

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2024/780

## Determinação da Espessura Ideal para Crown Pillar através de Modelagem Numérica

Michele Márcia de Souza

Coordenadora de Geomecânica, Equinox Gold, Teofilândia, Brasil, michele.msouza@equinoxgold.com

Marina Ramos Campos

Assistente de Geotecnia, Equinox Gold, Teofilândia, Brasil, marina.campos@equinoxgold.com

Arlton Ferreira Nascimento

Geólogo Geotécnico, Equinox Gold, Teofilândia, Brasil, arilton.nascimento@equinoxgold.com

**RESUMO:** A extração de minérios rasos limitados como crown pillars entre escavações subterrâneas e a céu aberto tem se tornado comum, especialmente com o contexto de aprofundamento das escavações e valorização do conteúdo metálico. Embora os mecanismos de rupturas em regiões de crown pillars tenham sido amplamente estudadas nos últimos anos, as diretrizes e condicionantes de projetos ainda são limitadas. Muito se deve a complexidade geológica e estrutural, assim como às diferentes geometrias já escavadas. Sendo assim, métodos empíricos e analíticos permanecem sendo os mais utilizados como metodologias de análises. Tomando a mina de Fazenda Brasileiro como exemplo, onde a mina a céu aberto possui interação com as escavações subterrâneas, o contexto de crown pillar ideal se torna ainda mais relevante, tornando assim a aplicação de modelagens numéricas um passo crucial para garantir a estabilidade do projeto. O trabalho apresenta um estudo de caso de aplicação de métodos numéricos para avaliação de estabilidade do crown pillar na mina de Fazenda Brasileiro, pertencente a Equinox Gold. Durante o estudo foram elaborados modelos bidimensionais em regiões específicas da mina, tendo como foco avaliar a influência do crown pillar nos taludes próximos.

**PALAVRAS-CHAVE:** Crown pillar, Fazenda Brasileiro, RS2, modelagem numérica.

**ABSTRACT:** The extraction of limited shallow ores as crown pillars between underground and open-pit excavations has become commonplace, especially with the context of deepening excavations and the valorization of metal content. Although rupture mechanisms in crown pillar regions have been widely studied in recent years, project guidelines and constraints are still limited. Much of this is due to the geological and structural complexity, as well as the different geometries already excavated. Therefore, empirical and analytical methods remain the most widely used methodologies for analyses. Taking the Fazenda Brasileiro mine as an example, where the open pit mine interacts with the underground excavations, the context of the ideal crown pillar becomes even more relevant, making the application of numerical modelling a crucial step in guaranteeing the stability of the project. This paper presents a case study of the application of numerical methods to assess crown pillar stability at the Fazenda Brasileiro mine, belonging to Equinox Gold. During the study, two-dimensional analyses were also carried out in specific regions of the mine, with the aim of assessing the influence of the crown pillar on nearby slopes.

**KEYWORDS:** Crown pillar, Fazenda Brasileiro, RS2, numerical modelling

### 1 INTRODUÇÃO

A procura por bens minerais é uma prática que se desenvolve desde os primórdios da humanidade, sendo o ouro um dos principais metais preciosos procurado. No Brasil, a descoberta do ouro se deu em 1560, tendo sido encontrada em 1590 a primeira jazida de “ouro de lavagem” (Lis et. al 2000).

Ao longo dos anos a crescente e constante busca por esse bem mineral acarretou na redução da ocorrência e concentração do mesmo, gerando assim a necessidade de buscá-lo em locais cada vez mais profundos ou então, através do desenvolvimento de novas técnicas de extração.

A mineração Fazenda Brasileiro (FBDM), pertencente à empresa Equinox Gold, mantém suas operações há quase 40 anos, sendo o foco principal de produção lavras subterrâneas através do método *Sublevel Stopping*. A extração do ouro ocorre em diferentes corpos de minério, estando a produção concentrada em regiões mais profundas, cerca de 1070 metros em relação a cota da superfície.

O aprofundamento em minas subterrâneas traz consigo um aumento nos custos e riscos associados ao processo produtivo. O aumento da DMT (distância média de transporte) e elevação do nível de tensões induzidas no maciço rochoso, são alguns exemplos dos impactos relacionados a operações nessas regiões.

