

Aplicação De Modelagem Numérica A Partir Da Classificação Geomecânica De Sondagem

Carlos Willian Fortes Flores

Estudante, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil, carlosff_hf@hotmail.com

Emerson de Senna Diogo

Estudante, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil, emersonsenna20@hotmail.com

André Cezar Zingano

Professor, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil, andrezin@ufrgs.br

Gabriel Faria Gonçalves

Geólogo, Jaguar Mining Inc., Conceição do Pará, Brasil, gabrielgoncalves18@gmail.com

Vanessa Resende de Andrade

Geóloga, Jaguar Mining Inc., Belo Horizonte, Brasil, vanessa.andrade@jaguarmining.com.br

RESUMO: As descrições geomecânicas estão cada vez mais presentes nas operações de mineração, juntamente com a aplicação da geoestatística a esses parâmetros. Avaliar e garantir a alta confiabilidade da estimativa é essencial. Embora lidar com parâmetros de geomecânica seja desafiador, o uso de métodos de interpolação numérica e krigagem múltipla de indicadores pode tornar a interpretação desses dados mais preciso e utilizar de maneira prática nas operações. Incorporar uma análise de risco é também uma prática válida, pois funciona como um controle estatístico de qualidade, proporcionando maior segurança nos valores gerados. Além disso, é crucial considerar os aspectos geológicos do depósito mineral, como as diferenças litológicas, as feições estruturais, incluindo foliações, falhas e fraturas, e os modelos 3D fornecidos pela equipe de geologia. A inclusão desses dados enriquece as informações tratadas e permite uma análise mais próxima a realidade. Esse fluxo de trabalho abrangente permite identificar áreas mais suscetíveis a zonas de fratura, falhas e locais de menor competência do maciço. Sendo fundamental para uma melhor avaliação das estratégias de contenção e detonação, com o objetivo de mitigar possíveis diluições e garantir a segurança da operação e colaboradores.

PALAVRAS-CHAVE: geomecânica, furos de sondagem, softwares mineração, krigagem, análise de risco.

ABSTRACT: Geomechanical descriptions are increasingly present in mining operations, along with the application of geostatistics to these parameters. Evaluating and ensuring high reliability in the estimates is essential. While dealing with geomechanical parameters is challenging, using numerical interpolation methods and multiple indicator kriging can make data interpretation more precise and practical for operations. Incorporating a risk analysis is also a valuable practice, as it functions as a statistical quality control, providing greater confidence in the generated values. Additionally, it is crucial to consider the geological aspects of the mineral deposit, such as lithological differences, structural features including foliations, faults, and fractures, and the 3D models provided by the geology team. Including this data enriches the information processed and allows for an analysis closer to reality. This comprehensive workflow enables the identification of areas more susceptible to fracture zones, faults, and locations with lower rock competency. This is fundamental for better evaluating containment and detonation strategies, with the aim of mitigating potential dilutions and ensuring the safety of the operation and its workers.

KEYWORDS: geomechanical, drilling boreholes, mining software, kriging, risk analysis.

1 INTRODUÇÃO

Apesar de muito importante, a descrição geomecânica ainda não está presente de forma unânime nos empreendimentos mineiros. Entretanto, com o aumento do interesse das empresas tornarem o ambiente de operação mais seguro, estão sendo adotados parâmetros para uma estabilidade preditiva, sendo uma prática decisiva e indispensável para a viabilização de projetos, tornando-se um dos principais responsáveis por garantir a segurança na maior parte da vida útil da operação.

Durante uma campanha de exploração, faz-se a extração de testemunhos de sondagem através de equipamentos de perfuração rotativa ou percussiva. Utilizando desta técnica, são obtidos testemunhos de sondagem que, posteriormente devem ser transportados até um local apropriado para as atividades de descrição e caracterização realizadas por geólogos, técnicos e auxiliares. Essa etapa inclui: criação de contatos (intervalos de profundidade) de acordo com a litologia identificada, seleção de amostras para análise química, ensaios de densidade, levantamento estrutural e levantamentos geofísicos.

