

DETERMINAÇÃO IMPLÍCITA DA ESPESSURA DE CAMADAS DE CARVÃO COM FUNÇÕES DISTÂNCIA ASSINALADAS

Roberto ROLO¹; Ricardo RADTKE²; Marcelo BATELOCHI³; João Felipe Coimbra Leite COSTA⁴

¹Universidade Federal do Rio Grande do Sul, robertorolo@gmail.com; ²Universidade Federal do Rio Grande do Sul, ricardo.radtke10@gmail.com; ³Universidade Federal do Rio Grande do Sul, mbateloichi90@gmail.com; ⁴Universidade Federal do Rio Grande do Sul, jfelipe@ufrgs.br

RESUMO

Na mineração de carvão, a espessura da camada mineralizada é um parâmetro importante influenciando na quantidade de recursos minerais, método de lavra, definição de equipamentos, dimensionamento de pilares, entre outras. A modelagem geológica implícita com funções distância assinaladas possibilita a determinação semiautomática da espessura das camadas em um grid interpolado, usando as funções distância que medem a distância, identificada pelo sinal positivo ou negativo, até a interface carvão-não carvão mais próxima. As distâncias serão negativas para locais pertencentes à camada de carvão, positivas para não carvão e zero na interface. As distâncias calculadas a partir dos dados de sondagem são interpoladas por krigagem ordinária para os locais não amostrados normalmente em forma de grid regular. A técnica permite localizar as interfaces com um bom grau de precisão. Um estudo de caso em um banco de dados tridimensional sintético foi conduzido demonstrando a funcionalidade da metodologia.

Palavras-chave: Espessura da camada, modelagem implícita, funções distância assinaladas

ABSTRACT

In coal mining, the seam thickness is an important parameter influencing the mineral resources estimation, mining method, equipment selection, pillars design, among others. Implicit geological modelling with signed distance functions allows a semi-automatic determination of the seam thickness using distance functions that measure the distance, identified by the positive or negative sign, to the nearest coal-non-coal interface. Negative distances are used to points belonging to the mineralized seam, positive to points that at non coal seams, and zero at the interface. The distances calculated from the surveyed data are interpolated by ordinary kriging at a regular grid. The technique allows mapping the coal/non coal interfaces with a good degree of precision. A case study in tridimensional synthetic dataset demonstrates the methodology functionality.

Key-Words: Coal seam thickness, implicit modeling, signed distances function

1 INTRODUÇÃO

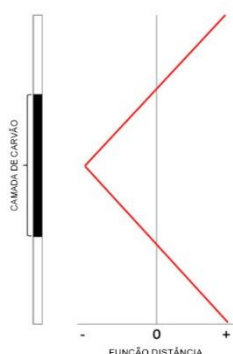
As toneladas *in situ* de carvão são calculadas pelo produto da espessura da camada, área e peso específico. Sendo assim, a determinação correta da espessura da camada é fundamental. Além disso, a espessura da camada mineralizada influencia a determinação do método de lavra, definição de equipamentos, dimensionamento de pilares, entre outras. A espessura pode ser determinada a partir da superfície, através da medição direta de afloramentos, por métodos geofísicos e a partir de furos de sondagem.

Savchenko (1995) propôs modelar objetos tridimensionais através da interpolação de uma função implícita. O assunto foi introduzido no campo da geologia por Cowan et al. (2002).

McLennan (2007) propôs a modelagem implícita de sólidos geológicos, a partir dos dados provenientes de sondagem, usando funções distância assinaladas, que são um subconjunto das funções implícitas. A função distância assinalada representa a distância entre um ponto e a interface mais próxima que separa domínios diferentes. É positiva para pontos externos ao domínio, negativa para pontos internos ao domínio e vale zero na interface entre domínios.

Exemplificando: a Figura 1 mostra, à esquerda, um furo de sondagem interceptando uma camada de carvão e o valor da função distância assinalada para pontos ao longo do furo à direita. O valor da função decresce à medida que um ponto ao longo do furo se aproxima da camada, e seu valor é a menor distância desse ponto até um ponto pertencente à interface carvão/não carvão. Vale zero na interface, e passa a ser negativo para pontos no interior da camada, atingindo o menor valor no centro, parte mais interna da camada de carvão.