A alta valorização do ouro, associada aos impactos descritos anteriormente, corroboraram para introdução do Open Pit em regiões de crown pillar no plano estratégico de Fazenda Brasileiro.

Com a mudança do meio de exploração e aumento da interação com antigas escavações, há também um acréscimo de fatores que influenciam na estabilidade do projeto, surgindo então, a necessidade cada vez maior da aplicação de controles e estudos geotécnicos para determinação do crown pillar ideal durante as etapas de operação.

## 2 CONTEXTUALIZAÇÃO

### 2.1 Localização

A mina de Fazenda Brasileiro está localizada no estado da Bahia, mais especificamente a noroeste da capital do estado, Salvador, cerca de 180 quilômetros (Figura 1). FBDM está em operação a aproximadamente quatro décadas, já tendo produzido aproximadamente 3.3 milhões de onças até o momento, que juntamente com as minas de Santa Luz, Aurizona, Riacho dos Machados e Aurizona, integram as minas da Equinox no Brasil.

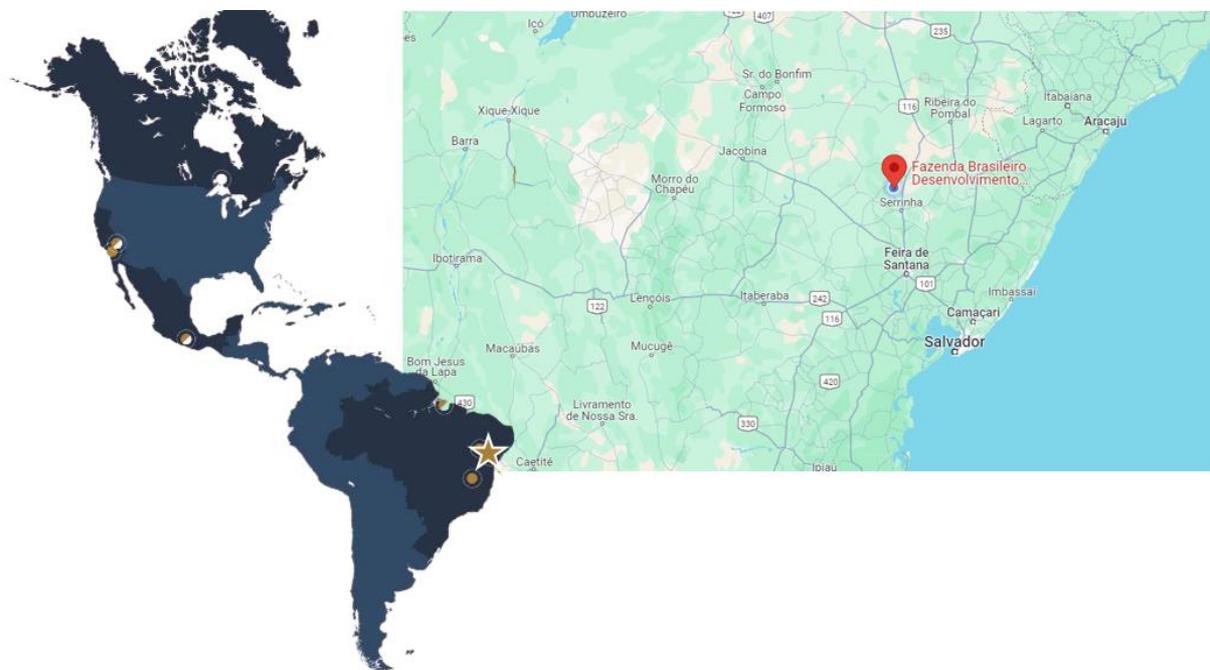


Figura 1. Localização da área de estudo.

## 2.2 Contexto Geológico e Estrutural

A mineralização de ouro de Fazenda Brasileiro está hospedada em um sill gabróico intrudido em rochas pertencentes ao *Greenstone Belt* Rio Itapicuru (GBRI), Cráton São Francisco (Silva, 1983). O GBRI é composto por rochas supracrustais que estão sobrepostas ao embasamento gnáissico-migmatítico Santa Luz. Essas rochas subpracrustais são subdivididas em três unidades, sendo a Vulcânica Félsica hospedeira da mineralização (Figura 2).

