

Determinação de um Fator de Correlação a Partir da Classificação do Maciço Rochoso na Mina de Cuiabá (Sabará, Minas Gerais).

Rodrigo César Padula

AngloGold Ashanti, Belo Horizonte, Brasil, ROPadula@anglogoldashanti.com.br

Rodrigo Peluci de Figueiredo

UFOP, Ouro Preto, Brasil, rpfigueiredo@yahoo.com.br

RESUMO: Este trabalho foca na análise *in situ* dos danos causados no maciço rochoso, tanto pelo estresse atuante quanto decorrentes de detonação, utilizando comparação entre a classificação do maciço rochoso considerando e não o fraturamento induzido, com certificação do limite desse dano e sua progressão em profundidade. Foi realizado um estudo de caso, com objetivo de avaliar o grau de dano induzido no maciço rochoso anisotrópico de rochas duras da mina Cuiabá, na galeria localizada a aproximadamente 1100m de profundidade. Furos para monitoramento com microcâmera foram confeccionados em seção estratégica, cujo local apresentou a pior classificação do maciço ao longo de toda galeria avaliada, o que permitiu mensurar em profundidade o limite da zona de danos no maciço rochoso ($D_f = 0,35m$). Para o cálculo analítico da zona de danos, D_f , utilizou-se Martin *et al.* (1999) e dados de campo, com raio médio da escavação ($a_{médio} = 2,75m$), $\sigma_1 = 40,50MPa$, $\sigma_3 = 27,0MPa$ e $\sigma_{c(médio)} = 180,0MPa$ ($D_f = 0,40m$). Além desses métodos, o limite da zona de danos ocasionado por fraturamento ao redor da escavação foi obtido através de análise computacional na mesma seção, utilizando o programa PHASE² ($D_f = 0,43m$). A análise ainda permitiu verificar que a medida que o confinamento aumenta, o nível de quebra diminui, chegando a zero. Através do mapeamento geomecânico, foi realizada a classificação do maciço rochoso, método Q (Tunnelling Quality Index, Barton *et al.*, 1974), correlacionado àquele sugerido por Hoek *et al.*, 1995; Marinos & Hoek, 2007, Geological Strength Index (GSI). Assim, o trabalho permitiu certificar que, para um mesmo ponto analisado do maciço, o valor GSI é diferente, a depender do nível de profundidade, apresentando valor baixo na superfície da escavação, gradando proporcionalmente ao aumento em profundidade e permanecendo constante após o limite D_f . No limite escavação-rocha, a zona de dano é ocasionada por fraturamento induzido, o que acarreta na diminuição do RQD e no aumento do número de famílias de descontinuidades (Jn). Em profundidade, a gradação do GSI ocorre devido ao aumento do RQD e à diminuição do Jn até o limite D_f . Para além desse limite o valor do GSI permanece constante, sendo consideradas, para efeito de classificação do maciço, apenas as descontinuidades geológicas. Em posse dos dados gerados, foi possível estabelecer um fator de correlação (fator de redução), mostrando a degradação do maciço em profundidade, com base numa modificação aos parâmetros de classificação RQD e Jn utilizados para determinação de Q e consequentemente GSI.

PALAVRAS-CHAVE: Maciço rochoso, Fraturamento induzido, Zona de danos, Fator de correlação.

1 INTRODUÇÃO

Estudos recentes mostram que o comportamento da rocha em aberturas

subterrâneas profundas pode ser diferente quando comparado ao analisado antecipadamente (Kaiser, 2006). Uma das razões para este desvio é a degradação do

maciço rochoso, como resultado dos processos de danos causados pela tensão, que não foram devidamente tidos em conta na redução da qualidade do maciço rochoso próximo ao limite da escavação-rocha. Assim, em rochas duras e em profundidade, a redistribuição de tensão ocasiona danos ao maciço rochoso, sendo observados principalmente no limite da escavação, que são atenuados em profundidade com o aumento do confinamento.

Além do impacto gerado por redistribuição de tensão, outro fator responsável pela ocorrência de danos no maciço é a detonação por desmonte de rochas. A utilização de explosivos tem a finalidade de fraturar a rocha e provocar o seu movimento em relação à face livre, de forma a promover a extração (ou arranque). Dessa forma, ocorre a desagregação do maciço rochoso pela energia do explosivo, resultando um conjunto de blocos (escombros). Nessa ação dos explosivos, existem inevitáveis efeitos secundários sobre o maciço remanescente, provocados pela energia libertada. Estes danos, na sua vertente, são traduzidos por fenômenos de sobreescavação e sobrefraturação, com o consequente aumento da permeabilidade do maciço (Bastos, 1998). A ação das ondas de choque de detonações realizadas para a abertura de galerias subterrâneas induz danos ao maciço rochoso remanescente (Silva, 2006).

