

ANÁLISE DO *BREAKOUT* DO SILO DE UMA MINA SUBTERRÂNEA DE COBRE

Laura Alves dos Santos¹; Daniel Santos de Santana²; Larissa Regina Costa Silveira³; Paulo Gustavo Cavalcante Lins⁴

Resumo – O conhecimento das tensões naturais nos maciços rochosos é importante para, em conjunto com o conhecimento da resistência do maciço, determinar se existe condição de estabilidade em minerações subterrâneas. O objetivo desse trabalho é aplicar uma solução analítica através de análise de *breakouts* ao redor de um silo de passagem de estéril de uma mina subterrânea, para determinar as magnitudes das tensões horizontais maior e menor. Cinco sessões ao longo do silo foram analisadas. Para duas dessas sessões, os valores encontrados para tensão horizontal menor pela solução analítica estão próximos dos valores da tensão principal menor, encontrados através de uma medição anterior para o mesmo nível. Os contornos das tensões induzidas pela escavação, bem como do fator de segurança e da diferença entre tensões principais foram obtidos utilizando a solução de Kirsch. Apenas os contornos de tensão principal maior e de diferenças entre as tensões principais se assemelharam à forma dos *breakouts* tipicamente encontrados na literatura.

Abstract – It is important to know the *in situ* stress state in rock masses. Through the knowledge about the *in situ* stresses and the strength of the rock masses it is possible to determine the stability condition of excavations. The purpose of this work is applying an analytic solution through breakout analysis around a waste pass in an underground mine in order to determine the minor and major horizontal stresses. Five sections in the waste pass were analyzed. In two of them, the values obtained to the minor horizontal stress by analytic solution are close to values of minor principal stress obtained in previous measurements. The contours of stresses induced by excavation, the contours of strength factor and the contours of the difference between the major and minor principal stresses were determined by Kirsch solution. Only the contours of major principal stress and the difference between principal stresses were close to the *breakouts* profiles found in theoretical literature.

Palavras-Chave – Tensões *in situ*, *breakout*, tensões induzidas, estabilidade de escavações.

¹ Enga. Minas, Ero Brasil Caraíba, lauralvesantoss@gmail.com

² Eng. Minas, MSc Universidade Federal de Ouro Preto, (34) 99930-3249, daniel.santana.engminas@gmail.com

³ Profa., Dra., Universidade Federal de Minas Gerais, larissarcs@geol.igc.ufmg.br

⁴ Prof., Dr., Universidade Federal da Bahia, (71) 3283-9836, plins@ufba.br

1. INTRODUÇÃO

A mecânica de rochas aplicada à mineração subterrânea busca antecipar o comportamento de tensão e deformação da rocha gerado no corpo do minério e nas encaixantes por qualquer processo de escavação. Os projetos de estruturas na superfície são desenhados baseados nas cargas impostas pelo sistema considerando a geometria da estrutura, função operacional e materiais constituintes. O desenho de projetos em escavações subterrâneas, por sua vez, depende do estado natural de tensão pré-abertura (tensões *in situ*) e das tensões originadas pela própria escavação. O conhecimento das tensões naturais é importante para, em conjunto com o conhecimento da resistência do maciço rochoso, antecipar as considerações referentes à estabilidade de escavações subterrâneas.

Segundo Ljunggren *et al.* (2003), os métodos para determinação das tensões *in situ* em rocha podem ser classificados em duas categorias: o primeiro consiste em métodos que geram o distúrbio na condição *in situ* da rocha por meio da indução de deformação ou da abertura de fraturas, tais como o alívio de tensões em blocos, o macaco plano de pequena área, as técnicas de sobrefuração e o fraturamento hidráulico; a segunda categoria consiste em métodos baseados na observação do comportamento da rocha sem nenhuma influência de métodos de medição, tais como *core-discing*, *breakout* e métodos acústicos. No presente trabalho será dada atenção para o estudo de *breakout*.

Stephansson & Zang (2012) defendem que as medições de tensão sejam conduzidas após a compilação do melhor modelo de tensão estimado. Às vezes, os modelos numéricos podem ser úteis na estimativa do efeito das variações dos parâmetros geológicos no estabelecimento de um modelo de tensão para um local. Stephansson & Zang (2012) apresentam contribuição para estabelecer o modelo final de tensões na rocha a partir de uma combinação de dados de tensão disponíveis do melhor modelo de tensão estimado, novos dados de tensão de métodos de medição de tensão no local e determinação de tensão integrada usando dados anteriores mais modelagem numérica.

