

MODELAGEM DA FORMAÇÃO E PROPAGAÇÃO DE TRINCAS EM MISTURAS ASFÁLTICAS

Jorge Barbosa Soares¹

Felipe Araújo Colares de Freitas²

Laboratório de Mecânica dos Pavimentos
Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes
Universidade Federal do Ceará

Recebido: 15/06/2002 - Aprovado: 15/08/2002

RESUMO

O trincamento da camada asfáltica em pavimentos é apontado como o principal defeito das rodovias brasileiras. Estudos experimentais e numéricos sobre este fenômeno vêm sendo realizados considerando o material como homogêneo. Este artigo apresenta uma abordagem numérica baseada na Teoria da Mecânica da Fratura na qual considera-se a heterogeneidade do material, sendo o ligante e os agregados tratados separadamente. As simulações realizadas são verificadas e calibradas através de ensaios laboratoriais simples e convencionais. O estudo trata da formação e propagação de trincas sob carregamentos monotônicos e aponta para uma nova forma de simulação do fenômeno de fadiga de misturas. É ainda discutida a utilização de uma abordagem multi-escala, na qual o dano observado na forma da propagação de trincas na escala local pode ser considerado numa escala global compatível com o pavimento real.

Palavras-chave: Elementos de interface; mistura asfáltica; elementos finitos; mecânica da fratura.

ABSTRACT

Cracking in the asphaltic layer has been pointed out as the major pavement distress in Brazilian roadways. Typically, no consideration for the material heterogeneity has been given on previous studies. This paper presents a numerical method of analysis, based on the theory of fracture mechanics, in which the asphaltic mixture is considered heterogeneous. The binder and the aggregates are treated as separate elements. The simulations performed can be verified and calibrated with simple and conventional laboratory tests. The study investigates crack formation and evolution under monotonic loading. Nevertheless, it also outlines a new method of analysis for fatigue of asphalt mixtures. It is also discussed the use of a multiscale methodology, in which the damage due to cracking in the local scale can be considered in a global analysis at the actual pavement scale.

Keywords: Interface elements; asphalt mixtures; fracture mechanics; finite elements.

1. INTRODUÇÃO

O trincamento da camada asfáltica em pavimentos, por fadiga ou reflexão, é apontado como o principal defeito das rodovias brasileiras (Rodrigues, 1991; Motta, 1991; Medina, 1997). Dada a importância da malha viária com revestimentos asfálticos para a economia do país, justifica-se uma permanente busca de melhor compreensão dos mecanismos que regem os trincamentos nestes revestimentos, para, a partir daí, buscar-se soluções que possam minimizar este dano.

No Brasil, os estudos de trincas em misturas asfálticas e cimentadas vêm sendo abordados principalmente através de investigações experimentais em fadiga utilizando-se corpos de prova extraídos de campo ou fabricados em laboratório (Preussler et al., 1981; Preussler, 1983; Ceratti, 1991; Trichês, 1993; Medina et al., 1992; Benevides, 2000). A pesquisa bibliográfica realizada indica que o mesmo é verdade na grande maioria dos estudos internacionais, nos quais o mecanismo do trincamento também tem sido abordado numa escala acima daquela na qual o fenômeno de fato se inicia (Lytton et al., 1993; Little et al., 1997; Lee e Kim, 1998; Daniel e Kim, 2002). Pouca consideração tem sido feita a heterogeneidade das misturas no que diz respeito a descrição dos fenômenos de formação e propagação de trincas. Chang e Meegoda (1997), utilizando o método dos elementos discretos (*discrete element method*), consideram a heterogeneidade de misturas, porém sem levar em conta ainda a geometria real dos agregados. Do ponto de vista de ensaios de laboratório, técnicas como tomografia computadorizada indicam um caminho para uma análise mais localizada do trincamento em misturas asfálticas (Braz et al., 2000).

Com o objetivo de contribuir para o corpo de conhecimento na área de trincamento em misturas, o presente estudo apresenta uma abordagem baseada na Teoria da Mecânica da Fratura – TMF – na qual considera-se a heterogeneidade do material. Trata-se de uma abordagem numérica pelo Método dos Elementos Finitos – MEF – que pode ser verificada e calibrada através de ensaios laboratoriais simples e convencionais. As misturas asfálticas são tratadas como materiais compósitos, podendo o ligante ser tratado como material viscoelástico, enquanto os agregados podem ser considerados corpos elásticos na forma geométrica real. O caminho da trinca e as interfaces entre os materiais podem ser modelados através de elementos especiais consolidados na literatura (Needleman, 1987; Tvergaard, 1990; Costanzo e Allen, 1996; Soares, 1997). Embora se restrinja a descrição da formação e propagação de trincas sob carregamento monotônico, o estudo aponta uma nova forma de investigação do fenômeno da fadiga em materiais asfálticos.

É discutida ainda a utilização de um esquema multi-escala para problemas encontrados em pavimentação. A formação e propagação de trincas no revestimento de pavimentos têm sido estudadas na escala real do pavimento, aqui chamada escala global, ou então na escala da mistura em corpos de prova de laboratório, aqui denominada escala local. Enquanto a primeira envolve modelagens computacionais para determinação de tensões e deformações do sistema de camadas e a subsequente tentativa de associação destes parâmetros estruturais a observações em campo (Silva, 1995; Benevides, 2000), a segunda está associada a ensaios de fadiga em laboratório para obtenção de parâmetros obtidos a partir de um modelo fenomenológico (Monismith et al., 1985; Pinto, 1991). A associação entre estas duas escalas, que traz ainda embutida as diferenças entre campo e laboratório (geometria, por exemplo), tem sido um dos aspectos menos desenvolvidos nos métodos mecânicos de dimensionamento de pavimentos.

