

ESTIMATIVA DOS VALORES DE N_{SPT} VIA KRIGAGEM ORDINÁRIA PARA PERFIL INTEMPÉRICO EM FILITO DOLOMÍTICO, FORMAÇÃO FECHO DO FUNIL, QUADRILÁTERO FERRÍFERO

Silas Salgado¹; Marcos Rogério do Nascimento Júnior²; Ledson Sathler³

Resumo – A estimativa de valores de N_{SPT} ainda é pouco difundida na literatura e está intrinsecamente vinculada ao desenvolvimento de modelos geológico-geotécnicos tridimensionais. Ambos os modelamentos são apresentados neste documento para um perfil intempérico desenvolvido no litotipo filito dolomítico da Formação Fecho do Funil (Quadrilátero Ferrífero - Minas Gerais). A estimativa dos valores de N_{SPT} via krigagem ordinária culminou na obtenção de valores representativos para o saprólito e solo residual de filito dolomítico, contudo, uma baixa eficiência da krigagem foi obtida para o solo residual de filito dolomítico mole. Tal fato deve-se a esta unidade abranger duas populações distintas de valores de N_{SPT} . O modelo de estimativa confeccionado foi posteriormente carimbado em um modelo de blocos que, por sua vez, pode dar suporte a análises de estabilidade e serem utilizados como ferramenta no planejamento de campanhas de investigações geológico-geotécnicas, uma vez que indicam zonas com maior carência de informação.

Abstract – The estimation of N_{SPT} values is still not widespread in the literature and is intrinsically linked to the development of three-dimensional geological-geotechnical models. Both models are presented in this document for a weathered profile developed in the dolomitic phyllite (Fecho do Funil Formation/ Quadrilátero Ferrífero – Minas Gerais). The process of estimating N_{SPT} values via ordinary kriging culminated in obtaining relatively representative calculated values for saprolite and dolomitic phyllite residual soil, however, a low kriging efficiency was obtained for the soft residual soil of dolomitic phyllite. This fact is attributed to the presence of two N_{SPT} population along the soft soil. The estimated block model can support stability analysis and be used as a tool in the design of geological-geotechnical investigation campaigns, since they indicate areas with greater lack of information.

Palavras-Chave – Modelo Numérico; geotecnia; parâmetros.

¹ Geól., Ph.D, DF+ Eng. Geotéc. Rec. Hídricos, (31) 2519-1001, ssalgado@dfmais.eng.br

² Geól., Esp., DF+ Eng. Geotéc. Rec. Hídricos, (31) 2519-1001, mnascimento@dfmais.eng.br

³ Geól., Esp., DF+ Eng. Geotéc. Rec. Hídricos, (31) 2519-1001, lsathler@dfmais.eng.br

1. INTRODUÇÃO

As sondagens percussivas são amplamente empregadas no Brasil onde o uso do índice de resistência à penetração (N_{SPT}) é potencializado pelo expressivo perfil intempérico observado em boa parte do país. Contudo, como qualquer outro tipo de sondagem, as sondagens percussivas fornecem informações pontuais, sendo a área compreendida entre perfurações objeto de inferências e interpretações. Neste trabalho, é apresentada uma sistemática de estimativa de valores de N_{SPT} via análise variográfica e emprego da krigagem ordinária. A análise numérica é suportada por um modelo geológico-geotécnico 3D, sendo ambos realizados com o auxílio do software *Leapfrog*. As estimativas foram realizadas para um conjunto de dados de N_{SPT} obtidos em sondagens percussivas executadas em saprólito e solo residual de filito dolomítico da Formação Fecho do Funil (Grupo Piracicaba/ Supergrupo Minas).

2. CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA-GEOTÉCNICA DA ÁREA DE ESTUDO

Em um contexto geológico regional, a área de estudo posiciona-se no flanco leste da macro-estrutura Sinclinal Moeda (Quadrilátero Ferrífero), especificamente, sobre o litotipo de filito dolomítico da Formação Fecho do Funil (Grupo Piracicaba/Supergrupo Minas). Geograficamente, a área de trabalho localiza-se próximo aos municípios de Itabirito-MG e Nova Lima-MG.

