

DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DE PARÂMETROS DE DANO VISCOELÁSTICOS EM MISTURAS ASFÁLTICAS

Felipe Araújo Colares de Freitas

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

Jorge Barbosa Soares

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

David H. Allen

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

RESUMO

O trincamento das camadas asfálticas de revestimentos em pavimentos é apontado como um dos principais defeitos em rodovias. Estudos recentes sobre esse fenômeno têm utilizado modelos micromecânicos baseados na Teoria da Mecânica da Fratura e na Mecânica do Contínuo. Esses estudos se utilizam de modelos fenomenológicos de evolução de dano devido à dificuldade de realização de ensaios em escalas reduzidas. Este artigo apresenta um procedimento experimental baseado no modelo de zona coesiva micromecânico para a determinação de parâmetros de dano viscoelásticos em misturas asfálticas.

ABSTRACT

Cracking of pavement asphaltic layers is known to be one of the major distresses in roadways. Recent studies related to this phenomena have used micromechanics models based on the Theory of Fracture Mechanics and Continuum Mechanics. These studies use phenomenological models of damage evolution due to the difficulty in performing reduced scale tests. This paper presents a laboratorial procedure based on a micromechanical cohesive zone model for the determination of viscoelastic damage parameters for asphaltic mixtures.

1. INTRODUÇÃO

Entre os tipos comuns de defeitos dos pavimentos brasileiros, destacam-se o trincamento por fadiga e o afundamento plástico em trilha de roda (Motta, 1991; Pinto, 1991). Esses fenômenos que ocorrem na escala do pavimento (escala global), geralmente são oriundos de escalas menores (escala local) (Freitas *et al.*, 2003). As abordagens micromecânicas ajudam no melhor entendimento do comportamento mecânico em ambas as escalas. A fim de prever corretamente a propagação e a formação de trincas em misturas betuminosas empregadas em pavimentos, é preciso determinar propriedades das misturas que governem a resistência ao trincamento. Allen e Searcy (2001) desenvolveram um Modelo de Zona Coesiva Micromecânico Viscoelástica (MZC-MV). Apesar do referido trabalho apresentar uma interpretação física e genérica para o problema, a análise foi realizada através de uma lei fenomenológica de dano.

O estudo ora descrito apresenta um procedimento experimental baseado no MZC-MV. Apresenta-se um equipamento compacto de tensão desenvolvido para a determinação de dano viscoelástico em misturas asfálticas. No presente artigo as misturas asfálticas são consideradas apenas a parte referente ao ligante e aos finos, ou seja, o que se denomina comumente como mastic. Os parâmetros determinados são utilizados na equação constitutiva determinada por Allen e Searcy (2001). A partir dessa abordagem é possível uma análise multi-escala de pavimentos, na qual o aparecimento de trincas na escala local pode ser incorporado na escala global na forma de perda de rigidez das camadas (Souza, 2005). Essa

técnica é possível através de princípios de homogenização (Allen *et al.*, 1987a, 1987b; Lee *et al.*, 1989, 1991; Allen e Yoon, 1998; Phillips *et al.*, 1999; Allen, 2001; Freitas *et al.*, 2003).

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A primeira abordagem da TMF foi proposta por Griffith (1921). Nesse trabalho, foi proposto que um corpo frágil rompe devido à concentração de tensões provocadas pela presença de trincas internas. A instabilidade da trinca ocorre quando o crescimento da energia de superfície (*surface energy*), causado pela propagação da trinca, é balanceado pelo desprendimento de energia de deformação elástica (*elastic strain energy*) no volume em torno da trinca. Nesse critério de energia, Griffith desconsidera a existência de deformação plástica no material. Essa abordagem é conhecida como teoria da Mecânica da Fratura Elástica Linear (*linear elastic fracture mechanics* - LEFM).

Planas e Elices (1989) dividiram os modelos de fratura em dois grupos: (1) elástico-lineares modificados e (2) modelo de amolecimento progressivo (*progressive softening models*). Essa divisão está relacionada ao comportamento do material em questão, podendo ele ser frágil (ruptura drástica) ou *quasi-frágil* (certa resistência é observada após a ruptura). A relação entre esses modelos pode ser encontrada em Planas e Elices (1989, 1990) e Shah *et al.* (1995).