Este trabalho foca na análise *in situ* dos processos de danos, utilizando comparação entre a classificação do maciço rochoso considerando e não o fraturamento induzido, ocasionado por redistribuição de tensão e por efeitos da detonação, com certificação do limite desse dano e sua progressão em profundidade. Para isso, foi realizado um estudo de caso, com objetivo de identificar e mensurar o grau de dano induzido no maciço rochoso anisotrópico de rochas duras da mina Cuiabá (Sabará, Minas Gerais), mais especificamente, na galeria localizada no nível 17, aproximadamente a 1100m de profundidade, que faz ligação entre os corpos de minério Serrotinho (SER) e Fonte Grande Sul (FGS).

2. DANOS OCASIONADOS AO MACIÇO POR REDISTRIBUIÇÃO DE TENSÃO

Kaiser (2000) cita que o processo de fraturamento devido a aberturas subterrâneas em rochas duras é uma função das grandezas de tensão *in situ* e as características da rocha (resistência de pico e rede de fraturas). Complementa ainda que, em profundidade, com o aumento da tensão *in situ*, as descontinuidades naturais ficam submetidas a confinamento e o processo de fraturamento é quebradiço e dominado por novas fraturas induzidas pelo aumento da tensão. Para maciços desse tipo, Marinos *et al.* (2007) discutem como o regime dependente de variação de tensão é controlado pela anisotropia da massa rochosa confinada e aponta que os principais sistemas de classificação não corretamente explicam o comportamento do maciço rochoso e redução de resistência como resultado da natureza heterogênea. Bewick & Kaiser (2009) e Bewick (2008) acrescentam que descontinuidades orientadas ao redor de um limite de uma abertura subterrânea afetam tanto a extensão e a forma de zonas de confinamento em torno da escavação, como a resistência do maciço rochoso (dependente da direção do carregamento), causando uma não uniformidade no estado de tensão e deslocamento ao redor do limite da abertura subterrânea.

Everitt & Lajtai (2004) e Kaiser (2006) sugerem que o processo de fratura ocasionada por tensão induzida é aprimorado quando as características estruturais, tais como articulações, zonas de fraqueza, planos de estratificação ou folheações são preferencialmente orientados em torno do limite das escavações, que por sua vez facilita o processo de desintegração do maciço rochoso mediante tensão atuante. O dano induzido não é apenas uma função do estresse, mas uma função da tensão e resistência do maciço rochoso por conta da anisotropia (Bewick, 2008), que relata que tais observações foram embasadas por evidências de campo registradas por Brox & Hagdorn (1996); Everitt & Lajtai (2004) e Kaiser (2006).

Martin *et al.* (1999) mostrou que a resistência do maciço rochoso *in situ* próximo da escavação subterrânea cai para um limite inferior de aproximadamente:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = 0,35 \text{ a } 0,45 UCS_{Lab} \quad (1)$$

Onde, σ_1, σ_3 são tensões principais, máxima e mínima, respectivamente e UCS_{Lab} é a resistência à compressão uniaxial da rocha medida em laboratório. Assim, Diederichs (2003) aponta que esse limite de valor é coincidente com o limite de iniciação de danos para a rocha intacta (Fig.1).

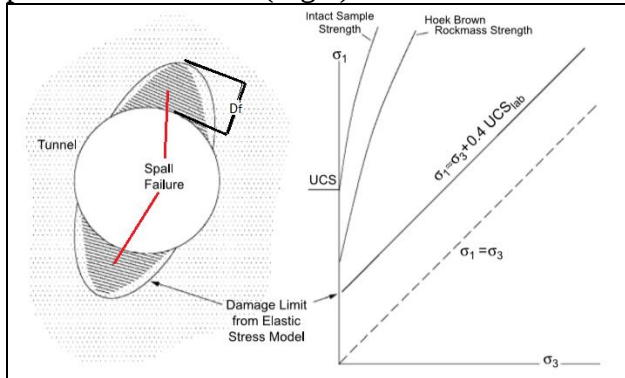


Figura 1: Limite empírico inferior de danos no maciço rochoso para rochas duras - Diederichs (2003).