O objetivo principal deste trabalho é determinar os valores de magnitude da tensão horizontal maior (σ_H) e da tensão horizontal menor (σ_h) analisando as magnitudes dos *breakout*, no silo de *Waste Pass* da Mina UG Pilar (antiga mina Caraíba), pertencente à Ero Brasil, calculados por meio de soluções analíticas propostas pelos autores Zoback *et al.* (1985), Figueiredo (2018) *apud* Guimarães (2019) e Armelin & Guimarães (2022). Adicionalmente, um código matemático foi desenvolvido em Matlab/Octave para visualizar os resultados da solução de Kirsch (1898) com base nos dados apresentados pela solução analítica.

2. ANÁLISE DO BREAKOUT

Considere-se uma abertura circular submetida a um campo de tensões homogêneo composto de uma tensão horizontal maior (σ_H) e de uma tensão horizontal menor (σ_h). Dependendo da relação entre as magnitudes das tensões *in situ* e das resistências a compressão e a tração da rocha, no entorno de uma abertura circular pode surgir uma fratura de tração paralela a tensão horizontal maior (σ_H). No sentido oposto, ocorre o lasqueamento (*spalling*) da parede da abertura na direção da tensão horizontal menor (σ_h). Este processo de lasqueamento forma um *breakout* com forma de orelha de cão (*dog ear*) ou um entalhe (*notch*), conforme discutido em Zoback *et al.* (1985) e Guimarães (2019). A Figura 1 ilustra o esquema do *breakout* no entorno de uma abertura circular.

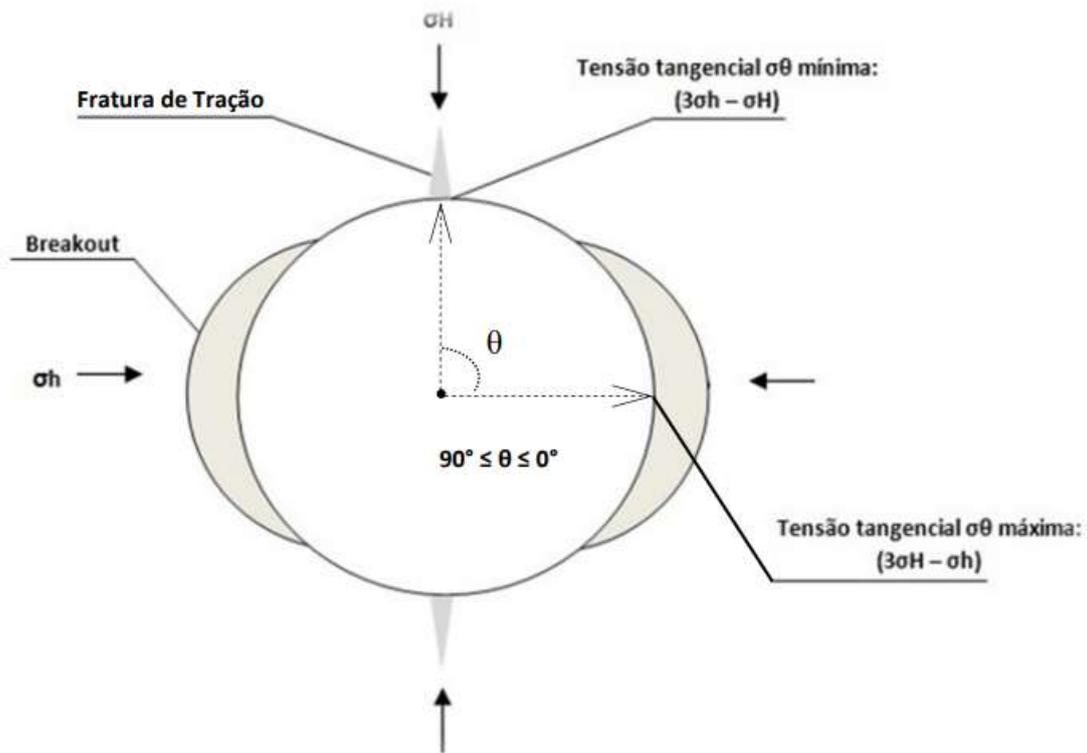


Figura 1. Desenho esquemático de *breakout* em estrutura circular escavada no maciço rochoso (Zoback, 1992 modificado por Guimarães, 2019).

Zoback *et al.* (1985) discutem que na literatura técnica a análise da formação de rupturas previu que as rupturas são regiões lasqueadas em cada lado do poço que são centralizadas no azimute da menor tensão principal horizontal onde a concentração de tensão compressiva era maior. Para Zheng *et al.* (1989), o mecanismo de formação de *breakouts* pode ser explicado como uma sequência de estágios de ruptura que ocorre inicialmente por tração com o crescimento unificado de microfissuras paralelas à parede do furo de sondagem, seguido por ocorrências de rupturas por cisalhamento na medida que se propaga para o interior da rocha. Com o avanço da ruptura, a tensão de confinamento do maciço atua para que ocorra a estabilização do *breakout*, atingindo então o seu formato final. Tendo em vista que o mecanismo de ruptura para o estágio final da geometria do *breakout* é governado por cisalhamento, pode-se adotar um critério que atenda este tipo de modelo para efetuar os cálculos necessários e se obter as magnitudes das tensões principais horizontais.