Já em relação ao contexto estrutural, o GBRI está disposto em sucessões de sinclinais e anticlinais, limitados por zonas de cisalhamentos regionais, com orientação bem definida de N-S na região centro-oeste e E-W na porção sul (Silva, 1983), sendo estruturas de mesmo padrão observadas em escala menor em Fazenda Brasileiro.

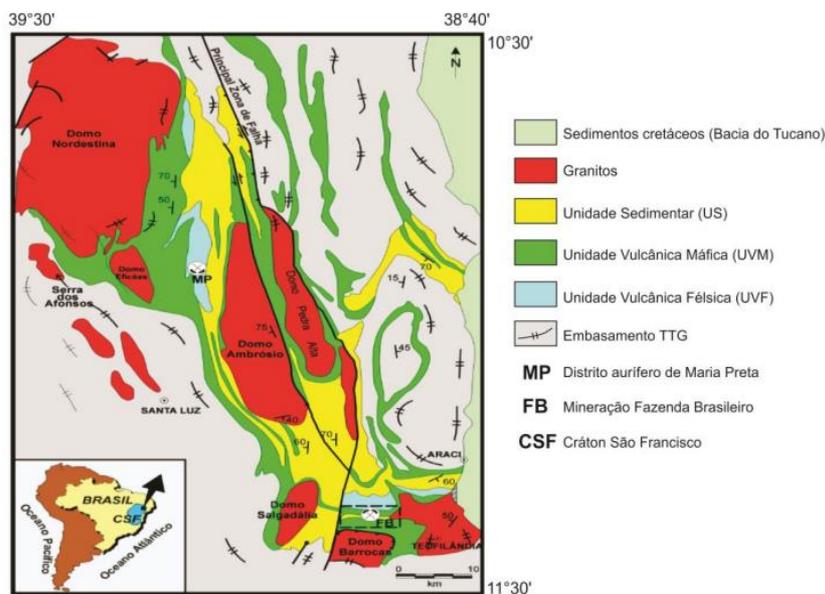


Figura 2: Mapa geológico simplificado do Greenstone Belt do Itapicuru (Rocha-Neto 1994).

## 2.3 Método de lavra

O foco de produção em Fazenda Brasileiro consiste na extração por meio de escavações subterrâneas através do método *Sublevel Stopping*, tendo a sequência *Top Down* como predominante. Diferente da sequência *Bottom Up* que prevê o enchimento dos stopes já lavrados para continuação da lavra nos níveis superiores, a sequência *Top Down*, mantém as escavações abertas, estabilizadas por meio de pilares verticais e horizontais, também conhecidos como *rib pillar* e *sill pillar*.

Embora as escavações subterrâneas tenham sido parte principal da produção do conteúdo metálico ao longo dos anos, a abertura de cavas em regiões anteriormente definidas como *crown pillar* tornaram-se parte do plano estratégico de FBDM, acarretando assim em operações simultaneas, ou seja, operações por meio do *Open Pit* e subsolo.

Na Figura 3 é possível visualizar a interação entre superfície e subsolo melhor detalhada, sendo as escavações em vermelho correspondentes a lavras subterrâneas e as linhas em azul o projeto previsto para o *Open Pit*. Vale a pena ressaltar que as escavações subterrâneas tratam-se de escavações antigas cujo foco de produção correspondia a minério de teor maior, ao passo que o *Open Pit* busca extrair a mineralização ao entorno dessas escavações, que possuem teor a menor, porém se tornam viáveis de ser extraídas através da superfície.

