

# MÉTODO DE RETROANÁLISE DE BACIAS OBTIDAS POR CARREGAMENTO DE EIXO PADRÃO ATRAVÉS DO USO DE *SOFTWARES* ADAPTADOS PARA FWD

**Klaus Machado Theisen**

**João Rodrigo G. Mattos**

**Diego Skolaude Treichel**

Alunos do Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil - UFRGS

**Jorge Augusto Pereira Ceratti**

Docente do Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil - UFRGS

## RESUMO

É descrita um método para o emprego de softwares de retroanálise de bacias obtidas via FWD em pavimentos submetidos ao carregamento de eixo padrão. Considerou-se comportamento elástico-linear dos materiais em pavimentos de quatro camadas, viabilizando a aplicação do princípio da sobreposição de efeitos de duas cargas circulares uniformes. Um banco de dados de 63 bacias foi produzido utilizando-se o programa EVERSTRESS®, posteriormente executando-se retroanálise das mesmas com o programa EVERCALC® de duas maneiras: considerando a carga de semi-eixo como uma placa circular (C1) e aplicando-se o método proposto (C2). Os resultados mostram que C1 resulta em acréscimo médio de 79% no módulo de resiliência do revestimento e de 153% na razão entre os módulos do revestimento e da base, enquanto que estes valores para C2 foram -0,8% e 1,2%, respectivamente. Análises mecanísticas empregando os módulos encontrados para C1 e C2 resultam em acréscimo na tensão de tração na base do revestimento para C1 e conseqüente subestimativa da vida de fadiga do mesmo, além do decréscimo das tensões que chegam as camadas inferiores, o que pode influir na previsão de deformações permanentes das mesmas. Um dimensionamento de reforço em função de bacias reais levantadas com FWD é demonstrado comparando-se C1 e C2, onde se constata que C2 implica um reforço 1 cm menos espesso e que C1 superestima a vida de fadiga do reforço projetado, segundo o método sul-africano de projeto empírico-mecanístico.

## ABSTRACT

It is described a methodology to employ backcalculation softwares to deflections bowls obtained via FWD on pavements under dual-tires loading. A linear-elastic behavior of a four-layered pavement has been assumed, allowing the use of the overlap principle of two uniform circular loads. A data bank of 63 deflection bowls has been produced by using the program EVERSTRESS 5.0®, afterward executing the backcalculations of them by using the program EVERCALC 5.0® through two ways: considering the semi-axle loading as an unique circular loaded plate (C1) and applying the proposed method (C2). The results show that C1 results in an average increasing of 79% in the surface layer resilient modulus and 153% in the surface/base moduli ratio, while this values for C2 were -0.8% and 1.2%, respectively. Mechanistic analysis employing the moduli obtained for C1 and C2 resulted in increasing in the tensile stress at the bottom of surface layer for C1, and therefore underestimating its fatigue life, besides of decreasing of stresses on unbound layers, that may have influence on its permanent deformation prediction. A pavement overlay design in function of real deflection bowls is shown comparing C1 and C2, which it is observed that C2 implies an overlay thickness 1 cm thinner than C1, and that C1 overestimates the fatigue life of the designed overlay, according to the South-African mechanistic design method.

## 1. INTRODUÇÃO

A retroanálise de bacias de deflexões é bastante empregada na avaliação e projeto de pavimentos flexíveis. É um método não-destrutivo, onde se estimam as propriedades dos materiais a partir de algoritmos analíticos sem a obrigação de coletar amostras em campo (Pereira, 2007). O cálculo dos módulos de resiliência das camadas do pavimento é feito a partir das bacias deflectométricas que o pavimento apresenta sob a ação do carregamento externo, medidas com equipamentos tipo viga Benkelman (ou eletrônica) ou *Falling Weight Deflectometer* (FWD), instrumento mais sofisticado que obtém valores mais precisos (Villela e Marcon, 2001).

Com as bacias deflectométricas, os módulos de resiliência são estimados com o uso de *softwares* específicos para retroanálise. De regra, tais *softwares* são adaptados a condição imposta pela

solicitação do FWD: uma placa circular de pressão tomada como uniforme atuando no pavimento; ou baseados em banco de dados de bacias retroanalizadas ou calculadas previamente.

Na realidade, uma placa circular de pressão uniforme não é o real carregamento imposto pelo tráfego nos pavimentos. A diferença é que pressão de contato pneu-pavimento não é constante (Siddharthan *et al.*, 2002). Mostafa *et al.* (2006), Fang *et al.* (2004) e Hua e White (2002) simularam numericamente pressões não uniformes nos pavimentos, constatando diferenças no desempenho a fadiga e deformações permanentes das misturas asfálticas. Entretanto, a notável diferença entre a realidade e o que é simulado por programas adaptados para FWD é o número de cargas do carregamento. O carregamento imposto pelo tráfego geralmente vem da atuação de eixos duplos (eixos simples de rodas duplas, eixos tandem duplo e triplo). Em vários métodos de projeto considera-se o eixo simples de rodas duplas de 82 kN (eixo padrão), podendo-se citar desde o método desenvolvido pelo antigo DNER até métodos recentes, como os métodos Sul-Africano (Theyse *et al.*, 2007) e os guias de projeto da AASHTO.

Os *softwares* adaptados para FWD não simulam a atuação de duas cargas simultâneas no pavimento. Os *softwares* baseados em banco de dados (dados de bacias retroanalizadas ou calculadas previamente em campo), mesmo considerando a atuação de eixos duplos, dependem do número de bacias que integram seu banco de dados, fazendo o usuário dependente da “sorte” de haver bacias no banco de dados que representem o que ocorre em campo. Tal “sorte” depende do tamanho do banco de dados. Para bancos limitados, compromete-se a acurácia da retroanálise.

Posto isto, o presente trabalho objetiva apresentar um método simples de uso de programas para retroanálises de bacias de FWD para bacias oriundas de cargas de eixo padrão, aliando o número de dados ilimitado gerado nestes programas e a simulação da condição de duas cargas atuando simultaneamente. A base para o método é o princípio da sobreposição de efeitos: simples de aplicar e apresenta resultados importantes, conforme constatado ao longo do trabalho.

