

**IAG164-03-13**  
**ANÁLISE NÃO LINEAR DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS**  
**CONSIDERANDO O EFEITO DA UMIDADE**  
**ANÁLISIS NO LINEAL DE PAVIMENTOS FLEXIBLES TENIENDO EN**  
**CUENTA EL EFECTO DE LA HUMEDAD**

Juceline Batista dos Santos Bastos  
jucelinebatista@hotmail.com  
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará  
Áurea Silva de Holanda  
aurea@det.ufc.br  
Suelly Helena de Araújo Barroso  
suelly@det.ufc.br  
Universidade Federal do Ceará

## **RESUMO**

A análise estrutural de pavimentos flexíveis é um problema complexo devido principalmente às condições de contorno envolvidas e ao comportamento dos materiais que compõem sua estrutura. As camadas granulares dos pavimentos, por exemplo, apresentam comportamento não linear que muitas vezes é desprezado. Além disso, há as variações climáticas sazonais que podem acarretar alterações que comprometam o desempenho do pavimento. Sendo assim, na tentativa de analisar um pavimento da forma mais adequada, foram estabelecidos os seguintes objetivos: avaliar os efeitos da variação da umidade dos solos nas análises considerando a não linearidade e comparar os resultados obtidos com os provenientes de análises elásticas lineares. Para execução do programa experimental foram coletados solos no município de Caucaia, localizado na Região Metropolitana de Fortaleza, estado do Ceará/Brasil, que foram submetidos aos ensaios de caracterização, compactação, CBR (Índice de Suporte Califórnia) e MR (Módulo de Resiliência). O MR desses solos foi avaliado em diferentes umidades de compactação e pós-compactação. A partir dos resultados do programa experimental, simularam-se seis diferentes seções de pavimento para serem realizadas as análises numéricas. Os resultados indicaram que a utilização do modelo não linear afetou a previsão do desempenho estrutural do pavimento.

## **RESUMEN**

El análisis estructural de pavimentos flexibles es un problema complejo, debido principalmente a las condiciones de contorno que intervienen y el comportamiento de los materiales que componen su estructura. Las capas granulares de pavimentos, por ejemplo, presentan un comportamiento no lineal muchas veces ignorado. Además, hay cambios climáticos estacionales que pueden causar alteraciones que comprometen el rendimiento del pavimento. Así, en un intento de analizar un pavimento adecuadamente, se establecieron los siguientes objetivos: evaluar los efectos de la variación de la humedad del suelo en los análisis teniendo en cuenta la no linealidad y comparar los resultados con los del análisis elástico lineal. Para ejecución de los experimentos, se recogieron muestras de suelo en el municipio de Caucaia, situada en la Región Metropolitana de Fortaleza, estado de Ceará/Brasil, los cuales fueron sometidos a las pruebas de caracterización, la compactación, CBR (Ensayo de Suporte de Suelos) y MR (Módulo de Resiliencia). El MR de los suelos fue evaluado en diferentes humedades antes y después de la compactación. A partir de los resultados del programa experimental, se simularon seis secciones diferentes de pavimento a ser realizadas por análisis

numéricas. Los resultados indican que el uso de modelo no lineal ha afectado la previsión del rendimiento estructural del pavimento.

## 1. INTRODUÇÃO

A análise estrutural de pavimentos flexíveis é um problema complexo devido às condições de contorno envolvidas e ao comportamento dos materiais que compõem sua estrutura. As camadas granulares dos pavimentos, por exemplo, apresentam comportamento  $\sigma \times \epsilon$  não linear que muitas vezes é simplificado em análises lineares. Há, ainda, as variações climáticas sazonais que podem acarretar alterações que comprometam o desempenho do pavimento.

Para investigar a estrutura de um pavimento é necessário analisar o comportamento dos seus materiais constituintes a partir de ensaios que simulem melhor suas propriedades. Assim, o ensaio de Módulo de Resiliência (MR) avalia o comportamento dos materiais quando submetidos aos diferentes níveis de tensões e os seus resultados podem ser utilizados na análise mecanística de um sistema de múltiplas camadas como é o caso dos pavimentos rodoviários. Vários fatores podem influenciar o comportamento resiliente dos materiais granulares, dentre eles vale citar a umidade.

A umidade das camadas dos pavimentos e do subleito pode variar na fase da construção dos pavimentos quando o controle tecnológico não é eficiente ou até mesmo quando se obedecem aos critérios de controle de execução das especificações de serviço do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT). Tais especificações admitem, por exemplo, uma tolerância de  $\pm 2\%$  em relação à umidade ótima. Além disso, a umidade ainda está sujeita a alterações na pós-construção, quando as variações climáticas sazonais podem acarretar mudanças que comprometam o desempenho do pavimento. Deve-se verificar quais materiais locais resistem melhor a tais variações e quais os efeitos dessas variações nas respostas dos critérios de desempenho dos pavimentos flexíveis.