Figura 1 – Furo de sondagem interceptando camada de carvão à direita, e valor da função distância assinalada à esquerda.



O exemplo da figura 1 é simplório, não aplicável à bancos de dados reais na mineração. Embora a ideia central seja a mesma, algumas adaptações devem ser feitas.

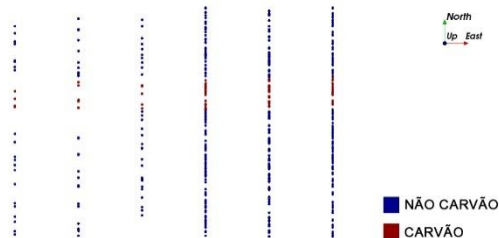
2 MODELAGEM GEOLÓGICA IMPLÍCITA COM FUNÇÕES DISTÂNCIA ASSINALADAS

O método é baseado na construção, interpolação e delimitação de uma isosuperfície de uma função implícita, a função distância assinalada.

Primeiramente, o conjunto de dados de sondagem $z(u_\alpha), \alpha = 1, \dots, n$ é codificado em indicadores de acordo com a Eq. 01. Um exemplo didático em duas dimensões é apresentado, no qual uma seção vertical sintética apresenta seis furos verticais igualmente espaçados. O resultado da codificação das amostras em indicadores é mostrado na Figura 2.

$$i(u_\alpha) = \begin{cases} 1, & \text{se } z(u_\alpha) \text{ é carvão} \\ 0, & \text{se } z(u_\alpha) \text{ não é carvão} \end{cases} \quad [\text{Eq. 01}]$$

Figura 2 – Amostras de sondagem em uma seção vertical codificadas em indicadores.



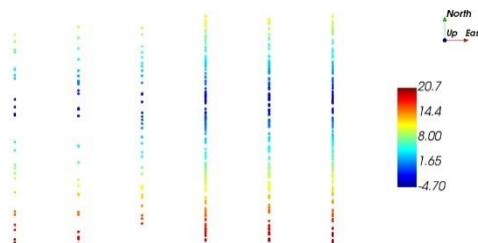
Então, o valor da função distância assinalada é calculado para cada amostra de acordo com a Eq. 02. Se a amostra foi codificada anteriormente com o indicador 1, recebe uma distância negativa, caso contrário, uma distância positiva.

$$d(u_\alpha) = \begin{cases} -\|u_\alpha - u_\beta\|, & \text{se } i(u_\alpha) = 1 \\ +\|u_\alpha - u_\beta\|, & \text{se } i(u_\alpha) = 0 \end{cases} \quad [\text{Eq. 02}]$$

u_β corresponde à amostra mais próxima que pertence à um domínio diferente de u_α .

A figura 3 mostra as distâncias calculadas para cada amostra do exemplo proposto.

Figura 3 – Distâncias assinaladas calculadas para cada ponto amostral e seu



As distâncias calculadas podem ser anisotrópicas, se o corpo mineral se estende mais em uma direção do que nas demais. Nesse caso, as coordenadas originais (x, y, z) dos dados devem ser transformadas por matrizes de rotação e dilatação/compressão, e então, as distâncias euclidianas calculadas normalmente para as novas coordenadas.

As distâncias calculadas devem ser variografadas. Os variogramas experimentais das distâncias assinaladas são extremamente contínuos e não apresentam efeito pepita algum. Além disso, apresentam um comportamento não estacionário, isto é, a variância aumenta à medida que o vetor $\vec{h}$ de separação entre as amostras também aumenta.

O alcance dos variogramas, juntamente com a anisotropia, controlam a forma, extensão e volume

dos sólidos modelados. Aumentando o alcance, o corpo geológico ganha volume segundo a direção de maior continuidade.