O sítio de trabalho consiste em uma encosta convexa e suave onde o litotipo filito dolomítico prolonga-se segundo a direção NE-SW e registra uma foliação metamórfica paralela ao acamamento sedimentar e definida pela atitude geral $300^\circ/40^\circ$ (*dip direction/dip*). Lateralmente, à oeste, o filito dolomítico é truncado por um plano de falha normal também de orientação NE-SW onde se depositaram sedimentos siltsos atribuídos à unidade depósito cenozoico. A leste, o filito dolomítico estabelece contato verticalizado com um filito prateado também vinculado à Formação Fecho do Funil.

3. MODELAMENTO NUMÉRICO

3.1. Input – Parâmetros de Entrada

O desenvolvimento do modelo numérico contou com os seguintes parâmetros de entrada:

- i) Superfície topográfica com resolução de 0,25 cm levantada em campo para toda a área modelada com o suporte de uma estação total;
- ii) Levantamento geológico-geotécnico de campo, com a caracterização das principais unidades aflorantes e a coleta de dados estruturais empregados diretamente no modelo;
- iii) Descrição, análise e validação de 41 sondagens realizadas dentro dos limites do modelamento. Destaca-se que a malha de sondagem apresenta uma distribuição irregular;
- iv) Estruturação dos dados litológicos e dos ensaios N_{SPT} de forma que os mesmos pudessem ser inseridos em ambiente 3D (*Leapfrog*). Neste momento foram elaboradas as planilhas: *Collar*, que contempla as coordenadas e elevação de execução das sondagens; *Lithology*, que contempla os litotipos presentes ao longo dos furos; *Survey*, referente a orientação e profundidade dos furos de sondagem; e N_{SPT} que apresenta os valores dos ensaios de percussão para cada metro ensaiado.

3.2. Modelo Geológico-Geotécnico 3D

O modelo geológico-geotécnico 3D confeccionado para a área de estudo segmenta o perfil intempérico dos materiais siltosos provenientes da decomposição do filito dolomítico em três unidades: saprólito de filito dolomítico (Fig. 1A), solo residual de filito dolomítico (Fig. 1B) e solo residual de filito dolomítico mole (Fig. 1C; Fig. 2). Estas unidades foram individualizadas com base em suas características tátil-visuais e nas faixas de consistência para solos siltosos e argilosos conforme a norma NBR 6484/2020 (Tabela 1). Uma breve descrição de cada uma destas unidades segue apresentada adiante e, desde já, salienta-se que estes litotipos irão constituir as envoltórias empregadas posteriormente na estimativa numérica.

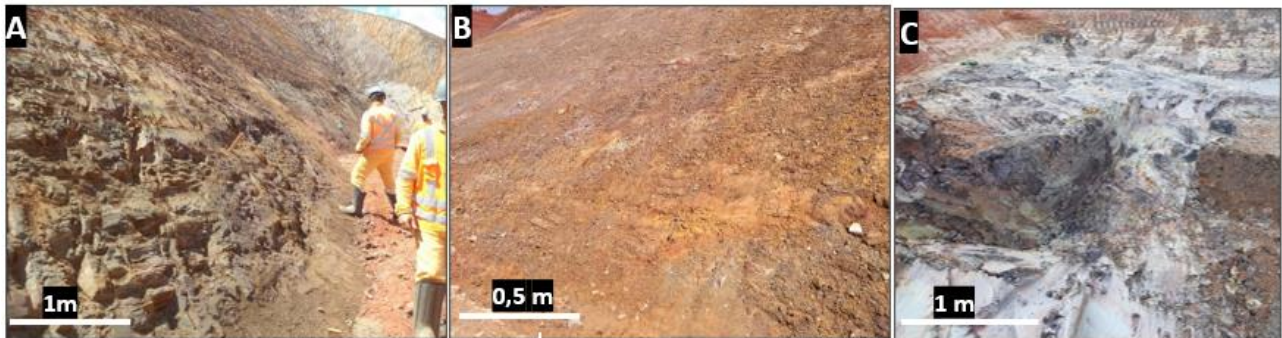


Figura 1. A) Saprólito de filito dolomítico; B) solo residual de filito dolomítico e; C) solo residual de filito dolomítico mole.

Tabela 1. Estado de consistência dos materiais conforme à norma NBR6484/2020.