De acordo com Armelin & Guimarães (2022), a solução analítica adotada assume a premissa que a rocha tem comportamento elástico o que permite, ao analisar o fenômeno do *breakout* e a sua forma final estabilizada, aplicar o critério de ruptura, definindo as condições de contorno do *breakout* e adotando-se uma zona de compressão uniaxial simples ou um ensaio triaxial de baixa tensão de confinamento. A demonstração do cálculo analítico é descrita a partir da adoção do critério de Mohr-Coulomb sendo expresso em função das tensões principais σ_1 e σ_3 .

Na ocorrência do *breakout*, a rocha por estar desconfinada em geometria circular e sofrer a ação do rearranjo das tensões na parede do furo, ela se rompe de forma característica ilustrada na Figura 2.

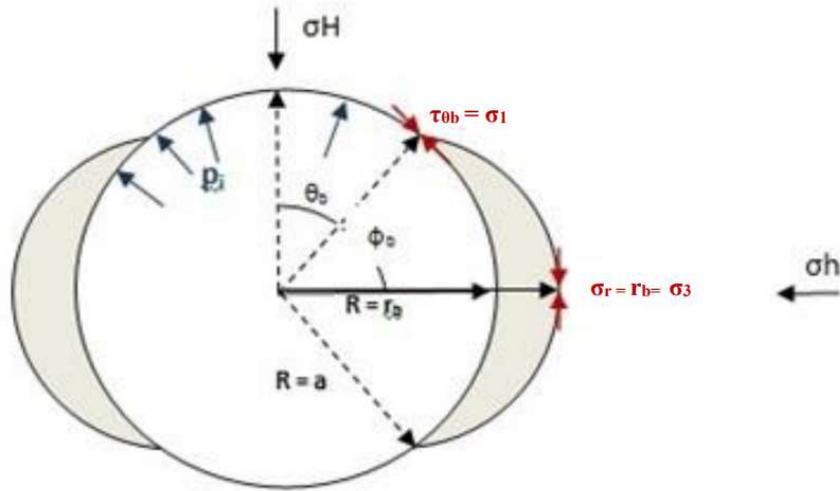


Figura 2. Parâmetros utilizados na análise de breakout, conforme Guimarães (2019).

Ao satisfazer o critério de Mohr-Coulomb para os dois pontos notáveis, de acordo com Armelin & Guimarães (2022), tem-se por meio de um sistema de duas equações e duas incógnitas que, portanto, admitem solução, os valores de σ_H e σ_h :

$$\sigma_H = \{3R^4 p_i + 3R^4 \sigma_c + 2r_b^4 \sigma_c + 3R^4 b^2 p_i + R^2 p_i r_b^2 - R^2 r_b^2 \sigma_c + 2b^2 p_i r_b^4 - 4r_b^4 \sigma_c \cos(2\theta_b) + 6R^4 b p_i + 3R^4 b \sigma_c + 2b p_i r_b^4 - 2b r_b^4 \sigma_c - 4R^2 b p_i r_b^2 - 5R^2 b r_b^2 \sigma_c - 5R^2 b^2 p_i r_b^2 - 4R^2 p_i r_b^2 \cos(2\theta_b) - 4R^2 b p_i r_b^2 \cos(2\theta_b)\} \div \{6R^4 b + 2b r_b^4 + 6R^4 + 2r_b^4 - 4r_b^4 \cos(2\theta_b) - 8R^2 b r_b^2 + 4b r_b^4 \cos(2\theta_b) - 4R^2 r_b^2 \cos(2\theta_b) - 4R^2 b r_b^2 \cos(2\theta_b)\} \quad (1)$$

$$\sigma_h = \{3R^4 p_i + 3R^4 \sigma_c + 2p_i r_b^4 + 3R^4 b^2 p_i - R^2 p_i r_b^2 + R^2 r_b^2 \sigma_c - 4r_b^4 \sigma_c \cos(2\theta_b) + 6R^4 b p_i + 3R^4 b \sigma_c + 2b p_i r_b^4 - 4R^2 b p_i r_b^2 - 3R^2 b r_b^2 \sigma_c - 3R^2 b^2 p_i r_b^2 - 4R^2 p_i r_b^2 \cos(2\theta_b) - 4R^2 b p_i r_b^2 \cos(2\theta_b)\} \div \{6R^4 b + 2b r_b^4 + 6R^4 + 2r_b^4 - 4r_b^4 \cos(2\theta_b) - 8R^2 b r_b^2 + 4b r_b^4 \cos(2\theta_b) - 4R^2 r_b^2 \cos(2\theta_b) - 4R^2 b r_b^2 \cos(2\theta_b)\} \quad (2)$$

Onde:

$R = a$ = raio da escavação;

r_b = raio do breakout;

p_i = pressão interna;

σ_c = resistência à compressão uniaxial da rocha;

$\theta_b = 90^\circ - \Phi_b$

Φ_b = ângulo de semiabertura do breakout;

$b = (1 + \sin\Phi) / (1 - \sin\Phi)$;

Φ = ângulo de atrito.

