

MODELAGEM GEOESTATÍSTICA APLICADA À ELABORAÇÃO DE MODELOS GEOLÓGICOS

Geostatistical modelling applied to the elaboration of geological models

Bruno Rodrigues de Oliveira*

Gabriela Branquinho Antônio**

RESUMO – Os estudos geológicos são de extrema importância quando se trata da elaboração de projetos de engenharia civil visto que após a definição da diretriz de uma obra linear, seja um canal ou um túnel, torna-se necessário conhecer as características geológico-geotécnicas, profundidades e categorias dos materiais, no caso de projetos que envolvam escavações. Com o intuito de obter tais informações, são executadas investigações geológico-geotécnicas diretas e/ou indiretas somente ao longo do eixo do empreendimento, devido ao seu elevado custo e tempo de execução, mesmo que as operações de terraplenagem se estendam além do eixo investigado. Diante desse contexto, o presente trabalho propõe realizar uma modelagem geoestatística utilizando a cokrigagem com objetivo de determinar as superfícies de contato entre as diferentes classes de materiais, levando em consideração a classificação de materiais em categorias de escavação. De posse das superfícies, foi possível elaborar um modelo tridimensional, um perfil longitudinal e seções transversais, mostrando a variabilidade das espessuras dos materiais gerados pelo modelo, capazes de orientar planos de investigações futuras e/ou auxiliar na elaboração de projetos.

SYNOPSIS – Geological studies are extremely important when it comes to the development of civil engineering projects, since after defining the guideline of a linear project, either a channel or a tunnel, it becomes necessary to know the geological and geotechnical characteristics, depths and categories of materials, in the case when these projects involve excavations. In order to obtain such information, direct and/or indirect geological and geotechnical investigations are executed only along the axis of the project due to their high cost and time of execution, even if the earthwork operations are extending beyond the axis investigated. In this context, this paper proposes to perform a geostatistical modeling using cokriging in order to determine the contact surfaces between the different classes of materials, taking into account the classification of materials into excavation categories. In possession of the surfaces it was possible to develop a three-dimensional model, a longitudinal profile and cross sections, showing the variability of the thickness of the materials generated by the model, capable of guiding plans for future investigations and / or assist in the development of projects.

PALAVRAS CHAVE – Geoestatística, obras lineares, cokrigagem ordinária.

1 – INTRODUÇÃO

No âmbito da elaboração de projetos de engenharia civil, os estudos geológicos devem receber uma atenção especial visto que são de extrema importância tanto em fases preliminares, auxiliando na definição das alternativas mais viáveis de traçado, quanto na fase de execução da obra, auxiliando na definição de soluções de engenharia mais adequadas para implantação.

* Geólogo graduado pela Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro e Pós graduado em Geoprocessamento e Georreferenciamento. E-mail: brunorodriguesoli@gmail.com

** Geógrafa graduada pela Estácio e mestranda em Recursos Hídricos e Saneamento na Universidade Federal de Alagoas. E-mail: gabrielabranquinho56@gmail.com

Após a definição da diretriz de uma obra linear, seja um canal ou túnel, é necessário ter o conhecimento das características geológico-geotécnicas e das profundidades dos materiais no caso de empreendimentos que envolvam escavações. Com o intuito de obter tais informações, são executadas investigações geológico-geotécnicas diretas e/ou indiretas e através da análise desses dados é possível elaborar um modelo geológico-geotécnico do local do empreendimento.

As investigações supracitadas são realizadas somente ao longo do eixo do empreendimento devido ao seu elevado custo e tempo de execução. Todavia, as operações de terraplenagem se estendem além do eixo investigado, fazendo que resultados obtidos no eixo sejam projetados transversalmente. Mesmo que essa prática seja amplamente utilizada, é possível que as espessuras dos materiais investigados apresentem variações transversalmente.

Diante desse contexto, o presente trabalho propõe analisar a variabilidade espacial dos dados obtidos nas investigações geotécnicas diretas com objetivo de realizar uma modelagem geoestatística. A técnica utilizada no modelo será a cokrigagem ordinária, que utiliza variáveis primárias, usualmente disponíveis em quantidades limitadas, e variáveis secundárias, que são mais fáceis de serem obtidas e que apresentem correlação com a variável primária.

O presente trabalho tem como objetivo determinar as superfícies de contato entre as diferentes classes de materiais, levando em consideração a classificação de materiais em categorias de escavação, definindo assim as espessuras das camadas e um modelo tridimensional. Para isso foram elaborados um perfil longitudinal e seções transversais em uma plataforma GIS para mostrar a variabilidade das espessuras gerados pelo modelo.