Solo	Índice de resistência a penetração (N_{SPT})	Designação
Argilas e Siltes argilosos	≤ 2	Muito mole
	3 a 5	Mole
	6 a 10	Média
	11 a 19	Rija
	20 a 30	Muito rija
	>30	Dura

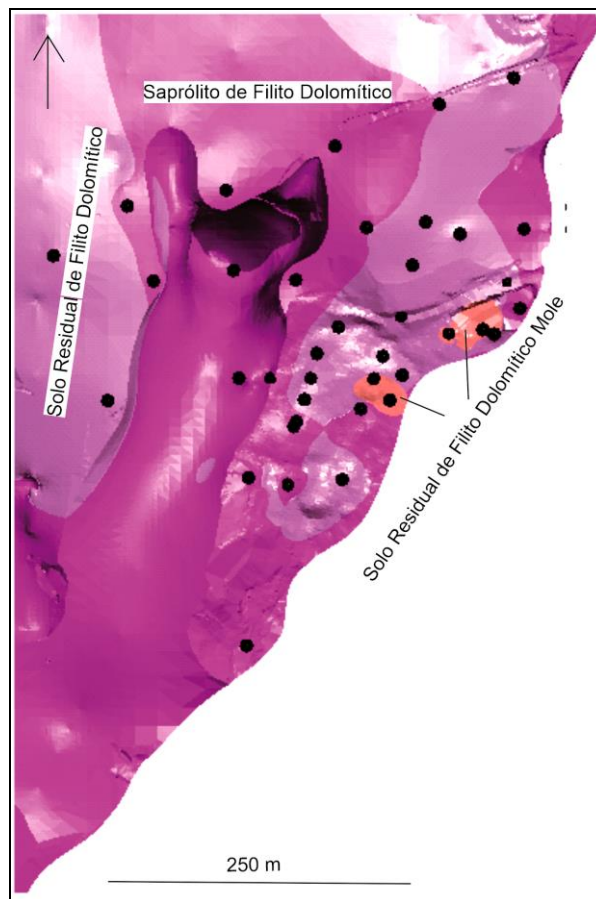


Figura 2. Vista para o modelo geológico-geotécnico 3D com os sólidos de saprólito, solo residual e solo residual mole de filito dolomítico individualizados.

O saprólito de filito dolomítico possui composição siltosa, plasticidade média a baixa, preserva a foliação metamórfica (anisotrópico) e apresenta consistência geralmente muito rija (Fig. 3). Sua área modelada envolve 285 ensaios com valores de N_{SPT} médio e mediana iguais a 25 e 22 golpes, respectivamente. O conjunto de dados apresenta coeficiente de variação igual a 0,44 e desvio padrão igual a 11 (Tabela 2). A Fig. 4 apresenta o histograma com a distribuição dos valores de N_{SPT} e o gráfico *box-plot*, ambos indicando a grande concentração modal dos valores de N_{SPT} em torno de 20 golpes nesta unidade.

