

# Analise do comportamento mecânico de pavimentos flexíveis utilizando método dos elementos finitos

Adriano Frutuoso da Silva

Professor Associado, Universidade Federal de Roraima, Boa Vista, Brasil, [adriano.silva@ufr.br](mailto:adriano.silva@ufr.br)

Joel Carlos Moizinho

Professor Titular, Universidade Federal de Roraima, Boa Vista, Brasil, [joel.moizinho@ufr.br](mailto:joel.moizinho@ufr.br)

**RESUMO:** Este trabalho propõe um estudo do comportamento mecânico de pavimentos por meio de modelagem numérica utilizando o método dos elementos finitos. Para tanto, inicialmente, foi feita a determinação dos parâmetros dos materiais constituintes do pavimento; em seguida foi realizada a modelagem numérica do pavimento constituído pelas camadas de base e revestimento, utilizando o programa PLAXIS, e resultados foram confrontados com valores obtidos com o programa KENLAYER. Para simular o material de base foi utilizado elementos triangulares isoparamétricos de 6 nós, e para o revestimento elemento de viga de 3 nós. O comportamento da base foi representado pelo modelo de Mohr-Coulomb e o revestimento pelo modelo Soft-Soil-Creep. Procurou-se verificar o efeito da variação dos módulos de resiliência no comportamento das camadas constituintes do pavimento. Os resultados mostraram: diminuição da deflexão no topo do revestimento com o aumento do módulo da base; redução da deflexão com o aumento da espessura do revestimento; redução da deflexão no topo do revestimento com o aumento do módulo do revestimento; as tensões na fibra inferior do revestimento asfáltico aumentou quando espessura do revestimento reduziu de 3 cm para 5 cm e diminuiu quando muda para 10 cm.

**PALAVRAS-CHAVE:** Pavimento Flexível, Método dos Elementos Finitos, Modelagem, PLAXIS, KENLAYER.

**ABSTRACT:** This work proposes a study of the mechanical behavior of pavements by means of numerical modeling using the finite elements method. Therefore, initially, was made determination of the parameters of the constituents of the pavement materials; in sequence was carried out the numerical modeling of the pavement. For the base material, 6-node isoparametric triangular elements were used, and for the 3-node beam element sheath. The mechanical behavior of the base layers was represented by an elastic-perfectly plastic with Mohr-Coulomb failure criterion and the asphalt layer was simulated with the soft soil creep model. The results show: decrease of the deflection at the top of the asphalt layer with increasing base modulus; reduction of deflection with increasing asphalt layer thickness; reduction of deflection with increasing asphalt layer module; the stresses in the bottom fiber of the asphalt coating increased when the coating thickness increased from 3 cm to 5 cm and decreased when it changed to 10 cm.

**KEYWORDS:** Flexible Pavement, Finite Elements Method, Modelling

## 1 INTRODUÇÃO

A condição empírica dos métodos de dimensionamento de pavimentos tem sido tópicos de discussão entre os engenheiros rodoviários por muitos anos. Os métodos empíricos se baseiam em regras desenvolvidas a partir de observações e experiência com certos tipos de pavimentos, para certos tipos de materiais de pavimentação e para condições específicas de clima, que não necessariamente as da região do projeto em questão. A maior limitação dos métodos empíricos é que eles não podem ser generalizados com confiabilidade para outras condições senão àquelas para as quais eles foram desenvolvidos.

Os engenheiros de pavimentação estão buscando gradativamente um entendimento mais analítico do problema e tentando, com isso, reduzir a parcela do empirismo que é inevitável no atual estado-da-arte. No

enfoque analítico, o pavimento é tratado como uma estrutura de engenharia e seu comportamento mecânico é avaliado em função do carregamento e da resistência dos materiais, assim como é feito com as estruturas de concreto ou de aço. Além disso, relacionam-se as tensões de tração na base da camada asfáltica com a formação de trincas no revestimento do pavimento ou as deformações verticais com o desenvolvimento do afundamento de trilha de roda. No entanto, em geral, tais teorias não modelam diversos fatores que deveriam ser observados no dimensionamento de um sistema em camadas, cujas propriedades variam com o tempo e com as condições ambientais, e que tem a deterioração acumulada com a passagem das cargas variáveis em intensidade, distribuição e velocidade. Assim, o último passo no processo de dimensionamento acaba por ter uma parcela empírica, com a aplicação dos fatores de calibração campo-laboratório sobre os modelos desenvolvidos em laboratório (MOTTA, 1991).