3. HISTÓRICO DE MEDIDAS DE TENSÃO IN SITU NA MINA UG PILAR

Uma discussão detalhada dos levantamentos das tensões *in situ* na Mina UG Pilar (antiga mina Caraíba) pode ser encontrada em de Freitas (2016). O trabalho de dos Santos (2024) apresenta uma sistematização dos dados das medidas de tensão *in situ*, cujos resultados são apresentados em relação ao azimute na Tabela 1 e em relação a K_H e k_h na Tabela 2.

Tabela 1. Resultados das estimativas das tensões *in situ*, em relação ao azimute (modificado de dos Santos, 2024).

Ano	Autor/método	Azimute de σ_1 e σ_3 respectivamente
1983	IPT/SP Triaxiais CSIRO	077° e 176°
1989	Yocitero Hasui Análise Estrutural	110° e 100°
1990	IPT/SP Doostoper + Leman	260° e 130°
1995	John Smith	090° e 000°
1995	Figueiredo	090° e 000°
1999	Simulação numérica + Discing Golder Associates	090° e 000°
2007	Figueiredo Modelo de Sheorey + Discing	090° e 000°
2022	Ingeroc CSIRO + Hollow Inclusion	350,8° e 88,8° (Cálculo 1) * 345° e 81,2° (Cálculo 2) *
2023	Quintin Simulação numérica	000° e 106°
2023	Quintin Discing + Breakout	350° e 090°

*Os valores apresentados são, nesse caso, os obtidos para σ_1 e σ_2 e correspondem às tensões horizontais máxima e mínima, respectivamente.

Tabela 2. Resultados das estimativas das tensões *in situ*, em relação a k_H e k_h (modificado de dos Santos, 2024).

Ano	Autor/método	Valores de k_H e k_h
1983	IPT/SP Triaxiais CSIRO	4 e 1,7
1989	Yocitero Hasui Análise Estrutural	-
1990	IPT/SP Doostoper + Leman	2,1 e 1,4
1995	John Smith	-
1995	Figueiredo	2 e 1,7
1999	Simulação numérica + Discing Golder Associates	-
2007	Figueiredo Modelo de Sheorey + Discing	1,5 e 1,3
2022	Ingeroc CSIRO + Hollow Inclusion	1,5 e 1,3
2023	Quintin Simulação numérica	1,6 e 1,3
2023	Quintin Discing + Breakout	-

4. ANÁLISE DE BREAKOUT DO SILO DE WASTE PASS DA MINA UG PILAR

A Mina UG Pilar está em processo de construção de uma nova câmara de britagem com o objetivo de atender à produção da área mais profunda da operação. O *layout* deste projeto inclui

duas escavações circulares em formato de poço utilizados para o transporte de minério e estéril, respectivamente chamados de *Ore Pass* e *Waste Pass* (dos Santos, 2024).

A abertura dessas escavações é realizada de forma mecanizada, sem a prática de desmonte, por meio de um equipamento conhecido como *slot borer*. A fase inicial do projeto compreende a execução de um furo piloto central de aproximadamente 11" de diâmetro, que é posteriormente alargado para o diâmetro calculado, conforme as exigências do projeto acordadas previamente entre o planejamento e a operação. No furo de *Waste Pass*, que se inicia no nível N-991 e se prolonga até o N-1078, a profundidades de 1441m e 1528m respectivamente, foi diagnosticado a ocorrência do fenômeno de *Breakout* que será o foco deste estudo (dos Santos, 2024).

Para estimar as tensões *in situ* resultantes desse fenômeno, conforme a solução apresentada nas equações 1 e 2, foram realizadas cinco seções transversais a partir do sólido de escaneamento da escavação (modelo digital da superfície do furo) e tratadas nos *softwares* Datamine e ZWCAD. Essas seções visam analisar o comportamento do *Breakout* e coletar parâmetros importantes como: (1) abertura do *breakout*; (2) raio do furo; (3) raio do *breakout* e (4) profundidade da ocorrência do *breakout*. Os parâmetros (5) ângulo de atrito; (6) pressão interna exercida pela água; (7) peso específico da rocha; (8) resistência à compressão axial da rocha foram coletas no próprio setor da Geotecnia da mina a partir de ensaios anteriores (dos Santos, 2024).

