

Análise de Estabilidade do Crown Pillar do Corpo Cabeça de Pedra, Mina Lamego – Sabará/Mg

Leonardo Pereira da Silva

AngloGold Ashanti, Sabará, Brasil, Lpsilva@anglogoldashanti.com.br

RESUMO: Problemas de colapso próximo a superfície tem atormentado operações de mineração durante anos, não apenas em áreas remotas, mas muitas vezes próximo a áreas urbanas. Conhecer de forma confiável a competência e a adequada cobertura de rocha que vai permanecer no local acima da superfície de escavação é essencial para evitar desmoronamentos e garantir a estabilidade da infraestrutura acima das escavações subterrâneas. Estimar uma espessura mínima estável para o crown pillar não depende somente das propriedades do maciço rochoso, pois este também é influenciado por outros fatores, tais como o método de escavação, reforço de rochas, regime de tensão e efeitos das intempéries, que devem ser levados em consideração durante a análise. O corpo Cabeça de Pedra, inicialmente iniciou seus trabalhos na forma de Open Pit para o corpo oxidado. Os trabalhos subterrâneos iniciaram com o método de corte e aterro e agora, passou-se a utilizar o método Open Stope para otimizar produção. Com base nisso, a proposta deste trabalho é apresentar a análise de estabilidade do crown pillar atual por meio do método empírico Scaled Span, determinar um fator de segurança mínimo e a probabilidade de falha para o crown pillar atual do corpo Cabeça de Pedra e comparar os resultados com modelagem numérica 2D no Phase² para determinar a espessura mínima para o crown pillar. Para isso, foram utilizados dados de classificação geomecânica (Q-Barton, RMR, GSI) do maciço alterado na superfície e do maciço rochoso no nível 1 do corpo Cabeça de Pedra, dados de resistência a compressão uniaxial do xisto no hangingwall, parâmetros da geometria da escavação, características mecânica e índices físicos das unidades geotécnicas do maciço rochoso do corpo Cabeça de Pedra na mina Lamego. Durante a análise, não foram considerados o material oxidado como parte do crown pillar, limitando-se o crown ao limite rocha sã/oxidado determinada por furos de sonda em trabalhos anteriores. Os resultados mostraram que o crown pillar atual, com espessura de 45m, apresenta-se estável, com fator de segurança de 2,62 e com probabilidade de falha de 2,19% e que foi confirmado pela modelagem numérica 2D realizada pelo software Phase². Adicionalmente, foi determinado uma espessura mínima para o crown pillar de 6,5m, apresentando fator de segurança de 0,99 e probabilidade de falha >50%, tornando-se instável do ponto de vista geomecânico.

PALAVRAS-CHAVE: análise de estabilidade, crown pillar, scaled span, fator de segurança.

1 INTRODUÇÃO

Com mais de duas décadas de utilização, o método de análise para dimensionamento do Crown Pillar, se mostrou um meio eficaz para o dimensionamento empírico da espessura de um pilar sobre uma escavação próximo a superfície. O desenvolvimento do conceito “Span Scaled” se deu no final 1980 e surgiu de uma necessidade da indústria para uma melhor

método de avaliação do risco de instabilidade do pilar de superfície (crown pillar).

O impulso para esta mudança se deu devido a várias falhas significativas que ocorreram no Canadá, e atraiu grande atenção da mídia (Carter et al., 1988). Em função disso foi estabelecido “Regras de Ouro”, até então, o única abordagem estabelecida para o dimensionamento destes pilares.

As diretrizes iniciais (Golder Associates,

1990, Carter, 1992, e Carter e Miller, 1995), foram desenvolvidas principalmente para geometrias com mergulho alto e foram destinadas para definir níveis de risco de colapso potencial para aberturas subterrâneas novas e abandonadas, e também para ajudar na determinação de dimensões críticas de crown pillar para quaisquer novos projetos de mina.

Avaliações adicionais mostraram que a maioria dos colapsos foram relacionadas a raveling e migração ascendente no teto da escavação, enquanto a maioria dos colapsos recentes ocorreram devido a proximidade das escavações com a superfície ou devido a baixa qualidade do maciço rochoso no crown pillar (Carter, 2002).

