

19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



25º Encontro Nacional de Conservação Rodoviária (ENACOR) 48ª Reunião Anual de Pavimentação (RAPV)

ESTUDO DOS PARÂMETROS DA BACIA DEFLECTOMÉTRICA POR MEIO DE GEOESTATÍSTICA

DOI: (a ser preenchido após o envio do código DOI da publicação)

Felipe H. Cava¹; Carlos Y. Suzuki²; Caio R.G. Santos³; Flaviane M.L. Vallejo³ & Angela M. Azevedo⁴

RESUMO

O levantamento deflectométrico consiste em uma atividade realizada para uso em diferentes aplicações da área de pavimentação rodoviária e aeroportuária, como fiscalização da execução de camadas, projetos de restauração de pavimentos asfálticos e monitoramento do desempenho de estruturas de pavimentos. Este trabalho teve como objetivo analisar por meio da geoestatística os parâmetros da bacia de deflexões na rodovia SP079. Foram realizados levantamentos de deflexões em um segmento de 5 quilômetros de extensão na rodovia SP079 e calculados os cinco parâmetros da bacia deflectométrica, sendo: deflexão máxima no topo do revestimento, raio de curvatura do pavimento, Surface Curvature Index, Base Damage Index e Base Curvature Index. Observou-se que por meio da geoestatística é possível estimar o comportamento dos parâmetros mesmo em áreas não levantadas, além de realizar a separação por segmentos com comportamentos semelhantes. Observou-se que o monitoramento do pavimento em função apenas das deflexões máximas na superfície do pavimento pode resultar em uma análise equivocada quanto ao comportamento estrutural do pavimento rodoviário. Com base na análise realizada neste trabalho, conclui-se que a análise de diferentes parâmetros da bacia deflectométrica por meio da geoestatística pode auxiliar na tomada de decisões dentro do sistema de gerência de pavimentos de uma malha rodoviária.

PALAVRAS-CHAVE: geoestatística; bacia de deflexões; gerência de pavimentos.

ABSTRACT

The deflectometric survey consists of an activity carried out for use in different applications in the area of road and airport paving, such as monitoring the execution of layers, restoration projects of asphalt pavements and monitoring the performance of pavement structures. This work aimed to analyze through geostatistics the parameters of the deflection basin on the SP079 highway. Deflection surveys were carried out in a 5 km long segment on the SP079 highway and the five parameters of the deflectometric basin were calculated, namely: maximum deflection at the top of the asphalt layer, radius of curvature of the pavement, Surface Curvature Index, Base Damage Index and Base Curvature Index. It was observed that through geostatistics it is possible to estimate the behavior of the parameters even in areas not surveyed, in addition to performing the separation by segments with similar behaviors. It was observed that monitoring the pavement based only on the maximum deflections on the pavement surface can result in a wrong analysis regarding the structural behavior of the road pavement. Based on the analysis carried out in this work, it is concluded that the analysis of different parameters of the deflectometric basin through geostatistics can help in decision-making within the pavement management system of a road network.

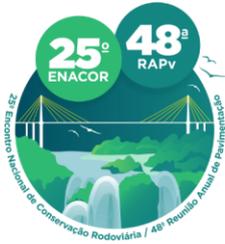
KEY WORDS: geostatistics; deflectometric basin; pavement management system.

¹ Centro Universitário da FEI, Departamento de Engenharia de Civil, e-mail: cava@fei.edu.br

² Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia de Transportes, e-mail: carlos.suzuki@planservi.com.br

³ Instituto Mauá de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil, e-mail: caiorubens@maua.br; flaviane.vallejo@maua.br

⁴ Planservi Engenharia Ltda, e-mail: angela.martins@planservi.com.br



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

O dimensionamento estrutural de reforços de pavimentos asfálticos é realizado de forma empírica, de modo que a deflexão medida na superfície do revestimento é utilizada como parâmetro de análise do desempenho da estrutura, conforme os procedimentos DNER PRO 11/79 e DNER PRO 269/94. Nestes procedimentos, a espessura de reforço é calculada com base na deflexão de projeto e no raio de curvatura do pavimento. A deflexão de projeto e o raio de curvatura consistem em parâmetros definidos em função dos dados obtidos em campo, por meio de um levantamento de deflexões com os equipamentos do tipo Viga Benkelman ou Falling Weight Deflectometer (FWD).

Além do dimensionamento de camadas de reforço, o levantamento deflectométrico é utilizado em outras atividades da pavimentação, como fiscalização da execução de camadas e o monitoramento de pavimentos. Neste último, o desempenho do pavimento é analisado por meio das deflexões, permitindo a tomada de decisão quanto a futuras intervenções estruturais.

Entretanto, as análises de desempenho do pavimento são realizadas de forma pontual ou utilizando valores característicos ao longo de segmentos específicos da rodovia. Neste contexto, o presente trabalho tem como objetivo geral estudar os parâmetros da bacia deflectométrica por meio da modelagem de variogramas e da geração de mapas por krigagem ordinária. O objetivo específico deste trabalho é verificar, por meio da geoestatística, a possibilidade de segmentação do trecho em função valor característico de diferentes parâmetros da bacia deflectométrica.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

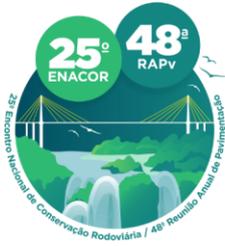
Parâmetros da bacia deflectométrica

A deflexão consiste no deslocamento recuperável causado na superfície do pavimento quando este for solicitado por uma carga. As deflexões podem ser medidas utilizando o equipamento conhecido como Viga Benkelman, conforme DNER ME 024/96, ou pelo *Falling Weight Deflectometer* (FWD), conforme DNER PRO 273/96. Por meio do FWD, o deslocamento pode ser registrado a partir das distâncias do ponto de aplicação da carga através do posicionamento de geofones.