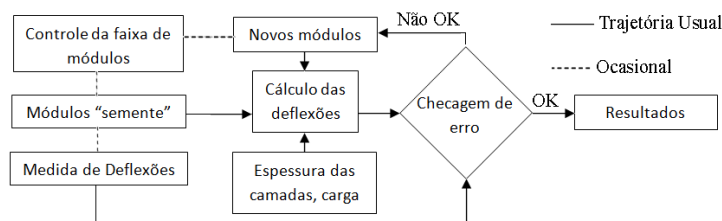
## **2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS SOBRE RETROANÁLISE**

Segundo o *Washington State Department of Transportation* (WSDT, 2005), retroanálise é uma avaliação mecanística, geralmente análises lineares elásticas de deflexões na superfície do pavimento, gerada por vários mecanismos de deflexão de pavimentos. Deflexões são medidas em campo via mecanismos quaisquer e calculadas, de forma que as deflexões calculadas se aproximem das medidas em campo considerando um dado erro. Os módulos necessários para obter tal aproximação são estimados, caracterizando o processo de retroanálise.

As bacias em campo são medidas com equipamentos tipo viga Benkelman ou FWD, os equipamentos mais utilizados no Brasil (Nóbrega, 2003). As bacias calculadas são obtidas através de análises mecanísticas ou extraídas de um banco de dados de bacias pré-calculadas ou retroanalizadas. Segundo Harichandran *et al.* (1993), os métodos que utilizam os artifícios antes citados são os métodos iterativos, que buscam os módulos individuais das camadas, diferentemente dos métodos simplificados, que buscam o módulo do pavimento e do subleito.

Segundo Nóbrega (2003), os métodos iterativos são aqueles onde a determinação das características elásticas e geométricas das camadas do pavimento são feitas pela comparação da bacia deflectométrica de campo com a teórica de uma série de estruturas, até que a diferença

entre deflexões de campo e a bacia teórica apresentem um resíduo admissível pré-definido. A Figura 1 mostra um fluxograma típico para uso do método iterativo de retroanálise:



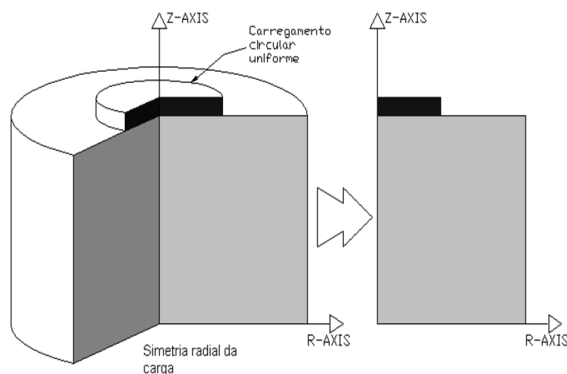
**Figura 1:** Fluxograma de retroanálise via métodos iterativos (adaptado de WSDT, 2005)

De regra, os métodos iterativos obtêm os módulos de resiliência das camadas de duas formas:

- Comparação de bacias resultantes de Análises mecánísticas onde módulos de resiliência são arbitrados com bacias obtidas em campo;
- Comparação de bacias previamente retroanalizadas vinda de um banco de dados com bacias obtidas em campo.

Em programas baseados em análises mecánísticas, como os adaptados ao FWD, o problema da “sorte” de coincidência de casos de medição em campo some. Sabidas as propriedades constitutivas dos materiais, simula-se qualquer tipo de estrutura. Assim, alguns programas de Retroanálise têm associado um programa de análise mecánística. Exemplos: EVERSTRESS® para EVERCALC®; FLAPS2® para LAYMOD4®.

No entanto, simulações de carregamentos mais complexos requerem esforço computacional, tornando o processo de retroanálise lento. Todavia, o carregamento imposto pelo FWD no pavimento permite uma simplificação favorável ao esforço computacional: a carga do FWD no pavimento é assumida como uma placa circular de pressão constante na superfície do pavimento, implicando respostas estruturais iguais em qualquer ponto distante um raio  $r$  do eixo  $z$  na estrutura reduzindo o problema de tridimensional para bidimensional, conforme a Figura 2:



**Figura 2:** Axissimetria na solução de análises mecánísticas

A simplificação diminui notavelmente o tempo de solução das equações que regem o problema. Contudo, tal simplificação é impossível ao incluir mais cargas na superfície do pavimento, tornando o problema tridimensional. A alternativa para superar este problema é o uso dos métodos baseados em bancos de dados. Nóbrega (2003) afirma que o método baseado em banco de dados é mais rápido, mas pode perder em acurácia se tal banco não for relativamente grande.

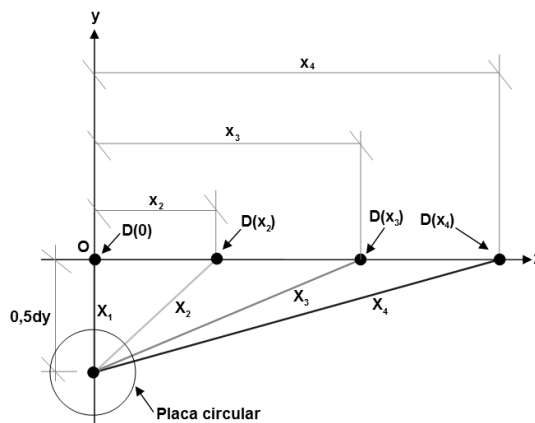
### 3. DESENVOLVIMENTO DO PROCEDIMENTO DE RETROANÁLISE

Posto o descrito no item anterior, a partir do princípio da sobreposição de efeitos é possível utilizar a solução axissimétrica para um caso com várias cargas atuantes na estrutura, adotando-se algumas hipóteses. As hipóteses adotadas para validade do método são as seguintes:

- Consideram-se as camadas do pavimento horizontalmente infinitas e de espessura constante;
- Os materiais são considerados como lineares elásticos, homogêneos e isotrópicos, ou seja, possuem apenas um módulo de Elasticidade e um coeficiente de Poisson, ambos constantes;
- Carregamento composto de placas circulares de pressão uniforme, de pressões e raios iguais;
- Os centros geométricos das placas carregadas estão igualmente distantes dos pontos de medida de deflexões na superfície do pavimento, ou seja, o carregamento é simétrico.