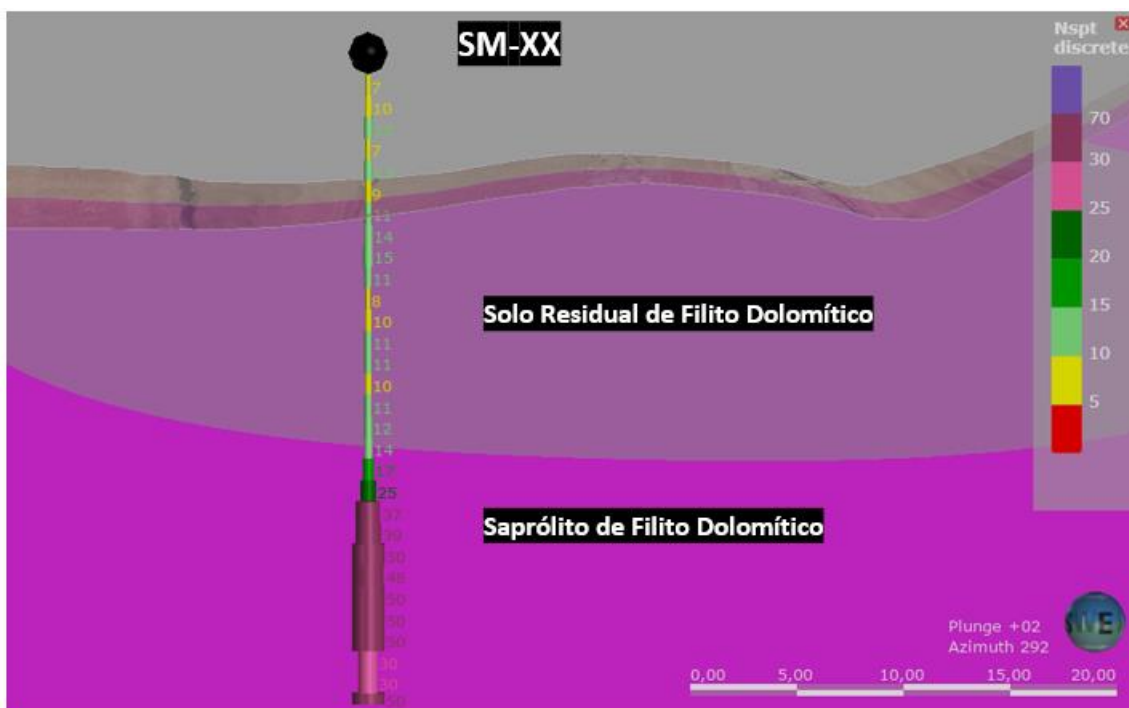


Figura 3. – Corte no modelo geológico-geotécnico 3D ao longo do furo de sondagem SM-XX registrando a separação entre o solo residual e o saprolito de filito dolomítico com base nos valores de NSPT.

O solo residual de filito dolomítico possui composição siltosa, plasticidade média a alta, em geral, não preserva a foliação metamórfica (isotrópico) e apresenta consistência geral média a rija. Sua área modelada envolve 362 ensaios com valores de N_{SPT} médio e mediana iguais a 11. O conjunto de dados apresenta coeficiente de variação igual a 0,30 e desvio padrão igual à 3,38 (Tabela 2). A Fig. 4 apresenta o histograma com a distribuição dos valores de N_{SPT} e o gráfico *box-plot*, ambos indicando a grande concentração modal dos valores de N_{SPT} em torno de 10 golpes nesta unidade.

O solo residual de filito dolomítico mole possui composição siltosa (argila subordinada), plasticidade alta a muito alta, não preserva a foliação metamórfica (isotrópico) e apresenta consistência mole a muito mole. Sua área modelada envolve 17 ensaios com valores de N_{SPT} médio e mediana iguais a 1,7 e 0,1 (valores de N_{SPT} iguais a 0 foram substituídos por 0,1). O conjunto de dados apresenta coeficiente de variação igual a 0,94 e desvio padrão igual à 2 (Tabela 2). A Fig. 4 apresenta o histograma com a distribuição dos valores de N_{SPT} e o gráfico *box-plot*, ambos indicando a presença de valores de N_{SPT} exclusivamente inferiores a 5 golpes.

Tabela 2. Análise estatística dos valores de N_{SPT} obtidos para os litotipos Saprolito de Filito Dolomítico, Solo Residual de Filito Dolomítico e Solo Residual de Filito Dolomítico Mole.

Litotipos	N° Ensaios N_{SPT}	N_{SPT} Média	N_{SPT} Mediana	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação	1° Quartil	3° Quartil
• Solo Residual de Filito Dolomítico Mole	17	1,7	0,1	1,9	1,11	0,1	4
Solo Residual de Filito Dolomítico	362	11	11	3,38	0,30	9	13
Saprolito de Filito Dolomítico	285	25	22	11	0,44	17	29

- Os valores de N_{SPT} iguais à zero e os avanços pelo peso da composição observados no solo residual de filito dolomítico mole foram substituídos pelo valor de 0,1, já que o software não trabalha com valores iguais a zero.