2 – ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo tem uma área aproximada de 7,5 ha e está localizada no extremo oeste da Paraíba, no município de São José de Piranhas, próximo à divisa com o município de Cajazeiras (Figura 1). O polígono que limita a área de estudo foi definido com base na área de desapropriação de um empreendimento que será executado no local.

O relevo no local apresenta uma amplitude hipsométrica de 64 metros, com uma declividade de 11% e pertence ao domínio geomorfológico de morros e de serras baixas.

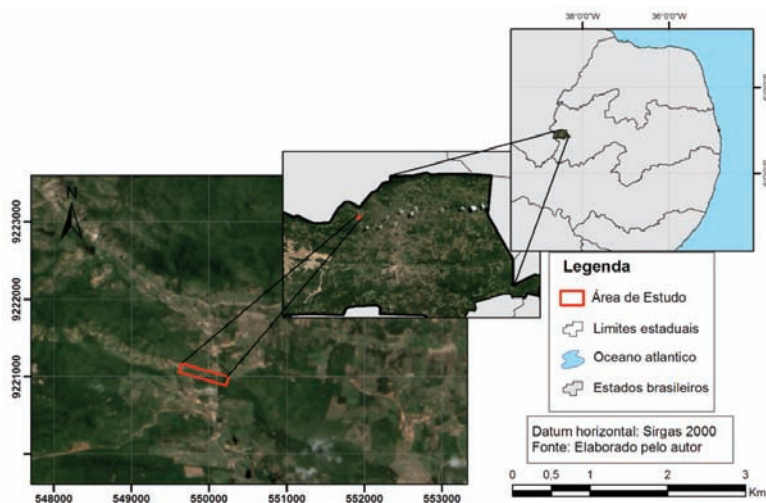


Fig. 1 – Mapa de localização da área de estudo.

Geologicamente está inserida em uma área de terrenos TTG, no domínio de complexos granitóides muito deformados, formado por rochas metamórficas, com intensa anisotropia planar (xistosidade e foliação) e sujeitos a movimento de massa e deslocamento de rocha (CPRM, 2002). Os litotipos predominantes identificados na região foram o quartzito e o gnaiss.

3 – ANÁLISE EXPLORATÓRIA

Como o empreendimento em questão é uma obra linear, as investigações executadas para a caracterização geológico-geotécnica da região e para a categorização dos materiais se encontram dispostas ao longo do eixo. Foram executadas 28 investigações para o estudo da área com um espaçamento médio entre os furos de aproximadamente 25 m e profundidade média de 10,33 m. A distribuição espacial das investigações geológico-geotécnicas pode ser observada na Figura 2.

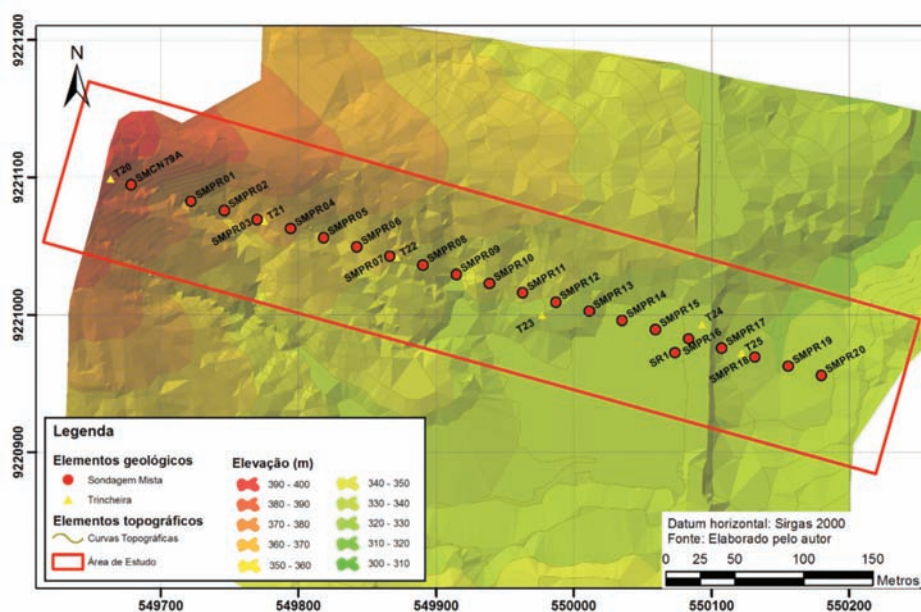


Fig. 2 – Mapa de localização das investigações geológico-geotécnicas.

As variáveis necessárias para a elaboração das superfícies de contato entre as categorias de materiais são divididas em duas classes: primárias e secundárias. As variáveis primárias são as variáveis que se tem interesse em estimar, mas que geralmente estão disponíveis em pequenas quantidades, enquanto as variáveis secundárias são informações em grande quantidade que auxiliam na determinação das variáveis primárias (Yamamoto e Landim, 2013).