Dentre os parâmetros usados para analisar a qualidade estrutural do pavimento, o raio de curvatura (R) é um indicativo do arqueamento da bacia de deflexões em relação ao ponto de aplicação de carga (D_0) e a uma distância de 25cm (D_{25}) (Bernucci *et al.*, 2008). A norma DNER PRO 11/79 indica que raios de curvatura com valores menores do que 100m representam uma condição estrutural ruim, sendo necessária a realização de intervenções no pavimento. O cálculo do raio de curvatura é realizado pela Equação 1, dado em função das deflexões entre rodas D_0 e D_{25} .

$$R = \frac{6250}{2 \cdot (D_0 - D_{25})} \quad (1)$$

Segundo Aavik e Talvik (2008) existem outros parâmetros da bacia deflectométrica que podem ser utilizados para avaliar a condição de diferentes camadas do pavimento em função dos dados levantados em campo com o FWD, de modo que cada parâmetro analisa a condição de uma camada em específico. As Equações 2 a 4 apresentam os cálculos dos parâmetros *Surface Curvature Index* (SCI), *Base Damage Index* (BDI) e *Base Curvature Index* (BCI) utilizados para analisar a condição



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



do revestimento, base e subleito, respectivamente. Nestas equações, a variável “DXX” corresponde à deflexão resultante a uma distância “XX” do ponto de aplicação de carga.

$$SCI = D0 - D30 \quad (2)$$

$$BDI = D30 - D60 \quad (3)$$

$$BCI = D60 - D90 \quad (4)$$

Autores como Kim (2002) e Horak (2008) mencionam sobre os valores limites dos parâmetros da bacia deflectométrica para que o pavimento apresente um bom desempenho. Segundo estes autores, os parâmetros SCI, BDI e BCI devem ser menores do que 25, 40 e 10 centésimos de milímetro, respectivamente, para que apresentem um bom comportamento.

Segundo Andrade, Vasconcelos e Bernucci (2016), o uso dos parâmetros de bacia de deflexões consiste em um bom indicador dos diferentes comportamentos dos pavimentos asfálticos. Contudo, os autores mencionam que os valores limites encontrados na bibliografia necessitam de calibração para as condições brasileiras.

Variável regionalizada e análise geoestatística

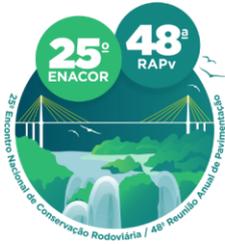
Segundo Krige (1951), a geoestatística é uma área da estatística clássica que tem como objetivo estudar as variáveis com comportamento regionalizado ou que se distribuem no espaço, de modo que esta foi originalmente desenvolvida para prever o teor de minérios em uma área a ser explorada.

Matheron (1971) descreve que a variável regionalizada é uma função composta por uma região aleatória e outra estruturada, sendo que este último é o que caracteriza o fenômeno regionalizado. Para Wackernagel (2003), a combinação dos aspectos de regionalização e a aleatoriedade do fenômeno resultam em uma função aleatória. Leuanghtong *et al.* (2008) descreve que o objetivo da geoestatística é analisar os padrões espaciais em variáveis regionalizadas por meio de variogramas.

Segundo Yamamoto (2020), a variância espacial é calculada pela Equação 5, de modo que $Z(x)$ é a variável regionalizada no ponto x , $Z(x+h)$ é a variável regionalizada a uma distância h do ponto x , n são pares de pontos separados pela distância h . A Figura 1 ilustra os elementos de um variograma, destacando-se o efeito pepita, amplitude, patamar e as regiões de campo estruturado e aleatório.

$$\gamma(h) = \frac{1}{2n} \cdot \sum_{i=1}^n [Z(x+h) - Z(x)]^2 \quad (5)$$

Yamamoto (2020) descreve o significado dos elementos do variograma. Segundo o autor, a amplitude consiste na distância em que as amostras começam a ser independentes, isto é, sem correlação espacial. O patamar do variograma é igual a soma da variância aleatória, que segundo o autor ocorre devido ao efeito pepita, e a variância espacial. Por fim, o efeito pepita consiste em uma variância na origem do variograma que ocorre devido à variabilidade do fenômeno espacial somada à incerteza por uma amostragem insuficiente.



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br

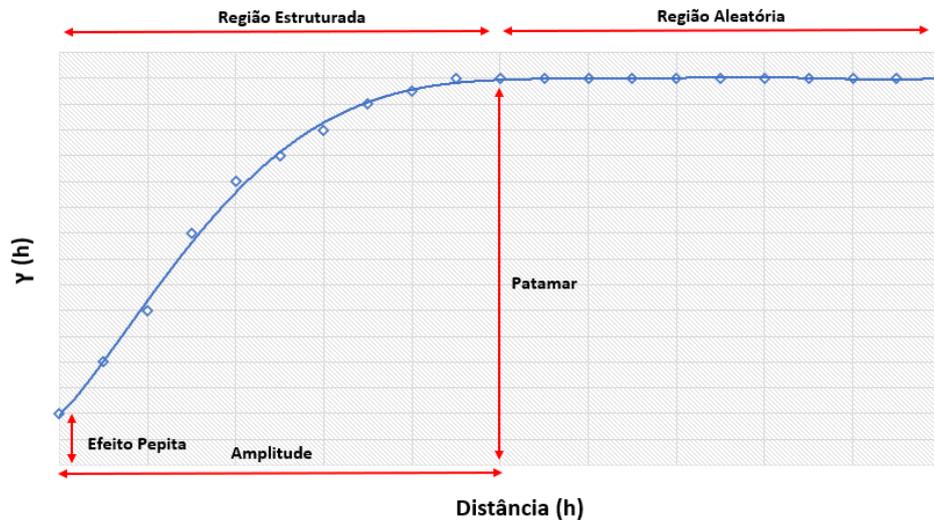


Figura 1 – Elementos do variograma experimental (AUTORES, 2023)

Krigagem ordinária

Segundo Matheron (1971) a krigagem consiste em um processo de estimativa com objetivo de determinar o melhor estimador linear possível, para um determinado ponto, levando em consideração toda a informação disponível. Para Olea (1991), a krigagem é um conjunto de técnicas de regressão que minimizam a variância da estimativa a partir de um modelo de covariância.