Com base em retro-análise de vários casos, foi sugerido uma metodologia revisada para permitir o uso da abordagem para análise de crown pillar com mergulho baixo ($<45^\circ$). Esta abordagem revista sugere o uso da projeção horizontal do stope, exposição do hangingwall e um ângulo apropriado para caracterizar de forma mais realista o mecanismo de ruptura do hangingwall (Carter et al, 2002).

Geralmente a razão pelo qual esses colapsos ocorrem tem como causa principal a falta de investigação geotécnica local e da dependência de modelagem numérica utilizando parâmetros estimados sem observação em campo.

2 METODOLOGIA

2.1 Avaliação de Estabilidade do Crown

Para avaliação da estabilidade três abordagens básicas podem ser tomadas para a concepção de novos layouts de crown pillar ou para avaliar a estabilidade dos pilares de superfície antigos, que são:

- (i) métodos empíricos – usando as regras de ouro, ou mais quantitativamente, com base em classificações do maciço rochoso,
- (ii) a análise estrutural e avaliações de cavabilidade, e/ou...
- (iii) modelagem numérica.

Embora cada um dos métodos tenha aplicabilidade equivalente, a escolha da abordagem mais adequada pode não ser das tarefas mais fáceis. O método a ser escolhido

deve ser suficientemente robusto para ser capaz de lidar com o mecanismo de falha correto. Em maciços rochosos, falhas podem ocorrer devido a interseção de descontinuidades, ou quando um determinado conjunto de grandes juntas ou falhas fornece um mecanismo de liberação para o colapso gravitacional. Onde a qualidade da rocha é baixa e o tamanho do bloco é pequeno, o mecanismo de falha pode ocorrer por raveling e desagregação dos blocos que compreendem o crown e o hangingwall. Para maciços rochosos de boa qualidade, o bloqueio do blocos pode gerar um arco de tensão, melhorando assim a estabilidade do crown, enquanto que nos casos onde existem fábricas ubíquas, slabbing incontrolável e descamação podem levar a mecanismos de falha do tipo chamine. Muitas vezes, não só a fábrica estrutural do crown deve ser levada em consideração, mas deficiências na parede lateral podem ser críticos.

Além disso, independentemente da abordagem e mecanismo definidos como apropriados, algumas informações chave são sempre necessárias, como a geometria do stope e a qualidade/competência da rocha. É preciso também estar ciente das limitações de informações e que os dados podem nem sempre estão disponíveis, ou mesmo suficientemente adequados para a realização de uma modelagem sofisticada, sendo assim, muitas vezes a melhor abordagem de análise seja realmente a mais simplista para que reflita a realidade.

2.2 O Método do Vão Dimensionado (*Scaled Span Method*)

Como o objetivo principal de um crown pillar é para proteger as pessoas e a infraestrutura de superfície, a mina, e aqueles que trabalham nela, a partir dos fluxos de água, solo e rocha, é vital que esses pilares de superfície permaneçam estáveis ao longo da sua vida. Manter a estabilidade da crown é crítica, não só para o sucesso da mina, mas também para assegurar a segurança de qualquer comunidade ou infraestrutura que existe acima dela.

Várias abordagens têm sido propostas ao longo dos anos para ajudar no dimensionamento de crown pillar abordando sua estabilidade. No

entanto, devido às diferenças significativas que existem de comportamento entre o mecanismo de falha identificados (Carter, 1989, Bétournay, 1987) a maioria destas abordagens, foram especificamente dirigidas a um ou outro dos diversos comportamentos característicos de falha (eg, Goel and Page, 1982, Hoek, 1989, Bétournay et al, 1994). Outros têm tentado examinar a zona de influência resultante ou a geometria real do sumidouro como uma função do processo de colapso (Szwedzicki, 1999).

Como parte deste foco, foram realizados extensos estudos dos fatores que controlavam a estabilidade do crown pillar e vários métodos de análise estrutural (Bétournay, 1987, 1996, Carter, 1989, Golder Associates, 1990). Estes estudos demonstraram que, para qualquer dada qualidade da rocha, a estabilidade depende principalmente da geometria. A extensão, espessura e o peso do maciço rochoso que compreende o crown pillar foram considerados parâmetros de caracterização mais críticos (Figura 1).