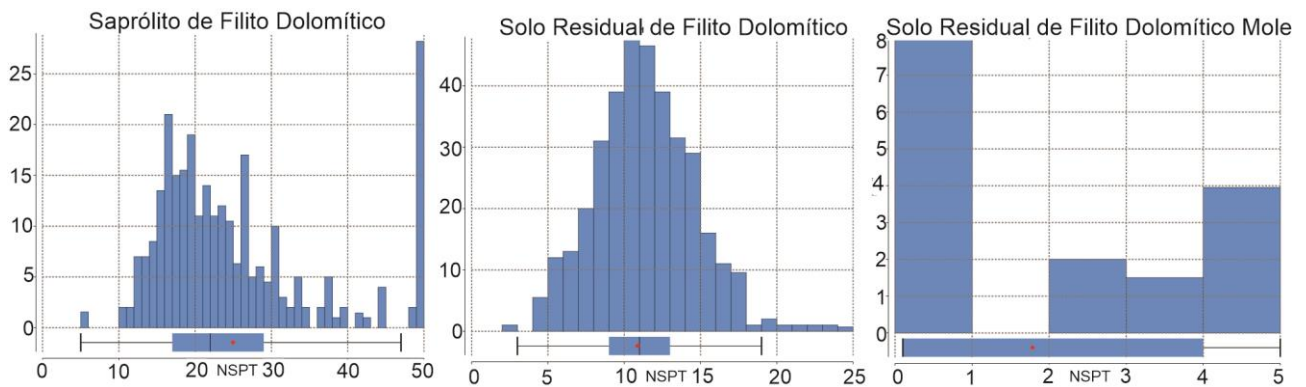


Figura 4. Histograma e *box-plot* apresentando a distribuição dos valores de N_{SPT} para as unidades saprólito, solo residual e solo residual mole de filito dolomítico.

3.3. Modelamento Numérico – Análise Variográfica

O modelamento numérico dos valores de N_{SPT} empregou como envoltória do modelo as três unidades geológico-geotécnicas saprólito de filito dolomítico, solo residual de filito dolomítico e solo residual de filito dolomítico mole. Foi aplicada a função *Hard Boundary* que restringe os dados empregados na estimativa aos valores internos do domínio. Os dados não foram compositados, já que os ensaios de N_{SPT} configuram um suporte amostral com comprimento da amostra homogêneo e igual a 1 m. Para cada um dos domínios foi realizada uma análise variográfica experimental que proporcionou a definição dos elipsoides de busca. O saprólito e o solo residual de filito dolomítico tiveram a direção $N30^\circ E$ como direção principal de busca, e elipsoide definido pelo eixo maior, médio e menor iguais a 90 m, 50 m e 30 m, respectivamente (Fig. 5). A distância de 90 m representa aproximadamente 1,5 vezes a distância média entre as sondagens, contudo, recorda-se que a malha empregada é irregular, desta forma, este valor é aproximado. O elipsoide de busca definido para o solo residual de filito dolomítico mole possui direção principal $N60^\circ E$, sendo tal direção correlata a um possível plano de falha que controla a distribuição destas camadas de baixa resistência. O elipsoide definido possui eixo maior, médio e menor iguais a 90 m, 30 m e 10 m, respectivamente.

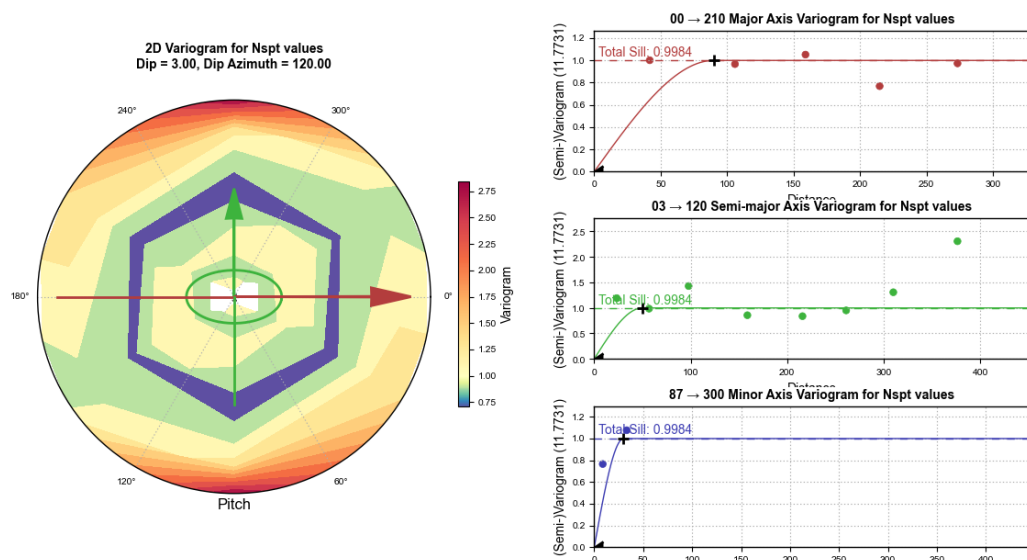


Figura 5. Variograma experimental confeccionado para os valores de N_{SPT} associados a unidade solo residual de filito dolomítico. Imagem extraída do software *Leapfrog*.

