

## **ATENÇÃO**

**AS INFORMAÇÕES CONSTANTES  
DESTE ARTIGO PODERÃO SER  
UTILIZADAS EM OUTROS  
TRABALHOS, DESDE QUE SEJAM  
CITADOS ESTA FONTE E OS  
AUTORES**

**37ª REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO  
11º ENCONTRO NACIONAL DE CONSERVAÇÃO RODOVIÁRIA  
37ª RAPv / 11º ENACOR**

**GOIÂNIA/GO - BRASIL - 08 a 11 de agosto de 2006**

**Local: Centro de Convenções de Goiânia**

**ANÁLISE DE TENSÃO E DEFORMAÇÃO EM ESTRUTURAS DE  
PAVIMENTOS FLEXÍVEIS CONTEMPLANDO CRITÉRIOS DE RUPTURA  
POR CISALHAMENTO DAS CAMADAS GRANULARES**

***Glicério Trichês<sup>1</sup>; Breno Salgado Barra<sup>2</sup>; Mônica Sayoco Nishibe<sup>3</sup>***

---

<sup>1</sup> Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Santa Catarina, Brasil, Rua João Pio Duarte Silva, s/n - Córrego Grande, CEP 88040-970 - Caixa Postal: 476. Fone: (48) 3331-9370, fax: (48)3331-9939, e-mail: [ecv1gtri@ecv.ufsc.br](mailto:ecv1gtri@ecv.ufsc.br)

<sup>2</sup> Doutorando do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Santa Catarina, Brasil, Rua Prof. Milton Sullivan, 76 - Carvoeira, CEP 88040-620. Fone: (48) 3331-9370, fax: (48) 3331-9939, e-mail: [brenobarra@gmail.com](mailto:brenobarra@gmail.com)

<sup>3</sup> Mestranda do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Santa Catarina, Brasil, Rua João Pio Duarte Silva, s/n - Córrego Grande, CEP 88040-970. Fone: (48) 3331-9370, fax: (48)331-9939, e-mail: [monica@centauroseng.com.br](mailto:monica@centauroseng.com.br)

**Análise de Tensão e Deformação em Estruturas de Pavimentos Flexíveis Contemplando Critérios de Ruptura  
por Cisalhamento das Camadas Granulares**

**37ª RAPv/11º ENACOR - nº 070**

***Os Caminhos da Integração  
Goiânia/GO - BRASIL - 08 a 11 de agosto de 2006***

**Análise de Tensão e Deformação em Estruturas de Pavimentos Flexíveis Contemplando Critérios de Ruptura  
por Cisalhamento das Camadas Granulares  
37ª RAPv/11º ENACOR - nº 070**

*Os Caminhos da Integração  
Goiânia/GO - BRASIL - 08 a 11 de agosto de 2006*

## RESUMO

Quando se processam análises mecanísticas não lineares em programas de dimensionamento de pavimentos, pode-se incorrer na obtenção de resultados que, a princípio, parecem ser indiferentes à condição de modificações na estrutura concebida originalmente, como a alteração das espessuras das camadas de revestimento, principalmente no que tange às deformações que ocorrem na fibra inferior das camadas citadas, induzindo na maioria dos casos a concluir uma equivalência da deformabilidade de camadas delgadas (3cm a 4cm) às mais espessas (9cm), por exemplo, acarretando questionamentos muitas vezes contraditórios ou equivocadamente explanados, caso não se tenha o conhecimento de uma ferramenta matemático-experimental na elucidação do problema. É neste contexto que vem a ser abordada neste trabalho, a importância da aplicação prática dos conceitos teóricos quanto à resistência ao cisalhamento dos materiais, com um enfoque maior dado ao comportamento das camadas granulares de base em estruturas de pavimentos, a fim de exemplificar que nem sempre as condições de deformação obtidas na fibra inferior das camadas de revestimento apenas, pode ser parâmetro para a aprovação ou rejeição do uso de um pavimento no campo, mas que esta decisão seja produto de uma análise mais global das condições da estrutura, entendendo que os estados de tensões a que estão sujeitos os materiais nos substratos, como nas camadas de base, por exemplo, são cruciais no entendimento do desempenho mecânico dos pavimentos frente às cargas solicitantes. É factível que ao não serem analisadas as tensões e deformações nas camadas granulares, como tradicionalmente ocorre no Brasil, há o risco de ser atendida a condição de resistência à fadiga da camada de revestimento, mas não a de ruptura por cisalhamento da camada de base. São apresentados resultados provenientes de simulações não lineares realizadas em um programa de análises mecanísticas, o Everstress 5.0, em duas estruturas típicas de pavimentos, verificando no espaço  $p$  (tensão normal efetiva)  $\times$   $q$  (tensão cisalhante máxima), o efeito da variação na espessura da camada de revestimento e da magnitude das cargas por eixo, na propagação das tensões à camada granular subjacente.

**PALAVRAS-CHAVE:** dimensionamento, pavimento, deformação, tensão, cisalhamento.

## ABSTRACT

When non-linear mechanistic analysis are processed using programs of pavement design, it can be incurred into the attainment of results that, at first, seem to be indifferent to modifications made in the original structure projected, such as the variation of the covering layer thicknesses, principally due to the strains that occur in the bottom of the covering layer, inducing in the majority of the cases to conclude an equivalency in the deformity of thin layers (3cm to 4cm) to the thickest (9cm), for instance, generating many times contradictory queries or wrongly explained, in case that it does not have the knowledge of a mathematic-experimental tool to elucidate the problem. It is in this context that this paper approaches the importance of the practical application of the theoretical concepts referred to the shear strenght of the materials, focusing more specifically the behavior of the unbound granular base layers in pavement structures, in order to exemplify that not always the strain conditions attained in the bottom of the covering layers only, can be used as a parameter to the approval ou rejection on the use of a pavement in the field, but that this decision be result of a more global analysis of the structure conditions, undstanding that the stress levels to that are submitted the materials in the underlayers, as in the unbound granular base layers, for instance, are crucial in the understanding of the mehanical performance of the pavements facing to the applied loadings. When is not analyzed the stresses and strains in the granular layers, as traditionally occurs in Brazil, there is the risk of being reached the condition of fatigue strength of the covering layer, but not to of rupture by shear of the base layer. They are presented results proceeding from non-linear simulations realized with a program of mechanistic analysis, such as EVERSTRESS 5.0, in two typical pavement structures, verifying in the space  $p$  (normal effective stress)  $\times$   $q$  (maximum shear strength), the effect of the variation in the thickness of the covering layer and the magnitude of loads per axle on the stress propagation all over the unbound granular base layers.