No caso de misturas asfálticas, o material pode se tornar frágil devido ao envelhecimento causado pela oxidação ou devido à baixa temperatura, ficando assim mais susceptível ao trincamento (Moavenzadeh, 1970). Para temperaturas mais elevadas, a análise dessas misturas se torna mais complexa devido à ocorrência de um escoamento plástico (Schapery, 1973, 1981, 1984, 1986). Dugdale (1960) e Barenblatt (1962) desenvolveram modelos que levam em consideração a existência dessa zona plástica. Esses modelos são chamados de coesivos devido a existência de forças de coesivas agindo ao longo da zona de processamento da fratura (Modelo de Zona Coesiva – MZC). Needleman (1987) e Tvergaard (1990) aperfeiçoaram os MZC adicionando relações potenciais e uma lei cúbica que relaciona as forças de superfície ao deslocamento entre as faces da trinca, respectivamente. Modelos alternativos têm sido desenvolvidos para considerar o efeito da zona plástica em meios viscoelásticos (Schapery, 1975a, 1975b, 1975c).

2.1 Modelo Micromecânico para ZCV

Allen e Searcy (2001) definem a ZC como sendo uma substituição matemática da zona danificada (*damaged zone*) por uma superfície (2D) mecanicamente equivalente submetida a ação de forças de tração na superfície. Neste caso, a zona danificada (Figura 1a) é considerada muito pequena em comparação com a dimensão da região (Figura 1b). Essa grande diferença entre as escalas é que permite uma formulação analítica de problemas que envolvem a referida zona.

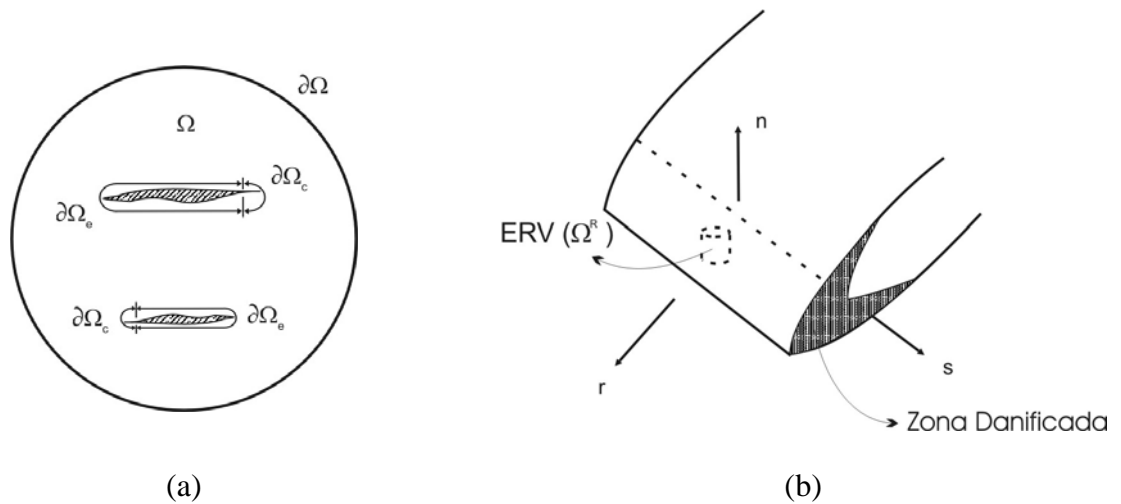


Figura 1: a) Escala global; b) Zona coesiva (Allen e Searcy, 2001)

No referido trabalho, um Elemento de Volume Representativo (EVR) é idealizado como um conjunto de fibras cilíndricas viscoelásticas envolvidas por vazios (Figura 2). Pelo fato da dimensão característica do EVR (nesse caso o comprimento das fibras) ser muito pequena em relação ao tamanho da zona danificada, foi possível utilizar-se de princípios de homogenização para que o EVR heterogêneo (fibras + vazios) seja trocado por um meio homogêneo equivalente.

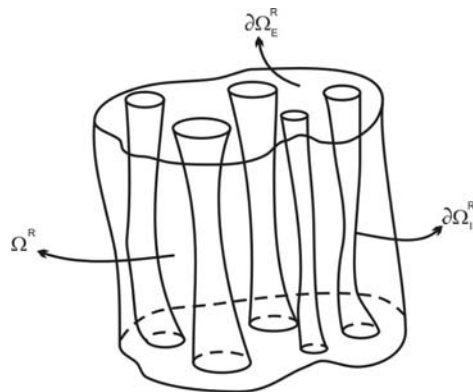


Figura 2: Elemento de Volume Representativo – EVR (Allen e Searcy, 2001)

Para que o problema micromecânico pudesse ser solucionado de forma direta, a geometria do EVR foi simplificada como mostra a Figura 3. As fibras foram consideradas cilindros circulares retos com propriedades viscoelásticas iguais as do material nos arredores da zona danificada. As fibras apresentam ainda características de suportarem apenas carregamentos espacialmente homogêneos e uniaxiais (ao longo da fibra). De acordo com essas hipóteses os autores definiram uma relação tração-deslocamento para cada fibra (Equação 1).