## 2. REVISÃO DE CONCEITOS

### 2.1. Dimensionamento de Pavimentos

No método do DNIT (antigo DNER) determina-se a espessura total do pavimento que é capaz de proteger o subleito quanto à ruptura por cisalhamento ou por acúmulo de deformações permanentes ou plásticas. Entretanto, é um método bastante limitado que não permite uma generalização adequada para outras regiões e diferentes cargas de tráfego (MEDINA e MOTTA, 2005). Em virtude destas limitações, torna-se necessária a evolução do dimensionamento de pavimento a partir de métodos mais mecanicistas.

Os métodos para o dimensionamento de pavimentos flexíveis, como o *Guide for Design of Pavement Structures da American Association of State Highway and Transportation Officials - AASHTO* (1993) e o *Guide for Mechanistic - Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures da National Cooperative Highway Research Program - NCHRP 1-37A* (2004) recomendam que os materiais das camadas do pavimento e do subleito sejam caracterizados mecanicamente considerando o MR.

A relação entre a tensão desvio ( $\sigma_d$ ), aplicada repetidamente, e a deformação recuperável ( $\epsilon_r$ ) correspondente é por definição o MR, ver Equação (1), do material.

$$MR = \frac{\sigma_d}{\epsilon_r} \quad (1)$$

Para o método mecanístico-empírico, os valores de tensão/deformação nos pavimentos são determinados a partir de simulações que têm como dados de entrada as propriedades dos materiais obtidas em ensaios de laboratório, sendo os resultados comparados com critérios de dimensionamento pré-definidos. Caso a escolha de uma estrutura não satisfaça aos critérios de desempenho, uma nova tentativa é realizada pelo projetista até que os requisitos sejam satisfeitos (NCHRP 1-37A, 2004).

Os critérios estabelecem para o projeto de estruturas de pavimentos flexíveis a expectativa do desempenho a ser oferecido, em termos de vida de fadiga e da ocorrência de deformações permanentes excessivas. Assume-se que esses fatores estão relacionados às respostas mecânicas que ocorrem em pontos críticos da estrutura submetidos à repetição das cargas do tráfego: deslocamento vertical da superfície (para fadiga); tensões/deformações de tração na face inferior do revestimento (para fissuração por fadiga) e tensões/deformações verticais de compressão no topo do subleito (para deformação permanente).

Preussler (1983) propôs expressões para estimar a deflexão máxima admissível na superfície da estrutura do pavimento gerada por um carregamento conhecido. A Equação (2) representa a deflexão para espessuras de revestimento maiores ou iguais a 10 cm. Para espessuras de revestimento menores que 10 cm, o autor recomenda que seja usada a Equação (3).

$$\log(D) = 3,479 - 0,289 \cdot \log N \quad (2)$$

$$\log(D) = 3,148 - 0,188 \cdot \log N \quad (3)$$

onde D é a deflexão máxima total admissível, em 0,01 mm e N é o número de aplicações de carga do eixo simples padrão de 8,2 tf.

Pinto (1991) sugeriu uma previsão de vida de fadiga representada pela Equação (4).

$$N_t = 6,14 \cdot 10^8 \cdot \left(\frac{1}{\sigma_t}\right)^{5,34} \quad (4)$$

onde  $N_t$  é o número de repetições da tensão de tração imposta que leva a vigota à ruptura completa e  $\sigma_t$  é a tensão de tração inicial (kgf/cm<sup>2</sup>).

Köstenberger (1989) *apud* Motta (1991) apresenta o modelo que estima na Áustria a tensão vertical admissível no topo do subleito, apresentado na Equação (5).

$$\sigma_{vm\acute{a}x} = \frac{0,006 \cdot M_R}{1 + 0,7 \cdot \log N} \quad (5)$$

onde  $\sigma_{vm\acute{a}x}$  é a tensão vertical admissível no topo do subleito, em kgf/cm<sup>2</sup>,  $M_R$  é o módulo de resiliência do subleito, em kgf/cm<sup>2</sup>.

Para análise e dimensionamento dos pavimentos, Franco (2007) desenvolveu o sistema SisPav, em que estão incorporados dois programas de análise: um baseado no método de Análise Elástica de Múltiplas Camadas (AEMC) e o outro baseado no Método dos Elementos Finitos Tridimensionais (EFin3D). Segundo Franco (2007), o AEMC é mais prático para as análises de pavimentos em relação ao EFin3D.

### 3. OBJETIVO

O objetivo da pesquisa aqui descrita foi avaliar os efeitos da variação da umidade dos solos nas análises considerando a não linearidade no dimensionamento de pavimentos flexíveis utilizando o programa computacional AEMC. Os resultados obtidos foram também comparados com os provenientes de análises elásticas lineares.

## **4. MATERIAIS E MÉTODOS**

Nesta pesquisa foram utilizados solos provenientes do município de Caucaia, localizado na Região Metropolitana de Fortaleza (RMF), estado do Ceará/Brasil. Esse município foi escolhido em razão da necessidade da implantação de novas rodovias, provocadas pela instalação de uma refinaria e uma siderúrgica nos próximos anos.

### **4.1. Ensaios de granulometria, compactação, CBR e expansão**

Para realização do programa experimental foram ensaiadas 4 amostras. As amostras 01 e 02 foram usadas para representar o subleito local. A amostra 03 foi utilizada na camada de sub-base e a quarta amostra foi composta pela mistura de 65% de brita (pedreira de Caucaia) e 35% da amostra 03 para ser utilizada na camada de base. Esses materiais foram submetidos aos ensaios de: análise granulométrica (DNER-ME 051/94), compactação de solos (DNER-ME 162/94) e CBR e expansão (DNER ME 049/94). Para a determinação dos valores de CBR e da expansão das amostras foram moldados CPs na umidade ótima e na energia de compactação correspondente a sua finalidade de aplicação: subleito (normal), sub-base (intermediária) e base (modificada).

### **4.2. Ensaios de Módulo de Resiliência**

Os solos e a mistura de solo-brita estudados foram submetidos ao ensaio triaxial de carga repetida, de acordo com o método da COPPE/UFRJ (MEDINA e MOTTA, 2005). Os CPs foram moldados por compactação dinâmica, em 10 camadas, em cilindro tripartido, de 10 cm de diâmetro por 20 cm de altura.

Os ensaios foram divididos em duas etapas. Na primeira etapa, os corpos de prova (CPs) foram compactados nas seguintes condições: (i) na umidade ótima ( $W_{ót}$ ); (ii) 2% acima da umidade ótima ( $W_{ót}+2\%$ ) e (iii) 2% abaixo da umidade ótima ( $W_{ót}-2\%$ ). Na segunda etapa, os CPs foram ainda moldados: (iv) na umidade ótima e posteriormente umedecidos até atingirem uma umidade 2% acima da ótima ( $W_{ót}+2\%$  pós), e (v) na umidade ótima e secos até atingirem uma umidade 2% abaixo da ótima ( $W_{ót}-2\%$  pós), conforme estudo completo apresentado em Bastos (2013).

## **5. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS**

### **5.1. Ensaios de compactação, CBR e expansão**

A massa específica aparente seca máxima obtida nas amostras 01, 02, 03 e 04 foram 1,862 g/cm<sup>3</sup>, 1,977 g/cm<sup>3</sup>, 1,985 g/cm<sup>3</sup> e 2,273 g/cm<sup>3</sup> associados a 11,5%, 8,3%, 8,6% e 6,1% de umidade ótima, respectivamente. Os CBRs obtidos nas amostras 01, 02, 03 e 04 foram 12,5%, 35,4%, 39,5% e 70,3% associados a 0,07%, 0,02%, 0,05% e 0% de expansão, respectivamente.

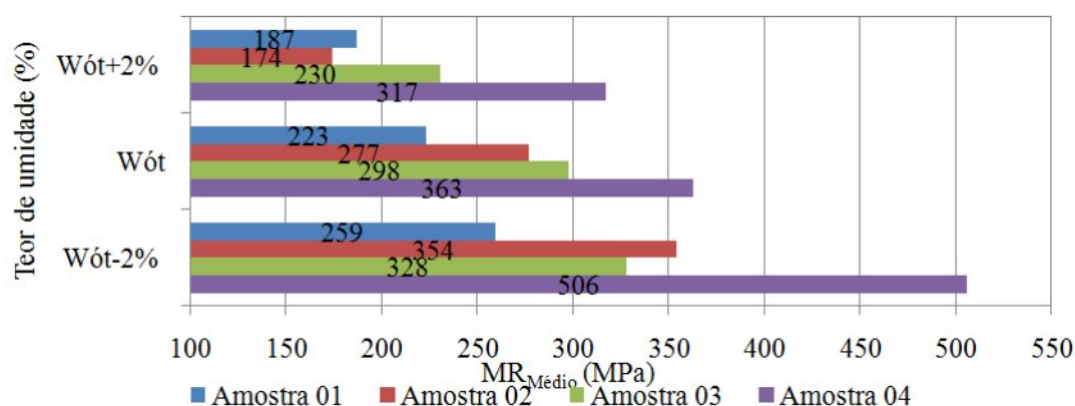
### **5.2. Módulo de Resiliência**

Verificou-se o comportamento dos subleitos e das camadas granulares na fase da construção dos pavimentos. Como esperado (Figura 1), valores menores de umidade resultaram em módulos de resiliência maiores e esses diminuíram à medida que o teor de umidade foi maior. Verificou-se, para os subleitos (amostras 01 e 02), que variações de umidade iguais a -2% e +2% na compactação, em relação à umidade ótima, resultaram respectivamente, em aumento

de 16% e redução de 19%, para amostra 01, e em aumento de 28% e redução de 59% nos valores de MR obtidos em relação à umidade ótima de compactação, para a amostra 02.

Percebeu-se, ainda, que variações de umidade de compactação iguais a -2% e +2%, resultaram respectivamente, em aumento de 10% e redução de 29%, para o material de sub-base (amostra 03); em aumento de 39% e redução de 15% em comparação com os valores do módulo de resiliência obtidos na umidade ótima de compactação para o material de base (amostra 04). Esses valores mostram que a camada de base dos pavimentos flexíveis simulados nessa pesquisa é mais resistente à adição de 2% de água, em relação à umidade ótima na fase de construção, em comparação à sub-base e aos subleitos testados. Costa e Motta (2006) também chegaram a resultados semelhantes.

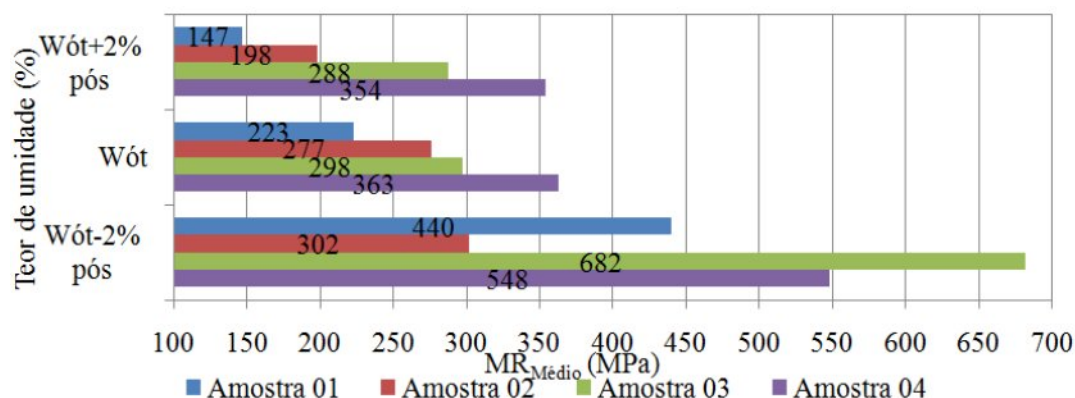
**Figura 1 – Variação do módulo de resiliência com o teor de umidade na compactação**



Dando prosseguimento à análise dos resultados, simulou-se o comportamento dos subleitos e das camadas granulares sob o efeito das variações de umidade na fase pós-construção dos pavimentos flexíveis, tendo em vista que após a construção, os pavimentos terão que suportar as variações de umidade, como resultado das variações climáticas sazonais.

Na Figura 2, verificou-se que valores menores de umidade resultaram em MR maiores e estes diminuíram à medida que o teor de umidade foi maior. Verificou-se para os subleitos (amostras 01 e 02) que variações de umidade iguais a -2% e +2% na pós-compactação, em relação à umidade ótima, resultaram respectivamente, em aumento de 97% e redução de 52%, para amostra 01, e em aumento de 9% e redução de 39%, para a amostra 02.

**Figura 2 – Variação do módulo de resiliência com o teor de umidade pós-compactação**



De acordo com os resultados indicados na Figura 2 é possível perceber que o material de sub-base (amostra 03) dos pavimentos propostos para esta pesquisa é o que sofre maior influência

com o processo de secagem, seguido do material de base (amostra 04) que apresenta aumentos de 129% e 51%, nos valores de MR, quando comparados aos valores de MR obtidos na umidade ótima de compactação. Takeda *et al.* (2006) também encontraram aumentos significativos após a secagem de 2% para os seus materiais. Deve-se destacar ainda que os MRs dos materiais, de sub-base e de base, analisados nesta pesquisa (amostras 03 e 04, respectivamente) reduziram pouco com o acréscimo de 2% de umidade pós-compactação.

## 6. RESULTADOS DAS ANÁLISES NUMÉRICAS

### 6.1. Análise Não Linear de Pavimentos Flexíveis - Efeito da Umidade

As análises não lineares foram efetuadas com o programa AEMC, adotando-se um modelo elástico linear para as camadas dos revestimentos e para os subleitos, e um elástico não linear para as camadas granulares, utilizando-se o modelo composto (MACÊDO, 1996). Admitiram-se a espessura total do pavimento e as espessuras de revestimentos obtidas em função do nível de tráfego ( $N$  de  $1 \times 10^6$ ,  $5 \times 10^6$  e  $5 \times 10^7$ ), determinadas utilizando-se o ábaco de dimensionamento de acordo com o método do DNIT (2006). Os valores de CBR utilizados nos dimensionamentos foram apresentados no item 5.1.