Segundo Wackernagel (1995), um ponto desconhecido pode ser estimado por meio da Equação 6, onde os dados dos vizinhos $Z(x_i)$ serão combinados linearmente com os pesos λ_i .

$$Z_{k0}^* = \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot Z(x_i) \quad (6)$$

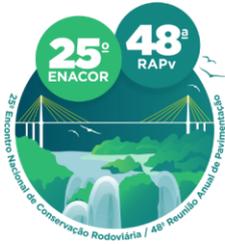
Para Yamamoto e Landim (2013), a krigagem ordinária é um método de estimativa local, de modo que ponto não amostrado resulta na combinação linear dos valores encontrados na vizinha.

Aplicação da geoestatística para projetos de infraestrutura

Embora a geoestatística tenha surgido com aplicações na área de mineração, esta tem sido aplicada para diferentes áreas do conhecimento. Albuquerque (2007) utilizou a geoestatística para propor melhorias no sistema de gerência de pavimentos dos estados do nordeste brasileiro. O autor menciona que a aplicação da estatística espacial poderia reduzir os custos de monitoramento de malha rodoviária, sendo observado pelo autor uma redução de 82,4% na Paraíba.

Albuquerque e Nunez (2012) analisaram utilizando krigagem a otimização de monitoramentos de deflexões máximas e módulos de resiliência de pavimentos asfálticos obtidos por retroanálise. Os autores observaram a possibilidade de redução de 90% das amostras para obter o mesmo resultado médio.

Ribeiro, Silva e Barroso (2017) utilizaram a geoestatística para mapeamento da região metropolitana de Fortaleza quanto ao ensaio CBR nas energias normal e intermediária. Os autores



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



observaram que a técnica pode auxiliar no reconhecimento prévio do comportamento dos solos para projetos de pavimentação.

Para apoiar o sistema de gerência de pavimentos aeroportuários, Almeida e Oliveira (2022a; 2022b) analisaram a macrotextura e condição dos pavimentos de pistas de pouso e decolagem usando geoestatística. Os autores acreditam que a estatística espacial pode apoiar na análise da condição superficial das pistas de pouso e decolagem.

MÉTODO

Os parâmetros da bacia deflectométrica foram levantados ao longo de 5 quilômetros da rodovia SP079, entre os municípios de Sorocaba e Piedade. As deflexões foram medidas utilizando o equipamento FWD, por meio da aplicação de uma carga de 40kN em uma área circular com raio de 150 milímetros e com 7 geofones posicionados conforme a Figura 2.

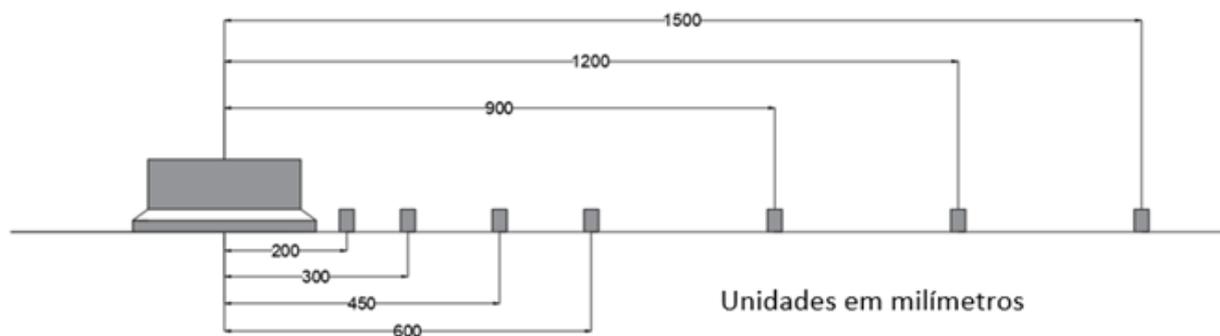
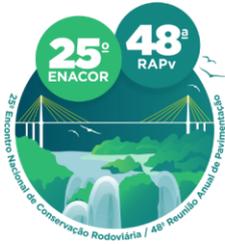


Figura 2 – Posição dos geofones para análise da bacia deflectométrica (AUTORES, 2023)

As medições foram realizadas com espaçamento de 40 metros, totalizando 126 bacias deflectométricas. A partir das deflexões em diferentes distâncias, foram calculados os parâmetros da bacia deflectométrica: Deflexão máxima (D_0), Raio de Curvatura da Bacia (R), *Surface Curvature Index* (SCI), *Base Damage Index* (BDI) e *Base Curvature Index* (BCI). Os parâmetros da bacia deflectométrica foram inseridos no QGIS para cada ponto de análise ao longo dos 5 quilômetros da rodovia SP079.

A análise geoestatística foi realizada considerando uma distância máxima de 2500 metros para elaboração dos variogramas, isto é, metade do comprimento total do trecho analisado, e uma distância de procura (*lag distance*) de 40 metros (igual ao espaçamento entre levantamentos). Foram estudadas diferentes funções de distribuição de probabilidades para modelar o variograma. Os variogramas e a krigagem ordinária foram elaborados utilizando o *plugin Smart-Map* e o software QGIS.

A fronteira conexa, utilizada para interpolação dos dados da bacia deflectométrica, foi definida como uma seção retangular e maior do que a largura da rodovia para facilitar a visualização dos resultados. A Figura 3 ilustra a localização geográfica das amostras e a fronteira convexa utilizada para a interpolação por krigagem ordinária.



