

## DESENVOLVIMENTO E INTEGRAÇÃO DE FERRAMENTAS GRÁFICAS PARA PROGRAMAS DE ANÁLISE ESTRUTURAL DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS

**Francisco Evangelista Junior**

**Jorge Barbosa Soares**

Laboratório de Mecânica dos Pavimentos - LMP

Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes - PETRAN

Universidade Federal do Ceará - UFC

**Edson Ricardo de Andrade Silva**

Departamento de Computação - DC

Universidade Federal do Ceará - UFC

### RESUMO

Esta comunicação apresenta o desenvolvimento de ferramentas gráficas para a modelagem bi e tridimensional de pavimentos asfálticos. As ferramentas se constituem de um pré- e pós-processador gráfico cuja flexibilização nos arquivos de transferência de dados permite sua utilização em diferentes programas de análise em elementos finitos. Na modelagem do pavimento é definida, inicialmente, a seção transversal (2D) que, através da técnica de *sweep*, definirá o modelo (3D). Conta-se com recursos gráficos de manipulação e visualização do modelo gerado, tais como *zooms*, *pans*, recursos de câmera, iluminação e visualização de elementos específicos dentro de regiões previamente selecionadas. Apresenta-se um estudo de caso no qual foram utilizados dois programas distintos para uma comparação entre as análises elásticas lineares e não-lineares através de recursos oferecidos pelo pós-processador para um melhor entendimento do comportamento mecânico do sistema em camadas.

### ABSTRACT

This paper presents the development of a graphical interface tool for bi- and tri-dimensional modeling of asphalt pavements. The tool is a graphical pre- and a pos-processor which can be used with different analysis programs based on the finite element method. In the approach used herein the 3D model is obtained from the 2D cross section by using the sweep technique. Graphical utilities, which allow model manipulation and visualization, such as zooms, pans, camera, illumination and selected elements visualization, are included. It is shown an example wherein two distinct computational programs are used to compare a linear elastic analysis with nonlinear elastic one by using the pos-processor tool for a better understanding of the mechanical behavior of the layered system.

### 1. INTRODUÇÃO

No Brasil, existe uma tendência de se utilizar métodos mecanísticos no dimensionamento de pavimentos (Motta, 1991; Silva, 1995; Benevides, 2000). A resposta mecanística do sistema em camadas é dada em termos de parâmetros estruturais usados em modelos de previsão de desempenho. Estes parâmetros incluem valores de contorno como a deflexão máxima na superfície, a tensão vertical no topo do subleito e a tensão de tração na fibra inferior do revestimento. Nas considerações de projeto, procura-se conhecer estes parâmetros através de ferramentas e métodos computacionais para posterior comparação com os valores estabelecidos pelos critérios de projeto quanto à fadiga e a deformação permanente (Medina, 1997).

No cálculo das tensões e deslocamentos do sistema de camadas do pavimento tem se recorrido a soluções analíticas fechadas baseadas na Teoria da Elasticidade para os casos mais simples. Nos casos mais complexos, programas baseados em métodos numéricos, principalmente o Método dos Elementos Finitos (MEF), foram desenvolvidos na busca de soluções aproximadas (Motta e Mahler, 1982; Huang, 1993; Hopman, 1994; Silva, 1995; Park e Kim, 1998). A grande vantagem da abordagem numérica é o uso de uma variedade de modelos constitutivos, tais como, elásticos lineares, elásticos não-lineares, elasto-plásticos, viscoelásticos, viscoplásticos para descrever o comportamento dos diversos materiais constituintes. Quando se necessita do desenvolvimento de diferentes modelos constitutivos é

importante trabalhar-se com um código aberto de modo a poder incluir as características particulares dos materiais locais. Por exemplo, solos tropicais apresentam características particulares, as quais requerem uma modelagem constitutiva específica (Medina, 1997).

Nos últimos 40 anos foram desenvolvidos vários programas baseados no MEF na tentativa de acelerar as soluções tensão-deformação de sistemas em camadas. Uma maior utilização destes métodos aliada a maior capacidade de processamento dos microcomputadores permitiu a evolução para análises mais complexas, como a formulação tridimensional de pavimentos (Aedo, 1997; Helwany et al., 1998; Soares et al., 2002; Desai, 2002; Collop et al., 2003). Era de se esperar também o desenvolvimento de interfaces gráficas que pudessem acompanhar essa evolução e popularizar sofisticadas técnicas de análise na comunidade técnica. Este avanço traz uma maior facilidade para converter informações de análise usadas no dimensionamento mecânico de pavimentos asfálticos.