Bieniawski (1989) propõe diversos parâmetros para coleta em campo relacionadas a descrição geomecânica, dentre elas estão: RQD, grau de alteração (W1, W2, W3, W4, W5) sendo W5 a pior classificação e W1 a melhor, grau de fraturamento e quantidade de descontinuidades presentes, alteração presente na parede da descontinuidade, preenchimento, presença de água, espaçamento das descontinuidades de acordo com a quantidade e intervalo de contatos, número de famílias e classificação e quantificação dessas famílias de descontinuidades. A relação das classes geradas através dos parâmetros levantados pode ser vista na tabela 1.

Tabela 1. Classe de maciço rochoso determinada pelo parâmetro de RMR.

Somatório dos pesos	100 - 81	80 - 61	60 - 41	40 - 21	<20
Classe nº	I	II	III	IV	V
Descrição	Muito rica	Rica	Regular	Pobre	Muito pobre

Fonte: Bieniawski, 1989.

O uso da geoestatística aliada à geomecânica é uma prática que vem ganhando espaço na mineração, isto porque há estudos e pesquisas (You & Barnes, 1997; Redondo, 2003; Jeon et. al, 2008) que comprovam a sua eficácia. É importante salientar que os valores geomecânicos não são contínuos, reiterando uma maior necessidade na utilização de métodos de krigagem ordinária e krigagem múltipla de indicadores, gerando mapas de probabilidade de maior confiabilidade e relevância para a operação.

Para a utilização de krigagem por indicadores, Journel (1982) propõe que seja aplicada uma função indicatriz – isto é, cada um dos parâmetros seja codificado em apenas dois valores, 0 ou 1, vide equação abaixo.

$$f(x) = \begin{cases} 0, & |x < \text{limiar} \\ 1, & |x \geq \text{limiar} \end{cases} \quad (1)$$

Faz-se adaptação das classes de RMR para a krigagem por indicadores, neste caso é considerado que os pacotes de RMR I e II poderiam ser comprimidos em um pacote denominados como rocha rica e/ou competente, RMR III em um pacote individual de rocha regular e, RMR IV e V, como um pacote de maciço ruim e/ou pobre.

Além disto, foram adaptadas equações para possibilitar a criação de mapas de risco em modelo de blocos, levando em consideração a competência das maciço presentes no depósito, mergulho do minério (área de interesse) e informações obtidas pela sondagem, gerando apenas um variograma que satisfizesse ambos os pacotes de classes RMR.

O presente trabalho tem como objetivo avaliar os métodos de coleta de dados adotados, confirmando a confiabilidade dos valores pós-processados através da comparação com outros modelos gerados pela equipe de exploração do alvo estudado e outras ferramentas de validações geoestatísticas.

2 METODOLOGIA

A metodologia consiste na aplicação de métodos de interpolação utilizando um software de modelagem 3D, principalmente ao utilizar ferramentas geoestatística básicas. A medida que avançamos as etapas, são feitas validações dos modelos gerados através de diversas alternativas encontradas como: análise do histograma estimado, comparação com modelos geológicos dispostos, validação visual com os valores reais da sondagem e análise de risco.

Foram descritos 48 furos de sondagem com profundidades que variam de 200 a 700 metros. A coleta de dados destes furos durou um semestre.

Posterior ao trabalho de coleta de dados, iniciou-se o processo de tratamento dos dados e *input* dos dados em *softwares* de modelagem 3D com finalidade de criar um modelo geomecânico que servisse quando a operação chegasse nas frentes em questão, e tivessem informações suficientes sobre o comportamento do maciço em relação a mecânica de rochas, tendo maior facilidade de resolução para os desafios reportados.

O momento de pós processamento fornece um mapa de probabilidade para cada um dos pacotes de RMR, tendo em vista que utilizar dados estatísticos se leva a premissa de uma incerteza inevitável, visando a menor invariabilidade e suavização possível do método de interpolação.