Quando as tensões tangenciais ao redor da escavação subterrânea excedem a resistência do maciço rochoso, Kaiser (2000) cita que em terrenos extremamente tensionados, são iniciadas fraturas em torno do túnel por *Spalling* (fragmentação) e por *Sllabing* (tensão induzida). Lajtai *et al.* (1990) sugerem que a iniciação de danos é causada por quebras de tração. Kaiser (2000) afirma que durante a compressão, as fendas de tração dominam o processo de falha, através de tensões de tração geradas internamente, que superam a resistência à tração da rocha. Tensões de tração no limite do túnel podem explorar fissuras em escala de grãos levando em última instância à fragmentação da rocha por tensão induzida. Evidências de testes de laboratório e estudos de campo sugerem que o processo de ruptura frágil (Kaiser, 2000) é um fenômeno que ocorre quando a tensão de confinamento for igual à resistência à tração ou próxima de zero. Diederichs (2003) define que micro-quebras por tração, agravadas pelo baixo confinamento condicionado próximo às escavações, levam a um processo de *sllabing* que é inconsistente com critérios convencionais de fraturamento. Complementa ainda que a resistência do maciço rochoso próximo às escavações subterrâneas é controlada por

mecanismos de iniciação de danos que são relativamente insensíveis a confinamento, com propagação até fraturamento em macro-escala, seguindo controlado por mecanismos que dominam a baixo confinamento. Kaiser (2000) relata que quando a tensão atinge um caminho de baixo confinamento e excede o limite de dano, no entanto, fenda e fratura se coalescem, levando à fragmentação em superfícies preferencialmente paralelas às fraturas (divisão axial paralela à tensão máxima principal). Esse resultado mostra que a resistência do maciço rochoso é significativamente menor do que o previsto em testes de laboratório, onde esse modo de falha é retardado devido ao estado particular de tensão em amostras cilíndricas.

Para rochas quebradiças, Diederichs (2003) através da Figura 2 mostra a representação da resistência (medida em laboratório e comparada com aquela do maciço rochoso) dividida em 4 fases: sem dano, falha de tração, lasqueamento e cisalhamento.

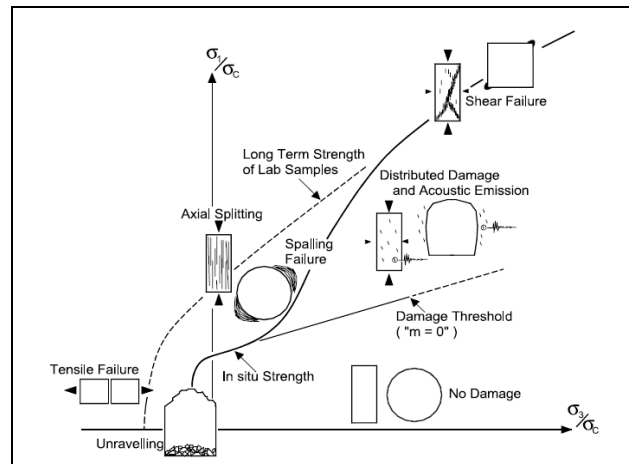


Figura 2: Esquema de fraturamento apresentando quatro mecanismos distintos de quebra no maciço rochoso - Diederichs (2003).

Diederichs (2003) explica que abaixo do limite de início de danos, a rocha não está danificada e permanece intacta. Quando o limite é excedido, emissões acústicas (quebras, micro-fraturas) são observadas, levando a uma intensidade crítica de quebra para interação (coalescência) das fraturas, resultando em falha de cisalhamento em macro-escala. A propagação de fraturas no estágio de fragmentação do maciço (*spalling*) ao redor da escavação é limitada pelo aumento do grau de confinamento para dentro do maciço, apresenta

geometria semicircular, elíptica, onde há estabilização dessa propagação em profundidade aproximada D_f , além do limite escavação-rocha (Fig.1), cujo cálculo pode ser obtido através da EQ. 2, sugerida por Martin *et al.* (1999) através da relação matemática que segue:

$$\frac{D_f}{a} = 1,25 \frac{\sigma_{max}}{\sigma_c} - 0,51 \quad (\pm 0,1) \quad (2)$$

Onde, D_f = profundidade de fracasso em metros medidos a partir do limite circular; a = raio do túnel em metros ou raio do círculo circunscrito à escavação; $\sigma_{max} = 3\sigma_1 - \sigma_3$ e σ_c = resistência à compressão simples da rocha intacta.