O carregamento considerado foi composto por uma pressão uniforme (550 kPa) aplicada em uma área de formato circular com raio de 0,108 m, cuja resultante corresponde à carga de uma roda do eixo simples padrão. Os coeficientes de *Poisson* adotados nesta pesquisa foram:  $\nu = 0,30$  para o revestimento;  $\nu = 0,35$  para base e sub-bases; e  $\nu = 0,40$  para os subleitos.

Os dados de entrada, para os diferentes números  $N$ , estão apresentados nas Tabelas 1 e 2. Ressalte-se que esses dados foram usados no programa para realização das análises não lineares considerando os materiais de subleito A-4 (amostra 01) e A-2-4 (amostra 02), de sub-base (amostra 03) e de base (amostra 04), compactados 2% abaixo da ótima ( $W_{ót}-2\%$ ) e compactados na umidade ótima e posteriormente secos até 2% abaixo da ótima ( $W_{ót}-2\%$  pós).

**Tabela 1 – Dados de entrada para análise do pavimento com subleito A-4**

Composição do pavimento	Espessura em função do número $N$ (m)			MR (MPa)
	$N = 1 \times 10^6$	$N = 5 \times 10^6$	$N = 5 \times 10^7$	
Revestimento (TSD)	0,025	-	-	500
Revestimento (CBUQ)	-	0,050	0,100	3000
Base ( $W_{ót}-2\%$ )	0,225	0,175	0,100	$1161,4 \cdot \sigma_3^{0,530} \cdot \sigma_d^{-0,296}$
Sub-base ( $W_{ót}-2\%$ )	0,100	0,100	0,100	$454,7 \cdot \sigma_3^{0,457} \cdot \sigma_d^{-0,400}$
Subleito ( $W_{ót}-2\%$ )	0,00	0,000	0,000	259
Base ( $W_{ót}-2\%$ pós)	0,225	0,175	0,100	$1633,3 \cdot \sigma_3^{0,471} \cdot \sigma_d^{-0,100}$
Sub-base ( $W_{ót}-2\%$ pós)	0,100	0,100	0,100	$805,6 \cdot \sigma_3^{0,544} \cdot \sigma_d^{-0,406}$
Subleito ( $W_{ót}-2\%$ pós)	0,000	0,000	0,000	440

**Tabela 2 – Dados de entrada para análise do pavimento com subleito A-2-4**

Composição do pavimento	Espessura em função do número $N$ (m)			MR (MPa)
	$N = 1 \times 10^6$	$N = 5 \times 10^6$	$N = 5 \times 10^7$	
Revestimento (TSD)	0,025	-	-	500
Revestimento (CBUQ)	-	0,050	0,100	3000
Base ( $W_{ót}-2\%$ )	0,225	0,175	0,100	$1161,4 \cdot \sigma_3^{0,530} \cdot \sigma_d^{-0,296}$
Subleito ( $W_{ót}-2\%$ )	0,000	0,000	0,000	354
Base ( $W_{ót}-2\%$ pós)	0,225	0,175	0,100	$1633,3 \cdot \sigma_3^{0,471} \cdot \sigma_d^{-0,100}$
Subleito ( $W_{ót}-2\%$ pós)	0,000	0,000	0,000	302

Destaque-se que não foi possível realizar análises não lineares das estruturas compactadas nas seguintes umidades: ótima ( $W_{ót}$ ), 2% acima da ótima ( $W_{ót}+2\%$ ) e na umidade ótima e umedecidos até 2% acima da ótima ( $W_{ót}+2\%$  pós). Nessas umidades os materiais da camada de base apresentaram coeficientes de determinação ( $R^2$ ) muito baixos para o MR, sendo esses valores melhor representados pela média. Maiores detalhes ver estudo completo apresentado em Bastos (2013).

## 6.2. Comparação das Análises Numéricas Lineares e Não Lineares

Neste item compararam-se os efeitos da variação da umidade dos solos nas análises não lineares e análises elásticas lineares. Verificou-se o deslocamento vertical (deflexão) no topo do pavimento, tensão horizontal na face inferior do revestimento e tensão vertical no topo do subleito, admitindo que esses resultados sejam máximos no eixo vertical no centro da carga.

### 6.2.1. Deslocamento Vertical

As Tabelas 3 e 4 exibem os resultados das deflexões obtidas nas análises e das deflexões máximas admitidas, calculadas pelas Equações (2) e (3) recomendadas por Preussler (1983).

**Tabela 3 – Deflexão no topo do pavimento (0,01 mm) – Estrutura com subleito A-4**

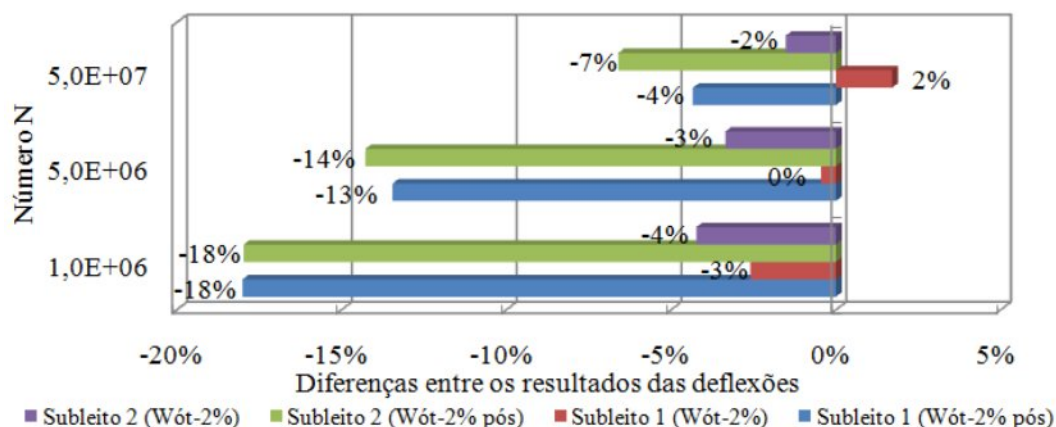
Número N	$1 \times 10^6$		$5 \times 10^6$		$5 \times 10^7$	
Programas	AEMC Linear	AEMC Não linear	AEMC Linear	AEMC Não linear	AEMC Linear	AEMC Não linear
$W_{ót}-2\%$	25	26	20	20	16	16
$W_{ót}-2\%$ pós	20	25	15	18	11	12
Dadm (0,01 mm)	105		77		18	

**Tabela 4 – Deflexão no topo do pavimento (0,01 mm) – Estrutura com subleito A-2-4**

Número N	$1 \times 10^6$		$5 \times 10^6$		$5 \times 10^7$	
Programas	AEMC Linear	AEMC Não linear	AEMC Linear	AEMC Não linear	AEMC Linear	AEMC Não linear
$W_{ót}-2\%$	23	24	18	19	14	14
$W_{ót}-2\%$ pós	24	29	19	22	15	16
Dadm (0,01 mm)	105		77		18	

Observando as Tabelas 3 e 4, conclui-se que as análises elásticas lineares e não lineares realizadas pelo AEMC apresentaram resultados diferentes para maioria das estruturas analisadas quanto aos valores de deflexão no topo do pavimento. Os resultados das análises não lineares são maiores em quase todos os casos, com exceção das estruturas para um tráfego de  $5 \times 10^7$  compactados 2% abaixo da umidade ótima para os dois subleitos. Observando as Tabelas 3 e 4, percebe-se que os valores de deflexão não ultrapassaram a deflexão máxima admitida nas umidades testadas. A Figura 3 apresenta os resultados das diferenças entre as deflexões considerando as análises elásticas lineares e não lineares.

**Figura 3 – Diferenças entre os resultados das deflexões - análises lineares e não lineares**



Percebeu-se que as diferenças nas análises se comportam da mesma forma nas estruturas com subleito A-4 (amostra 01) e A-2-4 (amostra 02) submetidos à secagem após a compactação. Os resultados das análises elásticas lineares foram até 18% menores que os resultados das análises não lineares. Percebeu-se, ainda, que as diferenças das análises das estruturas com subleito A-4 e A-2-4, compactados 2% abaixo da umidade ótima, foram muito pequenas ou nulas. Destaca-se que apenas as camadas granulares foram consideradas elásticas não lineares.

#### 6.2.2. Tensões Horizontais

As Tabelas 5 e 6 mostram as tensões de tração na face inferior do revestimento (para fissuração por fadiga) obtidas nas análises e as tensões de tração admissíveis na fibra inferior do revestimento asfáltico, calculadas pela Equação (4) recomendada por Pinto (1991).

**Tabela 5 – Comparação das tensões horizontais (kgf/cm<sup>2</sup>) – Estruturas com subleito A-4**

Número N	1×10 <sup>6</sup>		5×10 <sup>6</sup>		5×10 <sup>7</sup>	
Programas	AEMC Linear	AEMC Não linear	AEMC Linear	AEMC Não linear	AEMC Linear	AEMC Não linear
W <sub>ót</sub> -2%	-3,4	-3,3	-1,1	-1,0	0,0	-0,1
W <sub>ót</sub> -2% pós	-3,2	-3,0	-1,1	-1,0	-0,2	-0,4
σ <sub>tadm</sub> (kgf/cm <sup>2</sup> )	0,59		0,44		0,29	

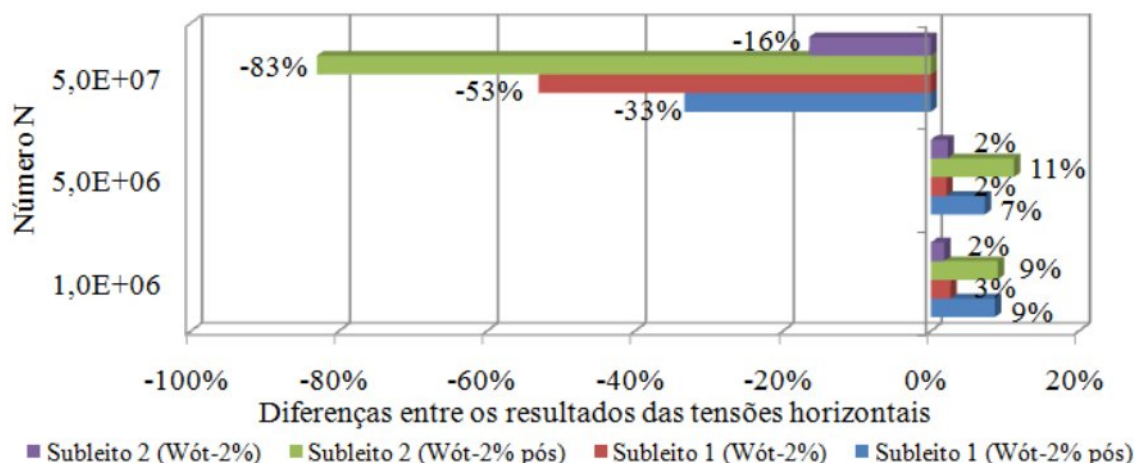
**Tabela 6 – Comparação das tensões horizontais (kgf/cm<sup>2</sup>) – Estruturas com subleito A-2-4**

Número N	1×10 <sup>6</sup>		5×10 <sup>6</sup>		5×10 <sup>7</sup>	
Programas	AEMC Linear	AEMC Não linear	AEMC Linear	AEMC Não linear	AEMC Linear	AEMC Não linear
W <sub>ót</sub> -2%	-3,3	-3,3	-1,0	-1,0	-0,1	-0,1
W <sub>ót</sub> -2% pós	-3,4	-3,2	-1,1	-1,0	0,0	-0,1
σ <sub>tadm</sub> (kgf/cm <sup>2</sup> )	0,59		0,44		0,29	

O sinal negativo, nas Tabelas 5 e 6, se refere aos esforços de compressão. Observando-se essas tabelas é possível concluir que as análises elásticas lineares e não lineares realizadas pelo AEMC apresentaram resultados semelhantes quanto aos valores de tensões de tração na fibra inferior do revestimento asfáltico do pavimento para as estruturas calculadas para um tráfego N de 1×10<sup>6</sup> e 5×10<sup>6</sup>. Mesmo assim, os resultados das análises não lineares foram até 11% maiores para as estruturas com os dois subleitos. Percebeu-se que os valores das tensões de tração na fibra inferior do revestimento não ultrapassaram os valores máximos admissíveis para as umidades testadas.

**Figura 4 – Diferenças entre os resultados das tensões horizontais**





Nota-se na Figura 4 que as diferenças foram mais representativas para as estruturas calculadas para o tráfego  $N = 5 \times 10^7$ , tanto para as estruturas com subleito A-4 (amostra 01), como para as com subleito A-2-4 (amostra 02). As análises lineares apresentaram valores de tensão de tração na fibra inferior do revestimento asfáltico até 83% menores que as não lineares.

### 6.2.3. Tensões Verticais

Nas Tabelas 7 e 8 são apresentados os resultados das análises elásticas lineares e as análises não lineares obtidas pelo AEMC para as tensões verticais no topo do subleito. As tensões verticais máximas admitidas foram calculadas pela Equação (5) citada por Motta (1991).

**Tabela 7 – Comparação das tensões verticais (kgf/cm<sup>2</sup>) – Estruturas com subleito A-4**

Tensões calculadas e tensões admissíveis (kgf/cm²) para cada umidade		Número N					
		1×10°		5×10°		5×10'	
		Programas					
		AEMC Linear	AEMC Não linear	AEMC Linear	AEMC Não linear	AEMC Linear	AEMC Não linear
Wót-2%	σVcalc	0,6	0,6	0,6	0,6	0,5	0,5
	σVadm		3,0		2,8		2,5
Wót-2% pós	σVcalc	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
	σVadm		5,2		4,7		4,2

**Tabela 8 – Comparação das tensões verticais (kgf/cm<sup>2</sup>) – Estruturas com subleito A-2-4**

Tensões calculadas e tensões admissíveis (kgf/cm²) para cada umidade		Número N					
		1×10º		5×10º		5×10¹	
		Programas					
		AEMC Linear	AEMC Não linear	AEMC Linear	AEMC Não linear	AEMC Linear	AEMC Não linear
Wót-2%	σv <sub>calc</sub>	1,1	1,2	1,1	1,1	1,1	1,1
	σv <sub>adm</sub>		4,2		3,8		3,4
Wót-2% pós	σv <sub>calc</sub>	1,1	1,2	1,0	1,1	1,0	1,0
	σv <sub>adm</sub>		3,6		3,2		2,9

Observando as Tabelas 7 e 8 é possível concluir que as análises elásticas lineares e não lineares realizadas pelo AEMC apresentaram resultados muito parecidos e na maioria das vezes iguais para os valores de tensões verticais no topo do subleito dos pavimentos estudados. Os resultados das análises elásticas lineares e não lineares diferiram em, no máximo, 9%. Percebeu-se, ainda, que os valores de tensão vertical no topo do subleito não ultrapassaram os valores máximos admissíveis nas umidades testadas.

A comparação das análises elásticas lineares e não lineares realizadas com o AEMC mostrou que mesmo as estruturas não alterando suas espessuras, no caso das estruturas testadas (por não atingirem os valores máximos admitidos), a consideração da não linearidade das camadas granulares resultou em diferenças nos resultados das deflexões, tensões horizontais e verticais. Percebeu-se que essas diferenças foram maiores nos resultados dos deslocamentos verticais e tensões horizontais, e que esses são essenciais para verificação da fadiga.

## 7. CONCLUSÕES

As análises elásticas lineares e não lineares realizadas pelo AEMC apresentaram resultados diferentes para maioria das estruturas analisadas quanto aos valores da deflexão no topo do pavimento. Os resultados das análises não lineares forneceram valores maiores em quase todos os casos, com exceção das estruturas para um tráfego de  $5 \times 10^7$  compactadas 2% abaixo da umidade ótima para os dois subleitos testados.

As análises elásticas lineares e não lineares realizadas pelo AEMC apresentaram resultados semelhantes quanto aos valores das tensões de tração na fibra inferior do revestimento asfáltico do pavimento para as estruturas calculadas para tráfegos de  $1 \times 10^6$  e  $5 \times 10^6$ . As diferenças entre as análises elásticas lineares e as análises não lineares foram mais representativas para o tráfego de  $5 \times 10^7$ , para os dois tipos de subleito investigados (A-4 e A-2-4). As análises elásticas lineares apresentaram valores de tensão de tração na fibra inferior do revestimento asfáltico até 83% menores que as análises não lineares.

As análises elásticas lineares e não lineares realizadas pelo AEMC apresentaram resultados muito parecidos e na maioria das vezes iguais para os valores de tensões verticais no topo do subleito dos pavimentos estudados.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS (1993). AASHTO. *Guide for design of pavement structures 1993*. Washington, DC.
- BASTOS, J. B. S. (2013). *Influência da variação da umidade no comportamento de pavimentos da região metropolitana de Fortaleza*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Ceará.
- COSTA, J. H. e MOTTA, L. M. G. (2006). *Estudo da Resiliência dos Solos Finos no Litoral de Sergipe*. In: XX ANPET - Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, 2006, Brasília.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM - DNER ME 049 (1994). *Solos – Determinação do índice de suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas*. Método de Ensaio. Rio de Janeiro, RJ.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM - DNER ME 051 (1994). *Solos – Análise granulométrica*. Método de Ensaio. Rio de Janeiro, RJ.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM - DNER ME 162 (1994). *Solos – Ensaio de compactação utilizando amostras trabalhadas*. Departamento Nacional de Estradas e Rodagem. Método de Ensaio, Rio de Janeiro, RJ.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES - DNIT (2006). *Manual de pavimentação*. 3ª edição. Rio de Janeiro.
- FRANCO, F. A. C. P. (2007). *Método de dimensionamento mecanístico-empírico de pavimentos asfálticos – SisPav*. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, RJ.
- MACÊDO, J. A. G. (1996). *Interpretação de ensaios defletoométricos para avaliação estrutural de pavimentos flexíveis*. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, RJ.
- MEDINA, J. e MOTTA, L. M. G. (2005). *Mecânica dos pavimentos*. 2ª Ed. Rio de Janeiro.
- MOTTA, L. M. G. (1991). *Método de dimensionamento de pavimentos flexíveis; critério de confiabilidade e*

*ensaios de cargas repetidas*. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE/UFRJ.

NATIONAL COOPERATIVE HIGHWAY RESEARCH PROGRAM - NCHRP 1-37A. (2004). *Guide for mechanistic-empirical design of new and rehabilitated pavement structures*. Report. Transportation Research Board.

PINTO, S. (1991). *Estudo do comportamento à fadiga de misturas betuminosas e aplicação na avaliação estrutural de pavimentos*. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE/UFRJ.

PREUSSLER, E. S. (1983). *Estudo da deformação resiliente de pavimentos flexíveis e aplicação ao projeto de camadas de reforço*. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE/UFRJ.

TAKEDA, M. C.; PARREIRA, A. B. e MOTTA, L. M. G. (2006). *A influência da variação de umidade pós-compactação no módulo de resiliência de solos tropicais*. In: XX ANPET - Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, 2006, Brasília. Panorama Nacional da Pesquisa em Transportes, 2006. v. 2. p. 1244-1255.