**KEY-WORDS:** designing, pavement, strain, stress, shear.

**Análise de Tensão e Deformação em Estruturas de Pavimentos Flexíveis Contemplando Critérios de Ruptura por Cisalhamento das Camadas Granulares**

**37ª RAPv/11º ENACOR - nº 070**

*Os Caminhos da Integração*  
*Goiânia/GO - BRASIL - 08 a 11 de agosto de 2006*

## INTRODUÇÃO

A incorporação das ferramentas computacionais, como os programas de análise mecânica, no dimensionamento de pavimentos, tem permitido avanços significativos no auxílio à previsão de desempenho das estruturas projetadas, antes mesmo de serem executadas no campo, evitando assim em muitos casos, que ocorram investimentos dispendiosos nas obras rodoviárias, as quais utilizam o erário público, sem o emprego de critérios técnicos que venham a comprometer a vida útil dos pavimentos no campo.

De uma forma geral, os pavimentos têm sido projetados com o intuito de se forjar uma estrutura de multi-camadas que possa suportar, os esforços provenientes da solicitação do tráfego e as condições intempéricas, compreendendo uma vida útil de vinte anos em média.

Quando o pavimento se deteriora prematuramente, seja em função das deformações permanentes, fissurações ou arrancamentos, entre outros, as intervenções na estrutura são necessárias. Inúmeros fatores na prática contribuem para que os defeitos descritos ocorram, contudo, muitas vezes são ignoradas as causas originadas ainda na fase de projeção das estruturas, como a interpretação parcial ou mesmo equivocada dos dados das análises mecânicas fornecidas pelos programas de dimensionamento, seja pela manipulação dos resultados em sua forma pura apenas ou pela ausência de interatividade de uma análise dos valores fornecidos a teorias de comportamento mecânico dos materiais na previsão de desempenho das estruturas dos pavimentos, como a resistência ao cisalhamento dos solos, por exemplo.

Estas considerações surgem à medida que, em alguns casos, quando são realizadas análises não lineares em programas de dimensionamento e atenta-se apenas para os critérios de deformação na fibra inferior da camada de revestimento como critério de colapso dos pavimentos, pode-se incorrer no equívoco de considerar a resistência mecânica de estruturas com camadas bastante delgadas (3cm a 4cm), equivalente à de camadas mais espessas (9cm), por exemplo, sem que se atente para uma verificação da condição dos estados de tensões a que estão submetidos os substratos deste pavimento, que ao serem investigados podem elucidar estas questões contraditórias e quase invariavelmente impertinentes.

Partindo da idéia de que as previsões do desempenho mecânico das estruturas de pavimentos devem compreender não apenas as análises mecânicas computacionais, é objetivo deste trabalho exemplificar através de simulações numéricas realizadas com duas estruturas de pavimento, que ao não serem analisadas as tensões e deformações nas camadas granulares, como tradicionalmente ocorre no Brasil, há o risco de ser atendida a condição de resistência à fadiga da camada de revestimento, mas não a de ruptura por cisalhamento da camada de base.

Os resultados permitiram verificar que as interações de teorias de comportamento mecânico dos materiais às análises mecânicas dos programas de dimensionamento, permitem além de uma avaliação mais global das condições dos estados de tensão, esclarecer as questões controversas em relação às deformações que ocorrem na fibra inferior das camadas de revestimento dos pavimentos.

## COMPORTAMENTO MECÂNICO DOS MATERIAIS GRANULARES

Sendo a resistência ao cisalhamento de um solo admitida como a máxima resistência que este é capaz de suportar, sob determinadas condições, sem apresentar ruptura generalizada, ainda que sujeito à ocorrência de rupturas em condições particulares (locais isolados) dentro de uma mesma estrutura, logo a resistência de um determinado solo à deformação é fortemente influenciada pela resistência ao cisalhamento no contato entre as partículas que o constitui [1].

Conhecer a magnitude desta resistência, bem como os fatores que a influenciam, denota um pré-requisito básico à compreensão da Mecânica dos Solos, e conseqüentemente do comportamento mecânico dos substratos das camadas dos pavimentos, como das camadas granulares de base, por exemplo.

Entretanto, pode-se resumir este efeito de interação considerando que a resistência ao cisalhamento total (o produto da tensão de cada ligação e o número total de ligações) é proporcional à força normal que une as duas partículas de solo. Se esta força normal diminui, a tensão ou o número de ligações diminui também, logo a resistência ao cisalhamento total acompanha a mesma escala de decréscimo. Desta forma, pode-se inferir que a resistência ao cisalhamento interpartículas é friccional na natureza.

[2] consideram que o comportamento friccional entre as partículas deve ser considerado como a situação normal para os solos, colocando o comportamento coesivo em uma condição de exceção. A afirmação que poderia caber mais adequadamente acerca do conteúdo descrito, encontra-se na interpretação da Equação 1 de Mohr-Coulomb.

$$\tau = c + \sigma' \operatorname{tg} \phi \quad (1)$$

onde:

$\tau$  = tensão tangencial ou cisalhante;

$c$  = intercepto coesivo, também chamado de coesão;

$\sigma'$  = tensão normal efetiva;

$\phi$  = ângulo de atrito.

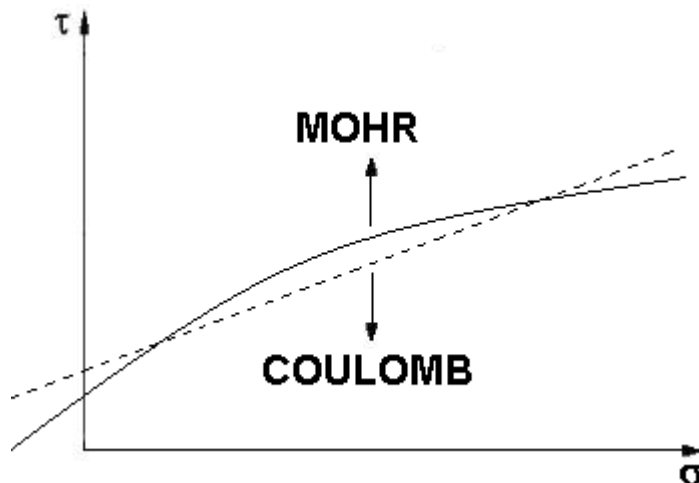
### **Análise de Tensão e Deformação em Estruturas de Pavimentos Flexíveis Contemplando Critérios de Ruptura por Cisalhamento das Camadas Granulares**

**37ª RAPv/11º ENACOR - nº 070**

*Os Caminhos da Integração  
Goiânia/GO - BRASIL - 08 a 11 de agosto de 2006*

A partir da nomenclatura dos elementos que compõem a Equação 1 é possível desmembrá-la em duas parcelas: a de atrito ( $\sigma' \tan \phi$ ) e a de coesão ( $c$ ). A primeira tem sua origem pautada em dois fatores, como o atrito puro mineral-mineral e o entrosamento entre as partículas que constitui o solo, tendo esta última uma participação maior na resistência ao cisalhamento dos solos, principalmente nos granulares, enquanto que a segunda deve-se às forças de atração eletrostática entre as partículas, dando origem à coesão “verdadeira” ou efetiva e, às forças de sucção, ocorrentes em função da capilaridade, denominada de coesão aparente.