3. DANOS OCASIONADOS AO MACIÇO POR DETONAÇÃO

Muitas vezes, ao se buscar uma fragmentação satisfatória na detonação de galerias de minas subterrâneas, pode-se induzir no maciço adjacente um carregamento excessivo de tensões devido à ação das ondas de choque. Isto pode gerar novas fraturas e/ou movimentação e abertura de fraturas preexistentes (Silva, 2006).

Segundo Dinis da Gama (1998), as principais variáveis que determinam o dano ao maciço encontram-se representadas na expressão proposta por Johnson (1971):

$$v = aQ^b D^c \quad (3)$$

Onde v = velocidade de pico crítica da partícula (mm/s); Q = quantidade de explosivos por retardo (Kg), D = Distância entre a detonação e o local de estudo (m), a , b e c são constantes que dependem das características da rocha, tipo de explosivo e técnica de desmonte. Os valores da velocidade de pico crítica, v , são correlacionados com a tensão dinâmica transmitida à rocha (σ), a massa específica da rocha (ρ) e a velocidade de propagação das ondas no meio (u), através da expressão:

$$\sigma = \rho \cdot u \cdot v \quad (4)$$

Conjugando as expressões acima apresentadas e considerando σ_t = resistência à tração dinâmica da rocha, é possível obter uma previsão da dimensão do dano (D_d) numa detonação subterrânea (Dinis da Gama, 1998):

$$D_d = \left[\frac{\sigma_t}{(\rho u a Q^b)} \right]^{\frac{1}{c}} \quad (5)$$

Silva (2006) utilizou a metodologia proposta por Ryan e Harris (2000), critério de Holmberg-Persson (Persson *et al.*, 1994), o qual define uma zona de dano crítico onde ocorre a ruptura da rocha por tração com criação de novas fraturas, sendo o mesmo expresso pela equação:

$$PPV_{critica} = \frac{\sigma_t \cdot V_p}{E} \quad (6)$$

Onde, $PPV_{critica}$ = Velocidade máxima de partícula suportada pela rocha antes do rompimento por tração (mm/s), σ_t = resistência à tração da rocha, V_p = Velocidade de propagação da onda primária (m/s) e E = Módulo de Young (Gpa).

Para que se possa avaliar também a extensão máxima da zona de danos, onde fraturas preexistentes na rocha podem se propagar e dilatar sob a influência de níveis relativamente baixos de vibração, Ryan e Harris (2000) adotaram o critério do CANMET (Calder, 1977), o qual, com as modificações sugeridas por Silva (2004), é expresso pela equação:

$$PPV_{minima} = \frac{0,021 \cdot \sigma_1}{V_p \cdot \rho_R} \quad (7)$$

Onde, PPV_{minima} = Velocidade mínima de partícula causadora de extensão e dilatação de fraturas preexistentes (mm/s), σ_1 = Tensão principal maior na ruptura estimada para rocha intacta (Pa) e ρ_R = Densidade da rocha intacta (g/cm³).

De acordo com Silva (2006), durante a detonação de uma carga de explosivos, um transdutor de vibração, posicionado em um ponto de observação, no campo muito próximo, não recebe contribuições de energia iguais de todas as porções da carga. Na prática, em situações na região do campo próximo, porções

da carga distantes do sensor geram menos impacto que porções próximas.

Ryan e Harris (2000) propuseram a equação de atenuação das vibrações para o campo próximo (equação 8), cujo arranjo espacial das variáveis é aquele mostrado na Figura 3.

$$PVS = K \left[\left(\frac{l}{R_0} \right) \left(\varphi - \arctan \left\{ \frac{R_0 \tan \varphi - H}{R_0} \right\} \right) \right]^\alpha \quad (8)$$

Onde, PVS = Módulo do Vetor Velocidade de Vibração de Partícula Resultante (mm/s), l = Razão linear de carregamento (kg/m), H = Comprimento da carga (m), R_0 = Distância horizontal do centro da carga ao transdutor (m), φ = ângulo em radianos, K e α = constantes do local.