A abordagem aqui apresentada para a modelagem da formação e propagação de trincas em misturas asfálticas possibilita o

uso de escalas diferentes, utilizando na análise global os resultados da análise na escala local. Soares et al. (2002) mostraram o desenvolvimento da análise local em duas dimensões e o desenvolvimento inicial da análise global em três dimensões. A idéia é que o dano na escala local possa ser avaliado a partir da formação e propagação de trincas, sendo a informação passada em forma de mudança na rigidez para a análise na escala global através de técnicas de homogeneização (Allen, 2002). No presente artigo, é discutida e apresentada a análise da formação e propagação de trincas em misturas asfálticas na escala local.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

No Brasil, existe uma tendência de se utilizar métodos mecânicos no dimensionamento de pavimentos (Silva, 1995; Medina, 1997; Benevides, 2000). Motta (1991) estruturou um método de dimensionamento, hoje difundido no país, no qual previne-se o trincamento limitando-se as tensões solicitantes na fibra inferior do revestimento de acordo com parâmetros obtidos em laboratório que são determinados, em geral, pelo ensaio de compressão diametral. O revestimento asfáltico é tratado como um material homogêneo, nenhuma consideração sendo feita à formação e propagação de trincas na escala em que de fato estas se iniciam. Este fenômeno dá origem a um processo de deterioração estrutural que modifica o estado de tensões do revestimento e do sistema de camadas como um todo. Esta deterioração ocorre numa escala local e deve ser de alguma forma computada na análise global.

A TMF tem sido usada como uma base racional para a consideração da formação e propagação de trincas nos materiais asfálticos, embora sempre considerando o material como homogêneo (Jayawickrama e Lytton, 1987; Perng, 1989; Erkens et al., 1997; Owusu-Antwi et al., 1998). No Brasil, o trabalho de Rodrigues (1991) contribuiu para disseminar a TMF em problemas de pavimentação. O referido trabalho fez uso da Lei de Paris (Paris e Erdogan, 1963) para a determinação de parâmetros de fratura de misturas asfálticas a partir de ensaios de fadiga, considerando, entretanto, o material como homogêneo.

2.1. Teoria da Mecânica da Fratura – Modelo de Zona Coesiva

Os métodos de projeto tradicionais não levam em consideração a existência de falhas inerentes aos materiais. Porém, sabe-se que a nível microscópico os materiais possuem imperfeições que causam uma redefinição do estado de tensões e uma conseqüente concentração de tensões nas partes descontínuas (microfissuras). Para levar em conta a existência de falhas em um material, a TMF tem sido usada para considerar a redução de resistência devido à presença de trincas (Hillerborg et al., 1976; Jenq e Perng, 1991; Soares e Zollinger, 1997).

A primeira abordagem da TMF foi proposta por Griffith (1921), na qual assumiu-se que não há deformação plástica no material, ou esta é desprezível (Mecânica da Fratura Elástica Linear – MFEL). Sem uma modificação, a MFEL não deve ser utilizada para descrever o comportamento de um material real, nos casos em que a zona onde se processa a fratura na ponta da trinca não é desprezível quando comparada ao tamanho desta trinca. Esta zona está sempre presente em materiais reais, resultado do escoamento do material no caso de metais, ou da formação de microfissuras para materiais frágeis heterogêneos. O leitor é referido a Planas e Elices (1989) e Shah et al. (1995) para uma discussão sobre diferentes abordagens da TMF.

A abordagem usada no presente trabalho se baseia no chamado modelo de zona coesiva (MZC) desenvolvido por Dugdale

(1960) e Barenblatt (1962). Estes modelos são considerados coesivos por assumirem a existência de tensões (*tractions*) coesivas agindo ao longo da zona de processamento da fratura. A opção pelo MZC deve-se ao fato do mesmo possibilitar a análise da formação e propagação de trincas a partir de trincas pré-existentes ou de uma superfície plena. Este modelo vem sendo usado na modelagem de diversos materiais, inclusive misturas asfálticas (Jenq e Perng, 1991).

A Figura 1 ilustra uma zona coesiva (ZC) no modo I de falha (abertura das faces). A separação das faces começa na tensão de tração σ_{max} , definida originalmente por Barenblatt (1962) como uma resistência teórica geralmente várias ordens de magnitude acima da resistência real do material, e a propagação da trinca é modelada considerando a transferência de tensões ao longo da ZC como dependente do deslocamento relativo das faces. No modo I, a relação constitutiva entre a tensão de coesão σ e a distância de separação w tem sido considerada uma propriedade do material. Alguns exemplos de relações $\sigma(w)$, chamadas curvas de amolecimento, são ilustrados nas Figuras 2a-2c. A área sob a curva $\sigma(w)$ é a energia absorvida por unidade de área da trinca quando a ZC se abre de zero até o máximo deslocamento de abertura, w_c . Os parâmetros σ_{max} , a abertura máxima w_c e a forma de $\sigma(w)$ são as propriedades do material neste modelo. A obtenção de curvas $\sigma(w)$, bem como uma discussão mais aprofundada do modelo e sua respectiva formulação em elementos finitos, podem ser encontradas em Soares (1997).

É importante neste momento desenvolver a relação constitutiva de uma ZC. Needleman (1987), em investigação em metais, foi o primeiro a mostrar um MZC que especificava as tensões coesivas como dependentes dos deslocamentos. Tal qual o modelo original de Barenblatt (1962), no modelo de Needleman, à medida que as faces da ZC se separam, as tensões aumentam, atingem um máximo, e decrescem a zero quando a separação completa ocorre. Conforme pode ser visto nas Figuras 2a e 2b, a diferença entre estes modelos está no fato de que no modelo original desenvolvido para cristais, a intensidade das tensões de coesão é zero para distâncias intermoleculares regulares (b). Com o crescimento da distância de abertura para aproximadamente $1,5b$, as tensões coesivas atingem um valor máximo após o qual decrescem rapidamente com o aumento progressivo da abertura.