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br

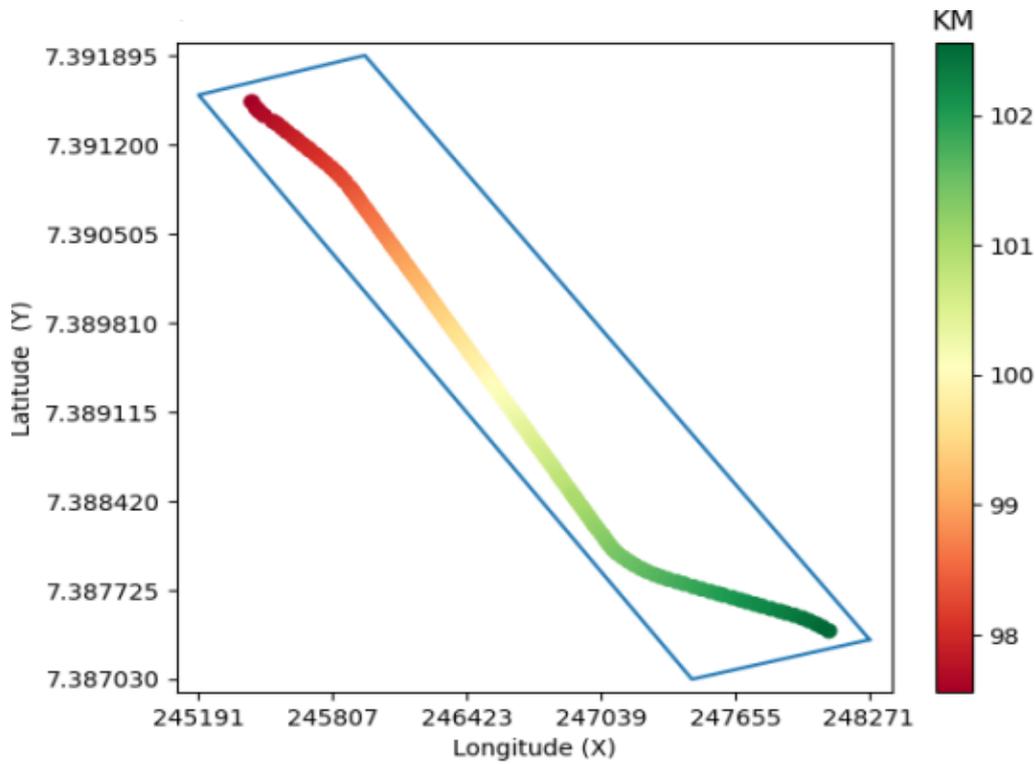


Figura 3 – Localização das amostras da bacia de deflexões (AUTORES, 2023).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Análise estatística

A Figura 4 ilustra o histograma dos 5 parâmetros da bacia defletométrica estudados neste trabalho. Observa-se que a deflexão máxima, D_0 , apresenta grande dispersão ao longo dos 5 quilômetros da rodovia SP079, variando de 25 centésimos de milímetro até 195 centésimos de milímetro. Devido à frequência de distribuição destas amostras, observa-se que o pavimento em questão apresenta um comportamento estrutural mediano, com a maior frequência na classe 42 centésimos de milímetro.

Com base no parâmetro SCI, observam-se as maiores frequências em classes de 19,6 a 37,3 centésimos de milímetro, o que indica que a camada de revestimento está atingindo grandes deformações. Além disso, com base no Raio de Curvatura, cerca de 65% do trecho apresenta raio de curvatura reduzido, indicando a necessidade de intervenções na estrutura.

Em relação aos parâmetros BDI e BCI, relativos à base e subleito do pavimento, respectivamente, observa-se que cerca de 90% do trecho apresenta um bom comportamento estrutural, de modo que estes parâmetros não indicam a necessidade de grandes intervenções na base e no subleito.