Mesmo após concluído o trabalho em softwares da campanha *infill* do projeto, o banco de dados foi sendo abastecido por mais dados coletados, agora, através de mapeamento das galerias subterrâneas nas áreas de interseção dos furos e feições que foram identificadas nos testemunhos de sondagem realizados pelo geólogo responsável nos anos seguintes.

2.1 Coleta de dados

O levantamento dos dados geomecânicos em furos de sondagem foi realizado em conjunto com a descrição geológica dos furos. Ao terminar a separação dos contatos litológicos, era iniciado o processo de caracterização geomecânica do maciço dos intervalos em questão. Para a região de saprólito/transicional foram feitos novos intervalos, além dos contatos estabelecidos pela geologia, tendo em vista fazer a separação dos intervalos com diferentes graus de alteração impacta apenas a geomecânica e não a geologia.

Intervalos, identificados visualmente, com comportamentos geomecânicos diferentes também foram incluídos visando uma descrição maior precisão de zonas propícias a regiões menos competentes (falhas, zonas de fratura/cisalhamento).

Para a realização da coleta foram dos parâmetros utilizados no presente trabalho, temos: trena de 10 m, pente de Barton e martelo/esclerômetro de schmidt, sendo estes utilizados para:

- **Trena:** Utilizada para a obtenção do RQD e intervalos de interesse;
- **Pente de Barton:** Utilizado para moldar a rugosidade da parede de descontinuidade da rocha e comparado ao ábaco de Barton-Bandis.
- **Martelo de Schmidt:** Utilizado para obtenção de parâmetros de resistência (UCS).

Os demais parâmetros obtidos como espaçamento médio, quantidade de descontinuidades, tipo de continuidades, número de famílias, entre outros parâmetros foram obtidos através de cálculos e identificação visual em campo.

2.2 QA/QC e Estimativa

Primordialmente, foi necessário garantir a qualidade dos dados para evitar que houvesse outliers ou ruídos na estimativa. O controle de qualidade começou com a avaliação da qualidade de descrição efetuada em campo. De modo em que, a campanha já havia iniciado um tempo antes do início da descrição geomecânica, alguns furos teriam sido descritos e amostrados em um período considero longo para uma coleta de dados confiável. Outra análise feita foram dos valores obtidos em relação a furos próximos, interpretando o comportamento do maciço de maneira visual. Além disso, valores muito discrepantes entre si foram analisados e comparados com intervalos de mesma litologia em todos os furos descritos. Parâmetros de resistência obtidos através do martelo de Schmidt também foram considerados para manter o controle de qualidade. Além disso, o campo de observação na planilha de campo podia fornecer outros *insights*, permitindo a exclusão de dados considerados problemáticos ou ruins. Este processo de QA/QC gerou a exclusão de alguns furos, são eles:

- FUH174 = Quando iniciado as descrições geomecânicas, este furo foi reaberto e descrito, entretanto, alguns valores de resistência levantaram suspeitas quando a confiabilidade e qualidade da descrição.
- FUH186 = Furo curto com informações pouco confiáveis;
- FUH219 e FUH220 = Furos descritos posteriormente a campanha, tendo valores de resistência discrepantes por conta do equipamento utilizado, além do mais, o furo estava muito distante da área de interesse, causando extrapolações irreais.

Após a realização do QA/QC dos furos que seriam estudados, foi necessário agrupar as cinco classes de RMR em três pacotes, visando trabalhar com um número menor classes, concentrando mais informações em pacotes menores com comportamentos similares. Para isso, foram utilizados os parâmetros de RMR dos intervalos apresentados na Tabela 1. Para os intervalos, foram definidas equações a fim de separar cada uma das classes, sendo utilizado como base a equação 1:

$$RMR_{5-4} = \begin{cases} 1, & \text{se } RMR \leq 40 \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (2)$$

$$RMR_3 = \begin{cases} 1, & \text{se } 41 < RMR < 60 \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (3)$$

$$RMR_{2-1} = \begin{cases} 1, & \text{se } 61 < RMR < 100 \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (4)$$

Os pacotes de RMR foram agrupados em três categorias distintas: ricos (classificados como 2 e 1), regulares (classificados como 3) e pobres (classificados como 5 e 4). Dada a composição silicificada e metamórfica do depósito, é plausível encontrar áreas com características pobres e regulares tanto no solo/saprólito quanto em zonas de transição. Conforme a perfuração avança em profundidade, há uma tendência de melhora na competência das rochas. Além disso, há indícios da presença de intervalos classificados como regulares em maiores profundidades, estes associados a zonas de cisalhamento, fratura ou falhas.

