

Análise Estatística e Influência do Tipo de Quebra dos Ensaios de Resistência à Compressão Uniaxial das Litologias que Compõem a Mina Ingá

Camila Broetto Milli

Estudante, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Brasil, millibcamila@gmail.com

João Pedro Barbosa Amaral

Engenheiro de Minas, AngloGold Ashanti, Crixás, Brazil, JPAmaral@anglogoldashanti.com.br

João Eduardo Fochi Ramires

Geólogo, AngloGold Ashanti, Crixás, Brazil, JERamires@anglogoldashanti.com.br

Jefferson A. Araújo Júnior

Estudante, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Brasil, jfjr@gmail.com

Jairo Henrique da Silva

Engenheiro Geólogo, AngloGold Ashanti, Crixás, Brazil, JHdasilva@anglogoldashanti.com.br

RESUMO: Compreender os parâmetros do maciço rochoso é fundamental para caracterização geotécnica. A resistência da rocha intacta, obtida por testes de *Uniaxial Compressive Strength* (UCS), contribui não só para caracterização geomecânica de maciços, mas também é fundamental para construção de modelos numéricos, dimensionamento de escavações e de pilares. Tendo em vista essa importância, ensaios geotécnicos são realizados em laboratório interno das operações da AngloGold Ashanti, em Crixás – GO, onde são obtidos valores de resistência para diferentes tipos de rocha, gerando um robusto banco de dados. Este trabalho busca atribuir valores representativos de UCS de cada litologia da mina subterrânea Ingá, considerando as rupturas que ocorrem em ensaios de rocha intacta e de descontinuidades, além de compreender as variáveis que podem influenciar nos resultados. Isto será obtido através de ensaios UCS de corpos de prova oriundos de furos de sondagem. Com a ruptura do corpo de prova, parâmetros como tipo de quebra (na foliação, na fratura ou na rocha intacta) e grau de confiança (alto, médio ou baixo) serão levantados. Os resultados serão processados nos aplicativos Excel e GEM4D com ferramentas estatísticas como coeficiente de variação, média, quartis e mediana, afim de eliminar *outliers* e definir tendências. Dessa forma, é esperado maior nível de confiabilidade nos dimensionamentos geomecânicos em termos de parâmetros de resistência.

PALAVRAS-CHAVE: UCS, Estabilidade Geotécnica, Maciço Rochoso, Resistência de Rocha Intacta, Mineração Subterrânea.

ABSTRACT: Understanding rock mass parameters is crucial for geotechnical characterization. The rock mass strength, obtained from Uniaxial Compressive Strength (UCS), tests contributes to the rock mass characterization and is essential for guiding underground mines and open pits in terms of design parameters, numerical modeling and stope design. Due to its importance, geomechanical tests are conducted in a Rock Mechanics internal laboratory of AngloGold Ashanti's operations in Crixás - Goiás - Brazil, where strength values from different rocks are obtained, forming a significant database. This study aims to determine representative strength values, from each lithology from Ingá Mine, considering the disruptions that occur in the intact rock and in discontinuities, in addition to understanding the variables that can influence the results. This will be achieved by UCS tests from specimens obtained by boreholes. With the rupture of the specimen, parameters such as break type (in foliation, in fracture or in intact rock) and confidence level (high, medium or low) will be found. The results will be processed in the software Excel and GEM4D with statistical tools as

coefficient of variation, mean, boxplot and median, in order to eliminate outliers and define trends. Thus, a higher level of reliability is expected in geomechanical designs in terms of strength parameters.

KEYWORDS: UCS, Geotechnical Stability, Rock Mass, Intact Rock Resistance, Underground Mining.

1 Introdução

Ensaaios geomecânicos são realizados em laboratório na Mineração Serra Grande (MSG), de propriedade da Anglo Gold Ashanti, em Crixás–GO, onde são obtidos valores de resistência de rocha intacta para diferentes tipos de rochas.

Devido à dificuldade de obter resultados de ensaios de rocha intacta, principalmente quando se trata de rochas metamórficas foliadas e fraturadas, é fundamental avaliar a influência das descontinuidades nos resultados obtidos. Por esta razão, nos ensaios de *Uniaxial Compressive Strength* (UCS) realizados na MSG são sempre observadas que as rupturas ocorrem em diferentes posições dos corpos de prova e, algumas vezes, são influenciadas por descontinuidades pré-existentes como fraturas e foliação. Diante da rotina de mapeamento de galerias subterrâneas e descrição de furos de sondagem, tem sido observado que algumas peculiaridades do maciço rochoso, tais como a composição mineralógica, foliação e grau metamórfico, influenciam nos parâmetros de resistência do maciço, refletindo nos ensaios de amostras analisados.