O objetivo do presente trabalho é apresentar as ferramentas gráficas desenvolvidas – pré- e pós-processador – para dar suporte a modelagem e análise bi e tridimensional de tensões e deformações em pavimentos asfálticos pelo MEF. Estas ferramentas apresentam uma flexibilização nos arquivos de transferência de dados permitindo sua utilização em diferentes programas de análise. Para a análise (processamento) o ponto de partida foi o código tridimensional SADISTIC (Allen et al., 1994) e o código axissimétrico FEPAVE2 (Silva, 1995), este já bastante difundindo no meio técnico, que contam com modelos constitutivos que podem ser aplicados nos diversos tipos de materiais das camadas dos pavimentos.

## **2. PRÉ-PROCESSADOR**

No desenvolvimento do pré-processador apresentado no presente artigo, a linguagem de programação foi o C++, uma expansão da linguagem C, conseguindo assim uma maior utilização entre as linguagens orientadas a objetos mais frequentemente adotadas. A utilização desta linguagem também permite uma portabilidade automática, ou seja, sem alteração de código, para as diversas plataformas, tais como as *Workstations*, que trabalham com sistema operacional *Unix*, e os micro-computadores da linha *PC* que trabalham geralmente com o sistema operacional *Windows*.

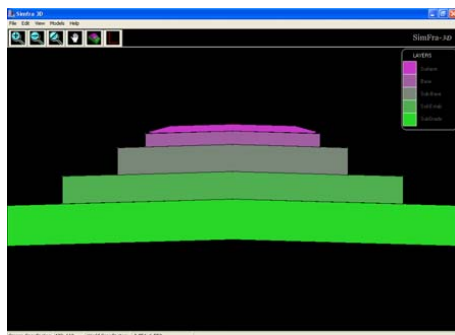
O pré-processador possui as funcionalidades básicas para modelos bi e tridimensionais em elementos finitos. Ele é responsável pela geração da geometria do sistema em camadas, definição dos atributos do modelo (situações de contorno, carregamentos e propriedades dos materiais), construção da topologia e geração de arquivos de saída que podem ser configuráveis para qualquer código de análise de pavimentos por elementos finitos.

O programa oferece um modo de operação interativo em que os dados são informados por meio de teclado e *mouse*. Uma vantagem deste método é a potencialidade de escolha por parte do usuário de operar todos os seus comandos a partir de *menus*, botões flutuantes ou atalhos pré-ajustáveis.

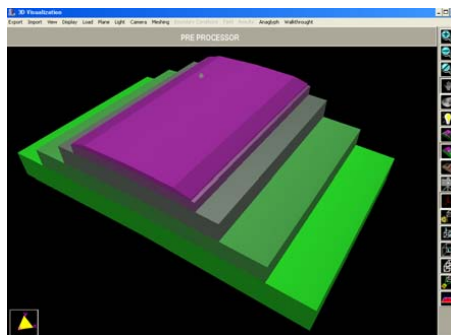
### **2.1. Geração da geometria**

O recebimento de informações necessárias à criação da geometria do modelo é feito através de formulários interativos, onde são observados campos de preenchimento para a entrada de dados essenciais para a construção do modelo do pavimento. Entre estes dados constam a largura da pista de rolamento, abaulamento da seção transversal, comprimento do pavimento

(para o caso de modelos tridimensionais), largura e inclinação de acostamento, e também taludes externos à rodovia. No que tange as camadas constituintes, o pré-processador desenvolvido conta com flexibilizações que consistem no controle total por parte do usuário do número e tipo de camadas a serem utilizadas na análise, tendo seis camadas potenciais para configurações. A Figura 1 mostra um modelo de pavimento com sua geometria projetada para 5 camadas.