A Figura 1, com seus histogramas, ilustra o que foi citado acima de forma mais clara. O eixo x vai de 0 a 1 e o eixo y representa o volume de dados. Nos tópicos A e B da figura em questão, os histogramas estão mais à esquerda, indicando uma maior incerteza dos valores classificados como rocha ruim ou regular. Já no tópico C, vemos mais barras à direita e com maior volume, confirmando que a maior parte do depósito é composta por rochas de boa competência.

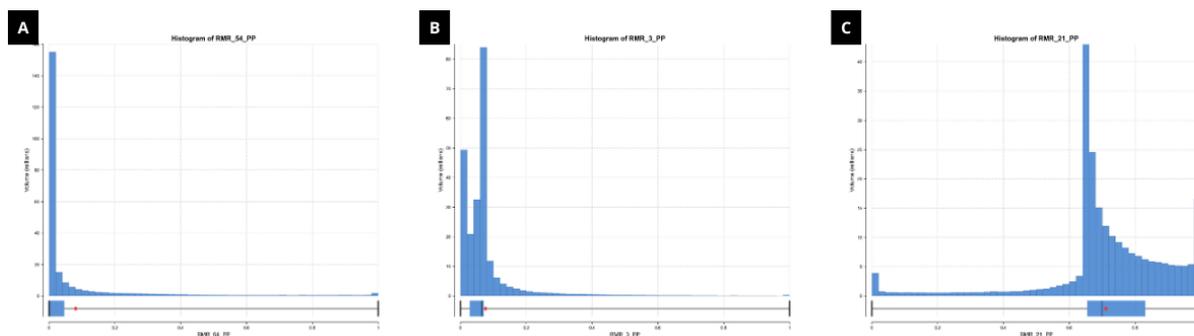


Figura 1: Histogramas dos pacotes de RMR. (A) Histograma dos valores de rocha pobre; (B) Histograma dos valores de rocha regular; (C) Histograma dos valores de rocha rica.

Após a garantia da confiabilidade dos dados e a definição dos indicadores, o processo de modelagem através do método de modelo numérico foi iniciado, a ideia proposta nesta etapa seria de avaliar qual seriam as melhores configurações espaciais para serem utilizadas no modelo de krigagem ordinária mais à frente.

A validação desse método foi realizada por meio da observação de *wireframes* geológicas, que incluem: informações sobre minério (dip, dip direction), zonas sulfetadas, falhas e outros elementos relevantes. Esta etapa supriu a necessidade compreender como a competência da rocha está diretamente relacionada à sua

composição mineralógica e estrutural que, por sua vez, está atrelada ao seu comportamento mecânico, classificado através do RMR.

A abordagem de validação visual por intermédio de outros modelos 3D possibilita uma avaliação mais completa e precisa das estimativas produzidas, ajudando a determinar se o modelo está gerando resultados mais próximos a realidade. Embora não garanta valores totalmente confiáveis, ela elimina, ou confirma, a possibilidade de um modelo irreal, contribuindo para uma análise mais sólida e confiável das características mecânicas do depósito.

Com o método de validação, foi possível constatar que o trend (dip, dip direction, azimuth) de melhor comportamento interpolado através dos dados geomecânicos se assemelha ao do minério gerado pela equipe de geologia. Isso assegura uma consistência na modelagem, garantindo que os dados de ambos os aspectos estão alinhados e que a interpolação reflete com precisão a distribuição do minério no subsolo. No processo de criação dos modelos foram testados outros comportamentos que poderiam ser possíveis, entretanto, por vários fatores, a adoção do minério se fez mais coerente e adequado.