Logo, tem-se que a Equação 1 apresentada anteriormente, expressa uma junção dos modelos referentes aos critérios de ruptura (envoltórias) dos solos postulados por Mohr e Coulomb, em que ambos podem ser visualizados graficamente na Figura 1.



**Figura 1: Modelos gráficos das envoltórias de ruptura propostas por Mohr e Coulomb [2].**

Conclui-se, diante do gráfico apresentado na Figura 1, que o critério de ruptura proposto por Coulomb, em 1776, estabelece uma relação linear entre as tensões tangencial ( $\tau$ ) e normal ( $\sigma$ ) no plano de ruptura, no momento da ruptura. Nota-se também que a tensão tangencial atuando no plano de ruptura aumenta com o acréscimo da tensão atuante no mesmo plano. Em contrapartida, Mohr, em 1882, propõe uma não-linearização do critério proposto por Coulomb. Por esta razão, o critério de ruptura adotado em Mecânica dos Solos é conhecido conforme descrito para a Equação 1, ou seja, de Mohr-Coulomb [2].

A reta pertinente aos modelos gráficos é denominada de envoltória de ruptura, sendo definida em função dos parâmetros  $c$  e  $\phi$  já mencionados.

É importante esclarecer que apesar dos planos de ruptura no gráfico da Figura 1 estarem em função da tensão normal total ( $\sigma$ ), a Equação 1, de acordo com o princípio das tensões efetivas, deve ser expressa com base na tensão normal efetiva ( $\sigma'$ ), em virtude da água e o ar não resistirem a esforços cisalhantes, sendo a resistência dos solos dada a partir da pressão intragranular, isto é, através dos arranjos dos grãos ou esqueleto mineral.

Portanto, o estudo da deformabilidade dos materiais granulares, têm procurado levar em consideração as tensões normais efetivas e as tensões máximas cisalhantes, sendo representadas em planos  $p \times q$ , respectivamente, conforme expressam as Equações 2 e 3 [2].

$$p = (\sigma_1 + \sigma_3)/2 \quad (2)$$

onde:

$p$  = tensão normal efetiva;

$\sigma_1$  = tensão principal maior;

$\sigma_3$  = tensão principal menor.

$$q = (\sigma_1 - \sigma_3)/2 \quad (3)$$

onde:

$q$  = tensão cisalhante máxima;

$\sigma_1$  = tensão principal maior;

$\sigma_3$  = tensão principal menor.

### **Análise de Tensão e Deformação em Estruturas de Pavimentos Flexíveis Contemplando Critérios de Ruptura por Cisalhamento das Camadas Granulares**

**37ª RAPv/11º ENACOR - nº 070**

*Os Caminhos da Integração*  
Goiânia/GO - BRASIL - 08 a 11 de agosto de 2006

A partir da observação das Equações 2 e 3, tem-se que as tensões máximas cisalhantes e normais efetivas atuantes em um plano p x q qualquer, podem ser determinadas desde que sejam conhecidas as tensões principais ( $\sigma_1$  e  $\sigma_3$ ).

## ESTRUTURAS DE PAVIMENTOS E DADOS DE ENTRADA DAS ANÁLISES

As estruturas de pavimento adotadas para a execução das análises mecânicas consistem de camadas de revestimento flexível (concreto betuminoso usinado a quente - CBUQ), e de substratos formados por uma base de comportamento granular (brita graduada simples) e subleito composto por material (solo) de comportamento coesivo de matriz argilosa. Na Tabela 1 são expostas as características de cada estrutura.

**Tabela 1 - Características estruturais dos pavimentos analisados.**

Camada	Espessuras (cm)	Coefficiente de Poisson ( $\nu$ )	Estrutura 1 Módulos Resilientes ( $\text{kgf/cm}^2$ )	Estrutura 2 Módulos Resilientes ( $\text{kgf/cm}^2$ )
Revestimento Betuminoso	2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 e 9	0,30	30000	50000
Base Granular	30	0,40	2500	3000
Subleito	semi-infinito	0,45	500	1500

Os materiais constituintes da estrutura de pavimento flexível utilizado são caracterizados por parâmetros que são utilizados como dados de entrada dos programas de análise de pavimentos utilizados.

Estes parâmetros são: módulo de resiliência, coeficiente de Poisson e, no caso de análise de camadas de comportamento não-linear, onde os módulos de resiliência são calculados no sistema, é necessário o conhecimento dos parâmetros  $k_1$  e  $k_2$ , determinados experimentalmente, utilizados nos modelos de previsão de comportamento modular do material, segundo os conceitos e teorias desenvolvidos por Biarez e Dunlap *apud* [3], e por [4].

Contudo, mesmo sendo os módulos das camadas de base e subleito gerados pelo próprio sistema operacional do programa EVERSTRESS 5.0 em análises não-lineares, faz-se necessário incluir nos dados de entrada os valores referenciais dos módulos de resiliência das camadas citadas (Tabela 1), para que o programa possa gerar o estado de tensões a que o material estará submetido nas cotas desejadas para análise do seu comportamento no campo, bem como as deformações resultantes da aplicação das cargas solicitantes, e com base nos valores das tensões geradas ( $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ ,  $\sigma_3$ ), o programa recalcula em sua base de processamento de dados, a partir dos valores de  $k_1$  e  $k_2$  fornecidos, indicando ao projetista os módulos adequados aos materiais das camadas mencionadas.

Neste trabalho, admitiu-se que a camada de base seguiria o comportamento de um material granular, utilizando-se o modelo de Biarez e Dunlap *apud* [3] (Equação 4). Para o material de subleito, foi considerado um comportamento conforme o modelo de [4], mas assumindo a constante  $k_2$  negativa (Equação 5).

$$M_R = K_1 \cdot \sigma_\theta^{k_2} \quad (4)$$

onde:

$M_R$  = módulo resiliente;

$\sigma_\theta$  ou  $\theta$  = soma das tensões principais ( $\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$ );

$k_1$  e  $k_2$  = constantes determinadas experimentalmente.

$$M_R = K_1 \cdot \sigma_d^{k_2} \quad (5)$$

onde:

$M_R$  = módulo resiliente;

$\sigma_d$  = tensão-desvio ( $\sigma_1 - \sigma_3$ );

$k_1$  e  $k_2$  = constantes determinadas experimentalmente.