19 a 22 de Setembro de 2023
 Foz do Iguaçu - PR
www.rapvenacor.com.br

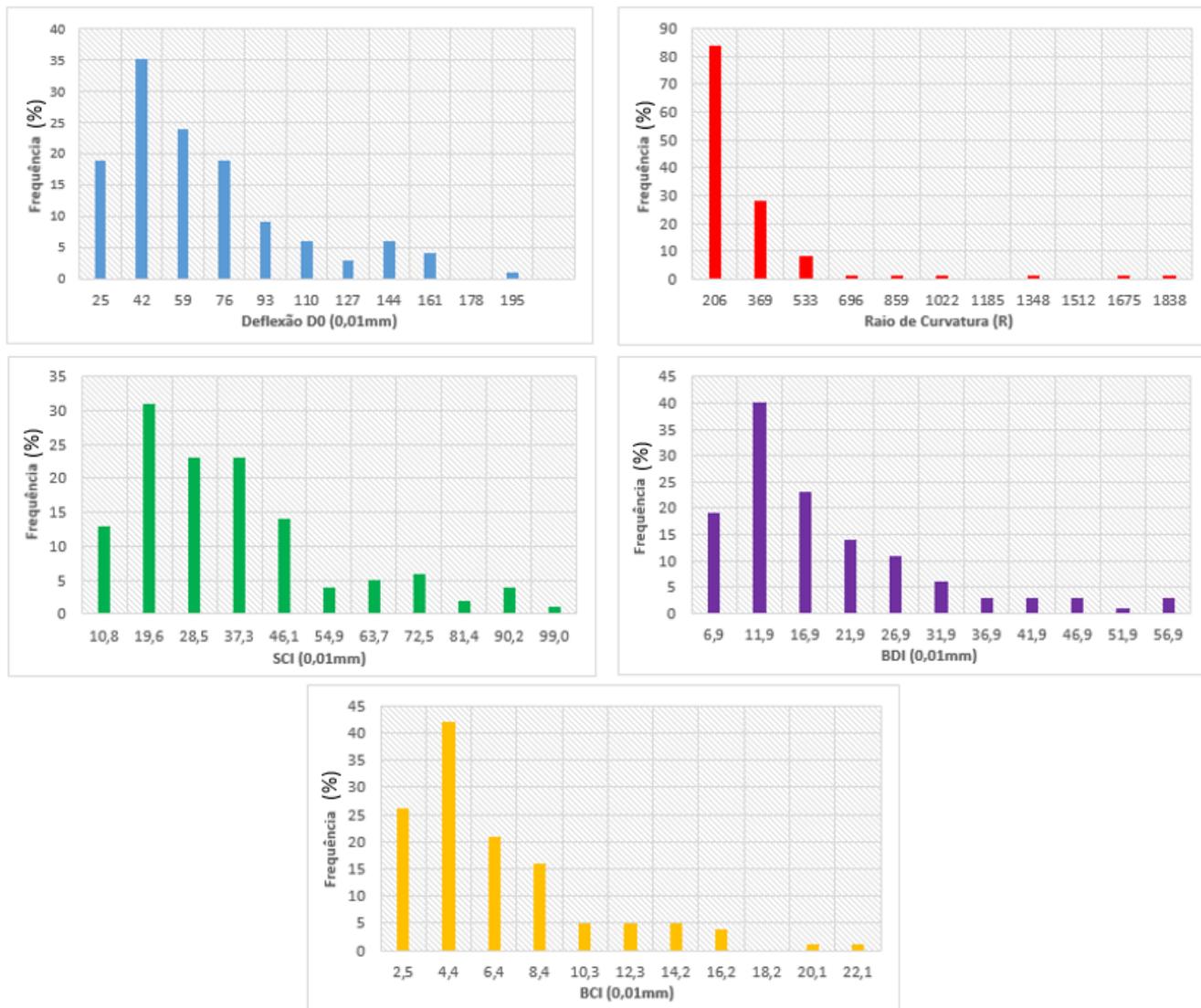


Figura 4 – Histogramas dos parâmetros da bacia (AUTORES, 2023).

A Figura 5 ilustra a dispersão dos parâmetros da bacia ao longo da rodovia em escala de cores. Observa-se que o raio de curvatura corresponde ao critério mais crítico neste trecho, indicando a necessidade de intervenções em um segmento maior.



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br

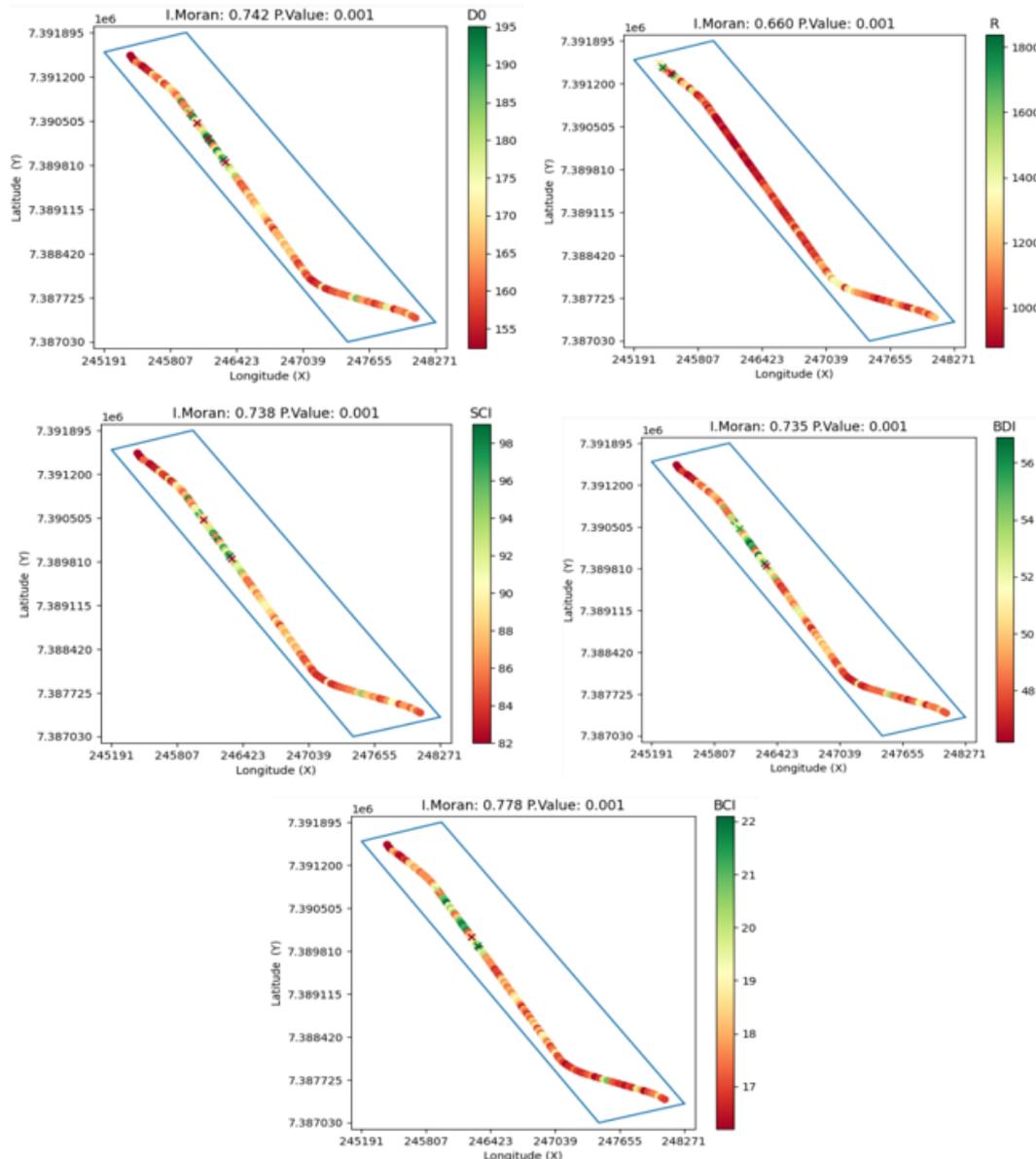


Figura 5 – Dispersão dos parâmetros da bacia deflectométrica (AUTORES, 2023)

Variogramas

Para elaboração dos variogramas, foram estudadas diferentes funções de distribuição de probabilidades, tendo como objetivo maximizar o coeficiente de determinação (R^2). A Figura 6 ilustra os variogramas obtidos, considerando uma função esférica para D_0 , SCI, BDI e BCI e função gaussiana para o R, de modo que os coeficientes de determinação estão situados entre 0,75 (BDI) e 0,93 (SCI). Observa-se que todos os modelos apresentaram uma correlação espacial de mediana para boa, alcançando o patamar em uma amplitude mínima de aproximadamente 1200 metros (BCI) e máxima de 2400 metros (R).