a) Visualização bidimensional

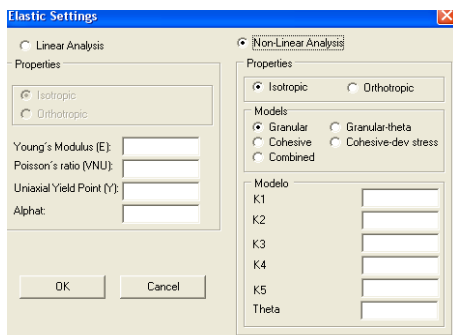


b) Visualização tridimensional

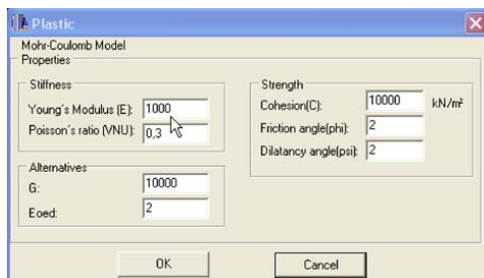
**Figura 1:** Modelo geométrico

## 2.2. Definição de atributos

As propriedades físicas e geométricas dos diversos materiais que constituem o sistema de camadas do pavimento são atribuídas às regiões (camadas) que formam o meio a ser analisado. A entrada dos dados relativa aos modelos constitutivos a serem usados e a propriedade dos materiais do sistema em camadas pode ser feita a partir de caixas de diálogo específicas para cada modelo utilizado. Podem-se utilizar programas de análise com os modelos elástico linear e não-linear (FEPAVE2), modelos plásticos e viscoelásticos (SADISTIC). A Figura 2 ilustra algumas entradas para a caracterização das camadas.



a) Modelos elástico linear e não-linear

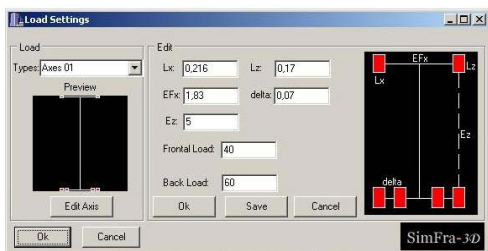


b) Modelo plástico de Mohr-Coulomb

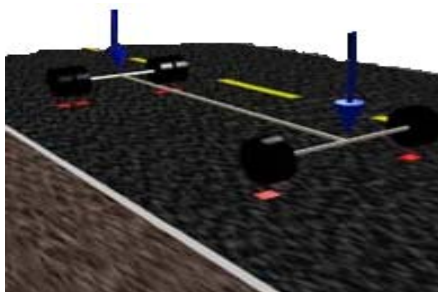
**Figura 2:** Entrada de dados dos materiais das camadas

Na definição dos carregamentos, o usuário pode escolher dentre os diversos tipos de configuração dos principais eixos padronizados de veículos, como por exemplo: (i) eixo

simples de roda simples; (ii) eixo simples de roda duplas; (iii) eixo tandem de roda simples (para pneus extra-largos); (iv) eixo tandem de roda dupla. Estes eixos podem ter parâmetros alterados, tais como, cargas para cada semi-eixo, largura média do pneu e espaçamento entre rodas. O carregamento por roda foi assumido como uniformemente distribuído por toda a área de contato pneu-pavimento. Foi assumida para o carregamento uma área de contato retangular de comprimento e largura configuráveis pelo usuário. A Figura 3 mostra a definição dos carregamentos e as opções de alteração de configurações do eixo escolhido no pré-processador.



