

ELABORAÇÃO E VALIDAÇÃO DE BANCO DE DADOS DE SONDAÇÃO E CONSTRUÇÃO DE UM MODELO GEOMECÂNICO DE UMA CAVA DO QUADRILÁTERO FERRÍFERO

PREPARATION AND VALIDATION OF A DRILLING DATABASE AND CONSTRUCTION OF A GEOMECHANICAL MODEL IN OPEN PIT MINE OF QUADRILÁTERO FERRÍFERO

ORLANDO FARIA PRADO

Geólogo, Pós-Graduado em Geologia pela UFSC. e-mail: orlandoprado.geologia@gmail.com

MURILO DA SILVA ESPÍNDOLA

Engenheiro, Doutor em Engenharia Civil pela UFSC. e-mail: murilo.espindola@ufsc.br

CRISTIAN NUNES ESTEVAM

Geólogo, Pós-Graduado em Geociências pela USP. e-mail: cristian.estevam@usp.br

RESUMO ABSTRACT

O gerenciamento seguro e eficiente de operações de mineração a céu aberto é um desafio, que pode ser potencializado por inconsistências em dados geomecânicos. Propriedades geomecânicas são indispensáveis para o conhecimento de rochas e solos e, devido ao crescente volume de dados e informações gerados em cada empreendimento minerário e a quantidade de equipes envolvidas durante campanhas de sondagens, é necessário realizar a validação destes dados. A validade dos dados é fundamental para a produção de modelos tridimensionais acurados e analisar sua qualidade, é uma lacuna corriqueira em projetos geomecânicos. Este estudo visa abordar essa lacuna, focando na avaliação da consistência de um banco de dados geomecânicos, sua validação e análises. Utilizando dados de uma mina brasileira, agora inativa, aplicamos critérios de classificação geomecânica para criar um modelo tridimensional geomecânico de uma cava hipotética. A metodologia empregada envolveu a correlação de parâmetros geomecânicos e a aplicação de critérios de classificação como o *Rock Mass Rating* (RMR) e o *Weak Rock*. Os resultados indicam uma melhoria significativa na precisão dos modelos geomecânicos com a adoção de variáveis *proxy* cor-

The safe and efficient management of open-pit mining operations is a challenge, potentially intensified by inconsistencies in geomechanical data. Geomechanical properties are crucial for understanding *rocks* and *soils*. Due to the rising volume of data and information generated in each mining project, and the multiple teams involved during drilling campaigns, data validation is essential. The data's validity is key for creating accurate three-dimensional models. Analyzing this validity is a common gap in geomechanical projects. This study aims to fill this gap by evaluating the consistency of a geomechanical database, its validation, and analyses. Using data from a now-inactive Brazilian mine, we applied geomechanical classification criteria to create a 3D geomechanical model of a hypothetical pit. The methodology involved correlating geomechanical parameters and applying classification criteria like the *Rock Mass Rating* (RMR) and *Weak Rock*. The results show a significant improvement in the accuracy of geomechanical models with the use of correlated proxy variables. This contributes to safer, more efficient mining operations. This work serves as a guide for integrating geomechanical data into 3D models, aiding

relacionadas, o que contribui para a operação de minas mais seguras e eficientes. Este trabalho serve como um guia para a integração de dados geomecânicos em modelos 3D, contribuindo para futuras pesquisas e aplicações práticas na indústria de mineração.

Palavras-chave: propriedades geomecânicas; banco de dados geomecânico; validação; modelo geomecânico tridimensional.

1. INTRODUÇÃO

O estudo geomecânico de cavas é fundamental para garantir a segurança e eficiência das operações de mineração a céu aberto. O maciço que contém o depósito mineral sofre alteração durante o processo de lavra (Braga Neto, 2020), que implicam na contínua mudança das características geomecânicas. É claro inferir que a caracterização das propriedades geológicas e geotécnicas, que abrange os estudos relacionados à descrição geológica do maciço e o levantamento dos parâmetros geotécnicos deste, são fundamentais para garantir a segurança operacional. É importante destacar ainda, que a utilização de modelos geomecânicos vem sendo construída há anos por pesquisadores e profissionais na indústria do petróleo, porém ainda são incipientes os trabalhos no âmbito da mineração.

A elaboração de modelos geomecânicos requer o levantamento de dados e informações acerca das propriedades geológicas e geotécnicas de uma área. Geralmente o levantamento de dados é realizado por diversas equipes, o que pode resultar em inconsistências nos parâmetros de descrição, que são posteriormente incorporadas aos modelos. O agrupamento destes dados e informações em banco de dados e elaboração de modelos tridimensionais vem sendo cada vez mais discutida no meio técnico e acadêmico como nos trabalhos de Hammah & Curran (2006), Vatcher *et al.* (2016), Kring & Chatterjee (2020), Liu *et al.* (2021) e Aquino *et al.* (2021).

Com o avanço das tecnologias de coleta de dados e modelagem 3D, torna-se cada vez mais importante compilar, validar e analisar os dados e informações gerados durante a operação de uma mina. Neste sentido, buscou-se avaliar a consistência dos dados de um projeto de mineração e elaborar um modelo geomecânico tridimensional,

future research and practical applications in the mining industry.

Keywords: geomechanical; drilling; data base; model; classification

que represente a mina, através de banco de sondagens contendo descrições geomecânicas dos testemunhos. As classes geomecânicas aqui estudadas derivam dos trabalhos de referência do *Rock Mass Rating - RMR* de Bieniawski (1993) e do *Weak Rock* (Martin & Stacey 2018).

O objetivo desta pesquisa é a elaboração e avaliação da consistência de um banco de dados, analisando a correlação dos parâmetros geomecânicos correlacionáveis e aplicando critérios de classificação geomecânica, obtendo-se trechos de classe geomecânica em furos de sondagem, que subsidiaram a elaboração de um modelo tridimensional geomecânico de uma cava hipotética.

A base de dados utilizada é oriunda de uma mina brasileira que teve sua operação encerrada e devido ao sigilo imposto pelos proprietários do negócio, ainda vigente, é tratada aqui como uma cava hipotética.

2. MATERIAIS E MÉTODO

Para alcançar o objetivo proposto esta pesquisa foi dividida em três fases que contemplam a i) compilação, organização e validação do banco de dados espacial, ii) elaboração de seções de resistência mecânica das rochas, grau de alteração e seções geomecânicas e iii) elaboração do modelo geomecânico após a análise crítica dos resultados.

A base de dados foi compilada a partir de levantamentos geológicos e geomecânicos executados durante a operação da mina pela empresa que a opera e por empresas terceiras que prestaram serviços de prospecção de dados em campanhas de sondagens.

