

# APLICAÇÕES GEOTECNICAS PARA REDUÇÃO DA DILUIÇÃO OPERACIONAL NA LAVRA SUBTERRÂNEA: ESTUDO DE CASO MINERAÇÃO SERRA GRANDE

G.A.P. Batista

*AngloGold Ashanti, Crixás-GO, Brasil*

M.P. Campos

*AngloGold Ashanti, Crixás-GO, Brasil*

Resumo – A definição de um projeto assertivo depende da avaliação de inúmeros fatores de natureza multidisciplinar. A Mineração Serra Grande – AngloGold Ashanti no primeiro semestre de 2014 apresentava altos índices de diluição no método de lavra subterrânea sublevel open stope, refletindo a instabilidade dos realces medida pela diluição operacional, ou seja, pela presença de material estéril proveniente de deslocamentos ou rupturas nos contornos do realce junto ao minério desmontado. A definição do projeto de redução da diluição operacional para o fechamento do ano envolveu eventos estatísticos, caracterização do maciço, compartimentação das informações, propostas técnicas e melhorias operacionais. No âmbito geotécnico, a definição do projeto ocorreu a partir da setorização das áreas por quantificação da diluição; classificação do maciço; identificação das descontinuidades regionais; retroanálise das condições de estabilidade dos vãos livres nos realces de lavra; eficácia do sistema de cabeamento; identificação dos processos de instabilidade e proposta das melhorias de layout e suporte. As implantações das propostas de melhoria de suporte estabelecidas no projeto geraram bons resultados. Com acumulado em junho de 2014 em 16.6% e meta de 15% de diluição operacional, foi inserido o sistema de estabilização por cabos duplos – dois cabos de aço perfurado em bit 64mm para sustentação do teto dos realces. No mês seguinte, a utilização dos cabos modificados – porca inserida no centro do cabo para melhorar aderência a tração, resultou no fechamento de 2014 diluição acumulada de 13.7%. Conclui-se que o sistema de contenção proposto confere estabilidade do realce durante a lavra minimizando os impactos da diluição com redução de 36% da diluição no segundo semestre de 2014.

## 1. INTRODUÇÃO

A Mineração Serra Grande (MSG) do grupo AngloGold Ashanti possui três minas subterrâneas e duas minas a céu aberto em atividades de extração de ouro no município de Crixás, localizada no extremo noroeste do Estado de Goiás desde o final da década de 80. As minas subterrâneas conduzem suas lavras em profundidades que variam de 300 a 800m, através de três métodos de lavra: Câmaras & Pilares, Corte & Enchimento e Sublevel-stoping conforme descrito por Batista & Campos (2015).

O método de lavra subterrânea Sublevel Open Stope (SLOS), considerado um método de extração de média a larga escala, é aplicado nas seguintes condições propostas por Harim (1982): Competência do minério moderada a elevada, competência das encaixantes ligeiramente alta a alta, forma do depósito tabular ou lenticular, mergulho do corpo mineral maior que o ângulo de repouso do minério desmontado e distribuição de teores ligeiramente uniforme.

Em escavações de realces do tipo SLOS, a geometria dos pilares e stopes – vãos que pretendem realizar a lavra do minério – apresenta maior risco de instabilidade e diluição. Uma das opções para dimensionamento do stope é a abordagem empírica denominada “Stability Graph Method”. Neste método, a estabilidade de um stope aberto é expressa em função de dois parâmetros: Raio Hidráulico (RH) e número de estabilidade  $N'$ , ambos relacionados com as faces do stope conforme descrito por Potvin (1988). A importância do reforço do maciço através de cabeamento é de extrema importância, uma vez que essas escavações apresentam nível de estabilidade inferior aos demais métodos de lavra e o reforço no maciço proporciona condições estáveis para realizar a lavra e minimizar a diluição.