a) Caixa de configuração do eixo padrão



b) Carregamento e áreas de contato

**Figura 3:** Definição de carregamentos

### 2.3. Discretização do modelo

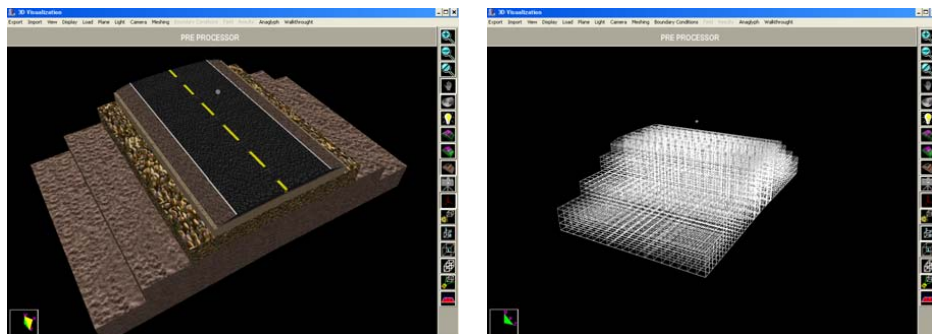
Após a geração da geometria do modelo e a definição dos carregamentos, a discretização pode ser gerada. Os elementos finitos disponíveis para geração da malha são o elemento bidimensional retangular de quatro nós (Q4) e o tridimensional de oito nós (BRICK8). Na geração da malha para análises axissimétricas, o pré-processador apresenta opções para as dimensões do elemento embaixo do carregamento e a razão da progressão geométrica a ser utilizada na geração automática da malha na direção do eixo de simetria para as bordas. Rotinas de controle foram implementadas de modo que a razão comprimento/largura não exceda 5/1.

Na discretização tridimensional do pavimento, houve a vantagem de que a estrutura é sempre paralela aos eixos cartesianos, permitindo a implementação de uma técnica simples. É importante observar que a malha gerada é adaptada nas regiões de zonas de contato pneu-pavimento. O usuário tem o controle de estipular a dimensão nas três direções do elemento finito 3D.

### 2.4. Recursos gráficos

O pré-processador foi desenvolvido de modo a oferecer ao usuário recursos gráficos de manipulação, visualização e edição das imagens durante as etapas de modelagem geométrica, geração da malha e sua edição. Nos dois ambientes de trabalho (2D e 3D) foram desenvolvidas funcionalidades gráficas, tais como, *zooms* de ampliação e redução da imagem, *pans* para movimentações em qualquer direção, flexibilizações no posicionamento da câmera de visualização e na fonte de iluminação do modelo construído. Também se pode contar com opções de visualização de elementos e nós, tais como, elementos pertencentes a determinadas camadas, visualização de um elemento especificado com todos os elementos pertencentes a sua seção transversal. Estes recursos são importantes para uma melhor compreensão e estudo de áreas específicas na superfície do modelo. A Figura 4 exemplifica alguns recursos gráficos

existentes.



a) Texturização

b) Visualização da malha

**Figura 4:** Recursos gráficos do pré-processamento

### 3. PÓS-PROCESSADOR

O pós-processador foi desenvolvido com os mesmos recursos de interatividade com o usuário do pré-processador e utiliza o mesmo ambiente gráfico desenvolvido. Foram implementadas funcionalidades no sentido de melhor representar o campo de deslocamentos e tensões para modelos bi e tridimensionais. Dentre as principais, destacam-se a visualização de deformações, tensões e deslocamentos. A seguir são detalhadas as funcionalidades implementadas.

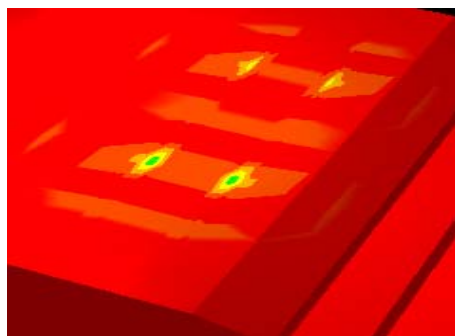
#### 3.1. Visualização de tensões, deformações e deslocamentos

Na representação dos resultados tensoriais, foi adotado o procedimento de suavização do contorno de tensões e deformações através do cálculo dos seus valores nodais como a média aritmética dos resultados nos pontos de Gauss mais próximos de cada nó. As tensões e deformações em qualquer ponto do elemento podem ser calculadas através das funções de forma usadas na formulação do elemento finito utilizado.