2.3 Análise de Risco

Visando compreender e validar da forma mais precisa possível, viu-se a necessidade de utilizar a variância de krigagem, considerada uma boa medida de qualidade de estimativas. O uso dos métodos antecessores, tem como finalidade, de acordo com Journel (1986a), trazer uma maior informação para o estudo de risco, tendo em vista que apenas a variância de krigagem poderia subestimar/superestimar os valores por conta dos vizinhos próximos, entretanto, quando colocamos os valores da krigagem, informações estruturais do corpo mineralizado, *wireframes* para a validação e entre outros métodos, estamos associando de forma preditiva o intervalo de confiança.

Em suma, a análise de risco é uma metodologia que considera e reproduz as estatísticas dos dados e informações espaciais da área estudada. A parte fundamental está no uso das estatísticas para medidas de incerteza, que são derivadas da função de distribuição condicional (CDF) da série $z(u)$ de teores de um bloco em uma localização u dentro do limite. Neste caso, utilizamos a variância da krigagem, adaptada da seguinte equação de variância condicional:

$$CV(u) = \sum_{k=1}^{K+1} [Z'_k - Z^*_{*E}(u)]^2 * [F(u; Z_k) - F(u; Z_{k-1})] \quad (5)$$

onde,

$Z_k, k=1... K$, são K valores de limiar discretizando o intervalo de variação dos Z -valores;

Z'_k é a média da classe Z_{k-1} , neste caso um modelo de estimativa;

$Z^*_{*E}(u)$ é o valor esperado da CDF aproximado por uma soma discreta;

$F(u, Z)$ é uma função de valores de teores Z para uma determinada localização u .

Deste modo, adaptamos a equação 5 para satisfazer nosso modelo, obtendo as seguintes equações:

$$RISK[RMR_{5-4}] = ((1 - (KRIG(RMR_{5-4}))^2 + (VARKRIG(RMR_{5-4}))^2) \quad (6)$$

$$RISK[RMR_3] = ((1 - (KRIG(RMR_3))^2 + (VARKRIG(RMR_3))^2) \quad (7)$$

$$RISK[RMR_{2-1}] = ((1 - (KRIG(RMR_{2-1}))^2 + (VARKRIG(RMR_{2-1}))^2) \quad (8)$$

3 RESULTADOS

Através dos modelos de estimativa gerados, é possível compreender que a competência mecânica das rochas está diretamente relacionada à litologia e às estruturas dos depósitos. Isso pode ser visto na figura 2, onde observamos que a maioria dos blocos de estimativas penalizadas está nas regiões de litologias classificadas como “TX” – Talco Xisto, “XG” – Xisto Grafítico e “BXG” – Biotita-Xisto Granada. Além dessas, outras litologias de maior competência também foram encontradas com blocos de estimativa menor para uma classificação de rocha que pela literatura trata estas litologias como de maior competência do que as citadas anteriormente, como “QSX” – Quartzo-Sericita Xisto, “ACLX” – Anfibólio Clorita Xisto, “MCH” –

Metachert, “BACLX” – Biotita Anfibólio Clorita Xisto, “VQz” – Veio de Quartzo e “HDM” – Rocha Hidrotermal.

Por se tratar de um depósito de contexto geológico metamórfico com muitos eventos de falhas, era esperado que essas litologias tivessem uma turbulência que afetaria sua resistência à compressão. Embora isso ocorra, observamos que esses intervalos, onde temos rochas metamórficas ou formações que tenderiam a ser rochas competentes, são identificados e classificados como zonas de cisalhamento, falhas ou fraturas.

A litologia “BXG” é encontrada massivamente na zona transicional, onde há uma turbulência natural do depósito. Já “TX” e “XG” são encontrados em maior profundidade, e a presença dessas litologias explica o ambiente metamórfico e hidrotermal de mineralização que compõe o depósito.