Os valores modulares fixos das camadas utilizados foram admitidos como valores referenciais, assim como os valores dos coeficientes de Poisson (Tabela 1). Estes últimos foram determinados baseados em estudos desenvolvidos por [5],

### Análise de Tensão e Deformação em Estruturas de Pavimentos Flexíveis Contemplando Critérios de Ruptura por Cisalhamento das Camadas Granulares

37ª RAPv/11º ENACOR - nº 070

*Os Caminhos da Integração*  
Goiânia/GO - BRASIL - 08 a 11 de agosto de 2006

que apresenta intervalos de valores de coeficientes de Poisson para diversos materiais que podem ser adotados em simulações numéricas (Tabela 2).

**Tabela 2 - Valores típicos de coeficientes de Poisson [5].**

Material	Limites
Mistura betuminosa densa	0,30 a 0,40
Materiais granulares não tratados	0,30 a 0,40
Solos granulares finos	0,30 a 0,50
Solos argilosos saturados	0,40 a 0,50

No caso dos valores dos módulos de resiliência adotados para as camadas das estruturas de pavimento exibidas na Tabela 1, o método de dimensionamento desenvolvido na COPPE/UFRJ apresentado em [6], serviu como parâmetro, em que foram utilizados os valores indicados na Tabela 3.

**Tabela 3 - Valores de módulo resiliente [6].**

Material	Limites de Módulo de Resiliência (kgf/cm <sup>2</sup> )
Revestimento asfáltico	30000 a 60000
Base granular	400 a 5000
Solo de subleito	500 a 3000

Os valores das constantes  $k_1$  e  $k_2$  dos modelos descritos nas Equações 4 e 5, foram extraídas dos estudos de [7], para a camada de base granular, e dos resultados dos ensaios triaxiais da amostra de solo do furo 03 referente ao projeto de duplicação da rodovia BR-101/SC, para o solo coesivo do subleito (Tabela 4).

**Tabela 4 - Valores de  $k_1$  e  $k_2$  utilizados.**

Material	$k_1$ (MPa)	$k_2$
Base granular	671	0,4637
Solo de subleito	217	-0,54

Como se pode perceber pela utilização das constantes experimentais  $k_1$  e  $k_2$ , as rotinas de avaliação mecânica das estruturas dos pavimentos neste trabalho foram executadas a partir de análises não-lineares, com o intuito de reproduzir de maneira mais realística os estados de tensões gerados nos substratos com a aplicação das cargas solicitantes, principalmente na camada granular de base. O programa EVERSTRESS 5.0, projetado pelo *Washington State Department of Transportation* [8] foi utilizado para simular as solicitações e as respostas dos pavimentos.

Na entrada de dados para as análises não-lineares no programa EVERSTRESS 5.0, as constantes  $k_1$  e  $k_2$  exigem um ajuste nos seus valores originais obtidos nos ensaios triaxiais, pois consideram a pressão atmosférica no cálculo dos módulos gerados. Desta forma, a Equação 6 utilizada tem o seguinte formato:

$$E = k_1 \cdot (pa)^{k_2} \cdot (\alpha/pa)^{k_2} \quad (6)$$

onde:

$E$  = módulo resiliente;

$pa$  = pressão atmosférica, admitida como 101,4 kPa;

$\alpha$  = soma de tensões (camada granular) ou tensão-desvio (camada de material fino);

$k_1$  e  $k_2$  = constantes determinadas experimentalmente.

Para que o programa calcule adequadamente os valores modulares, é necessário calcular o novo valor de  $k_1$ . Utilizando os valores adotados neste trabalho, o valor de  $K_1 = k_1 \cdot (pa)^{k_2}$  a serem adotados no processamento pelo EVERSTRESS 5.0 será de 232,2MPa, no caso da camada de base, e 746,79MPa no caso do subleito. Nota-se que o valor de  $k_2$  continua sendo o mesmo para entrada no programa (-0,54).

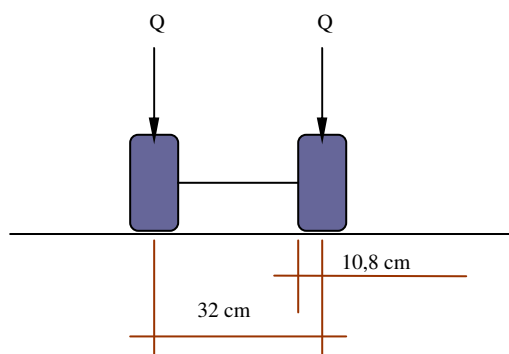
As configurações de eixo consideradas neste trabalho foram eixos simples de rodas duplas (ESRD) (Figura 2), em que diversas combinações de carga e pressão de insuflagem dos pneumáticos foram avaliadas (Tabela 5).



**Tabela 5 - Dados de entrada referentes ao tipo de eixos estudados.**

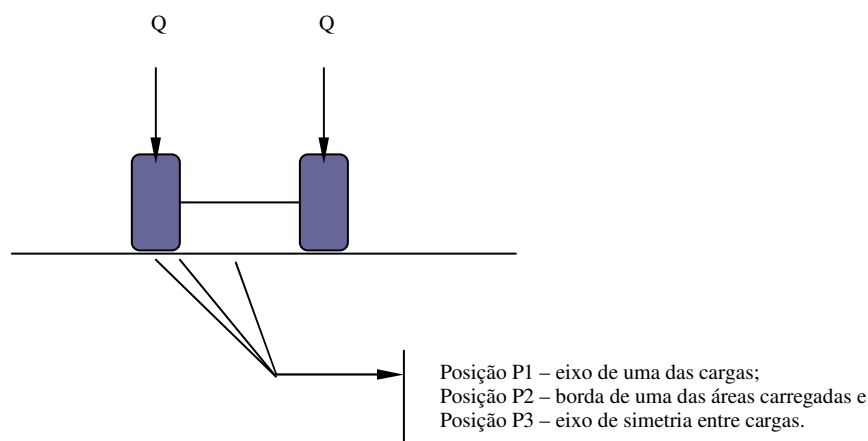
Carga por eixo (kN)	Carga por roda (kN)	Pressão de Insulflagem (kPa)	Raio de Contato (cm)
60,00 (30,00)	15,00	409,35	10,80
82,00 (41,00)	20,52	559,44	10,80
100,00 (50,00)	25,00	682,25	10,80
120,00 (60,00)	30,00	818,70	10,80

Obs.: coordenadas das distâncias entre as cargas (rodas) para o ESRD: (0,0) e (0,32). Os valores entre parênteses correspondem às cargas solicitantes por semi-eixo.