Nas operações MSG, o maciço rochoso é composto por, aproximadamente, doze litologias, das quais serão analisadas as seis principais que compõem a Mina Ingá e estão diretamente relacionadas aos corpos de minério e por sua vez, às escavações da mina subterrânea. As escavações são realizadas, predominantemente, em: filitos carbonosos (GXN), com foliação marcante, friável e composta por material carbonoso, quartzo, muscovita e biotita de granulação fina; metagrauvacas (MG), rocha foliada marcada pela biotita, muscovita e clorita; quartzo-biotita-muscovita-granada xistos (GNCX), rocha marcada pela presença do mineral granada, venulações de quartzo e/ou carbonato; quartzo-clorita-carbonato-biotita-granada-muscovita-anfíbólio xisto (CXV), rocha foliada com níveis de clorita, muscovita, biotita, carbonato, quartzo e granada; dolomito (DOL), rocha maciça a levemente foliada, constituída por carbonatos e quartzo de granulação fina e o veio de quartzo (VQZ), rocha branca, vítrea a leitosa, maciça, composta por quartzo (Borges & Campos, 2019).

Observou-se, diante de tantas peculiaridades de cada litologia, a necessidade de ter uma análise minuciosa dos resultados de ensaios de rocha intacta de cada litologia, permitindo obter um valor representativo de UCS para ser utilizado nos softwares de modelamento e nas análises empíricas. Pretende-se também analisar a resistência de fraturas e de descontinuidades que compõe o maciço rochoso, uma vez que as escavações e as detonações que são realizadas pelo desenvolvimento impactam nas descontinuidades (Carvalho, 2019). Os estudos para obtenção deste valor representativo foram realizados seguindo as normas do *Suggested Methods for determining tensile strength of rock materials*, ISRM, 1978.

2 Justificativa

Este trabalho busca atribuir um valor representativo de resistência de rocha intacta para cada grupo litológico da mina subterrânea Ingá, escavação com maior produção no momento da MSG. A resistência da rocha intacta é um dos parâmetros de entrada dos modelos numéricos, os quais auxiliam no dimensionamento de escavações e de pilares, garantindo a segurança no processo minerário. Além disso, será avaliada a influência da presença de descontinuidades nos resultados de UCS obtidos nos ensaios.

3 Metodologia

A metodologia conta com seis etapas. A primeira etapa se trata da revisão bibliográfica da região e da compreensão dos conceitos e dados analisados.

A segunda etapa ocorre após descrição geotécnica de testemunhos de sondagem de furos, da geologia de mina e da exploração, considerando furos que estão dispostos em uma malha de 25 metros, em cinza na Figura 1. É realizada a retirada de um metro de amostra do testemunho, localizada no *hangingwall* ou no *footwall*, até 20 metros do corpo de minério, em amarelo na Figura 1, e é coletada a metragem mais isotrópica

possível, isto é, com o menor número de descontinuidades, uma vez que o maciço é transversalmente anisotrópico.

Na terceira etapa é realizado o corte dos corpos de prova de acordo com as normas ISRM, sendo gerados 5 corpos de prova de UCS, com 100mm de altura e 35mm de diâmetro (diâmetro dos testemunhos de sondagem). São realizadas medidas do ângulo entre a foliação em relação ao eixo do furo e os corpos de prova são ensaiados, todos eles levados à ruptura, obtendo leitura de carga com valores de resistência em kN.

