

# Otimização do monitoramento de bacias deflectométricas para gerência de pavimentos pelo uso da geoestatística

Fernando Silva Albuquerque<sup>1</sup> e Washington Peres Núñez<sup>2</sup>

**Resumo:** Os procedimentos de projeto e gerência de pavimentos prevêem a utilização de dados de deflexão para a caracterização das camadas dos pavimentos. Contudo, o levantamento de dados ainda não é sistematicamente realizado por empresas gerenciadoras de rodovias, muito devido aos custos envolvidos em monitoramentos de grandes extensões de vias. O uso de métodos de estimativa para inferir dados em locais não amostrados a partir de amostras espaçadas, porém representativas da malha, pode ser uma boa alternativa para a otimização de levantamentos de deflexão em vias de baixo e médio volume de tráfego. Neste trabalho avaliou-se a aplicação da krigagem ordinária, procedimento utilizado na Geoestatística, para estimativa de dados de deflexão medidos com FWD em pavimentos asfálticos de três regiões do Brasil. Após as análises realizadas, constatou-se que as deflexões e os módulos de resiliência das camadas apresentavam variações espaciais bem típicas, com possibilidade de redução de amostras em até 90% sem alteração significativa das deflexões características, sendo, portanto, uma ferramenta útil e aplicável principalmente à gerência de pavimentos.

*Palavras-chave:* gerência de pavimentos, geoestatística, deflexão.

**Abstract:** Pavement design and management procedures take into account deflections data in order to characterize layers. However, data surveying still represents high costs to be paid by transportation agencies. Alternatively, statistical methods employing data from sampled points, may be used to optimize deflection surveying in low and mid volume roads. This paper analyses the use of the ordinary kriging, a geostatistics method, in the estimation of FWD deflections on asphalt pavements in three Brazilian regions. It was found that both deflections and layers modulus present well-defined spatial variability, allowing for a reduction of up to 90% in the sample size, while the characteristic deflection values were not significantly changed. It may be concluded that ordinary kriging is a powerful geostatistical tool available to engineers dealing especially with pavement management.

*Keywords:* pavement management, geostatistics, deflection.

## 1. INTRODUÇÃO

O monitoramento de pavimentos para obtenção de deflexões (e bacias deflectométricas) é um procedimento indispensável para atividades de gerência e projetos, já que estes dados dão suporte à tomada de decisão (Haas *et al.*, 1994; AASHTO, 2001; AASHTO, 2004; HDM, 2004).

Contudo, uma das grandes dificuldades enfrentadas por técnicos de empresas gestoras de rodovias no Brasil é a pequena disponibilidade de recursos para empregar no monitoramento sistemático de parâmetros de desempenho de pavimentos, principalmente em grandes malhas viárias de baixo e médio volume de tráfego.

Uma alternativa para a redução desses custos é a utilização de métodos de estimativas que permitam, a partir de uma amostragem reduzida, porém representativa da malha, inferir dados em locais não avaliados.

O importante é que se utilize, para esse fim, um método de estimativa que leve em consideração a continuidade espacial de uma variável. Sabe-se que as propriedades naturais da superfície terrestre são espacialmente contínuas, e essas mesmas influenciam fortemente os valores de deflexão em campo. A krigagem, procedimento da geoestatística, é um método de estimativa que leva em consideração tal variabilidade espacial, e sua base conceitual está fundamen-

tada na teoria das variáveis regionalizadas, formalizada por Matherson (1971). Este método é bem difundido e de grande utilização em pesquisas nas Ciências Naturais e na Mineralogia, mas também já foi aplicado por Albuquerque *et al.* (2005) para estimativa, entre outros parâmetros, da deflexão máxima, e por Albuquerque (2007) para a estimativa do *PCI (Pavement Condition Index)* em Pavimentos Asfálticos (Núñez *et al.*, 1986; NHI, 1998; ASTM, 1999), constituindo-se em uma ferramenta que proporciona meios para a redução de amostragens de campo, especialmente na engenharia rodoviária.

O objetivo deste trabalho é, portanto, avaliar a aplicação do método de krigagem como ferramenta para otimização de monitoramentos de deflexões máximas e de módulos de resiliência das camadas de pavimentos asfálticos obtidos por procedimentos de retroanálise. Com isto será analisada a possibilidade de redução de amostras de bacias deflectométricas nas campanhas de monitoramento em atividades de gerência de pavimentos.

## 2. KRIGAGEM

Krigagem (tradução utilizada em português da palavra em inglês “kriging”) é uma das ferramentas da geoestatística. É um termo derivado do nome de Daniel G. Krige, que foi o pioneiro em introduzir o uso de médias móveis para evitar a superestimação sistemática de reservas em mineração (Delfiner *et al.*, 1975).

A krigagem consiste em um conjunto de estimadores que utiliza algoritmos de regressão de mínimos quadrados generalizados que fornecem estimativas sem viés de valores no espaço, a partir de um conjunto de amostras em várias localizações. Faz-se uso de uma matriz de covariância espacial que determina os pesos atribuídos às diferentes amostras, o

<sup>1</sup> Fernando Silva Albuquerque, Departamento de Engenharia Civil, Centro de Ciências Exatas e Tecnologia, Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, SE, Brasil. (e-mail: albuquerque.f.s@uol.com.br).

<sup>2</sup> Washington Peres Núñez, Departamento de Engenharia Civil, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil. (e-mail: wpnunz@cpgec.ufrgs.br).

tratamento da redundância dos dados, a vizinhança a ser considerada no procedimento inferencial e o erro associado ao valor estimado. Além disso, a krigagem também fornece estimadores exatos com propriedades de não tendenciosidade e eficiência (Isaaks *et al.*, 1989).