**Figura 2 - Carga de eixo simples de rodas duplas.**

Para esta configuração, foram analisadas as respostas do processamento em três localizações horizontais distintas para a determinação mais precisa de valores críticos, conforme demonstrado na Figura 3.



**Figura 3 - Localização das cargas de eixo simples de rodas duplas.**

Considerando-se que o eixo da carga à esquerda esteja situado na posição ( $x=0$ ;  $y=0$ ), o ponto de análise P1 estará na posição (0;0), o ponto P2 em (0; 10,8) e P3 em (0; 16).

As cotas verticais selecionadas para análise dos dados foram: fibra inferior da camada de revestimento, metade da camada granular, e topo da camada de subleito.

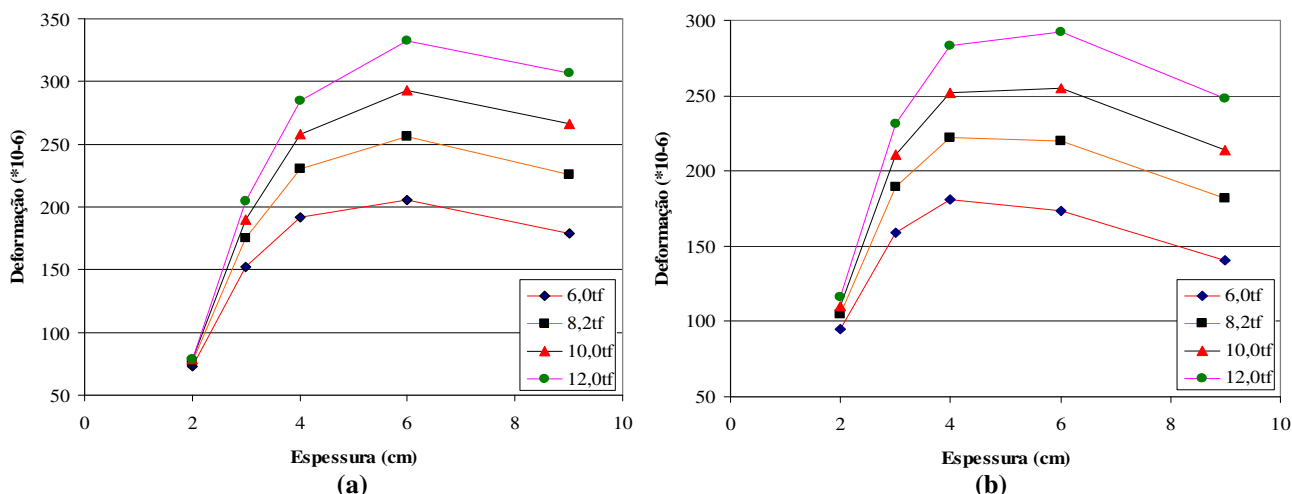
### **DEFORMAÇÕES NA FIBRA INFERIOR DAS CAMADAS DE REVESTIMENTO**

As estruturas dos pavimentos apresentadas na Tabela 1, submetidas às cargas de semi-eixo de 30kN, 41kN, 50kN e 60kN, conforme são consideradas pelo programa EVERSTRESS 5.0 na entrada de dados, apresentaram os seguintes valores de deformação na fibra inferior das camadas de revestimento, conforme as variações de espessura mencionadas anteriormente (Figura 4).

#### **Análise de Tensão e Deformação em Estruturas de Pavimentos Flexíveis Contemplando Critérios de Ruptura por Cisalhamento das Camadas Granulares**

**37ª RAPv/11º ENACOR - nº 070**

*Os Caminhos da Integração  
Goiânia/GO - BRASIL - 08 a 11 de agosto de 2006*



**Figura 4 - Deformações na fibra inferior da camada de revestimento com módulos de:**  
**(a) 30000kgf/cm<sup>2</sup> e (b) 50000kgf/cm<sup>2</sup>.**

Nota-se que estruturas cujo valor modular de revestimento são maiores desenvolvem deformações de tração menores que aquelas de valor modular inferior. Tal resposta confirma a tendência esperada, uma vez que camadas mais rígidas são capazes de suportar maiores tensões em sua face inferior.

Contudo, o formato das curvas obtidas é o fator relevante nas análises dos dados de deformação, pois interpretando apenas os resultados em sua forma absoluta, pode-se incorrer à afirmação de que a resistência mecânica de uma camada de revestimento com espessura de 4cm e 3cm, para camadas com módulos de 30000kgf/cm<sup>2</sup> e 50000kgf/cm<sup>2</sup>, respectivamente, suportam deformações de tração equivalentes à espessura de 9cm, isto se mantendo constante a espessura da camada granular nas modelizações das estruturas de pavimento estudadas.

Mesmo à frente de dados conflitantes como os mencionados, a resposta para uma situação conflitante como a apresentada é óbvia, pois é factível que aumentando a espessura da camada de revestimento de um pavimento, maior será a sua capacidade de absorver as cargas resultantes da solicitação do tráfego, logo mais resistente será em relação a espessuras mais reduzidas.

Entretanto, apenas inferir uma conclusão já esperada tornaria muito evasivo o argumento para o esclarecimento da situação mencionada. Necessitava-se então mostrar com dados práticos e simulados, o ganho de resistência ao pavimento atribuído pelo aumento da espessura da camada de revestimento, além da avaliação do estado de tensões ocorrentes na camada granular das estruturas dos pavimentos, a fim de verificar o quanto aspectos como a variação da espessura da camada de revestimento e da carga solicitante, influenciam nas condições de ruptura por cisalhamento dos pavimentos, ainda que análises de deformação, às vezes, computem valores de mesma magnitude para espessuras tão díspares, como foi o caso apresentado.

## **RUPTURA POR CISALHAMENTO DA CAMADA GRANULAR DOS PAVIMENTOS TESTADOS**

Para avaliar a resistência ao cisalhamento das camadas granulares dos pavimentos nas simulações computacionais, foram consideradas as tensões principais ( $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ , e  $\sigma_3$ ) resultantes da aplicação das cargas solicitantes exatamente na metade de suas cotas totais, em que resultaram na construção de gráficos sob o plano de tensões  $p \times q$ , com base nas Equações 2 e 3.