No presente trabalho, as variáveis primárias são as cotas da transição entre as classes de materiais obtidas através dos perfis de sondagens, enquanto as cotas altimétricas obtidas no levantamento topográfico serão utilizadas como a variável secundária. As variáveis estão configuradas com heterotopia parcial, ou seja, apenas em alguns pontos foram medidas tanto a variável primária quanto a secundária.

A realização da estatística descritiva das cotas da transição entre as classes de materiais e da cota topográfica revelou que todas as distribuições têm uma cauda direita mais pronunciada (coeficiente de assimetria > 0). Todas as variáveis apresentaram um valor de curtose maior que

zero, o que significa que as distribuições em questão são mais afuniladas e concentradas que a distribuição normal e que a obtenção de valores distantes da média a vários múltiplos do desvio padrão é muito provável. Nenhuma das variáveis supracitadas apresenta uma distribuição normal. O resumo da análise estatística realizada pode ser observado no Quadro 1.

Quadro 1 – Resumo da análise estatística univariada realizada para as variáveis em estudo.

	Cota Topográfica	Cotas da transição entre 1ª e 2ª Categoria	Cotas da transição entre 2ª e 3ª Categoria
Média	348,7	343,64	338,19
Desvio Padrão	14,74	17,24	16,64
Variância	217,43	297,36	311,19
Assimetria	1,08	1,12	1,45
Coeficiente de Variação	4,22	5,01	5,21
Curtose	3,45	1,01	2,27
Mínimo	328	327	320,87
1º Quartil	338	329,13	325,4
Mediana	344	339,1	330,7
3º Quartil	356	356,69	349,37
Máximo	396	391,1	390,4
Número de amostras	5542	28	28

Para ser possível elaborar as superfícies de contato entre as categorias de materiais, através da cokrigagem, é necessário que as variáveis primárias e secundárias se apresentem correlacionadas. O coeficiente de correlação (método de Pearson) calculado entre todas as variáveis é superior a 0,978, permitindo que a técnica geoestatística proposta seja aplicada com um ótimo resultado (Quadro 2).

Quadro 2 – Coeficientes de correlação entre as variáveis (Método de Pearson).

	Cota Topográfica	Cotas da transição entre 1ª e 2ª Categoria
Cota da transição entre 1ª e 2ª Categoria	0,991	–
Cota da transição entre 2ª e 3ª Categoria	0,978	0,980

4 – MODELAGEM E PREDIÇÃO GEOESTATÍSTICA

O termo geoestatística surgiu para enfatizar o estudo estatístico de um fenômeno natural, por sua vez, caracterizado pela distribuição no espaço de uma ou mais variáveis, denominadas “variáveis regionalizadas” (Journel e Huijbregts, 1978).

As variáveis regionalizadas representam um conjunto de dados distribuídos espacialmente, em que percebe-se uma determinada tendência espacial dos dados em estudo (Allessi, 2011). Estas variáveis possuem características aleatórias e estruturadas, ou seja, podem assumir localmente qualquer valor segundo uma função de probabilidade e globalmente possuem uma estruturação que pode ser tratada por uma função espacial. A variação espacial dos dados analisados caracteriza o fenômeno regionalizado que a originou (Journel e Huijbregts, 1978).

Para determinar o modelo de correlação espacial da variável regionalizada é necessário realizar uma análise variográfica. Essa análise consiste na construção de um variograma, também chamado de semivariograma por alguns autores, que é uma função que mostra a dissimilaridade entre pares de pontos a uma determinada distância h (Braga, 2014), ou seja, a função que representa quantitativamente a variação de um fenômeno regionalizado no espaço (Câmara *et al.*, 2002).

Essa análise permite compreender o comportamento espacial da variável regionalizada, identificar o tamanho da zona de influência de uma amostra e verificar a existência ou não de anisotropia geométrica ou zonal. Outros parâmetros observados durante a análise são: o alcance, que determina a distância dentro da qual as amostras apresentam-se correlacionadas espacialmente; o patamar, que a partir deste considera-se que não existe mais dependência espacial entre as amostras; e o efeito pepita, que reflete a variância aleatória comumente atribuído a erros de medição ou a forma de amostragem dos dados. Um modelo de semivariograma e a representação dos seus respectivos parâmetros pode ser observado na Figura 3.

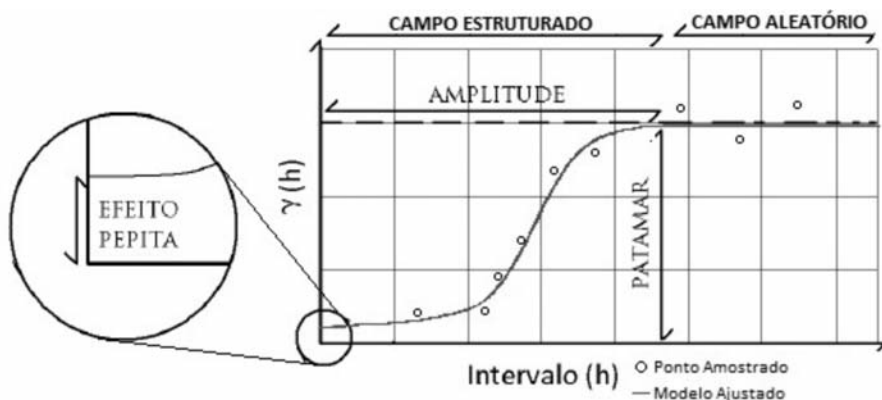


Fig. 3 – Principais parâmetros a serem observados em um semivariograma (adaptado de Correia, 2010).

Posteriormente calcula-se o modelo teórico que melhor se ajusta aos dados amostrados e realiza-se a interpolação. Dentre os modelos disponíveis, Yamamoto e Landim (2013) relatam que os modelos esféricos, exponenciais e gaussianos são capazes de representar a maioria dos fenômenos espaciais. No presente trabalho foi adotado o modelo Matern por englobar todos os comportamentos dos modelos supracitados (Braga, 2014) somente variando o parâmetro de forma ($kappa$).

É importante ressaltar que a distribuição das amostras influencia o cálculo dos variogramas e, por consequência, a estimativa dos pontos não amostrados. Para amostras coletadas de maneiras sistemáticas, é possível definir uma distância h para a modelagem, entretanto para amostras

irregularmente coletadas, seja por limitação econômica ou direcionadas a regiões de interesse, nem sempre isso é possível.

Como solução, considera-se uma direção e se define um intervalo e um ângulo de tolerância entre os pares de amostras (Figura 4). Quando não se tem certeza se o fenômeno sob estudo é isotrópico ou anisotrópico, Landim (2006) sugere que se iniciem as análises nas quatro direções, E-W, N-S, NE-SW e NW-SE, com um ângulo de abertura com tolerância de 45°.

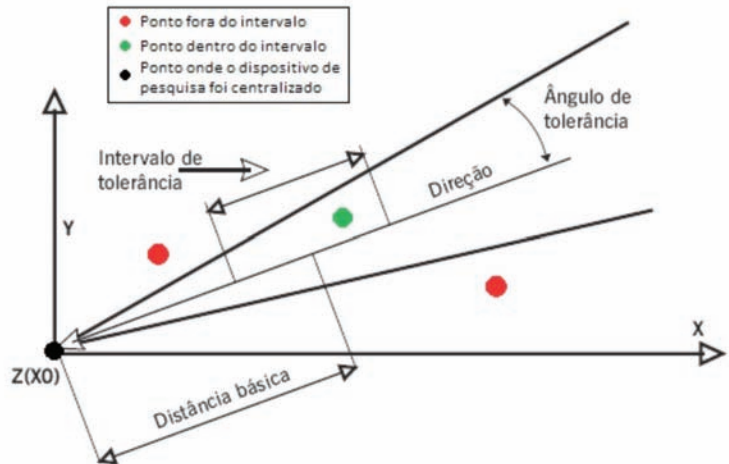


Fig. 4 – Esquema para localização de pontos em distribuições irregulares para cálculo de variogramas experimentais ressaltando amostras consideradas (ponto verde) e desconsideradas (pontos vermelhos) para a amostra em foco (ponto preto) (adaptado de Landim, 2006).

Como a variabilidade espacial dos dados é muito semelhante em todas as direções, foram construídos variogramas cruzados experimentais omnidirecionais (Figura 5) para definição do raio para o modelo isotrópico. A malha de estimação, onde será executada a modelagem, foi definida com os mesmos pontos utilizados como variável secundária. O Quadro 3 apresenta o resumo das variáveis, dos modelos teóricos, parâmetros e do número de pontos da malha de estimação utilizados nos modelos.

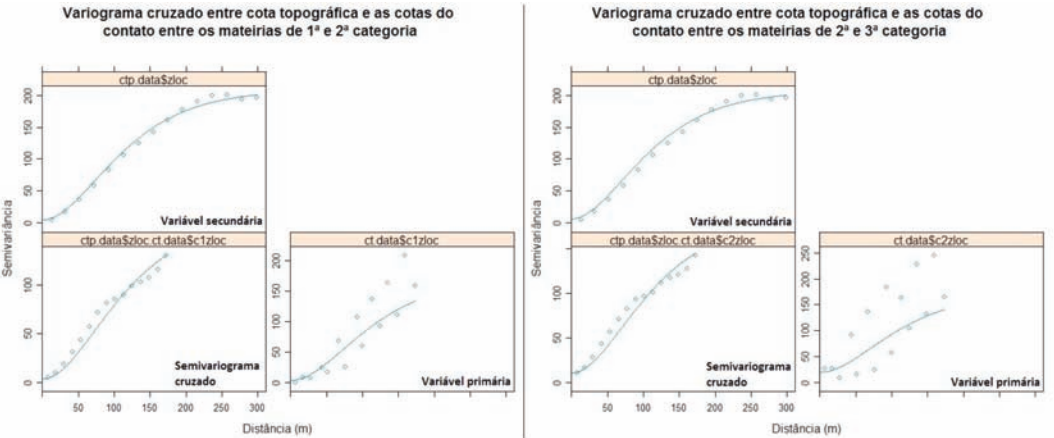


Fig. 5 – Semivariogramas cruzados: (a) entre cota topográfica e as cotas do contato entre os materiais de 1ª e 2ª categoria; (b) entre cota topográfica e as cotas do contato entre os materiais de 2ª e 3ª categoria.

Quadro 3 – Parâmetros utilizados nos modelos geoestatísticos.

Parâmetros	Superfície de contato entre 1ª e 2ª categoria	Superfície de contato entre 2ª e 3ª categoria
Técnica geoestatística	Cokrigagem	Cokrigagem
Variável primária	Cotas do contato entre 1ª e 2ª	Cotas do contato entre 2ª e 3ª
Variável secundária	Cota topográfica	Cota topográfica
Variograma	Omnidirecional	Omnidirecional
Efeito pepita	1,91	1,95
Patamar	217,84	311
Alcance	50	50
Modelo teórico	<i>Matern ($\kappa=2,2$)</i>	<i>Matern ($\kappa=2,1$)</i>
Total de pontos da malha de estimação	5542 pontos	5542 pontos

Para a modelagem das superfícies de contatos entre os materiais foi utilizado o pacote *gstat* no *software R*. O produto do modelo será um conjunto de pontos estimados, referentes às cotas dos contatos entre os materiais, que podem ser importados para plataformas GIS e CAD. A qualidade desses resultados é dependente da qualidade do ajuste dos modelos teóricos aos variogramas experimentais, dos dados utilizados na modelagem e da quantidade e qualidade da informação disponível.

5 – RESULTADOS

As cotas previstas pelo modelo geoestatístico foram importadas para uma plataforma GIS onde foram transformados em superfícies pelo interpolador TIN (*triangulated irregular network*) e inseridos no *ArcScene*. A superfície do terreno natural está representada através de curvas hipsométricas e a superfície de contato entre 1ª e 2ª categoria e 2ª e 3ª categoria com uma variação de tons de vermelho e verde respectivamente.

O modelo gerado para superfície de contato entre 1ª e 2ª categoria estimou valores de cotas acima do terreno natural como pode ser observado nas áreas em vermelho claro na Figura 5, o que poderia ser considerado uma sobrestimação. Entretanto, o mapeamento realizado nessas áreas indicava a presença de blocos e alguns afloramentos, o que caracteriza o material superficial dessas áreas como de segunda categoria, confirmando assim a estimativa apresentada pelo modelo geoestatístico.

Posteriormente foram elaborados um perfil longitudinal e as seções transversais nos locais indicados na Figura 6, para analisar a variação do modelo em subsuperfície. É possível observar uma grande semelhança entre a superfície do terreno natural e as superfícies de contato e isso ocorre devido ao facto da técnica utilizada, a cokrigagem ordinária, utilizar uma variável secundária como base, no caso, a topografia. Todavia, cabe ressaltar que todas as variações nas superfícies estão relacionadas com os valores observados nas investigações geológicas utilizadas na elaboração do modelo.