Como a krigagem trata da descrição de fenômenos naturais, consequentemente trata de fenômenos ocorridos com variáveis regionalizadas. Uma variável regionalizada é uma função numérica com uma distribuição espacial, mutável continuamente de acordo com sua localização, porém não representável por uma função determinística Matherson (1971). Portanto, ao descrever o fenômeno em estudo deve-se utilizar a localização geográfica para calcular uma medida do comportamento espacial, a qual se chama variograma.

## 2.1. Variograma

O variograma é uma ferramenta básica de suporte às técnicas de krigagem, que permite representar quantitativamente a variação de um fenômeno regionalizado no espaço (Huijbregts, 1975).

O variograma serve para denotar a dependência espacial de um parâmetro natural. O mesmo é representado por  $2\hat{\gamma}_{(h)}$ , e é definido como a esperança matemática do quadrado da diferença entre os valores dos pontos (X,Y) no espaço, separados pelo vetor distância **h** que depende do espaçamento entre as amostras. Detalhes do método de cálculo do variograma podem ser obtidos em (Isaaks *et al.*, 1989; Camargo, 2005; Albuquerque, 2007).

$$2\hat{\gamma}_{(h)} = \frac{1}{N_{(h)}} \sum_{i=1}^{N_{(h)}} [Z_{(x_i)} - Z_{(x_i+h)}]^2 \quad (1)$$

em que,

$2\hat{\gamma}_{(h)}$ : é o variograma estimado;

$N_{(h)}$ : é o número de pares de valores medidos,  $Z_{(x_i)}$  e  $Z_{(x_i+h)}$ , separados por um vetor distância **h**; e

$Z_{(x_i)}$  e  $Z_{(x_i+h)}$ : são valores da i-ésima observação da variável regionalizada, coletados nos pontos  $x_i$  e  $x_i+h$  ( $i=1, \dots, n$ ), separados pelo vetor de **h**.

De acordo com Isaaks *et al.* (1989), quando se constrói um gráfico (Figura 1) de um semivariograma experimental ( $\hat{\gamma}_{(h)}$ ) podem-se fazer as seguintes analogias:

- O semivariograma é tipicamente construído para di-

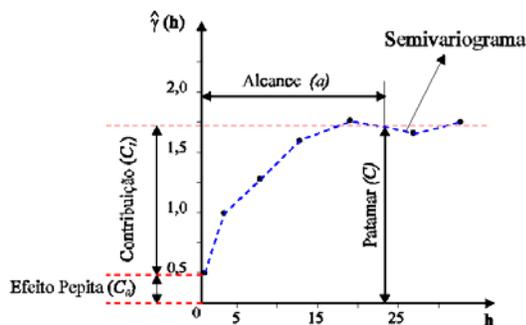


Figura 1. Exemplo de semivariograma contendo todos os seus elementos (Camargo, 2005)

ferentes direções. Qualquer direção particular do semivariograma irá depender somente da distância;

- As diferenças  $\{Z_{(x_i)} - Z_{(x_i+h)}\}$  decrescem à medida que **h**, a distância que os separa, decresce;
- A distância (**a**), que é o alcance ("range"), é a distância dentro da qual as amostras apresentam-se correlacionadas espacialmente;
- O valor (**C**), conhecido por patamar, é o valor do semivariograma correspondente ao seu alcance (**a**). Deste ponto em diante, considera-se que não existe mais dependência espacial entre as amostras, porque a variância da diferença entre pares de amostras ( $Var[Z_{(x)} - Z_{(x+h)}]$ ) torna-se invariável com a distância;
- O valor (**C₀**) é o efeito pepita ("nugget effect"), e representa a descontinuidade do semivariograma para distâncias menores do que a menor distância entre as amostras. Obs.: idealmente,  $\hat{\gamma}_{(0)} = 0$ , entretanto à medida que **h** tende para 0 (zero),  $\hat{\gamma}_{(h)}$  se aproxima de um valor positivo. Isto ainda pode ser derivado de erros de medição (Isaaks *et al.*, 1989), mas é impossível quantificar se a maior contribuição provém dos erros de medição ou da variabilidade de pequena escala não captada pela amostragem; e
- O valor (**Cᵢ**) é a contribuição ("sill"), que representa a diferença entre o patamar (**C**) e o Efeito Pepita (**C₀**).

Os cálculos do semivariograma experimental são realizados para todos os pares determinados com intervalo **h** e iniciando os cálculos a partir de cada nó da malha determinada pelo mesmo espaçamento **h**. Isto é repetido até que algum ponto de parada desejado seja finalmente alcançado.

A partir do semivariograma experimental calculado e representado em um gráfico, resta ainda o ajuste do modelo teórico no qual ele melhor se enquadra.

Os modelos de ajuste utilizados neste trabalho foram o esférico, o exponencial e o Gaussiano, que podem ser identificados na Figura 2 e são detalhadamente apresentados em Isaaks *et al.* (1989), Camargo (2005) e Albuquerque (2007). Os modelos utilizados são denominados como modelos isotrópicos (Isaaks *et al.*, 1989), já que a estrutura de dados das amostras varia em apenas uma direção (ao longo da extensão da via).

## 2.2. Krigagem ordinária

Os estimadores da geoestatística são divididos em: kriga-

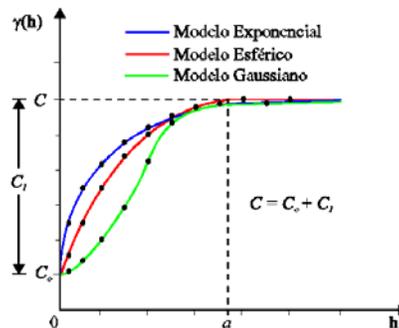


Figura 2. Modelagens de semivariogramas experimentais (Camargo, 2005)

gem simples, krigagem ordinária, krigagem universal, Co-krigagem, krigagem disjuntiva etc. (Isaaks *et al.*, 1989; Oliver *et al.*, 1990). Neste trabalho será apresentado apenas o procedimento conhecido por krigagem ordinária, que será utilizado como estimador nas análises apresentadas nas seções seguintes.