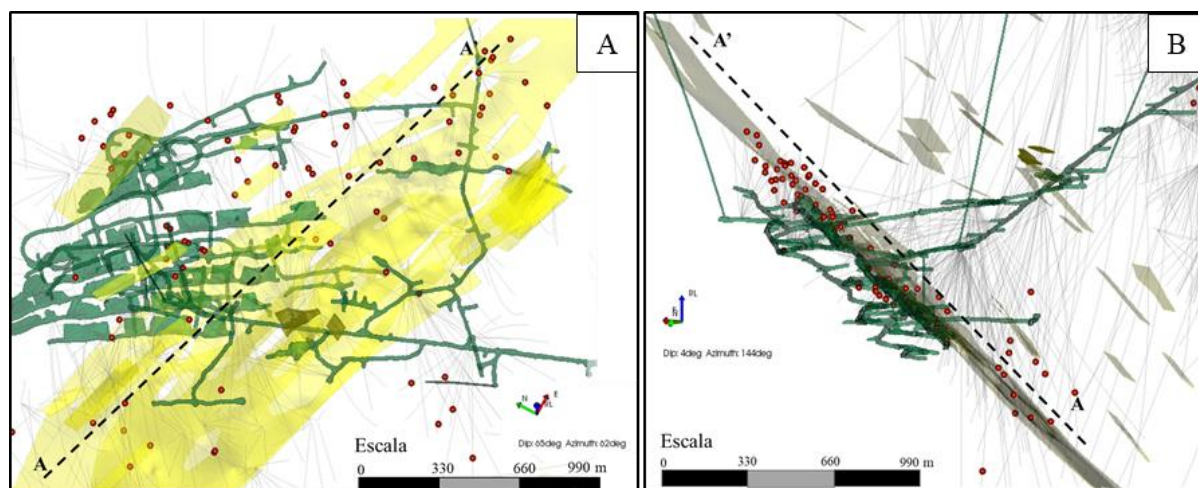


Figura 1. Disposição dos furos de sondagem, da escavação e do corpo de minério e os locais com ensaios geotécnicos da Mina Ingá (pontos vermelhos) (A). Corte do perfil AA' evidenciando a localização das amostras em relação ao *hangingwall* e ao *footwall* do minério (B).

A quarta etapa consiste nas adequações e conversões da leitura de carga para as unidades de medida padrão (MPa), e é obtido o valor final de resistência com adequações para diâmetro de 50 mm (Hoek & Brown, 1980), (Equação 1). A resistência foi estimada com conversão para 50mm de diâmetro de acordo com a equação abaixo:

$$\text{Resistência (MPa)} = \frac{LC}{1000} \cdot \frac{\pi \cdot \left(\frac{D \cdot 0.001}{2}\right)^2}{H} * \left(\frac{50}{H}\right)^{0.18} \quad (1)$$

Sendo,

LC: Leitura de Carga obtida dos ensaios, em kN

H: Altura do corpo de prova, em mm

D: Diâmetro do corpo de prova, em mm

Cada tipo de rocha influencia no valor da resistência da rocha intacta, mas além do grupo litológico, descontinuidades como foliação e fraturas que compõem a rocha e por sua vez, compõem o maciço rochoso, influenciam nos resultados de resistência de rocha intacta. Apesar de Deere & Miller (1966) sugerirem utilizar o Martelo de Schimidt para estimar o *Joint Compressive Strength* (JCS), segundo (Yanrong, 2019), o método para determinar o JCS depende do grau de intemperismo do plano estrutural. Para maciços rochosos não intemperizados ou levemente intemperizados, a resistência da descontinuidade é aproximadamente igual a do maciço rochoso, e o JCS pode adotar o UCS ou PLS (*Point Load Strength*). Deste modo, como os corpos de prova ensaiados no presente estudo são oriundos de rocha sã, os valores obtidos foram tratados como UCS. Sendo assim, as quebras que não ocorreram em rocha intacta, mas que utilizaram do plano da foliação ou de fratura pré-existent, foram contabilizadas, mas setORIZADAS como resistência da descontinuidade.

A quinta etapa ocorre após a ruptura do corpo de prova, com a atribuição de parâmetros como tipo de quebra - na foliação (Sn), na Fratura (Fr) ou na Rocha Intacta (RI). Outro parâmetro adotado é o grau de confiança, sendo definido como alta, média ou baixa. O grau de confiança auxilia na acurácia do tipo de quebra. Por exemplo, um ensaio que possui um tipo de quebra claramente na rocha intacta (Figura 2 (A)) ou na foliação (Figura 2 (B)), possui alto grau de confiança maior que um ensaio que apresenta um tipo de quebra na foliação mas também com características de quebra na rocha intacta (Figura 2 (C)), possuindo um grau de confiança

médio. Caso um ensaio possua tipo de quebra que não permita analisar se o valor foi referente à foliação ou à rocha intacta, o grau de confiança atribuído é baixo. Isto foi feito para que valores de foliação e fraturas pré-existentes não impactem no valor da rocha intacta e vice-versa. Para este estudo foram utilizados apenas tipos de quebra considerados de alta e demédia confiança.