A necessidade da modelagem mecanística-empírica vem da busca constante de se melhorar os projetos de pavimentação em termos de eficiência estrutural, de modo a utilizar materiais, sobre cujo desempenho de campo ainda não se têm experiência suficiente, e considerar, também, os efeitos das condições ambientais e de tráfego, diferentes daquelas para as quais os métodos empíricos, ainda utilizados no país, foram desenvolvidos.

Neste sentido, nos últimos anos o estudo da pavimentação vem experimentando um grande avanço tecnológico, tanto no Brasil quanto no exterior, devido em parte à pesquisa e ao desenvolvimento de diversos métodos de dimensionamento de pavimentos com base em estudos acadêmicos e observações de dados de comportamento de pistas experimentais. Como produto desse desenvolvimento uma série de programas computacionais para análise do comportamento tensão/deformação dos pavimentos foram desenvolvidos, baseados na teoria da elasticidade e em métodos numéricos, segundo Boussinesq, Burmister e outros. Dentre os métodos numéricos, o Método dos Elementos Finitos (MEF) tem se destacado pela sua simplicidade e generalidade.

Em pavimentação, dada à complexidade da geometria e das condições de contorno, dos modelos constitutivos específicos dos materiais do pavimento, assim como a melhoria dos métodos computacionais, o MEF tem sido usado para determinar as respostas do pavimento. Pesquisadores como Duncan et al. (1968) começaram usando o MEF na análise estrutural de pavimentos. O MEF também tem algumas vantagens sobre soluções elásticas em sistemas multicamadas porque garante maior flexibilidade na modelagem das respostas não-lineares características dos materiais granulares que constituem a seção do pavimento.

Os modelos, baseados neste método, simulam de forma mais realista as estruturas de pavimentos. Podem simular com eficiência o comportamento de materiais não lineares, as distribuições complexas das pressões de contato do pneu e as descontinuidades geométricas.

Baseado em toda a discussão apresentadas sobre o tema da mecânica dos pavimentos e buscando desenvolver ferramentas que auxiliem o cálculo do estado de tensões em estruturas e análise de desempenho dos materiais, este trabalho propõe um estudo do comportamento mecânico de pavimentos por meio de modelagem numérica utilizando o método dos elementos finitos, e dados de laboratório obtidos por Moizinho (2007) para materiais encontrados no estado de Roraima.

## 2 METODOLOGIA

A metodologia adotada para se alcançar os objetivos propostos nesta pesquisa consiste de três etapas principais: 1ª Etapa – obtenção dos dados dos materiais das camadas constituintes do pavimento; 2ª Etapa – modelagem do pavimento; 3ª Etapa – análise dos resultados, conforme descrito a seguir.

Na primeira etapa foi feita uma análise do banco de dados gerado por Moizinho (2007) sobre agregados lateríticos encontrados no estado de Roraima e misturas betuminosas, para determinação dos parâmetros das camadas constituintes dos pavimentos.

Na segunda etapa, a fim de avaliar a interação entre os diversos fatores na resposta estrutural do pavimento, foi modelado, um pavimento constituído por três camadas: a primeira camada (revestimento) é constituída de uma mistura asfáltica do tipo CAUQ – Concreto Asfáltico Usinado à Quente; a segunda camada corresponde a base, de materiais granulares, e a terceira corresponde ao subleito, como ilustrado na Figura 1. A solicitação será a de um eixo simples de rodas duplas com  $Q=8,2\text{tf}$  (82kN).

Procurou-se variar o módulo de resiliência, a espessura da camada de base e do revestimento, a fim de verificar o efeito destes parâmetros no comportamento da estrutural do pavimento, de acordo com a descrição

da Tabela 1. Foi adotado o coeficiente de Poisson de 0,35, 0,40 e 0,45, para o revestimento, base e subleito, respectivamente.

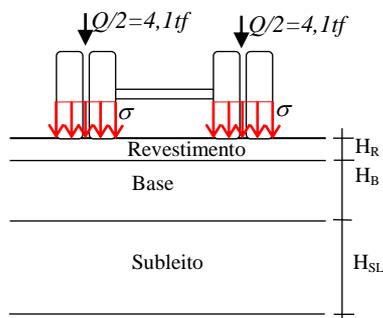


Figura 1. Estrutura do pavimento modelado

Table 1. Descrição dos arranjos estruturais da modelagem

Módulo de Resiliência do revestimento - MR (MPa)	Módulo de Resiliência da base - MB (MPa)	Módulo de Resiliência do subleito - MSL (MPa)	Espessura da Base - HB (cm)	Espessura do Revestimento - HR (cm)
10211	300	80	30	3
				5
				10
			40	3
				5
				10
5434	300	80	30	3
				5
				10
			40	3
				5
				10

As análises numéricas foram efetuadas utilizando o programa de elementos finitos PLAXIS, versão 7.2 (Brinkgreve & Vermeer, 1998), considerando condição de deformação plana. Este programa permite a geração automática da malha, simulação de elementos de interface e de viga, e a disponibilidade de uma interface gráfica de entrada e saída de resultados. Além disso, o programa tem disponíveis cinco modelos, sendo um elástico linear, um elástico perfeitamente plástico de Mohr-Coulomb, dois elastoplásticos (Soft-Soil e Hardening-Soil), e um modelo elastoviscoplastico (“Soft-Soil-Creep”), derivado a partir do modelo Cam-Clay.

A malha de elementos finitos gerada para as análises é composta por elementos finitos triangulares isoparamétricos de 6, com 3 pontos de Gauss, para as camadas constituintes do pavimento, e para o revestimento elemento de viga de 3 nós, conforme ilustrado na Figura 2.

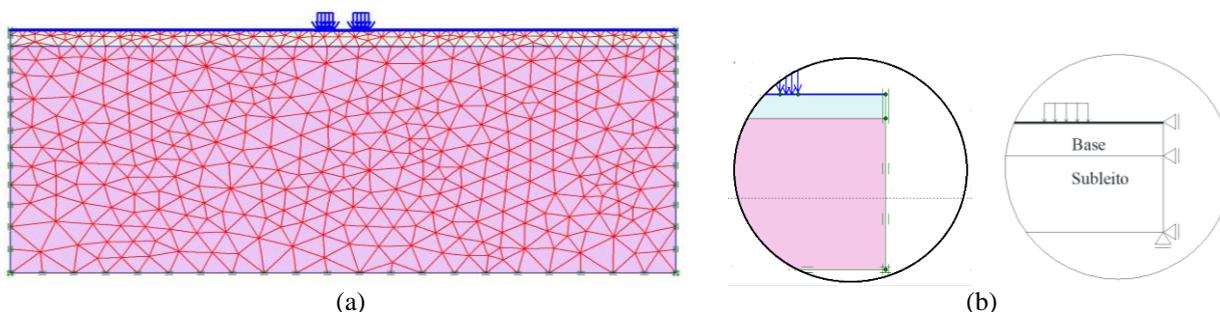


Figura 2. Modelo numérico: (a) malha de elementos finitos; (b) condições de contorno

Para simular o comportamento do sub-leito e da base foi utilizado o modelo constitutivo elastoplástico com critério de ruptura de Mohr-Coulomb e para o revestimento o modelo Soft-Soil-Creep.

Ao final da modelagem os resultados de deflexão obtidos utilizando o software de elementos finitos PLAXIS foi comparado com valores obtidos por Briglia (2009) com uso do softwares KENLAYER (Huang, 2001), com o intuito de verificar a convergência de resultados entre os dois programas ante as mesmas condições geométricas e de carregamento.

O Programa KENLAYER foi desenvolvido por Huang (1993), na universidade de kentuck, utiliza a teoria da elasticidade múltiplas camadas de Burmister, e analisa os danos causados por fadiga do revestimento asfáltico ou deformação permanente do subleito. Determina também, os deslocamentos e as deformações na estrutura do pavimento, sob condições de carregamento pré-estabelecidas. A análise é axissimétrica, usando sobre posição de efeitos e considera os materiais com comportamento elástico lineares, não lineares e viscoelásticos.

### 3 RESULTADOS

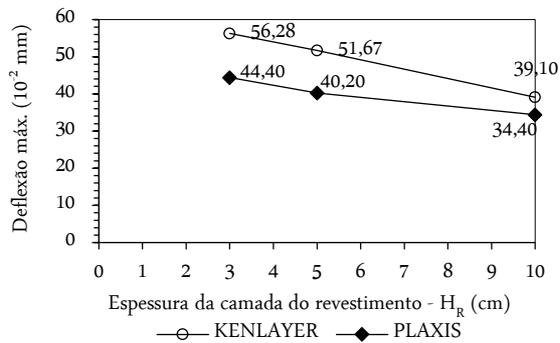
A Tabela 2 apresenta os resultados de deflexão máxima no topo do revestimento ( $D_0$ ) obtidas nas modelagens utilizando os programas PLAXIS e KENLAYER. Observa-se para todos os arranjos estruturais, que os valores obtidos com o KENLAYER foram superiores aos valores gerados com PLAXIS, com uma diferença percentual bastante significativa. Dente outras características intrinsecas que os programas apresentam, essa diferença pode ser justificada pelo fato de no KENLAYER foi considerado comportamento elástico lineares para todos os materiais, já nas modelagem com o PLAXIS foi considerado o modelo de Mohr-Coulomb para base e subleito e para o revestimento asfáltico o modelo Soft-Soil-Creep.

Tabela 2. Resultados de deflexão máxima – PLAXIS vs KENLAYER

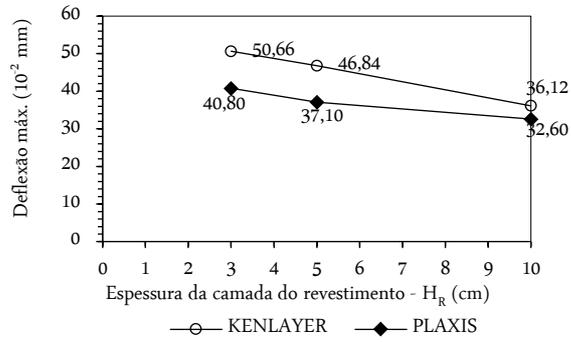
$M_R$ (MPa)	$M_B$ (MPa)	$M_{SL}$ (MPa)	$H_B$ (cm)	$H_R$ (cm)	PLAXIS	KENLAYER	$\Delta D_0$ (%)
					$D_0$ ( $10^{-2}$ mm)		
10211	300	80	30	3	44,400	56,280	21
				5	40,200	51,670	22
				10	34,400	39,100	12
			40	3	40,800	50,660	19
				5	37,100	46,840	21
				10	32,600	36,120	10
5434	300	80	30	3	45,900	56,930	19
				5	41,700	53,700	22
				10	36,600	42,910	15
			40	3	42,500	51,180	17
				5	38,600	48,620	21
				10	34,300	36,890	7

$M_R$ -módulo de resiliência do revestimento;  $M_B$ -módulo de resiliência da base;  $M_{SL}$ -módulo de resiliência do subleito;  $H_B$ -espessura do revestimento;  
 $D_0$  = Deflexão máxima no topo do revestimento;  $\Delta D_0$ -diferença percentual entre valores de deflexão

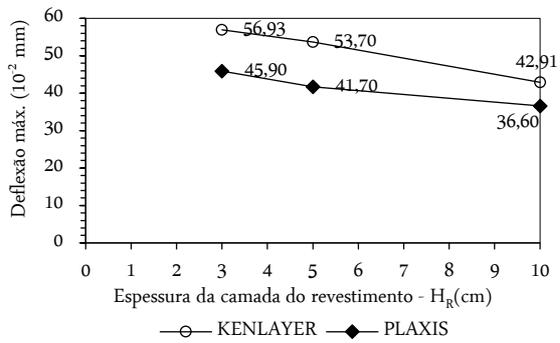
A Figura 3 apresenta o comportamento da deflexão, variando-se a espessura do revestimento, a espessura da base e o módulo revestimento. Observa-se tanto pelo PLAXIS quanto pelo KENLAYER que há redução linear da deflexão com o aumento do reventimento. Neste caso, há uma concordância em termos de comportamento, porém divergencia em termos de valores.



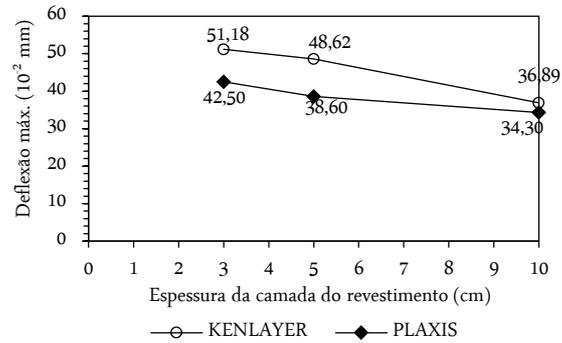
(a)  $M_R=10211$ ,  $M_B=300$ ,  $M_{SL}=80$ ,  $H_B=30$



(b)  $M_R=10211$ ,  $M_B=300$ ,  $M_{SL}=80$ ,  $H_B=40$



(c)  $M_R=5434$ ,  $M_B=300$ ,  $M_{SL}=80$ ,  $H_B=30$



(d)  $M_R=5434$ ,  $M_B=300$ ,  $M_{SL}=80$ ,  $H_B=40$

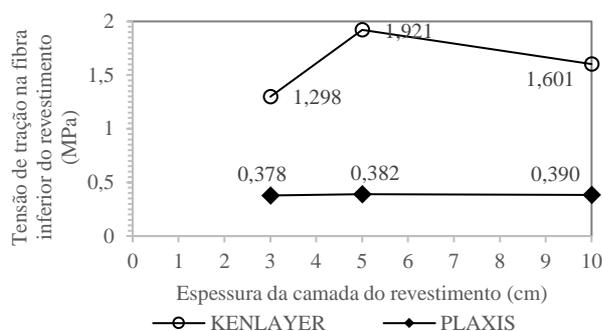
Figura 3. Deflexão máxima no topo do revestimento –  $D_0$  (10<sup>-2</sup>mm): PLAXIS vs KENLAYER

A Tabela 3 apresenta os valores observados de tensão de tração na fibra inferior do revestimento asfáltico ( $\sigma_t$ ) e tensão vertical no topo do subleito ( $\sigma_v$ ) para os arranjos estruturais modelados com o PLAXIS e KENLAYER. Observa-se que os valores de tensão de tração obtidos pelo PLAXIS foram maiores os valores obtidos com o KENLAYER. Enquanto os resultados de tensão vertical mostraram comportamento inverso, ou seja, tensões obtidas com o KENLAYER foram maiores.

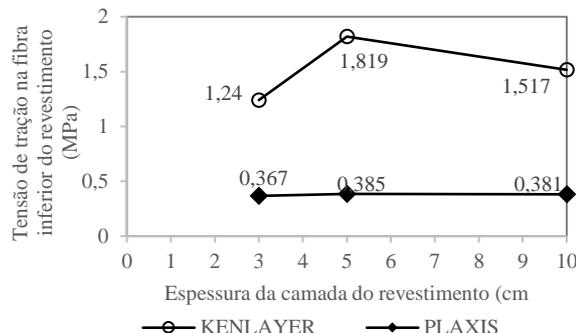
Tabela 3. Resultados de tensão - PLAXIS vs KENLAYER

$M_R$ (MPa)	$M_B$ (MPa)	$M_{SL}$ (MPa)	$H_B$ (cm)	$H_R$ (cm)	PLAXIS		KENLAYER	
					$\sigma_t$ (MPa)	$\sigma_v$ (MPa)	$\sigma_t$ (MPa)	$\sigma_v$ (MPa)
10211	300	80	30	3	1,298	0,058	0,378	0,065
				5	1,921	0,049	0,390	0,072
				10	1,601	0,031	0,382	0,076
			40	3	1,240	0,040	0,367	0,064
				5	1,819	0,035	0,385	0,068
				10	1,517	0,024	0,381	0,071
5434	300	80	30	3	0,464	0,061	0,366	0,063
				5	1,037	0,053	0,376	0,065
				10	1,092	0,036	0,382	0,066
			40	3	0,456	0,042	0,345	0,055
				5	0,989	0,037	0,365	0,065
				10	1,005	0,030	0,381	0,061

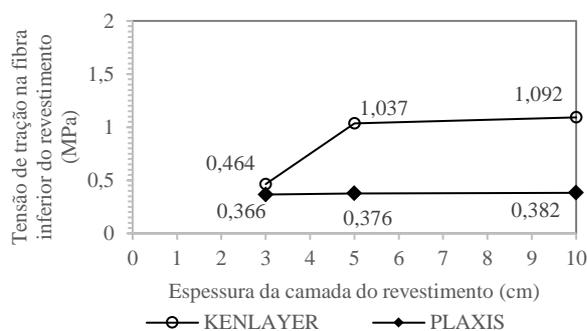
A Figura 4 mostra a tendência de comportamento das tenões na fibra inferior do revestimento asfáltico. Verificou-se, para o KENLAYER, que a tensão aumenta quando a espessura do revestimento muda de 3cm para 5cm, mas diminui quando o revestimento passa para 10 cm. Os resultados obtidos com o PLAXIS mostraram valores de tensão de tração muito próximo, com pouca variação com o aumento do revestimento.



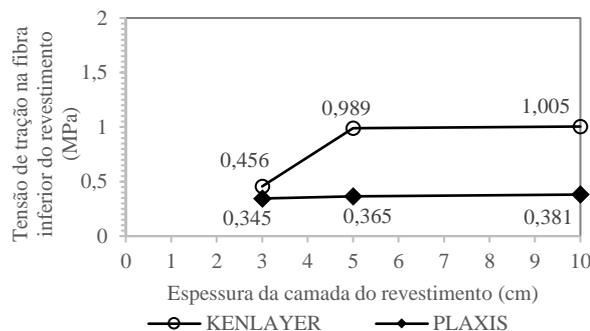
(a)  $M_R=10211$ ,  $M_B=300$ ,  $M_{SL}=80$ ,  $H_B=30$



(b)  $M_R=10211$ ,  $M_B=300$ ,  $M_{SL}=80$ ,  $H_B=40$



(c)  $M_R=5434$ ,  $M_B=300$ ,  $M_{SL}=80$ ,  $H_B=30$



(d)  $M_R=5434$ ,  $M_B=300$ ,  $M_{SL}=80$ ,  $H_B=40$

Figure 4. Tensão de tração no revestimento asfáltico ( $\sigma_t$ ): PLAXIS vs KENLAYER

## 4 CONCLUSÕES

A partir das modelagens realizadas nesses estudo, observa-se que os resultados obtidos nas análises realizadas pelo KENLAYER e PLAXIS apresentaram mesma tendência de comportamento, mas os valores foram bastante distintos.

Com relação a deflexão no topo do revestimento, o resultados mostram redução com aumento do módulo da base, aumento da espessura do revestimento e com o aumento do módulo revestimento.

Para as tensões na fibra inferior do revestimento asfáltico, verificou-se para o KENLAYER, que a tensão aumenta quando a espessura do revestimento aumanta de 3 cm para 5 cm e diminui quando muda para 10 cm. Os resultados obtidos com PLAXIS mostraram essa mesma tendência de comportamento, mas com uma variação muito discreta.

Diante dos resultados aqui apresentados, pretende-se futuramente realizar outras modelagem, variando as espessuras das camadas constituinte do pavimento, bem como os parâmetros dos materiais, e testar outros modelos constitutivos que representem melhor o comportamento dos materiais.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Roraima pelo apoio ao desenvolvimento desse trabalho.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Brinkgreve, R.B.J.; Vermeer, P.A. (1998). PLAXIS: Finite element code for soil and rock analyses, version 7.2. Technical Manual. Rotterdam: A.A. Balkema, 1998. 364p.
- Briglia, W.T. (2009). *Uso do programa Kenlayer na análise estrutural de pavimentos*. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal de Roraima.
- Duncan, J.M., Monismith, C.L., e Wilson, E.L. (1968) “Finite Element Analysis of Pavements”. HRR 228.
- HUANG, Y.H (2001). Manual do Programa Kenlayer.
- Moizinho, J. C. (2007). *Caracterização e Uso de Agregados Lateríticos do Distrito Federal e do Estado de Roraima em CBUQ*. Tese de Doutorado - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.
- Motta, L.M.G. (1991), *Método de dimensionamento de pavimentos flexíveis; critério de confiabilidade e ensaios de cargas repetidas*, Tese (Doutorado em Engenharia Civil), COPPE/UFRJ, 366p.