A Figura 3 ilustra uma das seções definidas a partir do escaneamento do furo de *Waste Pass*. Note-se que o *breakout* não possui uma simetria perfeita, de modo que foram consideradas duas condições (dois raios) para cada seção.

A Tabela 3 apresenta os resultados da aplicação da solução analítica de Figueiredo (2018) *apud* Guimarães (2019) (Equações 1 e 2) para as cinco seções consideradas. Em todas as análises adotou-se o ângulo de atrito $\phi = 0^\circ$, pressão interna $p_i = 0$, peso específico da rocha $\gamma = 0,027 \text{ MN/m}^3$, resistência a compressão uniaxial $\sigma_c = 168,49 \text{ MPa}$ e desconsiderou-se a presença de água. A solução analítica de Figueiredo (2018) *apud* Guimarães (2019) considera o critério de Mohr-Coulomb, o valor do ângulo de atrito foi adotado como nulo, seguindo o procedimento de cálculo de Guimarães (2019). A resistência a compressão simples foi obtida em ensaios de laboratório.

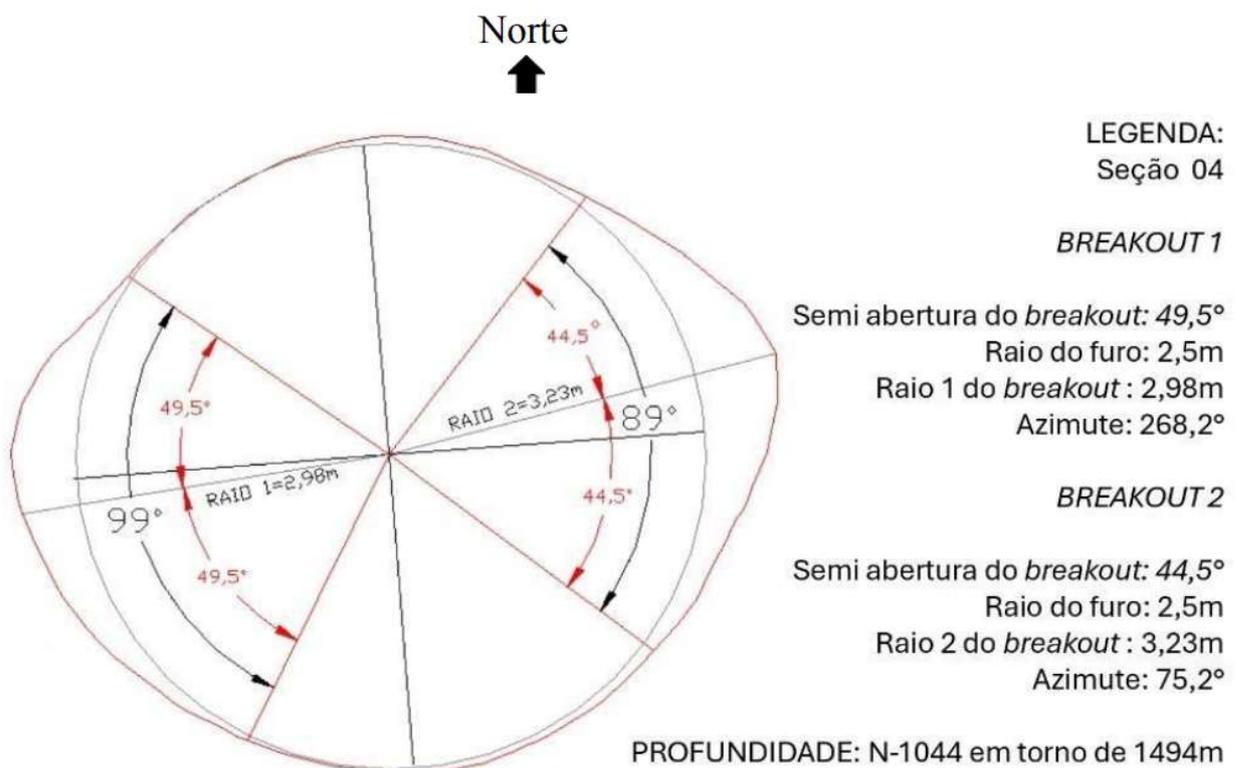


Figura 3. A quarta seção realizada a partir do escaneamento do furo de *Waste Pass* (dos Santos, 2024).

Tabela 3. Resultados da solução analítica de Figueiredo (2018) *apud* Guimarães (2019) para os furos de *raiser borer* do *waste pass* nas respectivas profundidades em que ocorrem os *breakouts* e cálculo do fator K (modificado de dos Santos, 2024).