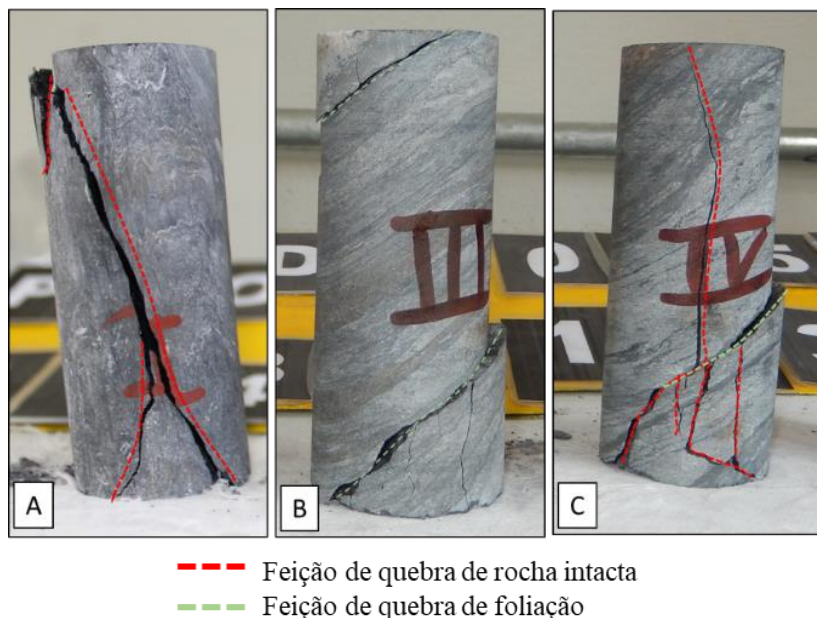


Figura 2. Corpos de prova após ruptura com classificação do tipo de quebra com alta confiança (A e B) e com média confiança (C).

A sexta etapa é fundamental para processar um robusto banco de dados com informação de 325 ensaios de UCS. Para isso, foram utilizadas ferramentas estatísticas como coeficiente de variação, média, quartis e mediana afim de reduzir influências de *outliers* e definir tendências, no aplicativo Excel. Primeiro, os valores de resistência foram separados por litologia, e posteriormente por tipo de quebra (Sn, Fr e RI). Cada tipo de quebra de cada litologia passou por uma seleção onde foram analisados apenas os ensaios com menos de 30% de variação, uma vez que variação acima de 30% é considerado inaceitável, segundo a *Measurement System Analysis* (MSA). Utilizou-se o coeficiente de variação, que é definido como a razão do desvio padrão (σ) pela média (\bar{x}) (Equação 2).

$$CV = \frac{\sigma}{\bar{x}} \quad (2)$$

Com esta seleção, foi atribuída a média aritmética para obtenção da resistência de rocha intacta, de foliação e de fratura para cada litologia. Contudo, atribuir média para uma série de valores com variação significativa devido a características intrínsecas de cada litologia não é confiável. De modo a reduzir impactos da variação nos resultados e *outliers*, foi utilizado o diagrama *boxplot* ou Diagrama de Caixa (Figura 3), o qual atribui um intervalo de confiança (valores entre o primeiro e o terceiro quartil) e um valor representativo (centro de dispersão – valor representativo do intervalo interquartílico) essencial para sumarizar dados quantitativos (Neto, 2017).

4 Resultados

Foram obtidos cinco diagramas de caixa com as litologias analisadas. Os cinco diagramas são referentes a: i) tipo de quebra na rocha intacta com índice de confiança alto (Figura 3); ii) tipo de quebra na rocha intacta com índice de confiança médio; iii) tipo de quebra na foliação com índice de confiança alto; iv) tipo de quebra na foliação com índice de confiança médio e v) tipo de quebra na fratura com índice de confiança alto. O

diagrama de caixa retorna os valores com maior representatividade, concentrados nos quartis centrais da caixa, os extremos nos quartis externos e os *outliers* como pontos externos, quando existentes.

Além da análise via diagrama de caixa, também foram obtidas as médias aritméticas de cada litologia para cada tipo de quebra. Os valores obtidos da média aritmética e nos diagramas estão dispostos na Tabela 1.

