

Perda de Resistência de Aderência em Sistema Cabo/*Grout*/Rocha

Reuber Ferreira Cota

Anglogold Ashanti, Sabará, Brasil, rfcota@anglogoldashanti.com.br

RESUMO: Cabos de aço injetados com *grout* constituem, em muitas minas, os principais elementos de reforço para as escavações. Por isto vários autores estudaram a relação entre rocha/*grout*/cabo, principalmente na década de 90 no Canadá. A resistência de aderência *grout*/cabo, geralmente a parte mais fraca do sistema rocha/*grout*/cabo, é gerada pela relação entre dilatação, ocasionada pelas tranças no escorregamento, e a tensão de confinamento, gerada pela tensão no maciço rochoso e seu módulo de elasticidade. Um estudo de caso foi analisado utilizando o conhecimento corrente deste tema para explicar um colapso ocorrido na mina Cuiabá, Sabará-MG, a cerca de 800m de profundidade, onde muitos cabos não romperam.

PALAVRAS-CHAVE: Cabos de aço, Resistência de Aderência, Escavação.

1 INTRODUÇÃO

A mina Cuiabá, localizada em Sabará-MG, Brasil, com escavações com cerca de 1270m de profundidade, é a mina de ouro subterrânea mais importante do Brasil. Com produção de 3500t/dia e produção anual de ouro de 265.000 Oz, a mina possui, atualmente, 200Km de escavações.

Para garantir a produção com segurança, cabos de aço são instalados, principalmente, nas escavações de produção. Cerca de 1600m de cabos de aço são instalados mensalmente na mina Cuiabá.

Cabos de aço injetados com *grout* (água e cimento) constituem, em muitas minas, os principais elementos de reforço para as escavações. Por isso vários autores estudaram a relação entre rocha/*grout*/cabo, entre eles podem ser destacados Hyett *et al.*, 1995; Tan *et al.*, 1993; Fuller *et al.*, 1990; Kaiser *et al.*, 1992; Yazici e Kaiser, 1992 e Diederichs *et al.*, 1993.

Na mina Cuiabá algumas instabilidades foram identificadas, principalmente anteriormente a 2011, nas escavações de produção. Em alguns colapsos foi possível identificar que vários cabos não romperam, não utilizando, assim, a resistência a tração máxima (25-27tf) utilizada para a recomendação de suporte.

Esta anomalia no sistema cabo/*grout*/rocha foi o gatilho para o início de um estudo detalhado visando otimizar este reforço e evitar novas instabilidades.

Os principais fatores que afetam a eficiência deste sistema, cabo/*grout*/rocha, serão aqui apresentados e detalhados.

Um estudo de caso é apresentado, objetivando a exemplificação da teoria já construída na década de 90, comprovando a sua importância e eficiência.

2 SISTEMA CABO/*GROUT*/ROCHA

2.1 Resistência de Aderência

A resistência de aderência *grout*/cabo, geralmente a parte mais fraca do sistema rocha/*grout*/cabo, é gerada pela relação entre dilatação, ocasionada pelas tranças no escorregamento, e a tensão de confinamento, gerada pela tensão no maciço rochoso e seu módulo de elasticidade (Figura 1).

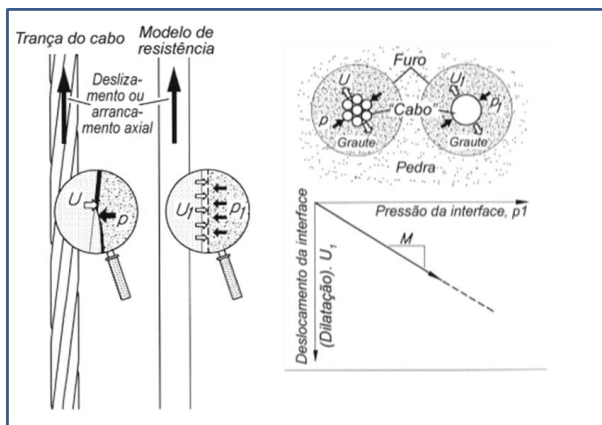


Figura 1. Modelo de resistência de aderência (Modificado de *Cablebolting in Underground Mine*, 1996).

A relação entre o deslocamento radial e a pressão da interface depende das propriedades elásticas da *grout* e da rocha, e é linear para a *grout* intacta. Normalmente, é gerada uma tensão circunferencial no anel da *grout*, resultando na formação de trincas radiais. Por sua vez, essas trincas reduzem a rigidez eficaz do anel da *grout* e, com isso, diminui a magnitude da pressão de dilatação em um deslocamento radial especificado. Assim que as trincas radiais estiverem totalmente desenvolvidas, a relação se tornará novamente linear, mas com um valor inferior (menos rígido) de M (elasticidade do sistema *grout*/rocha).