Para o eixo padrão, as hipóteses acima permitem admitir que cada uma das cargas é responsável por metade da deflexão do pavimento, podendo-se considerar na retroanálise a atuação de uma das cargas, caindo no caso da Figura 2. Todavia, novas distâncias “X” em relação ao centro da carga devem ser calculadas em função das distâncias “x” do levantamento deflectométrico.

No eixo x, são medidas em campo deflexões  $D(x_i)$ , onde  $x_i$  é a distância para o centro geométrico “O” do carregamento. Denota-se por  $dy$  a distância entre os centros das placas circulares do carregamento. O centro de cada carga está distante do ponto onde é medida  $D(x_i)$  uma distância  $X_i$ . Assumindo simetria do carregamento, considera-se apenas a atuação de uma das rodas, implicando uma deflexão  $0,5 D(x_i)$ . A ilustração do descrito anteriormente é vista na Figura 3:



**Figura 3:** Ilustração esquemática de carregamento de eixo padrão

As distâncias  $X_i$  são calculadas em função das distâncias  $x_i$  utilizando-se o a Equação 1:

$$X_i = \sqrt{(x_i)^2 + (0,5dy)^2} \quad (1)$$

Desta maneira, se para cada  $x_i$  há uma deflexão associada  $D(x_i)$ , o método simplesmente se trata da substituição de  $x_i$  por  $X_i$  e de  $D_i$  por  $0,5 D(x_i)$  na Retroanálise de um dado conjunto de bacias deflectométricas, considerando apenas a atuação de uma das rodas do eixo padrão, assim não havendo a necessidade de uma análise em três dimensões do problema em questão.

### 4. APLICAÇÕES DO MÉTODO PROPOSTO

Aqui se demonstra a aplicação do método proposto em alguns pontos teórico-práticos. Serão

consideradas duas maneiras de distribuição da carga no pavimento por um eixo padrão: a primeira (C1) considera a carga do semi eixo distribuída apenas em uma placa circular de pressão uniforme de 560 kPa, conforme a Figura 4, condição proposta com o intuito de representar a simplificação que se adotaria ao aplicar um determinado *software* adaptado para bacias de FWD na condição de carga de eixo padrão; a segunda (C2) considera a atuação das duas rodas do semi eixo, com os mesmos 560 kPa, distância entre os centros geométricos das cargas de 30 cm, porém analisando-se o efeito de apenas uma delas a partir do plano de simetria, conforme Figura 4. A condição C2 é a aplicação do método descrito no item 3.

Os resultados das retroanálises considerando as C1 e C2 serão empregados em três situações:

- Comparando-se módulos obtidos na retroanálise de bacias previamente calculadas utilizando-se o programa EVERSTRESS® considerando-se dois casos específicos;
- No cálculo de tensões, deformações e deslocamentos para 10 bacias do caso anterior, aleatoriamente escolhidas;
- Em um exemplo de dimensionamento de reforço de um trecho homogêneo de um determinado pavimento, nos quais bacias deflectométricas foram levantadas.

#### 4.1 Retroanálise de bacias geradas no EVERSTRESS®

Utilizando-se carregamento de eixo padrão, um banco de dados de 63 bacias foi gerado por análises mecánísticas via programa EVERSTRESS 5.0®. Considerou-se uma estrutura de 4 camadas (revestimento, base, sub-base e subleito), com coeficientes de Poisson de 0,30; 0,35; 0,40 e 0,45 para as camadas citadas. Considerou-se subleito com espessura infinita. As espessuras e os módulos de resiliência de todas as camadas foram arbitrados de forma a tentar cobrir a maior variedade possível de tipos de estruturas de pavimentos. A Tabela 1 apresenta as estatísticas dos módulos e espessuras que foram arbitrados para as análises mecánísticas:

**Tabela 1:** Médias, desvios padrão, mínimos e máximos dos módulos e espessuras arbitrados

Módulos de resiliência (MPa)					Espessuras (cm)				
Camada	Média	Desvio Padrão	Mín.	Máx.	Camada	Média	Desvio Padrão	Mín.	Máx.
Revestimento	6071	3037	500	12500	Revestimento	10,9	3,7	5,0	20,0
Base	357	214	40	1000	Base	24,1	11,8	10,0	65,0
Sub-base	228	133	25	500	Sub-base	36,7	16,1	10,0	80,0
Subleito	83	48	20	250					

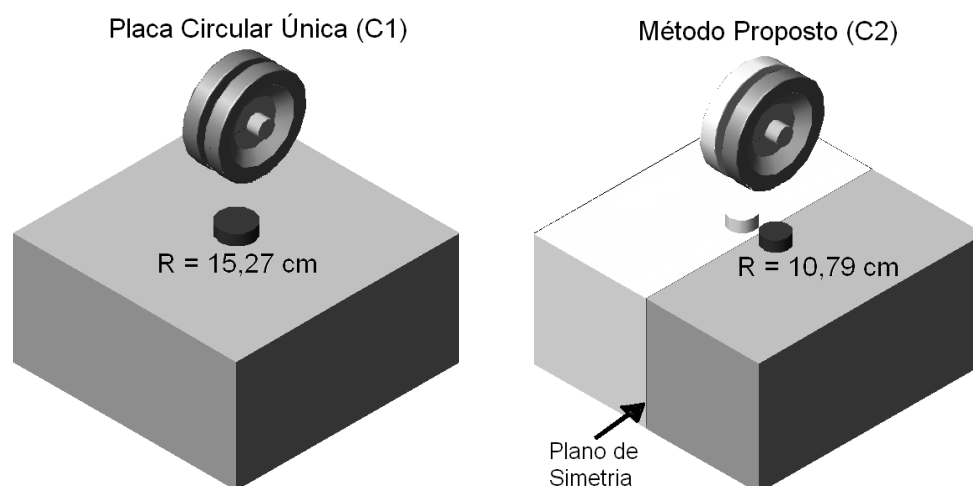
Calculadas as bacias, executou-se para cada uma delas a Retroanálise através do uso do programa EVERCALC 5.0 ®. Foram simuladas as duas condições descritas na Figura 4 (C1 e C2), após calculando-se o erro percentual médio (EPM), conforme a Equação 2:

$$EPM(\%) = \frac{1}{63} \sum_{i=1}^{63} 100 \frac{|MR_{retr_i} - MR_{real_i}|}{MR_{real_i}} \quad (2)$$

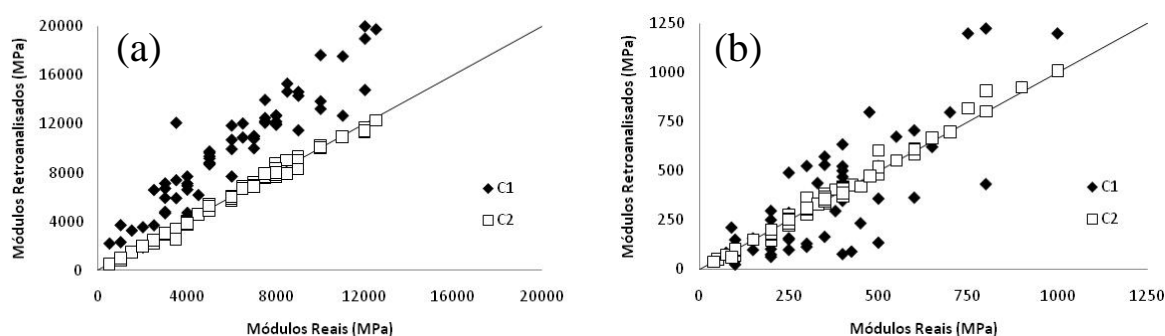
onde:

MR<sub>retr<sub>i</sub></sub> = Módulo de resiliência retroanalizado de dada camada da estrutura de pavimento i;  
MR<sub>real<sub>i</sub></sub> = Módulo de resiliência real de dada camada da estrutura de pavimento i.

A Figura 5(a) mostra o comparativo dos módulos do revestimento obtidos para C1 e C2 com os módulos reais do revestimento; a Figura 5(b) mostra o mesmo para o módulo da base. Nota-se na Figura 5(a) que os módulos para C1 são claramente maiores do que os módulos reais do revestimento. Isso é explicado pelo fato de em C1 o carregamento estar mais concentrado na superfície do carregamento, o que exige uma rigidez maior para obter a mesma deflexão. O EPM na comparação entre os módulos em C1 é de 79%. Comparando-se os módulos de C2 e os módulos reais, nota-se uma quase coincidência de valores, com erro médio percentual de -0,8%.



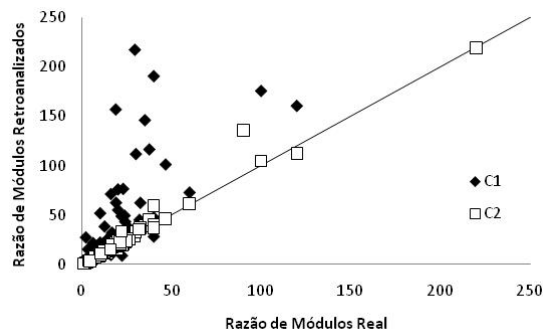
**Figura 4:** Condições de retroanálise empregadas no trabalho



**Figura 5:** Comparativo dos módulos obtidos do (a) revestimento e da (b) base para C1 e C2

Na Figura 5(b) nota-se que o módulo da base também não é próximo ao real considerando C1, cujos resultados dispersam com relação à linha de igualdade. O EPM obtido para C1 foi de 35,0% e para C2, 5,3%. Houve valores maiores e menores estimados em C1, que podem ser explicados ou pela compensação do acréscimo de rigidez no revestimento (no caso de decréscimo do módulo) ou pela compensação da distribuição de tensões no pavimento pelo fato do acréscimo de rigidez do revestimento diminuir as tensões que chegam às camadas inferiores.

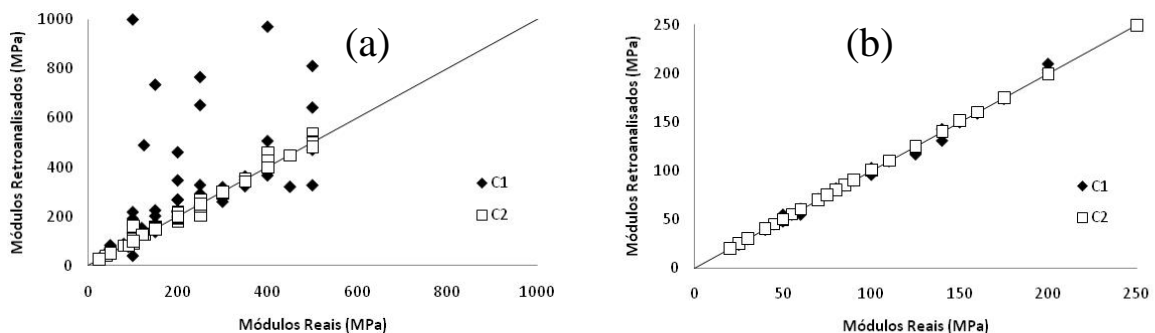
Se a Figura 5(a) mostra que os módulos do revestimento em C1 são maiores que os reais, e a Figura 5(b) mostra que os módulos da base podem ser maiores ou menores que os reais, o cálculo de módulos em C1 pode elevar a razão de módulos do revestimento e da base, influenciando na estimativa de vida de fadiga do revestimento. Assim, uma comparação entre a razão dos módulos do revestimento e da base para C1 e C2 foi feita, cujo resultado é visto na Figura 6:



**Figura 6:** Comparativo da razão módulo do revestimento/módulo da base para C1 e C2

A Figura 6 mostra visível aumento da razão dos módulos do revestimento e da base com relação às razões reais, onde C1 resultou em um EPM de 153% na estimativa da referida razão de módulos e C2, 1,2%. A superestimativa da razão entre os módulos do revestimento e base pode ser significativa no momento que os módulos retroanalizados forem utilizados na estimativa da vida de fadiga do revestimento e/ou no dimensionamento de reforço de revestimento.