A Tabela 1 compila as informações dos cinco diagramas de caixas gerados bem como as informações aritméticas. A primeira coluna expressa o tipo de quebra - Rocha Intacta (RI), Foliação (Sn) e Fratura (Fr). A segunda coluna é referente a maneira como os dados foram obtidos, intervalos por quartis sem influência de *outliers* via *boxplot* e oriundos da média aritmética, obtida de valores com variação menor que 30%. O Índice de Confiança (IC) se apresenta na terceira coluna e atribui a característica de alta ou média confiança, isto é, determina o grau de exatidão do tipo de quebra na estrutura ou a possível influência de outra descontinuidade na estrutura. As demais colunas ilustram os intervalos de valores de resistência obtidos pelo diagrama de caixa e os valores de resistência de média aritmética, para cada litologia: filitos carbonosos (GXN), metagrauvacas (MG), quartzo-biotita-muscovita-granada xistos (GNCX), quartzo-clorita-carbonato-biotita-granada-muscovita-anfibólio xisto (CXV), dolomito (DOL) e veio de quartzo (VQZ).

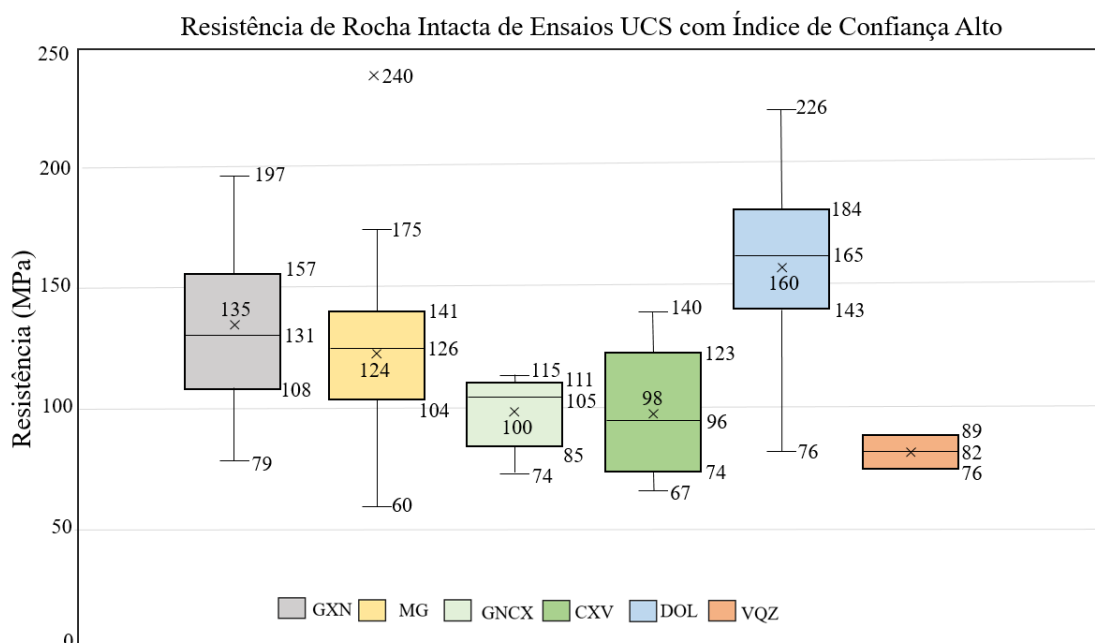


Figura 3. Diagrama de caixa com resistência de Rocha Intacta de ensaios UCS com Alta Confiança das litologias que compõem a Mina Ingá.

Tabela 1. Valores representativos e intervalo de valores de resistência (MPa) dos ensaios UCS.

Tipo de Quebra	Obtenção	IC	GXN	MG	GNCX	CXV	DOL	VQZ
RI	Quartis	Média	93.1 a	99.4 a	68.8 a	77.6 a		
		Alta	108.5 a	104.3 a	85.1 a	74.1 a	142.5 a	75.6 a
	Média Aritmética	Média	120.3	117.5	88.4	93.1		82.5
		Alta	135.3	123.8	99.5	98.3	160.2	
Sn	Quartis	Média	57.94 a	46.7 a	47.4 a	47.9 a		
		Alta	37.5 a	44.9 a	40.1 a	35.2 a		
	Média	73.2	61	64.9	71.4			

	Média Aritmética	Alta	60.7	55.6	53.8	43.2
Fr	Quartis	Alta	12.7 a 122.02	52.9 a 84.0	82.3 a 88.3	82.3 a 88.3
	Média Aritmética	Alta	12.7	83.6	85.6	35.5

Analisando a tabela acima é possível observar que os valores de foliação (estrutura com menor resistência que a rocha intacta) de todas as litologias com média confiança, isto é, obtidos de corpos de prova com tipo de quebra com influência da foliação e da rocha intacta, retratam valores superiores aos de foliação com alta confiança, com tipo de quebra assertivamente na foliação. É possível observar que a influência de rupturas na rocha intacta contribuem para aumentar o valor da resistência de ensaios que quebram na foliação. De modo semelhante, isto ocorreu para os valores de resistência de rocha intacta, a qual se espera valores superiores que de resistência de descontinuidades, como a foliação. Valores com médio índice de confiança de resistência de rocha intacta (que possuem tipo de quebra classificado como rocha intacta e como foliação) apresentaram valores de resistência inferiores frente aos valores de resistência de rocha intacta com alto índice de confiança, isto é, os valores das rupturas na foliação ou em possíveis fraturas influenciaram nos valores de resistência de rocha intacta. É possível visualizar as informações supracitadas na Tabela 2 e ilustradamente na Figura 4, com o exemplo dos valores de resistência da litologia filito grafitoso (GXN) da Tabela 2.

Tabela 2. Resistência média das litologias (MPa) considerando a influência do tipo de quebra.

	GXN	MG	GNCX	CXV
Rocha Intacta	135.3	123.8	99.5	98.3
Rocha Intacta com influencia da foliação	120.3	117.5	88.4	93.1
Foliação com influencia da Rocha Intacta	73.2	61	64.9	71.4
Foliação	60.7	55.6	53.8	43.2

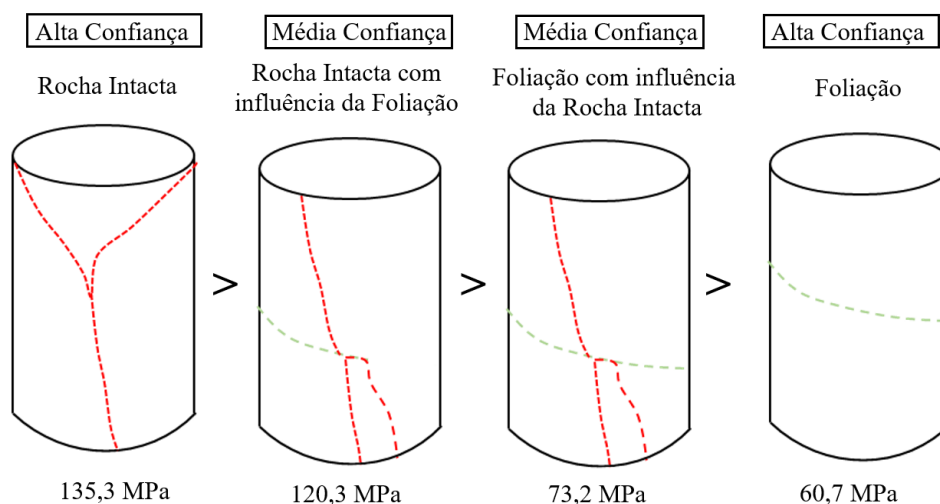


Figura 4. Resultado dos valores de resistência de acordo com a classificação atribuída – tipo de quebra (rocha intacta e foliação) e índice de confiança (alta e média) para litologia de filito carbonoso (GXN).

A utilização de diagrama de caixa por meio dos quartis frente a opção da média aritmética, mesmo com os dados com variação inferior a 30%, é algo que fornece um intervalo de valores significativo, uma vez que

identifica tendência e descarta a influência de *outliers*. Deste modo, a metodologia é válida e se aplica à proposta de trabalho.

Observa-se que o amplo intervalo de resistência em litologias como GXN e MG (Figura 3) é justificado uma vez que há grande número de amostras dessas litologia pois estão próximas ou em contato com corpo de minério, implicando localização no *hangingwall* ou no *footwall*. Além do grande número de amostras, as peculiaridades destas rochas corroboram para a variação dos valores, uma vez que há lentes de matéria orgânica (conferindo menor resistência) no GXN e estes se intercalam com a MG. A alta variação para valores de fraturas pré existentes é justificada, uma vez que existem várias famílias de fraturas, sendo duas predominantes (Ramires *et. al* 2019), e estas podem estar preenchidas, conferindo a elas anisotropias que refletem a grande variação.