A base de dados compilada tem dois tipos principais de dados: sondagens e modelo 3D geológico-geomecânico. Os dados básicos das sondagens, onde constam o código da sondagem, a posi-

ção espacial (X, Y e Z, em EPSG 31982 e o azimute ($^{\circ}$)), foram agrupados e registram as características básicas dos intervalos amostrados. Os dados dos parâmetros utilizados na classificação geomecânica, como, unidades litológicas dadas em: litotipos naturais (Itabiritos, Filitos, Hematitas, Xistos, Rochas intrusivas, Quartzitos, Lateritas, Canga, Brecha e Dolomito), litotipos antrópicos (Aterros, Material Rolado, Pilhas de Estéril) e sem recuperação, resistência-consistência (Mega pascal, ISRM adaptada, 1981), intemperismo (ISRM, 1981), grau de faturamento (fraturas/metro, modificado pelo IPT, 1997), RQD (porcentagem, conforme Deere, 1963), tipo de descontinuidade (ABGE, 1988), espaçamento (milímetros, ABGE, 1988), abertura das paredes (milímetros, Bieniawski, 1989), rugosidade (ISRM, 1981), material de preenchimento (Bieniawski, 1989), intemperismo da parede (ISRM, 1981), persistência (ISRM,

1981) e condição de água (ISRM, 1981) compõem as variáveis aqui estudadas dos intervalos amostrados na sondagem, aqui tratados como intervalos geomecânico. Os dados de investigação direta foram compilados em seu completo teor, fato que permitiu a validação integral dos dados.

Dados adicionais de ensaio de granulometria foram obtidos para realizar análises cruzadas com o parâmetro litológico do material quanto a sua resistência dividido em materiais: compacto, médio e friável. (Quadro 1). Foi definido um parâmetro de validação para ensaios granulométricos: que apontaram massa de sedimentos com percentual de massa, granulometria maior que 200 mm, superior a 50% foram classificados como material compacto; quando o percentual de massa representa entre 50% e 30% foi considerada material médio; e para percentual de massa menor que 30% foram consideradas como material friável.

Quadro 1 - Correlação de dados proposta para os parâmetros de resistência e análises granulométricas.

Índice de Resistência		Ensaio de Peneiramento	Resistência da Litologia
R0	Extremamente Branda	Percentual de massa passante < 30% passante na peneira 200 mm	Friável
R1 (-)	Muito Branda (inferior)		
R1 (+)	Muito Branda (superior)		
R2 (-)	Branda	Percentual de massa entre 50% e 30 % passante na peneira 200 mm	Média
R2 (+)	Pouco resistente		
R3	Medianamente resistente		
R4	Resistente		
R5	Muito resistente	Percentual de massa passante > 50% passante na peneira 200 mm	Compacta
R6	Extremamente resistente		

O grau de fraturamento é expresso pela quantidade de descontinuidades por metro linear de maciço rochoso de acordo com o proposto por Guidicini (1972). O RQD representa a relação entre a soma de todos intervalos de material maiores que 10 cm e o comprimento total do intervalo amostrado que é de um metro, variando valores de 0 até 100.

Os intervalos amostrados considerados válidos foram então classificados geomecanicamente com base nos critérios de classificação geomecânica a partir do sistema *Weak Rock* proposto por Martin & Stacey (2018) e o sistema *Rock Mass Rating* (Bieniawski, 1993) a fim de abranger representatividade dos diferentes litotipos presentes na

cava. Os sistemas de classificação geomecânica de maciços englobam critérios qualitativos e/ou quantitativos, fornecendo indicações no que diz respeito às propriedades intrínsecas sobre a qualidade do maciço. A aplicabilidade de cada sistema de classificação está relacionada ao grau de resistência da rocha intacta apresentado em cada intervalo amostrado. As rochas presentes na cava em estudo apresentam em sua maioria um grau de resistência baixo, sendo assim, o autor optou por utilizar o sistema de classificação RMR (Quadro 2) em litologias que apresentam valores de resistência entre as classes R2 (+) a R6, o sistema de classificação *Weak Rocks* para litologias que apresentam valores de resistência R0 e R2 (-) (Quadro 3).

Quadro 2 - Parâmetros e pesos relativos para classificação geomecânica no sistema RMR. Traduzido de Bieniawski (1993).

1 - PARÂMETROS DE CLASSIFICAÇÃO E SEUS PESOS									
PARÂMETROS			INTERVALO DE VALORES						
1	Resistência do material intacto	Índice de resistência à carga pontual (Mpa)	> 10	4 - 10	2 - 4	1 - 2	Para esses valores baixos, é preferível realizar o teste de compressão uniaxial		
	Resistência à compressão uniaxial (Mpa)		> 250	100 - 250	50 - 100	25 - 50	5 - 25	1 - 5	< 1
	Peso		15	12	7	4	2	1	0
2	Qualidade do testemunho (%): RQD (do inglês - <i>Rock Quality Designation</i>)		90 - 100	75 - 90	50 - 75	25 - 50	< 25		
	Peso		20	17	13	8	3		
3	Espaçamento das descontinuidades		> 0,6 m	0,6 m - 2 m	200 m - 600 mm	60 mm - 200 mm	< 60 mm		
	Peso		20	15	10	8	5		
4	Condição das descontinuidades		Superfícies muito rugosas descontinuas, fechadas, paredes duras	Superfícies pouco rugosas, abertura < 1 mm, paredes duras	Superfície pouco rugosa, abertura < 1 mm, paredes moles	Superfícies estriadas ou preenchimento < 5 mm ou abertura de 1 mm - 5 mm, contínuas	Preenchimento mole > 5 mm ou abertura > 5 mm, contínuas.		
	Peso		30	25	20	10	0		
5	Água subterrânea	Infiltração em 10 m de túnel (L/min)	0	< 10	10 - 25	25 - 125	> 125		
	Relação entre a pressão da água na fratura e a tensão principal		0	< 0,1	0,1 - 0,2	0,2 - 0,5	> 0,5		
	Condições gerais		Seco	Umedecido	Úmido	Gotejamento	Fluxo abundante		
	Peso		15	10	7	4	0		
2 - PESO DE AJUSTE EM FUNÇÃO DA ORIENTAÇÃO DAS DESCONTINUIDADES									
Direção e mergulho das descontinuidades			Muito favorável	Favorável	Aceitável	Desfavorável	Muito desfavorável		
Peso	Túneis		0	-2	-5	-10	-12		
	Fundações		0	-2	-7	-15	-25		
	Taludes		0	-5	-25	-50	-60		
3 - CLASSE DE MACIÇOS ROCHOSOS DETERMINADA PELA SOMATÓRIA DOS PESOS									
Somatória dos pesos			100 - 81	80 - 61	60 - 41	40 - 21	< 20		
Classe n°			I	II	III	IV	V		
Descrição			Muito bom	Bom	Regular	Pobre	Muito pobre		
4 - CARACTERÍSTICAS DOS MACIÇOS ROCHOSOS SEGUNDO A CLASSIFICAÇÃO RMR									
Classe n°			I	II	III	IV	V		
Stand-up time médio			20 anos para abertura de 15 m	1 ano para abertura de 10 m	1 semana para abertura de 5 m	10 horas para abertura de 2,5 m	30 minutos para abertura de 1 m		
Coesão da massa rochosa (kPa)			> 400	300 - 400	200 - 300	100 - 200	< 100		
Ângulo de atrito (graus)			> 45	35 - 45	25 - 35	15 - 25	< 15		

Quadro 3 - Parâmetros de resistência da ISRM modificada (Traduzido de Martin & Stacey,2018).