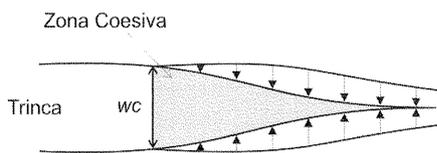


Figura 1. Zona coesiva

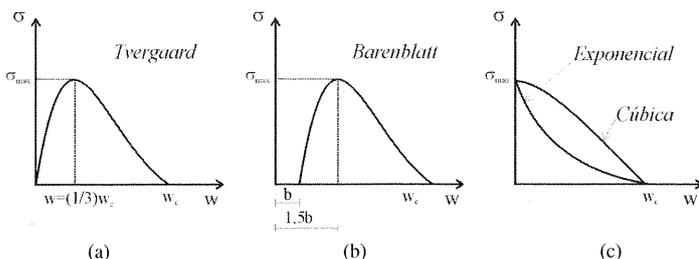


Figura 2. Modelos constitutivos para a zona coesiva

Tvergaard (1990) ampliou o modelo considerando separação normal e tangencial, sendo as tensões acopladas a deslocamentos normais $[u_n = w]$ e tangenciais, $[u_t]$ e $[u_s]$. Em análises bidimensionais, além do deslocamento normal $[u_n]$, apenas um deslocamento tangencial precisa ser considerado $[u_t]$. A extensão para o caso de três dimensões é dada em Foulk (1997). Tvergaard descreve um parâmetro adimensional, λ , que é usado para acoplar o comportamento normal e tangencial:

$$\lambda = \left[\left(\frac{u_n}{w_n} \right)^2 + \left(\frac{u_t}{w_t} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (1)$$

onde $[w_n = w_c]$ e $[w_t]$ são os valores máximos de $[u_n]$ e $[u_t]$, respectivamente. Quando $\lambda \geq 1$, a separação ocorre, ou seja, as tensões de coesão desaparecem. Estas tensões são definidas como funções dos deslocamentos da seguinte forma:

$$T_n = \frac{u_n}{w_n} F(\lambda); \quad T_t = \alpha \frac{u_t}{w_t} F(\lambda) \quad (2)$$

onde α é uma propriedade do material relacionando a resistência normal e a resistência ao cisalhamento, T_n e T_t são as tensões coesivas normal e tangencial dentro da ZC, respectivamente. T ao invés de σ é usado para representar as tensões de coesão no modo misto de fratura (modo II). O modelo é suficientemente genérico de modo que qualquer relação constitutiva $T = T(\lambda)$ pode ser usada. Tvergaard (1990), por exemplo, assumiu um modelo cúbico, $T = 27/4 \sigma_{max} (\lambda - 2\lambda^2 + \lambda^3)$.

Uma vez que o problema de trincas em materiais compósitos não tem solução analítica, ele pode ser resolvido computacionalmente usando o MEF (Allen et al., 1994; Zocher et al., 1997; Foulk et al., 1999). Na análise numérica de um material, pode-se aproximar as propriedades usadas no modelo numérico, $T = T(\lambda)$, σ_{max} e w_c , a partir de ensaios de deformação controlada em que se obtém uma curva força-deslocamento. Ou seja, os parâmetros do modelo são calibrados de modo a reproduzir a curva obtida em laboratório. Este procedimento foi adotado em Soares (1997), obtendo-se excelentes aproximações do comportamento de concreto-cimento tratado como um material homogêneo, tanto para o modo I como para o modo II. Phillips et al. (1999) usaram esta abordagem em materiais compósitos. No presente estudo, esta abordagem é usada pela primeira vez em misturas asfálticas, considerando ligante e agregados como materiais distintos.

2.2. Modelagem do trincamento em misturas asfálticas

A modelagem de materiais submetidos ao dano trincamento pode ser feita de duas maneiras (Kim et al., 1997): (1) abordagem contínua; e (2) abordagem micromecânica. Na primeira, o dano é quantificado pelas chamadas variáveis internas de estado, sendo o seu avanço governado por uma lei de evolução observada em laboratório ou em campo. Uma vantagem deste tipo de modelo é a economia em tempo computacional quando a análise é realizada. Uma desvantagem é que as leis constitutivas são determinadas fenomenologicamente. Os principais trabalhos em misturas asfálticas utilizando esta abordagem têm sido realizados na North Carolina State University por Kim e associados, utilizando as teorias de Schapery (Kim e Little, 1990; Park et al., 1996; Lee e Kim, 1997; Daniel e Kim, 2002; Chebad et al., 2002). Na abordagem micromecânica, os defeitos que constituem o dano, no caso as trincas, são tratados através de modelos como o da ZC. A análise é então feita num volume representativo para determinar o efeito da distribuição de microfissuras nos parâmetros macroscópicos. Como apontado por Kim et al. (1997), esta abordagem é de difícil utilização devido a complexidade da microestrutura e as interações entre as diversas trincas no material.

O trabalho de Allen (2001) aponta na direção da utilização da abordagem micromecânica realizando a análise em escalas diferentes. Analisa-se uma escala de dimensão menor do que a escala de interesse, sendo o dano nesta escala inferior verificado através

da TMF. Assumindo homogeneidade estatística na escala menor, pode-se, através de princípios de homogeneização, analisar a escala maior a partir do dano gerado na escala menor. Princípios de homogeneização têm sido usados em grande número de aplicações em materiais compósitos (Allen et al., 1987a, 1987b; Lee et al., 1989, 1991; Phillips et al., 1999). A vantagem desta abordagem é que os detalhes físicos que ocorrem na escala menor não são perdidos, enquanto estes não estão presentes quando do uso de modelos fenomenológicos na abordagem contínua.

Soares et al. (2002) apresentaram o desenvolvimento de uma análise em três escalas para a análise de misturas asfálticas em pavimentos: (i) micro-escala, onde há dissipação devido a microfissuras no ligante (escala 1); (ii) meso-escala, onde há interação entre o ligante e o agregado (escala 2); e (iii) macro-escala, que corresponde a escala real do pavimento onde observa-se deformação permanente e trincamento (escala 3). A meso-escala é o objeto do presente artigo, sendo as misturas consideradas um compósito com dois materiais distintos: um agregado de comportamento elástico e um ligante, que embora possa ser tratado com comportamento viscoelástico, é considerado elástico para simplicidade de análise. A metodologia descrita a seguir e os resultados apresentados neste artigo representam um importante passo para a utilização da abordagem micromecânica na investigação da formação e propagação de trincas em pavimentos asfálticos.

3. METODOLOGIA

No presente estudo, seções transversais de corpos de prova cilíndricos de misturas asfálticas foram representadas através de malhas de elementos finitos. Duas misturas à quente foram estudadas, sendo uma de areia-asfalto para representar um material aproximadamente homogêneo e uma de concreto betuminoso para testar o modelo num material heterogêneo. A partir das malhas geradas, foram realizadas simulações do comportamento mecânico mediante a aplicação de uma deformação controlada em compressão diametral. As simulações numéricas foram confrontadas com os ensaios laboratoriais.

3.1. Misturas Asfálticas

A mistura em areia-asfalto usinada a quente (AAUQ) usada enquadra-se na Faixa C do Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER, 1997), sendo determinado pelo método Marshall de dosagem um teor de ligante de 8,0%, o volume de vazios – $V_v = 6,9\%$ e a relação betume-vazios – $RBV = 71,0\%$. O concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ) investigado possibilita uma diferenciação mais clara entre os agregados e o ligante durante o processo de discretização da malha de elementos finitos. A curva granulométrica da composição dos agregados – brita 3/4" (16%); brita 3/8" (26%), areia de campo (22%), pó de pedra (35%) e filler (1%) – ficou enquadrada na Faixa C do DNER. Os agregados atenderam às especificações do DNER (ES 313/97) quanto à abrasão, durabilidade, índice de forma (agregado graúdo) e equivalente de areia (agregado miúdo). Também pelo método de dosagem Marshall, o teor determinado foi de 7,0 %, $V_v = 4,0\%$ e $RBV = 77,0\%$. O asfalto utilizado em ambas as misturas foi o CAP 50/60 da Petrobras/Lubnor oriundo do petróleo venezuelano Bachaquero.

3.2. Geração da malha e definição das propriedades dos materiais

O avanço dos geradores de malha facilitou a implementação de elementos especiais na malha de elementos finitos, como os elementos de interface que permitem simular a descontinuidade do material. As malhas de elementos finitos foram geradas com o programa Mtool (TeCCGraf5, 1997), sendo utili-

zados elementos triangulares lineares com o cuidado de diferenciar elementos relativos aos agregados (graúdos) e ao ligante no caso da mistura em concreto betuminoso. Neste caso, o ligante é o mastique formado pelo cimento asfáltico impregnado por finos e agregados miúdos, cuja pequena dimensão torna impraticável seu tratamento numérico de forma isolada. Esta dimensão é limitada pelo tempo computacional da análise. Primeiramente o corpo de prova foi serrado na metade de sua altura e posteriormente digitalizado. A obtenção da malha se dá de acordo com os seguintes passos (Figura 3):

- Digitalização: obtenção da disposição dos agregados na mistura;
- Geometria: definição da forma e dimensões do objeto em estudo;
- Sub-regiões: definição de sub-regiões internas do objeto (agregados);
- Pré-definição da linha de ruptura: definição e inserção de elementos de interface no local de ruptura;
- Sub-divisão: determinação do número de divisões para cada contorno das regiões;
- Malha: transformação das etapas anteriores em elementos finitos.

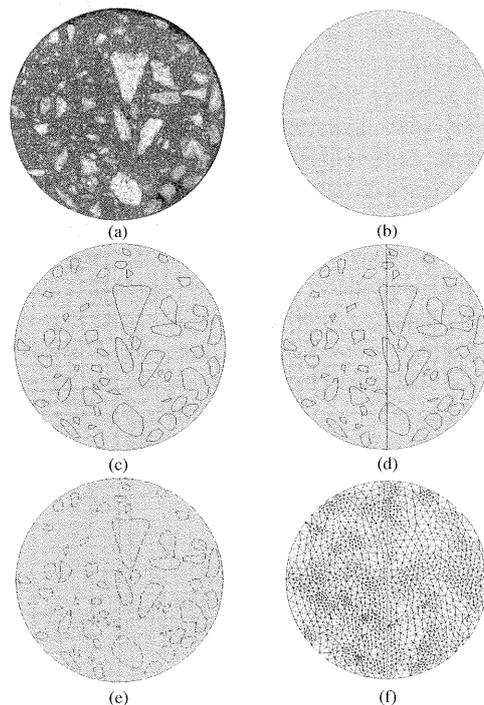


Figura 3. Etapas do processo de geração da malha de elementos finitos:

- Digitalização;
- Geometria;
- Sub-regiões;
- Pré-definição da linha de ruptura;
- Sub-divisão;
- Malha

Após a discretização da malha, prosseguiu-se com a definição das características dos materiais. No caso da mistura em AAUQ foi usado um módulo de elasticidade E único para o material homogêneo de 15.000 kgf/cm^2 , sendo este valor assumido a partir de valores de módulo de resiliência encontrados na literatura (Aldigueri, 2001). Um valor de 0,3 foi assumido para o coeficiente de Poisson ν . Para a mistura em CBUQ, os seguintes valores obtidos da literatura foram adotados para os parâmetros elásticos: (i) agregado: $E = 405.000 \text{ kgf/cm}^2$ e $\nu = 0,2$ (Mehta e Monteiro, 1993); (ii) ligante impregnado com finos: $E = 20.250 \text{ kgf/cm}^2$ e $\nu =$

0,3. É importante observar que a consideração de comportamento elástico do ligante é uma simplificação. No estudo de Souza e Soares (2002) descreve-se a obtenção de propriedades viscoelásticas de materiais betuminosos.

Para as propriedades dos elementos de interface, diferentes curvas de amolecimento $T = T(\lambda)$ e valores de σ_{max} e w_c foram testados de modo a reproduzir a curva força-deslocamento obtida em laboratório, para ambas as análises de mistura homogênea (AAUQ) e heterogênea (CBUQ). No caso da mistura homogênea existe apenas um tipo de elemento de interface ao longo do diâmetro solicitado no ensaio de compressão diametral. Trata-se, portanto, de um elemento de interface característico do AAUQ analisado. No caso da mistura heterogênea, existem três situações que podem ocorrer quando se considera o diâmetro solicitado: (i) descontinuidade do agregado; (ii) descontinuidade do ligante; e (iii) descontinuidade da interface ligante-agregado. Portanto, há a necessidade de se assumir propriedades do MZC para estas três situações distintas. Em todos os casos, a curva $T = T(\lambda)$ cúbica de Tvergaard (1990) e discutida em Soares (1997) foi assumida. Os valores dos outros dois parâmetros (σ_{max} e w_c) do modelo são calibrados conforme apresentado mais adiante.

3.3. Análise Computacional x Experimental

A etapa seguinte é a análise propriamente dita na qual são executados os cálculos de tensões e deformações. Embora o programa de análise utilizado (Allen et al., 1994) tenha capacidade de modelar o comportamento viscoelástico e viscoplástico dos materiais, o ligante foi considerado como um material elástico linear. A calibração do modelo numérico foi feita através da realização de ensaios a deformação controlada em corpos de prova confeccionados em laboratório. Conforme anteriormente mencionado, as propriedades dos elementos de interface do modelo numérico foram ajustadas de forma a permitir que a curva força-deslocamento determinada computacionalmente coincida com a curva experimental. A partir desta curva é possível se verificar a carga de ruptura bem como se ter uma indicação da energia necessária para esta ruptura. O estudo realizado possibilita pela primeira vez a estimativa de propriedades de fratura associadas ao MZC em misturas asfálticas. Conforme é mostrado na seção seguinte, as simulações são capazes de reproduzir os resultados experimentais.

A mistura em areia-asfalto usinada a quente (AAUQ) usada enquadra-se na Faixa C do Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER, 1997), sendo determinado pelo método Marshall de dosagem um teor de ligante de 8,0%, o volume de vazios - $V_v = 6,9\%$ e a relação betume-vazios - $RBV = 71,0\%$. O concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ) investigado possibilita uma diferenciação mais clara entre os agregados e o ligante durante o processo de discretização da malha de elementos finitos. A curva granulométrica da composição dos agregados - brita 3/4" (16%); brita 3/8" (26%), areia de campo (22%), pó de pedra (35%) e filler (1%) - ficou enquadrada na Faixa C do DNER. Os agregados atenderam às especificações do DNER (ES 313/97) quanto à abrasão, durabilidade, índice de forma (agregado graúdo) e equivalente de areia (agregado miúdo). Também pelo método de dosagem Marshall, o teor determinado foi de 7,0 %, $V_v = 4,0\%$ e $RBV = 77,0\%$. O asfalto utilizado em ambas as misturas foi o CAP 50/60 da Petrobras/Lubnor oriundo do petróleo venezuelano Bachaquero.

4. RESULTADOS

Os resultados dos ensaios de deformação controlada em compressão diametral (curva força-deslocamento) são confrontados com os resultados da simulação numérica considerando a mistura como homogênea (AAUQ) e heterogênea (CBUQ) nas

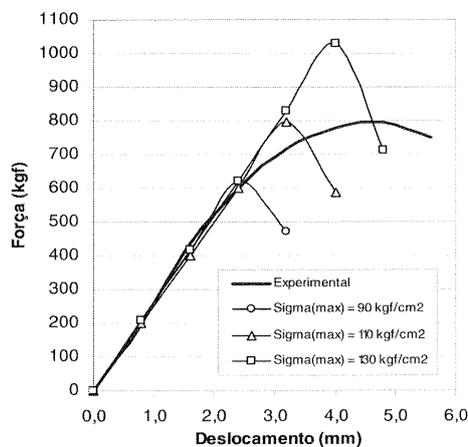
Figuras 4a-4d. Uma observação das referidas figuras permite uma análise de sensibilidade com relação aos parâmetros do MZC.

Para o AAUQ o modelo numérico se aproxima mais do resultado experimental quando se utiliza com a curva $T = T(\lambda)$ cúbica assumida, $w_c = 7,1 \times 10^{-3} \text{ cm}$ e $\sigma_{max} = 110 \text{ kgf/cm}^2$. O valor de w_c é uma ordem de grandeza acima dos valores usados em Soares (1997) para modelagem da propagação de trincas em concreto-cimento, o que era esperado dada a maior ductilidade do material betuminoso. Conforme afirma Barenblatt (1962), σ_{max} pode assumir um valor teórico proporcional a rigidez do material. Para alguns materiais e modelos de curvas de amolecimento este valor pode se aproximar do valor da resistência à tração do material (Hillerborg et al., 1976). A Figura 4a mostra a sensibilidade da simulação numérica ao parâmetro σ_{max} utilizando $w_c = 7,1 \times 10^{-3} \text{ cm}$, enquanto a Figura 4b mostra a sensibilidade ao parâmetro w_c utilizando $\sigma_{max} = 110 \text{ kgf/cm}^2$.

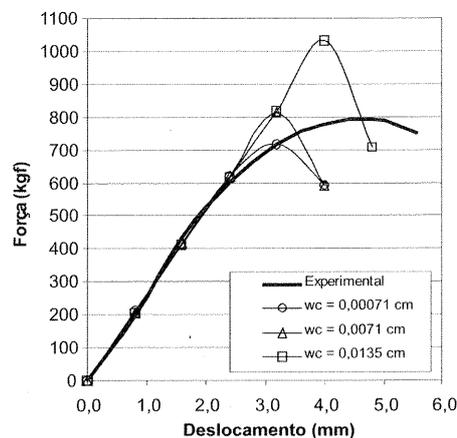
A mesma curva de amolecimento produziu simulações adequadas para o caso da mistura heterogênea com os seguintes valores assumidos para os parâmetros do MZC nas três possibilidades de interface ao longo do diâmetro solicitado:

- (i) Descontinuidade do agregado: $w_c = 4,0 \times 10^{-6} \text{ cm}$ e $\sigma_{max} = 165 \text{ kgf/cm}^2$;
- (ii) Descontinuidade do ligante: $w_c = 7,1 \times 10^{-3} \text{ cm}$ e $\sigma_{max} = 40 \text{ kgf/cm}^2$;
- (iii) Descontinuidade da interface ligante-agregado: $w_c = 7,1 \times 10^{-4} \text{ cm}$ e $\sigma_{max} = 5 \text{ kgf/cm}^2$.

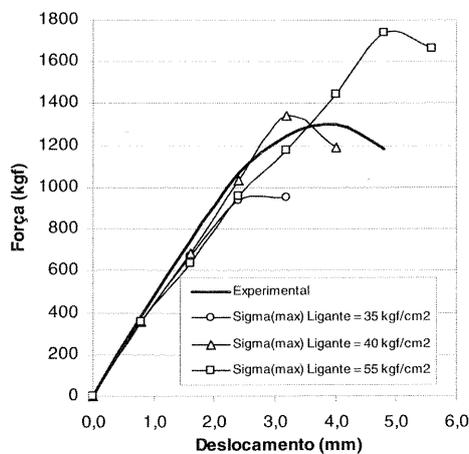
A Figuras 4c e 4d apresentam, para os três valores de w_c acima, a análise de sensibilidade da simulação ao valor de σ_{max} do ligante (impregnado de finos) e do agregado, respectivamente. Embora o ligante no caso heterogêneo seja similar ao material do caso homogêneo, o valor de σ_{max} necessário para reproduzir os ensaios de laboratório foi diferente, indicando a importância da calibração dos parâmetros.



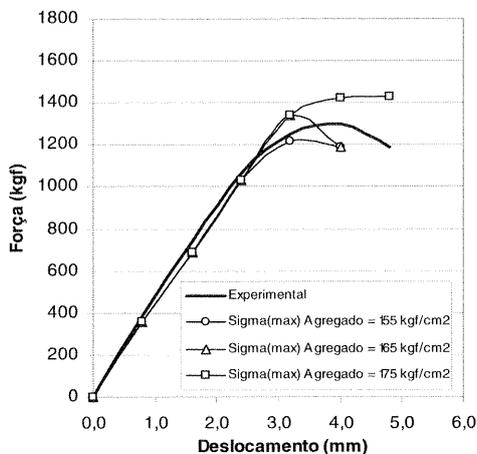
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 4. Simulação numérica \times experimental: (a) AAUQ: w_c fixo; (b) AAUQ: σ_{max} fixo; (c) CBUQ: variando σ_{max} do ligante; (d) CBUQ: variando σ_{max} do agregado

As Figuras 5a-5c apresentam a simulação do processo de formação e propagação da trinca considerando a mistura em areia asfalto para três tempos diferentes ao longo do ensaio de compressão diametral. É interessante observar na Figura 5b que a formação da trinca se inicia no local onde a deformação é máxima, sendo esta calculada a partir das equações analíticas para as tensões verticais e horizontais em corpos elásticos submetidos ao ensaio de compressão diametral na presença de frisos (Hondros, 1959). Este ponto não é o centro do cilindro como aponta também o estudo de Falcão e Soares (2002) para diferentes materiais de pavimentação considerados homogêneos, e ainda a observação experimental de Castro-Montero et al. (1995) num estudo em argamassa de cimento, utilizando a técnica de interferometria holográfica a laser. Neste último estudo, observou-se que o processo de formação da trinca se inicia a 70% da carga de ruptura na região de deformação máxima. No presente estudo, com os parâmetros usados, observou-se que a primeira separação de nós dos elementos de interface ocorre a 76% da carga máxima. Tal fato pode ser verificado apenas em laboratório através de técnicas precisas como a usada por Castro-Montero et al. (1995).

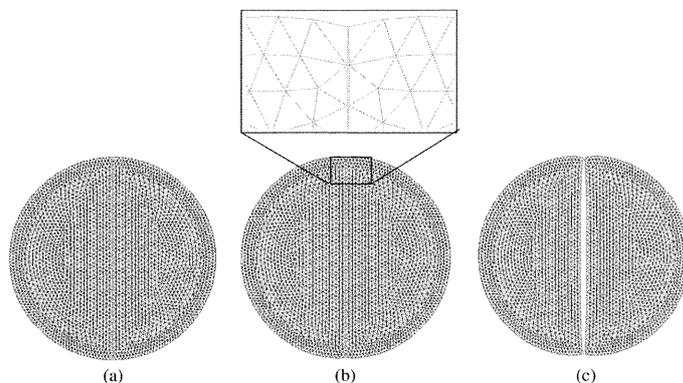


Figura 5. Simulação do ensaio de compressão diametral num corpo de prova homogêneo:

- (a) $F = 0$ kgf (0 seg);
- (b) $F = 620$ kgf = 76% F_{max} (3 seg);
- (c) $F = 815$ kgf = 100% F_{max} (4 seg)

As Figuras 6a-6c apresentam a formação e propagação da trinca considerando a mistura em CBUQ, sendo o início da trinca na mesma região de deformação máxima (Figura 6b) quando se considera o corpo de prova homogêneo. Os nós dos elementos de interface começam a se separar a 77% da carga de ruptura.

Os resultados apresentados mostram o enorme potencial da abordagem desenvolvida. A análise da formação e propagação de trincas em misturas betuminosas na escala em que de fato estes processos se iniciam pode ainda ser refinada considerando elementos de ZC na interface entre os materiais constituintes da mistura não só ao longo do diâmetro solicitado. Torna-se então possível observar, através da simulação, a formação de trincas em diferentes locais do corpo de prova, semelhantemente ao que foi observado experimentalmente em Braz et al. (2000). O grande potencial, entretanto, está na utilização da modelagem na escala real de um pavimento. Antes disso, as propriedades do modelo devem ser calibradas considerando diferentes misturas para que se adquira maior confiança nos valores utilizados para os materiais constituintes.