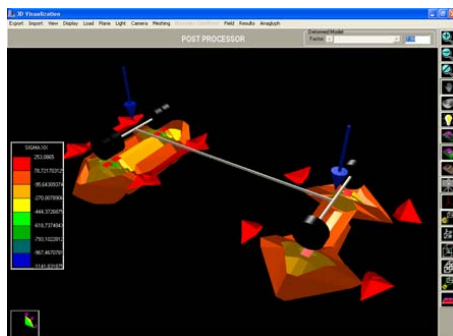
O algoritmo utilizado para a visualização do contorno de tensões e deformações é executado para cada nó do elemento, onde são lidos e armazenados os campos tensoriais requeridos ( $\sigma_{xx}$ ,  $\sigma_{yy}$ ,  $\sigma_{zz}$ ,  $\tau_{xy}$ ,  $\tau_{xz}$ ,  $\tau_{yz}$ ,  $\epsilon_{xx}$ ,  $\epsilon_{yy}$  e  $\epsilon_{zz}$ ) para que em seguida seja criada uma tabela onde cada faixa de cor está limitada por dois valores consecutivos na escala de valores utilizada. Também foi implementado o recurso de visualização de tensões e deformações por isosuperfícies e isolinhas que são os lugares geométricos de mesmo valor de tensão e deformação, respectivamente. A Figura 5a ilustra a visualização de isosuperfícies das tensões  $\sigma_{yy}$  e a 5b a visualização das isosuperfícies das deformações  $\epsilon_{yy}$ .

Os resultados vetoriais são os deslocamentos nodais da estrutura e são visualizados pela representação escalar dos seus componentes nos eixos cartesianos x, y e z. Pode-se visualizar o modelo deformado e o indeformado onde, para o primeiro, foi implementado a opção de alteração do fator de escala apresentado para os deslocamentos obtidos. Com isto, o usuário pode ampliar a visualização (até  $1 \text{ E}+12$  vezes) dos valores de deslocamentos imperceptíveis na escala natural. O pós-processador também apresenta opções para a visualização do histórico dos deslocamentos no pavimento. Através de uma escala, o usuário pode visualizar o

modelo deformado para um instante de tempo (viscoelasticidade) ou um determinado incremento de carregamento (elasticidade não-linear).



a) Tensões  $\sigma_{yy}$

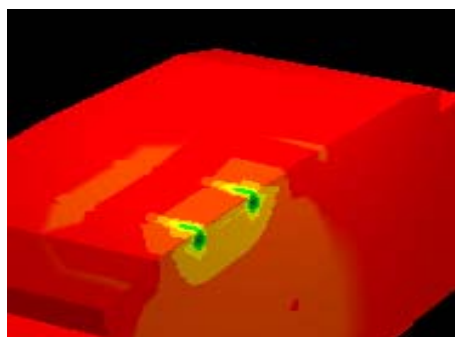


b) Isosuperfícies das deformações  $\epsilon_{yy}$

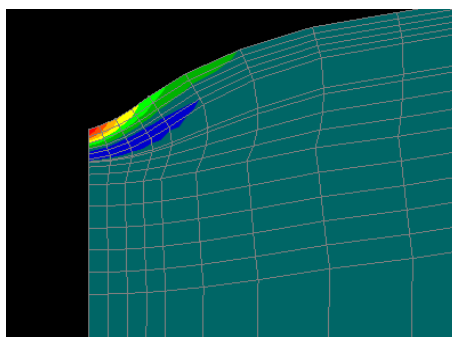
**Figura 5:** Visualização de tensões e deformações

### 3.2. Recursos gráficos

Existem ainda recursos que permitem uma maior interação do usuário na investigação do comportamento mecânico da estrutura. Há a possibilidade de cortes tridimensionais dentro do modelo, onde, em qualquer posição ou rotação, pode-se visualizar os contornos de tensão, deformação ou deslocamentos. Recursos de realidade virtual, tais como o *Walkthrough*, permitem um caminhamento tridimensional que simula uma caminhada sobre a superfície e/ou no interior do modelo em pontos estrategicamente previstos. Recursos como este visam permitir uma investigação qualitativa do comportamento tridimensional de pavimentos. A Figura 6 ilustra estes recursos do pós-processador.



a) Corte tridimensional



b) Modelo axissimétrico deformado

**Figura 6:** Recursos gráficos do pós-processamento

## 4. ESTUDO DE CASO

Foram realizadas análises axissimétricas usando-se o FEPAVE2, modelo elástico linear para a camada de revestimento e não-linear para as demais camadas, e o SADISTIC, modelo elástico linear para todas as camadas. A simulação objetiva analisar qualitativamente a distribuição de tensões nas camadas do pavimento através dos recursos gráficos existentes no pós-processador desenvolvido.