Para atribuir o critério de ruptura das camadas granulares dos pavimentos foram adotados os parâmetros  $c$  (intercepto coesivo) e  $\phi$  (ângulo de atrito) de uma brita graduada de boa resistência mecânica utilizada em simulações numéricas realizadas por [9], cujos valores são 45,9° e 73,4kPa, respectivamente (Figuras 5 e 6, de a até e).

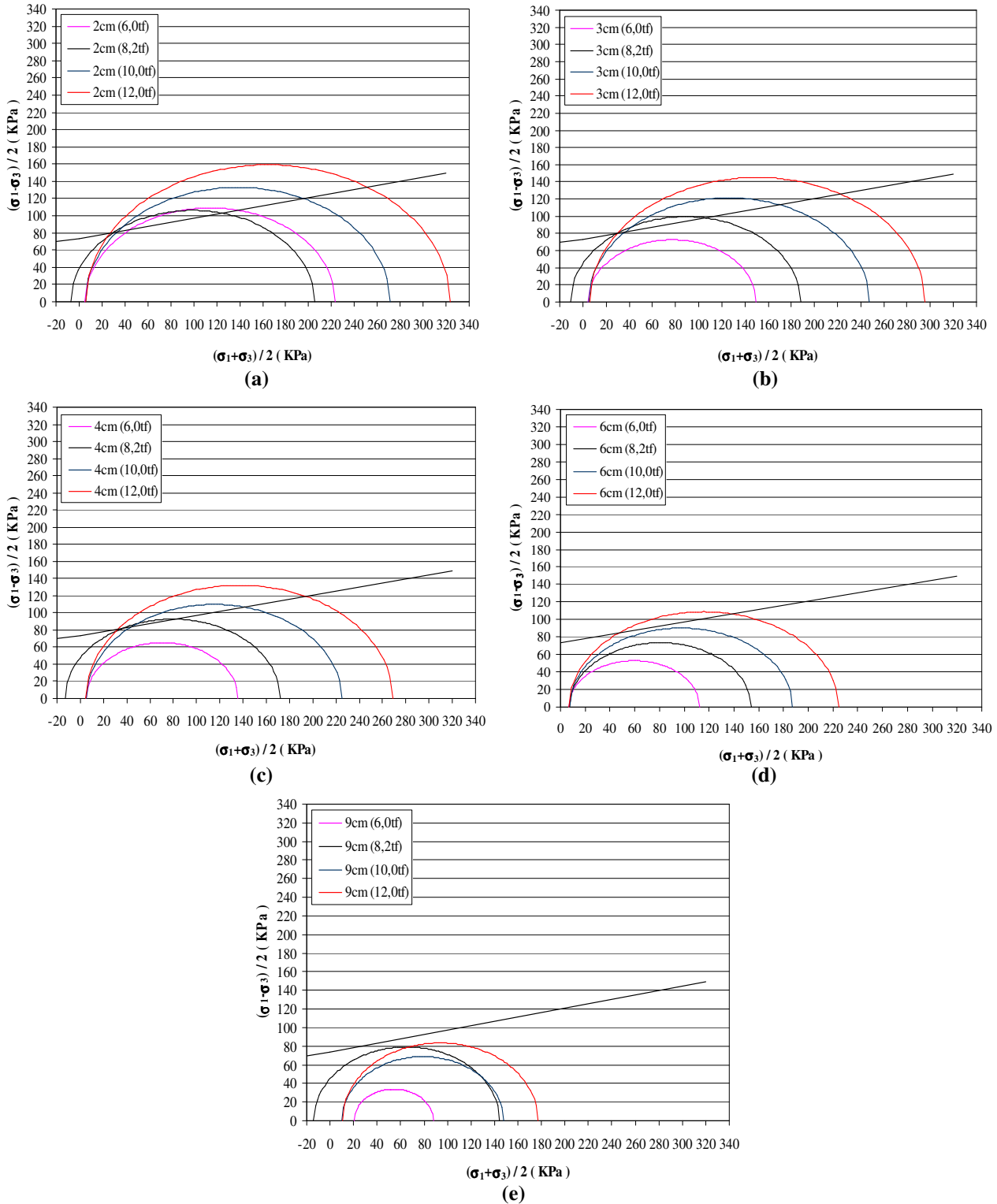
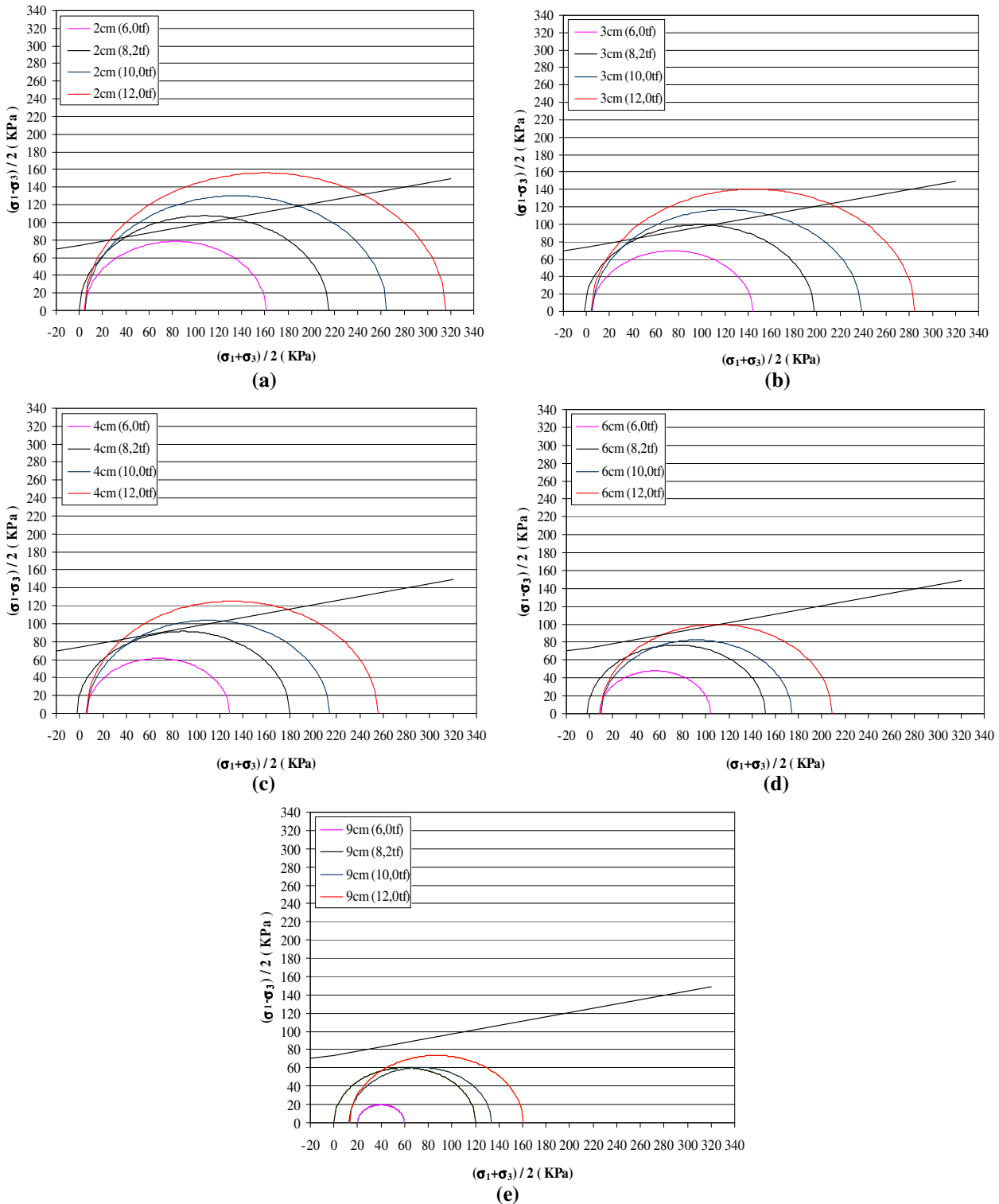