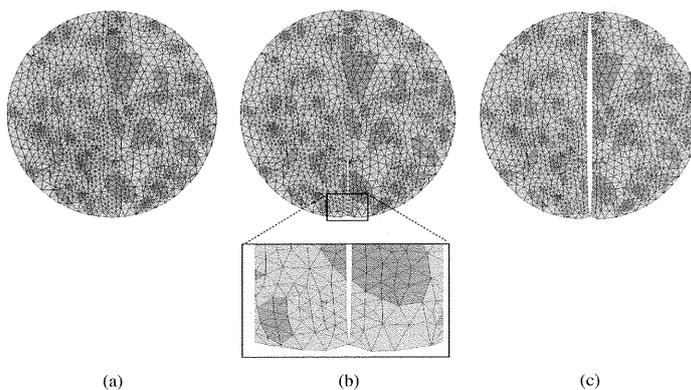


Figura 6. Simulação do ensaio de compressão diametral num corpo de prova heterogêneo:

- (a) $F = 0$ kgf (0 seg);
- (b) $F = 1.031$ kgf = 77% F_{max} (3 seg);
- (c) $F = 1.338$ kgf = 100% F_{max} (4 seg)

5. CONCLUSÕES

Não tem sido costume nos estudos de trincamento em misturas asfálticas considerar-se a heterogeneidade do material, o que impede um maior entendimento do mecanismo da formação e propagação das trincas neste composto. O presente trabalho faz uso da abordagem micromecânica para investigação do fenômeno do trincamento em misturas asfálticas. A abordagem

utiliza elementos de zona coesiva consagrados na Teoria da Mecânica da Fratura para a modelagem das trincas. A análise numérica feita pelo Método dos Elementos Finitos pode ser verificada e calibrada através de ensaios laboratoriais simples e convencionais. Quanto aos materiais, o ligante e os agregados são tratados como elásticos, mas a abordagem discutida é suficientemente genérica para permitir a utilização de modelos constitutivos mais avançados. Embora o estudo trate da formação e propagação de trincas sob carregamentos monotônicos, abre-se uma nova possibilidade para a simulação do fenômeno de fadiga. Avanços neste sentido serão ditados pela velocidade de processamento necessária devido a sucessiva aplicação de cargas. Um aumento na velocidade de processamento facilitará ainda a realização de simulações assumindo elementos de interface entre os materiais distintos nos diversos locais do sólido além do local pré-definido para a propagação da trinca. Foi discutida ainda a possibilidade da análise aqui desenvolvida numa escala local ser usada numa abordagem multi-escala. Desta forma o dano observado na forma da propagação de trincas seria considerado na escala global compatível com o pavimento real.

Agradecimentos

Os autores agradecem à equipe do Laboratório de Mecânica dos Pavimentos da Universidade Federal do Ceará – LMP/UFC e ao Prof. David Allen pelo incentivo e suporte ao trabalho. O primeiro autor agradece ao CNPq e o segundo autor a Agência Nacional do Petróleo pelas respectivas bolsas de pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aldigueri, D.R. (2001) Estudo de misturas de areia-asfalto usinadas a quente com asfaltos de diferentes consistências para revestimento de pavimentos do Estado do Ceará. Tese de Mestrado, Escola Politécnica da USP.
- 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., Jones, R.H. e Boyd, J.G. (1994) Micromechanical analysis of a continuous fiber metal matrix composite including the effects of matrix viscoplasticity and evolving damage. *Journal of Mechanics and Physics of Solids*, 42(3), 505-529.
- Allen, D.H. (2001) Homogenization principles and their application to continuum damage mechanics. *Composites Science and Technology*, Vol. 61, pp. 2223-2230.
- Barenblatt, G.I. (1962) Mathematical theory of equilibrium cracks in brittle fracture. *Advances in Applied Mechanics*, Volume 7, pp. 55-129, Academic Press, New York.
- Benevides, S. A. S. (2000) Análise comparativa dos métodos de dimensionamento de pavimentos asfálticos – empírico do DNER e resiliência da COPPE/UFRJ – em rodovias do Ceará. Tese de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- Braz, D., Lopes, R.T. e Motta, L.M.G. (2000) Computed tomography: an evaluation of the effect of adding polymer SBS to asphaltic mixtures used in paving. *Applied Radiation and Isotopes*, Vol. 53, pp. 725-729.
- Castro-Montero, A., Jia, Z. e Shah, S. P. (1995) Evaluation of damage in Brazilian test using holographic interferometry. *ACI Materials Journal*. Title No. 92-M29.
- Ceratti, J.A.P. (1991) Estudo do comportamento a fadiga se solos estabilizados com cimento para utilização em pavimentos. Tese de Doutorado. COPPE/Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- 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., Witzczak, 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.
- Costanzo, F. e Allen, D.H. (1996) A continuum thermodynamic analysis of cohesive zone models. *International Journal of Engineering Science*, Vol. 33, No. 15, pp. 2197-2219.
- 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.
- DNER (1997) Especificações gerais para obras rodoviárias do DNER, ES 313/97. Volume III/IV, Pavimentos Flexíveis. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem.
- Dugdale, D. (1960) Yielding of steel sheets containing slits. *Journal of Mechanics and Physics of Solids*, Volume 8, pp. 100-104.
- Erkens, S.M.J.G., Moraal, J., Molenaar, A., Groenendijk, J. e Jacobs, M. (1997) Using Paris' Law to determine fatigue characteristics – A discussion. Eighth International Conference on Asphalt Pavements, Seattle, Washington, Estados Unidos, pp. 1123-1140.
- Falcão, M.F.B. e Soares, J.B. (2002) Considerações sobre o ensaio de compressão diametral no estudo de materiais de pavimentação. XVI Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, ANPET, Natal, Vol. 1, pp. 169-181.
- Fouk, J.W., Allen, D.H. e Helms, K.L.E. (1999) Formulation of a three-dimensional cohesive zone model for application to a finite element algorithm. *Computational Methods in Applied Mechanics and Engineering*.
- Griffith, A.A. (1921) The phenomena of rupture and flow in solids. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series A* 221, pp. 163-198.
- Hillerborg, A., Modeer, M. e Peterson, P.E. (1976) Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements. *Cement and Concrete Research*, Vol. 6, No. 6, 773-782.