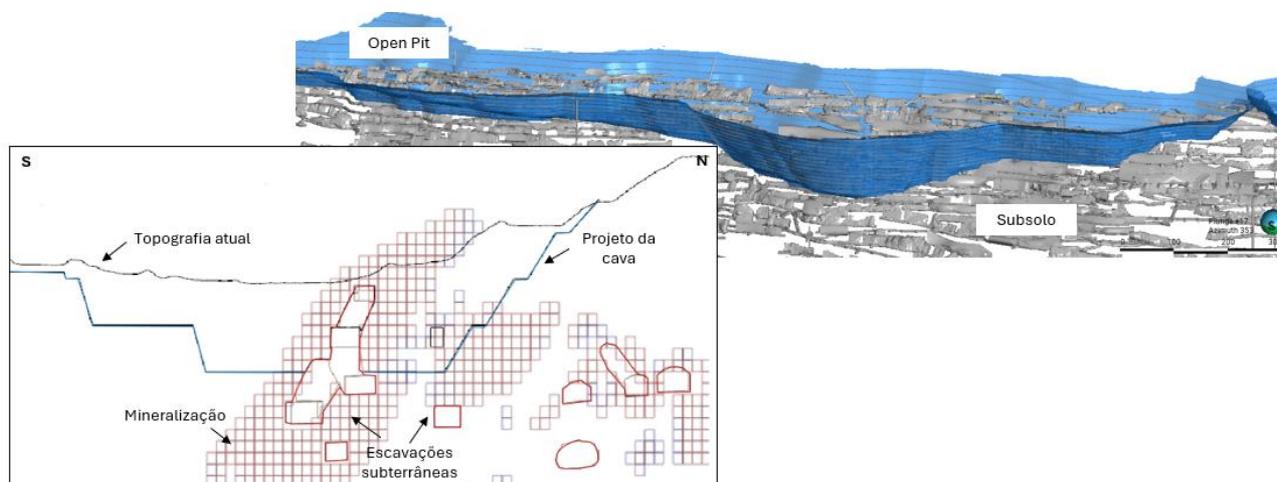


Figura 3: Croqui esquemático indicando interação entre Open Pit e subsolo.

### 3 METODOLOGIA

#### 3.1 Caracterização Geomecânica

Para realização das análises numéricas são tidos como inputs básicos os parâmetros do maciço rochoso, obtidos por meio das classificações geotécnicas e ensaios laboratoriais.

A caracterização geotécnica é realizada através da descrição de testemunhos de sondagem e mapeamentos geotécnicos ao longo do *Open Pit*, sendo utilizadas as metodologias propostas por Barton *et al* (1974) e por Bieniawski (1989), sendo elas o Q e RMR respectivamente. Para ambas são atribuídos pesos a parâmetros que interferem na qualidade do maciço, como por exemplo, a resistência a compressão uniaxial da rocha, RQD, espaçamento das discontinuidades, orientação e condição das mesmas.

Junto dessas classificações também são realizados mapeamentos estruturais (Figura 4) que tem por objetivo entender o comportamento das famílias de estruturas e qual o impacto delas nas escavações, principalmente nos trechos de avaliação do *crown pillar*. Aerofotogrametria e mapeamentos em campo são as principais metodologias utilizadas.

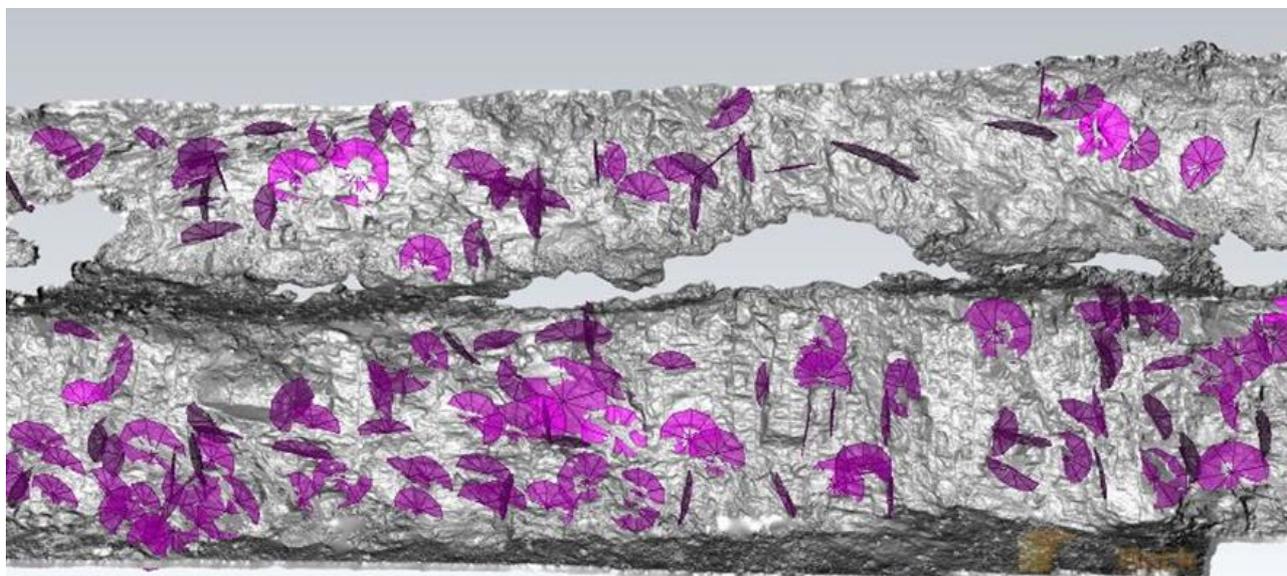


Figura 4: Discos estruturais obtidos por meio de aerofotogrametria e mapeamentos em campo.