A uma dilatação limitante, a pressão de dilatação nas pontas das saliências da *grout* atinge um nível equivalente à resistência à compressão uniaxial da *grout*, causando a fragmentação dessas saliências. Esse limite de dilatação é controlado pela resistência do *grout* e depende da pressão de confinamento (Figura 2).

A proporção água:cimento também controla a rigidez da *grout*, o que, por sua vez, afeta a rigidez radial do sistema. *Grouts* mais viscosas aumentam a pressão de dilatação em determinado deslocamento radial. Isso resulta um aumento na resistência de aderência máxima, como mostra a Figura 3.

Devido a grande importância da relação água/cimento para a resistência de aderência, a composição da *grout* foi modificada, em 2010, na mina Cuiabá. Anteriormente a *grout* era composta por água, cimento, areia e aditivos, sem controle adequado da relação

água/cimento.

Testes de capacidade de suporte, realizados após 24h, comprovaram uma resistência de aderência pequena para esta composição (média de cerca de 10tf/m). Atualmente a *grout* é formada apenas por cimento e água, com relação de água/cimento de 0,4. Esta relação foi encontrada como sendo a mínima para o bombeamento com as bombas utilizadas na mina. Auditorias são realizadas constantemente para verificação desta relação.

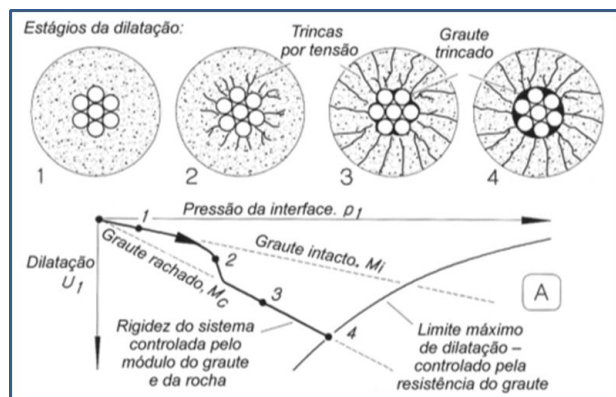


Figura 2. Modelo de resistência ao arrancamento axial de cabos de trança normal (conforme Kaiser et al., 1992; Yazici e Kaiser, 1992; Diederichs et al., 1993 – em *Cablebolting in Underground Mine*, 1996).

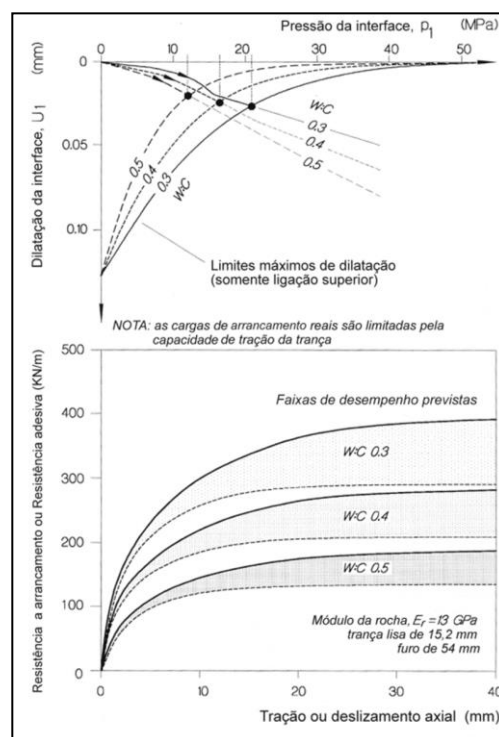


Figura 3. Influência da resistência e rigidez da *grout*, conforme determinada pela proporção água:cimento (segundo Diederichs et al., 1993).

Com relação à qualidade da *grout*, pode-se dizer que, após o trabalho realizado no ano de 2010, a *grout* possui uma qualidade considerada boa. Isto pode ser verificado pelas auditorias realizadas para obtenção da relação água/cimento, além dos resultados dos testes de resistência de aderência (Figura 4). Para cabos com trança simples, a resistência de aderência, após 24h, possui média de cerca de 18tf/m. (a *grout* com areia apresentava uma média de cerca de 10tf/m).

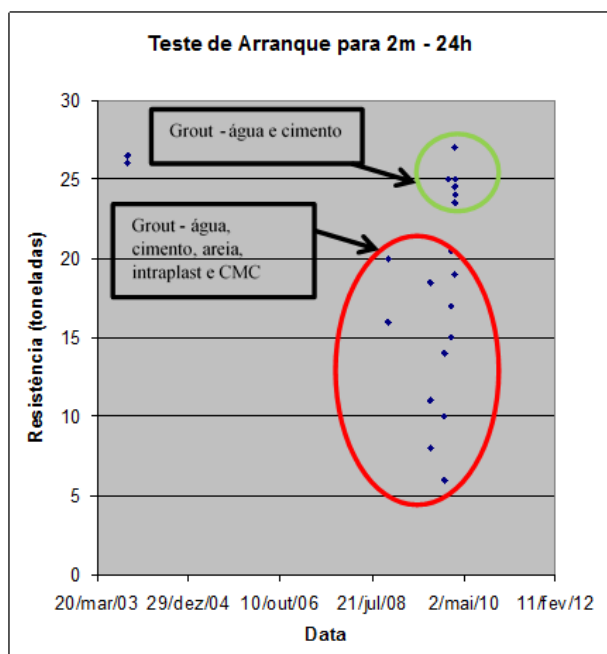


Figura 4. Teste de arranque para cabos com 2m de comprimento para *grout* com água, cimento, areia e aditivos e *grout* com apenas água e cimento.

