

Caracterização Geológico-Geotécnica da Mina Subterrânea de Vazante

Paulo André Charbel

Instituto Federal de Goiás, IFG, Goiânia, Brasil, pauloanch@gmail.com

Hernán Eduardo Martínez Carvajal

Universidade de Brasília, UnB, Brasília, Brasil, carvajal@unb.br

Márcio Muniz de Farias

Universidade de Brasília, UnB, Brasília, Brasil, muniz@unb.br

André Pacheco de Assis

Universidade de Brasília, UnB, Brasília, Brasil, aassis@unb.br

RESUMO: O comportamento mecânico de um maciço rochoso, sujeito à influência de escavações de uma mina subterrânea, depende de condições geomecânicas do maciço e de condições operacionais. Este trabalho, desenvolvido na mina Vazante, atém-se à descrição das condições geomecânicas do maciço rochoso, a qual abrange fatores intrínsecos e extrínsecos ao maciço. Os fatores intrínsecos referem-se às características da rocha intacta e das descontinuidades do maciço. Os fatores extrínsecos referem-se às condições circunstanciais presentes no maciço, as quais, neste estudo, são as condições de tensões *in situ* e de fluxo de água subterrânea. Para descrever os fatores intrínsecos e extrínsecos ao maciço rochoso da mina Vazante, desenvolveu-se uma caracterização geológico-geotécnica. Resultou desta caracterização, inicialmente, um modelo geológico-geotécnico e, posteriormente, um modelo físico da mina, onde condições geomecânicas, considerando a variabilidade natural de parâmetros geotécnicos, foram descritas tão mais próximo à realidade quanto possível. O modelo físico tornou-se base para estudos posteriores de análise numérica aplicada à diluição não planejada de minério. Assim, a caracterização geológico-geotécnica descrita visou, estritamente, os estudos de diluição não planejada de minério por meio de análises numéricas.

PALAVRA-CHAVE: caracterização geológico-geotécnica, modelo geológico-geotécnico, modelo físico.

1 INTRODUÇÃO

A caracterização geológico-geotécnica, ora apresentada, é parte de um estudo acadêmico sobre diluição não planejada de minério desenvolvido na mina Vazante. Entende-se por diluição não planejada (diluição externa ou de diluição secundária), a contaminação do minério por material abaixo do teor de corte, que se encontra além do limite de lavra (Figura 1). Esta contaminação decorre de deslocamentos ou sobre-escavação (*overbreak*) verificados nas rochas encaixantes aos realces de mina. A mina Vazante é uma mina subterrânea de zinco, de propriedade da Votorantim Metais (VM), situada no município de Vazante, Brasil.

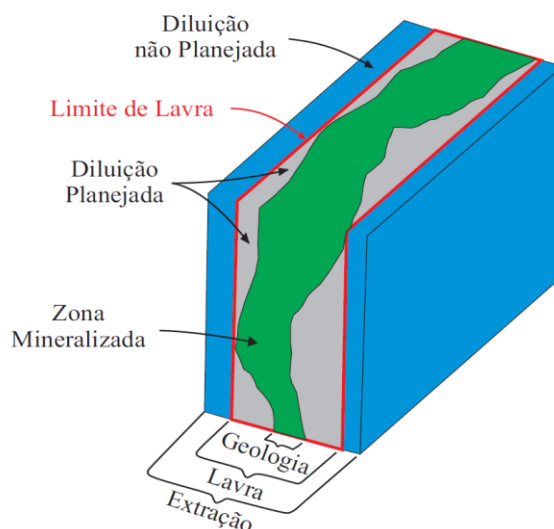


Figura 1 – Diluição não planejada (modificado de Scoble & Moss, 1994).

O objetivo deste trabalho é descrever o processo de elaboração dos modelos geológico, geológico-geotécnico e físico, onde condições geomecânicas dos maciços rochosos estão descritas. Este modelo deve ser tão mais fiel à realidade quanto possível, pois representará o maciço rochoso da mina em estudos de análise numérica aplicada à diluição não planejada.

Para descrever o processo de elaboração dos modelos, o trabalho está separado em quatro tópicos: caracterização geológico-geotécnica; elaboração do modelo geológico; elaboração do modelo geológico-geotécnico; elaboração do modelo físico.

2 CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICA

A caracterização geológico-geotécnica é um procedimento de descrição e quantificação de condições de um maciço, que isolada ou conjuntamente, condicionam o seu comportamento, perante solicitações impostas por uma obra de engenharia ou pela própria natureza. Nas escavações subterrâneas, a caracterização geológico-geotécnica constitui-se em prática fundamental, como forma de avaliar a qualidade do maciço a ser escavado. O planejamento e a execução destas investigações geológico-geotécnicas devem observar dois requisitos. O primeiro é ater-se à descrição e à quantificação das condições do maciço, pertinentes ao problema geotécnico analisado. O segundo é gerar informações, cuja qualidade satisfaça à sofisticação dos métodos de projeto (empíricos, analíticos ou numéricos) utilizados no planejamento e execução das escavações (Franciss em 1974 citado por Serra Júnior & Ojima 2009).