Figura 5 - Envoltórias de ruptura do pavimento com revestimento de módulo  $30000\text{kgf/cm}^2$  frente às cargas solicitantes de 6,0tf, 8,2tf, 10,0tf, e 12,0tf, com espessuras de: (a) 2cm, (b) 3cm, (c) 4cm, (d) 6cm, e (e) 9cm.



**Figura 6 - Envoltórias de ruptura do pavimento com revestimento de módulo 50000kgf/cm<sup>2</sup> frente às cargas solicitantes de 6,0tf, 8,2tf, 10,0tf, e 12,0tf, com espessuras de: (a) 2cm, (b) 3cm, (c) 4cm, (d) 6cm, e (e) 9cm.**

A partir da visualização dos gráficos com as envoltórias de ruptura das camadas granulares dos pavimentos com camadas de revestimento de módulo 30000kgf/cm<sup>2</sup> e 50000kgf/cm<sup>2</sup>, é bastante perceptível que projetar ou restaurar estruturas de pavimentos apenas com base nos dados fornecidos pelas análises computacionais quanto às deformações

**Análise de Tensão e Deformação em Estruturas de Pavimentos Flexíveis Contemplando Critérios de Ruptura por Cisalhamento das Camadas Granulares**

**37ª RAPv/11º ENACOR - nº 070**

na fibra inferior das camadas de revestimento, pode conduzir à concepção de estruturas incapazes de suportar a magnitude das cargas solicitantes em seus substratos, principalmente na camada de base.

Comparando os resultados das simulações mecânicas em todos os casos, nota-se que justamente as espessuras de revestimento com 3cm e 4cm, que pareciam se deformar de maneira equivalente à espessura de 9cm, conforme ilustrado na Figura 3, apresentaram os maiores índices de ruptura das camadas granulares face às cargas solicitantes adotadas, devido às elevadas tensões cisalhantes máximas resultantes.

De maneira sistemática, pôde-se observar que melhores são as condições de resistência ao cisalhamento das camadas granulares, à medida que aumentam as espessuras das camadas de revestimento juntamente com o acréscimo da rigidez através da elevação do módulo de resiliência, em consonância à solicitação de cargas de menor impacto.

Desta forma, para a estrutura com revestimento de módulo 30000kgf/cm<sup>2</sup>, a espessura de 2cm de concreto asfáltico não se mostrou capaz de suportar nenhuma carga solicitante das que foram adotadas nas simulações, enquanto as de 3cm e 4cm comportaram apenas os eixos de 6,0tf. No caso dos revestimentos com 6cm ocorre uma resistência maior às cargas solicitantes, em que apenas a de 12,0tf acarretou na ruptura por cisalhamento do material, ao passo que com o aumento da espessura para 9cm, todas as cargas solicitantes encontraram-se abaixo do critério de ruptura estabelecido pelas condições de  $c$  e  $\phi$  do material granular adotado.

A situação fica praticamente inerte quando se analisam as simulações realizadas com a estrutura dotada de uma camada de revestimento de módulo 50000kgf/cm<sup>2</sup>, pois a única diferença para a situação descrita no parágrafo anterior, é que a espessura de 2cm de concreto asfáltico é incluída no universo das espessuras que suportam as solicitações de eixos com 6,0tf.

Entretanto, como nas situações práticas das rodovias atualmente não se verifica o tráfego de veículos com baixa capacidade de carga por eixo, tem-se que para os pavimentos poderem ser resistentes às solicitações cada vez mais crescentes dos veículos, devem-se conceber pavimentos com materiais de qualidade capazes de forjar uma estrutura resistente às solicitações de suas estruturas, e analisar o desempenho mecânico visando não apenas a magnitude das deformações de tração nas camadas de revestimento, mas a partir de uma visão global dos estados de tensões a que estão sujeitas todas as suas camadas, como exemplificado neste trabalho, com a camada granular.

Observando os dados das simulações nas Figuras 5 e 6, entende-se porque existem muitas contestações às análises não-lineares de algumas ferramentas computacionais, pois como o programa EVERSTRESS 5.0 utilizado nas simulações para este trabalho considera na entrada de dados o modelo de Biarez e Dunlap (Equação 4) para análise do comportamento resiliente da camada granular, tem-se que tal modelo só pode ser utilizado nas condições em que a relação  $q/p$  (tensão-desvio/média de tensões) for menor ou igual a 1,0.

Valores superiores a 1, nesta relação, exigem que o módulo seja calculado por um modelo do tipo descrito na Equação 7 [10].

$$E = [3.(2,2 - q/p).(k_1 \theta^{k_2} - 3)]/1,2 \quad (7)$$

onde:

$E$  = módulo resiliente;

$p$  = média das tensões principais ou invariante de tensões  $(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3/3)$ ;

$q$  = tensão-desvio  $(\sigma_1 - \sigma_3)$ ;

$k_1$  e  $k_2$  = constantes determinadas experimentalmente.