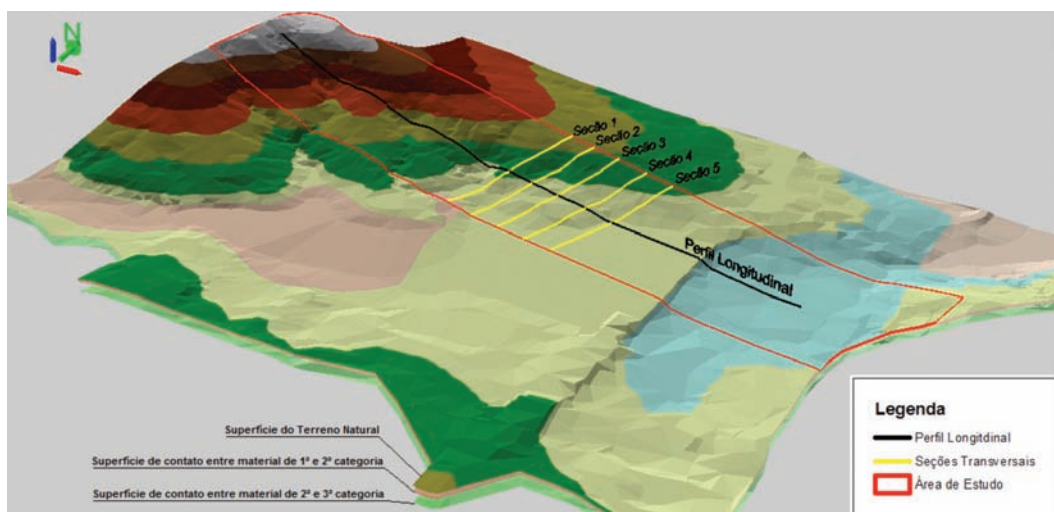


Fig. 6 – Modelo tridimensional das categorias de materiais com a localização do perfil longitudinal e das seções transversais.



Fig. 7 – Material categorizado como segunda categoria na área em vermelho claro a nordeste na Figura 6.

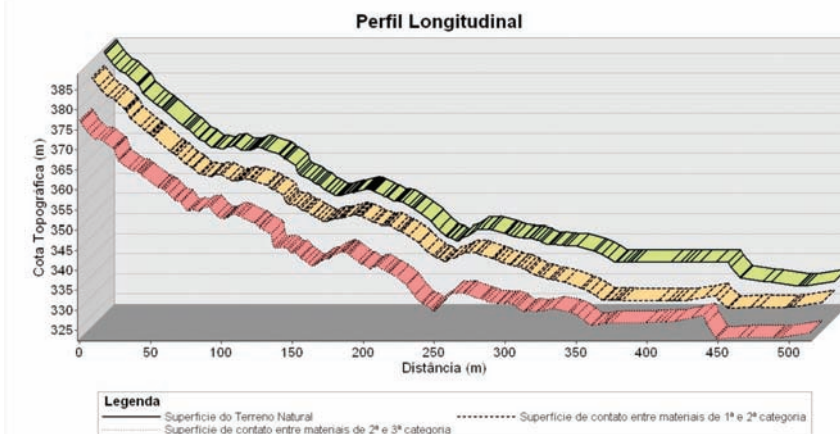


Fig. 8 – Perfil longitudinal ao longo do eixo do empreendimento na área de estudo.

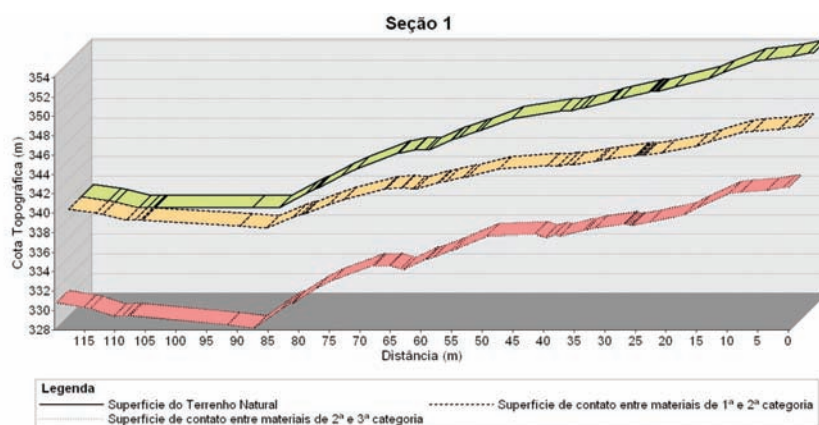


Fig. 9 – Seção 1 transversal ao eixo do empreendimento.

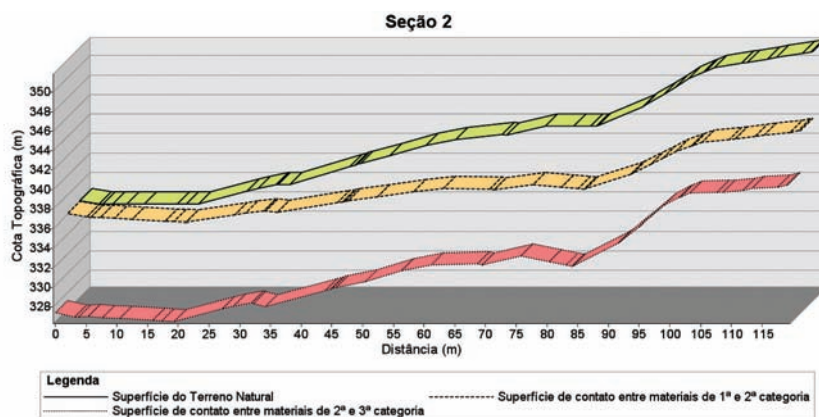


Fig. 10 – Seção 2 transversal ao eixo do empreendimento.