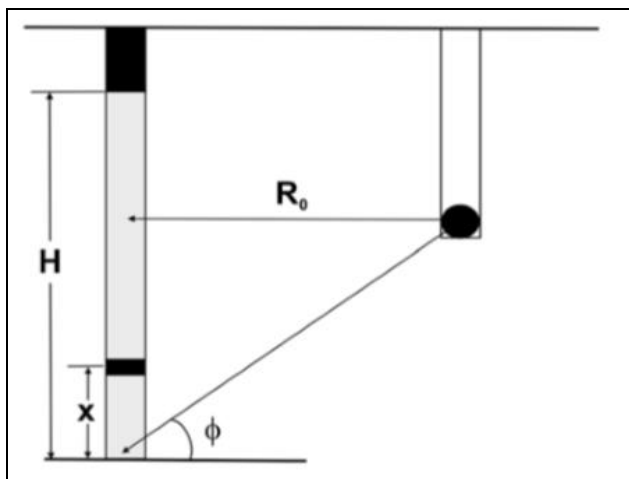


Figura 3: Arranjo proposto para as variáveis da equação 8 (Ryan e Harris, 2000).

4. METODOLOGIA E EXECUÇÃO DO TRABALHO

Durante o mapeamento geomecânico foi constatado que ao longo da galeria em estudo alguns pontos mapeados apresentavam maior grau de fraturamento com relação aos demais pontos. Dessa forma, foi identificado o local de intenso fraturamento e realizada uma seção estratégica, transversal à galeria, para avaliação e verificação da zona de danos em profundidade no maciço, utilizando o programa computacional PHASE² e através do monitoramento por microfilmagem de quatro furos confeccionados ao longo da seção.

4.1. Verificação de danos no maciço através de microfilmagem

Através da microfilmagem foi possível determinar o valor D_f em profundidade, mostrando o processo de degradação ao redor do limite de escavação do maciço rochoso. A tabela 1 mostra o limite de dano obtido pela microfilmagem dos furos feitos na seção 2.

Tabela 1: Limite de danos obtido por microfilmagem de furos locados ao longo da seção transversal.

	MICROFILMAGEM	Limite de Danos
Furo 1		35cm
Furo 2		47cm
Furo 3		23cm
Furo 4		35cm

A partir dos resultados, verificou-se que a zona de danos no maciço rochoso em profundidade variou de 0,23m a 0,47m e, dessa forma, ficou estabelecido um valor médio de $D_f = 0,35m$.

4.2. Verificação de danos no maciço através do programa PHASE²

Essa etapa contou com análise computacional em duas dimensões da seção estratégica, utilizando o programa PHASE², para determinação da zona de danos em profundidade D_f .

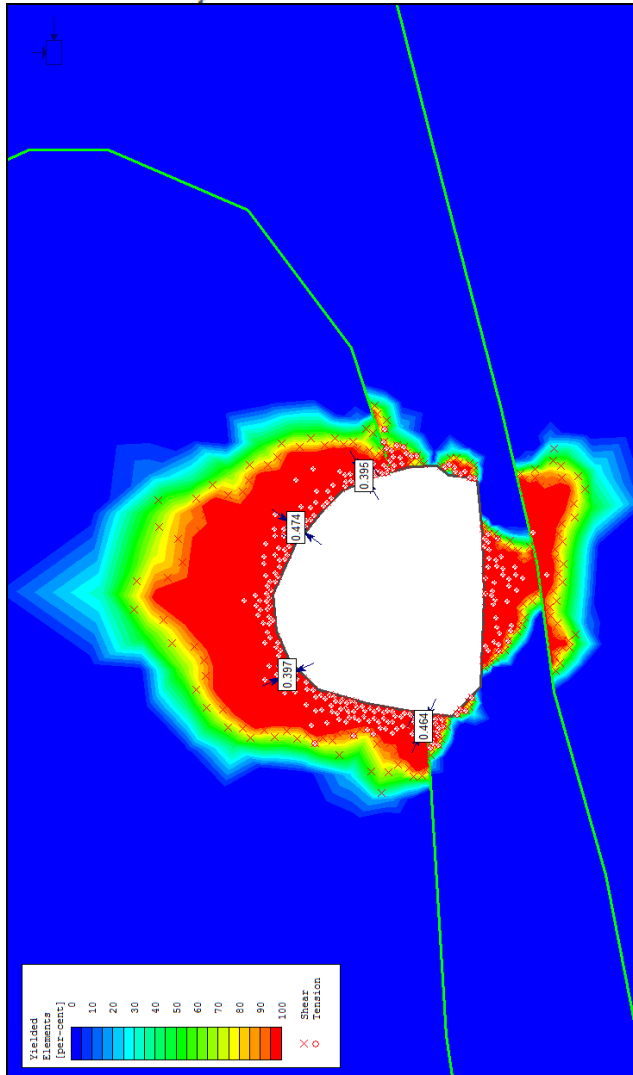


Figura 4: Análise da zona de danos em profundidade (seção estratégica), mostrando o limite de quebra por tensão.

A figura 4 mostra o limite em profundidade de quebra mecânica por tração ao redor da escavação. O valor médio obtido para a zona de danos $D_f = 0,43\text{m}$. A análise ainda permitiu verificar o limite de quebra ocasionado por cisalhamento, mostrando que à medida que o confinamento aumenta, o nível de quebra diminui, confirmando que o grau de fraturamento em profundidade diminui devido ao aumento do confinamento do maciço rochoso.

4.3. Caracterização e classificação do maciço rochoso

A caracterização e classificação do maciço rochoso, através do mapeamento geomecânico da galeria em estudo, foram realizadas pelos métodos Q (Tunnelling Quality Index, Barton *et al.* 1974), correlacionado àquele sugerido por Hoek *et al.* (1995); Marinos & Hoek (2007), o Geological Strength Index (GSI), o que permitiu certificar sobre a qualidade do maciço no limite escavação-rocha e em profundidade, além do limite de danos D_f , com recurso da microfilmagem.

Foi possível verificar que o valor de GSI para um mesmo ponto do maciço rochoso pode ser diferente, a depender do nível de profundidade, apresentando valor baixo na superfície da escavação, gradando proporcionalmente ao aumento da profundidade para além do limite escavação-rocha. Em profundidade, observou-se que número de juntas (Jn) diminui, acarretando no aumento do RQD, mantendo-se constantes após o limite D_f , onde o maciço rochoso apresenta valores de GSI constantes.

Expandindo esse conhecimento para os 19 pontos mapeados, foi possível estabelecer uma correlação dos valores de GSI para cada um desses pontos: valores baixos correspondem àqueles obtidos pela classificação do maciço no limite escavação-rocha e valores maiores obtidos pela classificação realizada através de microfilmagem, até a profundidade D_f (Fig. 5).

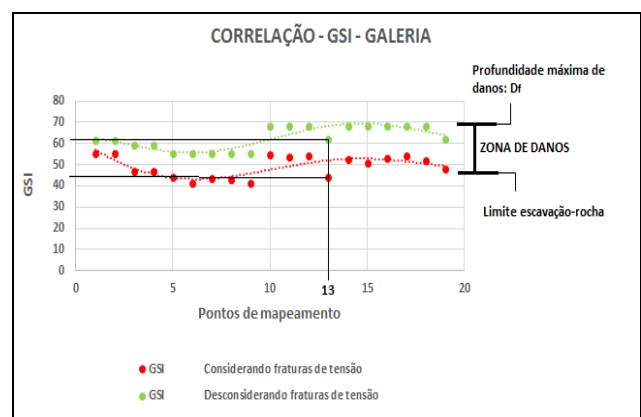


Figura 5: Gráfico mostrando dispersão de pontos mapeados considerando fraturas de tensão (Limite escavação-rocha e desconsiderando fraturas de tensão (Profundidade máxima D_f).

Ressalta-se que as fraturas foram consideradas como parâmetros de classificação do maciço no limite escavação-rocha (com diminuição do RQD e aumento do J_n) e desconsideradas (com aumento do RQD e diminuição do J_n) até o limite D_f , onde em profundidade a classificação do maciço se mantém constante.

Observa-se pela correlação que o valor de GSI, para determinados pontos mapeados, chegam a ter diferença percentual de até 40%, como mostrado para o ponto 13 de mapeamento (Fig.5), que está localizado próximo à seção utilizada para modelagem computacional e microfilmagem.

A Figura 6 resume o processo de degradação do maciço rochoso, mostrando a evolução de fraturamento no limite escavação-rocha e em profundidade, cujos danos foram ocasionados por tensão induzida e desmonte de rochas.