3.4. Modelamento Numérico – Krigagem e Modelo de Blocos

A estimativa foi realizada via krigagem ordinária, considerando a orientação dos elipsoides definidos na análise variográfica bem como suas distâncias de busca (range). A função *clipping* não foi aplicada, desta forma, os dados foram integralmente empregados na estimativa. O modelo foi discretizado para 3 pontos nos eixos X, Y e Z, desta forma, os parâmetros presentes em cada bloco serão definidos a partir da média dos referidos pontos. Considerou-se um número mínimo de 3 amostras e um número máximo de 20 amostras como critério para a realização das estimativas.

Após a estimativa, foi gerado um modelo de blocos de malha 1 X 1 X 1 onde os parâmetros da krigagem ordinária foram inseridos. A Tabela 3 apresenta os parâmetros estatísticos dos valores de N_{SPT} calculados via krigagem e carimbados no modelo de blocos. Observa-se que os valores da média, mediana e do coeficiente de variação calculados para o solo residual de filito dolomítico, bem como para saprólito de filito dolomítico ficaram muito próximos dos valores de entrada apresentados na Tabela 3, o que sugere, à princípio, uma boa qualidade das estimativas. Contudo, o solo residual de filito dolomítico mole apresenta um grande contraste nos parâmetros de N_{SPT} de entrada se comparado aos valores estimados. Tal divergência pode ser atribuída ao baixo volume de ensaios N_{SPT} para esta unidade e à sua forma de ocorrência relativamente anômala, já que está presente como bolsões isolados. A média de distância das amostras empregadas na krigagem para o saprolito, solo residual e solo residual mole de filito dolomítico foram iguais à 40 m, 34 m e 13 m. Destaca-se que os parâmetros de eficiência da krigagem (*kriging efficiency*) e regressão linear (*slope regression*) foram calculados com a finalidade de identificar áreas onde a krigagem foi menos efetiva (Fig. 6). Com base nestas informações, caso a baixa performance da krigagem seja atribuída à ausência de dados, sondagens podem ser programadas especificamente para a área em questão.

Tabela 3. Análise estatística dos valores de N_{SPT} calculados via krigagem ordinária para os litotipos Saprólito de Filito Dolomítico, Solo Residual de Filito Dolomítico e Solo Residual de Filito Dolomítico Mole.

Litotipos	N° DE BLOCOS	N_{SPT} Média	N_{SPT} Mediana	Desvio Padrão	Coeficiente de Variação	1° Quartil	3° Quartil
Solo Residual de Filito Dolomítico Mole	4467	0,30	0,10	0,77	2,56	0,10	0,10
Solo Residual de Filito Dolomítico	1781188	10,96	10,92	2,17	0,20	9,54	12,51
Saprolito de Filito Dolomítico	4267822	26,89	24,84	8,69	0,32	20,23	32,11