A caracterização geológico-geotécnica da mina Vazante teve-se à descrição e à quantificação de condições geomecânicas do maciço rochoso, que influenciam a diluição não planejada de minério. Quanto à qualidade das informações geradas nesta caracterização, visou-se satisfazer as necessidades exigidas pelas análises numéricas aplicadas ao estudo de diluição não planejada de minério, em uma determinada área da mina.

Face aos objetivos descritos anteriormente, a caracterização geológico-geotécnica pode ser separada em três fases: elaboração do modelo geológico; elaboração do modelo geológico-geotécnico e; elaboração do modelo físico.

3 ELABORAÇÃO DO MODELO GEOLÓGICO

As condições geológicas e estruturais, bem como as tensões tectônicas, presentes no âmbito de uma mina, são um produto da história geológica de uma macrorregião, onde a mesma se insere. Assim, a formação geológica, os tipos de dobras, falhas e juntas, presentes na escala de uma mina, representam uma fração de um padrão geológico estrutural mais amplo, originados a partir de processos geológicos de magnitude regional (Hoek & Brown, 1980).

Em observação às considerações anteriores, o modelo geológico representa uma visão inicial sobre o maciço rochoso da mina. Este modelo decorre da interpretação de trabalhos anteriores de geologia regional e local, que descrevem o ambiente geológico onde se insere o depósito zincífero de Vazante.

O ambiente geológico da mina, em síntese, caracteriza-se por uma mineralização associada a uma estrutura tectônica denominada Zona de Cisalhamento Vazante (ZCV), ou Falha Vazante (FV), a qual corta, de forma discordante, uma sequência de rochas carbonáticas. A ZCV é uma falha transcorrente sinistral, dúctil-rúptil, cuja direção de mergulho e o mergulho são 320°/60°-70° (Dardenne, 2000).

Com base em trabalhos de geologia regional, como Dardenne (2000), e trabalhos de geologia local, como IPT (1994), entre outros trabalhos, elaborou-se o modelo geológico simplificado da mina (Figura 2). Neste modelo, identificam-se três litologias e quatro famílias de descontinuidades, mais frequentes. As litologias são: brecha mineralizada ou willemítica, brecha dolomítica e rochas dolomíticas. E as famílias de descontinuidades são: NW, NE, S₀ e FV.

Embora, as rochas carbonáticas sejam susceptíveis à dissolução, o que favorece à formação de ambientes cársticos, a área da mina analisada era uma região sem presença de feições cársticas. Por esta razão, a feição em questão não

está presente no modelo geológico proposto para representar a área da mina a ser analisada neste estudo.

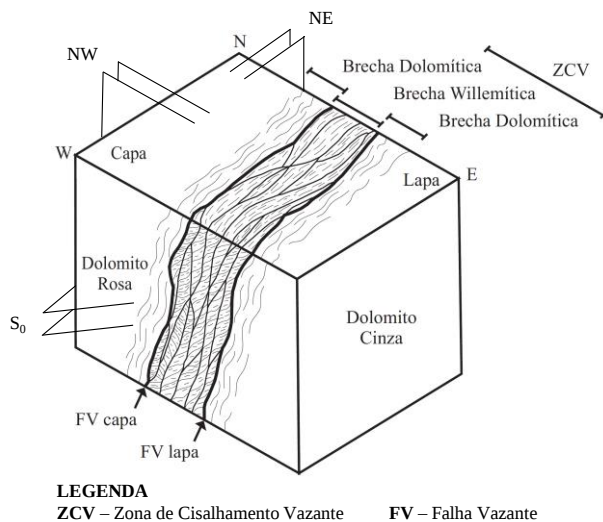


Figura 2 – Modelo geológico (modificado de IPT, 1994).

4 ELABORAÇÃO DO MODELO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICO

A visão inicial do ambiente geológico da mina, pelo modelo geológico, é agora detalhada por meio da elaboração do modelo geológico-geotécnico. O refinamento do modelo consiste em definir: se o maciço rochoso será representado, numericamente, como um meio contínuo ou descontínuo e isotrópico ou anisotrópico; os parâmetros geomecânicos do maciço; o estado de tensões *in situ*; e a condição de fluxo de água subterrânea. Por esta razão, a elaboração deste modelo está separada em sete etapas, mapeamento geológico-geotécnico, classificação do maciço rochoso, parâmetros de rocha intacta, parâmetros de maciço rochoso, estado de tensões, fluxo de água subterrânea e modelo geológico-geotécnico. A descrição resumida de cada etapa é apresentada a seguir.

4.1 Mapeamento Geológico-Geotécnico

O mapeamento geológico-geotécnico é um método de investigação, cujo produto é uma representação geral de todos os componentes do ambiente geológico identificados na escala mapeada (de Souza *et al.*, 2009).