### 3.2 Mapeamento de Vazios

Para a identificação e mapeamento das escavações antigas, também denominadas de vazios, são realizadas avaliações através do uso dos escaneamentos topográficos. Entretanto, por se tratar de uma mina em operação a aproximadamente 40 anos, parte das escavações superficiais que haviam sido projetadas e direcionadas apenas com o uso mapas em papéis, não tiveram seus dados recadastrados e digitalizados uma vez que foram perdidos com o passar dos anos. Com isso, diferentes metodologias de identificação de vazios se tornam necessárias, sendo os métodos geofísicos, perfurações investigativas e voos de drone parte do trabalho.

Os métodos como o GPR (*Ground Penetrating Radar*), e a Eletroresistividade, cujas anomalias encontradas podem estar relacionadas a regiões potenciais de vazios (Figura 5), são métodos aplicados a FBDM nas fases iniciais de projeto (uma vez que dependem de uma área maior para execução) que posteriormente são validados através das sondagens investigativas.

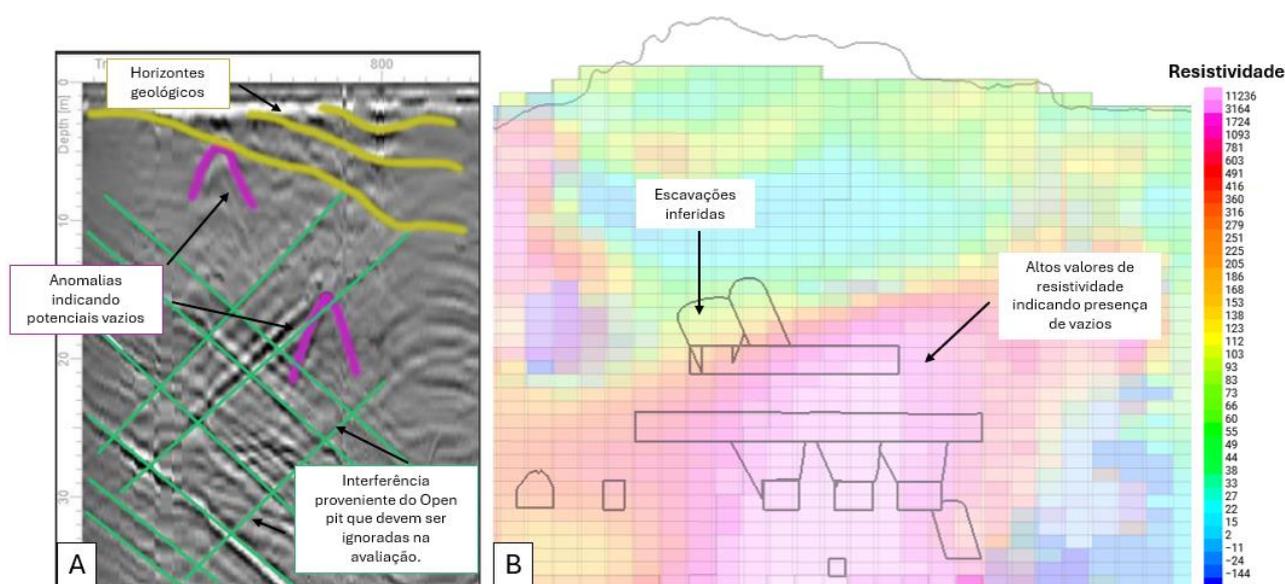


Figura 5: A) Interpretação dos resultados geofísicos obtidos através do GPR, estando em rosa a interpretação de potenciais vazios. B) Seção com valores de resistividade, sendo os valores baixos interpretados como solos argilosos e/ou rochas alteradas, valores médios interpretados como rocha e valores acima de 10.000 tratados como anomalias, podendo as mesmas serem indicativas de vazios.

