x_j o vetor das coordenadas do contorno externo.

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i}) \quad (2)$$

onde: $u_{i,j} = \frac{\partial u_i}{\partial x_j}$

Sabendo que o EVR está em equilíbrio, o que é matematicamente refletido pelas equações de equilíbrio em termos do tensor de tensão de Cauchy σ_{ij} , o problema local pode ser resolvido usando as Equações 1 e 2 conjuntamente com as Equações de equilíbrio 3 e 4 e a Equação 5 (Lei de Hooke generalizada) que representa a relação constitutiva elástica-linear (Hill, 1963).

$$\sigma_{ji,j} = 0, \text{ no volume } V \quad (3)$$

$$T_i = \sigma_{ij}n_j, \text{ no contorno } (\partial V) \quad (4)$$

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl}\varepsilon_{kl} \quad (5)$$

onde T_i é o vetor de carregamento no contorno do problema, e C_{ijkl} representa a matriz constitutiva, que está relacionada às propriedades mecânicas do material.

2.3. Relações entre micro e macroescalas

As relações entre micro e macroescalas são obtidas usando os chamados teoremas de média (*averaged theorems*) sobre o volume de um EVR, onde o teorema da divergência é usado para transformar a integral sobre o volume indeformado do EVR (V) em uma integral de superfície (∂V). As tensões e deformações na macroescala são obtidas pelas Equações 6 e 7, respectivamente (Allen, 2001). Note-se que a Equação 7 não possui contribuição de contornos internos, o que significa que os efeitos de trincas ou vazios não são considerados (Boyd et al., 1993).

$$\bar{\sigma}_{ij} = \frac{1}{V} \int_{\partial V} \sigma_{ik} n_k x_j ds \quad (6)$$

$$\bar{\varepsilon}_{ij} = \frac{1}{V} \int_{\partial V} \frac{1}{2} (u_i n_j + u_j n_i) ds \quad (7)$$

3. METODOLOGIA

Malhas de elementos finitos em duas escalas diferentes foram construídas a partir de uma seção transversal de um corpo de prova de areia-asfalto (10,16cm de diâmetro), como indicado na Figura 2. No caso da escala local, foi realizada a simulação numérica de uma barra comprimida uniaxialmente (estado plano de tensão). As análises realizadas para a escala global assumiram o estado plano de deformação. Na análise local, o BVP foi formulado e resolvido, sendo os resultados de tensão desta análise homogeneizados de modo a se obter os parâmetros elásticos a serem usados na escala global.

A fim de avaliar a eficiência da técnica de homogeneização, a escala global também foi analisada considerando-se o material como um compósito de duas fases sem a utilização da técnica homogeneização. Neste caso, há um esforço computacional bem mais elevado devido à necessidade de uma discretização mais refinada do meio físico quando se considera a heterogeneidade do material. Os resultados das duas análises globais são comparados e discutidos.



Figura 2: Seção transversal de um corpo de prova de areia-asfalto

3.1. Análise local

O EVR foi selecionado a partir de uma seção do corpo de prova em areia-asfalto moldado em laboratório (Figura 2). Para que o EVR possa representar a escala global, sua seleção foi realizada de modo a manter a relação entre as áreas de cada constituinte na escala global (no caso, 91,27% de mastique e 8,73% de agregado). As propriedades elásticas dos materiais, assumidas com base no estudo de Soares e Freitas (2003), assim como os percentuais de área de cada constituinte do EVR selecionado são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1: Propiedades dos constituintes do EVR

| Constituintes | Módulo de elasticidade (E) (kgf/cm ²) | Coefficiente de Poisson (ν) | Área (%) |
|--------------------|--|--------------------------------------|-------------|
| Ligante (mastique) | 13.200 | 0,2 | 90,04 |
| Agregado | 405.000 | 0,2 | 9,96 |

A malha de elementos finitos (Figura 3a) foi gerada para a área do EVR selecionado (0,7cm × 0,7cm) usando-se elementos triangulares e tendo-se com o cuidado de diferenciar os agregados maiores do mastique. Note-se que os elementos triangulares são adequados para descrever as irregularidades geométricas do exemplo em questão. As condições de contorno usadas são mostradas na Figura 3b, sendo um deslocamento uniforme aplicado no topo do EVR.