Outro fator que influencia muito a resistência de aderência é a rigidez do sistema, definida pela rigidez da *grout* e da rocha. A rigidez do sistema diminui com a rigidez decrescente da rocha, como mostra a figura 5. É importante observar que a rigidez da rocha tem grande influência sobre a resistência de aderência quando o módulo da rocha ao redor do furo está próximo ou é inferior ao módulo da *grout*.

O módulo de elasticidade da *grout* utilizada na mina pode ser estimado pela figura 6, onde identifica-se um valor de cerca de 10GPa, próximo ao módulo de elasticidade do xisto do HW de cerca 15 GPa. Em toda rocha rígida, o módulo de elasticidade e a resistência da *grout* são parâmetros críticos que determinam a

resistência de aderência (*Cablebolting in Underground Mine*, 1996).

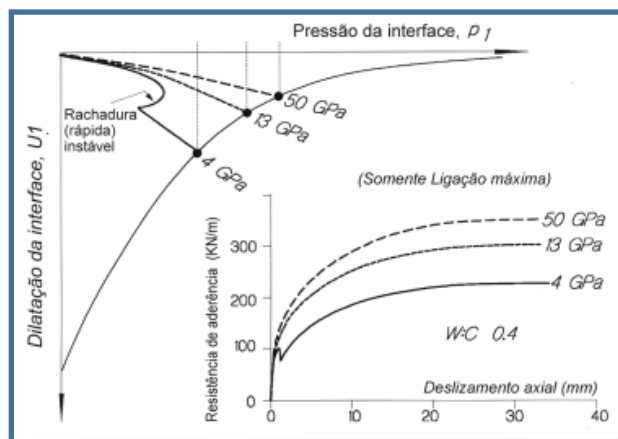


Figura 5. Influência do módulo da rocha sobre a rigidez do sistema, dilatação da interface e resistência de aderência (segundo Diederichs et al., 1993).

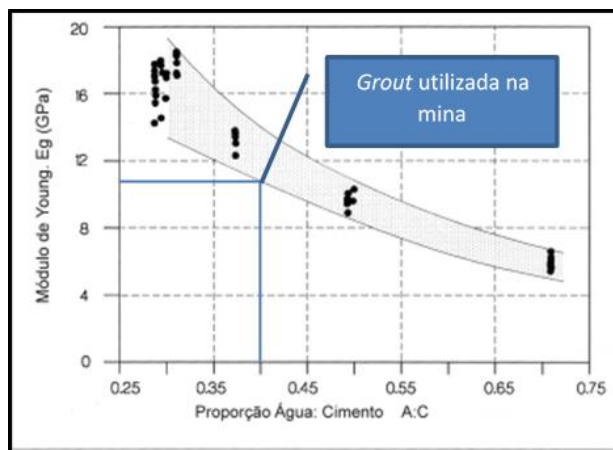


Figura 6. Módulo elástico da *grout* em relação à proporção água:cimento (segundo Hyett et al., 1992).

É necessário considerar a rigidez da rocha do furo. As juntas e fraturas ao redor do furo podem influenciar essa rigidez. Se o espaçamento médio entre fraturas for superior a 5 vezes o diâmetro do furo ou se o maciço rochoso estiver moderadamente tensionado, pode-se presumir que o módulo de rocha intacto domina o comportamento do cabo. Para as densidades de fratura mais altas ou em ambientes de pouca tensão, convém usar o módulo do maciço rochoso projetado a partir dos esquemas de classificação de maciços rochosos. Quando for necessário usar o módulo do maciço rochoso, é prudente utilizar 50-70% da rigidez detectada em laboratório, para

considerar os danos do furo (*Cablebolting in Underground Mine*, 1996).

A rigidez da rocha pode mudar ao longo da vida útil de um cabo de aço. Quando o maciço rochoso é submetido a uma tensão excessiva, criando mais fraturas, ou quando as fraturas existentes se abrem, a rigidez efetiva da rocha pode diminuir, ocasionando uma queda na resistência adesiva do cabo. Esse efeito em sido observado no campo (Hyett et al., 1992; MacSporran et al., 1992).