Por mais que nossos resultados se mostrem satisfatórios, é necessário um fluxo de trabalho para além da estimativa, é preciso que o modelo seja validado de alguma forma. Na literatura podemos encontrar vários métodos de validação: validação cruzada, validação visual - através da comparação dos dados reais, entre outros.

3.1 Validação dos modelos de estimativa

Nos modelos de estimativa foi aplicado a seguinte equação para o filtro de cores:

$$\text{cor}(x) = \begin{cases} \text{Vermelho}, & \text{se } x < 0.35 \\ \text{Amarelo}, & \text{se } 0.35 \leq x < 0.5 \\ \text{Verde Claro}, & \text{se } 0.5 \leq x < 0.65 \\ \text{Verde Escuro}, & \text{se } x \geq 0.65 \end{cases} \quad (9)$$

Com isto, é possível observar que a estimativa está levando em consideração fielmente os dados e as informações que são passadas através da sondagem. Nas partes B e C da Figura 2, é observado grandes complementos de blocos ruins, sendo possível associar as litologias das rochas que estão descritas, assim como os valores de UCS dispostos no intervalo da sondagem.

Essas informações trazem uma segurança maior no planejamento operacional, pois mostram que estas regiões estão sendo penalizadas diretamente devido a mineralogia e baixa competência em relação aos pesos dos parâmetros levados em conta na classificação de RMR. Além do mais, a precisão quanto a localização espacial do depósito também pode ser levada em consideração, já que é obter essa informação através da profundidade da sondagem e dos blocos de estimativa gerados na área.

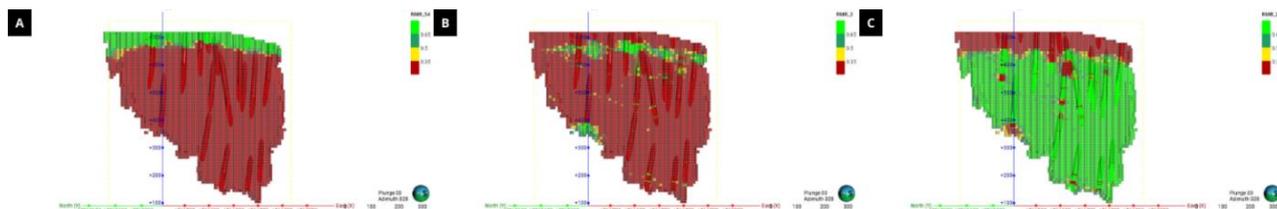


Figura 2: Validação do modelo de estimativa através dos furos da sondagem. (A) Seção da estimativa RMR₅₋₄; (B) Seção da estimativa RMR₃; (C) Seção da estimativa RMR₂₋₁.

Na figura 3, faz-se a validação através das *wireframes*. Este método se torna usual por conta de se tratar de um modelo que utiliza todos os processos de caracterização do minério presente no depósito, assim como seu comportamento estrutural como um todo, já que falhas e/ou outras condições mudam significativamente os modelos.

A análise das *wireframes* trouxe *insights* interessantes para as áreas com estimativa menor. Tanto pelo estudo apresentado na figura 2, quanto o da figura 3 mostram claramente que a estrutura do depósito é controlada por falhas e outras estruturas geológicas resultantes do evento de formação. Estes eventos causam um impacto na qualidade geral do maciço.

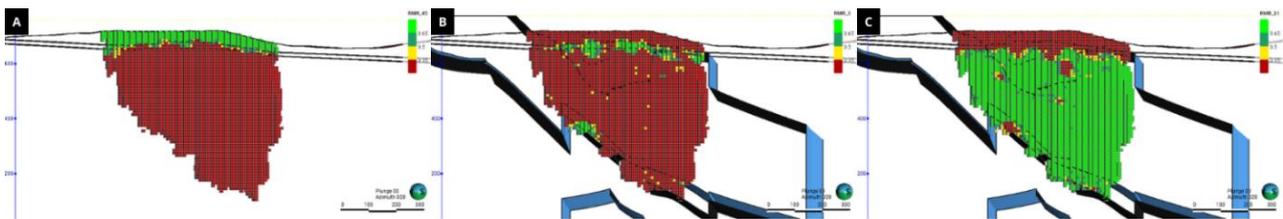


Figura 3: Validação do modelo de estimativa através das *wireframes* da geologia. (A) Seção da estimativa RMR5-4; (B) Seção da estimativa RMR3; (C) Seção da estimativa RMR2-1.