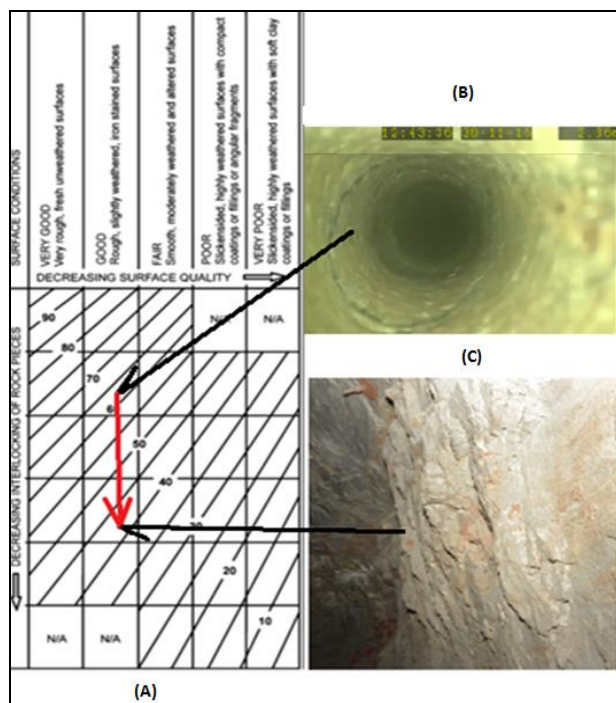


Figura 6: Redução da qualidade da rocha devido à degradação do maciço – Próximo ao ponto 13 de mapeamento. (A) Gráfico GSI mostrando degradação do maciço com caimento de aproximadamente 40%. Valores obtidos em profundidade e no limite escavação-rocha. (B) Imagem de microcâmera mostrando a qualidade do maciço com GSI aproximado de 62 (não considerando as fraturas induzidas por tensão). (C) Fraturamento no limite escavação-rocha com uma zona de danos de aproximadamente 50cm de espessura.

5. CONCLUSÕES

Diante dos dados coletados com essa pesquisa, verificou-se que a abertura de escavação subterrânea em rochas duras profundas geram danos ao maciço decorrentes de redistribuição de tensão e da detonação para desmonte de rocha. Através dos métodos de análise para determinação da espessura da zona de danos, (modelagem computacional, microfilmagem e método analítico) determinou-se que para a galeria em estudo o limite da zona de danos em profundidade é dado por $0,35m < D_f < 0,42m$.

O trabalho ainda permitiu realizar uma comparação entre os valores de GSI para os pontos mapeados (considerando a zona de danos decorrente do alto grau de fraturamento na interface escavação-rocha) e em profundidade, além do limite D_f de danos (desconsiderando o fraturamento induzido por redistribuição de tensão e desmonte em rocha).

Dessa forma, criou-se um fator de correlação (FC) para área estudada, considerando a variação percentual para cada ponto mapeado com relação aos valores máximo e mínimo de GSI (Fig. 7).

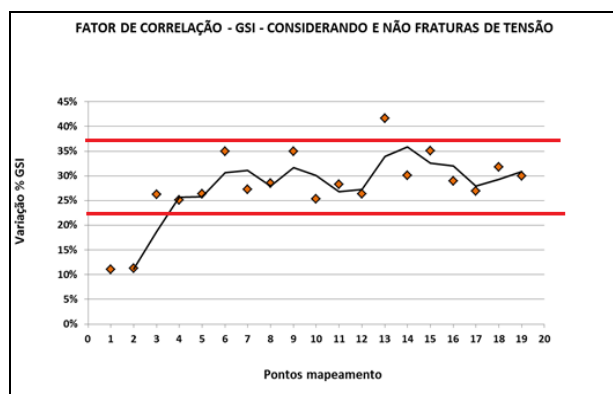


Figura 7: Fator de correlação (FC) para área em estudo, considerando e não o fraturamento induzido por redistribuição de tensão e desmonte em rocha dura: $25\% < FC < 35\%$.

Verifica-se que a qualidade do maciço rochoso estudado sofre um impacto, com geração de uma zona de danos (fraturamento induzido por redistribuição de tensão e desmonte em rochas duras) devido à abertura da escavação subterrânea, cuja degradação média varia entre 25% a 35% de sua qualidade e

classificação geomecânica original (antes da abertura da escavação).