Na utilização do processo de krigagem ordinária um valor desconhecido  $Z_{(x_0)}^*$  pode ser estimado através da utilização de um conjunto de  $n$  valores com coordenadas  $(x_i, y_i)$ , adicionando-se um parâmetro  $\lambda_0$ .

$$Z_{x_0}^* = \lambda_0 + \sum_{i=1}^n \lambda_i Z_{(x_i)} \quad (2)$$

Para a utilização da krigagem ordinária, é desejável obter-se um estimador não tendencioso, ou seja, o erro do estimador deve ser nulo ( $E[Z_{x_0} - Z_{x_0}^*] = 0$ ) (Krige, 1951, *apud* Isaaks *et al.*, 1989). Então, para que isto ocorra, é necessário que as médias dos valores estimados e reais sejam iguais.

O procedimento adotado para a realização da krigagem ordinária não requer o prévio conhecimento da média dos dados analisados. Para que a igualdade da média dos valores reais e estimados seja satisfeita é necessário utilizar um artifício matemático ( $\lambda_0 = 0$  e  $\sum \lambda_i = 1$ ) para obter a variância minimizada do erro, ou variância de krigagem ordinária ( $\sigma_{ko}^2 Var[Z_{x_0} - Z_{x_0}^*]$ ). O detalhadamente do método de krigagem ordinária é apresentado em Isaaks *et al.* (1989), Camargo (2005) e Albuquerque (2007).

### 3. METODOLOGIA DE ANÁLISE

Os dados analisados referem-se aos valores de deflexões máximas e módulos de resiliência das camadas do pavimento, obtidos através de medições de bacias deflectométricas com equipamento FWD e métodos de retroanálise, respectivamente. Estes dados foram obtidos em três rodovias localizadas em regiões distintas do Brasil, conforme as seguintes descrições:

- BR-290/RS: localizado no estado do Rio Grande do Sul, entre o km 1+500 e o km 23+143. O espaçamento aplicado neste monitoramento foi de 40 metros entre amostras, numa mesma faixa de tráfego;
- SP-225: localizado no estado de São Paulo, entre o km 235+300 e o km 317+740. O espaçamento aplicado neste monitoramento foi de 120 metros entre amostras, numa mesma faixa de tráfego; e
- CE-060: localizado no estado do Ceará, entre o km 0+000 e o km 73+463. O espaçamento aplicado neste monitoramento foi de 400 metros entre amostras, numa mesma faixa de tráfego.

Todos os trechos de rodovia analisados são revestidos em concreto asfáltico, porém com materiais de base e subleito distintos. Além disto, as condições climáticas e de tráfego não se repetem. Ressalta-se que o objetivo deste trabalho não prevê a descrição detalhada das características físicas dos trechos rodoviários analisados. Portanto, pretende-se verificar como os procedimentos da geoestatística tornam possível avaliar de que forma a variação espacial deste conjunto de características influencia nos resultados de de-

flexão obtidos em campo e, conseqüentemente, nos resultados de retronálise das bacias deflectométricas realizadas com software EVERCALC5<sup>1</sup>.

As análises para a verificação da aplicabilidade dos procedimentos da geoestatística na otimização de amostragens de bacias deflectométricas foram realizadas de acordo com o seguinte procedimento, proposto por Albuquerque (2007):

- Verificação da continuidade espacial dos dados (utilizando-se banco de softwares do Variowin<sup>2</sup>): realizou-se a modelagem de semivariogramas utilizando-se os dados disponíveis dos monitoramentos de deflexão e os respectivos módulos de resiliência obtidos por retroanálise de bacias deflectométricas. Para tanto, levou-se em consideração semivariogramas onidirecionais, pelo fato de que os fenômenos ocorridos em rodovias prolongam-se linearmente (Kutz *et al.*, 2004; Kohler *et al.*, 2005);
- Análise da estatística descritiva dos dados originais: analisaram-se os dados disponíveis, resultantes dos monitoramentos de deflexão realizados em cada rodovia estudada. Calcularam-se as médias, os quartis, desvios padrão e coeficientes de variação;
- Realização do processo de krigagem ordinária (utilizando-se banco de softwares do Gslib90<sup>3</sup>): este processo foi aplicado apenas para as deflexões máximas. Foram suprimidas amostras existentes (estabeleceram-se espaçamentos variáveis das amostragens, menores que os alcances máximos obtidos pelos semivariogramas). Posteriormente procederam-se as estimativas de valores de deflexão para cada uma das três rodovias, utilizando-se os modelos de continuidade espacial determinados. As estimativas foram realizadas para cada 40 m da rodovia nos trechos analisados. Foram calculadas as novas médias, os quartis, desvios padrão e os coeficientes de variação para os valores estimados. Os mesmos ainda foram dispostos em uma nuvem de dados para proceder à comparação visual com as amostras originais de cada rodovia, permitindo a avaliação do processo de krigagem.

### 4. RESULTADOS E ANÁLISES

Na sequência são apresentados os resultados das análises listadas na metodologia deste trabalho. Ao passo que se processa a apresentação dos resultados os mesmos são discutidos.