A representação parcial do maciço rochoso da mina Vazante foi obtida de mapeamentos

executados em galerias de minério e de transporte e em travessas da mina, as quais expõem ao mapeamento, respectivamente, as unidades geológicas da brecha mineralizada, dos dolomitos e da brecha dolomítica (Figura 3). Ressalta-se que a presença de galerias de transporte e travessas na capa ocorre em situações específicas da mina.

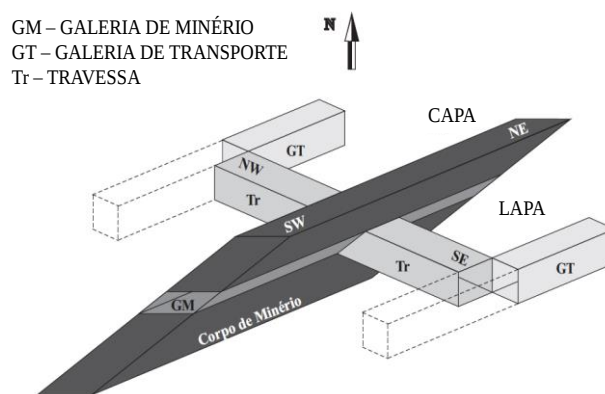


Figura 3 – Galerias de minério, de transporte e travessas.

A partir deste mapeamento foi possível caracterizar as litologias e as discontinuidades dos maciços rochosos presentes nas três unidades geológicas. Esta caracterização permitiu três interpretações, entre outras observações, as quais são: primeira, o contato entre as unidades geológicas é bem definido; segunda, as famílias de discontinuidades apresentam espaçamento pequeno; terceira, entre estas discontinuidades, não se verifica uma família com resistência mecânica significativamente menor do que as demais.

A partir destas interpretações, consideraram-se os maciços como meios contínuos e isotrópicos, assumindo desvios aceitáveis da condição ideal.

4.2 Classificação do Maciço Rochoso

Para a análise de diluição não planejada, os maciços das três unidades geológicas foram classificados pelo sistema GSI (*Geological Strength Index*), conforme descrito na Figura 4. Cabe observar que, embora para cada litologia apresentou-se um único valor para o índice GSI, Hoek & Marinos (2007) sugerem definir o índice GSI como um intervalo de valores.

A classificação ocorreu a partir de análises visuais das litologias, das feições estruturais e da

qualidade das superfícies destas feições, realizadas durante o mapeamento.

As análises visuais das litologias e das feições estruturais permitiram definir o padrão estrutural do maciço e, por conseguinte o travamento dos blocos de rocha.

Já a análise da qualidade das superfícies permitiu avaliar as condições de rugosidade, intemperismo/alteração das superfícies entre os blocos de rocha.

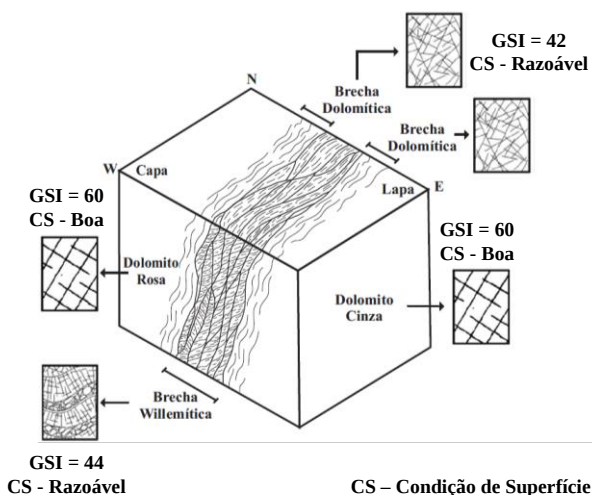


Figura 4 – Classificação dos maciços rochosos pelo sistema GSI (modificado de IPT, 1994).

4.3 Parâmetros de Rocha Intacta

A obtenção de parâmetros de rocha intacta deve ser, necessariamente, precedida da definição sobre quais parâmetros geotécnicos devem ser determinados. A definição destes parâmetros depende do método de análise (empírico, analítico e/ou numérico) a ser utilizado na avaliação do problema geotécnico.

No caso da mina Vazante, a diluição não planejada foi avaliada por meio de métodos numéricos e o maciço rochoso foi interpretado como um meio contínuo e isotrópico. Assim, para as três unidades geológicas, assumiu-se como modelo constitutivo, o modelo elasto-plástico com critério de ruptura de Hoek-Brown.

O referido modelo elasto-plástico compõe-se de um domínio elástico e do critério de ruptura de Hoek-Brown. O domínio elástico é descrito pelo módulo de deformabilidade (E) e pelo coeficiente de Poisson (ν). E o critério de ruptura de Hoek-Brown é descrito pela equação:

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_{ci} \left(m_i \frac{\sigma'_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^{0,5} \quad (1)$$

onde, σ'_1 e σ'_3 são tensões efetivas principais maior e menor na ruptura, σ_{ci} é a resistência à compressão simples da rocha intacta, m_i é o parâmetro de resistência de Hoek-Brown para rocha intacta e s é uma constante do material.