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br

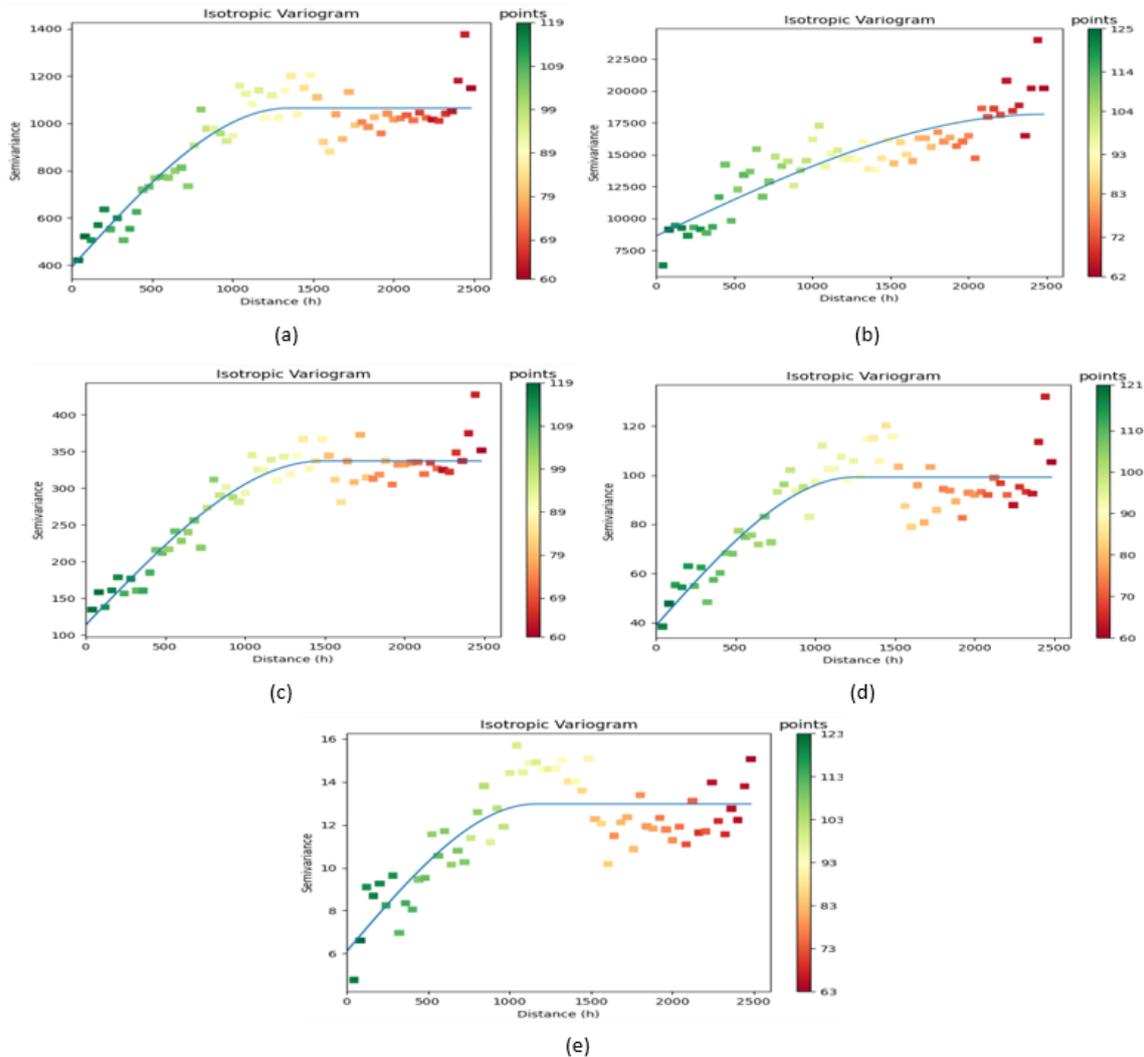


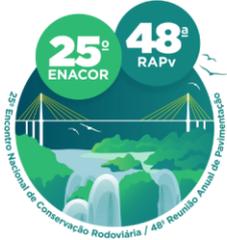
Figura 6 – Variogramas dos parâmetros da bacia: (a) D_0 ; (b) R; (c) SCI; (d) BDI; (e) SCI (AUTORES, 2023)

Krigagem

A krigagem ordinária foi realizada utilizando o *software* QGIS e o *Plugin* SmartMap, com base nos variogramas elaborados para uma distribuição esférica e gaussiana. Desta forma, a Figura 7 ilustra as interpolações para os diferentes parâmetros da bacia deflectométrica. O mapa de cores permite a estimativa do comportamento do pavimento em regiões não amostradas da rodovia em estudo. Observa-se claramente a região mais crítica do pavimento, de modo que são observados os maiores valores de deflexão, BDI, BCI e SCI e os menores valores do raio de curvatura.

Para fins de projeto de restauração de pavimentos, observa-se que a distribuição espacial dos parâmetros da bacia permite definir, para cada índice, as regiões com comportamento semelhante. Desta forma, os segmentos homogêneos podem ser definidos utilizando a krigagem ordinária e as soluções estabelecidas para cada trecho com comportamento semelhante.