REFERÊNCIAS

- Bastos, M. J. N. 1998. A Geotecnia na concepção, projecto e execução de túneis em maciços rochosos. MSc tese, Universidade Técnica de Lisboa.
- Barton, N. R., Lien, R. and Lunde, J. 1974. Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. *Rock Mech.*, 6(4): 189-239.
- Bewick, R. P. 2008. Effects of anisotropic rock mass characteristics on excavation stability. MASc thesis, Laurentian University.
- Bewick, R. P. & Kaiser, P.K. 2009. Numerical assessment of Factor B in Mathews' method for open stope design. 3rd Can/US Rock Symposium and 20th Canadian Rock Mechanics Conference.
- Brox, D. R. and Hagedorn, H. 1996. Prediction of in situ stresses based on observations and back analysis: Piora-Mulde exploratory tunnel, Gotthard Base Tunnel Project. Eurock '96, Barla (ed.). Balkema, Rotterdam.
- Calder, P. Perimeter blasting. In: Pit Slope Manual. Ottawa: CANMET (Canada Centre for Mineral and Energy Technology), 1977. Cap. 7, p. 37.
- Diederichs, M. S. 2003. Rock fracture and collapse under low confinement conditions. *Rock Mech. And Rock Engr.*, 35(5):339-381.
- Dinis Da Gama, C. (1998). "Quantification of rock damage for tunnel excavation by blasting". Proceedings of the World Tunnel Congress 98 on Tunnels and Metropolises. São Paulo, Brazil. 25-30 April 1998. Balkema, Rotterdam. pp. 451-456.
- Everitt, R. A. and Lajtai, E. Z. 2004. The influence of rock fabric on excavation damage in the Lac du Bonnet granite. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 41(2004): 1277-1303.
- HOEK, E., KAISER, P. K., BAWDEN, W. F. Support of Underground Excavations in Hard Rock. Rotterdam: Balkema, 1995. 210p
- JOHNSON, (1971). "Explosive Excavation Technology", U.S. Army Engineer Nuclear Cratering Group, Livermore.
- Kaiser, P.K., and Tannant, D.D., 2000. The Role of Shotcrete in Hard Rock Mines. Chapter in Mining Handbook, Hustrulid and Pollock eds, SME, 24 Figs., 22p.
- Kaiser, P.K., Yazici, S., and Maloney, S., 2000. Mining-induced stress change and consequences of stress path on excavation stability – a case study. *Int. J. of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 15 Figs., 23 p.
- Kaiser, P. K. 2005. Tunnel stability in highly stressed, brittle ground - Rock mechanics considerations for Alpine tunnelling. Keynote lecture, Geological AlpTransit Symposium GEAT'05, Zürich, Switzerland, 20 p, in press.
- Kaiser, P. K. 2006. Rock mechanics consideration for construction of deep tunnel in brittle ground. Keynote lecture, Asia Rock Mechanics Symposium, Singapore, 12 p, in press.
- Lajtai, E.Z., Carter, B.J., and Ayari, M.L., 1990. Criteria for brittle fracture in compression, *Engineering Fracture Mechanics*, 37(1): 25-49.
- Martin, C. D., Kaiser, P. K. and McCreath, D. R. 1999. Hoek-Brown parameters for predicting the depth of brittle failure around tunnels. *Can. Geotech. J.*, 36(1): 136-51.
- Marinos, P. G., Marinos, V. and Hoek, E. 2007. The Geological Strength Index (GSI): A characterization tool for assessing engineering properties for rock masses. Proceedings of the International Workshop on Rock Mass Classification in Underground Mining. DHHS (NIOSH) Publication No. 2007-128.
- Silva, J. C. R. M. As implicações do desmonte com explosivos na estabilidade da rocha remanescente em mina subterrânea. Ouro Preto: Escola de Minas, UFOP. 2004. p. 52-54. (Dissertação de Mestrado em Engenharia Mineral).
- Silva, J. C. R. M., Silva, Valdir Costa e, Avaliação dos danos causados pelo desmonte com explosivos no contorno de galerias subterrâneas a partir de um modelo baseado em medidas de velocidade de partícula. Ouro Preto: Escola de Minas, UFOP. Janeiro, 2006.
- Persson, P. A., Holmberg, R., Lee, J. Rock blasting and explosives engineering. Boca Raton: CRC Press, 1994. 540p.
- Ryan, J. M., Harris, S. P. Using state of the art blast modeling software to assist the excavation of the Yucca Mountain nuclear waste repository. In: High-Tech Seminar. State-of-the-Art Blasting Technology Instrumentation and Explosives Applications, 2000. Proceedings. Orlando: Blasting Analysis International Inc., 2000. p. 407-423.