

A Interpretação dos Resultados do Point-Load Test – Mineração Serra Grande – AngloGold Ashanti

Nome do Autor: Davi Newton Pinheiro da Costa Gomes

MSG - AngloGold Ashanti, Crixás-GO, Brasil, dcgomes@anglogoldashanti.com.br

RESUMO: Tomado como base a relação estabelecida por Bieniawski (1973), este trabalho tem como objetivo estabelecer as funções inerentes a cada litologia, que relacionam a resistência a compressão pontual corrigida e a resistência à compressão uniaxial. Relaciona-se também neste trabalho o ângulo formado entre a foliação e o carregamento, e a resistência à compressão uniaxial. Após a calibração da relação entre a resistência à compressão pontual corrigida e a resistência à compressão uniaxial, os resultados apresentaram-se mais realistas, por estarem mais aproximados dos valores padrões inerentes a cada litologia, obtidos em ensaios de laboratório, o que comprova a eficiência da regressão linear como processo de calibração.

Como esperado, a resistência à compressão uniaxial aumenta quando o ângulo do carregamento está próximo da ortogonalidade da foliação.

PALAVRAS-CHAVE: *Point-Load Test*, foliação, compressão uniaxial.

1 INTRODUÇÃO

O “*Point-Load Test*” é um teste de campo para a determinação expedita da resistência à compressão puntiforme. Este teste é um dos mais difundidos em todo o mundo e conta com um aparato simples, constituído por uma bomba manual, um êmbolo hidráulico, ponteiras e um manômetro que indica a pressão necessária para partir cada corpo de prova (Figura 1).

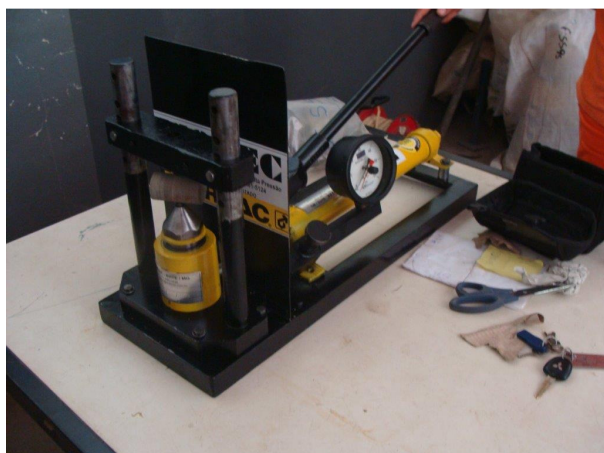


Figura 1. Aparato utilizado no “*Point-Load Test*”.

O “*Greenstone Belt*” Crixás, por definição é um ambiente metamórfico e seus litotipos

apresentam-se quase sempre foliados, o que implica em corpos de prova anisotrópicos. Na Mineração Serra Grande, utilizaram-se como corpos de prova, testemunhos de sondagem de diâmetros variados. Estes testemunhos foram segregados de acordo com os litotipos mais comuns e considerou-se o ângulo entre a foliação e o carregamento.

Em dois anos, realizaram-se quase 1200 testes individuais adotando os métodos e procedimentos propostos pelo ISRM (1985) para a obtenção do índice de resistência a compressão pontual corrigido “ IS_{50} ”. Utilizou-se também a constante “ C ”, proposta em Bieniawski (1973) *apud* Bieniawski (1975), que relaciona o índice “ IS_{50} ” e a resistência à compressão uniaxial “ σ_c ”, e que é função do diâmetro do corpo de prova. Estes procedimentos e parâmetros serviram como estrutura do banco de dados.

Considerando-se como padrão os resultados dos ensaios de resistência à compressão uniaxial realizados em laboratório, o foco deste trabalho é estabelecer através de tratamentos estatísticos dos resultados dos ensaios, as equações inerentes a cada litotipo que substituem a constante “ C ”, e calibram a relação

entre “ σ_c ” e “IS₅₀”. Também descreve-se aqui a relação entre “ σ_c ” e o ângulo formado entre a foliação e o carregamento “ $\theta\sigma$ ”.

Para substituir a constante “C”, após a regressão linear da dispersão “IS₅₀X σ_c ”, aplicou-se esta relação aos dados referentes ao “IS₅₀” e chegou-se a resistência à compressão uniaxial recalculada “ σ_{cRec} ”.

Como “ $\theta\sigma$ ” não foi medido nos ensaios de resistência à compressão uniaxial que foram realizados em laboratório, adotaram-se neste trabalho, para efeitos comparativos, ângulos padrões de foliação para cada litotipo. Estes ângulos são baseados na simples observação da frequência da foliação nos testemunhos de sondagem e variam entre 45 e 60°.

Posteriormente à determinação das equações de segundo grau que relacionam “ σ_{cRec} ” e “ $\theta\sigma$ ”, comparou-se os valores padrões de resistência à compressão uniaxial de laboratório, bem como os ângulos estimados da foliação de cada litotipo. A partir disto, obtiveram-se os fatores de correção das equações de cada litotipo.

2 PROCEDIMENTOS E CÁLCULOS

2.1 Obtenção do IS₅₀

De acordo com ISRM (1985), a resistência à compressão pontual não corrigida “IS” é expressa pela Equação 1:

$$IS(MPa) = \frac{(P(KN) \times 1000)}{4 \times \left(\frac{D(mm)}{2}\right)^2} \quad (1)$$

“P” representa a leitura da carga necessária para romper o corpo de prova e “D” representa a espessura do corpo de prova.

Os critérios de dimensionamento dos corpos de prova, tanto testemunhos de sondagem quanto blocos serrados ou de formato irregular, podem ser entendidos através da Figura 2.

Em testemunhos de sondagem, os ensaios podem ser realizados na posição axial, que é paralela à direção do eixo do furo feito pela sonda, e diametral, que é ortogonal ao eixo do furo. Em corpos de prova anisotrópicos e foliados, realiza-se também os ensaios irregulares, que possuem direções oblíquas ao

eixo do furo. Os critérios de execussão do ensaio em testemunhos foliados podem ser compreendidos pela figura 3.

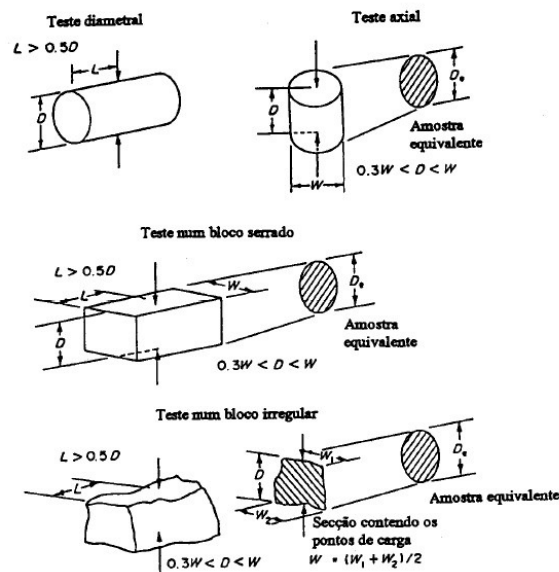


Figura 2. Critérios de dimensionamento dos corpos de prova. Modificado de ISRM (1985).

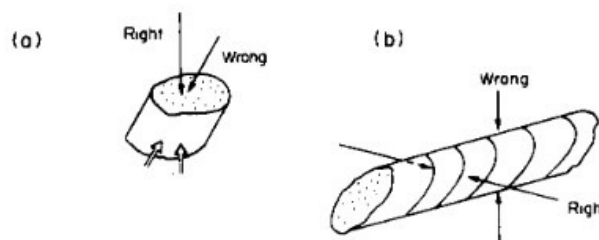


Figura 3. Critérios de carregamento em testemunhos foliados. A) Ensaios irregulares, B) Ensaios diametraes. Modificado de ISRM (1985).

Como consequências dos critérios de execussão do “Point-Load Test” em testemunhos anisotrópicos foliados, assume-se que os ensaios irregulares fornecem apenas resultados ortogonais, ou seja ($\theta\sigma=90^\circ$). Os ensaios diametraes fornecem apenas resultados paralelos à foliação ($\theta\sigma=0^\circ$). Somente os ensaios axiais, realizados em testemunhos com as facetas cerradas ortogonalmente ao eixo do furo de sonda, fornecem resultados com ângulos oblíquos ($90^\circ > \theta\sigma > 0^\circ$).

Para se obter as facetas ortogonais ao eixo do furo, necessárias à execussão dos ensaios axiais, levou-se os testemunhos à uma simples serra de marmoraria.

Nas Figuras 4 e 5 pode-se compreender o

processo de marcação da foliação e obtenção do ângulo “ $\theta\sigma$ ”.

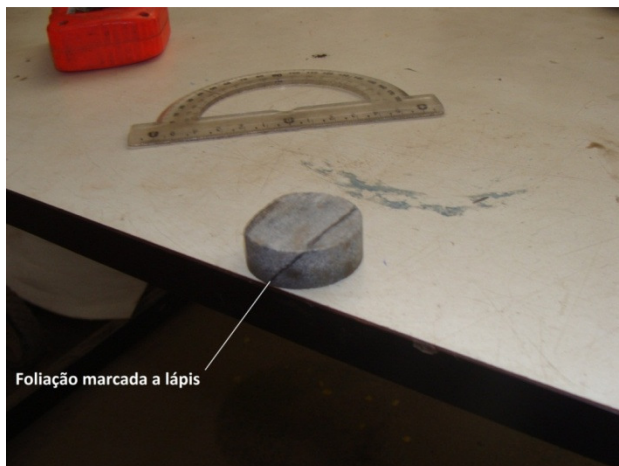


Figura 4. Foliação marcada a lápis no testemunho com as facetas serradas.

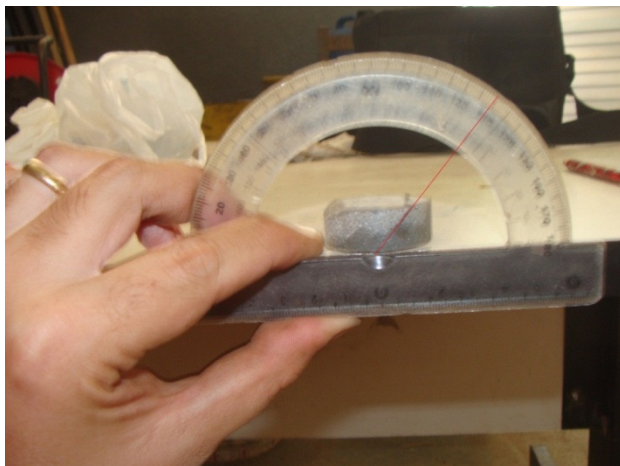


Figura 5. Medição do ângulo entre a foliação e o eixo do furo de sondagem.

Após a obtenção da resistência à compressão pontual “IS” e do ângulo “ $\theta\sigma$ ”, obtém-se, segundo Bieniawski (1973) citado em ISRM (1985), a resistência a compressão pontual corrigida para um corpo de prova de 50 mm de espessura “IS₅₀”, através da Equação 2:

$$IS_{50}(\text{MPa}) = I_s(\text{MPa}) \times \left(\left(\frac{D(\text{mm})}{50} \right)^{0.45} \right) \quad (2)$$

2.2 O fator de conversão “C”

Em D’Andrea et al. (1964) citado em Kahraman (2015), foi proposto um modelo de regressão linear para relacionar “IS” a resistência à compressão uniaxial “ σ_c ”.

Em Read et al. (1980) citado em Kahraman

(2015), mostrou-se a variação da relação σ_c/IS em função da variação do diâmetro do corpo de prova.

Para relacionar “IS₅₀” e “ σ_c ”, foram propostos por Bieniawski (1973), citado em Brandani (2011), fatores de conversão “C” que são relacionados à espessura “D” de cada corpo de prova. Esta relação pode ser compreendida pela Tabela 1 e pela Equação 3, que trás o exemplo do cálculo para uma amostra de 35,4 mm de espessura:

Tabela 1. Relação entre a constante “C” e a espessura da amostra. Modificada de Brandani (2011).

Espessura da amostra D (mm)	Constante C
20	17.5
30	19
40	21
50	23
60	24.5

$$C = \left((35,4 - 30) \times \left(\frac{21-19}{40-30} \right) \right) + 19 = 20.08 \quad (3)$$

3 BANCO DE DADOS E RESULTADOS

3.1 Banco de dados

Até o momento conta-se com um banco de dados com 1207 ensaios realizados com oito litotipos diferentes, dos quais 1008 atenderam aos critérios de ruptura, que são definidos pela Figura 6:

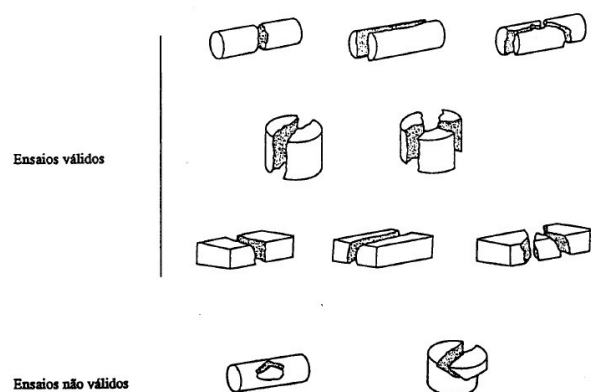


Figura 6. Critérios de ruptura utilizados para validação dos ensaios. Modificado de ISRM (1985).

A metodologia utilizada apresenta uma

efetividade de 83,51%.

Os ensaios válidos das Metagrauvacas (MG) e dos Carbonato-Clorita Xistos (CBCX) representam 50,37% do banco de dados, e são as litologias que até o momento apresentaram matéria suficiente para apresentação, portanto, trata-se apenas destes dois litotipos nesta publicação.

Nenhuma das litologias trabalhadas até o momento apresentou alguma simetria nos histogramas de “ σ_c ”.

A distribuição da frequência e as estatísticas descritivas dos ensaios executados em Metagrauvacas podem ser observadas na Figura 7 e na Tabela 2, respectivamente:

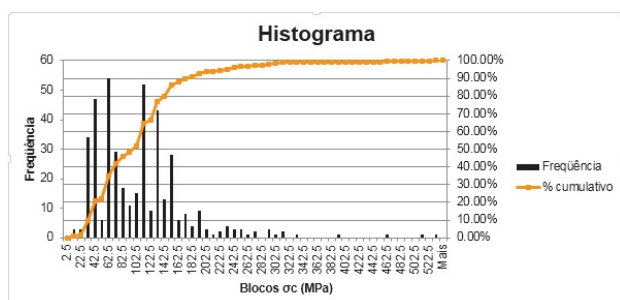


Figura 7. Histograma com a distribuição dos resultados dos ensaios realizados em Metagrauvacas.

Tabela 2. Estatística descritiva dos ensaios realizados em Metagrauvacas.

σ_c (MPa)	
Média	102,043
Erro padrão	3,365
Mediana	97,339
Modo	106,878
Desvio padrão	69,046
Variância da amostra	4767,379
Intervalo	521,707
Mínimo	4,907
Máximo	526,614
Contagem	421

A distribuição da frequência e as estatísticas descritivas dos ensaios em Carbonato-Clorita Xistos podem ser observadas na Figura 8 e na Tabela 3, respectivamente:

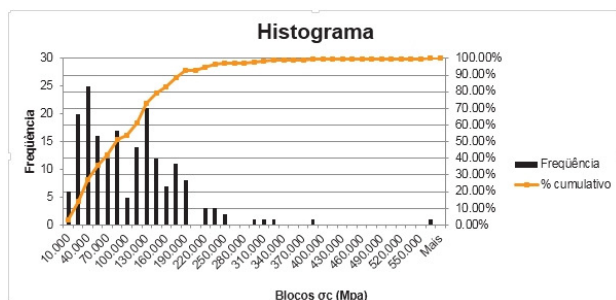


Figura 8. Histograma com a distribuição dos resultados dos ensaios realizados em Carbonato-Clorita Xistos.

Tabela 3. Estatística descritiva dos ensaios realizados em Carbonato-Clorita Xistos.

σ_c (MPa)	
Média	97,855
Erro padrão	5,491
Mediana	83,259
Modo	19,629
Desvio padrão	75,085
Variância da amostra	5637,755
Intervalo	540,980
Mínimo	9,815
Máximo	550,794
Contagem	187

3.2 Calibração do Fator “C”

Através da regressão linear das dispersões “IS₅₀X σ_c ” obtêm-se as equações de primeiro grau que relacionam estas variáveis, como pode ser verificado nas Figuras 9 e 10:

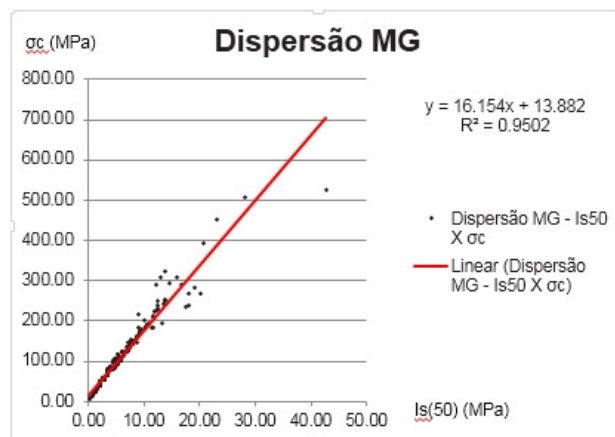


Figura 9. Dispersão das Metagrauvacas.

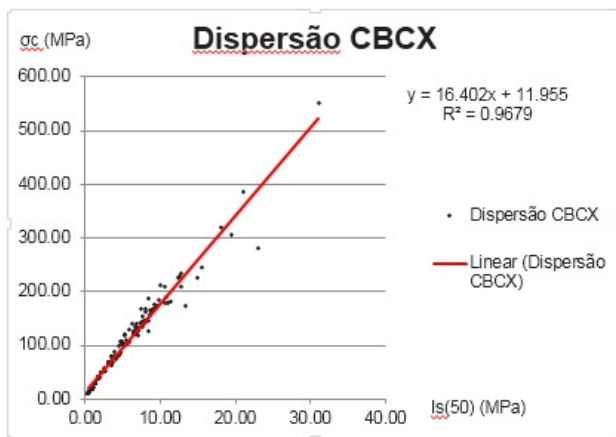


Figura 10. Dispersão dos Carbonato-Clorita Xistos.

A expressão de “ σ_c ” em função de “ IS_{50} ” obtida para as Metagrauvacas é dada pela Equação 4:

$$\sigma_{cRec}(\text{MPa}) = (16.15 \times IS_{50}) + 13.88 \quad (4)$$

A expressão de “ σ_c ” em função de “ IS_{50} ” obtida para os Carbonato-Clorita Xistos é dada pela Equação 5:

$$\sigma_{cRec}(\text{MPa}) = (16.40 \times IS_{50}) + 11.95 \quad (5)$$

Após a aplicação destas equações aos resultados de “ IS_{50} ” no banco de dados, obteve-se a resistência a compressão uniaxial recalculada “ σ_{cRec} ”.

3.3 Comparação entre “ $\theta\sigma X \sigma_c$ ” e “ $\theta\sigma X \sigma_{cRec}$ ”

Pode-se compreender a relação “ $\theta\sigma X \sigma_c$ ” das metagrauvacas através da Figura 11 e da Equação 6:

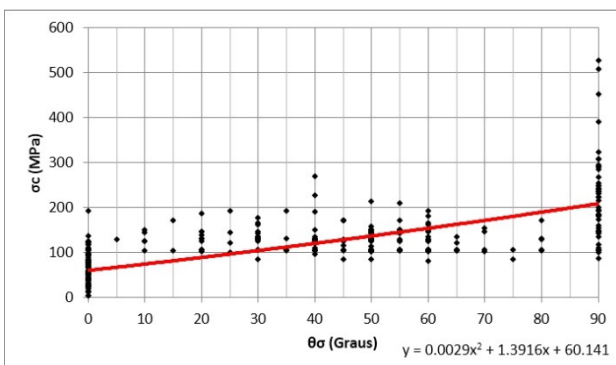


Figura 11. Resistência a compressão uniaxial em função do ângulo formado entre a foliação e o carregamento.

$$\sigma_c = (0,002 \times (\theta\sigma)^2) + (1,391 \times (\theta\sigma)) + 60,14 \quad (6)$$

Pode-se compreender a relação “ $\theta\sigma X \sigma_{cRec}$ ” das metagrauvacas através da Figura 12 e da Equação 7:

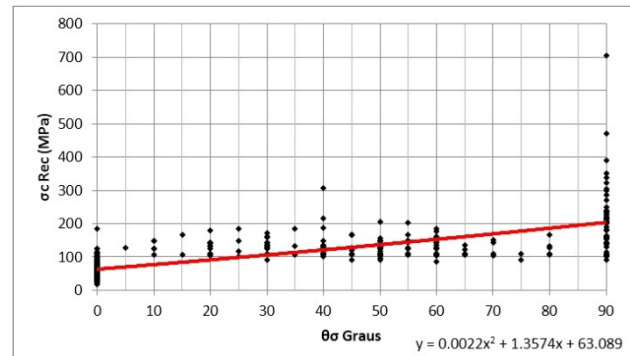


Figura 12. Resistência a compressão uniaxial recalculada em função do ângulo formado entre a foliação e o carregamento.

$$\sigma_{cRec} = (0,002 \times (\theta\sigma)^2) + (1,357 \times (\theta\sigma)) + 63,08 \quad (7)$$

Pode-se compreender a relação “ $\theta\sigma X \sigma_c$ ” dos Carbonato-Clorita Xistos através da Figura 13 e da Equação 8:

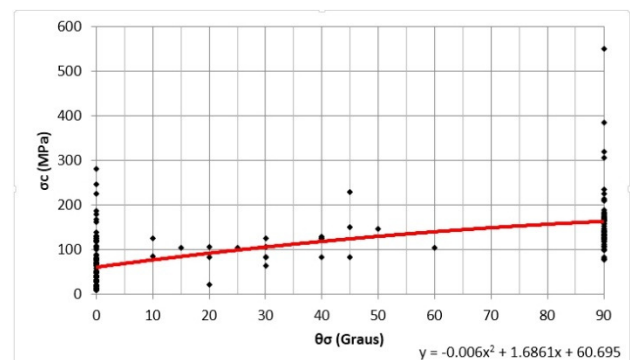


Figura 13. Resistência a compressão uniaxial em função do ângulo formado entre a foliação e o carregamento.

$$\sigma_c = (-0,006 \times (\theta\sigma)^2) + (1,686 \times (\theta\sigma)) + 60,69 \quad (8)$$

Pode-se compreender a relação “ $\theta\sigma X \sigma_{cRec}$ ” dos Carbonato-Clorita Xistos através da Figura 14 e da Equação 9:

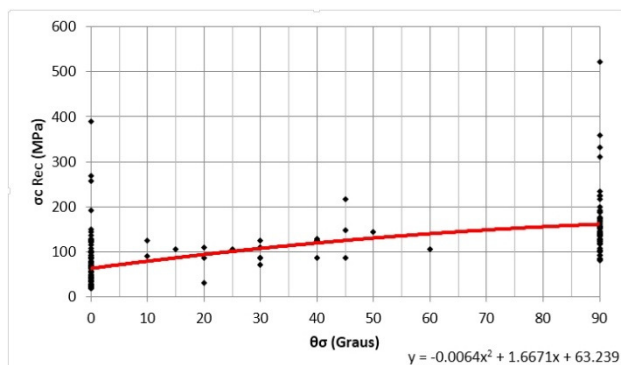


Figura 14. Resistência a compressão uniaxial recalculada em função do ângulo formado entre a foliação e o carregamento.

$$\sigma_{cRec} = (-0,006 \times (\theta\sigma)^2) + (1,667 \times (\theta\sigma)) + 63,23 \quad (9)$$

Assumindo que as metagrauvacas possuem uma resistência à compressão uniaxial de 151,3 MPa para um ângulo de 60° entre a foliação e o carregamento, obteve-se um fator de correção de -2,77 MPa para a relação “ $\theta\sigma\chi\sigma$ ”. Para a relação “ $\theta\sigma\chi\sigma_{cRec}$ ”, obteve-se um fator de correção de -1,15 MPa.

Assumindo que os Carbonato-Clorita Xistos possuem uma resistência à compressão uniaxial de 159,7 MPa para um ângulo de 55 graus entre a foliação e o carregamento, obteve-se um fator de correção de 24,42 MPa para a relação “ $\theta\sigma\chi\sigma$ ”. Para a relação “ $\theta\sigma\chi\sigma_{cRec}$ ”, obteve-se um fator de correção de 24,13 MPa.

3.4 Conclusões

A resistência à compressão uniaxial das unidades litológicas em questão aumenta quando o carregamento encontra-se próximo a ortogonalidade da foliação e diminui quando o carregamento está próximo ao paralelismo da foliação, como o esperado.

Os fatores de correção de menor módulo mostrados para as relações “ $\theta\sigma\chi\sigma_{cRec}$ ”, quando comparadas as relações “ $\theta\sigma\chi\sigma$ ”, expressam o sucesso na calibração do fator “C” que relaciona “IS₅₀” e a resistência à compressão uniaxial.

Os fatores de correção obtidos pela comparação entre os resultados de laboratório de ensaios triaxiais e o *Point-Load Test*, podem ser interpretados como a soma dos erros do procedimento descrito neste trabalho.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a minha companheira Isabella e a minha família.

Agradeço ao Gerente Geral de Operações da Mineração Serra Grande Ricardo de Assis, ao Gerente de Geologia e Exploração Diogo Costa, ao Chefe da Divisão de Mecânica das Rochas Marcelo Campos e aos meus colegas Gustavo Batista e Gerson Ribeiro.

REFERÊNCIAS

- Bieniawski, Z.T. 1973. Engineering classification of jointed rock masses. Trans S. Afr. Inst. Civ. Engrs. 15, 335 - 344.
- Bieniawski, Z. T. "The point-load test in geotechnical practice." Engineering Geology 9.1 (1975): 1-11.
- Brandani, D.B. 2011. Estudo do comportamento geomecânico de pilares esbeltos modelados em rocha dura na bacia do Corpo I, Mina Nova – Crixás/GO, dissertação de mestrado em engenharia geotécnica – UFOP. p. 36 - 61.
- D'Andrea, D.V., Fisher, R.L., Fogelson, D.E., 1964. Prediction of compressive strength from other rock properties. Colorado Sch. Min. Q. 59 (4B), 623–640. Disponível em <https://scholar.google.com.br>. Na data de 09/04/2016.
- ISRM - International Society for Rock Mechanics. 1985. Suggested method for determining point load strength. Int J Rock Mech Min Sci Geomech. Abstr., 22: 53 – 60.
- Kahraman, S. "The determination of uniaxial compressive strength from point load strength for pyroclastic rocks." Engineering Geology 170 (2014): 33-42. Disponível em <https://scholar.google.com.br>. Na data de 09/04/2016.
- Read, J.R.L., Thornten, P.N., Regan, W.M., 1980. A rational approach to the point load test. Proceedings of the 3rd Australian – New Zealand Geomechanics Conference. vol. 2 New Zealand Institution of Engineers, Wellington, pp. 35–39. Disponível em <https://scholar.google.com.br>. Na data de 09/04/2016.