ÍNDICE DE RESISTÊNCIA	DESCRIÇÃO	RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO UNIAXIAL Martelo	AVALIAÇÃO DE CAMPO						MÉTODO UTILIZADO
			Martelo	risco canivete ¹	queda canivete	raspagem canivete ¹	risco unha	pressão manual	
R6	Extremamente resistente	>250	lasca	não	não	não	não	não	RMR 1993 não não não não
R5	Muito resistente	250-100	quebra com dificuldades e vários golpes	não	não	não	não	não	
R4	Resistente	100-50	quebra com vários golpes	risco superficial	-	não	não	não	
R3	Medianamente resistente	50-25	quebra com dificuldade com um golpe			com muita dificuldade	não	não	
R2	R2+ (concreto)	Pouco Resistente	25 - 10	quebra com um golpe	risca	ponto pequeno	com dificuldade	não	WEAK
	R2- (solocimento)	Branda	10 - 5	fragmenta com um golpe		ponto grande	produz pó	risco superficial	
R1	R1+ (tijolo)	Muito branda superior	5 - 3		risca fundo	com facilidade produz muito pó	risca	quebra pontualmente	
	R1- (saprólitos)	Muito branda inferior	3 - 1	desagrega	corta (separa)	penetra	descasca esculpe	penetra	quebra as bordas
R0	Extremamente branda	1 - 0,25	-		penetra	-	corta	desagrega	EXTREMELY WEAK

¹ varia conforme presença de minerais de hábito lamelar

Método de avaliação da consistência das Rochas
1 - Reação ao golpe com martelo de geólogo
2 - Resistência ao risco com a ponta do canivete
3 - Reação à queda do canivete
4 - Reação à raspagem da lâmina do canivete na borda da amostra
5 - Reação ao risco com a unha
6 - Reação à pressão dos dedos

Índice de Reação ao Método	
	ALTA
	MÉDIA
	BAIXA

A elaboração de seções geomecânicas compreendeu a segunda etapa do trabalho e foi realizada a partir do banco de dados de sondagens validado, resultando em 24 seções guias a partir das classes geomecânicas RMR (1993) e classes geomecânicas do *Weak Rocks* (2018), com espaçamento médio de 1.668 m entre as seções. Para as

seções do grau de intemperismo e do grau de resistência foram geradas 12 seções. Todas estas 24 seções seguiram padrão de melhora da qualidade do maciço com o aumento da profundidade, considerando os materiais de cobertura para agrupar regiões com comportamentos geomecânicos similares (Figura 1).

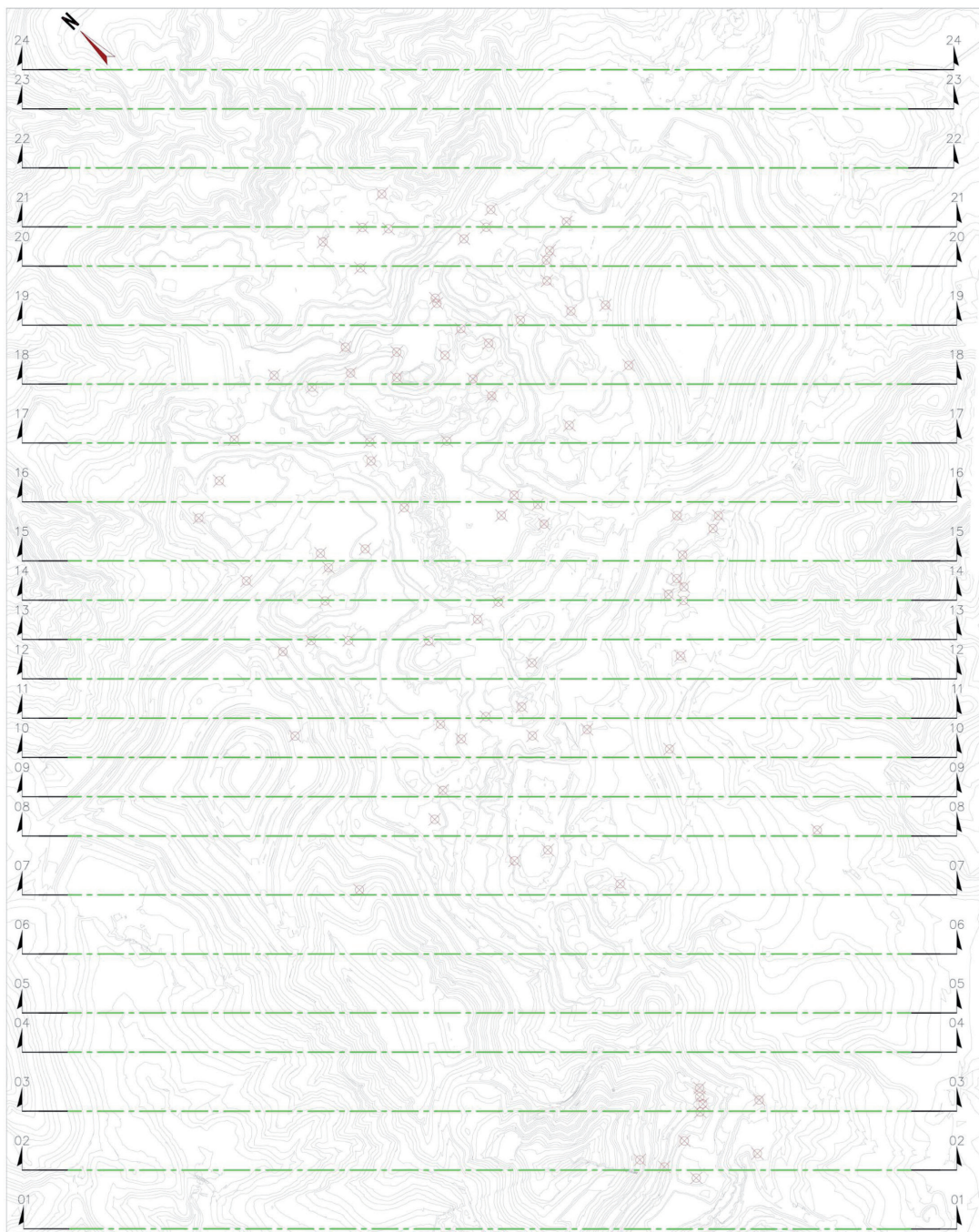


Figura 1 - Localização das seções geomecânicas elaboradas e as sondagens utilizadas.