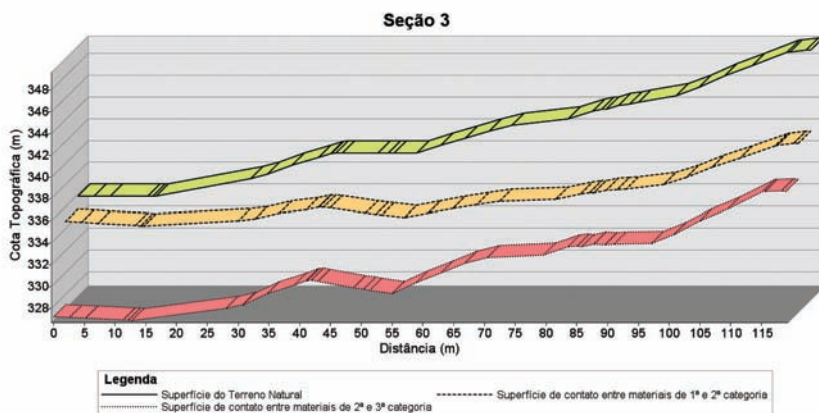


Fig. 11 – Seção 3 transversal ao eixo do empreendimento.

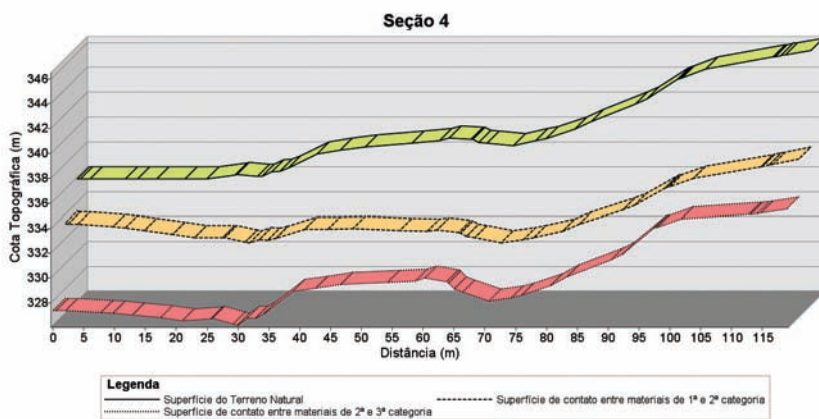


Fig. 12 – Seção 4 transversal ao eixo do empreendimento.

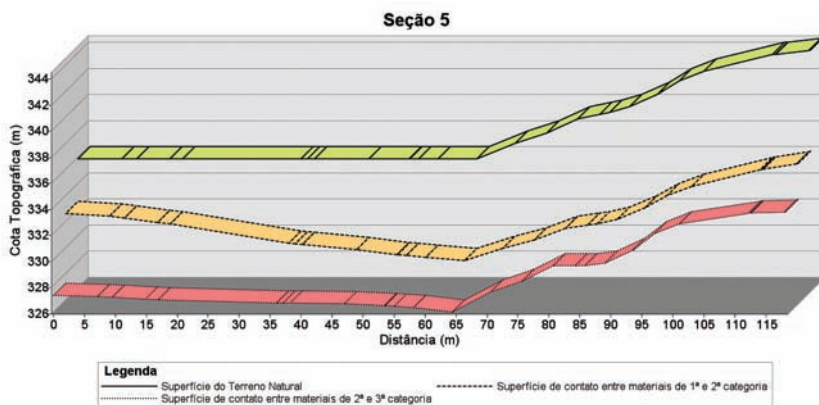


Fig. 13 – Seção 5 transversal ao eixo do empreendimento.

Além da análise dos resultados das modelagens através das seções, foi realizada a validação cruzada, que compara os valores conhecidos com os estimados. A validação realizada omite um valor e prediz este valor utilizando o restante das amostras, e então compara os valores amostrados e preditos.

Os índices estatísticos calculados para averiguar a qualidade do modelo foram o erro médio dos valores residuais (*Mean error* - ME), o erro quadrático médio de predição (*Mean square prediction error* - MSPE), o erro médio quadrático normalizado (*Normalized mean square error* - NMSE), a correlação entre os valores observados e preditos e a correlação entre os valores preditos e os valores residuais. Os valores calculados servem como índices de qualidade do modelo geostatístico (Johnston *et al.*, 2001). O Quadro 4 mostra um resumo estatístico dos resultados calculados.