### 3.3 Análises numéricas bidimensionais

A estabilidade do talude rochoso e dos esforços exercidos no *crow pillar* podem ser determinados a partir do uso do método de Redução da Força ao Cisalhamento (SSR), encontrando-se o fator de redução da resistência crítica (SRF).

A opção “redução da resistência ao cisalhamento” no *software* RS2 permite que seja executado uma análise de estabilidade por elementos finitos e calculado um fator crítico de redução de resistência para o modelo. O fator crítico de redução da resistência é equivalente ao “fator de segurança” do talude.

Em termos gerais, o conceito básico do método de Redução da Força de Cisalhamento (SSR) pode ser explicado da seguinte maneira: Os parâmetros de resistência de um talude são reduzidos pelo fator (SRF), e a análise de tensões por elementos finitos é calculada. Esse processo é repetido para diferentes valores de SRF, até que o modelo se torne instável (os resultados da análise não convergem mais). Isso determina o fator crítico de redução de resistência (SRF crítico), ou fator de segurança da escavação.

Na Figura 6 é demonstrado um exemplo de análise considerado o SRF como parâmetro de análise, para este cenário são apresentados contornos/condição de deformação máxima de cisalhamento, onde não são observadas influências entre as escavações subterrâneas e o talude.

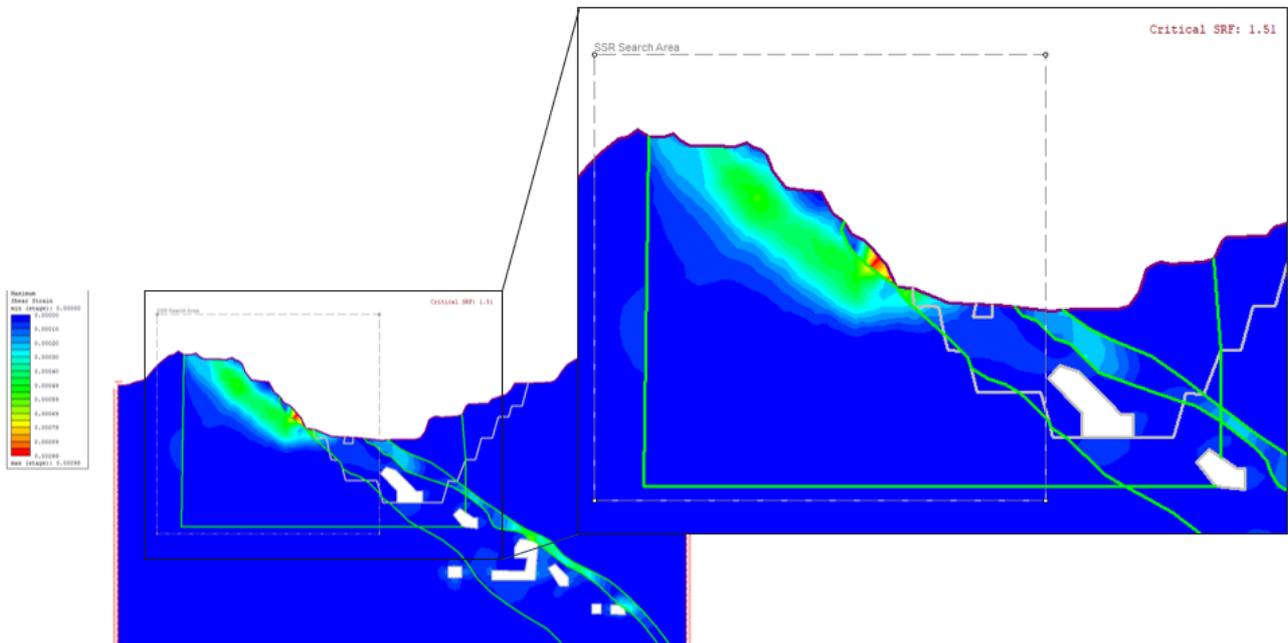


Figura 6: Condição de deformação máxima de cisalhamento, indicando valores de SRF iguais a 1.51. Para esse cenário é possível observar que não há interferência das escavações com

Além do método SRF avaliações em termos de *strength factor* (SF) e *yielded elements* também são utilizadas para mapeamento do crown pillar ideal, porém em escala de trabalho menor. A Figura 7 ilustra um cenário de avaliação com crown pillar de 10m entre a superfície da cava e teto da galeria.