A produção do modelo geomecânico, último procedimento desta pesquisa, foi realizada com o programa Leapfrog Geo a partir dos dados validados das sondagens, mapeamento, seções geomecânicas e de modelo geológico preexistente. Superfícies foram geradas a partir das seções geomecânicas para, posteriormente, criar os sólidos. Os sólidos tomaram como referência as superfícies e os dados de sondagens, de modo a representar todo o registro geológico amostrado. A estimativa do modelo de blocos teve início com a validação dos sólidos a partir do modelo de blocos geológicos, onde os blocos tiveram 70 m, os sub-blocos tiveram 10 m, e o número de blocos para X, Y e

Z, foi de 60, 44 e 120, respectivamente. Devido à dimensão dos blocos, foi realizado carimbo com as classes geomecânicas identificadas nos sólidos (Figura 2A) e nas lentes (Figura 2B), para que não houvesse subestimativa ou perda de informações de camadas delgadas. A análise exploratória dos dados foi realizada para identificar padrões e auxiliar na escolha de parâmetros das estimativas. A estimativa foi realizada com o método vizinho mais próximo e inverso do quadrado da distância, com raio de busca de 400, 600 e 200 m para X, Y e Z, respectivamente. Os resultados foram então comparados em termos de volume, média e comportamento espacial.

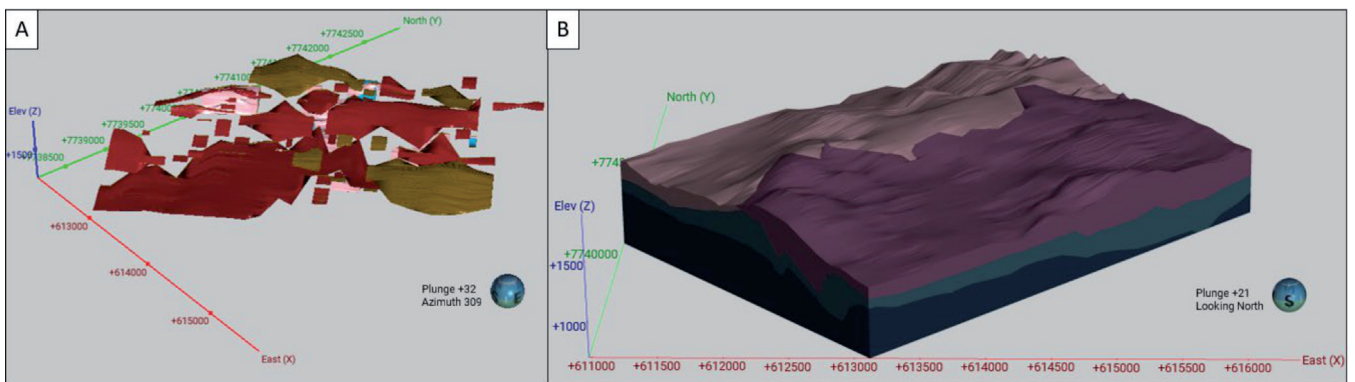


Figura 2 - (A) Sólidos gerados das classes; (B) Lentes após a geração das superfícies.

Esta pesquisa estudou 21.996,00 metros amostrados em testemunhos de sondagem, contido em 180 furos de sondagens, onde foram agrupados materiais de comportamento semelhante nos parâmetros utilizados, a partir da documentação dos furos.

A fim de se averiguar a veracidade das informações descritas nas sondagens, realizou-se uma série de validações. A primeira parte da análise concentrou-se no levantamento das informações faltantes, revelou que para os 21.996,00 metros de sondagem analisados, 68% não possuem a descrição do preenchimento de descontinuidades; em 30% dos metros investigados na base de dados não há descrição da abertura das descontinuidades; em 26% não há descrição do intemperismo da parede; para 21% a rugosidade não é descrita; em 17% a estrutura não é descrita e também em 17% o tipo de material de preenchimento não é apontado. Nos intervalos que não possuem descrição de algum dos parâmetros supracitados, quando pos-

sível, foi adotado valores de referência de outros intervalos próximos.

Todos os intervalos apresentavam a descrição do material quanto a litologia, possui predominância de variedades de itabiritos (46,1%), filitos (15,0%), hematitas (8,7%); e apresenta contribuição de aterro (8,0%), xistos (6,6%), rochas intrusivas (4,3%), quartzito (3,1%), sem recuperação (2,0%), laterita (1,8%), material rolado (1,4%), canga (1,2%), brecha (1,1%), material pilha de estéril (0,5%) e dolomito (0,3%).

As etapas seguintes consistiram na validação das informações descritas, comparando aqueles que possuem correspondência.

A validação da coerência entre os Parâmetros de Resistência e o Grau de Alteração utilizando os critérios apresentados no Quadro 4, demonstrou uma aderência satisfatória entre os dois parâmetros, visto que 85,1 % da correlação entre os dados é compatível, 12,4 % são incompatíveis e 2,5 % não puderam ser determinadas pela ausência de descrição de algum dos parâmetros.

Quadro 4 - Critério de Validação parâmetros de resistência frente ao grau de alteração.

Índice de Resistência		Grau de alteração	Resistência da Litologia
R0	Extremamente Branda	W6 W5 W4	Friável
R1 (-)	Muito Branda (inferior)		
R1 (+)	Muito Branda (superior)		
R2 (-)	Branda	W4 W3	Média
R2 (+)	Pouco resistente		
R3	Medianamente resistente		
R4	Resistente	W3 W2 W1	Compacta
R5	Muito resistente		
R6	Extremamente resistente		

Foi realizada uma análise na aderência entre os valores de fraturamento e RQD nos intervalos amostrais. Para a primeira classes de fraturamento foi identificada apenas uma amostra, sendo o RQD de 59,3; para a segunda classe o RQD médio vale 84,9 e foi calculado a partir de 8 amostras; a terceira classe possui 14 amostras e RQD médio

de 66,1; a quarta classe apresenta 42 amostras que exibem RQD médio de 33,5; a quinta classe teve 41 amostras computadas e RQD médio de 13,4; e a sexta classe possui 173 amostras com RQD médio de 0,2. A correlação entre os parâmetros é exibida na Figura 3 .

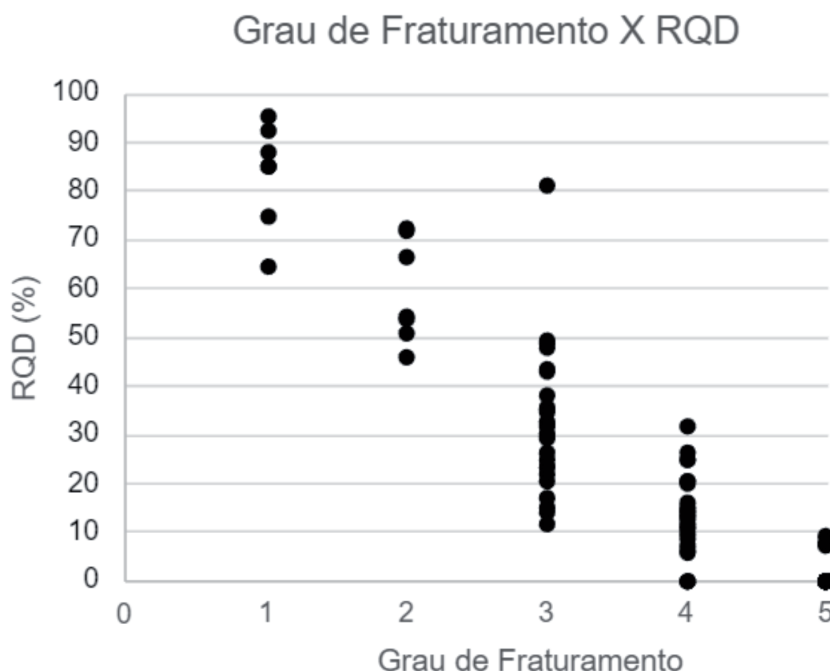


Figura 3 – Correlação entre Grau de Fraturamento e RQD.

Para a análise do grau de fraturamento frente ao espaçamento das descontinuidades, utilizou-se cinco classes de acordo com o fraturamento indicado no intervalo amostral. Para a primeira classe de fraturamento (maciço), foi identificada apenas uma amostra, sendo o espaçamento médio de 3,0 mm.; para a segunda classe (pouco fraturado) o espaçamento médio também foi de 3,0 mm, calcu-

lado a partir de 4 amostras; a terceira classe (moderadamente fraturado) possui 28 amostras e espaçamento médio de 2,0 mm.; a quarta classe (muito fraturado) apresenta 16 amostras que exibem espaçamento médio de 1,8 mm.; a quinta classe (intensamente fraturado) teve 37 amostras computadas e espaçamento médio de 1,7 mm. A correlação entre os parâmetros é exibida na Figura 4.

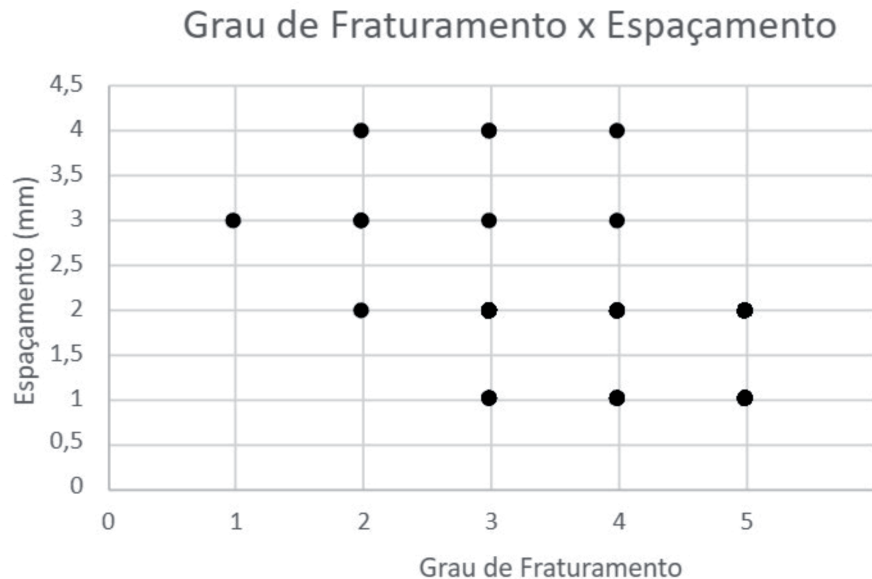


Figura 4 - Correlação entre Grau de Fraturamento e Espaçamento

Uma última análise foi realizada comparando a tipologia do material quanto à resistência frente ao ensaio de peneiramento. Esta análise só foi possível ser realizada em 572 intervalos (34,0%) dos 1306 intervalos totais, pois apenas estes apresentavam ambas as variáveis. A primeira classe contempla 252 intervalos (19,3%) que foram classificadas como material litológico friável, a classe litológica do tipo médio foi identificada em 10 intervalos (0,8%) e a classe material litológico do compacto teve 76 intervalos identificados (5,8%). Dos 572 intervalos, 234 (17,9%) foram definidos como inválidos devido a não aderência dos parâmetros de validação, ou seja, havia divergências entre parâmetro litológico quanto a resistência descrita na sondagem e o resultado de ensaio granulométrico executado.

Os resultados acima submetidos a validação foram então agrupados e se dois parâmetros ou mais estiveram ausentes, tais como grau de fraturamento, RQD, resistência e grau de intempe-

risimo, o intervalo amostral com estes parâmetros faltantes foi descartado.

Finalizada a validação cruzada de dados e informações, o banco de dados foi considerado validado, onde 21.644,06 m (98,4 %) dos intervalos amostrados apresentaram dados e informações compatíveis com as descrições fornecidas e 351,94 m (1,6 %) foram considerados incompatíveis. Os dados e informações incompatíveis foram assim desconsiderados por não possuírem as informações necessárias para a classificação geomecânica.

Para todos os intervalos amostrais validados foram aplicados os critérios de classificação geomecânica *Weak Rocks* (Martin & Stacey, 2018) e *Rock Mass Rating* (Bieniawski, 1993). Foram determinadas nove classes gerais (Quadro 5) sendo cinco delas relativas ao universo RMR (67,6%), quatro delas representativas do universo *Weak Rock* (19,7%) e duas adicionais que representam os perfis intempéricos de solo desenvolvidos na cava e aterros (12,8%).

Quadro 5 - Correlação entre índice de resistência e o sistema de classificação utilizado (Martin & Stacey, 2018 Adaptado)

Índice de Resistência		Resistência à compressão Uniaxial (Mpa)	Sistema de classificação utilizado	Classe Geomecânica
R0	Extremamente Branda	1,0 - 2,5	Weak Rocks	Extremely Weak
R1 (-)	Muito Branda (inferior)	3,0 - 1,0		Very Weak
R1 (+)	Muito Branda (superior)	5,0 - 3,0		Weak
R2 (-)	Branda	10,0 - 5,0		
R2 (+)	Pouco resistente	25,0 - 10,0	RMR	Classe V
R3	Medianamente resistente	50 - 25		Classe IV
R4	Resistente	100 - 50		Classe III
R5	Muito resistente	250 - 100		Classe II
R6	Extremamente resistente	>250		Classe I

No universo de classificação geomecânica utilizando a metodologia RMR, à classe de maciço II (bom) o valor médio de RMR determinado foi de 69,7 e apresentou desvio padrão de 6,1; para a classe de maciço III (médio) o RMR médio foi de 50,4 e a dispersão das medidas foi de 5,7; para a classe de maciço IV (pobre) o valor médio de RMR foi de 36,0 e o desvio padrão foi de 5,7.

Após a análise estatística dos dados para o universo RMR (Bieniawski, 1993), notou-se que a classe de maciço IV apresenta valor médio de RMR 35 para o Itabirito e o Filito; a classe de maciço III apresenta valor médio de RMR 50 para o Itabirito e Filito, valor médio de RMR de 51 para as Hematita e RMR de 52 para as Rochas Intrusivas; a classe de maciço II apresenta amostragem apenas no Itabirito com valor médio de RMR 70.

Nas amostras representativas ao universo de classificação geomecânica *Weak Rocks* (Martin & Stacey, 2018), obteve-se que 205 amostras (31,4 %) foram classificadas como *weak rock*; amostras classificadas como *very weak* foram 136 (20,8 %); e *extremely weak* representam 61 (9,3 %) amostras.

Das litologias representativas englobadas pelo universo de classificação *Weak Rocks* (Martin & Stacey, 2018), o Itabirito apresenta 235 intervalos, divididos nas classes: *weak* (59,6%) *very weak* (27,7 %) e *extremely weak* (12,8%); o Filito apre-

senta 70 intervalos amostrais divididos em: *weak* (27,1%), *very weak* (51,4%) e *extremely weak* (21,4%) *very weak* (51,4%); as hematitas possuem 36 intervalos amostrais divididos em: *weak* (66,7%), *very weak* (22,2%) e *extremely weak* (11,1%); as rochas intrusivas possuem 19 intervalos amostrais, divididas nas classes: *weak* (26,3%), *very weak* (68,4%) e *extremely weak* (5,3%); o Quartzito possui 18 intervalos amostrais divididos nas classes: *weak* (44,4%), *very weak* (27,8%) e *extremely weak* (27,8%).

As 24 seções litológicas-geomecânicas intersectaram todas as classes litológicas e todas as classes geomecânicas, representando o comportamento maciço ao longo de 66,6 km de transectos. A cava é predominantemente coberta por solos lateríticos, aterro e canga. Este comportamento é verificado em todas as seções e evidenciado pela predominância de classes geomecânicas pertencentes às classes *extremely weak*, *weak* e maciços classe IV, III e II. As classes geomecânicas são controladas pelas dobras do terreno, assim como a litologia e a profundidade.

A área modelada representa 18 km² e ocorreu somente onde existiram seções geomecânicas, resultando em um modelo geomecânico onde cada bloco gerado pelo modelo em determinada classe possuem o mesmo valor (Figura 5).

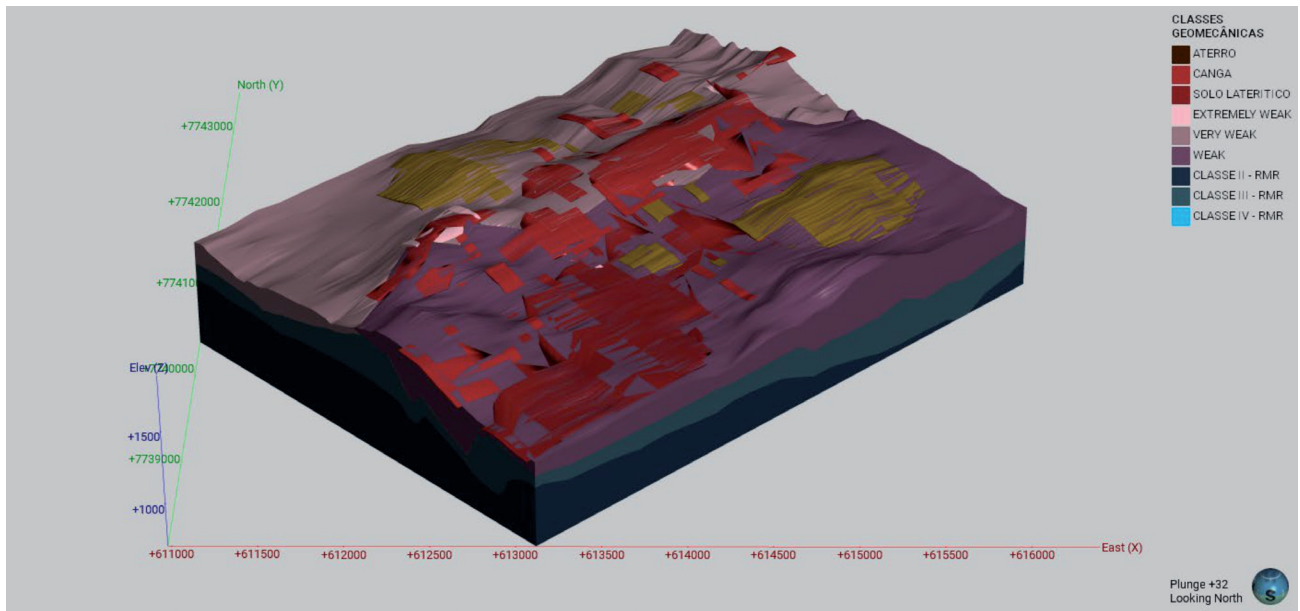


Figura 5 - Modelo Geomecânico blocos tridimensionais com os blocos carimbados por classe.

Considerando o método *Weak Rocks* (Martin & Stacey, 2018), a classe *extremely weak* ocorre como lentes e camadas não contínuas, de até 50m de espessura, tanto na formação ferrífera friável como nas encaixantes estéreis, e é restrita a profundidades superiores a cota 1100m. A classe *very weak* é identificada como uma camada contínua nas encaixantes leste, limitada pelo contato com a formação ferrífera, ocorrendo subordinadamente como lentes na formação ferrífera friável e no encaixante oeste. As rochas classificadas como *weak* são as mais frequentes descritas nas sondagens e ocorrem na forma de camadas contínuas nas encaixantes da porção oeste e em meio a formação ferrífera friável, tanto como lentes como em corpos espessos.

Considerando a classificação de Bieniawski (1993) a classe de maciço IV não é comum, pois ocorre sob forma de lentes, tanto na formação ferrífera quanto nas encaixantes (filito e rochas intrusivas). Apresenta resistência variando entre R2+ até R6 e grau de alteração W2 a W4. A classe de maciço III é predominante, quando consideramos Bieniawski (1993) e ocorre principalmente nas tipologias compactas (lentes de hematita e itabirito), no corpo principal de itabirito em profundidade e em rochas encaixantes profundas. As cotas de topo deste contato variam entre 1500m e 975m, já as cotas de base entre 1300m e 672m. A espessura do maciço de classe III varia entre 75m e 288m.

O grau de resistência encontrado é entre R2+ a R6, com alteração entre W1 e W4.

A classe de maciço II predomina em rochas encaixantes estéreis e formação ferrífera em profundidades, em média, abaixo da cota 1200 m. Raramente ocorre em lentes de hematita e itabirito compacto em meio a formação ferrífera friável, além da ocorrência pontual de uma grande lente na rocha intrusiva na porção sudoeste. Esta classe possui grau de resistência entre R3 e R6 e alteração entre W1 a W4. A classe de maciço I foi obtida em apenas uma sondagem, entretanto não foi representativa o suficiente para ser modelada devido a sondagens mais próximas exibirem outro comportamento geomecânico.

3. DISCUSSÃO

Após todas as análises realizadas nos intervalos amostrais dos furos de sondagem, a cava hipotética é composta pelas litologias predominantes: Itabiritos, Filitos e Hematitas, além de Quartzitos, Rochas Intrusivas e coberturas. As litologias que contêm formações ferríferas foram divididas entre friáveis, médias e compactas de acordo com os ensaios de peneiramento, onde foi feito uma validação entre a descrição tipológica de resistência da litologia com o ensaio de peneiramento, nos intervalos em que os ensaios foram efetivamente

realizados, permitindo a validação e a desconsideração de certos trechos que não apresentaram resultados de correlação entre os dados.

Para todos os intervalos foi realizada a classificação geomecânica do trecho, através dos sistemas RMR e *Weak Rocks*. As litologias são preferencialmente mais representativas no sistema de classificação *Weak rocks*, com as classes *very weak/weak rock* associada aos litotipos friáveis das formações ferríferas. Filitos e Rochas Intrusivas com valores médios de resistência R2; a classe *extremely weak* restringe-se apenas no setor leste com corpos dispersos com valores médios de resistência R0.

O valor de resistência à compressão uniaxial foi estimado, sendo recomendada a execução de ensaios triaxiais em litologias que apresentem valores de resistência < 25 Mpa, restrito a classes geomecânicas regidas pelo universo de classificação *Weak Rocks*, sendo representativo na cava

com maciço classe *extremely weak, very weak, weak* e RMR classe V

As litologias regidas pelo sistema RMR estão associadas às formações ferríferas médias e compactas em maior expressividade, e pequenas lentes associadas aos Filitos. A Classe III do sistema RMR é a com maior expressividade na cava, relacionado aos itabiritos médios com alto a muito alto grau de fraturamento e a Rocha intrusiva no setor oeste; a classe IV associado a Itabiritos médios com grau de fraturamento muito alto e Filito da porção nordeste da cava; a classe II ocorre majoritariamente nos litotipos compactos e médios com valores de resistências elevado (R4).

As classes de maciço RMR (Classes II, III e IV) ocorrem, em superfície, como lentes e corpos em meio de maciços classificados como *Weak Rock*. A partir da cota 1150m de acordo com o modelo, ocorrem apenas maciços Classe II (Figura 6).

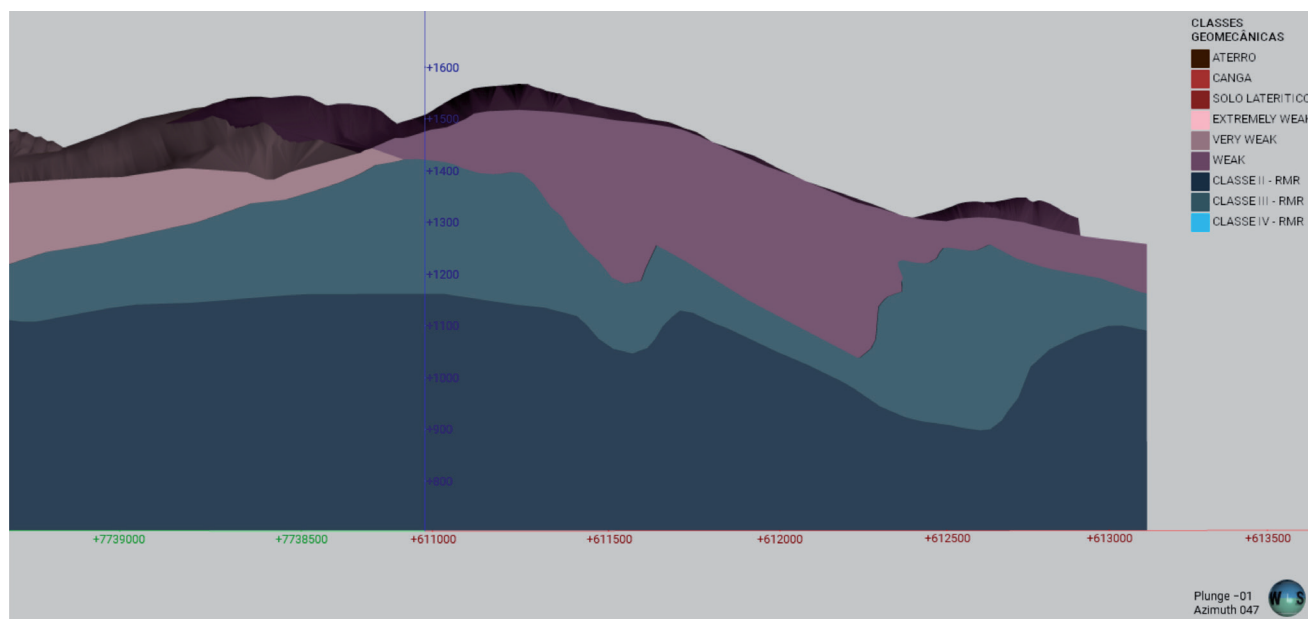


Figura 6 - Seção tipo com as principais classes geomecânicas, indicando a ocorrência superficial das variedades *Weak Rocks* e Classes RMR não aflorantes.

Apesar de haver diversos intervalos com parâmetros de classificação faltantes, não houve implicações para a determinação da classe geomecânica na área. Este fato pode ser atribuído a escolha de parâmetros de classificação conservadores, quando há disponibilidade de variáveis diretamente correlacionáveis, sempre preconizando

a segurança nesta associação. A qualidade do modelo proposto mais está associada à quantidade e qualidade dos dados de entrada que dos métodos utilizados para a classificação.

Na validação do método de interpolação estatístico mais adequado para a elaboração do modelo geomecânico da cava proposta, o método do

Vizinho Mais Próximo é o mais adequado, pois este método estima uma quantidade maior de valores para blocos vizinhos, atribuindo valores apenas no alcance do raio de busca determinado, tendendo a diminuir com o aumento da distância.

Durante o processo de revisão e validação do modelo geomecânico elaborado, algumas divergências foram encontradas, quanto à descrição litológica do trecho quando comparada com

a classe geomecânica. A exemplo a Figura 7, onde a litologia é descrita como Itabirito Friável, porém a classe geomecânica produto da modelagem é dita como *Weak*. Essa divergência pode ser explicada pela quantidade de investigações utilizadas na construção do modelo, que apesar de numerosas (180 furos) espaçadas em 18 km² acabam não sendo o suficiente para um modelo idêntico à realidade.