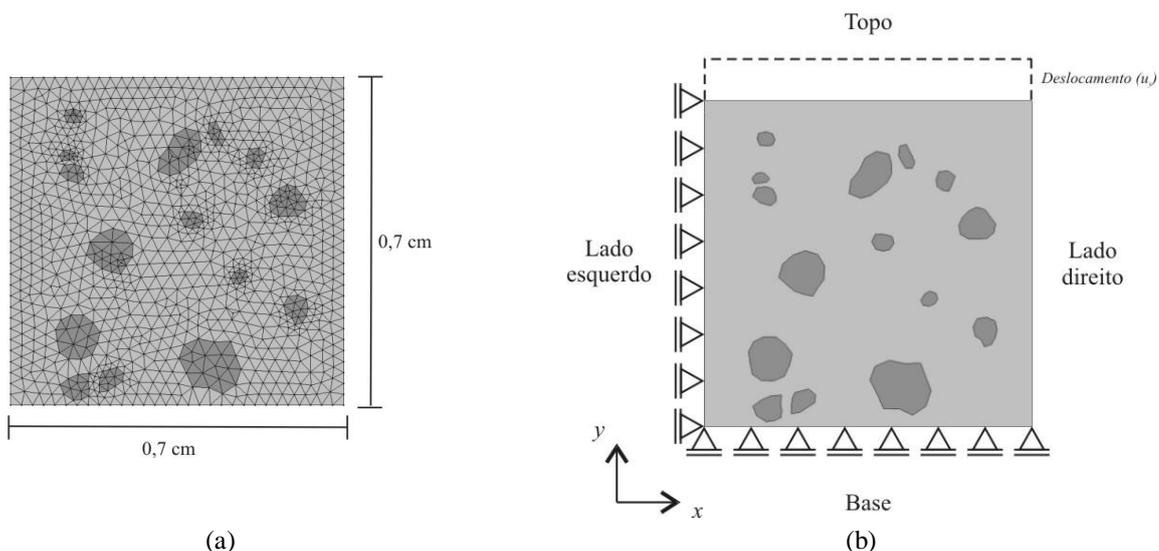


Figura 3: EVR: (a) malha de elementos finitos; (b) condições de contorno

3.2. Homogeneização

O objetivo do processo de homogeneização, neste caso, é prever os parâmetros elásticos a serem usados na análise global (módulo de elasticidade homogeneizado, E_h , e coeficiente de Poisson, ν_h). Dada a condição de compressão uniaxial (estado plano de tensão) assumida no BVP local, o parâmetro E_h pode ser calculado através da Equação 8, onde $\bar{\sigma}_y$ (Equação 9) é a tensão média na área do EVR, e $\bar{\varepsilon}_y$ é a deformação na direção y (deslocamento aplicado dividido pela a altura do EVR).

$$E_h = \frac{\bar{\sigma}_y}{\bar{\varepsilon}_y} \quad (8)$$

$$\bar{\sigma}_y = \frac{\sum_{i=1}^{nel} (\sigma_y)_i A_i}{A} \quad (9)$$

onde A é a área total do EVR, A_i é a área de cada elemento finito, $(\sigma_y)_i$ é a tensão na direção y em cada elemento finito e nel é o número de elementos finitos.

3.3. Análise Global

Para a análise global, dois diferentes problemas foram investigados. O primeiro tratou de uma seção retangular ($8\text{cm} \times 6\text{cm}$) selecionada do corpo de prova cilíndrico e o segundo de toda a seção circular do corpo de prova submetida a compressão diametral. Na primeira análise global, foram impostas praticamente as mesmas condições de contorno usadas para a análise do EVR na análise local, sendo modificado apenas o deslocamento uniforme no topo por uma carga concentrada F no lado esquerdo conforme ilustrado na Figura 4a.

Na análise da seção circular em compressão diametral, a base é fixada e, no topo, é imposta a mesma força F da primeira análise (Figura 4b). Quanto aos parâmetros elásticos, ambas as análises utilizam os parâmetros homogeneizados (E_h, ν_h). As malhas de elementos finitos (retangular e circular) são mostradas nas Figuras 5a e 5b, respectivamente.