Uma forma adicional de validar o modelo é comparando os histogramas das estimativas (Figura 4) com os histogramas dos valores reais (Figura 1), os eixos dizem as mesmas informações em ambos.

Os dois conjuntos de histogramas apresentam um padrão onde a maioria dos volumes de resistência está concentrada na faixa de RMR₂₋₁. Além disso, é possível notar que os volumes estão distribuídos de forma semelhante nas duas figuras. Nota-se também uma certa suavização dos dados na Figura 4, o que é um efeito natural do processo de krigagem. Outro ponto a se observar é que os dados complementam o que foi citado no início do estudo, no qual os valores em profundidade correspondem ao RMR₂₋₁ e RMR₃, onde a ausência de RMR₂₋₁ está relacionado a zonas de turbulência das rochas (zonas de cisalhamento, fratura, entre outros).

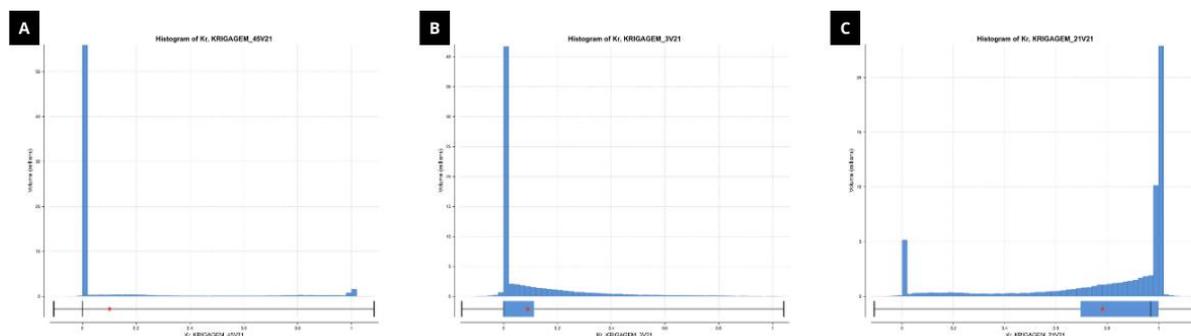


Figura 4: Histogramas de estimativa dos pacotes de RMR. (A) Histograma dos valores de rocha pobre; (B) Histograma dos valores de rocha regular; (C) Histograma dos valores de rocha rica.

3.2 Análise de Risco

As figuras 5 e 6 ilustram a análise de risco utilizando as equações 6,7 e 8. Diferente da equação das cores disposta na equação 9, para esta análise, os valores são tratados de forma inversa: quanto mais próximos a 1 (verde) maior risco de ser estéril, ou seja, de não pertencer a classe em questão. O ideal seria ter valores próximos a zero, indicando uma baixa variância da krigagem e valores satisfatórios de qualidade do maciço.

Nesse contexto, onde se aborda a variância da krigagem, um dos fatores mais relevantes para carimbar os modelos serão as informações, especificamente a quantidade de sondagens incorporadas no modelo e valores dos blocos da estimativa. Percebe-se que as regiões de borda do modelo têm uma alta variância da krigagem, isto quer dizer que apesar de terem sofrido uma certa suavização no processo de krigagem, tem um valor muito grande de incerteza atrelado pela falta de informação na área.

A união destas duas análises corrobora com a eficiência dos modelos de estimativa gerados e comprova que as estimativas estão alinhadas com a realidade, apresentando um considerável valor de certeza mesmo em áreas com pouca informação.