#### 4.1. Modelo

Na simulação foi adotado o pavimento do trecho Fortaleza-Pacajus, no estado do Ceará, que consiste em um revestimento asfáltico, base, subbase e subleito com espessuras de 5, 15, 20 e 400 cm, respectivamente. Foi adotado um raio da área de contato pneu-pavimento de 10,8cm e seguiu-se a recomendação de Duncan et al. (1968) quanto ao limite radial e espessura da última camada (subleito). A Tabela 1 apresenta as propriedades constitutivas dos materiais das camadas extraídas dos ensaios realizados por Benevides (2000). A discretização por elementos finitos foi feita pelo pré-processador usando-se elementos quadriláteros de quatro nós onde uma malha de 650 nós e 600 elementos foi gerada.

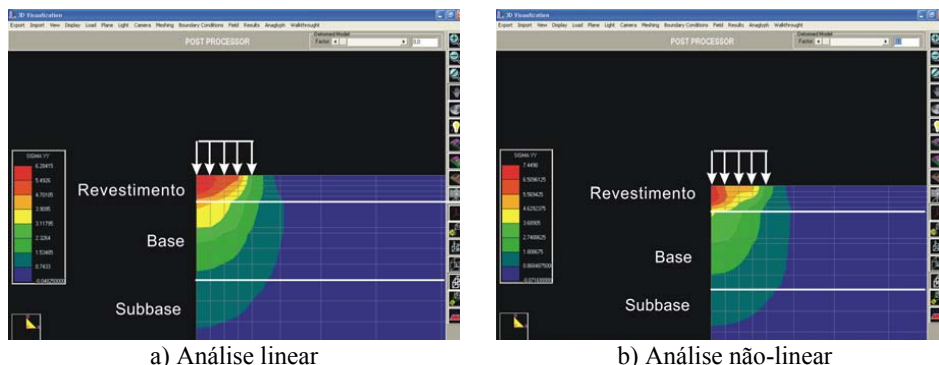
**Tabela 1:** Propriedades elásticas dos materiais do trecho Fortaleza - Pacajus

Camadas	Elástica não-linear		Elástica linear	
	MR (kgf/cm <sup>2</sup> )	Poisson (ν)	MR (kgf/cm <sup>2</sup> )	Poisson (ν)
Revestimento	27.526	0,25	27.526	0,25
Base	7.119 $\sigma_3^{0,55}$	0,35	7.119	0,35
Subbase	5.635 $\sigma_3^{0,05}$	0,35	5.635	0,35
Subleito	3.283 $\sigma_3^{0,35}$	0,40	3.283	0,40

#### 4.2. Resultados

A comparação dos resultados das análises elástica linear (SADISTIC) e não-linear (FEPAVE2) indicaram, a partir dos valores de tensões e deformações, que a hipótese de linearidade conduz a resultados em que a estrutura apresenta uma maior rigidez. Motta e Mahler (1982) já observavam que os deslocamentos obtidos dos modelos elásticos lineares apresentavam valores menores que os medidos em estruturas reais. A análise das tensões radiais  $\sigma_{yy}$  e das tensões tangenciais  $\sigma_{xy}$  mostram a existência de um pico de tensão, independente do caso analisado, no topo da camada de base. A Figura 7 mostra as isosuperfícies para as tensões  $\sigma_{yy}$  onde pode ser percebido que, apesar de uma distribuição espacial semelhante, os maiores valores das tensões (regiões mais escuras da figura) pertencem ao modelo linear.

Com relação aos parâmetros utilizados no dimensionamento mecanístico de pavimentos asfálticos pode-se concluir que: (i) a deflexão na superfície do revestimento é maior no modelo não-linear; (ii) a tensão de tração no fundo da camada de revestimento e a (iii) a tensão vertical no topo do subleito são maiores quando assumida a linearidade.



**Figura 7:** Isosuperfícies das tensões  $\sigma_{yy}$



## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho apresenta os resultados do desenvolvimento de um pré- e pós-processador gráfico bi e tridimensionais, onde, é crucial o emprego de técnicas de computação gráfica para se obter uma boa estratégia de desenvolvimento de uma robusta, genérica e eficiente análise de pavimentos. Com o estudo de caso comprovou-se a flexibilização da transferência de dados entre o pré- e pós-processador com dois programas de análise em elementos finitos que utilizam modelos constitutivos diferentes, tendo um deles uso bastante difundido no meio técnico e acadêmico. As técnicas utilizadas consistem em um esforço para o desenvolvimento de interfaces gráficas específicas para modelagem e simulação de pavimentos asfálticos. Tal desenvolvimento é motivado pelo avanço nos últimos anos da modelagem constitutiva de materiais de pavimentação. Os resultados aqui apresentados representam importantes recursos gráficos de pré- e pós-processamento, tais como visualizações dos campos de tensão e deformação, que permitem à comunidade técnica o uso de amigáveis ferramentas de análise para pavimentos asfálticos.