As Figuras 7(a) e 7(b) mostram a comparação feita nas Figuras 5 e 6 para as camadas de sub-base e subleito, respectivamente:



**Figura 7:** Comparativo dos módulos obtidos do (a) sub-base e da (b) subleito para C1 e C2

Na Figura 7(a) nota-se que a diferença entre módulos é maior quando os módulos previstos por C1 são maiores que o módulo real, talvez pela compensação da perda de rigidez da camada de base. Na Figura 7(b), os módulos obtidos para ambas as condições são próximos aos reais, talvez pelo fato de que as deflexões mais distantes do centro do carregamento sejam semelhantes nas condições C1 e C2, sendo tais deflexões afetadas primeiramente pelo módulo do subleito.

#### 4.2 Análise de tensões, deformações e deflexões

Com a intenção de realizar uma investigação das consequências da diferença de módulos obtidos em C1 e C2 no desempenho do pavimento, uma análise de tensões, deformações e deslocamentos foi feita empregando-se o programa EVERSTRESS 5.0®. Escolheu-se aleatoriamente 10 das estruturas arbitradas em 4.1, cujas características são vistas na Tabela 2.

Os parâmetros analisados nas estruturas mostradas na Tabela dois são citados a seguir:

- Deflexão no centro geométrico do carregamento (DEF), ou seja, no ponto O da Figura 3;

- Tensão de tração na base do revestimento (TTBR);
- Tensão de compressão no topo da base (TCTB), sub-base (TCTSb) e subleito (TCTSl);
- Razão entre vidas de fadiga do revestimento de C1 e C2 com a vida de fadiga real do revestimento (N/NR), considerando-se um fator  $b = -3$ , segundo a equação 3:

$$N_f = aS^b \quad (3)$$

onde  $N_f$  é a vida de fadiga,  $S$  é tensão de tração na base do revestimento e  $a, b$  são constantes;

- Razão entre a tensão cisalhante octaédrica a soma das tensões principais (TO/TP) no topo da base (TO/TPTB), da sub-base (TO/TPTSb) e do subleito (TO/TPTSl). Tais parâmetros são calculados em função das tensões principais  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  e  $\sigma_3$  conforme a equação 4:

$$TO/TP = [3(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)]^{-1} \sqrt{2[(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)^2 - 3(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_1\sigma_3 + \sigma_2\sigma_3)]} \quad (4)$$

**Tabela 2:** Estruturas de pavimento analisadas (tensões, deformações e deflexões)

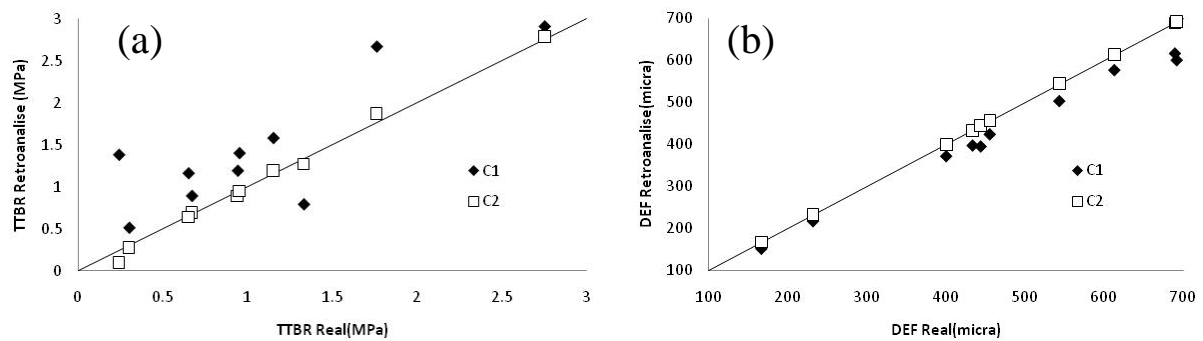
Estrutura	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$e_{\text{revest}}(\text{cm})$	10	12	8	19	5	18	10	8	10	8
$e_{\text{base}}(\text{cm})$	20	10	10	35	25	65	30	45	15	25
$e_{\text{sub-base}}(\text{cm})$	30	50	55	70	60	10	40	50	25	60
$E_{\text{revest}}R(\text{MPa})$	5000	1000	10000	3000	4000	3500	3000	12000	8500	6000
$E_{\text{base}}R(\text{MPa})$	300	500	40	100	250	650	400	1000	450	550
$E_{\text{sub-base}}R(\text{MPa})$	150	50	400	150	300	100	50	400	25	150
$E_{\text{subleito}}R(\text{MPa})$	75	80	90	60	20	125	50	50	60	40
$E_{\text{revest}}C1(\text{MPa})$	8737	3709	13232	4799	4722	7395	6710	20000	14651	11869
$E_{\text{base}}C1(\text{MPa})$	281	136	42	43	492	623	425	1200	235	675
$E_{\text{sub-base}}C1(\text{MPa})$	170	57	506	735	275	166	41	378	29	136
$E_{\text{subleito}}C1(\text{MPa})$	75	82	90	55	20	121	51	49	61	40
$E_{\text{revest}}C2(\text{MPa})$	5129	801	10195	3092	3844	3341	2948	11349	9034	6000
$E_{\text{base}}C2(\text{MPa})$	289	604	38	95	253	667	403	1008	421	553
$E_{\text{sub-base}}C2(\text{MPa})$	155	50	424	156	298	91	49	399	25	149
$E_{\text{subleito}}C2(\text{MPa})$	75	80	90	60	20	125	50	50	60	40

A Figura 8(a) mostra as Deflexões obtidas para as estruturas consideradas; a Figura 8(b) mostra as tensões de tração na base do revestimento das mesmas estruturas. Nesta Figura, são vistas os efeitos da superestimativa do valor do módulo do revestimento em C1. Existe uma queda da DEF para todos os casos analisados, além do notável crescimento da TTBR em nove estruturas. Também se comparou N/NR para C1 e C2, notando-se decréscimo em tal previsão em C1, exceto para a estrutura 5 (TTBR é menor que a real). Isto significa que considerar C1 na retroanálise pode resultar em sub-estimativa da vida de fadiga do revestimento e assim aumento de frequência do período de manutenção do pavimento, não atraente economicamente. A Tabela 3 mostra a comparação entre N/NR para C1 e C2 das estruturas analisadas. A Figuras 9 e 10 mostram a comparação dos parâmetros restantes de C1 e C2 com os parâmetros reais.

Os parâmetros nas Figuras 9 e 10 têm relação com deformações permanentes: quanto maior



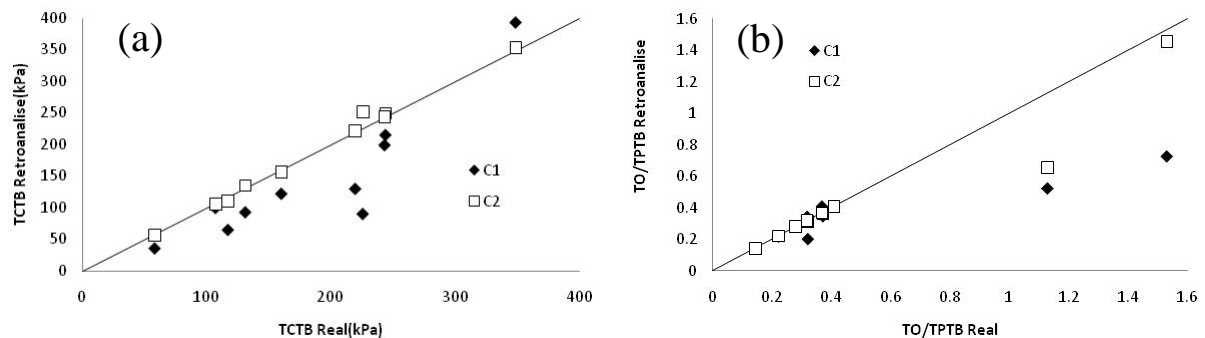
forem, maiores deformações permanentes surgirão na camada. Para as tensões de compressão no topo das camadas (Figuras 9(a), 10(a) e (c)), nota-se valores menores que os reais para C1, mostrando que o aumento de rigidez do revestimento atinge todo o pavimento. Quanto próximo do revestimento, maior será o erro na estimativa das deformações permanentes, segundo modelos que prevêem deformações permanentes em função de tais tensões de compressão. Modelos mais sofisticados de previsão de deformações permanentes consideram parâmetros como tensão de cisalhamento octaédrica e razão de tensões cisalhantes e confinantes (exemplo: teoria do *Shakedown*), motivo das análises nas Figuras 9(b), 10(b) e 10(d). Nestas Figuras, nota-se que no caso da base TO/TP pode ser sub-estimado, resultando em previsão de crescimento de deformações permanentes menor que a real. No caso das outras camadas, TO/TP pode tanto ser maior ou menor que o real, resultando más estimativas de deformações permanentes.



**Figura 8:** Comparativo de (a) TTBR e (b) DEF para as Estruturas analisadas

**Tabela 3:** Comparativo de N/NR para as Estruturas analisadas

Estrutura	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
N/NR (C1)	0,39	0,01	0,84	0,43	4,77	0,20	0,18	0,49	0,29	0,31
N/NR(C2)	0,90	13,82	0,96	0,92	1,15	1,23	1,05	1,18	0,83	1,00

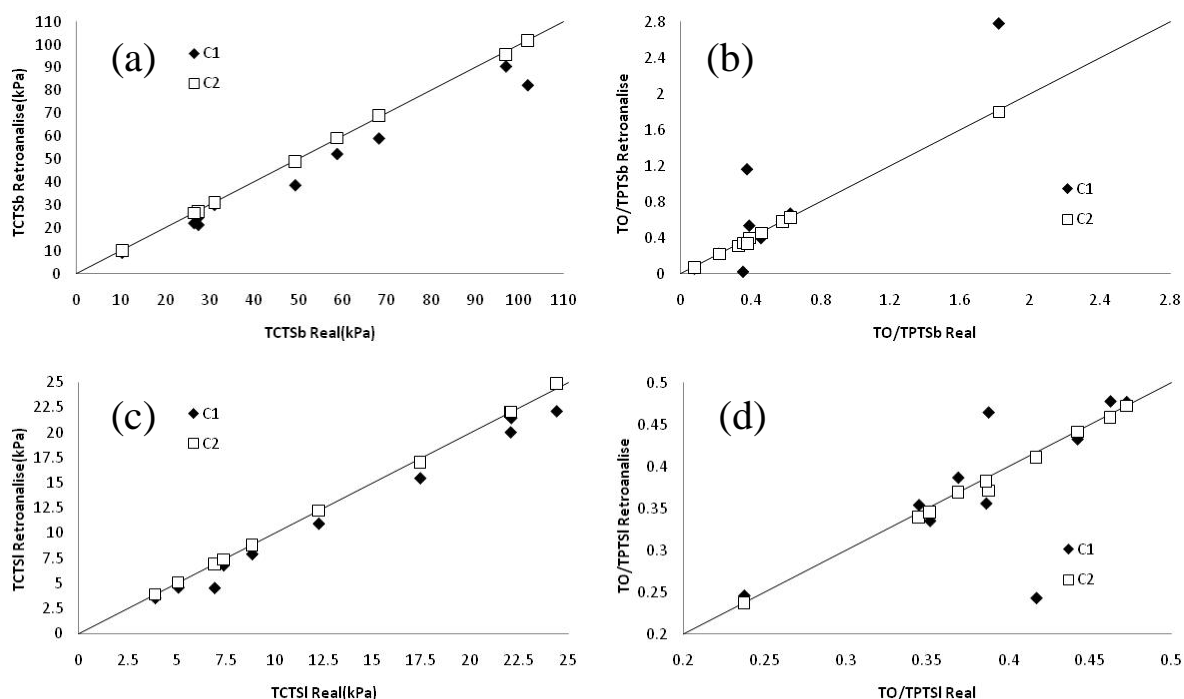


**Figura 9:** Comparação entre (a) TCTB e (b) TO/TPTB

#### 4.3 Dimensionamento de Reforço de um Pavimento

Demonstrando as consequências práticas ao considerar C1 na retroanálise, é apresentado um exemplo de projeto de reforço de pavimento com bacias reais de campo (vistas na Tabela 4). Supõe-se um trecho homogêneo de quatro camadas, com espessuras de 8, 24, 43 cm e infinita. Os mesmos coeficientes de Poisson de 4.1 e 4.2 foram adotados. O reforço foi composto de uma mistura asfáltica cujo módulo de resiliência vale 7000 MPa e coeficiente de Poisson de 0,3. Sua

função foi reduzir a tensão de tração na base do revestimento corrente para 1 MPa.



**Figura 10:** Comparação entre (a) TCTSb, (b) TO/TPTSb, (c) TCTSI e (d) TO/TPTSI de C1 e C2 e valores reais para as Estruturas analisadas.

**Tabela 4:** Deflexões  $D_i^*$  (micra) levantadas em campo

Estaca	$D_0$	$D_{20}$	$D_{30}$	$D_{45}$	$D_{65}$	$D_{90}$	$D_{120}$	Estaca	$D_0$	$D_{20}$	$D_{30}$	$D_{45}$	$D_{65}$	$D_{90}$	$D_{120}$
60	700	523	354	231	135	93	67	460	611	444	340	214	118	65	38
100	579	432	332	206	119	66	48	500	792	615	447	269	117	48	25
140	577	403	299	219	121	78	57	540	562	420	324	200	119	75	46
180	578	421	315	204	121	76	49	580	594	441	339	214	104	52	25
220	620	426	316	198	110	60	37	620	601	389	278	163	93	60	45
260	650	462	349	207	119	74	50	660	657	383	285	155	77	36	24
300	569	400	290	177	90	47	26	700	630	433	324	199	111	56	30
340	699	486	357	220	110	54	28	740	473	355	250	158	87	43	23
380	558	389	273	159	80	41	24	780	507	387	297	192	108	61	35
420	703	501	387	248	129	56	27	820	705	501	382	241	117	55	28

\*  $D_i$  é a deflexão medida a  $i$  cm do centro do carregamento.

Nos resultados das retroanálises (C1 e C2) notou-se que a estaca 500 teve a maior razão de módulos revestimento/base e a condição mais desfavorável a fadiga. Assim, o reforço projetado nesta estaca foi utilizado em todo o trecho. Sucessivas análises foram realizadas para C1 e C2 para obter a espessura de reforço para tensão de tração na base do revestimento velho (TTBRV) <1 MPa. A Tabela 5 mostra os resultados das análises e as espessuras de reforço em C1 e C2:

**Tabela 5:** Dimensionamento de reforço para as condições C1 e C2

Espessura(cm)	0	5	6	7	8	9	10	9,6	8,5
TTBRV(MPa) em C1	2,93	1,57	1,41	1,28	1,16	1,06	0,97	1,00	-
TTBRV(MPa) em C2	2,68	1,42	1,27	1,15	1,05	0,95	0,87	-	1,00

A Tabela 5 mostra que a espessuras de reforço necessárias para C1 e C2 são 9,6 cm e 8,5 cm, respectivamente. Na prática, toma-se como espessuras 10 cm e 9 cm. Esta diferença de 1 cm é significativa ao considerar o km de pavimento reforçado. Em 1 km de rodovia e 1 m de largura de pista, a economia de material considerando C2 é de 10 m<sup>3</sup>, o que é significativo considerando-se o alto custo do m<sup>3</sup> de mistura asfáltica e a largura de uma rodovia de considerável tráfego.

Objetivando-se a economia proporcionada por C2, fez-se uma análise de durabilidade dos reforços com o Método de Dimensionamento Mecânico de Pavimentos Sul-africano (SAMDM), visto em Theyse *et al.* (2007) e Theyse e Muthen (2000). O SAMDM prevê a vida de fadiga do revestimento e número de ciclos para início do trincamento conforme a equação 5:

$$N_f = 10^{A \left[ 1 - \frac{\log(\epsilon_h)}{B} \right]}; N = FN_f; F = \begin{cases} 1, & \text{se } 0 \leq e_1 \leq 25 \text{ mm} \\ \frac{11}{225 \text{ mm}} (e_1 - 25 \text{ mm}) + 1, & \text{se } 25 \text{ mm} \leq e_1 \leq 250 \text{ mm} \end{cases} \quad (5)$$

onde:

- N<sub>f</sub> = número de operações de eixo padrão (N<sub>AASHTO</sub>) para o início do trincamento por fadiga;
- A, B = constantes. Função do volume de tráfego e do módulo de resiliência do revestimento;
- ε<sub>h</sub> = deformação de extensão na base do revestimento (μstrain);
- N = número de operações de eixo padrão até o aparecimento do trincamento na superfície;
- F = fator de correção em função da espessura e<sub>1</sub> em mm do revestimento.

As espessuras de reforço se enquadram na categoria de revestimentos espessos. Foi adotada categoria “A” de nível de serviço do pavimento, cujos valores de A e B para módulo de resiliência 7000 MPa valem 15,233 e 3,257 (interpolação entre 5000 e 8000 MPa), respectivamente. Os valores de N e N<sub>f</sub> para C1 e C2 estão na Tabela 6:

**Tabela 6:** Cálculo de N e N<sub>f</sub> segundo o SAMDM para as espessuras de reforço encontradas

Condição C1			Condição C2		
Espessura (cm)	N <sub>f</sub>	N	Espessura (cm)	N <sub>f</sub>	N
9,6	1,50x10 <sup>8</sup>	6,69x10 <sup>8</sup>	8,5	2,93x10 <sup>7</sup>	1,15x10 <sup>8</sup>
10,0	1,26x10 <sup>8</sup>	5,87x10 <sup>8</sup>	9,0	2,38x10 <sup>7</sup>	9,95x10 <sup>7</sup>
-	-	-	9,6	2,01x10 <sup>7</sup>	8,98x10 <sup>7</sup>
-	-	-	10,0	1,86x10 <sup>7</sup>	8,66x10 <sup>7</sup>

Na Tabela 7 nota-se que C1 resulta uma vida de fadiga maior que C2. Todavia, por C1 resultar módulos de revestimentos maiores que os reais, a razão de módulos do reforço/revestimento diminui, assim como a deformação de extensão na base do reforço, causando altos valores de N e N<sub>f</sub>. Assim, a condição C1 superestima os valores de N e N<sub>f</sub>. Mostrando que a superestimativa de N<sub>f</sub> do reforço em C1 não é devida sua maior espessura, calculou-se N e N<sub>f</sub> para C2 com as espessuras de C1, cujos resultados estão na Tabela 6. Observando-se os resultados, nota-se que o acréscimo de rigidez do reforço não aumenta, mas sim diminui sua vida de fadiga.

## 5. CONCLUSÕES E COMENTARIOS FINAIS

Analizando os resultados do presente trabalho, conclui-se que:

- Os resultados de retroanálises de bacias mostraram que o método retorna módulos próximos aos módulos reais. Adotar a simplificação de uma placa carregada para a carga de eixo padrão resulta em estimativas sem sucesso dos módulos do revestimento e da razão entre os módulos do revestimento e da base;
- As análises mecânicas considerando C1 e C2 mostram que em C1 há aumento da tensão de tração na base do revestimento devido a maior rigidez prevista para o revestimento, influenciando na distribuição de tensões das camadas inferiores, o que pode influir na previsão de deformações permanentes das mesmas; e principalmente na estimativa de vida de fadiga do revestimento, subestimando-a na maioria dos casos estudados;
- O exemplo de dimensionamento de reforço demonstrou que na prática a simplificação da modelagem da carga do eixo padrão pode acarretar, um reforço projetado mais espesso do que a aplicação do método proposto. No exemplo mostrado em 4.3, o revestimento projetado seguindo a condição C1 foi 1 cm mais espesso. Quanto a durabilidade, a vida de fadiga segundo o SAMDM para C1 é maior que em C2, não pela maior espessura do reforço, mas pelo acréscimo de rigidez irreal de C1, comprovando o a superestimativa da vida de fadiga.

Por fim, mostrou-se que a utilização de *softwares* tradicionais é simples para outras condições de carregamento em pavimentos através de pequenas adaptações, que resultam em maior acurácia dos resultados de retroanálises, e evitam a estimativa de falsos valores de parâmetros de fundamental importância no custo de construção e/ou manutenção dos pavimentos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- FANG, H.; HADDOCK, J. E.; WHITE, T. D.; HAND, A. J. (2004) *On the characterization of flexible pavement rutting using creep model-based finite element analysis*. Finite element analysis and design, n. 41, p 49-73.
- HARICHANDRAN, T.M.; RAAB, A.R.; BALADI, G.Y. (1993) *Modified Newton Algorithm for Backcalculation of Pavement Layer Properties*. Transportation Research Record, n. 1196, p. 116-124.
- HUA, J. ; WHITE, T. (2002) *A Study of Nonlinear Tire Contact Pressure Effects on HMA Rutting*. International Journal of Geomechanics, Volume 2, Number 3, p.353-376.
- MOSTAFA, A. E.; AL-QADI, I.; YOO, P. J. (2006) *Viscoelastic modeling and field validation of flexible pavements*. Journal of engineering mechanics, vol. 132, n.2, p.172-178.
- NÓBREGA, E. S. (2003). *Comparação entre métodos de retroanálise em pavimentos asfálticos*. Tese - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, 365 p.
- PEREIRA, J.M.B. (2007) *Um procedimento de Retroanálise de pavimentos flexíveis baseado na teoria do ponto inerte e em modelagem matemática*. Dissertação (mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, USP-SC.
- SIDDHARTHAN, R.V.; KRISHNAMEMON, N.; EL-MOUSLY, M.; SEBAALY, P.E. (2002) Investigation of tire contact stress distributions on pavement response. Journal of transportation Engineering, v. 128, n. 2.
- THEYSE, H.L. E MUTHEN, M. (2000) *Pavement Analysis and Design Software (PADS) Based on the South African Mechanistic-Empirical Design Method*. In: 19th Annual South African Transport Conference. SATC.
- THEYSE, H.L.; MAINA, J.W. E KANNEMEYER, L. (2007) *Revision of the South African Flexible Pavement Design Method: Mechanistic-Empirical Component*. In: Conference on Asphalt Pavements for Southern Africa, 9th CAPSA, p. 256-292.
- VILLELA, A.R.A., MARCON, A.F. (2001). *Avaliação Estrutural de Pavimentos Utilizando um Método Simplificado de Retroanálise – Retran-2CL*. 33ª Reunião Anual de Pavimentação. p. 622-633, Florianópolis, SC.
- WSDT (2005). *EVERSERIES® USER'S GUIDE. Pavement Analysis Computer Software and Case Studies*. Environmental and Engineering Programs Materials Laboratory - Pavements Division, Washington, DC.