- Hondros, G. (1959) The Evaluation of Poisson's Ratio and the Modulus of Materials of a Low Tensile Resistance by Brazilian (Indirect Tensile) Test with Particular Reference to Concrete. *Australian J. Appl. Sci.*, 10 (3).
- Jayawickrama, P.W. e Lytton, R. (1987) Methodology for predicting asphalt concrete overlay life against reflection cracking. *Sixth International Conference Structural Design of Asphalt Pavements*, Vol. I, 912-924
- Jenq, Y-S. e Perng, J-D. (1991) Analysis of crack propagation in asphalt concrete using cohesive crack model. *Transportation Research Record* 1317, pp. 90-99.
- 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.
- Kim, Y.R. Lee, H-J. e Little, D. (1997) Fatigue characterization of asphalt concrete using viscoelasticity and continuum damage theory. *Proceedings, Association of Asphalt Paving Technologists*, Vol. 66, pp. 520-558.
- 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, 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, 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.
- Little, D.N., Lytton, R.L., Williams, D. e Kim, Y.R. (1997) Propagation and healing of microcracks in asphalt concrete and their contribution to fatigue. *Asphalt Science and Technology*, editado por Artur M. Usmani, Indianapolis, Indiana, Marcel Dekker, Inc.
- 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.
- Medina, J. (1997) *Mecânica dos Pavimentos*, 1 ed. COPPE/UFRJ, p. 380.
- Medina, J., Motta, L.M., Pinto, S. e Leite, L.M. (1992) Um estudo de fadiga de misturas asfálticas com seis cimentos asfálticos da Petrobras. *10º Encontro de Asfalto*, Instituto Brasileiro de Petróleo, IBP, Rio de Janeiro, pp. 56-63.
- Mehta, P.K. e Monteiro, P.J.M. (1993) *Concrete, structure, properties and materials*. Prentice Hall, New Jersey, p. 548.
- Monismith, C.L., Epps, J.A. e Finn, F.N. (1985) Improved asphalt mix design. *Proceedings, Association of Asphalt Paving Technologists*, Vol. 54, pp. 347-406.
- Motta, L.M.G. (1991) Método de dimensionamento de pavimentos flexíveis; parâmetro de confiabilidade e ensaios de cargas repetidas. *Tese de Doutorado*, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.
- Needleman, A. (1987). A continuum model for void nucleation by inclusion debonding. *Journal of Applied Mechanics*, September, Vol. 54, 525-531.
- Owusu-Antwi, E., Khazanovich, L. e Titus-Glover, L. (1998) A mechanistic-based model for predicting reflective cracking in AV overlaid pavements. *77th Annual Meeting*, Transportation Research Board.
- Paris, P.C. e Erdogan, F. (1963) A critical analysis of crack propagation laws. *Transactions of the American Society for Mechanical Engineers, Journal of Basic Engineering, Series D, Volume 85, No. 3.*
- 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*, Vol. 24, pp. 241-255.
- Perng, J-D. (1989) Analysis of crack propagation in asphalt concrete using a cohesive crack model. *Tese de Doutorado*, Ohio State University.
- 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*.
- Pinto, S. (1991) Estudo do comportamento à fadiga de misturas betuminosas e aplicação na avaliação estrutural de pavimentos, *Tese de Doutorado*, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.
- Planas, J. e Elices, M. (1989) Size-effect in concrete structures: mathematical approximations and experimental validation. *Cracking and damage: strain localization and size effect*, Ed. By J. Mazars e Z.P. Bazant, Elsevier, London, UK, pp. 462-476.
- Preussler, E.S., Pinto, S. e Medina, J. (1981) Determinação da vida de fadiga de concretos asfálticos brasileiros e aplicação no dimensionamento de reforço de pavimentos. *Anais da 20ª Reunião Anual de Pavimentação*. ABPv.
- Preussler, E.S. (1983) Estudo de deformação resiliente de pavimentos flexíveis e aplicação ao projeto de camadas de reforço. *Tese de Doutorado*, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.
- Rodrigues, R.M. (1991) Estudo do trincamento dos pavimentos. *Tese de Doutorado*, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.
- Shah, S.P., Swartz, S.E. e Ouyang, C. (1995). *Fracture mechanics of concrete*. John Wiley & Sons, Inc., New York.
- Silva, P.D.E.A. (1995) Contribuição para o aperfeiçoamento do emprego do programa FEPAVE2 em estudos e projetos de pa-

vimentos flexíveis. Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.

Soares, J.B. (1997) Concrete characterization through fracture mechanics and selected pavement applications. Tese de Doutorado, Texas A&M University, College Station, TX.

Soares, J.B. e Zollinger, D.G. (1997) A compatible approach to concrete strength characterization in the design and construction of concrete pavements. Transportation Research Record 1568, 89-95.

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.

Souza, F.V. e Soares, J.B. (2002) Previsão do Comportamento Mecânico de Materiais Asfálticos a Partir dos Resultados do

Ensaio de Creep Estático. XVI Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, ANPET, Natal, Vol. 1, pp. 29-41.

TeCGraf5 (1997) MTOOL – Bidimensional Mesh Tool, Versão 3.0. Grupo de Tecnologia em Computação Gráfica, PUC-Rio.

Trichês, G. (1993) Concreto compactado a rolo para aplicação em pavimentação. Estudo do comportamento na fadiga e proposição de metodologia de dimensionamento. Tese de Doutorado, Instituto Tecnológico da Aeronáutica, São José dos Campos.

Tvergaard, V. (1990) Effect of fibre debonding in a whisker-reinforced metal. Materials Science and Engineering, A125, 203-213.

Zocher, M.A., Allen, D.H. e Groves, S.E. (1997) A three-dimensional finite element formulation for thermoviscoelastic orthotropic media. International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol. 40, pp. 2267-2288.

CONTATOS

¹ Jorge Barbosa Soares

E-mail: jsoares@det.ufc.br

² Felipe Araújo Colares de Freitas

E-mail: freitas@det.ufc.br