Os resultados realizados em laboratório e em campo para materiais com diferentes módulos de elasticidade podem ser visualizados na figura a seguir:

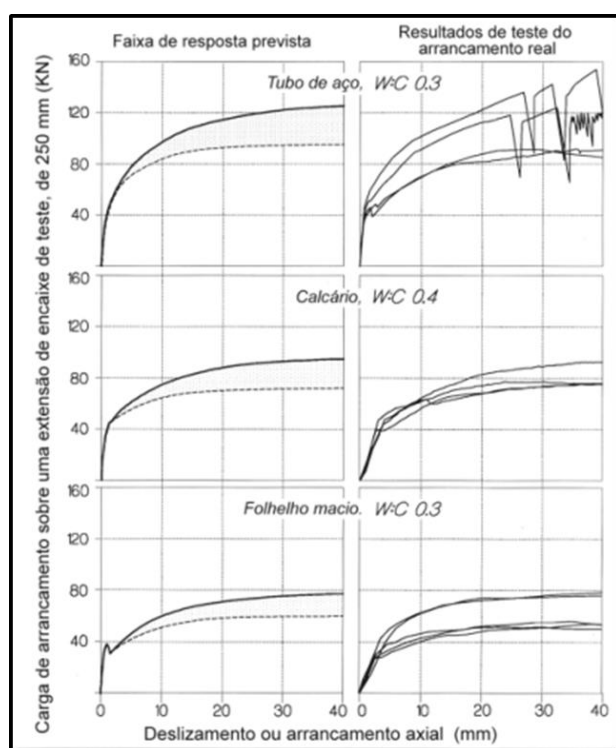


Figura 7- Comparação de previsões do modelo (segundo Diederichs et al., 1993) com ensaios selecionados, realizados em laboratório e em campo (segundo Hyett et al., 1992).

Pesquisas nesta área (Kaiser et al., 1992; Diederichs et al., 1993; Maloney et al., 1992; Pieterse, 1993; MacSporran et al., 1992; Bawden, 1994; Hyett et al., 1995) demonstraram de modo conclusivo que a alteração de tensão no maciço rochoso ao redor do furo, após a instalação de um cabo de aço, pode afetar profundamente a resistência de aderência do cabo. Em suma, os aumentos de

tensão ocasionam um aumento na resistência adesiva, enquanto reduções de tensão podem diminuir essa resistência. Nesse último caso, é possível, em um maciço rochoso macio inicialmente tensionado, que a resistência adesiva do cabo seja anulada. Diversas falhas de cabo de aço que foram observadas pelos autores (Kaiser et al., 1992; Hutchinson e Diederichs, 1993) podem ser atribuídas à diminuição da tensão nos cabos instalados (*Cablebolting in Underground Mine*, 1996).

Para entender esse mecanismo, é necessário considerar a sequência de instalação dos cabos. Primeiro, abre-se um furo na rocha tensionada. À medida que perfurado, o furo se deforma de fora para dentro. Após a criação, a parede do furo é submetida a um alívio de tensão radial. Em seguida, o cabo é inserido e a *grout* é injetada. Nesse momento, a tensão sobre o cilindro da *grout* também é aliviada mas o cilindro permanece em contato total com o cabo e a rocha (presume-se que a qualidade da estrutura do cabo seja padrão e que não haja contração do *grout*).

Durante a vida útil do cabo em um ambiente de mineração, são feitas novas escavações ao redor do cabo, ocasionando uma mudança no campo de tensão local. A reação do furo é um deslocamento adicional radial, em geral, contraindo-se com o aumento de tensão ou expandindo-se com a redução de tensão. Nesse momento, a *grout* também é influenciada por essas deformações e, por sua vez, as condições na interface entre cabo/*grout* são alteradas, como pode ser visualizado na figura 8 (*Cablebolting in Underground Mine*, 1996).

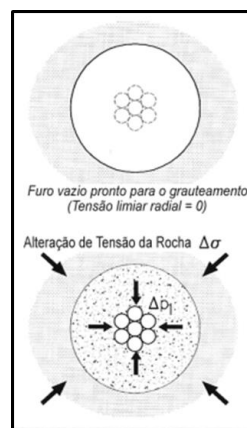


Figura 8- Alteração de tensão e pressão da interface (*Cablebolting in Underground Mine*, 1996).

Voltando ao modelo, um aumento de tensão no maciço rochoso ocasiona uma contração do furo e uma compressão da *grout*. Supondo-se que o cabo estivesse comparativamente rígido, esse efeito seria modelado como um aumento na pressão da interface entre cabo/*grout*, sem qualquer dilatação, como mostra a Figura 9 a). O resultado é um aumento na pressão máxima da interface (após a dilatação) para uma determinada rigidez do sistema e, portanto, um aumento na resistência de aderência máxima.

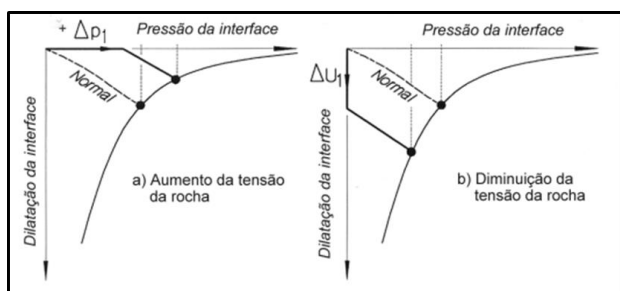


Figura 9- Influência de aumento de tensão (a) e redução de tensão (b) sobre a resistência adesiva de cabos de trança normal com *grout* (segundo Kaiser et al., 1992).

Uma queda de tensão no maciço rochoso ao redor do furo resulta em uma expansão do furo à medida que a rocha se relaxa. Conseqüentemente, a *grout* sem tensão se separa do furo e/ou do cabo. Esse afastamento deve ser fechado para se ter uma pressão de dilatação. Esse efeito é modelado por uma dilatação sem aumento de pressão, como mostra a figura 9 b). Se a pressão de dilatação foi gerada através do deslizamento dos cabos, o relaxamento da rocha (queda de tensão) reduzirá imediatamente a pressão da interface e a resistência de aderência. O efeito da alteração de tensão pode ser visualizado na figura a seguir:

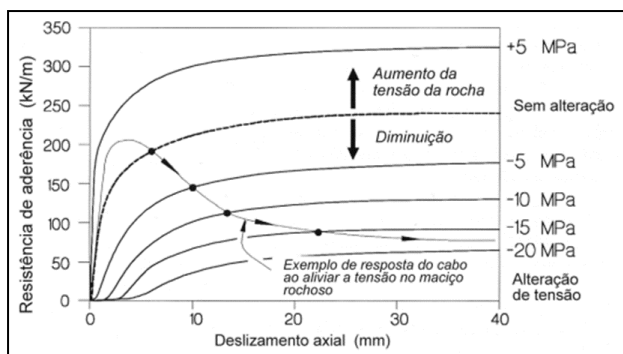


Figura 10- Alteração de tensão sobre arrancamento previsto. A:C=0,4, E=13GPa (Diederichs et al., 1993).

Deve-se observar que a pesquisa de campo (Maloney et al. 1992) e levantamento independente e modelagem da resistência de aderência (Hyett et al., 1995) confirmaram o comportamento previsto.

Em maciços rochosos fraturados, o módulo da rocha pode depender da tensão. Em geral, a rigidez da rocha tenderá a diminuir com a queda de tensão. As rochas mais plásticas são mais sensíveis à alteração de tensão. O resultado combinado do relaxamento da rocha, portanto, será maior (uma queda mais acentuada na resistência de aderência) como na figura 11.

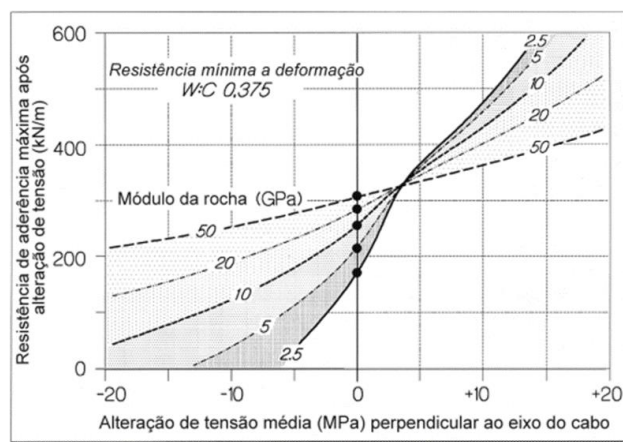


Figura 11- Efeito da alteração de tensão e confinamento do furo e módulo de elasticidade da rocha sobre a resistência de aderência em uma *grout* de A:C = 0,375.

3 ESTUDO DE CASO

3.1 Realce de Produção 14 Serrotinho

Foi utilizado um estudo de caso, no corpo 14 Serrotinho, lavrado em corte e aterro a cerca de 800m de profundidade, para a verificação do quanto a resistência de aderência nos cabos instalados nas escavações de produção, formadas por xisto na capa, é influenciada pela variação da tensão e pela mudança do módulo de elasticidade do maciço rochoso ao longo da evolução da lavra.

Como relatado anteriormente, a qualidade da *grout* na ocasião é considerada boa, comprovada pelo controle da relação água e cimento e, principalmente, pelos testes de capacidade de suporte com comprimentos que variam de 0,5 e 1m.

É importante ressaltar que no local de estudo

alguns cabos modificados, tipo *nutcaged*, já haviam sido instalados. Estes cabos possuem aproximadamente o dobro de resistência de aderência quando comparados com cabos simples.

Neste local houve um colapso do xisto da capa, no momento do enchimento com backfill hidráulico, onde não se tinha acesso às pessoas no momento, com peso aproximado de 2700tf (figura 12).



Figura 12- Visualização do colapso ocorrido no corpo 14 Serotinho.

Para identificar a variação da tensão ao longo da evolução da lavra, foi realizado modelagem numérica por meio de elementos finitos em 2D com o software Phase2 (Rocscience). As tensões referentes ao sigma 1, sigma 2 e sigma 3, foram identificadas no modelo na face e a 3m para dentro da capa. Os locais de coleta das tensões foram escolhidos próximos aos cabos instalados no modelo. A variação da tensão do sigma 1 pode ser visualizado na figura 13. É possível identificar que próximo à face do minério, onde os cabos são instalados, existe um confinamento maior, mas que após algumas detonações inicia-se um processo de relaxamento do xisto da capa, gerando uma perda de confinamento significativa em volta dos cabos instalados anteriormente.

Os resultados das tensões obtidas, para σ_1 , σ_2 e σ_3 , para a face de xisto da capa, ao longo da evolução da lavra até a altura vertical de cerca de 20m, podem ser visualizados na tabela 1.

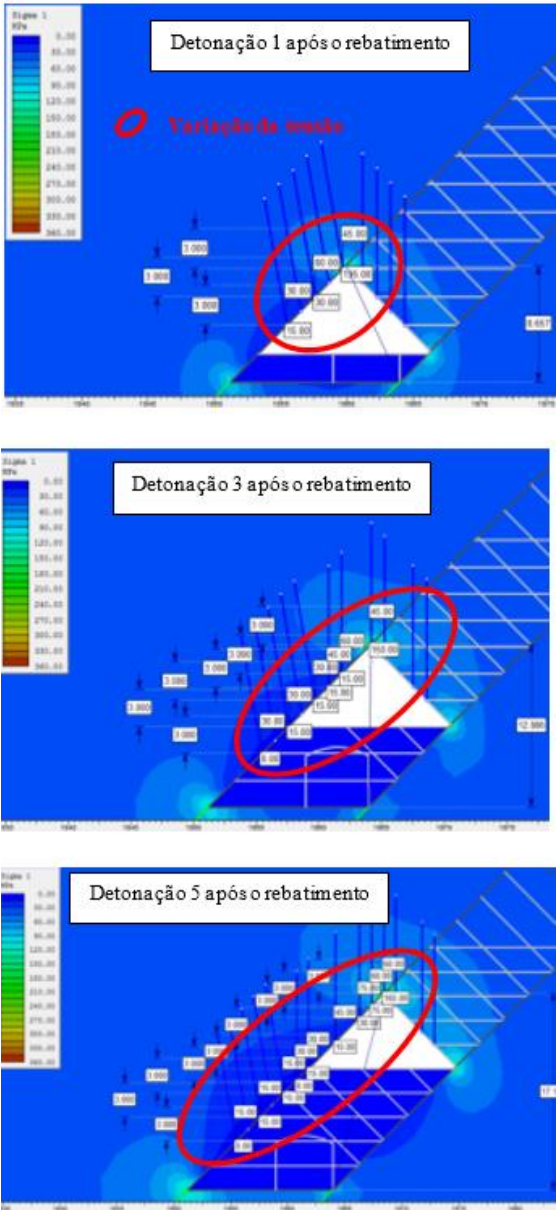


Figura 13- Variação da tensão do sigma 1 com a evolução da lavra na face e a 3m para dentro da capa (Phase2-Rocscience).

Tabela 1. Variação da tensão σ_1 para cada cabo, na face da capa, após cada detonação.

Tensões identificadas na face da capa relativas à cada detonação										
Detonação	Cabo 1	Cabo 2	Cabo 3	Cabo 4	Cabo 5	Cabo 6				
SIGMA 1	1	15	30	135						
	2	0	15	15	45	135				
	3	0	15	15	15	15	150			
	4	0	15	15	15	15	30	150		
	5	0	15	15	0	15	15	30	75	165
	6	0	15	0	0	15	15	15	30	30
SIGMA 2	Detonação	Cabo 1	Cabo 2	Cabo 3	Cabo 4	Cabo 5	Cabo 6	Cabo 7	Cabo 8	Cabo 9
	1	12,5	15	45						
	2	0	10,5	14	21	45,5				
	3	0	10,5	10,5	14	14	52,5			
	4	0	10,5	10,5	10,5	10,5	14	56		
	5	0	10,5	10,5	0	10,5	10,5	14	28	56
SIGMA 3	Detonação	Cabo 1	Cabo 2	Cabo 3	Cabo 4	Cabo 5	Cabo 6	Cabo 7	Cabo 8	Cabo 9
	1	0	0	25						
	2	0	0	0	0	15				
	3	0	0	0	0	0	35			
	4	0	0	0	0	0	0	35		
	5	0	0	0	0	0	0	0	5	35
SIGMA 3	6	0	0	0	0	0	0	0	0	40

A variação média da tensão (tensão inicial – tensão final) para σ_1 , σ_2 e σ_3 , para a face e a 3m para dentro do HW, após a 4ª e a 6ª detonação depois do rebatimento completo do minério, pode ser visualizado na tabela 2.

Tabela 2- Variação média da tensão na face e a 3m para dentro da capa.

Variação média da tensão na face				Média
Número de detonações	Sigma 1 - MPa	Sigma 2 - MPa	Sigma 3 - MPa	
4 detonações	-70,0	-22,6	-12,5	-35,0
6 detonações	-86,7	-27,9	-16,7	-43,8
Variação média da tensão a 3m dentro da capa				Média
Número de detonações	Sigma 1 - MPa	Sigma 2 - MPa	Sigma 3 - MPa	
4 detonações	-15,0	-15,8	-16,7	-15,8
6 detonações	-20,0	-19,4	-20,0	-19,8

A variação média da tensão para σ_1 , σ_2 e σ_3 , entre a face e 3m para dentro Da capa pode ser visualizada na tabela 3.

Tabela 3- Variação média da tensão na face e a 3m para dentro da capa.

Variação média da tensão entre a face e 3m para dentro da capa	Média Geral (MPa)
Após 4 detonações depois do rebatimento total do minério	-25,4
Após 6 detonações depois do rebatimento total do minério	-31,8

Estabelecida a variação de tensão, a mudança do módulo de deformabilidade do maciço rochoso da capa ao longo da lavra deve ser identificada. Esta mudança é ocasionada, principalmente, pela abertura e cisalhamento das descontinuidades. Este fato é comprovado pela identificação mais intensa de quebras/cisalhamento, por microcâmera, quando o furo está mais afastado da face do minério, como pode ser visualizado pela figura 14;

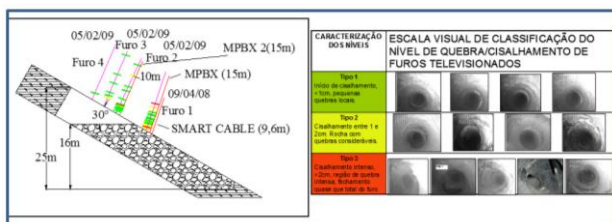


Figura 14- Identificação de quebras e cisalhamentos na capa por televisionamento de furos com microcâmera, ao longo da evolução da lavra pelo método de corte e aterro.

Considerando a classificação RMR (Rock Mass Rating, Bieniawski 1989) para o xisto da capa com o valor 55, obtido por meio da classificação, e consequentemente, GSI (Geological Strength Index) de 50, tem-se:

$$E_m(\text{GPa}) = (1 - D/2) \times (\sigma_{ci}/100)^{1/2} \times 10^{((GSI - 10)/40)} \quad (1)$$

Onde E_m é o módulo de deformabilidade do maciço rochoso; D é o fator de dano por detonação; σ_{ci} é a resistência da rocha intacta da rocha.

Considerando o fator detonação como 0 (sem dano por detonação) e $\sigma_{ci} = 58 \text{ MPa}$, tem-se:

$$E_m(\text{GPa}) = (1 - 0) \times ((58/100)^{1/2}) \times 10^{((50-10)/40)}$$

$$E_m(\text{GPa}) = 1 \times 0,7616 \times 10$$

$$E_m(\text{GPa}) = 7,616 \quad (2)$$

Assim, pode-se identificar, na figura 15, uma significativa perda de aderência após a 4ª detonação, com valor abaixo de 5tf/m.

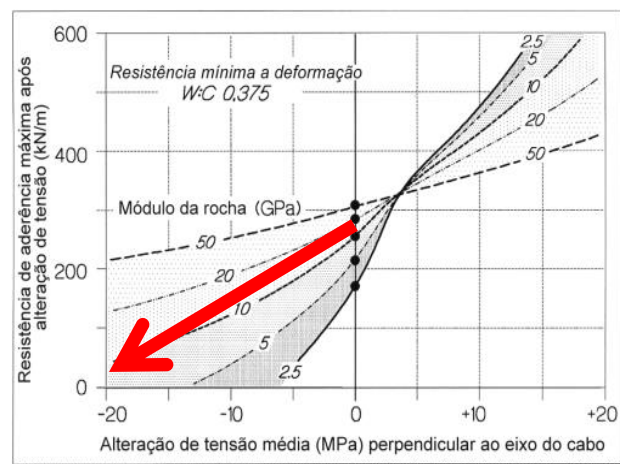


Figura 15- Situação da perda de resistência de aderência com relação à diminuição da tensão de confinamento e do módulo de elasticidade do maciço rochoso da mina cuiabá. É interessante notar que este gráfico foi elaborado para a grout com relação água/cimento de 0,375 (modificado de Cablebolting in Underground Mine).

Hutchinson e Diederichs (1996) apresentam um gráfico de resistência crítica para a resistência de aderência. Esta resistência crítica de aderência determina a capacidade dos cabos, com uma determinada malha, de conter blocos com um peso específico determinado.

Considerando o peso específico da rocha na capa, xisto, no caso da mina, com peso

específico de 2,8tf/m³ e uma malha de 1,5 x 1,5m² para os cabos, tem-se:

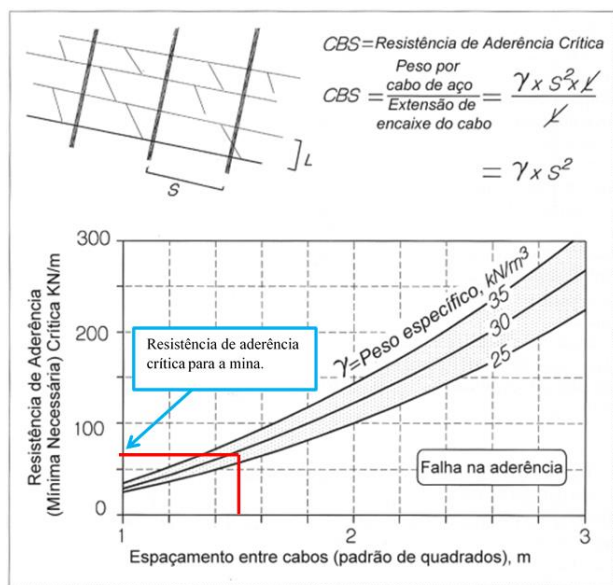


Figura 16- Resistência de aderência crítica para os cabos instalados na capa da mina Cuiabá.

Por meio dos dados apresentados, é possível constatar que a resistência de aderência após 4 detonações (<5tf/m) é menor do que a resistência de aderência crítica (7tf/m), ou seja, haverá o deslizamento no sistema rocha/grout/cabo.

4 CONCLUSÕES

Vários autores trabalharam de forma detalhada no entendimento pleno do funcionamento do sistema rocha/grout/cabo. A resistência de aderência reflete a eficiência deste sistema que é influenciado por diversos fatores.

O tipo de cabo, a relação água/cimento, o módulo de deformabilidade do maciço rochoso e a variação da tensão são os fatores que mais influenciam este sistema.

Foi possível concluir, por meio da obtenção do módulo de deformabilidade do maciço rochoso e da variação de tensão ao redor do cabo, que a perda de resistência de aderência entre a face da capa e até 3m para dentro, após 4 detonações, é significativa, resultando em um valor menor do que a resistência de aderência crítica, ou seja, incapaz de manter um bloco estável estando sujeito ao seu próprio peso.

Esta conclusão pode explicar a instabilização

de alguns locais de lavra, com método de corte e aterro, principalmente, após 4 detonações, na mina Cuiabá.

Para minimizar a possibilidade de instabilização devido a esta perda de resistência de aderência, Hutchinson e Diederichs (1996) sugerem a utilização de cabos modificados, tipo *nutcaged* e *birdcaged*, que podem duplicar a resistência de aderência quando comparados aos cabos simples.

Na mina Cuiabá após a substituição dos cabos simples por cabos tipo *nutcaged* os problemas de instabilidade diminuíram muito, o que reforça toda a teoria e exemplo aqui trabalhado.

AGRADECIMENTOS

À AngloGold Ashanti Brasil por permitir que trabalhos técnicos possam ser desenvolvidos e divulgados. À equipe de mecânica de rochas da mina Cuiabá.

REFERÊNCIAS

- Bawden, W.F., Dubé, S., Hyett, A.J. (1994). *A Laboratory Study on the Capacity of Fully Grouted Cablebolts subjected to Combined Axial and Lateral Loads*. Report to U.R.I.F. Apud Hutchinson, D.J., Diederichs, M.S. (1996).
- Diederichs, M.S., Pieterse, E., Nosé, J., Kaiser, P.K. (1993). *A Model for Evaluating cable bolt bond strength: An Update*, Eurorock 93, Rotterdam, 83-90.
- Hutchinson, D.J., Diederichs, M.S. (1996). *Cablebolting in Underground Mines*, Bitech Publishers Ltd, British Columbia, Canadá, 406p.
- Kaiser, P.K., Yazici, S., Nosé, J. (1992). *Effect of Stress Change on the Bond Strength of Fully Grouted Cables*, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech, vol. 29, nº 3, 293-306.
- Kaiser, P.K., Yazici, S. (1992). *Bond Strength of Grouted Cable Bolts*, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech, vol. 29, nº 3, 279-292.
- Kaiser, P.K., Diederichs, M., Yazici, S. (1992). *Cable Bolt Performance During Mining Induced Stress Change – Three Case Examples*, Rock Support, Rotterdam, 377-384.