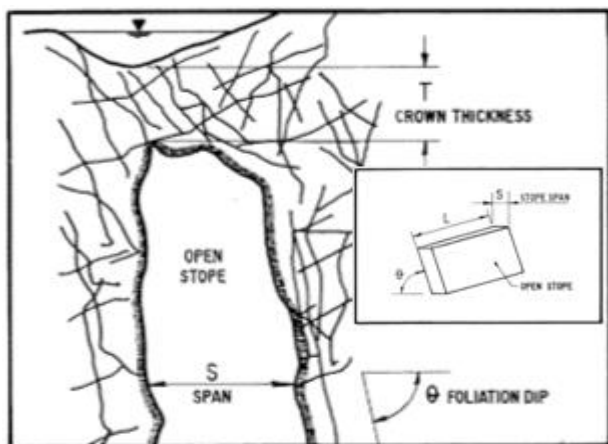


Figura 1. Definição de geometria para a avaliação de estabilidade do vão dimensionado do Crown Pillar.

Isto levou a tentativas iniciais de normalizar os parâmetros controladores, reconhecendo que:

$$\text{Crown Stability} = f \frac{(T \sigma_h \theta)}{SL \gamma u} \quad (1)$$

onde o aumento da estabilidade para qualquer qualidade do maciço rochoso seria refletida pelo um aumento da:

T = espessura de rocha do crown pillar

σ_h = tensão horizontal insitu

θ = mergulho da foliação ou do stope, e onde a redução da estabilidade para qualquer crown pillar seria refletido pelo aumento do:

S = Vão (Span)

L = comprimento total do stope

γ = peso específico

u = pressão da água subterrânea.

No desenvolvimento da geometria tridimensional para caracterizar o crown pillar global em função do seu span real (S), quatro componentes são considerados – razão span/espessura, para manter alguma ligação com a “regras de ouro” original – um fator inclinação, para refletir o mergulho do corpo mineralizado e/ou o mergulho da parede do stope, um fator referente ao raio hidráulico, para refletir a geometria tridimensional do crown pillar e, - um fator peso, equivalente ao método Terzaghi para refletir efeitos de carga na rocha, em relação ao tamanho do crown e devido a quaisquer cargas superpostas.

Desde modo, a expressão empírica definitiva, denominada de Scaled Crown Span (Cs) fica formulada da seguinte forma:

$$Cs = S \left\{ \frac{\gamma}{T(1 + Sr)(1 - 0,4 \cos(\theta))} \right\}^{0,5} \quad (2)$$

Onde: S = crown pillar span (m)

γ = peso específico (toneladas/m³)

T = espessura do crown pillar (m)

θ = mergulho da foliação ou da parede do stope (°)

Sr = razão span/comprimento do stope (S/L)

Do mesmo modo como o gráfico NGI-Q, está expressão de dimensionamento (Cs), é plotado no eixo y de encontro com a qualidade da rocha no eixo x. A figura 2 mostra o gráfico original publicado em 1990, com cada um dos casos identificados registrados relacionados a stopes abertos e aterrados, e se estáveis ou não.

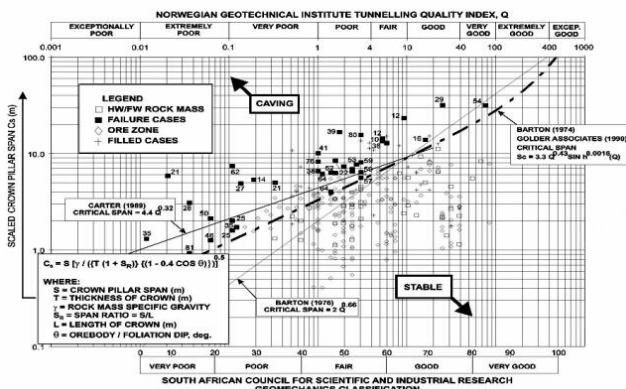


Figura 2. Gráfico do Vão Dimensionado (Scaled Span), mostrando registros de casos estáveis e falhos plotados em função da qualidade da rocha (Golder Associates, 1990).

Como mostrado na Figura 2, os vãos dimensionados para todos os casos registrados foram plotados em função da qualidade da rocha, usando ambos os eixos de classificação NGI-Q / RMR, cada um posicionado em relação ao outro com base na expressão de correlação de Bieniawski, 1976;

$$RMR_{76} = 9 \cdot \ln(Q) + 44, \quad (3)$$

mantendo assim sua equivalência com o GSI (Hoek et al., 1995, Marinos & Hoek, 2000).

No trabalho original, em vez de simplesmente definir a qualidade crítica do maciço rochoso Q_{crit} para cada caso dado e comparando com o vão dimensionado, um limite de vão em que a falha poderia ocorrer foi definida com base em um ajuste de regressão dos dados.

Como notou-se que a linha de ajuste que divide os casos registrados como falhos dos estáveis era correspondente com a curva empírica para “vãos não suportados”, originalmente proposto por Barton et al., 1974 para casos de túneis e cavernas, foi formulado uma curva semelhante ao ajuste de regressão para definir o “Vão Dimensionado Crítico” (Sc – Critical Scaled Span), em que o colapso poderia ser esperado, conforme:

$$Sc = 3,3 \times Q^{0,43} \times \sinh^{0,0016}(Q) \quad (4)$$

onde o $\sinh$ foi introduzido na expressão, em uma tentativa de se ajustar a tendência de não linearidade significativa para aumentar a

estabilidade a alta competência de maciços rochosos.

A avaliação direta da probabilidade de falha pode ser derivada analiticamente a partir da seguinte expressão:

$$Pf(\%) = \frac{100}{\left(1 + 441 \cdot e^{\left(-\frac{6}{Fc}\right)}\right)} \quad (5)$$

onde, $Fc = Sc/Cs$.

O gráfico de estabilidade (Figura 3) inclui linhas de isoprobabilidades que definem sete classes de estabilidade em função de sua provável longevidade, com base em experiências extrapolados a partir de avaliações de estabilidade para riscos geotécnicos controlados não apenas para crown pillars, mas também para outras escavações subterrâneas e superficiais, como discutido por Cole (1987), Kirsten e Moss (1985), McCracken e Jones (1986), Priest e Brown (1983) e Pine (1992).

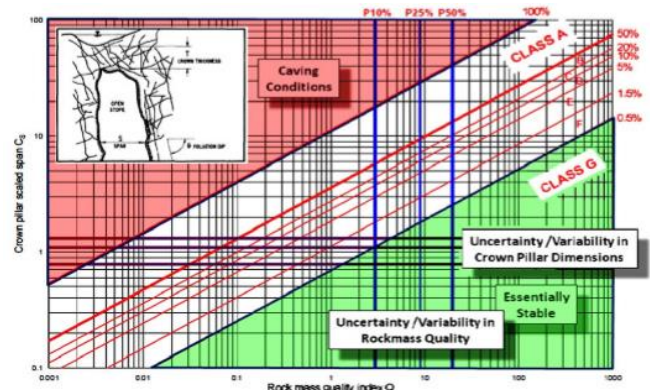


Figura 3. Gráfico do Vão Dimensionado (Scaled Span), com probabilidade de classes de falha para a avaliação do estado de estabilidade para geometria variável e qualidade rocha variável (como sugerido por Richards, 2013, modificado de Carter e Miller, 1995).

Embora estas classes de estabilidade podem ser convenientemente representados como mostrado na Figura 3 e Tabela 1 para definir rapidamente um estado de estabilidade apropriado para uma dada geometria e qualidade do maciço rochoso, várias facetas de entrada de dados brutos para essas avaliações requerem uma consideração muito cuidadosa, a fim de garantir a decisão de projeto correta fazer.

Tabela 1. Diretrizes aceitáveis para o risco de exposição comparativa – Significância comparativa de falha do Crown Pillar (de Carter et al., 2008, modificado Carter & Miller, 1995).

Class	Probability of Failure %	Minimum Factor of Safety	Maximum Scaled Span, $C_s (= S_c)$	FSR (Barton et al. 1974)	Design Guidelines for Pillar Acceptability/Serviceable Life of Crown Pillar			
					Expectancy	Years	Public Access	Operating Surveillance Required
A	50 – 100	<1	$11.31Q^{0.44}$	>5	Effectively zero	< 0.5	Forbidden	Totally unacceptable
B	20 – 50	1.0	$3.58Q^{0.44}$	3	Very, very short-term (temporary mining purposes only; unacceptable risk of failure for temporary civil tunnel portals)	1.0	Forcibly Prevented	Continuous sophisticated monitoring
C	10 – 20	1.2	$2.74Q^{0.44}$	1.6	Very short-term (quasi-temporary slope crowns; undesirable risk of failure for temporary civil works)	2 – 5	Actively prevented	Continuous monitoring with instruments
D	5 – 10	1.5	$2.33Q^{0.44}$	1.4	Short-term (semi-temporary crowns, e.g. under non-sensitive mine infrastructure)	5 – 10	Prevented	Continuous simple monitoring
E	1.5 – 5	1.8	$1.84Q^{0.44}$	1.3	Medium-term (semi-permanent crowns, possibly under structures)	15 – 20	Discouraged	Conscious superficial monitoring
F	0.5 – 1.5	2	$1.12Q^{0.44}$	1	Long-term (quasi-permanent crowns, civil portals, near-surface sewer tunnels)	50 – 100	Allowed	Incidental superficial monitoring
G	<0.5	>2	$0.69Q^{0.44}$	0.8	Very long-term (permanent crowns over civil tunnels)	>100	Free	None required

3 ESTUDO DE CASO

O corpo Cabeça de Pedra (Figura 4) está localizado na região da charneira da grande estrutura do Lamego. A área que demonstrou viabilidade econômica apresenta formações ferríferas e metacherts (80% da área é representada pelas BIFs e o restante pelo MCH). A presença de falhamentos torna confusa a estratigrafia em determinados pontos. Normalmente apresenta Xistos e metapelitos (X1) no contato de hanging wall e metandesitos no footwall. O plunge médio considerado para este corpo é de 130/29.

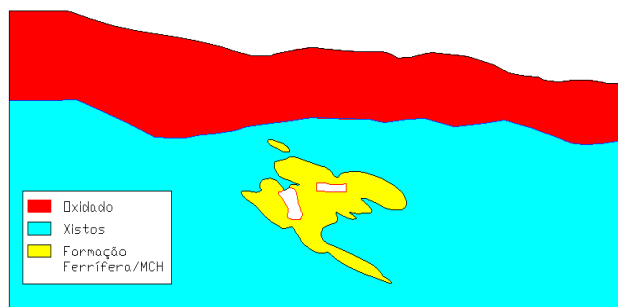


Figura 4. Seção esquemática simplificada do corpo Cabeça de Pedra.

O corpo Cabeça de Pedra inicialmente lavrado sob a forma de corte e aterro, que é um método que permite lidar com variações quanto a continuidade e homogeneidade da qualidade do minério, passou a ser lavrado sob a forma de Open Stope no intuito de otimizar a produção. Com base nisso, viu-se a necessidade do estudo do pilar que ficaria acima da escavação já que existe uma mina a céu aberto antiga, onde foi lavrada anteriormente o minério oxidado do

corpo Cabeça de Pedra.

Na tabela 2 são apresentadas as unidades geotécnicas e os parâmetros geomecânicos, já na tabela 3 os índices físicos dos maciços rochosos da mina Lamego, obtidos segundo a metodologia NGI-Q e RMR, além do parâmetro RQD e por ensaios de compressão uniaxial. A classificação geomecânica foi realizada para o hangingwall, minério e footwall. O hangingwall é composto por xisto grafitoso (XG) e o minério por formação ferrífera bandada (BIF).

Tabela 2. Classificação geomecânica do maciço rochoso na mina Lamego.

Unidade	RQD (%)	RMR	Q
MCH	100	83	25
BIF	100	75	28
MAN	98	66	11
XISTO	94	66	10,5
XG	96	56	5,3

Tabela 3. Índices físicos das unidades geotécnicas do maciço rochoso da Mina Lamego.

Unidade	UCS (MPa)	E (GPa)	V	$\Phi_0(^{\circ})$	ρ (g/cm ³)	W (%)
MCH/BIF	320	87	0,17	37	2,78	0,07
MAN	102	34	0,21	34	2,72	0,02
XISTO	44 (paralelo) – 107 (perpendicular)*	80 (paralelo) – 64,5 (perpendicular)*	0,25	34	2,7	-
XG	67	11,5	0,25	34	2,7	0,06

Atualmente o nível 1 do corpo Cabeça de Pedra encontra-se a 90,0m da superfície, considerando a superfície oxidada, conforme ilustra a figura 5. Para a análise de estabilidade do crown pillar será desconsiderada esta superfície oxidada em função da baixa qualidade do maciço e também em função da necessidade de se retomar a lavra a céu aberto no futuro.

Na tabela 4 é mostrado todos o parâmetros solicitados para o desenvolvimento das análise conforme é solicitado para a aplicação das formulações propostas para o dimensionamento do crown pillar do corpo Cabeça de Pedra.

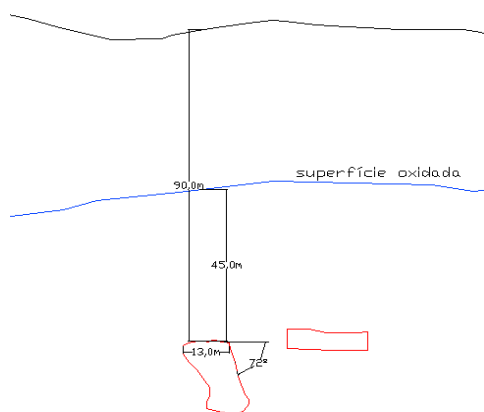


Figura 5. Seção esquemática delimitando a superfície oxidada da superfície a ser considerada para o Crown Pillar do corpo Cabeça de Pedra.

Tabela 4. Configuração de design atual no corpo Cabeça de Pedra.

Crown Span (S)	13 m
Espessura Crown Pillar	45 m
Comprimento CP no Strike	108 m
Comp. HW no stope	22.4 m
Θ (Mergulho foliação/stope)	72 °
Ângulo da excavação	72 °
Razão Span (S/L)	0.12
peso específico	2.8
Q	5.3

Sendo assim, conforme a expressão empírica (2) para o dimensionamento do crown pillar, o corpo Cabeça de Pedra apresenta $C_s = 2,60$, ou seja, apresenta-se estável do ponto de vista geomecânico, conforme apresenta figura 6.

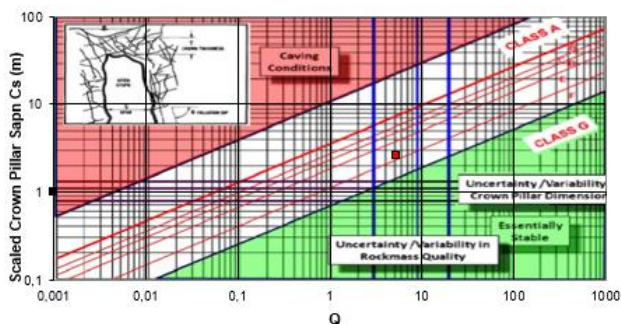


Figura 6. Gráfico do Vão Dimensionado (Scaled Span), contemplando a situação atual do crown pillar do corpo Cabeça de Pedra.

O vão crítico para a situação atual, onde o colapso poderia ser esperado ($FS < 1$), aplicado na expressão (3), mostra $Sc = 6.81$ (Figura 7).

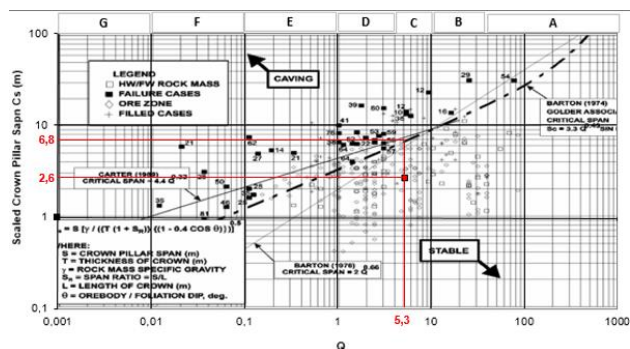


Figura 7. Gráfico do Vão Dimensionado (Scaled Span), contemplando a situação atual e o vão crítico para o crown pillar do corpo Cabeça de Pedra.

Dessa forma, a avaliação direta da probabilidade de falha, derivada analiticamente da expressão (4) é de $P_f = 2.19$ e fator de segurança de 2,62.

Tabela 5. Diretrizes aceitáveis para o risco de exposição para o crown pillar atual.(de Carter et al., 2008, modificado Carter & Miller, 1995).

Class	Probability of Failure %	Minimum Factor of Safety	Maximum Scaled Span, $C_s (= Sc)$	ESR (Barton et al. 1974)	Design Guidelines for Pillar Acceptability/Serviceable Life of Crown Pillar				
					Expectancy	Years	Public Access	Regulatory position on closure	Operating Surveillance Required
A	50-100	<1	$11.31Q^{0.66}$	>5	Effectively zero	<0.5	Forbidden	Totally unacceptable	Ineffective
B	20-50	1.0	$3.58Q^{0.66}$	3	Very, very short-term (temporary mining purposes only - unacceptable risk of failure for temporary civil tunnel portals)	1.0	Forbidden	Not acceptable	Continuous sophisticated monitoring
C	10-20	1.2	$2.78Q^{0.66}$	1.6	Very short-term (quasi-temporary slope crowns; undesirable risk of failure for temporary civil works)	2-5	Actively prevented	High level of concern	Continuous monitoring with instruments
D	5-10	1.5	$2.33Q^{0.66}$	1.4	Short-term (some temporary crowns, e.g. under non-sensitive mine infrastructure)	5-10	Prevented	Moderate level of concern	Continuous simple monitoring
E	1.5-5	1.8	$1.84Q^{0.66}$	1.3	Medium-term (semi-permanent crowns, possibly under structures)	15-20	Discouraged	Low to moderate level of concern	Conscious superficial monitoring
F	0.5-1.5	2	$1.12Q^{0.66}$	1	Long-term (quasi-permanent crowns, civil portals, near-surface sewer tunnels)	50-100	Allowed	Of limited concern	Incidental superficial monitoring
G	<0.5	>2	$0.68Q^{0.66}$	0.8	Very long-term (permanent crowns over civil tunnels)	>100	Free	Of no concern	None required

Ainda de acordo com a proposta de comparar o resultado do método empírico com a modelagem numérica 2D no software Phases, foi realizada simulação e se confirmou a estabilidade do crown pillar atual conforme apresenta a figura 8, mostrando pequena quebra por tração no teto (capelamento).

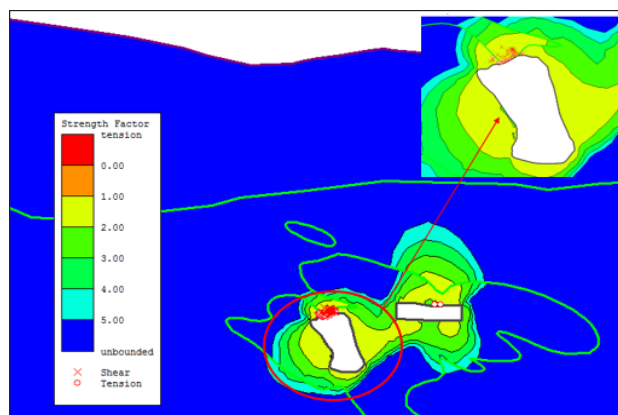


Figura 8. Modelagem numérica 2D.

Adicionalmente, no intuito de se determinar a espessura mínima para o crown pillar do corpo Cabeça de Pedra, conforme formulação empírica proposta pela Tabela 5, temos que para o limite máximo para o vão deverá ser de 3,85m, apresentando um fator de segurança (FS) de 1,77.

3 CONCLUSÕES

Estimar uma espessura mínima estável para uma determinada situação depende não só das propriedades do maciço rochoso no crown pillar e das paredes da escavação, a estabilidade também é influenciada por considerações mais práticas, como método de escavação, reforço, sequenciamento, regime de tensões e efeitos atmosféricos. Todos esses fatores devem ser considerados e alguma compensação deverá ser feita na metodologia de projeto para explicar os seus efeitos. Um fator de segurança pode também ser aplicado aos resultados finais, ou aos componentes individuais da sequência de cálculo.

Embora esta metodologia de aplicação do vão dimensionado para o dimensionamento de crown pillars ser um método de grande aceitação, deve-se salientar que estes gráficos são todos baseados em uma condição de estado limite final, ou seja, foram baseados em uma linha divisória assumida entre geometrias estáveis e fracassos. Assim, esse tipo de abordagem deve ser utilizada como diretriz para um projeto final.

REFERÊNCIAS

- Barton, N., Lien, R. & Lunde, J., 1974. *Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support*. Rock Mechanics Vol.6, No.4, pp.189-236.
- Bétournay, M.C. 1987. *A Design Philosophy for Surface Crown Pillars of Hard Rock Mines*, CIM Bulletin, Vol. 80, No. 903, pp.45-61.
- Bétournay, M.C. 1996. *Lessons Learnt from Stability Analysis of Case Studies of Shallow Stopes of Hard Rock Mines*. Proc. 2nd North American Rock Mechanics Symposium Montreal, Vo. 2, pp. 1849-1856.
- Bétournay M.C. Mitri, H. S. and Hassani, F. *Chimneying disintegration failure mechanisms of hard rock mines*. In Proc. 1st North American rock mech. symp. Austin, 1994, 987-96.
- Bieniawski, Z.T., 1976. *Rock Mass Classification in Rock Engineering*. Proc. Symp. on Exploration for Rock Engineering, Johannesburg, pp.97-106.
- Carter, T.G., Busbridge, J.R., Mackasey, W.O., and Annan, A.P. 1988. *Investigations and Remedial Measures for Reinstatement of Highway Collapse over Old Mine Workings*. Proc. 2nd.Int. Conf. on Construction in Areas of Abandoned Mineworkings, Edinburgh, pp.289-297.
- Carter, T.G. 1989. *Design Lessons from Evaluation of Old Crown Pillar Failures*. Proc. Int. Conference on Surface Crown Pillars for Active and Abandoned Metal Mines, Timmins, Canada. pp.177-187.
- Carter, T.G., and Miller, R.I., 1995. *Crown Pillar Risk Assessment - Cost Effective Measures for Mine Closure Remediation Planning*. Trans. Inst. Min. Metl, Vol 104, pp.A41-A57.
- Carter, T.G. 1992. *A New Approach to Surface Crown Pillar Design*. Proc. 16th Can. Rock Mechanics Symposium, Sudbury, pp. 75-83.
- Carter, T.G., and Miller, R.I., 1995. *Crown Pillar Risk Assessment - Cost Effective Measures for Mine Closure Remediation Planning*. Trans. Inst. Min. Metl, Vol 104, pp.A41-A57.
- Carter, T.G., Alcott, J. and Castro, L.M., 2002. *Extending Applicability of the Crown Pillar Scaled Span Method to Shallow Dipping Stopes*, Proc. 5th Nth. American Rock Mech. Symp., pp.1049-1059.
- Cole, K.W. 1987. *Building over abandoned shallow mines-a strategy for engineering decisions on treatment*. Ground Engineering, 20, no. 4 1987, 14-30.
- Goel, S.C. and Page, C.H., 1984. *An Empirical Method for Predicting the Probability of Chimney Cave Occurrence over a Mining Area*, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abst., 19, pp. 325-37.
- Golder Associates, 1990. Report 881-1739 to CanMet on "Crown Pillar Stability Back-Analysis". Report #23440-89074/01-SQ, CANMET, pp. 90.
- Hoek, E. 1989. *A Limit Equilibrium Analysis of Surface Crown Pillar stability*. Proc. Int. Conf. on Surface Crown Pillars Active & Abandoned Metal Mines Timmins, pp.3-13.
- Kirsten, H.A.D. and Moss, A.S.E. 1985. *Probability applied to slope design-case histories*. In Proc. ASCE symp. rock masses and probability of slope failure, Denver, 1985, 106-19.
- McCracken, A. and Jones, G.A. 1986. *Use of probabilistic stability analysis and cautious blast design for urban excavation*. In Rock engineering and excavation in an urban environment, proceedings of conference, Hong Kong, February 1986 (London: IMM, 1986), 231-40.
- Marinos, P. and Hoek, E., 2000 *GSI – A geologically friendly tool for rock mass strength estimation*. Proc. GeoEng2000 Conference, Melbourne. 1422-1442
- Pine, R.J. 1992. *Risk analysis design applications in mining*. Trans. Instn Min. Metall. (Sect. A: Min. ind.), 101, A149-57.
- Priest, S.D. and Brown, E.T. 1983. *Probabilistic stability analysis of variable rock slopes*. Trans. Instn Min.

Merall. (Seer. A: Min. industry), 92, 1983, A1-12.
Richards, L. R., 2013, *Personal Communication*.
Szwedzicki, T., 1999. *Sinkhole Formation Over Hard
Rock Mining Areas and its Risk Implications*. Trans.
Inst. Min. Metal (Section A), Vol. 108, pp. A27-A36.