5 Conclusões

A utilização de *boxplot* se mostrou útil para tratar os valores de resistência encontrados, fornecendo dados com alta representatividade e confiança, apresentando um intervalo de valores sem influência de outliers, tanto de rocha intacta quanto das demais estruturas que compõe o maciço rochoso. A média aritmética, utilizada com variação inferior a 30%, também se mostrou eficaz, com valores dentro do intervalo já esperado pelos resultados de *boxplot*.

Mostra-se também fundamental a análise do tipo de quebra para interpretação da resistência de rocha intacta para ensaios UCS, sendo necessário desconsiderar influências conceituais de foliação e fraturas.

A metodologia de inserir o índice de confiança em baixa, média e alta se mostrou eficaz, uma vez que os valores da foliação com média confiança, isto é, com corpos de prova com tipo de quebra na rocha intacta e na foliação, atribuíram valor de resistência de foliação superior que os valores de resistência de foliação com alta confiança, mostrando que a ruptura na rocha intacta influencia no valor da resistência da foliação e que o tipo de quebra influencia no valor de resistência. Isto ocorre do mesmo modo para rocha intacta. Valores com médio índice de confiança de rocha intacta, isto é, com corpos de prova com ruptura na rocha intacta e com evidência de ruptura na foliação, apresentaram valores inferiores frente aos valores de rocha intacta com alto índice de confiança, com ruptura apenas na rocha intacta, evidenciando que valores de resistência de foliação ou de possíveis fraturas influenciaram nos valores da resistência da rocha intacta.

A influência das litologias também tem de ser considerada, uma vez que, composições mineralógicas diferentes implicam em comportamentos geomecânicos distintos. Só se compreende o maciço rochoso se as características litológicas forem consideradas como unidades.

Estes resultados são relevantes pois auxiliam em tomadas de decisões e dimensionamentos necessários para desenvolvimento de escavações subterrâneas e a céu aberto e permite compreender o comportamento das litologias que compõem o maciço, colabora com modelos numéricos, dimensionamento de escavações e pilares, auxilia parâmetros de desing e permite mensurar o desgaste de brocas utilizadas na mineração subterrânea para escavação sem o uso de explosivos.

Diante dos resultados é possível concluir que a metodologia se aplica à proposta de trabalho. Os objetivos foram concluídos uma vez que se atribuiu um valor de rocha intacta para cada litologia bem como um intervalo com assertividade.

AGRADECIMENTOS

Os agradecimentos deste trabalho cabem à Anglo Gold Ashanti - Unidade Serra Grande – Crixás, por incentivar a pesquisa e a inovação; ao Gerente Sênior de Geologia e Exploração Marcelo Campos, pelo fomento ao constante aperfeiçoamento; ao Gerente de Mecânica de Rochas e Topografia, Jairo Henrique da Silva, pela organização do trabalho em equipe e pelo tempo de qualidade disponibilizado deliberadamente e à toda equipe de Mecânica de Rochas, que trabalha com ética, com comprometimento e com segurança, tratada como primeiro valor.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Borges & Campos, 2019 – *Caracterização Petrográfica dos litotipos do Greenstone Belt Crixás*



Carvalho, 2019 – *Correlação entre os modelos geotécnicos de curto e médio prazo da Mina Ingá, Crixás, Goiás* – Monografia n° 285

Deere DU, Miller RP (1966) *Engineering classification and index properties for intact rocks*. Tech Rep Air Force Weapons Lab, New Mexico, no AFNL-TR, pp 65–116

Everitt, Brian S. (8 de outubro de 1998). *Cambridge Dictionary of Statistics* (em inglês). [S.l.]: Cambridge University Press.

Hoek, E. and Brown, E.T. 1980. *Empirical strength criterion for rock masses*. *J. Geotech. Engng Div., ASCE* 106(GT9), 1013-1035.

ISRM, 1978 – *Suggested Methods for determining tensile strength of rock materials*

Li, Yanrong - *Handbook of Geotechnical Testing: Basic Theory, Procedures and Comparison of Standards*, 12/2019 - pag. 76

MSA – *Measurement System Analysis*, Pag. 78

Neto, J. V., 2017 - *BoxPlot: Um recurso gráfico para análise e interpretação de dados quantitativos*. Em: *Rev Odontol Bras Central* 2017; 26(76): 1-6

Ramires et. al, 2019 - *Q-system classification applied to geotechnical-structural domain mapping* – ISRM International Congress on Rock Mechanics and Rock Engineering