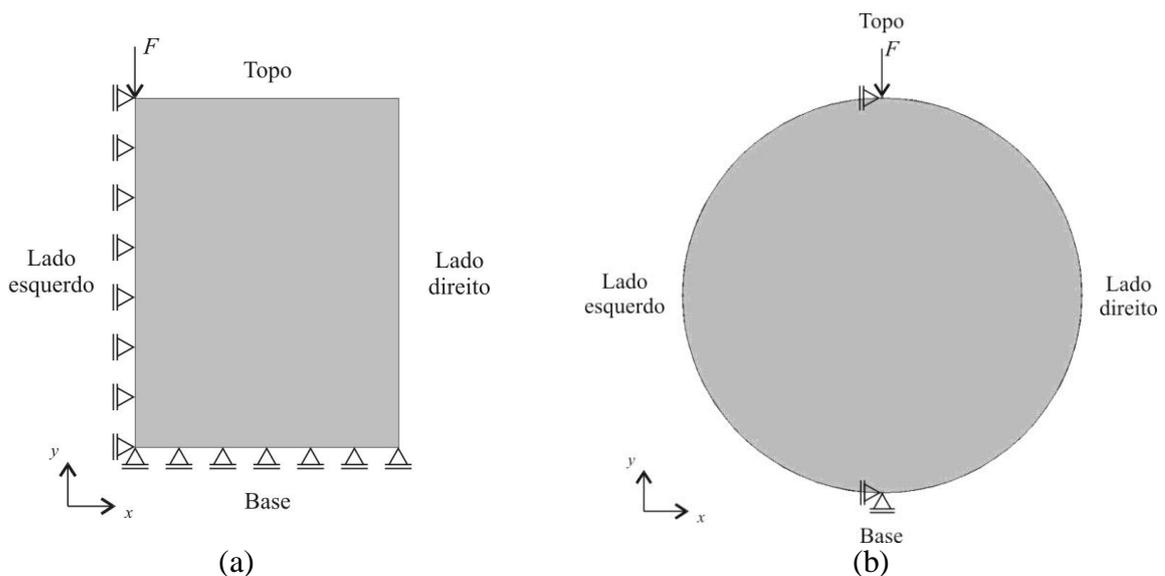


Figura 4: Estrutura global e condições de contorno: (a) seção retangular; (b) seção circular

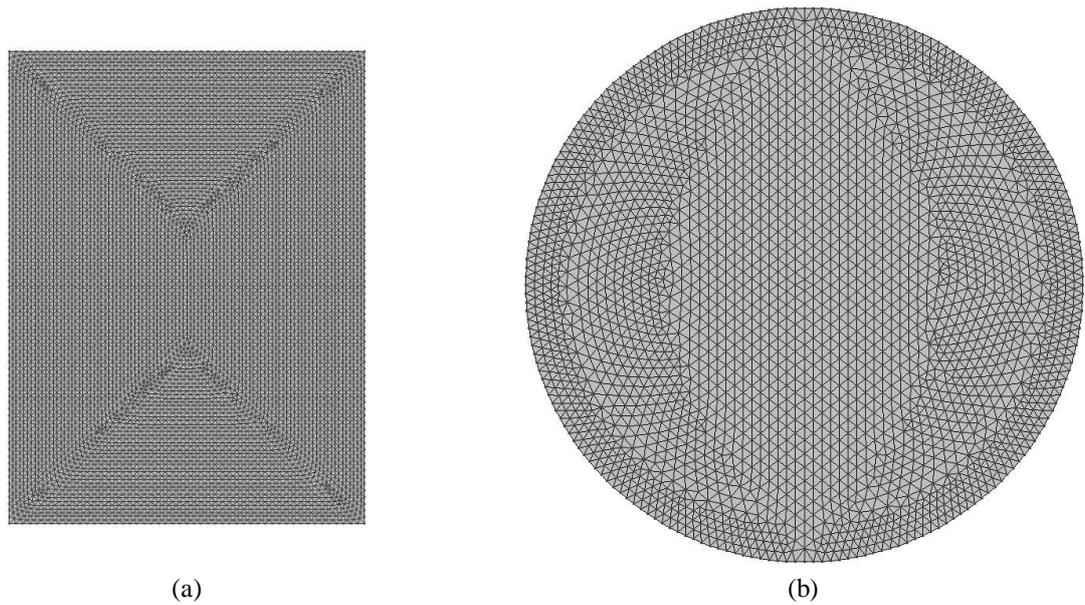


Figura 5: Malhas de elementos finitos na escala global: (a) seção retangular; (b) seção circular

A título de verificação da técnica de homogeneização e comparação do esforço computacional a análise global da seção retangular e da seção circular em compressão diametral foi realizada também considerando a heterogeneidade do material em ambos os casos. Malhas de elementos finitos foram geradas para cada seção conforme mostra a Figura 6.

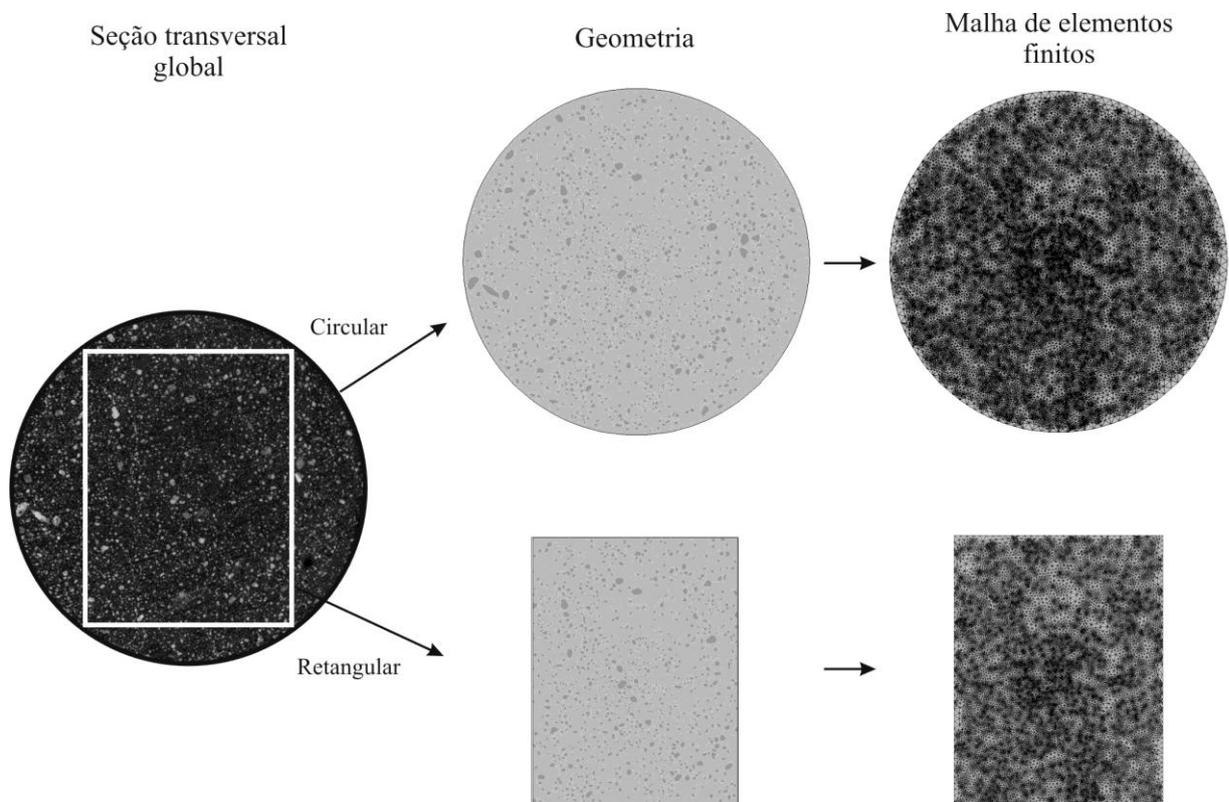


Figura 6: Seção transversal do corpo de prova, geometrias e malhas de elementos finitos na escala global

Devido à quantidade de elementos finitos utilizados para representar a heterogeneidade do material, e conseqüentemente a difícil visualização, a Figura 6 apresenta a seção transversal do corpo de prova, as geometrias das seções após o processamento das imagens e as respectivas malhas de elementos finitos. As propriedades elásticas dos materiais adotadas são as mesmas apresentadas na Tabela 1. Quanto aos percentuais de cada constituinte, usaram-se os mesmos valores mostrados na Tabela 1 para a seção retangular; porém, para a seção circular, obteve-se um percentual de área de 91,27% de ligante e 8,73% de agregado.

4. RESULTADOS

Impondo-se o deslocamento uniforme $u_y = 8 \times 10^{-4}$ cm no topo do EVR, pode-se calcular o módulo de elasticidade homogeneizado usando a Equação 8. Encontrou-se $E_h = 15.704,7 \text{ kgf/cm}^2$. Dado que se considerou o mesmo coeficiente de Poisson para os dois materiais (ligante e agregado), assume-se que o coeficiente de Poisson homogeneizado é $\nu_h = 0,20$.

Vale ressaltar que quando da utilização da técnica de homogeneização, inicia-se com a análise local que é homogeneizada e, posteriormente, usada na análise global (local + global). No caso da não utilização da técnica de homogeneização, no entanto, realiza-se apenas a análise global heterogênea.

A Figura 7 mostra os resultados de deslocamentos verticais no topo da seção retangular para as análises globais, com e sem utilização da técnica de homogeneização, para $F = 1,11 \text{ kgf/cm}^2$. Percebe-se que, para a seção retangular, a análise homogeneizada se aproxima da análise heterogênea.

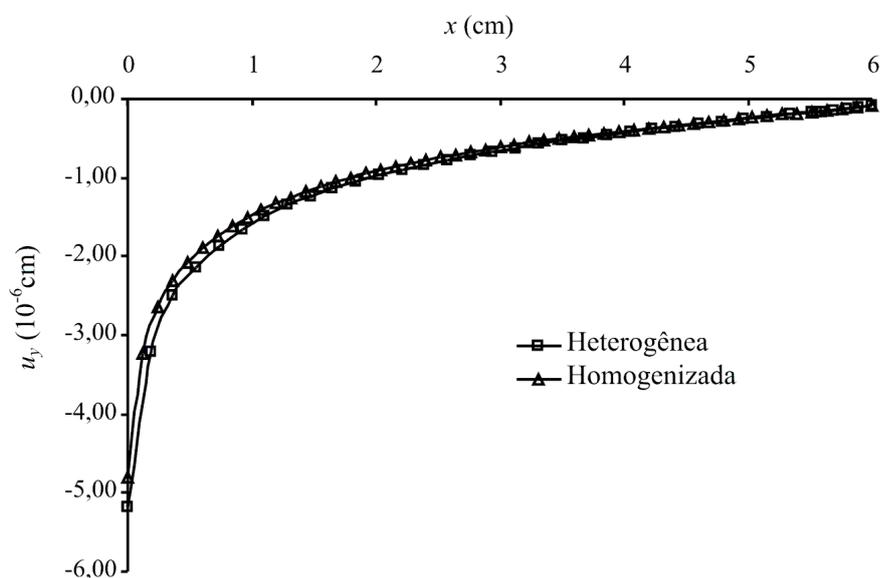


Figura 7: Deslocamento vertical no topo da seção retangular

A Tabela 2 mostra os resultados de deslocamento das análises para a seção circular em compressão diametral. Foram analisados os deslocamentos horizontais nas extremidades do diâmetro horizontal (lados esquerdo e direito), e os deslocamentos verticais no ponto de aplicação da força. Nota-se que a análise homogeneizada produz resultados de deslocamentos bem próximos daqueles obtidos da análise heterogênea. É importante notar que não foi

realizada uma análise de convergência de malha para os casos estudados, dado que o escopo do trabalho é avaliar a aplicação de princípios de homogeneização na previsão do comportamento mecânico de misturas asfálticas.

Tabela 2: Deslocamentos na seção circular em compressão diametral

| Análise | Deslocamentos (cm) | | |
|---------------|--------------------|---------------|----------|
| | u_y (topo) | u_x (lados) | |
| | | Esquerdo | Direito |
| Homogeneizada | -0,00040 | -0,000017 | 0,000017 |
| Heterogênea | -0,00043 | -0,000018 | 0,000017 |

Vale salientar que os valores de deslocamentos horizontais nas extremidades do diâmetro horizontal diferem entre si para a análise heterogênea. Isto se deve às diferenças (distribuição de agregados) existentes entre os dois lados da seção circular ocasionadas pela heterogeneidade do material (Figura 6).

A Tabela 3 mostra as características das malhas de elementos finitos usadas (números de nós e elementos) quando se utiliza e quando não se utiliza a técnica de homogeneização, para ambas as seções analisadas. A análise numérica foi executada usando um processador Pentium IV de 2GHz, 1Gb de memória RAM e sistema operacional Windows XP. Nota-se que o esforço computacional exigido pela análise homogeneizada é bastante inferior àquele exigido pela análise heterogênea.

Tabela 3: Propriedades das malhas de elementos finitos e esforço computacional

| Análise | Propriedades da Malha | | Tempo de análise (s) | Tempo total (s) |
|--|-----------------------|-----------------|----------------------|-----------------|
| | Nº de nós | Nº de elementos | | |
| Local + Global homogeneizadas (retangular) | 1.046 + 6.786 | 1.970 + 13.330 | 5 + 14 | 19 |
| Global heterogênea (retangular) | 26.069 | 51.916 | 2.700 | 2.700 |
| Local + Global homogeneizadas (circular) | 1.046 + 2.613 | 1.970 + 5.024 | 5 + 10 | 15 |
| Global heterogênea (circular) | 33.652 | 67.182 | 22.500 | 22.500 |

As Figuras 8a-d apresentam as malhas deformadas para as estruturas globais homogeneizada e heterogênea para as seções retangular e circular. Os deslocamentos para a seção retangular são multiplicados por um fator 10^6 e os da seção circular por 10^3 de modo a torná-los visíveis na malha. Percebe-se uma semelhança visual entre as malhas deformadas homogeneizada e heterogênea, para ambas as seções.

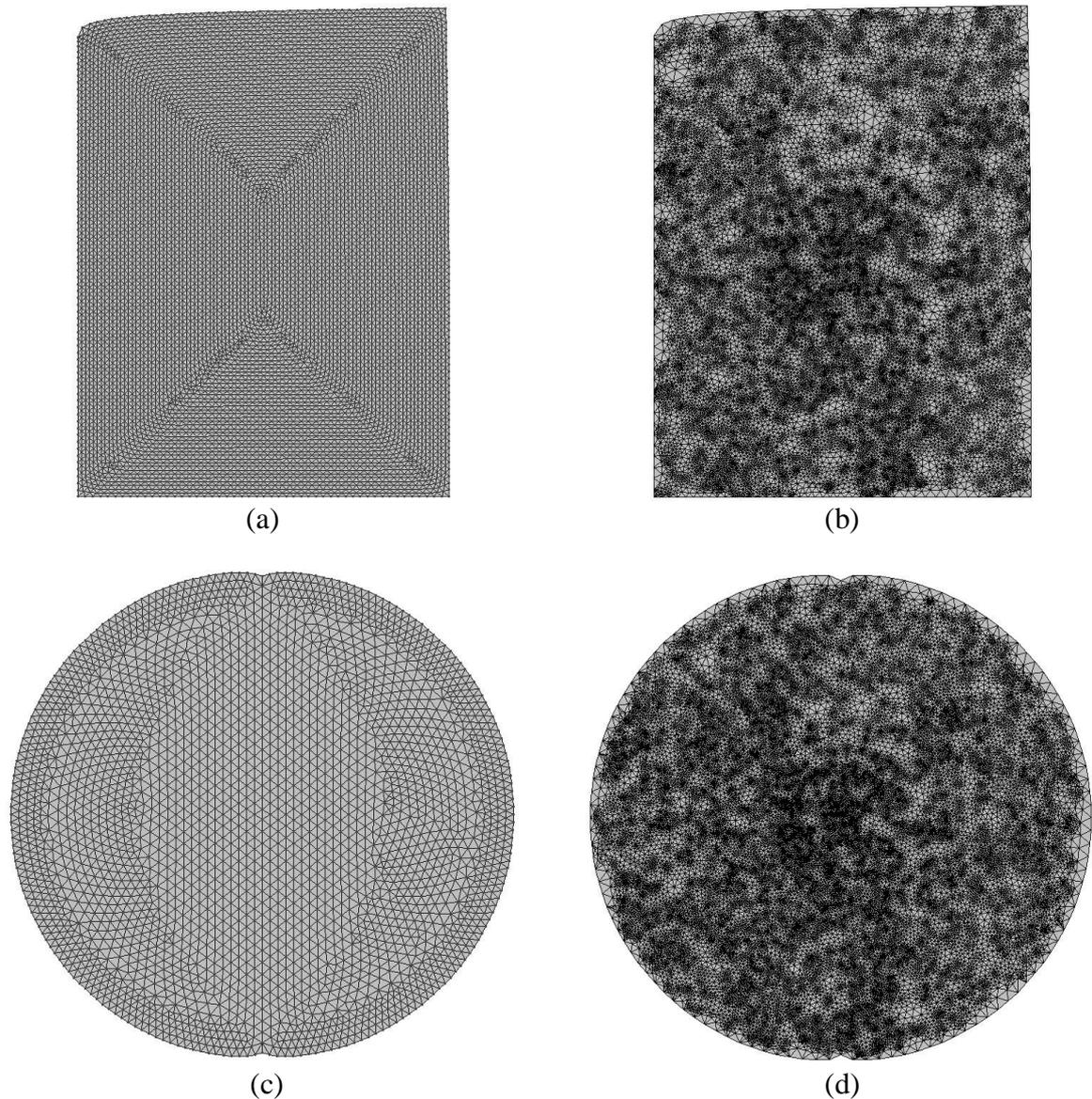


Figura 8: Malhas deformadas: seção retangular (a) homogeneizada e (b) heterogênea; seção circular (c) homogeneizada e (d) heterogênea

5. CONCLUSÕES

Neste artigo foi apresentada a utilização do princípio de homogeneização para uma mistura asfáltica em areia-asfalto. A análise numérica foi realizada por meio do Método dos Elementos Finitos. A eficácia do processo de homogeneização pôde ser verificada comparando os resultados da análise global homogeneizada com aqueles da análise global considerando-se a heterogeneidade do material. Embora os constituintes, ligante e agregado, tenham sido considerados elásticos no presente estudo, a abordagem é suficientemente genérica para incorporar modelos constitutivos mais avançados. Mostra-se que a utilização da técnica traz uma grande vantagem em termos de economia de tempo computacional, tornando a consideração da heterogeneidade do material computacionalmente viável.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Allen, D. H., Harris C.E. e Groves, S.E. (1987a) A thermomechanical constitutive theory for elastic composites with distributed damage – Part I: Theoretical development. *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 23, No. 9, pp. 1301-1318.
- Allen, D. H., Harris C.E. e Groves, S.E. (1987b) A thermomechanical constitutive theory for elastic composites with distributed damage – Part II: Application to matrix cracking in laminated composites. *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 23, No. 9, pp. 1319-1338.
- Allen, D.H. (2001) Homogenization principles and their application to continuum damage mechanics. *Composites Science and Technology*, Vol. 61, pp. 2223-2230.
- Auriault, J.L. (1991) Heterogeneous medium is an equivalent macroscopic description possible? *International Journal of Science*, Vol. 29, No. 7, pp. 785-795.
- Boyd, J.G., Constanzo, F. e Allen, D.H. (1993) A micromechanics approach for constructing locally averaged damage dependent constitutive equations in inelastic composites. *International Journal of Damage Mechanics*, Vol. 2, No. 9, pp. 209-228.
- Chang, K.G. e Meegoda, J.N. (1997) Micro-mechanics simulation of hot mix asphalt. *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 123, No. 5, Maio, pp. 495-503.
- Chebad, G.R., Kim, Y.R., Schapery, R.A., Witczak, M.W. e Bonaquist, R. (2002) Time-temperature superposition principle for asphalt concrete mixtures with growing damage in tension state. *Proceedings, Association of Asphalt Paving Technologists*, Vol. 72.
- Daniel, J.S. e Kim, Y.R. (2002) Development of a simplified fatigue test and analysis procedure using a viscoelastic, continuum damage model. *Proceedings, Association of Asphalt Paving Technologists*, Vol. 72.
- Drugan, W.J. e Willis, J.R. (1996) A micromechanics-based nonlocal constitutive equation and estimates of representative volume element size for elastic composites. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* Vol. 4 No. 44, pp 497-524.
- Hill, R. (1963) Elastic properties of reinforced solids: Some theoretical principles. *Journal Mech. Phys. Solids*, Vol. 11, pp. 347-372.
- Kandhal, P.S. e Koehler, W.S. (1985) Marshall mix design method: current practices. *Proceedings, Association of Asphalt Paving Technologists*, Vol. 54.
- Kim, Y.R. e Little, D. (1990) One-dimensional constitutive modeling of asphalt concrete. *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 116, No. 4, pp. 751-772.
- Lee, J.W., Allen, D.H. e Harris, C.E. (1989) Internal state variable approach for predicting stiffness reductions in fibrous laminated composites with matrix cracks. *Journal of Composite Materials*, Vol. 23, No. 12, pp. 1273-1291.
- Lee, J.W., Allen, D.H. e Harris, C.E. (1991) The upper bounds of reduced axial and shear moduli in cross-ply laminates with matrix cracks. *Composite Materials: Fatigue and Fracture (Third Volume)*, ASTM STP 1110, T.K. O'Brien, Ed., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, pp. 56-69.
- Lee, H-J. e Kim, Y.R (1997) Fatigue characterization of asphalt concrete using viscoelasticity and continuum damage theory. *Proceedings, Association of Asphalt Paving Technologists*, Vol. 66.
- Lee, H-J. e Kim, Y.R. (1998) Viscoelastic constitutive model for asphalt concrete under cyclic loading. *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 124, No. 1, pp.32-40.
- Lytton, R.L., Fernando, E.G., Roque, R., Hiltunen, D. e Stoffels, S.M. (1993) Development and validation of performance prediction models and specifications for asphalt binders and paving mixes. *Strategic Highway Research Program*, National Research Council.
- Park, S. W., Kim, Y. R. e Schapery, R. A. (1996) A Viscoelastic Continuum Damage Model and its Application to Uniaxial Behavior of Asphalt Concrete. *Mechanics of Materials*, v. 24, n° 4, p. 241-255.
- Phillips, M.L., Yoon, C. e Allen, D.H. (1999) A Computational Model for Predicting Damage Evolution in Laminated Composite Plates. *Journal of Engineering Materials and Technology*.
- Saad, M.H., Qingli, D., Parameswaran, V. e Shukla, A. (2003) Simulation of asphalt materials using a finite element micromechanical model with damage mechanics. Apresentado na Reunião Anual do Transportation Research Board.
- Soares, J.B., Allen, D.H., Melo, L.T.B. e Cavalcante Neto, J.B. (2002) Local and global finite element modeling of asphaltic pavements. *Proceedings, Third International Symposium: 3-D Finite Element for Pavement, Analysis, Design and Research*.
- Soares, J. B. e Freitas, F. A. C. (2003) Crack Modeling of Asphaltic Mixtures Considering Heterogeneity of the Material. *TRB 2003 Annual Meeting CD-ROM*.
- Soares, J. B. e Souza, F. V. (2002) Verificação do Comportamento Viscoelástico Linear em Misturas Asfálticas. *Anais do 16º Encontro de Asfalto, IBP, Rio de Janeiro*.

- Souza, F. V. e Soares, J. B. (2002) Previsão do Comportamento Mecânico de Misturas Asfálticas a partir dos Resultados do Ensaio de Creep Estático. Anais do XVI Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, ANPET, Natal, p. 29-41.
- Souza, F. V. e Soares, J. B. (2003) Efeito da Consideração do Comportamento Viscoelástico Linear do Revestimento no Cálculo de Tensões e Deslocamentos em Pavimentos Asfálticos. Artigo submetido ao XVII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, ANPET.

Endereço para correspondência:

Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia – Campus do Pici, S/ N°, Departamento de Engenharia de Transportes, DET Bloco: 703 CEP: 60.455-760, Fortaleza/CE - Brasil. e-mail: freitas@bigred.unl.edu; jsoares@det.ufc.br; flaviovs@det.ufc.br.