Seção	Azimute (°)	ϕ_b (°)	$R=a$ (m)	r_b (m)	Profundidade (m)	σ_v (MPa)	σ_H (MPa)	σ_h (MPa)	Média de valores de k_H e k_h
1	248,2	36	2,6	2,99	1473	39,7	104,1	79,6	
1	89,9	42	2,6	2,95	1473	39,7	100,3	73,8	2,6 e 1,9
2	267	47,5	2,5	3,12	1480	41,4	113,9	42,1	
2	86	39,5	2,5	2,87	1480	41,4	103	75,9	2,6 e 1,4
3	260,9	42,5	2,5	2,95	1487	41,6	106,8	68,4	
3	60,6	40,5	2,5	3,08	1487	41,6	115,9	67,7	2,7 e 1,6
4	268,2	49,5	2,5	2,98	1494	40,3	104,2	46	
4	75,2	44,5	2,5	3,23	1494	40,3	123,1	48	2,8 e 1,2
5	258,7	43,5	2,54	3,37	1501	40,5	129,3	47,7	
5	80,9	40	2,54	3,11	1501	42	110,4	71,9	2,9 e 1,4

As seções 4 e 5 serão o foco do estudo por estarem mais representadas ao descrito na literatura sobre a forma final e estabilizada do *breakout* e os valores encontrados serão comparados com as estimativas de tensão *in situ* realizadas na mina. Ao analisar os dados apresentados pela última campanha de medição de tensões *in situ* utilizando o método sobrefuração, conduzido pela empresa Ingeroc no ano de 2022, na profundidade 1460m, observa-se que a orientação de σ_h , obtida através da solução analítica, é similar à orientação da tensão horizontal mínima apresentada na Tabela 1.

Os resultados obtidos pela solução analítica de Figueiredo (2018) *apud* Guimarães (2019) indicam magnitudes de σ_H e σ_h para a seção 4 de 104 MPa, 46 MPa (Raio 1 do *breakout*) e 123 MPa e 48 MPa (Raio 2 do *breakout*), respectivamente. Na seção 5 é de 129 MPa e 47 MPa (Raio 1 do *breakout*) e 110 MPa, 71 MPa (Raio 2 do *breakout*), respectivamente. Em comparação, os valores apresentados pela Ingeroc para σ_1 e σ_3 são cerca de 87,56 MPa, 60,60 MPa e 69,31 MPa, 47,41 MPa para valores de módulos de elasticidade e Poisson distintos (dos Santos, 2024).

Nota-se também que o valor de k_h da solução analítica é próximo ao resultado obtido pelo ensaio de sobrefuração (Tabela 2), o que infere que os valores de σ_2 da campanha de medição *in situ* estão próximos dos resultados encontrados para σ_h nos cálculos aqui apresentados, enquanto os valores de σ_H (tensão horizontal máxima) encontrados através da solução analítica estão superiores aos de σ_1 apresentados pela empresa Ingeroc (dos Santos, 2024).

5. ANÁLISE DAS TENSÕES AO REDOR DO FURO

A solução de Kirsch (1898) permite calcular as tensões ao redor de uma abertura circular em um meio elástico, em um campo de tensões não hidrostático. Considerando um sistema de coordenadas polares e incluindo a presença de uma pressão interna, as equações podem ser expressas na forma:

$$\sigma_r = \frac{\sigma_x^o + \sigma_y^o}{2} \left(1 - \frac{R_w^2}{r^2}\right) + \frac{\sigma_x^o - \sigma_y^o}{2} \left(1 + 3\frac{R_w^4}{r^4} - 4\frac{R_w^2}{r^2}\right) \cos 2\theta + p_w \frac{R_w^2}{r^2} \quad (3)$$

$$\sigma_\theta = \frac{\sigma_x^o + \sigma_y^o}{2} \left(1 + \frac{R_w^2}{r^2}\right) - \frac{\sigma_x^o - \sigma_y^o}{2} \left(1 + 3\frac{R_w^4}{r^4}\right) \cos 2\theta - p_w \frac{R_w^2}{r^2} \quad (4)$$

$$\tau_{r\theta} = \frac{\sigma_y^o - \sigma_x^o}{2} \left(1 - 3\frac{R_w^4}{r^4} + 2\frac{R_w^2}{r^2}\right) \sin 2\theta \quad (5)$$

Onde:

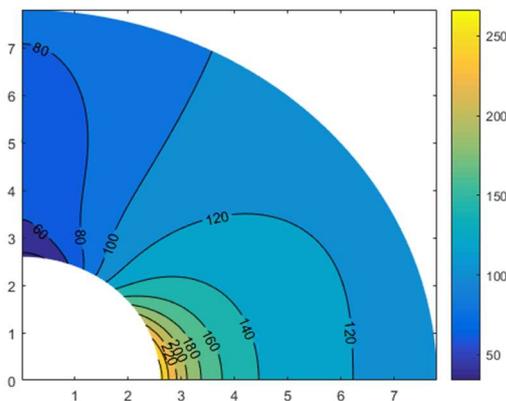
σ_y^o e σ_x^o são respectivamente as tensões verticais e horizontais *in situ*;

θ e r são o ângulo e o raio do sistema de coordenadas polares;

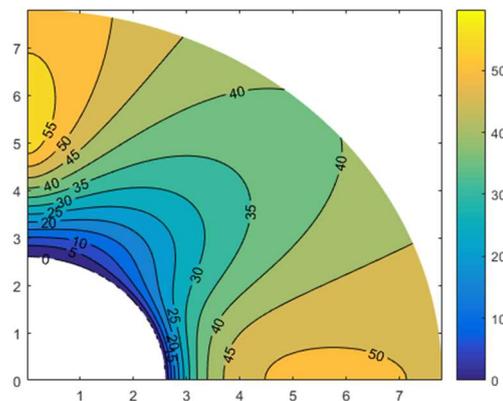
R_w é o raio da abertura;

p_w é a pressão interna aplicada na abertura.

Um código foi desenvolvido em Matlab/Octave para visualizar os resultados da solução de Kirsch (1898). O primeiro raio da seção 4 foi considerado com $\sigma_H = 104,2$ e $\sigma_h = 46$ MPa. A Figura 4(a) apresenta contornos de tensão principal maior (σ_1). A Figura 4(b) apresenta contornos de tensão principal menor (σ_3). A Figura 5(a) apresenta contornos de diferença entre as tensões principais maior e menor ($\sigma_1 - \sigma_3$). A Figura 5(b) apresenta contornos de fator de segurança local $(\sigma_1 - \sigma_3)_{ruptura} / (\sigma_1 - \sigma_3)$.

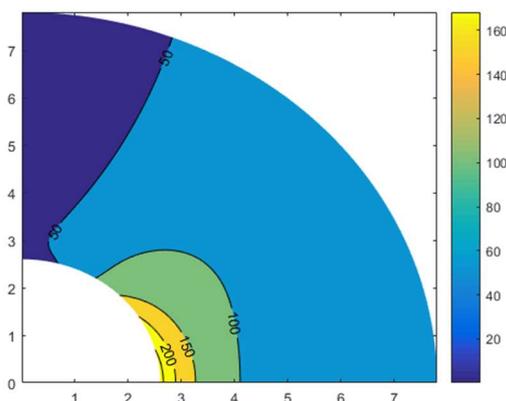


(a) Tensão principal maior (σ_1).

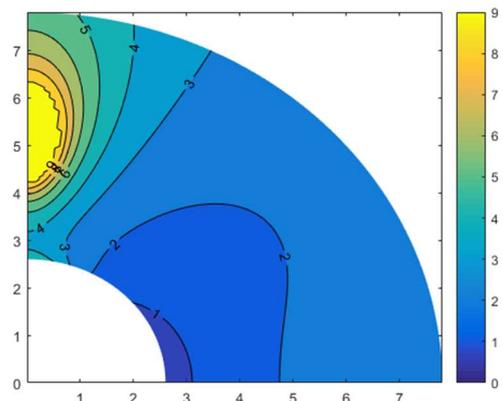


(b) tensão principal menor (σ_3).

Figura 4. Contornos de tensões principais.



(a) Diferença entre tensões principais ($\sigma_1 - \sigma_3$)



(b) Fator de segurança local

$$(\sigma_1 - \sigma_3)_{ruptura} / (\sigma_1 - \sigma_3).$$

Figura 5. Indicadores de ruptura.

Os fatores de segurança local foram calculados considerando o critério de ruptura de Mohr-Coulomb. A coesão foi adotada como metade da resistência a compressão simples ($\sigma_c = 168,49$ MPa). A pressão interna foi considerada nula. O ângulo de atrito foi considerado nulo, seguindo o procedimento de cálculo adotado por Guimarães (2019), ver item 4.

Os contornos de tensão principal menor mostrado na Figura 4(b) não apresenta relação com a forma do *breakout* encontrado nas medidas de campo. Por outro lado, formas similares ao *breakout* teórico são encontradas nos contornos de tensão principal maior (Figura 4(a)); nos contornos de diferença entre as tensões principais maior e menor (Figura 5(a)) e nos contornos de fator de segurança local (Figura 5(b)). A região delimitada pelo fator de segurança local unitário e a forma do *breakout* é consistente com as hipóteses tomadas no desenvolvimento de Figueiredo (2018) *apud* Guimarães (2019).

6. CONCLUSÕES

Diante da importância do conhecimento do estado de tensões in situ e induzidas, sobretudo em obras subterrâneas em geral, diversas técnicas de medição são utilizadas, bem como algumas soluções analíticas e numéricas foram propostas. Diante da complexidade inerente desse tema, é importante que as interpretações geológicas estabeleçam um diálogo coerente entre as medidas de tensão e os modelos analíticos e numéricos gerados.

Nesse trabalho foi aplicada a solução proposta por Figueiredo (2018) *apud* Guimarães (2019) para determinar os valores de magnitude da tensão horizontal maior (σ_H) e da tensão horizontal menor (σ_h) através da ocorrência dos *breakouts*, no silo de *Waste Pass* da Mina UG Pilar. Esses resultados puderam ser comparados com medidas anteriores das tensões in situ, realizadas nessa mesma mina.

Cinco sessões ao longo do silo em questão foram analisadas, sendo que as seções 4 e 5 foram as que mais se assemelharam aos perfis típicos de *breakouts* encontrados na literatura. Os resultados obtidos pela solução analítica de Figueiredo (2018) *apud* Guimarães (2019), indicam magnitudes de σ_H e σ_h para a seção 4 de 104 MPa, 46 MPa (Raio 1 do *breakout*) e 123 MPa e 48 MPa (Raio 2 do *breakout*), respectivamente. Na seção 5 é de 129 MPa e 47 MPa (Raio 1 do *breakout*) e 110 MPa, 71 MPa (Raio 2 do *breakout*), respectivamente.

Dentre os dados de tensões obtidos por consultorias e medições anteriores, o que mais se aproxima do resultado encontrado para o mesmo nível foram os valores medidos pela Ingeroc, onde σ_1 e σ_3 são cerca de 87,56 MPa, 60,60 MPa e 69,31 MPa, 47,41 MPa. Nota-se que os valores de σ_3 estão próximos dos resultados encontrados para a σ_h (tensão horizontal mínima), enquanto os valores de σ_H (tensão horizontal máxima) encontrados através da solução analítica são maiores que os σ_1 apresentados pela empresa Ingeroc. Isso pode ter acontecido por se tratar de métodos diferentes, sendo um analítico. Além do mais, os valores do módulo de elasticidade e do coeficiente de Poisson são distintos. Ainda assim, pode-se considerar que o resultado da solução analítica é satisfatório, diante das dificuldades envolvidas em medições e estimação de tensões.

A solução de Kirsch também foi aplicada para determinar os contornos das tensões ao redor da escavação, bem como os contornos do fator de segurança ($(\sigma_1 - \sigma_3)_{ruptura} / (\sigma_1 - \sigma_3)$) e da diferença entre tensão maior e menor ($\sigma_1 - \sigma_3$). Apenas os contornos de $(\sigma_1 - \sigma_3)$ e de σ_1 se assemelharam à forma do *breakout* teórico.

É imprescindível que os estudos geotécnicos relacionados à medição de tensões sejam continuamente aprimorados e revisados, sobretudo com o aprofundamento das operações. Isso assegura a segurança das operações e equipamentos, além de contribuir para a prolongação da vida útil da mina.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Ero Brasil Caraíba pelo suporte oferecido.

REFERÊNCIAS

- ARMELIN, J.L. & GUIMARÃES, A.J. (2022) *Considerações gerais sobre tensões in situ e a aplicação de breakouts em sua determinação*, Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental, São Paulo. 165 p.
- DE FREITAS, J.P. (2016) *Elaboração do modelo geomecânico tridimensional para a reavaliação e setorização geotécnica dos realces da Mineração Caraíba*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto.
- DOS SANTOS, L.A. (2024) *Estimativa das tensões in situ analisando a ocorrência de Breakout na Ero Brasil Caraíba*. Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia de Minas, Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia.
- GUIMARÃES, A.J. (2019) *Estudo de breakouts em maciços rochosos para determinação da magnitude das tensões in situ*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto.
- LJUNGGREN, C., CHANG, Y., JANSON, T. & CHRISTIANSSON, R. (2003). "An overview of rock stress measurement methods". in *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, v. 40, n. 7-8, p. 975-989.
- KIRSCH, E.G. (1898) "Die theorie der elastizität und die bedürfnisse der festigkeitslehre". in *Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure*, Band 42, p.797-807.
- STEPHANSSON, O. & ZANG, A. (2012) "ISRM Suggested Methods for rock stress estimation -Part 5: Establishing a Model for the in situ stress at a given site". in *Rock Mechanics and Rock Engineering*, Vol. 45, p. 955-969.
- ZOBACK, M.D.; MOOS, D.; MASTIN, L. & ANDERSON, R.N. (1985) "Wellbore breakouts and in situ stress". in *Journal of Geophysical Research*, Vol. 90, n. B7, p.523-5530.
- ZHENG, Z.; KEMENY, J. & COOK, N.G.W. (1989) "Analysis of borehole breakouts". in *Journal of Geophysical Research*, Vol. 94, n.B6, p.7171-7182.