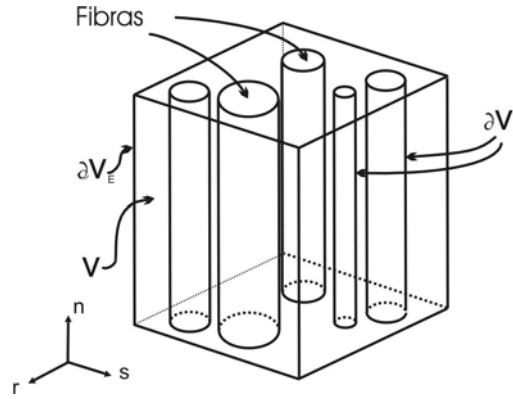


Figura 3: Simplificação geométrica do EVR (Allen e Searcy, 2001)

$$t_i = \frac{u_i(t)}{\delta_i \cdot \lambda(t)} \cdot \left[\sigma_i^f + \int_{t_0}^t E^c(t-\tau) \frac{\partial \lambda(t)}{\partial \tau} d\tau \right] \quad (1)$$

onde t_i são os componentes da tração nas direções i ; σ_i^f é o estado de tensão necessário para o início da evolução do dano; E^c é o módulo de relaxação viscoelástico linear da zona coesiva; δ_i é definido como o parâmetro empírico de comprimento do material nas direções i ; u_i são deslocamentos nas direções i ; λ é definido como a deformação longitudinal imposta das fibras (Equação 2).

$$\lambda \equiv \left[\left(\frac{u_n}{\delta_n} \right)^2 + \left(\frac{u_r}{\delta_r} \right)^2 + \left(\frac{u_s}{\delta_s} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

Devido ao fato das fibras serem consideradas equivalentes em tamanho, uniformes na sua constituição e estarem submetidas ao mesmo deslocamento uniaxial, isso faz com que o estado de tensão em cada cilindro seja uniforme. Portanto, o processo de homogenização pode ser realizado em qualquer seção transversal do EVR (Equação 3) (Figura 4).

$$T_i(t) = \left[\sum_{k=1}^n \frac{A^k(t)}{A} \right] \cdot t_i \quad (3)$$

onde T_i são as médias das tensões nas direções i ; A^k é a área da seção transversal da k -ésima fibra; A é a área da seção transversal do EVR; e n representa o número de fibras.

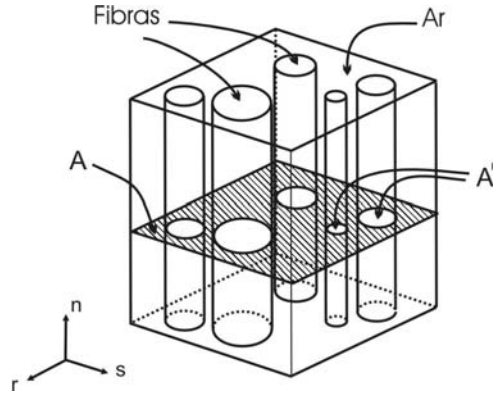


Figura 4: Área da seção transversal do EVR

Substituindo a Equação 1 na Equação 3, obtém-se a Equação 4.

$$T_i(t) = \frac{u_i(t)}{\delta_i \cdot \lambda(t)} \cdot \left[\sum_{k=1}^n \frac{A^k(t)}{A} \right] \cdot \left[\sigma_i^f + \int_{t_0}^t E^c(t-\tau) \frac{\partial \lambda(t)}{\partial \tau} d\tau \right] \quad (4)$$

Que pode ser representada pela Equação 5.

$$T_i(t) = \frac{u_i(t)}{\delta_i \cdot \lambda(t)} \cdot [1 - \alpha(t)] \cdot \left[\sigma_i^f + \int_{t_0}^t E^c(t-\tau) \frac{\partial \lambda(t)}{\partial \tau} d\tau \right] \quad (5)$$

onde α é o parâmetro interno de dano da zona coesiva (Equação 6).

$$\alpha(t) \equiv \frac{A - \sum_{k=1}^n A^k(t)}{A} \quad (6)$$

Na impossibilidade de realização de experimentos para a determinação de α , Allen e Searcy (2001) optaram por utilizar uma lei fenomenológica de evolução do dano (Equação 7). No presente artigo será abordado uma metodologia experimental para a determinação do parâmetro interno de dano através de um ensaio compacto de tensão.

$$\frac{d\alpha}{dt} = \begin{cases} \alpha_1 \lambda^m, & \text{para } \frac{d\lambda}{dt} \geq 0 \text{ e } \alpha \leq 1 \\ 0, & \text{para } \frac{d\lambda}{dt} \leq 0 \text{ e } \alpha = 1 \end{cases} \quad (7)$$

3. METODOLOGIA

De forma a determinar o parâmetro interno de dano da zona coesiva α , é necessária a observação da evolução da ZC ao longo do tempo. Foi então desenvolvido um equipamento (Equipamento Compacto de Tensão – ECT) (Figura 5) capaz de simular uma ZC de uma mistura asfáltica. Um microscópio estéreo e uma câmera digital são acopladas ao aparato de forma a ampliar e capturar imagens das ZC, respectivamente. De posse dos vídeos produzidos pela câmera digital, é possível analisar a evolução, em tempo real, das referidas ZC. O ECT foi desenvolvido no presente estudo com base no trabalho realizado por Williams (2002).

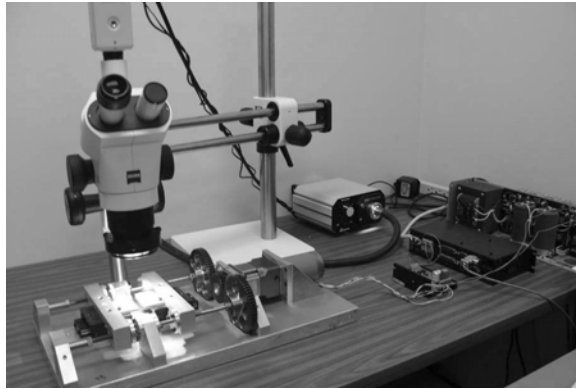
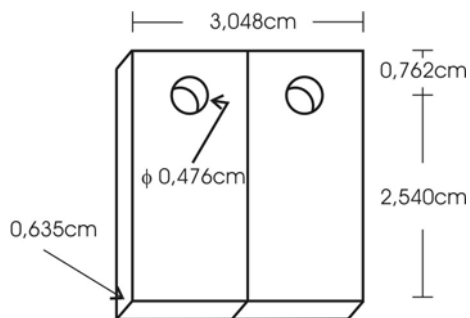


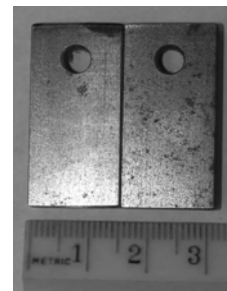
Figura 5: Equipamento compacto de tensão

3.1 Confeção das Amostras

A geometria das amostras a serem ensaiadas no ECT foi definida de acordo com a ASTM D5045 com algumas modificações. Duas placas de aço foram confeccionadas de forma a facilitar a limpeza e a reutilização do ensaio (Figura 6). A mistura asfáltica foi colocada em uma das faces (a de maior comprimento) (Figura 7a) das placas de aço, que foram posteriormente anexadas uma a outra (o mastique a ser ensaio serviu de “cola” entre as placas). A espessura do filme de mistura asfáltica entre as placas foi atingida através da compressão de uma placa de aço contra a outra. Após o resfriamento da mistura, o excesso de material foi removido (Figura 7b).

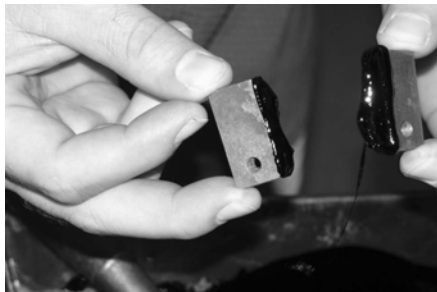


(a)

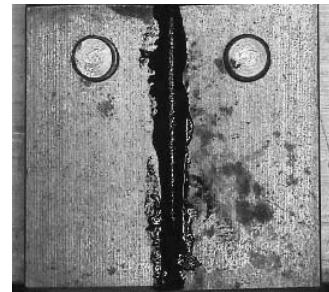


(b)

Figura 6: a) Geometria das placas de aço; b) Placas de aço utilizadas



(a)

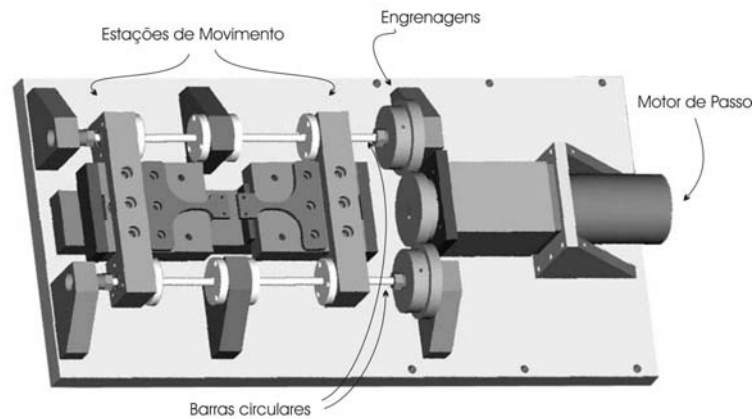


(b)

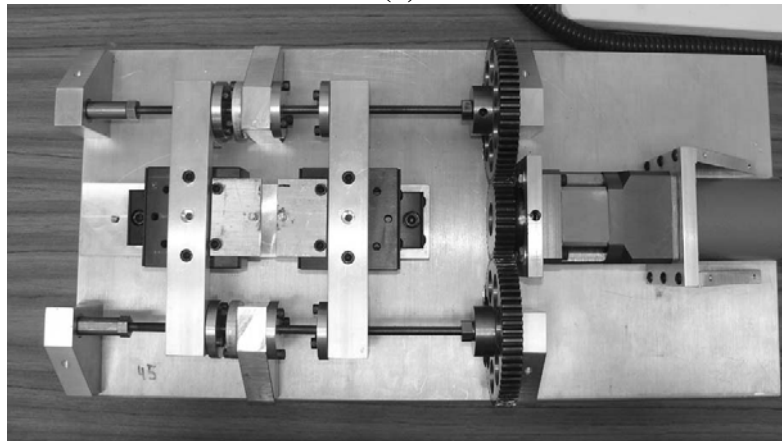
Figura 7: a) Aplicação da mistura asfáltica a ser ensaiada; b) Amostra pronta para ser ensaiada

3.2 Equipamento Compacto de Tensão – ECT

O ECT é composto basicamente de três partes: (1) sistema de controle; (2) sistema de movimento (Figura 8); e (3) sistema de ampliação e recepção de imagens. O objetivo deste ensaio é filmar a simulação do modo I de fratura (abertura de faces). O ensaio pode ser realizado através da aplicação de deslocamentos constantes. O controle do equipamento é feito através de um computador. Por meio de um *software* (LabVIEW, por exemplo) é possível criar um algoritmo para comandar as funções do equipamento (velocidade, deslocamento, aceleração, desaceleração, etc).



(a)



(b)

Figura 8: a) Representação esquemática do sistema de movimento; b) Sistema de movimento real

Os comandos emitidos pelo sistema de controle são executados por um motor de passo (*stepping motor*). Este motor está conectado a um sistema de engrenagens que transmitem o torque a duas barras circulares. Essas barras possuem sulcos helicoidais (em forma de parafuso) que permitem a aplicação de deslocamentos horizontais em duas Estações de Movimento – EM. As EMs se deslocam em velocidades iguais e sentidos opostos, podendo se aproximar ou se afastar a uma determinada taxa de deslocamento. A amostra a ser ensaiada é colocada nas EMs (Figura 9).

As imagens ampliadas através do microscópio estéreo são gravadas por uma câmera digital do tipo MiniDv. As imagens são primeiramente armazenadas em fitas digitais e posteriormente

transferidas a um computador pessoal. Essa transfência é realizada através da tecnologia *firewire* que possibilita o máximo de qualidade possível. O filme é analisado (em *softwares* de edição de imagens) para possibilitar a determinação da evolução dos comprimentos e dos diâmetros das fibras asfálticas formadas durante o ensaio. O comprimento e o diâmetro críticos são determinados imediatamente antes do rompimento de cada fibra (Figura 10).

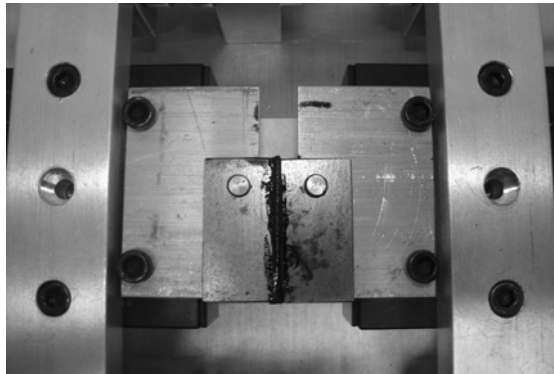


Figura 9: Sistema de engrenagens e barras circulares

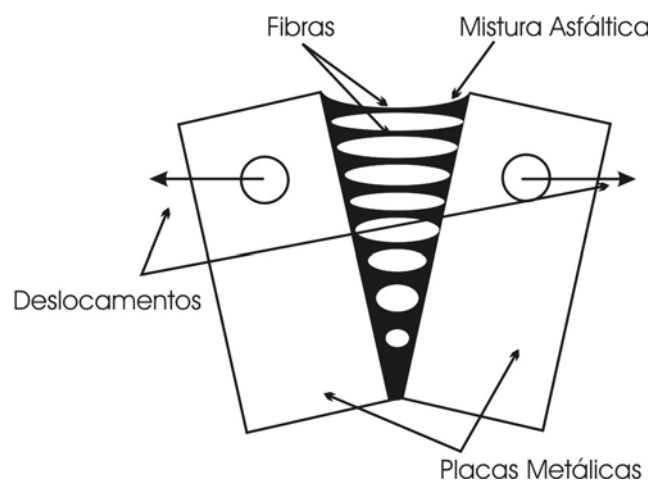


Figura 10: Representação esquemática da formação de fibras durante o ensaio

4. RESULTADOS

Embora o desenvolvimento do ECT encontre-se em fase de validação, ensaios preliminares se mostraram satisfatórios na determinação das áreas das seções transversais das fibras asfálticas. Uma mistura asfáltica foi elaborada com 75% de cimento asfáltico de petróleo – CAP e 25% de pó de pedra retido na peneira No. 200. A espessura do filme de mistura entre as placas foi de 0,127cm. O ensaio foi realizado com a aplicação de deslocamento constante (0,3527cm/s) à temperatura ambiente (25°C).

A primeira fibra (Figura 11) asfáltica foi detectada após 1,4 segundos do início do ensaio. De posse do diâmetro ao longo do ensaio, foi possível o cálculo da área transversal desta fibra em função do tempo. Na Figura 12a-b é apresentada a evolução do comprimento e da área da seção transversal da fibra durante o ensaio, respectivamente. O comprimento e o diâmetro críticos (0,5627cm e 0,0056cm, respectivamente) foram determinados imediatamente antes do rompimento da fibra em questão (Figura 13). Observe que o acompanhamento foi feito de apenas uma fibra e, portanto, não se determinou no presente artigo o parâmetro de dano $\alpha(t)$, o que deve ser feito na seqüência deste estudo para diferentes tipos de mastique.

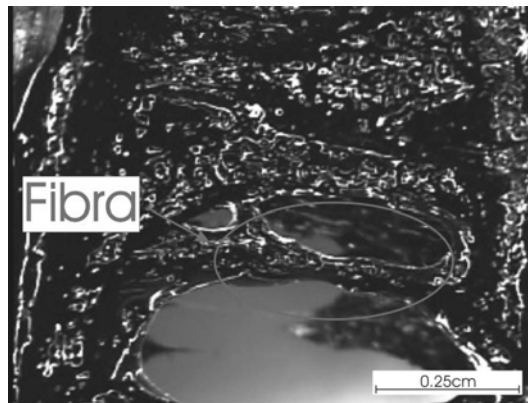
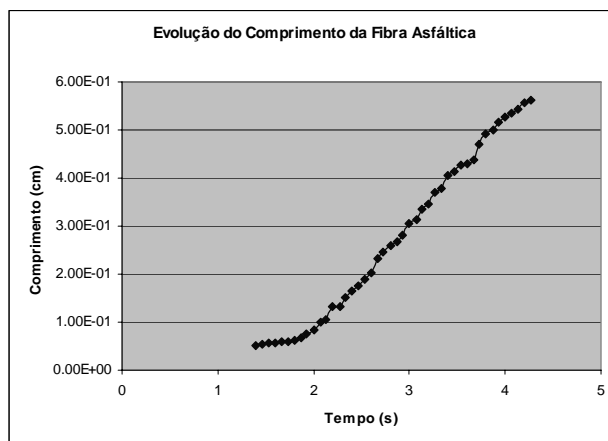
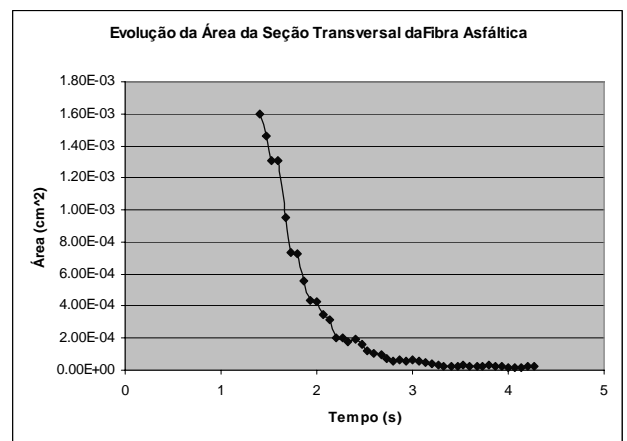


Figura 11: Formação da primeira fibra asfáltica



(a)



(b)

Figura 12: a) Comprimento da fibra ao longo do tempo; (b) Área da seção transversal da fibra ao longo do tempo

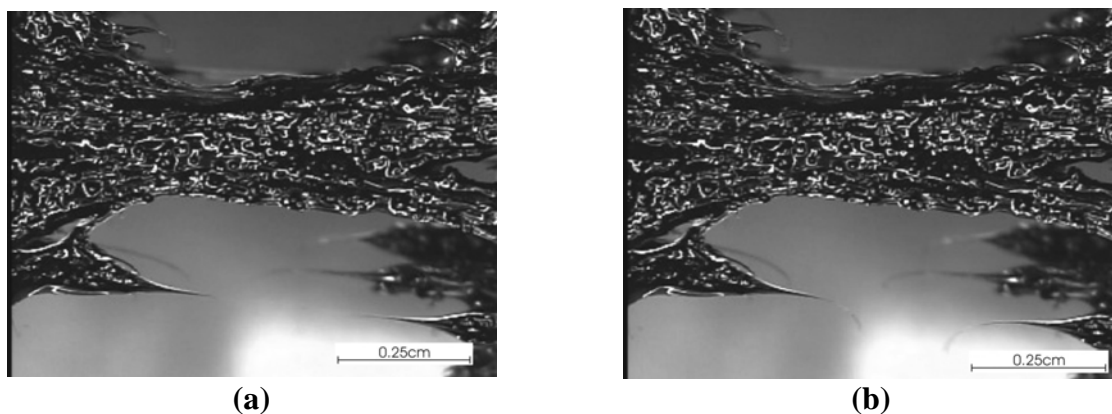


Figura 13: a) Comprimento crítico ($t = 4,27s$); b) Rompimento da fibra

5. CONCLUSÕES

Nesse artigo, foi apresentado um procedimento experimental para determinação de parâmetros de dano viscoelástico para misturas asfálticas, aqui entendidas como mastiques. Os resultados apresentados, de forma preliminar, mostram a determinação da área transversal em função do tempo ($A(t)$) para uma única fibra. Vale ressaltar que a determinação do parâmetro de dano viscoelástico α deve ser realizado com o máximo número de fibras possíveis (Figura 15), o que será realizado na sequência deste estudo.



Figura 15: Formação de fibras durante o ensaio

Através do procedimento experimental descrito, do modelo constitutivo desenvolvido por Allen e Searcy (2001) e de técnicas de homogeneização, é possível uma análise multi-escala robusta onde a evolução do dano na escala local é transferida para a escala global. Abordagens como essa permitem a incorporação de modelos viscoelásticos e de formação e propagação de trincas em misturas asfálticas, conforme descrito em outros trabalhos (Souza, 2005; Souza *et al.*, 2005).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Allen, D. H., Harris C.E., e Groves, S.E. (1987) 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. e SEARCY, C.R. (2001) A Micromechanical Model for a Viscoelastic Cohesive Zone. *International Journal of Fracture*, v. 107, p. 159-176.
- Allen, D.H. (2001) Homogenization Principles and their Application to Continuum Damage Mechanics. *Composites Science and Technology*, v. 61, p. 2223-2230.
- Allen, D.H. e C. Yoon (1998) Homogenization Techniques for Thermoviscoelastic Solids Containing Cracks. *International Journal of Solids and Structures*, v. 35, p. 4035-4054.
- ASTM D5095 (1999) Standard Test Methods for Plane-Strain Fracture Toughness and Strain Energy Release Rate of Plastic Materials.
- Barenblatt, G.I. (1962) Mathematical Theory of Equilibrium Cracks in Brittle Fracture. *Advances in Applied Mechanics*, v.7, p. 55-129, Academic Press, New York.
- Dugdale, D. (1960) Yielding of Steel Sheets Containing Slits. *Journal of Mechanics and Physics of Solids*, v.8, p. 100-104.
- Freitas, F. A. C., Soares, J. B. e Souza, F.V. (2003) Principios de homogeneização aplicados em uma mistura asfáltica considerada como um composto elástico. XVII Congresso de Ensino e Pesquisa em Transportes ANPET, Rio de Janeiro, 2003. v. 1. p. 1-10.
- Griffith, A.A. (1921) The Phenomena of Rupture and Flow in Solids. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series A* 221, p. 163-198.
- 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.
- Moavenzadeh, F. (1970) Asphalt Fracture. *Proceedings Association of Asphalt Paving Technologists*, p. 51-79.
- 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, RJ.
- Needleman, A. (1987) A Continuum Model for Void Nucleation by Inclusion Debonding. *Journal of Applied Mechanics*, September, v. 54, 525-531.
- 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*.
- 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, p. 462-476.
- Planas, J. e Elices, M. (1990) Fracture Criteria for Concrete: Mathematical Approximations and Experimental Validation. *Engineering Fracture Mechanics*, 35(1), 87-94.
- 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, RJ.
- Schapery, R.A. (1973) A Theory of Crack Growth in Viscoelastic Media. Report 2, MM 2764-73-1, Mechanics and Materials Research Center, Texas A&M University, College Station.
- Schapery, R.A. (1975a) A Theory of Crack Initiation and Growth in Viscoelastic Media; Part I: Theoretical Development. *International Journal of Fracture*, v. 11, n. 1, p.141-159.
- Schapery, R.A. (1975b) A Theory of Crack Initiation and Growth in Viscoelastic Media; Part II: Approximate Methods of Analysis. *International Journal of Fracture*, v. 11, n. 3, p.369-387.
- Schapery, R.A. (1975c) A Theory of Crack Initiation and Growth in Viscoelastic Media; Part III: Analysis of Continuous Growth. *International Journal of Fracture*, v. 11, n. 4, p.549-562.
- Schapery, R.A. (1981) Correspondence Principles and a Generalized J Integral for Large Deformation and Fracture Analysis of Nonlinear Viscoelastic Media. Reports, MM 3274-81-1 through 3, Mechanics and Materials Research Center, Texas A&M University, College Station.
- Schapery, R.A. (1984) Correspondence Principles and a Generalized J Integral for Large Deformation and Fracture Analysis of Viscoelastic Media. *International Journal of Fracture*, v.25, p. 195-223.
- Schapery, R.A. (1986) Time-Dependent Fracture: Continuation Aspects of Crack Growth. *Encyclopedia of Materials Science and Engineering*, M.B. Bever (ed), Pergamon Press, Elmsford, New York, p. 5043-5053.
- Shah, S.P., SWARTZ, S.E. e OUYANG, C. (1995). *Fracture Mechanics of Concrete*. John Wiley & Sons, Inc., 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, Fortaleza.
- Souza, F.V.; J. B. Soares; D.H. Allen e F. Evangelista Jr. (2005) Model for Predicting Damage Evolution in Heterogeneous Viscoelastic Asphaltic Mixtures. Transportation Research Record, Transportation Research Board, National Research Council, EUA.
- Tvergaard, V. (1990) Effect of Fiber Debonding in a Whisker-Reinforced Metal. Materials Science and Engineering, A125, 203-213.
- Williams, J.J. (2001) Two Experiments for Measuring Specific Viscoelastic Cohesive Zone Parameters. Master's Thesis, Texas A&M University, College Station, TX, USA.
- Yoon, C. e D. H. Allen (1999) Damage Dependent Constitutive Behavior and Energy Release Rate for a Cohesive Zone in a Thermoviscoelastic Solid. International Journal of Fracture, v. 96, p. 55-74.

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; dhallen@unlnotes.unl.edu.