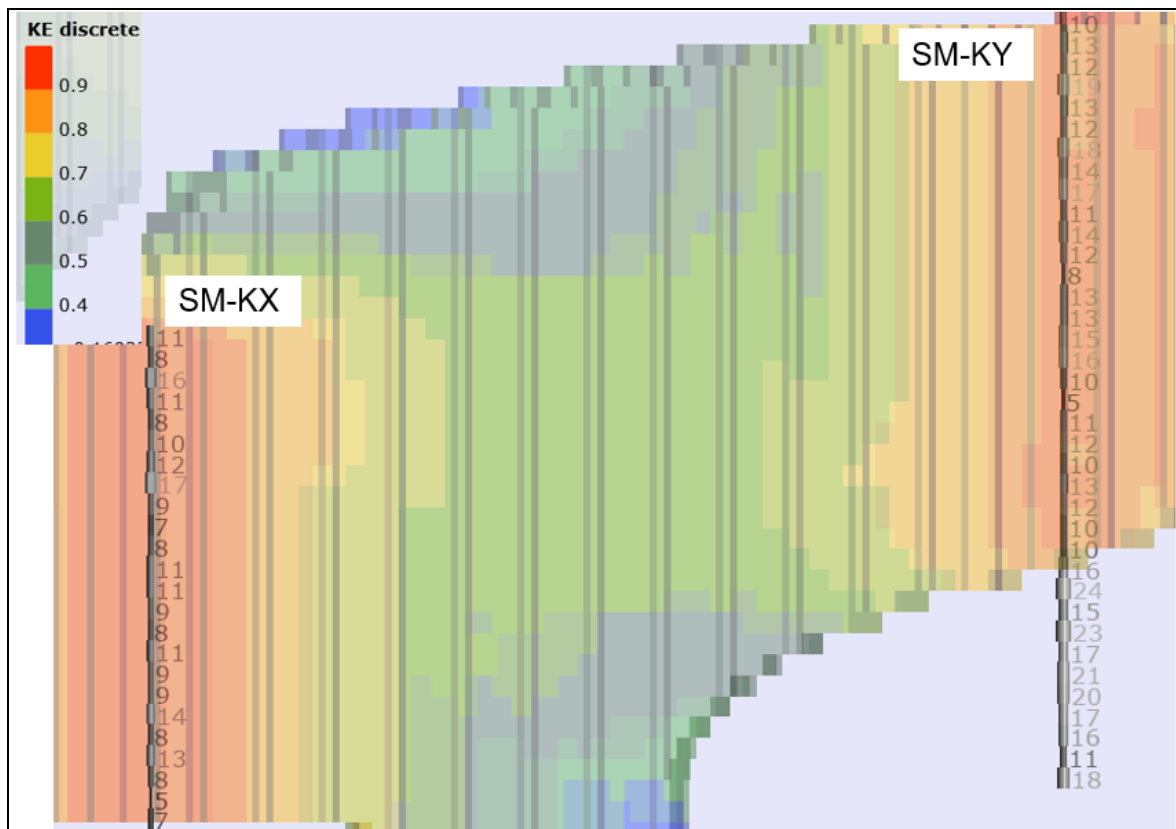


Figura 6. Representação dos valores de eficiência da krigagem para a área compreendida entre dois furos de sondagem mista. Destaque para redução dos valores em função da distância dos furos de sondagem.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A aplicação da modelagem numérica na estimativa de parâmetros de resistência em solo e rocha ainda não se encontra amplamente difundida, sendo tal análise pouco reportada na literatura e no universo das empresas de consultoria/mineração. Neste trabalho, o modelamento numérico apresentado fornece uma ideia inicial de como o processo de estimativa dos valores de N_{SPT} pode ser aplicado para perfis intempéricos, sendo o perfil intempérico aqui avaliado estabelecido sobre um filito dolomítico da Formação Fecho do Funil.

A estimativa dos valores de N_{SPT} abre uma janela de aplicações, onde destaca-se: i) identificação de áreas de baixa confiabilidade dos dados possibilitando o direcionamento das investigações geológico-geotécnicas para tais locais e; ii) inserção do modelo de blocos em *softwares* de análises de estabilidade, onde uma função de resistência pode levar em consideração a variabilidade dos valores de N_{SPT} .

Por fim, destaca-se que uma vez que as análises numéricas de parâmetros de resistência passem a ser empregadas em maior escala, como nos modelos geológico-geotécnicos tridimensionais por exemplo, as campanhas de investigações poderão ser vistas sob uma ótica de uma malha regular de sondagens. Atualmente, as sondagens são direcionadas a áreas específicas da estrutura, por vezes, levando em consideração apenas critérios geométricos (e.g. seções de maior altura de barragens).

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a DF+ Engenharia Geotécnica e Recursos Hídricos pelo apoio no desenvolvimento e divulgação desses estudos.

REFERÊNCIAS

ABNT NBR6484 (2020) Sondagem de Simples Reconhecimento com SPT - Método de Ensaio. Soil — Standard Test Method for Standard Penetration Test (SPT) — Test Procedure. Associação Brasileira de Normas técnicas, 32p.