O comportamento não estacionário dos variogramas pode tornar a inferência do alcance arbitrária. Uma alternativa é limitar a variância dos variogramas de acordo com a variância *a priori* da distância assinalada. Ou então, a partir dos dados, e/ou conhecimento adicional a respeito da geologia, inferir arbitrariamente a anisotropia e alcances dos variogramas das distâncias assinaladas.

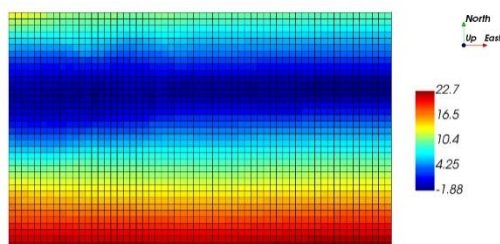
Embora os variogramas experimentais das distâncias assinaladas não apresentem efeito pepita, este pode ser adicionado arbitrariamente pelo usuário para controlar a interconexão dos sólidos modelados. Quanto maior a contribuição do efeito pepita em relação a variância total, mais desconexo o sólido. As distâncias, calculadas e variografadas, devem então ser interpoladas para todos os nós de um *grid*.

Para que não surjam artefatos nos mapas gerados, Deutsch e Wilde (2013) recomendam o uso da krigagem global (krigagem ordinária retendo todas as amostras em cada estimativa), um interpolador suave. Porém, em bancos de dados muito grandes, reter todas as amostras em todas as estimativas pode tornar o tempo de execução do algoritmo muito longo. Assim, Silva (2015) sugere a aplicação da krigagem ordinária (Eq. 03) com número de dados condicionantes e raio de busca suficientemente grandes para aproximar a solução, evitando o uso de todas as amostras do banco de dados.

$$d^*(u) = \sum_{\alpha=1}^n \lambda_{\alpha}^{OK}(u) d(u_{\alpha}) \quad [\text{Eq. 03}]$$

A Figura 4 mostra as distâncias interpoladas para todos os nós do *grid*.

Figura 4 – Distâncias assinaladas interpoladas para todos os nós do *grid* por krigagem ordinária.



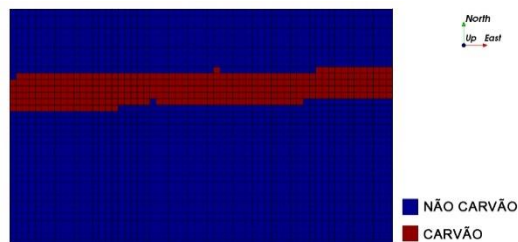
Por fim, os blocos são classificados de acordo a Eq. 04. Blocos atribuídos com distâncias negativas pertencem à camada de carvão, enquanto blocos

atribuídos com distâncias positivas, não pertencem à camada.

$$i^*(u) = \begin{cases} 1, & \text{se } d^*(u) \leq 0 \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad [\text{Eq. 04}]$$

A figura 5 mostra os blocos classificados em carvão ou não carvão.

Figura 5 – Blocos estimados, definindo a espessura e posição da camada.



Dessa forma, a localização espacial e dimensões das camadas de carvão podem ser determinadas implicitamente de forma semiautomática e rápida.

2.1 MODELANDO MÚLTIPLAS CAMADAS SIMULTANEAMENTE

Silva (2015) propôs uma metodologia para modelar múltiplas camadas simultaneamente. Suponha que existem K diferentes camadas a serem modeladas no depósito mineral. Para todos os pontos amostrais $z(u_{\alpha}), \alpha = 1, \dots, n$ um vetor de K elementos é codificado de acordo com a Equação 5. Para todos os possíveis K .

$$i_k(u_{\alpha}) = \begin{cases} 1, & \text{se } z(u_{\alpha}) = k \\ 0, & \text{se } z(u_{\alpha}) \text{ caso contrário} \end{cases} \quad [\text{Eq. 05}]$$

Então, da mesma maneira que quando apenas uma camada era modelada, o valor da função distância assinalada é calculado para cada amostra e para cada um dos K elementos do vetor criados pela Equação 5.

As K propriedades funções distâncias criadas dessa forma são variografadas e interpoladas, gerando K novas propriedades distância interpolada.

Os blocos são então classificados de acordo com a menor distância interpolada em cada bloco, de acordo com a equação 6.

$$i^*(u) = k' \text{ sendo que } d_{k'}^* = \min \{d_k^*(u)\}_{k=1}^K \quad [\text{Eq. 06}]$$

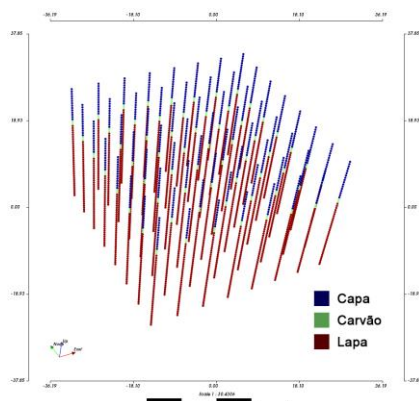
A distância estimada em cada bloco fornece uma medida de proximidade ao domínio oposto mais próximo, para cada uma das K camadas.

3 ESTUDO DE CASO

A metodologia apresentada foi aplicada a um banco de dados tridimensional sintético e os resultados são apresentados e discutidos.

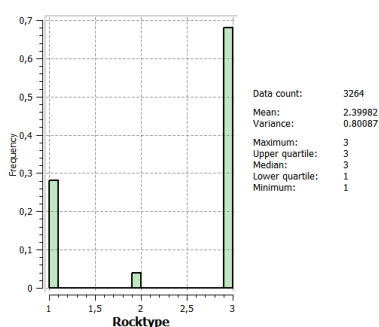
Existem 3264 amostras numa malha amostral regular, conforme visto na Figura 6, abrangendo 3 diferentes categorias: capa (1), lapa (3) e uma camada de carvão (2).

Figura 6 – Dados amostrais em perspectiva.



A figura 7 mostra o histograma dos dados amostrais evidenciando as proporções de cada litologia.

Figura 7 – Histograma dos dados.

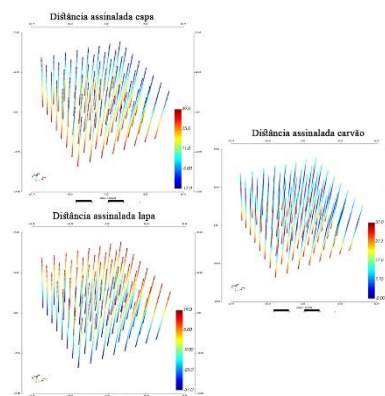


3.1 MODELAGEM GEOLÓGICA

Para cada amostra, e cada litologia (capa, lapa e carvão) o valor da função distância assinalada foi calculado. Nessa aplicação, o caso isotrópico foi escolhido.

A Figura 8 ilustra as distâncias calculadas para cada litologia e cada ponto amostral.

Figura 8 – Distâncias assinaladas calculadas para cada ponto amostral e cada litologia.



As distâncias calculadas devem então ser interpoladas para todos os nós de um grid criado (Tabela 1). Os variogramas das distâncias foram modelados a partir um modelo gaussiano e efeito pepita zero, não há rotação alguma nas direções principais e os parâmetros de alcance podem ser observados na Tabela 2.

Tabela 1 – Parâmetros dos variogramas das distâncias assinaladas.

Capa		
Range max (m)	Range med (m)	Range min (m)
∞	∞	15
Carvão		
Range max (m)	Range med (m)	Range min (m)
∞	∞	2
Lapa		
Range max (m)	Range med (m)	Range min (m)
∞	∞	30

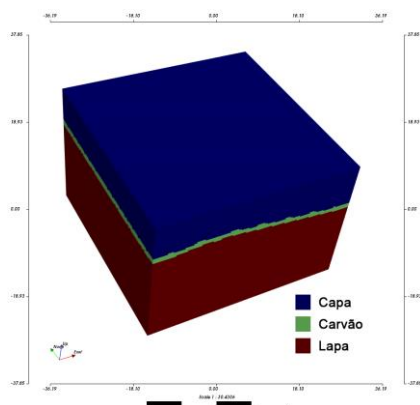
As dimensões do *grid* controlam a resolução do modelo, e consequentemente, o tempo de execução do algoritmo e podem ser observadas na Tabela 2.

Tabela 2 - Dimensões do *grid* de interpolação.

Número de células		
X (m)	Y (m)	Z (m)
75	75	100
Dimensões da célula		
X (m)	Y (m)	Z (m)
1	1	0.5
Origem		
X (m)	Y (m)	Z (m)
-2	-2	200

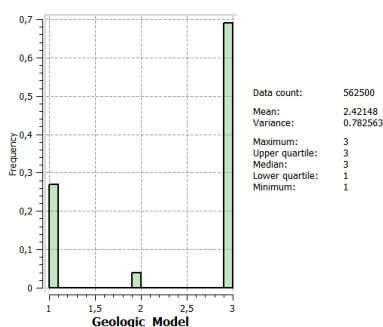
A Figura 9 mostra o modelo gerado.

Figura 9 – Modelo gerado.



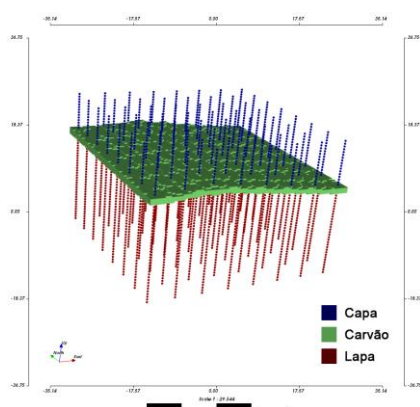
A figura 10 exibe o histograma do modelo geológico criado implicitamente.

Figura 10 – Histograma do modelo.



A figura 11, mostra apenas a camada de carvão modelada juntamente com os dados amostrais.

Figura 11 – Camada de carvão juntamente com dados amostrais.

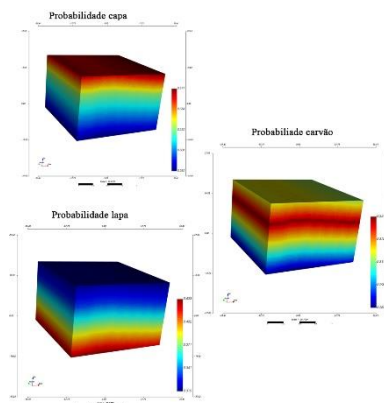


A camada pôde ser modelada com alto grau de precisão e de forma rápida. Quanto maior a densidade amostral mais o modelo implícito se aproxima da realidade.

As distâncias interpoladas ainda fornecem uma medida heurística de incerteza associada a cada bloco, quanto menor a distância interpolada para um

bloco, maior a probabilidade daquele bloco pertencer a uma determinada litologia. A Figura 12 mostra as probabilidades calculadas para cada uma das litologias modeladas.

Figura 12 – Probabilidades calculadas a partir das distâncias para cada uma das litologias modeladas.



4 CONCLUSÃO

O método é rápido e de simples implementação. Apesar de não substituir completamente um geomodelador experiente se mostrou de grande ajuda, principalmente, em fases iniciais da pesquisa mineral auxiliando numa rápida cubagem das reservas.

5 REFERÊNCIAS

- COWAN, E. et al. Rapid geological modelling. Applied Structural Geology for Mineral Exploration and Mining, International Symposium, 2002
- DEUTSCH, C. V.; WILDE, B. J. Modeling multiple coal seams using signed distance functions and global kriging. International Journal of Coal Geology, n. 112, p. 87-93, 2013.
- MCLENNAN, J. A. The decision of stationarity. Tese (Doutorado) - University of Alberta, 2007.
- SAVCHENKO, V. V. et al. Function representation of solids reconstructed from scattered surface points and contours. In: WILEY ONLINE LIBRARY. Computer Graphics Forum. [S.l.], 1995. v. 14, n. 4, p. 181–188.
- SILVA, D. M. A. Enhanced geologic modeling with data-driven training images for improved resources and recoverable reserves. Tese (Doutorado) - University of Alberta, 2015.