#### 4.1. Verificação da continuidade espacial dos dados

Os resultados dos modelos obtidos para os semivariogramas de deflexões máximas podem ser observados na Figura 3, sendo apresentados detalhadamente na Tabela 1. Os mo-

<sup>1</sup> O EVERCALC5 foi desenvolvido pelo Departamento de Transportes do Estado de Washington (EUA). Calcula a bacia de deflexões teóricas pelo modelo de multicamadas elásticas e algoritmo modificado de Gauss-Newton para a otimização, e compara-a com a bacia de deflexões medida pelo FWD, ajustando os valores dos módulos das camadas do pavimento por iterações até a diferença entre as duas ser aceitável.

<sup>2</sup> O Variowin 2.2 é um software de domínio público. Com o uso do Variowin 2.2 é possível montar um matriz de pares de amostras, calcular, modelar e apresentar graficamente os semivariogramas de conjuntos de dados.

<sup>3</sup> O Gslib90 é um software de domínio público. A partir de modelos de semivariogramas de dados, pode-se utilizar o Gslib90 para proceder à estimativa de dados pelo uso da krigagem ordinária.

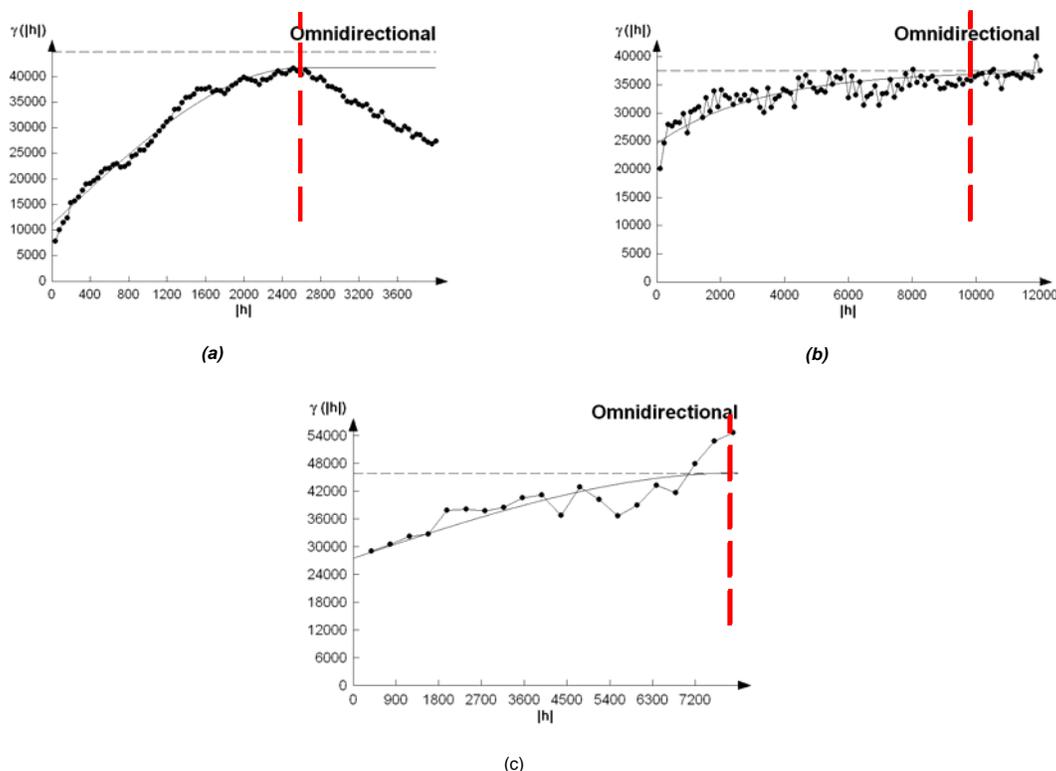


Figura 3. Semivariogramas unidirecionais modelados: (a) BR-290/RS; (b) SP-225; e (c) CE-060

Tabela 1. Características dos modelos dos semivariogramas de deflexões máximas

<i>Características do modelo</i>	<i>BR-290/RS</i>	<i>SP-225</i>	<i>CE-060</i>
Espaçamento entre amostras (m)	40	120	400
Modelo	Esférico	Exponencial	Esférico
Alcance (m)	2.600	9.840	8.100
Contribuição	30.600	12.920	18.400
Efeito pepita	11.250	24.700	27.600

delos obtidos para os semivariogramas dos módulos de resiliência das camadas dos pavimentos e para o subleito são apresentados na Tabela 2. Constam também na Tabela 2 os módulos de resiliência médios retroanalisados das bacias deflectométricas.

Nota-se que o modelo que teve maior continuidade espacial para deflexões máximas foi o do trecho rodoviário da SP-225 (Figura 3.b), alcançando 9,8 km. De fato, os semivariogramas dos módulos de resiliência desta rodovia também tiveram grande continuidade espacial (Tabela 2). Os modelos ajustados tiveram alcance acima de 30 km, indicando que os agentes que alteram a grandeza do módulo de resiliência das camadas do pavimento desta rodovia foram bem quantificados nos modelos. Contudo, a krigagem não é capaz de qualificá-los, isto cabendo às técnicas de engenharia rodoviária (análise de tráfego, avaliações de superfície, análise de formação de solos etc.).

Continuidade elevada também é observada no semivariograma de deflexões máximas da CE-060 (Figura 3.c). Conforme a Tabela 1, este semivariograma teve alcance de 8,1 km. Já os semivariogramas dos módulos de resiliência das camadas do pavimento e subleito (Tabela 2) desta rodovia, embora obtendo alcances consideráveis (todos acima de um quilômetro), foram bem variáveis quando comparados aos da SP-225.

O semivariograma da deflexão máxima para a BR-290/RS (Figura 3.a) foi o de menor alcance quando comparando às rodovias anteriores (Tabela 1). Embora o mesmo não tenha atingido o patamar máximo indicado, evidenciando a existência de várias estruturas imbricas (várias estruturas geométricas em sequência até atingir o patamar máximo), para efeito de simplificação, optou-se pela construção do modelo com uma única forma geométrica até o alcance indicado, mesmo sendo possível obter um modelo com alcance maior, caso atingisse o patamar máximo. Os semivariogramas para os módulos de resiliência das camadas do pavimento e do subleito tiveram continuidades bem variáveis (Tabela 2), com alcances sempre inferiores ao do semivariograma da deflexão máxima deste trecho. Isto pode ser devido à grande variabilidade da configuração estrutural do pavimento, principalmente das espessuras de base e revestimento (relação de espessura de base e revestimento variou entre 4 e 7), o que afeta nos resultados de retroanálise das bacias deflectométricas.

**Tabela 2.** Características dos modelos dos semivariogramas de módulos de resiliência

<i>Características do modelo</i>	<i>Revestimento</i>	<i>Camada de Ligação</i>	<i>Base</i>	<i>Subleito</i>
<i>BR-290/RS</i>				
Espaçamento entre amostras (m)	40	200	40	80
Modelo	Esférico	Exponencial	Esférico	Exponencial
Alcance (m)	2156	1260	470	1504
Contribuição	2640000	1984000	555000	8360
Efeito pepita	2700000	4416000	705000	29640
Módulo de Resiliência Médio (MPa)	2650 <sup>(1)</sup>	770 <sup>(1)</sup>	870 <sup>(2)</sup>	285 <sup>(3)</sup>
<i>SP-225</i>				
Espaçamento entre amostras (m)	2400	2400	2400	2400
Modelo	Esférico	Gaussiano	Gaussiano	Gaussiano
Alcance (m)	36960	37800	37800	31920
Contribuição	9430000	650000	6000	4620
Efeito pepita	13340000	1825000	24000	9380
Módulo de Resiliência Médio (MPa)	6495 <sup>(1)</sup>	495 <sup>(1)</sup>	250 <sup>(4)</sup>	220 <sup>(3)</sup>
<i>CE-060</i>				
Espaçamento entre amostras (m)	400	400	400	400
Modelo	Esférico	Exponencial	Exponencial	Gaussiano
Alcance (m)	1400	9720	1600	2880
Contribuição	12100000	588000	4200	8400
Efeito pepita	9900000	600000	15960	47600
Módulo de Resiliência Médio (MPa)	3025 <sup>(1)</sup>	1330 <sup>(1)</sup>	150 <sup>(4)</sup>	300 <sup>(3)</sup>

(1) Camada de Concreto Asfáltico;

(2) Camada de Brita Graduada Tratada com Cimento – bastante degradada;

(3) Solo Compactado;

(4) Brita Graduada Simples ou Solo Estabilizado Granulometricamente.

O espaçamento diferenciado entre amostras nas rodovias (ver Tabela 1), embora todos múltiplos de 40m, foi um fator indesejado na análise, já que impediu que elas tivessem as mesmas condições para comparação. Este fator não pôde ser controlado, pois os dados foram obtidos e fornecidos por órgãos e empresas parceiras em condições e para fins distintos. Contudo, concordando com a hipótese definida neste trabalho, na qual os fenômenos que definem as deflexões em pavimentos são espacialmente dependentes, pode-se verificar que, mesmo em amostragem com espaçamento maior que 40m (SP-225 e CE-060), a dependência espacial foi muito alta (alcance de 9.840m e 8.100m, respectivamente). Provavelmente, mesmo com espaçamento entre amostras em 40m, a SP-225 e a CE-060 apresentariam alcances semelhantes aos obtidos nos semivariogramas apresentados, pois este fator é um princípio básico das variáveis regionalizadas e da geoestatística, embora isto não tenha sido testado neste trabalho.

#### 4.2. Krigagem ordinária de deflexões máximas e análises comparativas

Para efeito de avaliação do método de krigagem, foram utilizadas apenas as deflexões máximas. Contudo a mesma metodologia também pode ser aplicada na estimativa de módulos de resiliência.

Para proceder à estimativa por krigagem ordinária, as deflexões medidas em campo foram corrigidas linearmente para o valor correspondente a aplicação de uma carga registrada no prato do FWD de 40.000N. Após isso, as amostragens originais foram reduzidas até um espaçamento máximo em torno de 400m a 480m, cerca de 10 a 11 vezes o espaçamento padrão adotado pelo DNIT em uma mesma faixa de tráfego, da seguinte forma:

- BR-290/RS: espaçamento entre amostras de 200m e 400m, ambos múltiplos do espaçamento original de 40m;

- SP-225: espaçamento entre amostras de 240m e 480m, ambos múltiplos do espaçamento original de 120m; e
- CE-060: como o espaçamento das amostragens foi de 400m, então utilizaram-se os dados originais para a krigagem.

A partir das amostragens reduzidas, foram realizadas as krigagens para estimativa de dados a cada 40 metros em toda a extensão dos trechos rodoviários estudados. Os resultados da krigagem ordinária estão apresentados nas Tabelas 3, 4 e 5, para a BR-290/RS, SP-225 e CE-060, respectivamente. Nestas tabelas podem-se observar os comparativos realizados entre as estatísticas descritivas das amostragens originais e das krigagens a partir das amostragens reduzidas.

Para a BR-290/RS, o processo de krigagem para as duas amostragens reduzidas (espaçamentos entre amostras de 200m e 400m) não alterou significativamente as grandezas das estatísticas descritivas, exceto os valores máximos e mínimos, que foram suavizados pelo processo de estimativa. Os valores mínimos estimados tiveram um aumento médio de 50% e os valores máximos uma redução média de 26% quando comparados aos dados originais.

O processo de estimativa para a SP-225 conservou a média e os valores do 1º, 2º e 3º quartis. Porém houve alteração nos valores mínimo, máximo e no desvio padrão. Na CE-060 apenas a média e o 3º quartil foram conservados pelo processo de estimativa.

Como todos os modelos de continuidade espacial foram elaborados para os dados originais, é de se esperar que o modelo da BR-290/RS, cujo espaçamento entre amostras é o menor (40m), forneça menor discrepância nas estimativas que o modelo da SP-225 (espaçamento de 120m) e, conseqüentemente, da CE-060 (espaçamento de 400m).

**Tabela 3.** Estatística descritiva para dados originais e estimados para a BR-290/RS (24 km)

<i>Estatística de Do FWD (0,001mm*)</i>	<i>Dados Originais (espaçamento de 40m)</i>	<i>Krigagem para Estimativas (dados espaçados em 200m)</i>	<i>Krigagem para Estimativas (dados espaçados em 400m)</i>
N° de dados	540	600	600
$\bar{x}$	364	373	365
S	212	201	210
C.V. (%)	58,23	53,84	57,37
Mínimo	79	124	119
1° quartil	195	197	198
2° quartil	307	335	289
3° quartil	494	525	501
Máximo	1308	943	995

\* Dados extraídos em arquivos FWD são em milésimos de milímetros, portanto a mesma unidade foi conservada nas análises.

**Tabela 4.** Estatística descritiva para dados originais e estimados para a SP-225 (82,44 km)

<i>Estatística de Do FWD (0,001mm*)</i>	<i>Dados Originais (espaçamento de 120m)</i>	<i>Krigagem para Estimativas (dados espaçados em 240m)</i>	<i>Krigagem para Estimativas (dados espaçados em 480m)</i>
N° de dados	688	2061	2061
$\bar{x}$	459	458	455
S	262	199	172
C.V. (%)	57,11	43,37	37,79
Mínimo	99	131	147
1° quartil	295	317	331
2° quartil	382	409	395
3° quartil	540	546	570
Máximo	2.071	1.801	1.402

\* Dados extraídos em arquivos FWD são em milésimos de milímetros, portanto a mesma unidade foi conservada nas análises.

**Tabela 5.** Estatística descritiva para dados originais e estimados para a CE-060 (80 km)

<i>Estatística de Do FWD (0,001mm*)</i>	<i>Dados Originais (espaçamento de 400m)</i>	<i>Krigagem para Estimativas (dados espaçados em 400m)</i>
N° de dados	187	2000
$\bar{x}$	466	465
S	215	133
C.V. (%)	46,07	28,54
Mínimo	150	160
1° quartil	320	365
2° quartil	420	450
3° quartil	560	546
Máximo	1.360	1.360

\* Dados extraídos em arquivos FWD são em milésimos de milímetros, portanto a mesma unidade foi conservada nas análises.

Vale observar que a regularidade no espaçamento em amostragens de parâmetros de pavimentos, tal qual é utilizada na prática rodoviária e nas amostragens avaliadas neste trabalho, é um fator que contribui positivamente na aplicação do método de krigagem ordinária.

As estimativas por krigagens estão apresentadas em forma gráfica nas Figuras 4, 5 e 6, para a BR-290/RS, SP-225 e CE-060, respectivamente. Nestas mesmas figuras são apresentados os comparativos em forma de nuvem de dados entre as deflexões máximas medidas em campo e as deflexões máximas obtidas por estimativas (a partir de amostragens reduzidas). Estão identificados também os segmentos homogêneos ao longo dos trechos rodoviários. Estes segmentos homogêneos continuaram conservados, mesmo após o processo de estimativa. Observa-se, porém, que os valores extremos são suavizados, mas as deflexões características nos segmentos homogêneos (deflexão média adicionada ao desvio padrão) não são substancialmente alteradas.

Todas as análises foram limitadas a um espaçamento

máximo entre de 400m a 480m. Quando comparada à prática da engenharia rodoviária, na qual se prevê um espaçamento de 40 m entre duas estações consecutivas para levantamentos de bacias deflectométricas, o número de amostras necessárias é aproximadamente 90% menor. Considera-se, portanto, que a krigagem pode ser uma ferramenta bastante importante para aplicação na pavimentação, sobretudo para gerência de pavimentos em rodovias de baixo a médio volume de tráfego. Contudo deve-se considerar as limitações já mencionadas para a ferramenta, sobretudo a suavização de valores extremos.

## 5. CONCLUSÕES

A escolha de trechos rodoviários localizados em regiões distintas do Brasil (BR-290/RS, SP-225 e CE-060), e com climas também diferenciados, tornou possível a avaliação das ferramentas variograma e krigagem ordinária da Geoestatística como otimizador de amostras no processo de monitoramento de bacias deflectométricas.

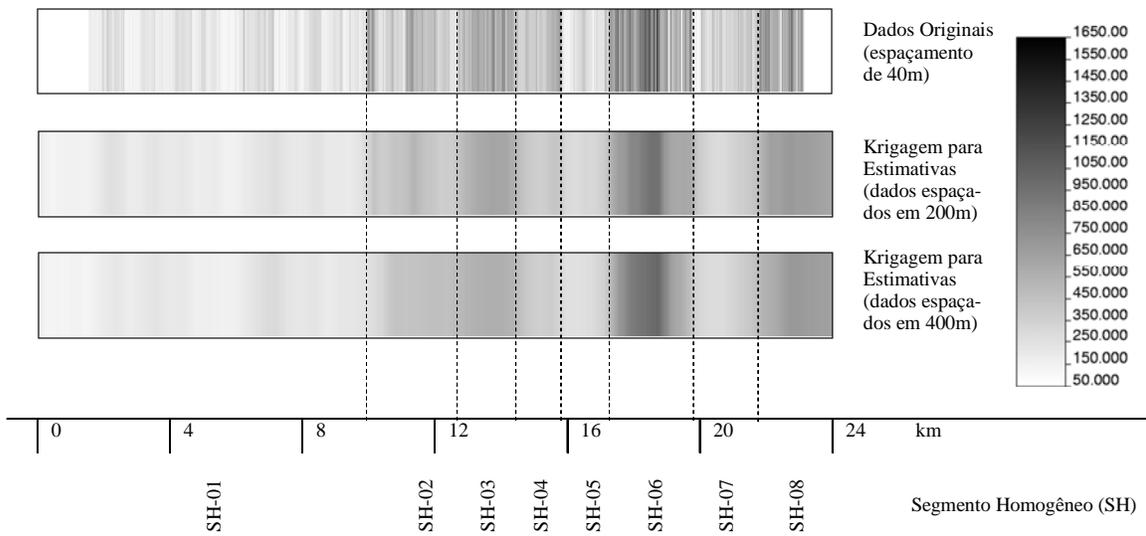


Figura 4. Comparativo entre dados originais e estimados por krigagem na BR-290/RS

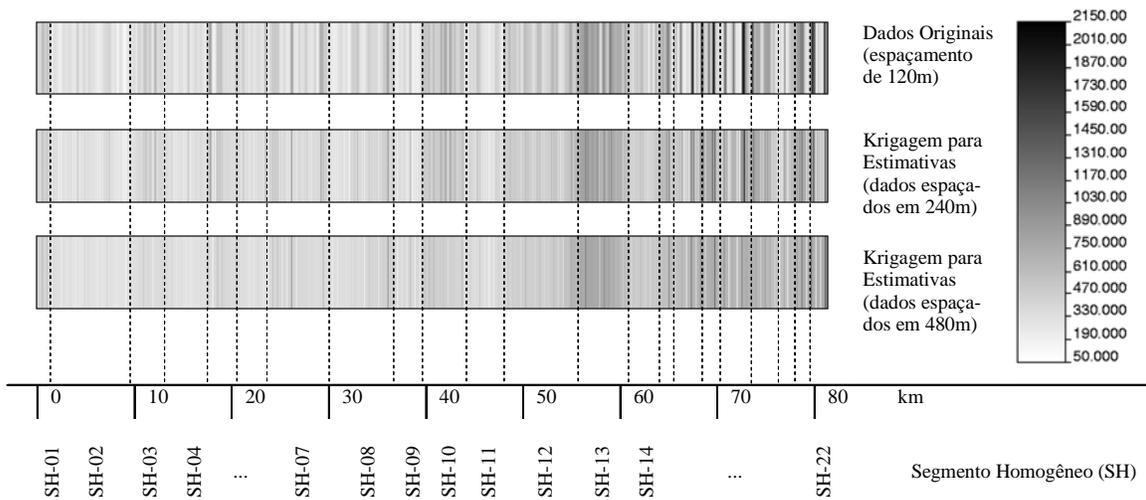


Figura 5. Comparativo entre dados originais e estimados por krigagem na SP-225

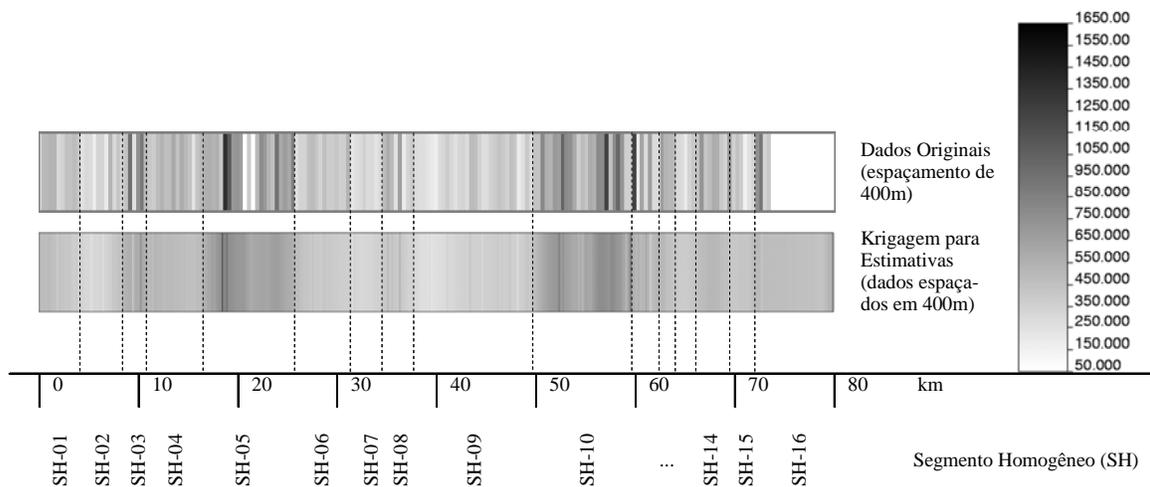


Figura 6. Comparativo entre dados originais e estimados por krigagem na CE-060

A estimativa de valores em locais não amostrados para as deflexões características dos segmentos homogêneos (SHs) dos trechos rodoviários analisados, pelo uso da krigagem ordinária, mostrou-se confiável.