Quadro 4 – Resultado dos testes de validação cruzada.

Teste estatístico	Resultado esperado	Valor do teste da superfície de contato entre materiais de 1ª e 2ª Categoria	Valor do teste da superfície de contato entre materiais de 2ª e 3ª Categoria
Erro médio (ME)	Idealmente 0	0,0088	0,0133
Erro quadrático médio de predição (MSPE)	Idealmente pequeno	0,2403	0,2443
Erro médio quadrático normalizado (NMSE)	Próximo de 0	0,0561	0,0562
Correlação entre observado e predito	Idealmente 1	0,9994	0,9993
Correlação entre predito e residual	Idealmente 0	0,0351	0,0406

Todos os índices calculados apresentaram valores adequados demonstrando que a predição espacial por cokrigagem ordinária apresenta uma alta precisão.

6 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base nos resultados, é possível afirmar que a aplicação da geoestatística se apresenta eficaz na produção de informação capaz de otimizar o planejamento e/ou complementar estudos geológico-geotécnicos. O *software* utilizado permitiu uma análise de qualidade além de ser capaz de exportar os resultados num formato que pode ser importado para plataformas GIS e CAD para análises posteriores.

De posse das superfícies de contato entre as categorias de materiais, foi elaborado um modelo tridimensional das categorias de escavação capaz de predizer a espessura das camadas em qualquer ponto modelado, fazendo com que as estimativas de volumes de escavação sejam realizadas com maior precisão, especialmente em obras lineares em que as investigações estão dispostas ao longo de um eixo. A vantagem da utilização dessa metodologia é a qualidade e a disponibilidade da variável secundária, as cotas topográficas, visto que projetos de engenharia realizam levantamentos topográficos amplos e precisos.

Dos modelos também ressaltam áreas que apresentam comportamentos diferentes ou que necessitam de maior detalhamento. No caso do presente estudo são representadas pelas áreas em vermelho claro que indicaram material de segunda categoria acima do terreno natural que foi confirmado pelo mapeamento de campo.

Mesmo com informações limitadas, poucas amostras e distribuídas ao longo de um alinhamento, foi possível gerar um modelo tridimensional, mapas e seções auxiliares capazes de orientar planos de investigações futuras e/ou na elaboração de projetos. Por fim, é importante que, à medida que se iniciem as operações de terraplenagem no empreendimento, se realize o mapeamento geológico-geotécnico e que tais informações sejam inseridas no modelo geoestatístico com vista a realizar uma calibração no modelo.

7 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Allessi, C.C. (2010). *Análise estatística e geoestatística da distribuição de CO₂, CH₄ Rn e microbiota em uso campo petrolífero do Recôncavo Baiano (BA)*. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. 218p.
- Braga L.P.V. (2014). *Introdução à geoestatística com programas em R*. Rio de Janeiro: E-papers, 132p.
- Câmara, G.; Carvalho, M.S.; Cruz, O.G.; Correia, V. (2002). *Análise espacial de áreas*. Análise espacial de dados geográficos, Eds. Fuks, S.D.; Carvalho, M.S.; Câmara, G.; Druck, S.; Carvalho, M.S.; Câmara, G.; Monteiro, A.V.N. Divisão de processamento de imagens – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – São José dos Campos. Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/analise/cap5-areas.pdf>>. Acesso em: 29 de fevereiro de 2016.
- Correia, P. (2010). *Modelação e Estimação - Uma introdução à geoestatística*. Apostila do Núcleo de Minas do Instituto Superior Técnico. Universidade de Lisboa.
- CPRM (2002). *Geologia e Recursos Minerais do Estado da Paraíba*. Brasília: CPRM, 142p. Inclui Mapa Geológico e Mapa dos Recursos Minerais do Estado da Paraíba. Disponível em: <http://www.cprm.gov.br/publique/media/geodiversidade_paraiba.pdf>. Acesso Dezembro de 2015.
- Johnston, K.; Hoef, J.M.V.; Krivoruchko, K.; Lucas, N. (2001). *Using ArcGIS Geostatistical Analyst*. Redlands: ESRI Press.
- Journel, A.G.; Huijbregts, Ch.J. (1978). *Mining geostatistics*. Academic Press, 600p.
- Landim, P.M.B. (2006). *Sobre Geoestatística e mapas*. Terra e Didática, 2(1): 19-33. Disponível em: <<http://ocs.ige.unicamp.br/ojs/terraedidatica/article/viewFile/1008/442>>. Acesso agosto de 2015.
- Yamamoto J.K.; Landim, P.M.B. (2013). *Geoestatística: conceitos e aplicações*. São Paulo, Oficina de Textos. 215p.