Este modelo apresentado na Equação 7 é válido no intervalo da relação  $q/p$  de 1,0 a 2,2, em que estariam a quase totalidade dos estados de tensões analisados nas estruturas de pavimento apresentadas, e acima do limite superior de 2,2 admite-se  $E = 3$ MPa. Isso se deve ao comportamento do material que varia em função de seu estado de tensões e para que não houvesse redução abrupta de módulo na “ruptura”. [10] mostraram que o efeito da adoção de um critério de ruptura na análise numérica é muito significativo para pavimentos com revestimentos de 5cm ou menos e deixa de ser importante para espessuras de 20cm, como apresentado por [6]. Desta forma, torna-se um fator muito significativo para os estudos desenvolvidos neste trabalho.

A simples visualização dos resultados de análises nas estruturas de pavimento considerando módulos constantes na base permitiu verificar que tensões de tração nesta camada apareceram em todas as estruturas tanto nos resultados obtidos na profundidade média, expostos nas Figuras 5 e 6, quanto na face inferior desta camada, principalmente quando são observados os estados de tensões referentes à carga solicitante de 8,2tf.

O material granular, por sua própria característica inerente à sua composição, não possui coesão efetiva. Desta forma, trata-se de uma camada incapaz de suportar a esforços de tração.

Quando isto ocorre, percebe-se claramente uma falha no critério de ruptura estabelecido pela ferramenta computacional na avaliação das relações  $q/p$  do material, devido em alguns casos, os módulos gerados nas simulações não lineares para a camada granular chegarem a ser menores que os da camada de subleito.

## **Análise de Tensão e Deformação em Estruturas de Pavimentos Flexíveis Contemplando Critérios de Ruptura por Cisalhamento das Camadas Granulares**

**37ª RAPv/11º ENACOR - nº 070**

*Os Caminhos da Integração  
Goiânia/GO - BRASIL - 08 a 11 de agosto de 2006*

Nas estruturas correntes, o módulo da base granular quase sempre é baixo porque a relação  $q/p$  cresce muito e o material se aproxima da ruptura, com correspondente redução do módulo resiliente. Esta observação tem muito a ver com as estruturas de pavimentos flexíveis nos país [6].

Estas tensões nos estudos de estruturas com camada de base de comportamento não-linear indicam que estas estruturas, levadas a efeito dos parâmetros  $k_1$  e  $k_2$  extraídos do trabalho de [7], não estão realmente desenvolvendo tensões de tração na camada de base, como podem induzir os dados apresentados em alguns casos para a carga de 8,2tf nas Figuras 5 e 6.

Entretanto, apesar destas controvérsias quanto aos estados de tensões apresentados em algumas simulações, não há o comprometimento das tendências indicativas nas análises, pois é bastante coerente na prática que as camadas mais espessas de revestimento resistam mais aos esforços solicitantes, distribuindo melhor a propagação das tensões aos substratos e que não apresentem equivalências de deformação às camadas mais delgadas, como induzem os dados da Figura 4.

## CONCLUSÕES

As análises mecânicas dos pavimentos através de ferramentas computacionais permitem a previsão do desempenho das estruturas antes da execução no campo, viabilizando a compreensão dos estados de tensão a que estão sujeitas as camadas que os constituem, evitando que sejam construídas estruturas incapazes de suportar as cargas solicitantes a que estarão submetidas na prática.

Avaliar o desempenho mecânico dos pavimentos apenas considerando o critério de deformação na fibra inferior da camada de revestimento, pode induzir à errônea conclusão de que espessuras delgadas, da ordem de 3cm a 4cm, possuem a mesma deformabilidade de camadas mais espessas, como exemplificado neste trabalho em relação à espessura de 9cm.

Por esta razão, devem-se aliar as ferramentas computacionais às teorias de comportamento mecânico dos materiais, como a de resistência ao cisalhamento dos materiais granulares, por exemplo, a fim de interpretar em um âmbito mais global a interferência que as cargas solicitantes ou mesmo alterações nas espessuras das camadas acarretam nos estados de tensões dos pavimentos de uma forma mais realística.

Recomenda-se, portanto, que os projetistas atentem aos modelos de geração dos dados nas ferramentas computacionais, em relação ao tipo de material a que está sendo considerado, e principalmente quanto ao critério de ruptura adotado em função do estado de tensões a que está sujeito, sob pena de em algumas situações, estar aprovando ou rejeitando estruturas de pavimentos em condições opostas à decisão correta a ser tomada.

## REFERÊNCIAS

- [1] HOLTZ, R. D.; WILLIAM, D. (1981), **An Introduction to Geotechnical Engineering**. Edited by Prentice-Hall, Inc, 733 p. Englewood Cliffs, New Jersey, USA.
- [2] LAMBE, T. W.; WHITMAN, R. V. (1969), **Soil Mechanics**. Edited by themselves, 553 p. Massachusetts Institute of Technology (MIT), Massachusetts, USA.
- [3] DNER (1996), **Manual de Pavimentação**. Rio de Janeiro, Brasil.
- [4] HICKS, R. J. (1970), **Factors Influencing the Resilient Properties of Granular Materials**. PhD Thesis. UC Berkeley, 510p.
- [5] HUANG, Y.H., (1993), **Pavement Analysis and Design**. University of Kentucky, USA.
- [6] MEDINA, J., (1997), **Mecânica dos Pavimentos**. Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, Brasil.
- [7] FERNANDES, I.S., (2000), **Avaliação do Comportamento Mecânico da Camada de Brita Graduada "in situ"**. Dissertação para obtenção de Título de Mestre pela Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, Brasil.
- [8] WSDOT (1999), **EVERSTRESS 5.0 - Layered Elastic Analysis Program**. Washington Department of Transportation. Washington, D. C., USA.
- [9] DAWSON, A.; ARNOLD, G.; WERKMEISTER, S.; HUGHES, D.; ROBINSON, D. (2003), **Using a Shakedown Approach as a Simple Means of Predicting Rutting in Unsealed and Chip Sealed Pavements**. Chapter, 21st ARRB (Australian Road Research Board)/ 11th REAAA Conference, Australia.
- [10] STOCK, A. F.; BROWN, S. F., (1980), **Nonlinear Characterization of Granular Materials for Asphalt Pavement Design**. Transportation Research Record (TRR), n.775, Washington, D. C., 1980, p. 14-20.

**Análise de Tensão e Deformação em Estruturas de Pavimentos Flexíveis Contemplando Critérios de Ruptura por Cisalhamento das Camadas Granulares**

**37ª RAPv/11º ENACOR - nº 070**

*Os Caminhos da Integração*  
*Goiânia/GO - BRASIL - 08 a 11 de agosto de 2006*