Um fato importante observado foi a constatação de extensas continuidades espaciais da deflexão máxima e dos módulos de resiliência das camadas do pavimento e subleito. O menor alcance observado nos modelos dos semivariogramas de deflexões foi de 2,60 km (BR-290/RS) e o maior de 9,84 km (SP-225). Para os módulos de resiliência, destacam-se os semivariogramas da SP-225, nos quais os alcances foram superiores a 30 km. Mesmo com espaçamentos entre amostras de 400 m a 480 m, e posterior estimativa dos dados para cada 40 m, as deflexões características nos segmentos homogêneos dos trechos rodoviários analisados permaneceram praticamente inalteradas, quando comparadas a valores obtidos a partir da amostragem original. Este fator é importante, pois os procedimentos utilizados na gerência de pavimentos de baixo a médio volume de tráfego podem prever amostragens com espaçamentos maiores que o usual sem comprometer significativamente as avaliações desejadas.

Contudo, um fator de ponderação no uso dos procedimentos da geoestatística está relacionado à suavização realizada por esse método nos valores extremos (os valores máximos e mínimos se aproximam da média em cada segmento homogêneo). Caso deseje-se realizar análises pontuais (nos quais os valores máximos são importantes), o uso da geoestatística não seria recomendado, devendo os segmentos identificados como críticos serem estudados com maior abrangência, sobretudo em rodovias de elevado volume de tráfego.

Ressalta-se que a utilização das ferramentas da geoestatística tem grande potencial por oferecer potencial de economia de recursos e logística nos monitoramentos de bacias deflectométricas, constatando-se para o caso específico deste trabalho a possibilidade de redução de amostras em aproximadamente 90%. Embora este resultado tenha sido constatado para os três trechos rodoviários analisados, ele não deve ser considerado como regra, principalmente pelo fato de toda rodovia ter comportamento estrutural e meio ambiente diferenciados, podendo influenciar decisivamente nas modelagens de semivariogramas e, conseqüentemente, nos alcances obtidos em outras rodovias.

## REFERÊNCIAS

- AASHTO (2004) *Guide for mechanistic-empirical design of new and rehabilitated structures. Identification of feasible rehabilitation strategies*. American Association of State Highway and Transportation Officials. Washington, DCC/USA, p. 25.
- AASHTO (2001) *Pavement management guide*. American Association of State Highway and Transportation Officials. Washington, DC/USA.
- Albuquerque, F. S. (2007) *Sistema de gerência de pavimento para departamentos de estradas do nordeste brasileiro*. Tese (doutorado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre.
- Albuquerque, F. S.; W. P. Núñez e J. A. G. Macedo (2005) Aplicação da geoestatística na otimização do processo de amostragem. *Anais XIX Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes*, 2005, Recife. Panorama Nacional da Pesquisa em Transportes, v. 2. p. 1434–1443.
- ASTM (1999) D6433 –*Standard Test Method for Roads and Parking Lots Pavement Condition Index Surveys*. American Society for Testing and Materials, v. 04.03.
- Camargo, E. C. G. (2005) *Geoestatística: fundamentos e aplicações*. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Governo Federal. Brasil. Disponível em: <[www.dpi.inpe.br/gilberto/tutoriais/gis\\_ambiente/5geoest.pdf](http://www.dpi.inpe.br/gilberto/tutoriais/gis_ambiente/5geoest.pdf)> (Acesso em 20/6/2006).
- Delfiner P. e J. P. Delhomme (1975) *Optimum interpolation by kriging*. In: J. D. Davis and M. J. McCullagh (eds), *Display and Analysis of Spatial Data*. New York, John Wiley and Sons, p. 96–114.
- Haas, R. C. G., Hudson W. R., Zaniewski J. P. (1994) *Modern pavement management*. Krieger Publishing Company. Malabar, Florida.
- HDM-4 (2000) *Volume 4 – Analytical framework & model descriptions: Part C – road deterioration models*. International Study of Highway Development and Management Tools (ISOHDM), The World Bank, Washington, USA.
- Huijbregts, C. (1975) *Regionalized variables and quantitative analysis of spatial data*. In *Display and Analysis of Spatial Data*, editado por J. Davis and M. McCullagh, Wiley, Londres, UK.
- Isaaks, E. e R. Srivastava (1989) *An introduction to applied geostatistics*. Oxford University Press Inc. New York, USA.
- Kohler, E. R.; J. S. Nicholas e T. H. John (2005) *Pilot Project for Fixed Segmentation of the Pavement Network*. UCPRC-RR-2005/11 – Part of PPRC Strategic Plan Item 3.2.4, Prepared for California Department of Transportation, Division of Research and Innovation, Office of Roadway Research, UC Pavement Research Center University of California, Davis and Berkeley – USA, 2006.
- Krige, D. G. (1951) A statistical approach to some basic mine valuation problems on the Witwatersrand. *J. of the Chem., Metal. and Mining Soc. of South Africa*. v. 52 n. 6, p. 119–139.
- Kutz, M. e G. S. Spring (2004) *Handbook of transportation engineering: part I: networks and systems: chapter 5. applications of GIS in transportation*. McGraw-Hill Professional, Digital Engineering Library, McGraw-Hill, USA. Disponível em: <<http://www.digitalengineeringlibrary.com>> (Acesso em 10/6/2006).
- Matherson, G. (1971) *The theory of regionalized variables and its applications*. Les Cahiers du Centre de Morphologie Mathématique de Fontainebleu, Paris.
- NHI (1998) *Pavement management systems*. Federal Highway Administration, National Highway Institute Course, 422 p, NHI Course n° 131035. Disponível em: <<http://www.nhi.fhwa.dot.gov>> (Acesso em 25/01/2006).
- Núñez, M. M. e M. Y. Shahin (1986) Pavement condition data analysis and modeling. *Transportation Research Record 1070*, Transportation Research Board, p. 125–132, Washington-DC, USA.
- Oliver, M. A. e R. Webster (1990). *Statistical methods in soil and land resource survey*. Oxford University Press, USA.