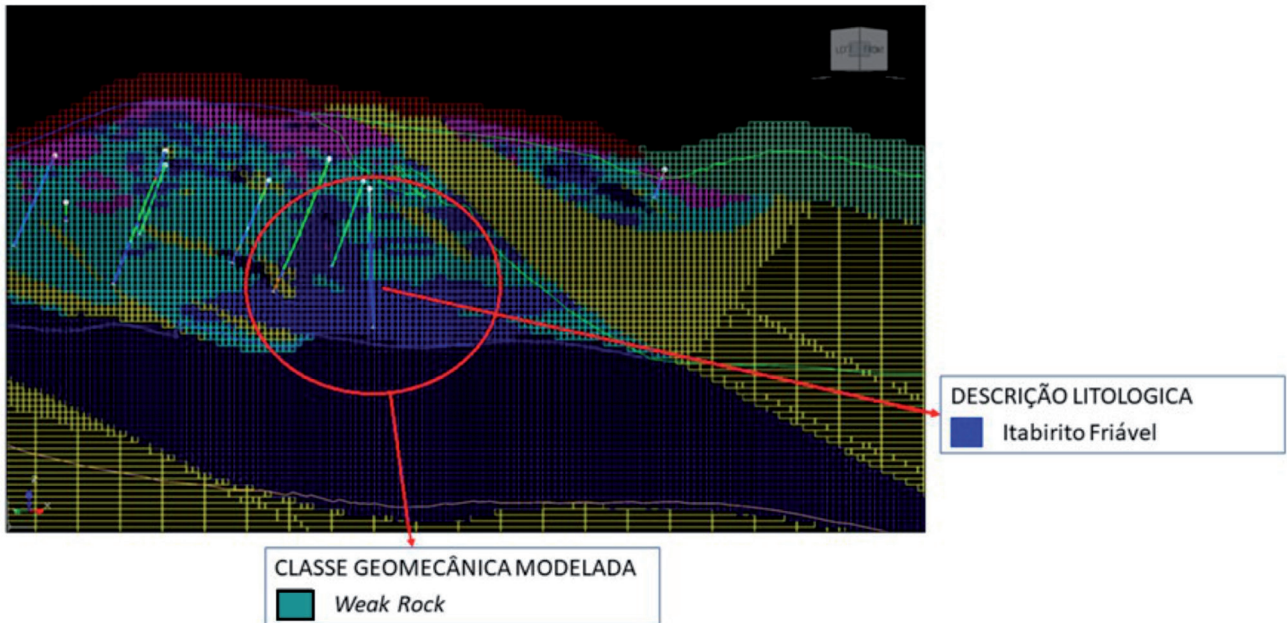


Figura 7 - Inconsistências encontradas entre o Modelo Geomecânico elaborado e descrição litológica no furo de sondagem.

4. CONCLUSÕES

A validação dos parâmetros de descrições geomecânicas correlacionáveis de grau de resistência da litologia (friável, média e compacta) e granulometria apresentaram uma correlação positiva valor de $R^2 = 0,98$, indicando que as litologias descritas como friáveis apresentam valores passantes na peneira 200 mm < 30%. Apesar da boa correlação dos dados, apenas em 572 intervalos (34,0%) foi possível essa validação devido à ausência de informação de ensaio de peneiramento.

A correlação entre os parâmetros de classificação de grau de fraturamento e RQD apresentou uma boa correlação entre os dados com valores de $R^2 = 0,87$, maciço com valores de baixo RQD = 40% estão restritos a grau de fraturamento F4 e F5. Os valores que não apresentaram correlação

podem estar relacionados a ausência de informações das variáveis grau de fraturamento ou RQD.

Apesar de que a ausência de alguns parâmetros de descrição das sondagens não influenciam na qualidade dos dados de entrada e posterior classificação geomecânica do maciço, impossível não mencionar que no mercado de investigações brasileiro voltado para projetos geotécnicos há uma carência notável em padronização e controle de qualidade, não utilizando metodologias de sucesso na exploração mineral como o QAQC (*quality assurance and quality control*), sendo imprescindível a definição e aplicação de protocolos e procedimentos, boas práticas, controle nas atividades de campo e na aquisição de dados geológicos.

O modelo geomecânico elaborado é satisfatório, sendo mais representativo e preciso nas cotas próximas à superfície e em regiões que concentram ao menos um furo de sondagem a cada 80

m para o modelo como um todo (18 km²), sendo concentrado na região de interesse mineral.

Para a elaboração de projetos geotécnicos em áreas minerárias a utilização de modelos geomecânicos com o *input* de dados e calibrações das variáveis presentes nos intervalos de descrição aqui utilizados atende satisfatoriamente, prevenindo mecanicamente o comportamento do maciço de interesse. Durante a execução de projetos referenciados por modelos assim propostos, é indispensável a realização de mapeamentos geológicos-geotécnicos e a obtenção de parâmetros geomecânicos, bem como o entendimento do comportamento estrutural das litologias em superfície, para refinar o modelo utilizado e executado na atividade proposta, de forma segura e eficiente.

Até a data de elaboração deste artigo, não pudemos encontrar nenhum tipo de norma ou protocolo que padronize a obtenção de dados geomecânicos de sondagens e espaçamento de investigação em projetos de cavas a céu aberto. Sugerimos a utilização para o espaçamento mínimo de investigação diretas os preconizados em (DNIT6b) com no mínimo uma sondagem a cada 120 m de corte. Para os critérios de descrição de trechos geomecânicos, recomenda-se a utilização dos critérios metodológicos aqui utilizados.

REFERÊNCIAS

OLIVEIRA, A. M. S. *et al.* Geologia de engenharia e ambiental. São Paulo. ABGE, v. 2, p. 479, 2018.

AQUINO, I. B. M.; ROLO, R. M.; ZINGANO, A. C.; LIMA, H. M. Classificação geomecânica prévia do maciço rochoso do entorno de escavações subterrâneas usando modelos de blocos estimados por krigagem dos indicadores. Estudo de caso: mineração fazenda brasileiro-Bahia/Brasil. *Holos*, 4, 1-23, 2021

BIENIAWSKI, Z.T. 1973. Engineering classification of *rock* masses. *Trans S. Afr. Inst. Civ. Eng.*, 15:335-44. Bieniawski, Z. T. 1993. Classification of *rock* masses for engineering: the RMR system and future trends. In:

BRAGA NETO, J. A.. Classificação geomecânica de taludes de mineração a céu aberto. 2020. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília. 174 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES - DNIT. DIRETORIA DE PLANEJAMENTO E PESQUISA. COORDENAÇÃO GERAL DE ESTUDOS E PESQUISA. INSTITUTO DE PESQUISAS RODOVIÁRIAS. Diretrizes básicas para estudos e projetos rodoviários: escopos básicos / instruções de serviço. - 3. ed. - Rio de Janeiro, 2006

GUIDICINI, G. *et al.* Um método de classificação geotécnica preliminar de maciços rochosos. *Semana Paulista de Geologia Aplicada*, v. 4, p. 285-331, 1972.

HAMMAH, R. E.; CURRAN, J. H. Geostatistics in geotechnical engineering: Fad or empowering?. In: *GeoCongress 2006: Geotechnical Engineering in the Information Technology Age*. 2006. p. 1-5.

IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas. 1997. Caracterização geomecânica do maciço rochoso do Trecho Faria Lima - Vila Sônia, Linha 4 - Amarela do Metrô de SP. Relatório no 34902.

ISRM. *Rock* characterization, testing and monitoring. ISRM suggested methods, p. 211, 1981.

KRIGE, D. G. A practical analysis of the effects of spatial structure and of data available and accessed, on conditional biases in ordinary kriging. In: *Geostatistics Wollongong '96. Proceedings of the 5th International Geostatistical Congress*, Wollongong, NSW, Australia. 1996. p. 799-810.

LIU, F. *et al.* Geostatistics-block-based characterization of heterogeneous *rock* mass and its application on ultimate pit limit optimization: a case study. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, v. 80, n. 2, p. 1683-1700, 2021.

MARTIN, D.; STACEY, P. (Ed.). Guidelines for open pit slope design in *weakrocks*. CSIRO PUBLISHING, 2018.

VATCHER, J.; MCKINNON, S. D.; SJÖBERG, J. Developing 3-D mine-scale geomecanical models in complex geological environments, as applied to the Kiirunavaara Mine. *Engineering geology*, v. 203, p. 140-150, 2016