## AGRADECIMENTOS

Agradecimentos à equipe da Rede de Modelagem Computacional (FINEP-Petrobras) e do Departamento de Computação da Universidade Federal do Ceará – DC/UFC – pelo apoio. Os autores também agradecem ao CNPq e CTPETRO pelo apoio financeiro da pesquisa.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aedo, J.L.C. (1997) Programa para Análise Tridimensional de Pavimentos Asfálticos. Dissertação de Mestrado. PUC-Rio, Rio de Janeiro, Brasil.
- 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 the Mechanics and Physics of Solids*, v. 42, n. 3, p. 505-529.
- 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. Dissertação de Mestrado. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil.
- Collop, A.C., Scarpas, A., Kasbergen, A. e De Bondt, A. (2003) Development and Finite Element Implementation of a Stress Dependent Elasto-Visco-Plastic Constitutive Model with Damage for Asphalt. *TRB 2003 Annual Meeting CD-ROM*.
- Desai, C. S. (2002) Mechanistic Pavement Analysis and Design Using Unified Material and Computer Models. *Proceedings, Third International Symposium on 3-D Finite Element for Pavement: Analysis, Design and Research*, p.1-64. Amsterdam, The Netherlands.
- Harichandran, R., Yea, M. e Baladi, G. (1990) MICHPAVE: A Nonlinear Finite Element Program for Analysis of Flexible Pavements. *Transportation Research Record*, n. 1286, p. 123-131.
- Helwany, S., Dyer, J. E. e Leidy, J. (1998) Finite Element Analysis of Flexible Pavements. *Journal of Transportation Engineering, ASCE*.
- Hopman, P. C. (1994) VEROAD: A Linear Visco-Elastic Multilayer Program for the Calculation of Stresses, Strains and Displacements in Asphaltic Road Constructions: A Visco-Elastic Multilayer System. *Delft University of Technology*, The Netherlands.
- Huang, Y.H. (1993) *Pavement Analysis and Design*. Prentice Hall. New Jersey, USA.
- Medina, J. (1997) *Mecânica dos Pavimentos* (1ª ed.). COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, Brasil.
- Motta, L.M.G. (1991) Método de Dimensionamento de Pavimentos Flexíveis; Critério de Confiabilidade e Ensaios de Cargas Repetidas. Tese de Doutorado. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil.
- Motta, L.M.G. e Mahler, C.F. (1982) Comentários sobre a Utilização do Método dos Elementos Finitos na Análise de Pavimentos. *Anais da 17ª Reunião Anual de Pavimentação (ABPv)*. Rio de Janeiro, Brasil.
- Park, S. W. e Kim, Y. R. (1998) Analysis of Layered Viscoelastic System with Transient Temperatures. *Journal of Engineering Mechanics*, v. 124, n° 2, p. 223-231.
- Silva, P.D.E.A (1995) Contribuição para o Aperfeiçoamento do Emprego do Programa FEPAVE2 em Estudos e Projetos de Pavimentos Flexíveis. Dissertação de Mestrado. COPPE / UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil.
- 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 on 3-D Finite Element for Pavement: Analysis, Design and Research*, p.179-187. Amsterdam, The Netherlands.



**Endereço dos autores:**

Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia – Campus do Pici, S/Nº  
Departamento de Engenharia de Transportes, DET Bloco: 703 CEP 60.455-970  
Laboratório de Mecânica dos Pavimentos, LMP  
Fortaleza – Ceará – Brasil  
e-mail: [fejr@det.ufc.br](mailto:fejr@det.ufc.br); [jsoares@det.ufc.br](mailto:jsoares@det.ufc.br) ; [latino@lia.ufc.br](mailto:latino@lia.ufc.br)