A figura 6, em especial, demonstra que o RMR₅₋₄ está presente em toda a porção mais próxima a superfície. No entanto a falta de sondagens no restante da área gera um alto valor de variância de krigagem. Isso não significa que em outras porções de RMR as áreas que estão em verde no modelo de RMR₅₋₄ podem estar com uma baixa variância. Na verdade, o oposto é verdadeiro, pois esta análise leva em consideração ambas as informações para a estimativa.

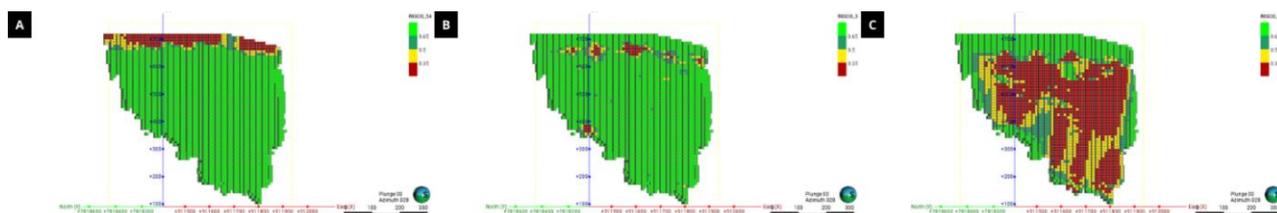


Figura 5: Análise de risco. (A) Seção de RMR₅₋₄; (B) Seção de RMR₃; (C) Seção de RMR₂₋₁.

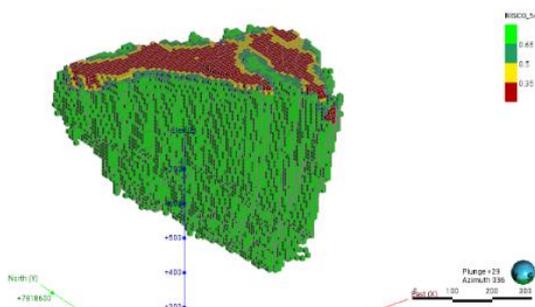


Figura 6: Vista de cima do modelo, observando apenas os valores de risco de RMR₅₋₄.

4 CONCLUSÃO

É possível perceber que os valores obtidos através do processamento dos dados se fazem satisfatório, tanto através das validações, tanto pelo conhecimento e discernimento do depósito estudado e experiência em campo a respeito do contexto geológico que o depósito está incluso.

A respeito dos métodos geoestatísticos, foi possível concluir que são de suma importância para a validação de dados de natureza geomecânica, representando um grande aliado para todas as etapas do planejamento.

Dentro do contexto de longo prazo, há a possibilidade de enriquecer ainda mais esse banco de dados à medida que os avanços subterrâneos forem realizados nas áreas estudadas. Isso pode, futuramente, aprimorar os resultados obtidos, proporcionando uma maior segurança para as operações. Essa abordagem contínua de coleta de dados e análise geoestatística contribui para uma gestão mais eficaz e informada das atividades relacionadas à geotecnia.

Mesmo que a adoção dessas práticas seja comprovadamente confiável, é importante conhecer o depósito no qual está sendo trabalhado, pois muitas informações de comportamento de maciços e outras informações são relevantes para garantir a confiabilidade dos valores apresentados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Barnes, Y. K.; R. J. Infill sampling design for tunnel rock classification. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. fev. 1997.
- Bieniawski, Z. T. *Engineering Rock Mass Classifications: A Complete Manual for Engineers and Geologists in Mining, Civil, and Petroleum Engineering*. New York: Wiley, 1989.
- Jeon, S., Hong, C., & You, K. *Design of tunnel supporting system using geostatistical methods*. In *Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground*. 2008.
- Journel, A. G. *The indicator approach to estimation of spatial distributions*. 1982.
- Journel, A. G. *Constrained interpolation and qualitative information – the soft kriging approach*. 1986a.
- Redondo, F. *Classificação probabilística do padrão geomecânico de um maciço rochoso mineralizado com base no índice RQD*. UNESP. Disponível em: <repositorio.unesp.br>. Acesso em: mai. 2003.