A observância dos limites de plastificação do maciço, com a utilização do parâmetro *yielded elements* não indicou plastificação avançada no núcleo do pilar, considerando a espessura modelada de 10 metros. Somado a isto, os valores de *strength factor* acima de 1.8 na região central do *crown pillar* são considerados estáveis se considerada metodologia proposta por Carter *et al* (1995).

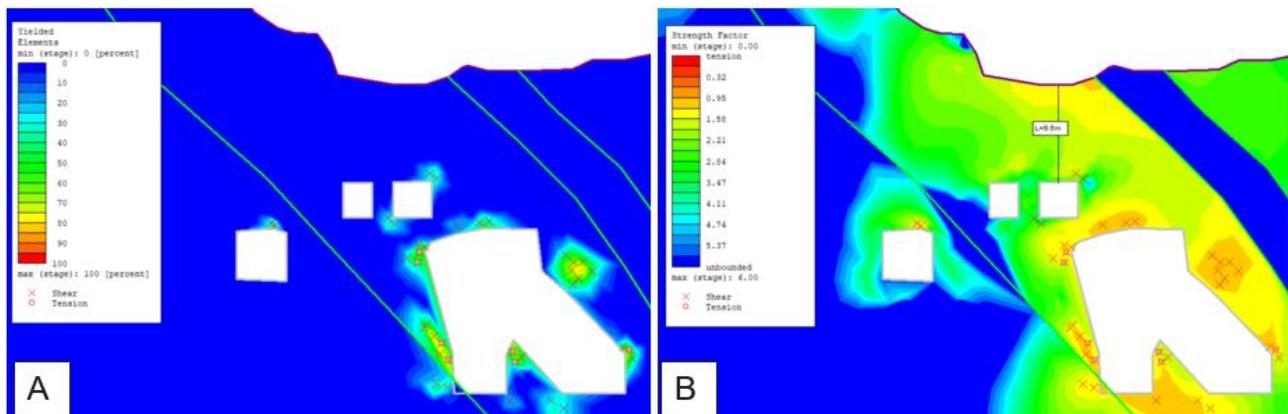


Figura 7: Exemplos de análises numéricas bidimensionais para dimensionamento do *crown pillar* ideal. A) avaliação em termos de zona de plastificação – *yielded elements* e B) avaliação em termos de *strength factor*.

#### 4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A complexidade geológica e estrutural, assim como as diferentes geometrias de projeto tornam as análises numéricas parte fundamental para avaliação de crown pillar. Entretanto, para uma correta avaliação são necessárias avaliações multidisciplinares que vão desde o mapeamento de vazios, coleta de dados de qualidade de maciço, até as calibrações dos modelos numéricos. Porém, a correta aplicação da ferramenta promove maior confiabilidade do projeto e segurança ao longo de todas as etapas operacionais.

#### AGRADECIMENTOS

Agradecemos a toda equipe de Serviços Técnicos e Operação pela parceria e condução conjunta dessa metodologia de lavra tão complexa, mas que sempre nos desafia a promover um trabalho com foco em segurança e excelência. Em conjunto agradecemos também a Equinox Gold por incentivar e apoiar nossos projetos.

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Barton, N., Lien, R. & Lunde, J. (1974). *Engineering Classification of Rock Masses for the Design of Tunnel Support*. Journal of Rock Mechanics and Rock Engineering, 6: 189–236.
- Bieniawski, Z. T. (1989). *Engineering Rock Mass Classification*. New York. John Wiley & Sons, 251 p.
- 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.
- Lis, F.A.; Loureiro, F.E.V.L.; Albuquerque, G.A.S.C. (2000). *Brasil 500 anos. A construção do Brasil e da América Latina pela mineração*. 421p.
- Rocha-Neto, M.B. (1994). *Geologia e recursos minerais do greenstone belt do Rio Itapicuru, Bahia*. CBPM, Salvador, Série Arquivos Abertos, v.4, 47p.
- SILVA, M. G (1983). A seqüência vulcanossedimentar do médio Rio Itapicuru, Bahia: caracterização petrográfica, considerações petrogenéticas preliminares e zoneografia metamórfica. Dissertação de Mestrado, Salvador, Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia.