

# Mecanismo de Ruptura da Rampa Fonte Grande Sul – Mina Cuiabá / Sabará e sua Interação com Concreto Projetado.

Felipe de Brito Pereira

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

**RESUMO:** A Mina Cuiabá de propriedade da AngloGold Ashanti Córrego do Sítio Mineração é hoje uma das mais importantes minas subterrâneas do Brasil. Dentre os métodos de lavra aplica-se *Sublevel Stopping*, Corte e Aterro e variantes. A crescente prática do *sublevel stopping* permitiu o desenvolvimento e entendimento do suporte do tipo concreto projetado na mina. Sua metodologia de aplicação e dimensionamento deve ser condicionada aos mecanismos de ruptura da mina para que assim, possa ser efetivo, de fato. Estudos realizados em uma das rampas do complexo, desenvolvida sem concreto projetado, permitiram ilustrar a frequência de *buckling* e seu efeito progressivo com o tempo, em decorrência da dinâmica da qual as tensões estão submetidas em uma mina. Para este fim, foi realizado escaneamento digital da porção e calculado o nível de *overbreak* da mesma em relação ao projeto ideal. O entendimento do mecanismo de ruptura e do princípio de atuação do mesmo, associado à capacidade produtiva da mina de instalação do suporte, permitirá reduzir o risco da operação e também minimizar os retrabalhos através da adequada instalação do suporte na escala do tempo, sendo ideal logo após o desenvolvimento.

**PALAVRAS-CHAVE:** Concreto Projetado, *Buckling*, *overbreak*, Suporte.

## 1 INTRODUÇÃO

A Mina Cuiabá está localizada no setor NW do Quadrilátero Ferrífero, a 5,5 km do centro da cidade de Sabará, nas margens da rodovia MG-050 que liga essa à cidade de Caeté, Figura 1.

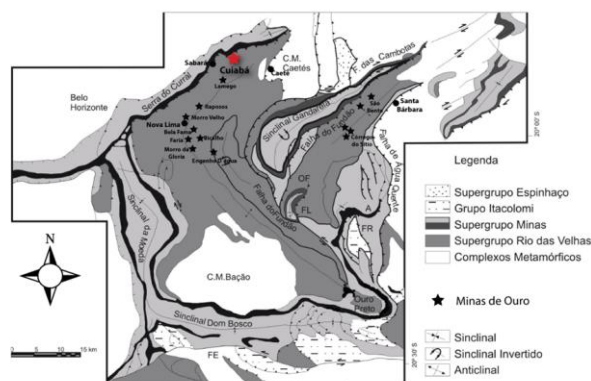


Figura 1: Localização da Mina Cuiabá.

Como método de lavra vem se aplicando as metodologias de corte e aterro e *sublevel stopping* com suas variantes, da qual o último representa o mais expressivo.

Associada às alterações na metodologia de lavra, a aplicação de concreto projetado como suporte vem se evoluindo desde o ano de 2012, seja no aspecto de qualidade e volume produtivo. Esta evolução está alinhada ao plano estratégico da empresa no que diz respeito à segurança e redução de custos em aspecto global. A figura, ilustra o efeito em segurança no médio prazo da aplicação de concreto projetado nas galerias na mina de Kiruna, Suécia.

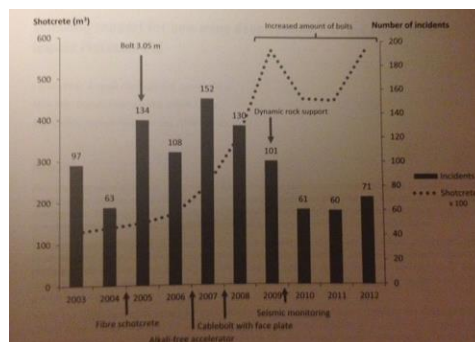


Gráfico 1: Melhoria do sistema de suporte em relação a incidentes durante o período 2003 -2011. (Jacobsson et. al 2013)

A qualidade do sistema de suporte, sendo qual for, se faz de grande importância para que se garanta sua eficácia. Caso contrário, a interação rocha-suporte não ocorreria da maneira necessária para controlar deslocamento, reter e suportar blocos do maciço rochoso.

Não menos importante, o conhecimento prévio dos esforços solicitantes são necessários para que se tenha o correto dimensionamento do suporte, não deixando de se avaliar as metodologias de controle de qualidade e custos da recomendação.

## 2 CONTEXTUALIZAÇÃO

A aplicação de concreto projetado na Mina Cuiabá iniciou teoricamente no ano de 2007 quando o primeiro equipamento de projeção, Meyco Cobra, foi adquirido pela empresa. Desde então, as atividades foram se estruturando até que no ano de 2012 foi adquirido uma estrutura física para elaboração de concreto em subsolo, mais precisamente localizada no nível 15, há aproximadamente 1000 m da superfície.

Coincidentemente a este fato, 2012 representou o início das atividades para que a metodologia de lavra por *sublevel stoping* fosse a principal prática da mina, por questões óbvias de segurança, da qual se elimina a exposição do homem do interior dos realces.

Com esta alteração foi percebido no anos subsequente um aumento drástico no número de *Fall of Ground* (FOG) nas áreas de desenvolvimento, como se pode ilustrar pelo Gráfico 2.

Diante deste contexto, gráfico 2, foi notório a inversão do ritmo de ocorrência de FOGs para em galerias de desenvolvimento, representando blocos em sua maioria, entre malhas que somente são evitados com a presença de suporte de superfície. Como ação mitigadora a equipe de concreto projetado vem sofrendo investimentos em equipamentos de projeção, treinamentos e mão de obra para que as novas demandas possam ser abrangidas.

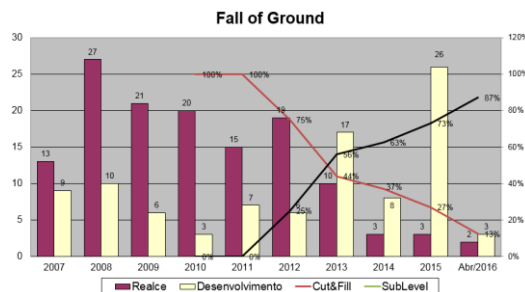


Gráfico 2: Evolução da quantidade de FOGs para a Mina Cuiabá.

### Concreto Projetado Aplicado - Mina Cuiabá

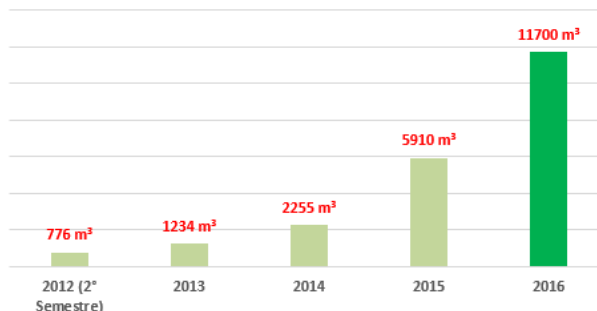


Figura 2: Evolução do volume de projeção na Mina Cuiabá.

### 2.1 Classificação Geotécnica da Rampa Fgs

A Mina Cuiabá possui como principal acesso: rampas que comunicam do Nível 3 ao níveis mais inferiores e *shaft* que comunica a superfície a no máximo o nível 11.

De uma maneira geral as rampas foram e estão sendo desenvolvidas em um maciço xistoso, denominado Sericita Clorita Xisto, salvo em momentos da qual se percebe evidências de quartzo e ou camadas de Grafita Xisto.

Para consideração deste trabalho discutiremos os aspectos e características da Rampa Fonte Grande Sul, entre os níveis 11 e 18 da qual foi desenvolvido na litologia predominante Sericita Clorita Xisto.

Considerando a classificação geomecânica realizada entre os níveis 13 a 15, o maciço rochoso pode ser enquadrado como Rocha Boa (RMR médio = 68) para o sistema Bieniawski (1989) e Boa (Q médio = 12,4) para o sistema Q de Barton et. al (1974). Tais resultados estão em acordo com o range sinalizado por Barbosa (2008).

Tabela 1: Descrição dos dados referente a classificação dos Níveis 13 a 15 da rampa FGS.

|     | Média | Máximo | Mínimo | Desvio Padrão |
|-----|-------|--------|--------|---------------|
| RMR | 68,5  | 80     | 56     | 4,8           |
| Q   | 12,4  | 18,8   | 4,9    | 4,8           |

Dentre os planos de fraqueza do maciço a foliação representa a predominante, haja visto sua frequência e persistência. Este pode ser representado pela atitude 156/30, conforme análise realizada no software da Rocscience Dips V.5.0.

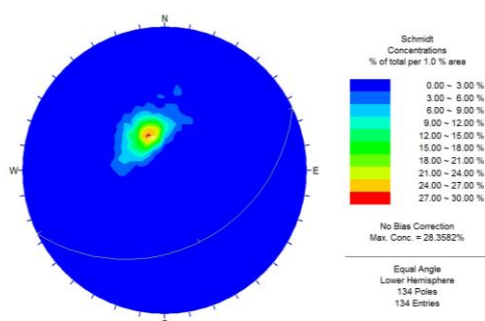


Figura 3: Análise de estereograma para o plano de foliação do maciço rochoso em estudo.

Em virtude da anisotropia deste maciço, provocada pela xistosidade característica da rocha, os comportamentos mecânicos da mesma se alteram dependendo da direção da qual os esforços são submetido, como se observa pela resultados realizados para amostras extraídas dos níveis 14 e 15 Fonte Grande Sul.

Tabela 2: Resultados de ensaios laboratoriais para o Clorita Sericita Xisto. (Fonte: Demin – UFMG, 2012)

| Relação da Força axial e Xistosidade | RCU    | Módulo de Elasticidade |
|--------------------------------------|--------|------------------------|
| Paralela                             | 57 MPa | 66 GPa                 |
| Perpendicular                        | 68 MPa | 57 GPa                 |

A seção típica dos túneis desta rampa considera-se como 4,8 x 4,8 entre os níveis 11 e 14 e 5,5 x 5,5 para níveis 15 em sequência. Como sistema de reforço observa-se uma grande variabilidade de aplicações em malha aproximada de 1,5 x 1,5, seja para tirantes resinados com 4m de comprimento; cavilhas expansivas com 2,4m de comprimento e/ou

coordalhas ancoradas com argamassa em 3m de comprimento (cabos com trama modificada pela inclusão de porcas espaçadas a cada um metro para algumas situações e cabos com trama convencional para outras).

## 2.2 Modelos de Rupturas da Rampa Fonte Grande Sul (FGS)

A rampa em estudo representa uma região da qual a situação atual, esta modificada em relação a seu estado original quando escavado. Esta mudança esta condicionada em:

- Alteração do estado de tensão da mesma graças a lavras e desenvolvimento próximos;
- Influência ocasionada por vibrações decorrente de detonações próximas;
- Saneamento mecanizado eventual para adequação do ambiente de trabalho a operação;
- Reinstalação de reforço/suporte dos túneis pós saneamento mecanizado.

Inspeções de campo nesta rampa evidenciam mecanismos de quebra do tipo *buckling* (flexão composta), porém em grande parte com elevado nível de evolução devido ao auxílio do saneamento mecanizado da qual a rampa foi submetido ao longo dos anos.

Este modelo de ruptura em maciços foliados, possui como mecanismo deflagrador o excesso de tensão cisalhante nos planos de xistosidade, entretanto, este excesso ocorre em virtude a nova condição da qual o maciço esta exposto quando escavado e também pós um novo estado de tensão (induzida). No caso deste estudo a ruptura se torna progressiva, pois, as camadas de rocha que permanecem intactas, pós rupturas inicial, podem sofrer novas plastificações, modificando o cenário com o tempo.

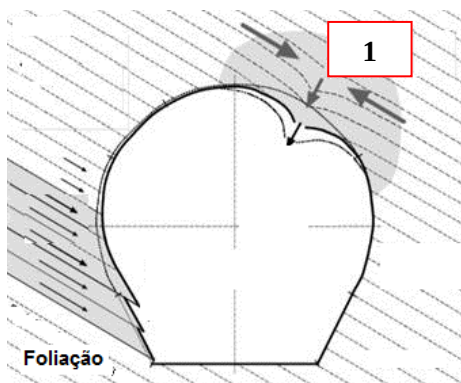


Figura 4: Mecanismo de ruptura por flexão composta (buckling), sinalizado pelo numeral 1. (Oliveira, 2013)

Bewick e Kaiser (2009) mostram que para maciços anisotrópicos, a zona de dano nas paredes da escavação é altamente dependente da orientação da anisotropia e menos condicionada pela razão entre a orientação das tensões principais, ao contrário do que se esperar para maciços homogêneos. Os últimos destacam também que a espessura das camadas e a resistência da rocha intacta podem influenciar diretamente na profundidade/extensão da zona de dano. Referem-se também que para túnel circular nas condições exploradas na referência, uma janela de influência com 100° em relação a normal da foliação representa a região da qual o maciço estará condicionada a rupturas do tipo buckling, assim como mostrado pela figura abaixo.



Figura 5: Evidência de overbreak ao longo do nível 13 da rampa FGS, sinalizando o “capelamento”.

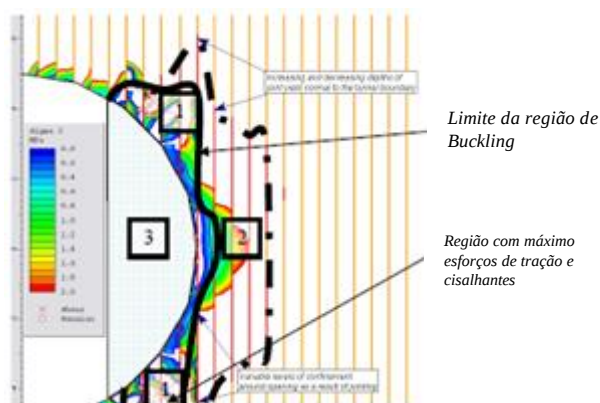


Figura 6: Túnel circular em estado de tensão isotrópico ( $K=1$ ) e maciço rochoso com anisotropia a zona de influência da estrutura dominante em janela de 100°. (Bewick 2009)

Hutchinson e Diederichs (1996) destaca que maciços anisotrópicos podem gerar rupturas com nível de tensão bem inferior que a resistência a compressão da rocha através da ruptura por flexão composta (buckling). Para tal mecanismo o mesmo propõe expressão analítica para cálculo da tensão crítica requerida para início do mecanismo.

Com o objetivo de se detectar a porcentagem da rampa com evidência de *buckling* a mesma foi caracterizada de acordo com as evidências visuais, independente da magnitude da evidência de campo, apenas a título qualitativo.

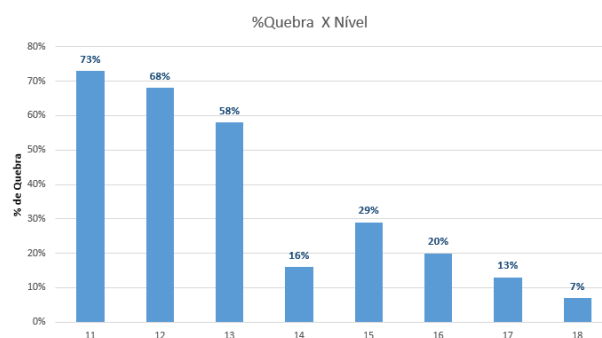


Gráfico 3: Porcentagem de evidências de *buckling* mapeadas em campo, por nível da rampa FGS.

O Gráfico 3 demonstra que os níveis mais superiores já apresentam um nível da rampa com evidências ao buckling significativo quando comparado aos inferiores que ainda não foram submetidos a diversas variações do estado de tensão pelas lavras próximas, pelo tempo de exposição e pela menor ocorrência de re saneamentos mecanizados na região.

### 2.2.1 Levantamento de Overbreak da Rampa FGS

Como anteriormente mencionado, o levantamento qualitativo permitiu reconhecer as áreas da qual o *buckling* já se mostrava evidente. Com a proposta de se avaliar o *overbreak* médio por nível, foi realizado escaneamento digital dos 3084 metros de rampa entre o nível 11 e nível 18 para tal quantificação.

Como definido por Spathis (2012) apud Zdazinky (2015), a sobre escavação (*overbreak*) é representado pela subtração entre o volume real da escavação levantada subtraído pelo volume ideal a se escavar.

O gráfico abaixo permite observar os valores médios de *overbreak* encontrados por nível e seus respectivos valores mínimo e máximo para cada nível. Vale ressaltar que a análise foi realizada em porções com comprimento médio de 20 metros para maior detalhamento da análise ao longo de toda extensão de estudo.

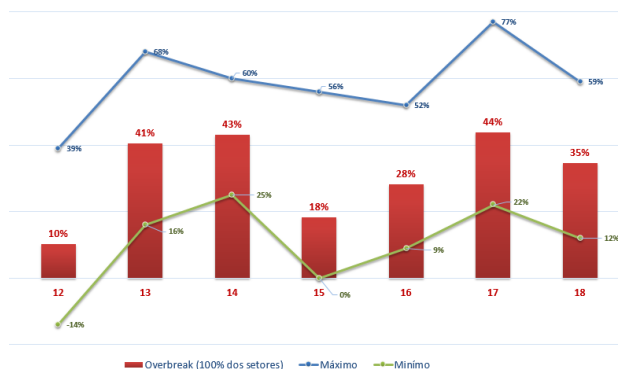


Gráfico 4: Overbreak médio para cada nível avaliado.

Deste não se percebe uma correlação clara entre os resultados dos níveis, entretanto, nota-se pelos limites superiores e inferiores médios uma tendência crescente de overbreak em profundidade, mesmo sabendo que os níveis inferiores ainda não foram submetidos a variação de tensão tão elevada e exposição a saneamento mecanizado como os níveis superiores, contudo, os níveis mais profundos possuem um estado de tensão natural mais intenso que os superiores, decorrente a profundidade.

O volume total de overbreak da região escaneada representa 22179 m<sup>3</sup>, ou seja,

aproximadamente 59884 toneladas de rocha estéril que foi removida, sem nenhum ganho a empresa, logo, desperdício de dinheiro.

### 2.3 Mecanismo de Atuação do Concreto Projetado

A aplicação de concreto projetado data-se de 1907, quando Karl Akeley iniciou o processo de projeção via seca, chamado de gunita. (Rispien 2001). A aplicação do material, até então direcionada para obras civis ganhou relevância também na mineração com o passar dos anos. Novas tecnologias de concreto, equipamento, logística e técnicas operacionais tem alimentado o aumento da aplicação deste tipo de suporte em todo o mundo.

Suporte de superfície da escavação, bem como concreto projetado, telas, TSL, *straps* e/ou combinação possuem como princípio básico fazer com que o maciço rochoso mantenha sua integridade, reduzindo deslocamentos e por consequência, prevenindo a perda de massa no entorno da escavação (Kuchta, 2002).

Bernard (2008) apud Seymour et. al., relatam que o concreto projetado previne a degradação do sistema de ancoragens e conecta o vão entre ancoragens, suportando material desconfiando que esteja no contorno da escavação.

O mecanismo de transferência de esforços entre maciço rochoso e concreto projetado está intimamente correlacionado a maneira da qual o mesmo é disposto nos túneis. Para aproveitar a resistência a compressão uniaxial do concreto o mesmo deve ser disposto de tal forma a se trabalhar como um arco compressivo. Para tal se faz necessário que suporte seja aplicado piso a piso.

Em aplicações para mineração, vários são os fatores com que induzem a prática para que a projeção seja realizada de maneira a não se estender até o piso, seja ela pela longevidade da galeria, otimização do tempo de projeção e redução de custo. (Hadjigeorgiou, 2011)

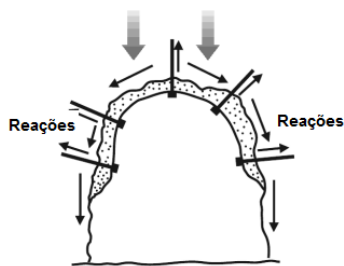


Figura 6: Distribuição de esforços no projetado quando aplicado até limite superior ao piso do túnel. (Clements 2009 apud Hadjigeorgiou 2011)

Como de se esperar a prática acima citada não irá exigir do concreto sua maior capacidade resistiva por não formar o arco compressivo. Seu comportamento diante aos esforços estará relacionado com:

- Aderência entre concreto projetado e maciço rochoso / Resistência ao cisalhamento entre concreto e maciço rochoso;
- Resistência a tração na flexão;
- Transferência de carga para sistema de reforço, desde que este seja aplicado a posterior do projetado.

Kaiser and Tannant 2001 apud Seymour et. al., descreve que o concreto projetado resiste aos esforços por adesão, restringindo a superfície da escavação contra movimentos em decorrência da rigidez, adesão e resistência a tração na flexão do mesmo.

Chryssanthakis et. al. 1997, simulou numericamente a influência do concreto projetado em maciços descontínuos, demonstrando redução nos esforços do sistema de ancoragem do túnel em até 50% da carga quando comparada a situação sem aplicação de concreto projetado. O mesmo, destacou uma redução de 6% no deslocamento do arco do túnel.

Stacey (2001) identificou diversos mecanismos e sub mecanismos de atuação do concreto projetado da qual podem atuar isoladamente ou em combinação. Quando direcionamos para maciços anisotrópicos ao modelo de ruptura acima proposto, destacamos os seguintes princípios de estabilização:

- Inter travamento dos blocos (limitador cinemático)

A interação entre o concreto projetado e o maciço através da adesão, previne deslocamentos que acarretaria na perda de blocos pela escavação.

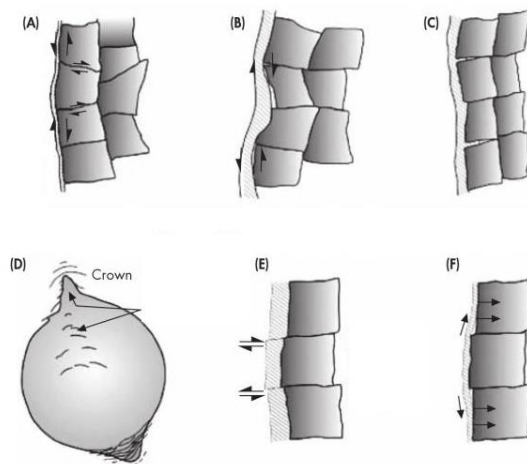


Figura 7: Mecanismos de estabilização por intertravamento. (A) Adesão da interface limitando deslocamentos (B) Resistência de cisalhamento entre concreto e rocha para concreto com baixa resistência de aderência. (C) Penetração de concreto nas trincas, aumentando a restrição de movimento. (D) Suporte de quebras por tensão quando aplicada na fase inicial do processo, inibe o movimento progressivo. (E) resistência ao cisalhamento puro do concreto (F) Pequenas espessuras de concreto promovem perda de adesão e consequente esforço por tração e tração na flexão. Stacey (2001)

- Mecanismo tipo "Basket"

Quando o maciço rochoso encontrase com alto nível de plastificação, a atuação do concreto baseia no princípio de armazenar a massa rompida. Neste processo a tenacidade do concreto se faz um elemento de grande relevância para a estabilidade do mesmo.

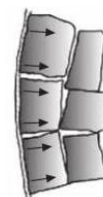


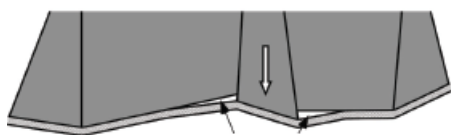
Figura 8: Mecanismo tipo "Basket". Stacey (2001)

### c) Reforço aos Planos de Fraqueza

Como já relatado, maciços xistosos apresentam proeminência de ruptura por *buckling*, logo as camadas discretas do maciço podem ser enrigecidas com o projetado, reduzindo como consequência sua elbeltez e aumentando a resistência ao buckling.

## 2.4 Mecanismos de Ruptura do Concreto Projetado Aplicado a Rampa em Estudo

Holmgren, 2001 apud Kutcha 2002, descreve que testes realizados na Suécia ilustram resultados da qual concreto projetado de boa qualidade iniciam seu processo de ruptura pela resistência de adesão. Diante deste fato, a movimentação subsequente do maciço, seja por gravidade e/ou progressão do *buckling*, irá promover um movimento descendente na camada de concreto, aumentando assim, seus esforços de tração e/ou tração na flexão.



**Perca de Adesão**

Figura 10: Ruptura por tração/tração na flexão resultante de insuficiente resistência de aderência entre concreto e escavação. (Kutcha, 2002)

Considerando que a camada de concreto está corretamente dimensionada para suportar os esforços solicitantes, após evolução do processo de plastificação do maciço este cenário pode evoluir para situação pelo mecanismo do Figura (G), da qual será exigido do suporte sua propriedade de tenacidade, induzindo em alguns casos a resistência ao cisalhamento do concreto.

A evolução para o cenário abaixo ilustrado, representa para Barret & McCreath (1995) a situação mais crítica entre os reforços. O mesmo, propôs metodologia de cálculo considerando mecanismos de ruptura do tipo: adesiva, cisalhamento direto, tração na flexão e cisalhamento por pulsionamento.

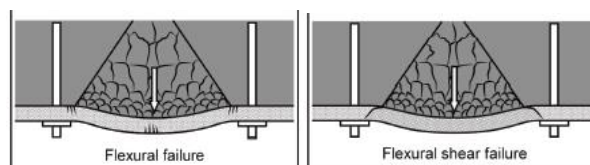


Figura 11: Modo de ruptura esquemático (after Morton et al., 2008; Barret and Mc Creath, 1995 apud Seymour et. al.)

## 3. CONCLUSÃO

O *buckling* representa o mecanismo de ruptura mais comum da Rampa Fonte Grande Sul, como evidenciado no mapeamento da estrutura ao longo dos 3084 metros de rampa. Esta evidência está presente desde os níveis da qual os realces próximos já foram lavrados, em maior porcentagem, até aqueles que ainda não, menor porcentagem. Este fato deixa claro que, os dimensionamentos de suporte para túneis devem ser feitos considerando as possíveis interferências futuras, para assim evitar riscos e trabalhos indesejados no médio a longo prazo.

Como as rampas avaliadas não apresentam suporte tipo concreto projetado, a mesma esteve submetida ao longo de toda sua vida, a vibrações, rearranjos de tensões e saneamentos mecanizados da qual foram responsáveis por progredir com o nível de quebra do mecanismo tecnicamente descrito anteriormente. A atividade de saneamento mecanizada elimina os blocos instáveis da galeria do momento, entretanto, permite que as camadas superiores estejam expostas a alterações assim como a primeira esteve no momento anterior. Desta maneira, este mecanismo se torna progressivo e oneroso ao processo.

O resultando do levantamento de *overbreak* realizado ao longo de toda extensão, demonstra que elevados níveis de *overbreak* (10% - 44%) são encontrados, mesmo em regiões da qual tecnicamente não se esperava. Fato este que se justifica pelas interferências sucessivas da qual a escavação foi submetida ao longo dos anos para readequação operacional, através de atividades de saneamento mecanizado e re-atirantamento em decorrência da dinamicidade do ambiente geotécnico da qual está inserida. Todo este cenário se associa a influência da

anisotropia, conforme citado por Bewick & Kaiser (2009).

Avaliando este fato como uma anomalia, a melhor prática para que evitemos os custos com retrabalho no longo prazo de uma operação, seria a instalação no tempo adequado dos suportes de superfície considerando assim o dimensionamento para o longo prazo, pós dinamicidade ocasionada pela lavra. Assim estaremos, de fato, permitindo com que o concreto projetado, exerça sua função de limitador cinemático e retentor de blocos já discretos.

#### 4 NOVOS ESTUDOS

Como sequência deste trabalho estudos de direção do túnel contra *overbreak* estão sendo conduzidos para que se possa avaliar a afirmação de Tropa, 2013 da qual considera que o *buckling* ocorre quando a diferença angular entre foliação e eixo do *raise* de ventilação seja inferior que 20°.

Outra oportunidade de estudo em andamento, relacionasse a grande influência no processo que os constantes retrabalhos promovem ao ciclo produtivo da mina. Nesta linha, busca se comparar o custo do retrabalho contra o custo de aplicação do concreto projetado no ciclo.

Como trabalho futuro, a instrumentação do concreto projetado permitiria aprimorar o entendimento da transferência de carga do sistema: Rocha – Concreto – Ancoragens. Este poderia ser realizado através da instalação de células de pressão entre o concreto e a parede da escavação em paralelo a instrumentos de deslocamento do maciço.

#### REFERÊNCIAS

- Barbosa, E. S., (2008). Avaliação do Suporte com cabos de aço na Mina Cuiabá. Mestrado Profissional. Núcleo de Geotecnia da Escola de Minas / UFOP.
- Bewick, R. P.; Kaiser, P.K. (2009) Influence of rock mass anisotropy on tunnel stability. ROCKENG09. Proceedings of the 3<sup>rd</sup> CANTUS Rock Mechanics Symposium. Toronto, Canada.
- Chrysanthakiev, P.; Barton, N.; Christianson, M.; Lorig, L. (1997) Numerical Simulation of fiber Reinforced Shotcrete in a Tunnel Using the discrete element Method. Int. J. Rock Mech. & Min. Sci. 34:3-4.
- Hadjigeorgiou, J., Potvin, Y., (2011) Hard Rock Ground Control with Steel Mesh and Shotcrete. Chapter 8.6. SME Mining Engineering Handbook, 3<sup>rd</sup> ed.
- Hutchinson, D. J., Diederichs, M. S. (1996) *Cablebolting in Underground Mines*. Richmond: BiTech Publishers Ltd, Hammersmith way, Richmond, British Columbia, Canada.
- Jacobsson, L., Toyra, J., Woldemedhin, B., Krekula, H. (2013) Rock support in the Kiirunavaara Mine. Ground Support 2013. ACG – Australian Center of Geomechanics, Perth.
- Oliveira, D. (2013) Comunicação eletrônica do dia 10/dez/2013. Coffey Associates.
- Kaiser, P. K., Yazich, S., Nosê, J. (1992). *Effect of Stress Change on the Bond Strength of fully Grouted Cables*. Pergamon Pres Ltd.
- Kuchta, M. E., (2002) Quantifying the increase in adhesion strength of Shotcrete applied to surfaces treated with high-pressure water. SME Annual Meeting, Phoenix, Arizona, USA.
- Rispin, M.; Brooks. J. Shotcrete in North American underground mines: yesterday, today and tomorrow. Master Builders, Inc Cleveland, Ohio, USA.
- Stacey, T.R., and Orlepp, W.D., 2007. Yielding rock support: The capacities of different types of support, and matching of support type to seismic demand. In Challenges in Deep and High Stress Mining. Edited by Y. Potvin, J. Hadjigeorgiou, and D. Stacey. Nedlands, Western Australia: ACG.
- Tropa, 2013. Análise de tensões in situ em ambiente de lavra subterrânea – Mina Cuiabá – Sabará/MG. Mestrado Profissional. Núcleo de Geotecnia da Escola de Minas / UFOP.
- Zdazinsky, C. (2015) Effects of electronic Detonators in Underground Tunneling Applications. The Journal of Explosives Engineering. Vol. 32, N 5, sep/oct15, p.30.