Portanto, os parâmetros a serem determinados são: módulo de deformabilidade (E); coeficiente de Poisson (ν); resistência à compressão simples (σ_{ci}); as constantes m_i e s e; o peso específico (γ).

Os módulos de deformabilidade (E) e as resistências à compressão simples (σ_{ci}) são tratados como variáveis aleatórias. Ambos foram obtidos de análises estatísticas dos resultados dos ensaios de resistência de laboratório (Figuras 5, 6 e 7) e estão representados pela média e o desvio padrão.

As constantes m_i são tratadas como parâmetros determinísticos e foram obtidas dos gráficos de tensões principais maior e menor (Figura 8), plotados com resultados de ensaios de compressão simples, triaxial e diametral, utilizando o programa RocLab (2007).

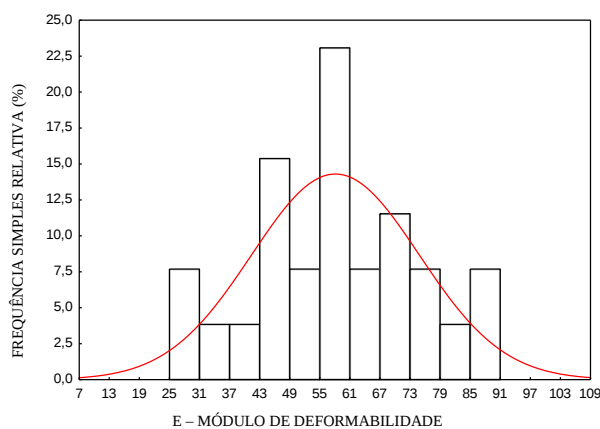
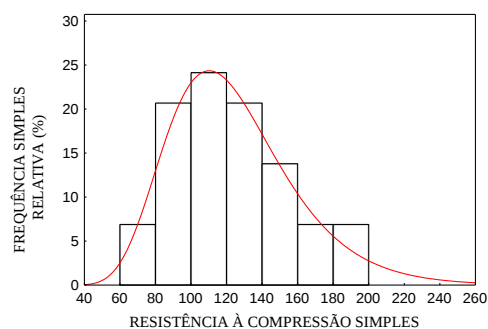


Figura 5 – Resistência à compressão simples e módulo de deformabilidade dos dolomitos (Charbel, 2015).

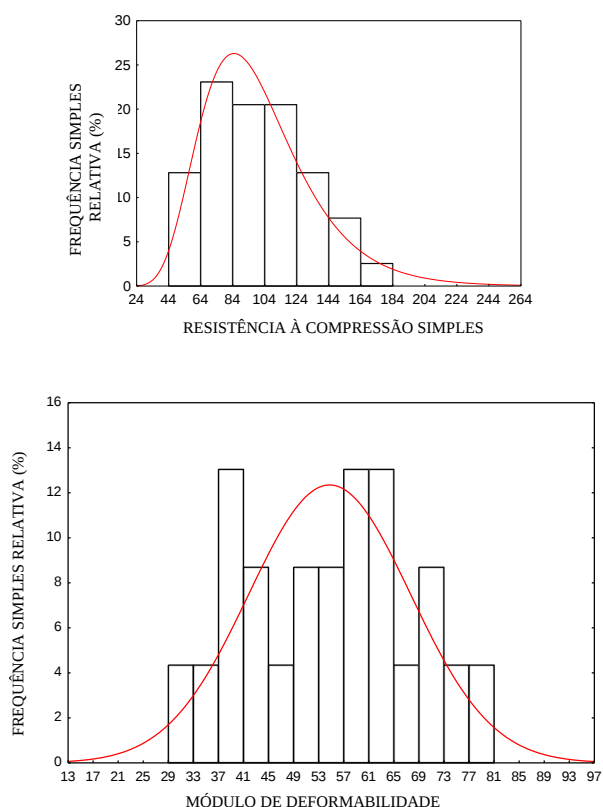


Figura 6 – Resistência à compressão simples e módulo de deformabilidade da brecha dolomítica (Charbel, 2015).

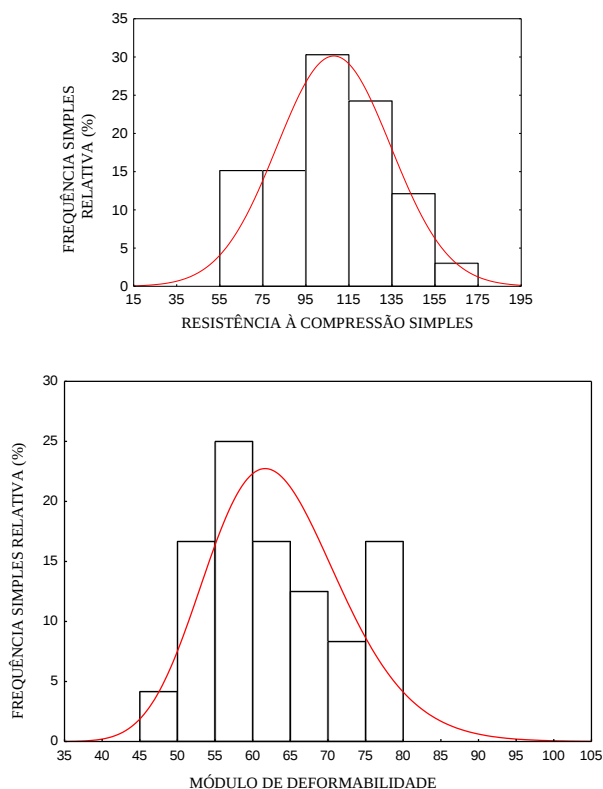


Figura 7 – Resistência à compressão simples e módulo de deformabilidade da brecha willemítica (Charbel, 2015).

A constante s , o coeficiente de Poisson (ν) e o peso específico (γ) foram tratados como parâmetros determinísticos. A constante s

assume valor igual a 1 para rocha intacta. Os pesos específicos (γ) assumiram os valores adotados pela VM. E os coeficientes de Poisson (ν) foram obtidos a partir de dados de literatura.

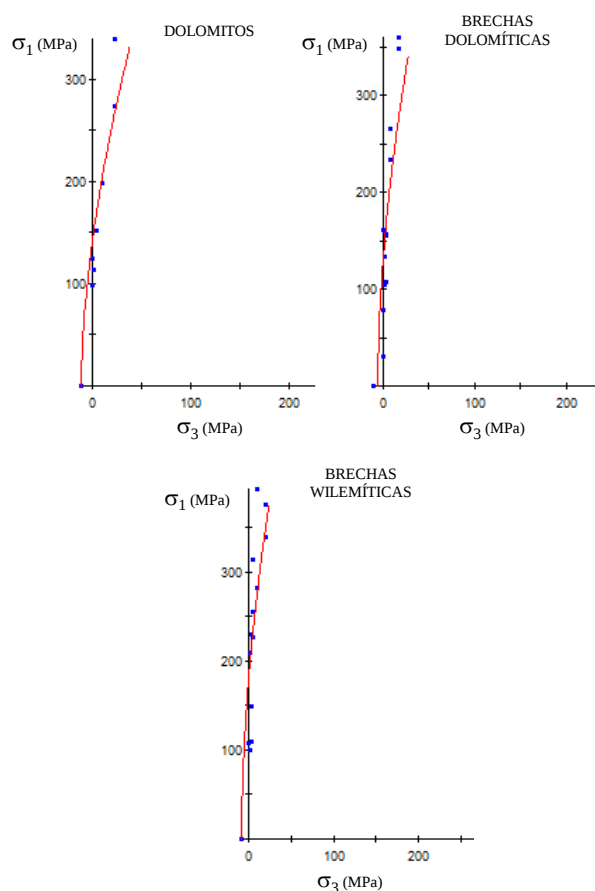


Figura 8 – Gráfico de tensões principais maior e menor.

Todos estes parâmetros de rocha intacta referentes às três unidades geológicas, brecha willemítica, brecha dolomítica e rochas dolomíticas, estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Parâmetros geomecânicos de rocha intacta.

Parâmetros		Litologia		
		DCZ	BXD	BXW
E (GPa)	μ	58	55	63
	DP	17	13	9
ν		0,2	0,2	0,2
σ_{ci} (MPa)	μ	124	101	108
	DP	36	35	26
m_i		12,5	23,9	20,9
s		1	1	1
γ (MN/m ³)		0,027	0,030	0,035

DCZ é dolomito; BXD é a brecha dolomítica; BXW é a brecha mineralizada; E é o módulo de deformabilidade; ν é o coeficiente de Poisson; σ_{ci} é a resistência à compressão simples da rocha intacta; m_i e s são parâmetros de resistência de Hoek-Brown para rocha intacta e; γ é o peso específico, μ é média e DP é desvio padrão.

4.4 Parâmetros de Maciço Rochoso

Um dos principais problemas, em escavações subterrâneas, é estimar os parâmetros de resistência e deformabilidade do maciço rochoso. A determinação pode ser realizada por meio de relações empíricas, propostas por diferentes autores. Não obstante à existência destas relações, para um projeto de escavação subterrânea, a questão fundamental é estimar os parâmetros do maciço de forma tão realística e confiável, quanto possível (Hoek *et al.*, 2005).

Como citado, o modelo constitutivo adotado é o modelo elasto-plástico com critério de ruptura de Hoek-Brown, anteriormente descrito para parâmetros de rocha intacta. Reescrevendo este modelo para maciço, o domínio elástico passa a ser descrito pelo módulo de deformabilidade do maciço rochoso (E_{MR}) e pelo coeficiente de Poisson (ν). E o critério de ruptura de Hoek-Brown passa a ser descrito pela equação:

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_{ci} \left(m_b \frac{\sigma'_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a \quad (2)$$

onde, σ'_1 e σ'_3 são tensões efetivas principais, maior e menor, na ruptura, σ_{ci} é a resistência à compressão simples da rocha intacta, m_b é o parâmetro de resistência de Hoek-Brown para o maciço, s e a são constantes do maciço.

Logo, os parâmetros a serem obtidos são o E_{MR} , o parâmetro m_b de Hoek-Brown e as constantes s e a .

Para a determinação do E_{MR} utilizou-se a relação empírica proposta por Hoek & Diederichs (2006) descrita pela equação:

$$E_{MR} = E_i \left(0,02 + \frac{1-D/2}{1+e^{\left(\frac{60+15D-GSI}{11}\right)}} \right) \quad (3)$$

onde, E_{MR} e E_i são os módulos de deformabilidade do maciço e da rocha intacta, respectivamente, GSI (*Geological Strength Index*) é o índice de resistência da rocha, e D é o efeito da detonação sobre o maciço.

Para determinação dos parâmetros m_b , s e a utilizaram-se as relações empíricas, propostas por Hoek *et al.* (2002), descritas a seguir:

$$m_b = m_i \exp \left(\frac{GSI-100}{28-14D} \right) \quad (4)$$

$$s = \exp \left(\frac{GSI-100}{9-3D} \right) \quad (5)$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} (e^{-GSI/15} - e^{-20/3}) \quad (6)$$

onde, m_b e m_i são os parâmetro de resistência m de Hoek-Brown, respectivamente, para maciço e

rocha intacta, GSI é o índice de resistência da rocha, D é o efeito da detonação sobre o maciço, s e a são constantes características do maciço.

Segundo Marinós & Hoek (2001), a principal função do índice GSI , nas Equações 3 a 6, é reduzir os valores dos parâmetros obtidos em laboratórios, adequando-os às condições *in situ*. Daí a importância em descrever as condições geológicas dos maciços, de forma detalhada.

Os cálculos dos parâmetros dos maciços rochosos foram efetuados por meio do programa RocLab (2007), programa este que apresenta implementadas as Equações 1 a 6.

A partir dos cálculos dos parâmetros geomecânicos de maciços rochosos reescreveu-se a Tabela 1 na forma da Tabela 2. Observa-se que, a variabilidade natural do E_{MR} e σ_{ci} foi considerada somente para brecha dolomítica da capa (BXD_{Capa}). Nas demais litologias os parâmetros E_{MR} e σ_{ci} foram tratados como parâmetros determinísticos e assumiram os valores estatísticos da média. A razão para tal consideração deve-se ao fato da diluição não planejada, na mina Vazante, restringir-se à deslocamentos na capa dos realces (Couto, 2012), o que motivou um maior detalhamento dos parâmetros da BXD_{Capa} .

Tabela 2 – Parâmetros geomecânicos de maciço rochoso.

Parâmetros		Litologia			
		BXD (Capa)	DCZ	BXD (Lapa)	BXW
E_{MR}	μ	10	30	10	13
(GPa)	DP	2	-	-	-
ν		0,2	0,2	0,2	0,2
σ_{ci}	μ	101	124	101	108
(MPa)	DP	35	-	-	-
m_b		3,012	2,966	3,012	2,829
s		0,0016	0,0117	0,0016	0,002
a		0,510	0,503	0,510	0,509
γ		0,030	0,027	0,030	0,035
(MN/m ³)					

BXD (Capa) e BXD (Lapa) são brechas dolomíticas de capa e lapa do realce; E_{MR} é o módulo de deformabilidade do maciço; m_b é o parâmetro de resistência de Hoek-Brown para maciço e; s e a são constantes do maciço.

4.5 Estado de Tensões

O estado de tensões *in situ*, ou naturais, é fator importante em escavações subterrâneas. Quando se desenvolve e lavra uma mina subterrânea, as tensões *in situ* são modificadas, localmente, por aberturas escavadas no maciço, o que origina

tensões induzidas no entorno destas escavações. Conhecer as magnitudes, as direções e os sentidos destas tensões, antes e após a escavação de realces, é essencial para o planejamento de mina, pois em muitos casos, a resistência da rocha é excedida, o que pode ocasionar uma instabilidade com consequências indesejáveis, como uma elevada diluição não planejada (Hoek *et al.*, 2005).

Neste trabalho, avaliou-se o estado de tensões naturais com base em interpretações geológico-geotécnicas, análises de testemunhos de sondagem (verificação de *diskings*) e medições de tensões *in situ* executadas pelo IPT (1997). A partir destas avaliações, assumiu-se que o estado de tensões se caracterizava por apresentar a tensão principal maior (σ_1) representada pela tensão vertical (σ_v) e, por conseguinte as tensões principais intermediária (σ_2) e menor (σ_3) representadas por tensões horizontais.

As magnitudes destas tensões, vertical e horizontais, foram estimadas pelas seguintes equações:

$$\sigma_1 = \sigma_v = \gamma \times h \quad (7)$$

$$\sigma_2 = \sigma_H = k_H \times \sigma_{vertical} \quad (8)$$

$$\sigma_3 = \sigma_h = k_h \times \sigma_{vertical} \quad (9)$$

onde, γ é o peso específico do maciço rochoso, expresso em MN/m², h altura da coluna de rocha sobrejacente ao local da medição, σ_H é a tensão horizontal maior, σ_h é a tensão horizontal menor e k_H e k_h são, respectivamente, as razões, σ_H/σ_v e σ_h/σ_v , entre as tensões horizontais e a vertical.

Os valores de k_H e k_h são respectivamente 1 e 0,7. Estes valores foram estimados com base nas avaliações sobre tensões, citadas anteriormente.

Quanto a orientação das tensões principais (Tabela 3), estas foram estimadas, também, com base nas avaliações sobre tensões, já citadas.

Tabela 3 – Orientação das tensões principais.

Atitudes	σ_1	σ_2	σ_3
Azimute	-	315°	225°
Inclinação	90°	0°	0°

Segundo Hoek *et al.* (2005), para avaliar a extensão da zona de plastificação, em torno de uma escavação, analisa-se várias vezes um modelo, para investigar a influência da variação das tensões, sobre a extensão da zona em questão. A importância desta região está no fato da diluição não planejada associar-se à mesma.

4.6 Fluxo de Água Subterrânea

A mina Vazante, em 2013, apresentava uma vazão média anual bombeada igual a 10.000 m³/h (Nascimento, 2013). Entretanto, o fluxo hídrico não interfere na estabilidade dos realces de mina, pois estes são escavados dentro do cone de rebaixamento do lençol freático. Portanto, não se contempla o fluxo hídrico no modelo.

4.7 Modelo Geológico-Geotécnico

A partir da caracterização geológico-geotécnica descrita, anteriormente, apresenta-se o modelo geológico-geotécnico da mina (Figura 9).

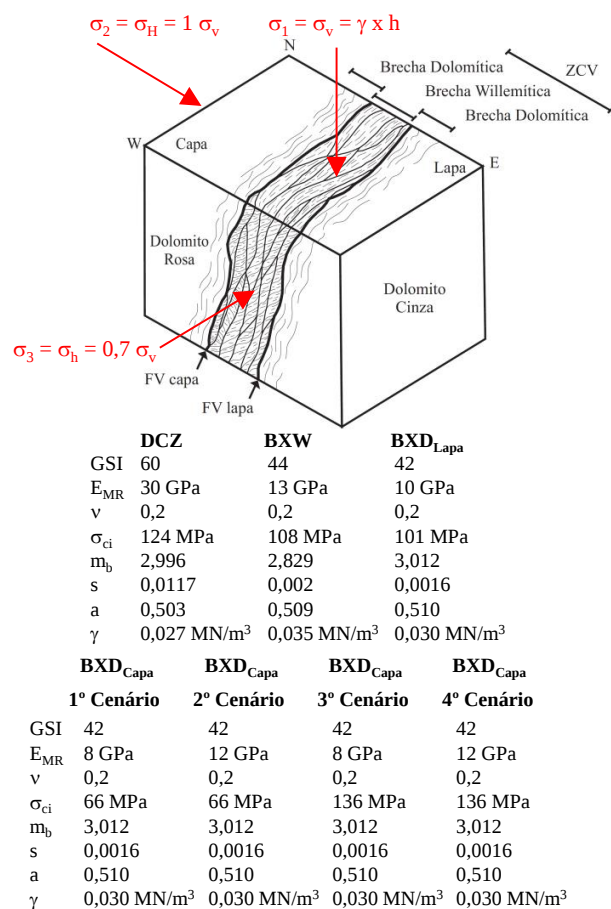


Figura 9 – Modelo geológico-geotécnico.

No modelo, considera-se a variabilidade natural do E_{MR} e σ_{ci} da BXD_{Capa} por meio da estimativa de dois valores para cada parâmetro (Figura 10). Esta forma de considerar a variabilidade está proposta no método dos pontos de estimativa, um método probabilístico publicado por Rosenblueth (1975). No modelo, considera-se a variabilidade pela proposição de quatros cenários de parâmetros para a BXD_{Capa}.

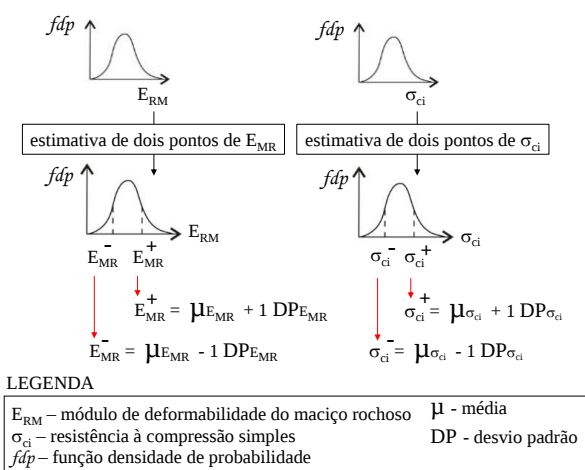


Figura 10 – Variabilidade do E_{MR} e σ_{ci} .

5 ELABORAÇÃO DO MODELO FÍSICO

O modelo físico é uma reprodução do modelo geológico-geotécnico (Figura 10) acrescido das dimensões do problema. Para o caso analisado, as dimensões estão descritas na Figura 11.

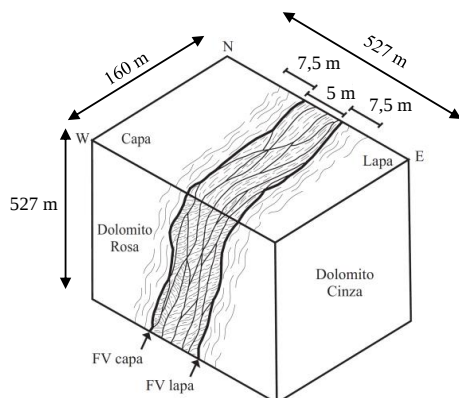


Figura 11 – Dimensões do modelo físico.

6 CONCLUSÕES

O modelo físico representa uma situação real de um problema geotécnico. Portanto análises numéricas, analíticas ou empíricas do problema baseiam-se neste modelo. Por esta razão, três considerações, entre outras, são feitas. Primeira, o modelo deve reproduzir a realidade o mais fiel possível. Segunda, deve-se continuamente rever o modelo. Terceira, deve-se conhecer as potencialidades e sobretudo as limitações do modelo. A conjugação destas considerações permite interpretar os resultados das análises geotécnicas, de forma mais próxima à realidade.

REFERÊNCIAS

- Charbel, P.A. (2015). Gerenciamento de Risco Aplicado à Diluição de Minério. Tese de doutorado em geotecnia, Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, 406.
- Couto, L.C.G. (2012). Comunicação Pessoal com P.A. Charbel.
- Dardenne, M.A. (2000). The Brasília Fold Belt. In: 31 st International Geological Congress, Rio de Janeiro. Tectonic evolution of South America, 231-263.
- De Souza, L.A.P.; da Silva, R.F.; Iyomasa, W.S. (2009). Métodos de Investigação. Geologia de Engenharia, sexta reimpressão, 2009. Editores Antônio Manoel dos Santos Oliveira e Sérgio Nertan Alves de Brito, Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, São Paulo-SP, 163-196.
- Hoek, E., Brown E.T. (1980). Underground Excavation in Rock. IMM, London, UK, 527.
- Hoek, E.; Carranza-Torres, C.; Corkum, B. (2002). Hoek-Brown failure criterion – 2002 edition. Proceedings of NARMS-TAC conference, Toronto, 1, 267-273.
- Hoek, E.; Kaiser, P.K.; Bawden, W.F. (2005). Support of Underground Excavations in Hard Rock. Fourth print, Published by Taylor & Francis, 215.
- Hoek, E. & Diederichs, M.S. (2006). Empirical estimation of rock mass modulus. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 43, 203-215.
- Hoek, E.; Marinos P. (2007). A brief history of the development of the Hoek-Brown failure criterion. Soils and Rocks, No 2, 13.
- IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas (1994). Assessoria em geomecânica na mineração subterrânea de Vazante – Vazante, MG. Relatório Nº 32 032, 58.
- IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas (1997). Determinação de tensões nos maciços rochosos das lavras subterrâneas da Mineração Morro Agudo, Paracatu-MG e Mina Morro da Usina, Vazante-MG. Relatório Nº 34 913, 94.
- Marinos P. & Hoek, E. (2001). Estimating the geotechnical properties of heterogeneous rock masses such as flysch. Bull. Eng. Geol. Env., 60, 85-92.
- Nascimento, G.C.S. (2013). Comunicação Pessoal com P.A. Charbel.
- RocLab (2007). Rock mass strength analysis using Hoek-Brown Failure Criterion. [http:// www.rocscience.com](http://www.rocscience.com).
- Rosenblueth, E. (1975). Point estimates for probability moments. *Proc. Nat. Acad. Sci, USA*, Vol. 72, Nº 10, 3812-3814.
- Scoble, M.J. & Moss, A. (1994). Dilution in underground bulk mining: implications for production management. Mineral Resource Evaluation II: Methods and Case Histories. *Geological Society Special Publication*, Nº 79, 95-108.
- Serra Júnior, E. & Ojima, L.M. (2009). Caracterização e classificação de maciços rochosos. Geologia de Engenharia, sexta reimpressão. Editores Antônio Manuel dos Santos Oliveira e Sérgio Nertan Alves Brito. Publicado pela Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, São Paulo, 211-226.