O mapa das deflexões máximas indica que o início do trecho, próximo ao km 98 da rodovia, apresenta um pavimento com bom comportamento estrutural, de modo que as deflexões são baixas. Além disso, a deflexão máxima, D_0 , e o SCI apresentam mapas de interpolação semelhantes quanto



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



ao comportamento dos dados. Observa-se um trecho crítico, quanto a estes parâmetros, de cerca de 20% da extensão analisada. Entretanto, em função do raio de curvatura, o comportamento do pavimento é ruim em cerca de 60% do trecho. Ou seja, a análise do pavimento em função apenas das deflexões máximas pode resultar em uma análise equivocada quanto ao comportamento da estrutura.

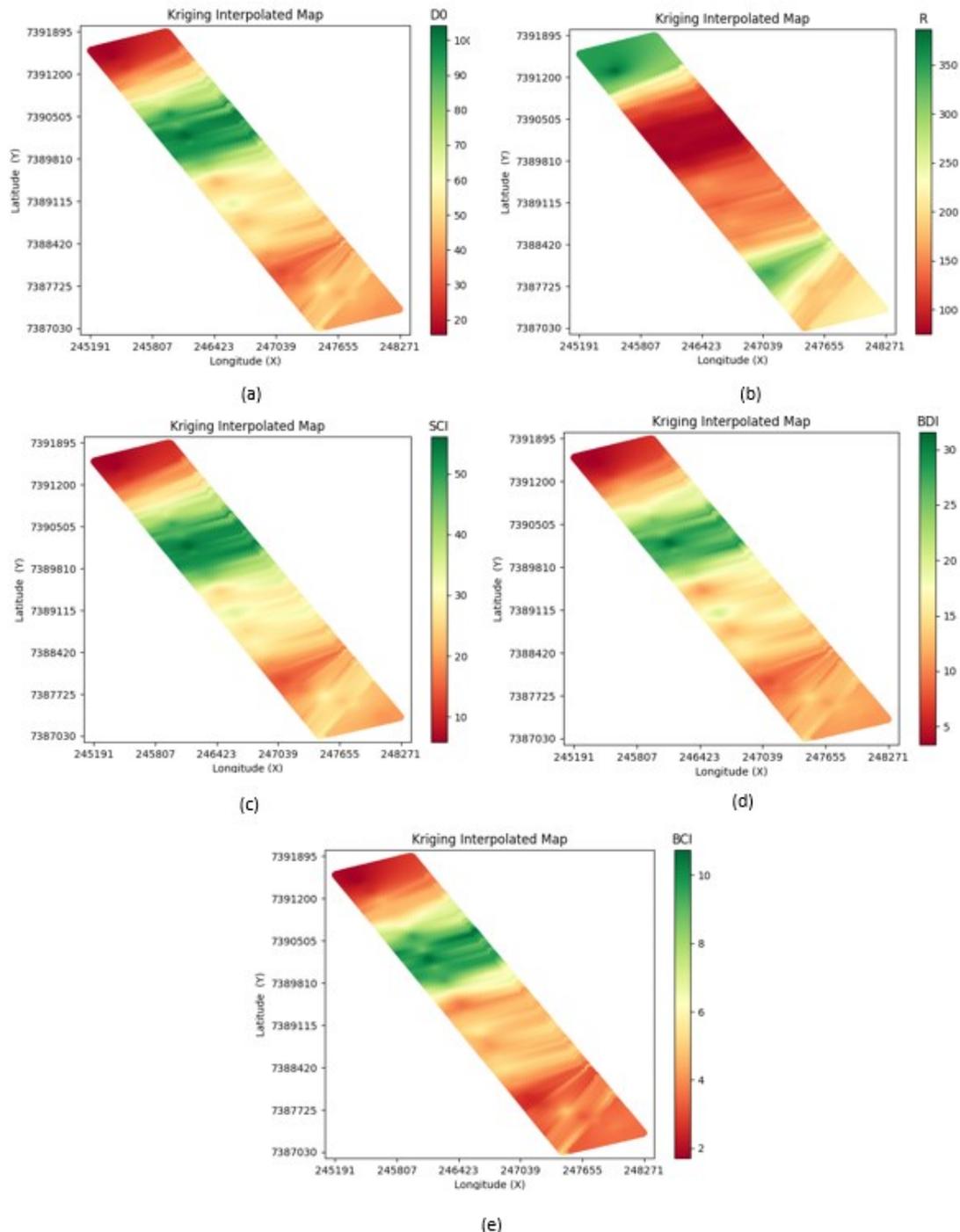
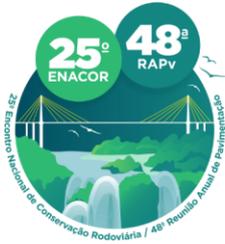


Figura 7 – Krigagem ordinária dos parâmetros da bacia: (a) D0; (b) R; (c) SCI; (d) BDI; (e) BCI (AUTORES, 2023).



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



Observa-se que há uma correlação espacial entre os diferentes parâmetros, indicando um mesmo trecho como mais crítico. Entretanto, os parâmetros BDI e BCI, que estão relacionados com o comportamento da base e do subleito, respectivamente, apresentam valores reduzidos mesmo na região crítica. A análise permite concluir que a base e o subleito desta região permanecem em boas condições, sendo necessária apenas a intervenção no revestimento asfáltico.

Considera-se que a análise espacial dos dados de bacia de deflexões permite o aprimoramento do sistema de gerência de pavimentos. Deste modo, as manutenções podem ser programadas em função da tendência de comportamento dos parâmetros e, não apenas, quando o pavimento apresenta defeitos evidentes.

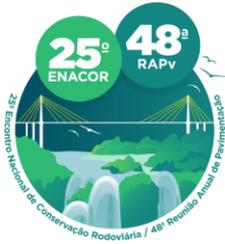
CONCLUSÃO

Este trabalho teve como objetivo uma análise geoestatística da rodovia SP079 em função dos parâmetros da bacia de deflexões. Os parâmetros da bacia de deflexões apresentaram boa correlação espacial, resultando em um coeficiente de determinação mínimo de 0,75, para o BDI, e máximo de 0,93, para o parâmetro SCI. A geoestatística permitiu de forma visual a análise da região mais crítica dentro da extensão analisada, sendo possível estimar o comportamento dos parâmetros mesmo em áreas não levantadas e realizar a separação por segmentos com comportamentos semelhantes. Observou-se que o monitoramento do pavimento em função apenas das deflexões máximas pode resultar em uma análise equivocada quanto ao comportamento da estrutura.

Com base no estudo de caso realizado, conclui-se que a análise de diferentes parâmetros da bacia por meio da geoestatística pode auxiliar na tomada de decisões dentro do sistema de gerência de pavimentos, permitindo a segmentação do trecho para diferentes soluções. Desta forma, há a possibilidade de definir manutenções em função da tendência de comportamento dos dados, resultando em pavimentos que proporcionam melhores condições de rolamento e mais segurança aos usuários.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aavik, A; Talvik, O. Use of falling weight deflectometer (FWD) measurement data for pavement structural evaluation and repair design. Faculty of Environmental Engineering: The 7th International Conference, Lithuania, 2008.
- Albuquerque, F.S. Sistema de gerência de pavimento para departamento de estradas do nordeste brasileiro. Tese de Doutorado: Programa de pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.
- Albuquerque, F.S; Nunez, W.P. Otimização do monitoramento de bacias deflectométricas para gerência de pavimentos pelo uso da geoestatística. Revista Transportes, v.20, n.1, 2012.
- Almeida, A.F.M; Oliveira, F.H.L. Análise da macrotextura de pistas de pouso e decolagem por meio da geoestatística. SITRAER Airport Transportation Symposium, São José dos Campos, 2022a.
- Almeida, A.F.M; Oliveira, F.H.L. Análise do Pavement Condition Index Aeroportuário com uso de estatística espacial. SITRAER Airport Transportation Symposium, São José dos Campos, 2022b.
- Bernucci, L. B.; L. Motta; J. Ceratti e J. Soares. Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros. Editora Abeda, Rio de Janeiro, 2008.
- Departamento Estradas de Rodagem (DER). IP-DE-P00/001 - Projeto de Pavimentação. São Paulo, 2006.



19 a 22 de Setembro de 2023
Foz do Iguaçu - PR

www.rapvenacor.com.br



Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER). Determinação de deflexões utilizando deflectômetro de impacto tipo "Falling Weight Deflectometer (FWD)". Método de Ensaio 273,1996.

Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER). Projeto de restauração de pavimentos flexíveis – TECNAPAV. Procedimento 269, 1994.

Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER). Pavimento – Determinação das deflexões pela viga benkelman. Método de Ensaio 024, 1994.

Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER). Avaliação estrutural dos pavimentos flexíveis. Procedimento 11, 1979.

Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT). Manual de Pavimentação – Publicação IPR-719 – Instituto de pesquisa rodoviária, Rio de Janeiro, RJ, 2006.

Federal Aviation Administration (FAA). AC 150/5320-6G – Airport Pavement Design and Evaluation. Washington: US Department of Transportation, 2021.

Ferri, S. Critérios de aceitação e controle da qualidade da execução de camadas de fundação de pavimentos novos através de métodos deflectométricos. Dissertação de Mestrado: Escola Politécnica da USP, Departamento de Transportes, São Paulo, 2013.

ORAK, E. Benchmarking the structural condition of flexible pavements with deflection bowl parameters. Journal of the South African Inst. of Civil Eng. v50, n.2. p. 2-9. 2008.

KIM, Y. R. Use of Falling Weight Deflectometer Multi-Load Data for Pavement Strength Estimation. No. FHWA/NC/2002-006. Department of Civil Engineering North Carolina State University Raleigh. 2002.

Krige, D.G. A statistical approach to some basic mine valuation problems on the Witwatersrand. Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 52(6): 119-139, 1951.

Leuangthong, O.; Khan, K.D; Deutsch, C.V. Solved Problems in geostatistics. Hoboken, John Wiley & Sons, 2008.

Mantesso-Neto, V; Ribeiro, R.R; Garcia, N.G.M; Del Lama, E.A; Theodorovicz, A. Patrimônio geológico no estado de São Paulo. Boletim paranaense de geociências, volume 70, pg 53-76, 2013.

Matheron, G. The theory of regionalized variables and its applications. Fontainebleau, Les Cahiers du Centre de Morphologie Mathématique de Fontainebleau, 1971.

Olea, R.A. Geostatistical glossary, and multilingual dictionary. New York, Oxford University Press, 177p, 1991.

Ribeiro, A.J.A; Silva, C.A.U; Barroso, S.H.A. Metodologia de baixo custo para mapeamento geotécnico aplicado à pavimentação. Revista Transportes, 2017.

Rossi, M. Mapa Pedológico do Estado de São Paulo: Revisado e Ampliado. São Paulo: Secretaria do Meio Ambiente, Instituto Florestal, 2017.

Wackernagel, H. Multivariate Geostatistics. An Introduction with Applications. xiv 256 pp. Berlin, Heidelberg, New York, Barcelona, Budapest, Hong Kong, London, Milan, Paris, Tokyo: Springer-Verlag, 1995.

Wackernagel, H. Multivariate geostatistics – an introduction with application. Berlin, Springer, 2003.

Yamamoto, J.K; Landim, P.M.B. Geoestatística: Conceitos e aplicações. São Paulo, Oficina de Textos, 215p, 2013.

Yamamoto, J.K. Estatística, análise e interpretação de dados geoespaciais. São Paulo: Gráfica Paulos, 2020.