Nesse trabalho é apresentado o sistema implantado de reforço do maciço e a metodologia proposta para redução da diluição no SLOS. Serão apresentados os resultados dos testes de arrancamento do sistema de contenção denominado por cabo plano que consiste em uma cordoalha simples de 7 fios,

helicoidalmente enrolada, com diâmetro de 15,8 mm (5/8") e o sistema de contenção denominado de cabo modificado o qual é derivado do cabo plano, que apresenta um bulbo no fio central entrelaçado pelos demais 6 fios de forma helicoidal. Os sistemas de contenção foram desenvolvidos para resistir, principalmente, a esforços à tração.

Esse teste consiste em aplicar uma força de tração no sistema de contenção através de cilindro hidráulico até que haja o deslizamento ou rompimento do cabo, de forma a obter sua aderência com o maciço rochoso e carga máxima de ruptura. Esse artigo apresenta as melhorias estabelecidas na capacidade de aderência do sistema de suporte com melhor eficiência devido adesão entre o cabo e o graute (calda de cimento).

Sabendo que o reforço com cabos de aço possui grande influência na estabilidade de escavações, podemos relacionar três vantagens da melhoria nesse sistema. A primeira diz respeito a segurança de pessoas e equipamentos, uma vez que diminui a possibilidade de deslocamentos antes, durante e após a lavra. A segunda melhoria diz respeito a recuperação de minério considerando que grandes deslocamentos, se ocorridos durante a detonação do minério, podem inviabilizar a continuidade da lavra. Por fim, a terceira diz respeito a diminuição da diluição, uma vez que a ruptura do maciço durante a lavra se não causar risco de perda material (equipamento) ou perda de reserva de lavra, pode diminuir o teor da região lavrada devido ao acréscimo de estéril. Dessa forma, se faz relevante o comparativo entre a capacidade do sistema de cabeamento e a diluição operacional, ou seja, pela presença de material estéril proveniente de deslocamentos ou rupturas nos contornos do realce junto ao minério desmontado. Outro fator importante na eficiência do sistema de cabeamento é a qualidade do graute. Dessa forma, será apresentado dados da relação água/cimento com a capacidade de aderência.

## **2. SISTEMA DE CONTENÇÃO**

A revisão bibliográfica apresentada nesse capítulo tem como principal fonte o livro Cablebolting in Underground Mines – Diederichs et al. (1996), o qual trata de diversos aspectos referentes ao sistema de cabeamento.

### **2.1. SISTEMA DE REFORÇO EM MACIÇO ROCHOSO**

Segundo Diederichs et al. (1996) os cabos são utilizados em minas subterrâneas de rochas duras para proporcionar um ambiente de trabalho seguro, aumentar a estabilidade do maciço e controlar ou diminuir a diluição do estéril durante a lavra. Se partirmos do pressuposto que o controle da diluição pode ter uma influência direta sobre o custo de um realce, a melhoria do sistema de cabeamento poderá representar uma melhoria também no custo de lavra como um todo.

### **2.2. PROPRIEDADES DO SISTEMA DE CONTENÇÃO**

A contenção com cabos de aço é uma combinação das funções de reforço e sustentação. Como reforço, os cabos evitam a separação e o deslizamento ao longo dos planos de fragilidade no maciço rochoso. Se for possível evitar a separação da junta moderadamente imperfeita e as superfícies de fraturas, a influência dessas descontinuidades pode ser minimizada. Se as descontinuidades forem orientadas desfavoravelmente, resultando blocos soltos e removíveis, os cabos de aço poderão ser elementos eficazes de sustentação mantendo no lugar os blocos de rocha soltos. Os cabos de aço são elementos ineficientes de retenção em maciços rochosos de baixa qualidade e manutenção de pequenas blocos de rocha da superfície da escavação, a menos que utilizados em conjunto com tela, concreto projetado, cintas ou outros tipos de sistema de superfície. Os conceitos de reforço e sustentação utilizando cabos de aço é exemplificado na figura 1.

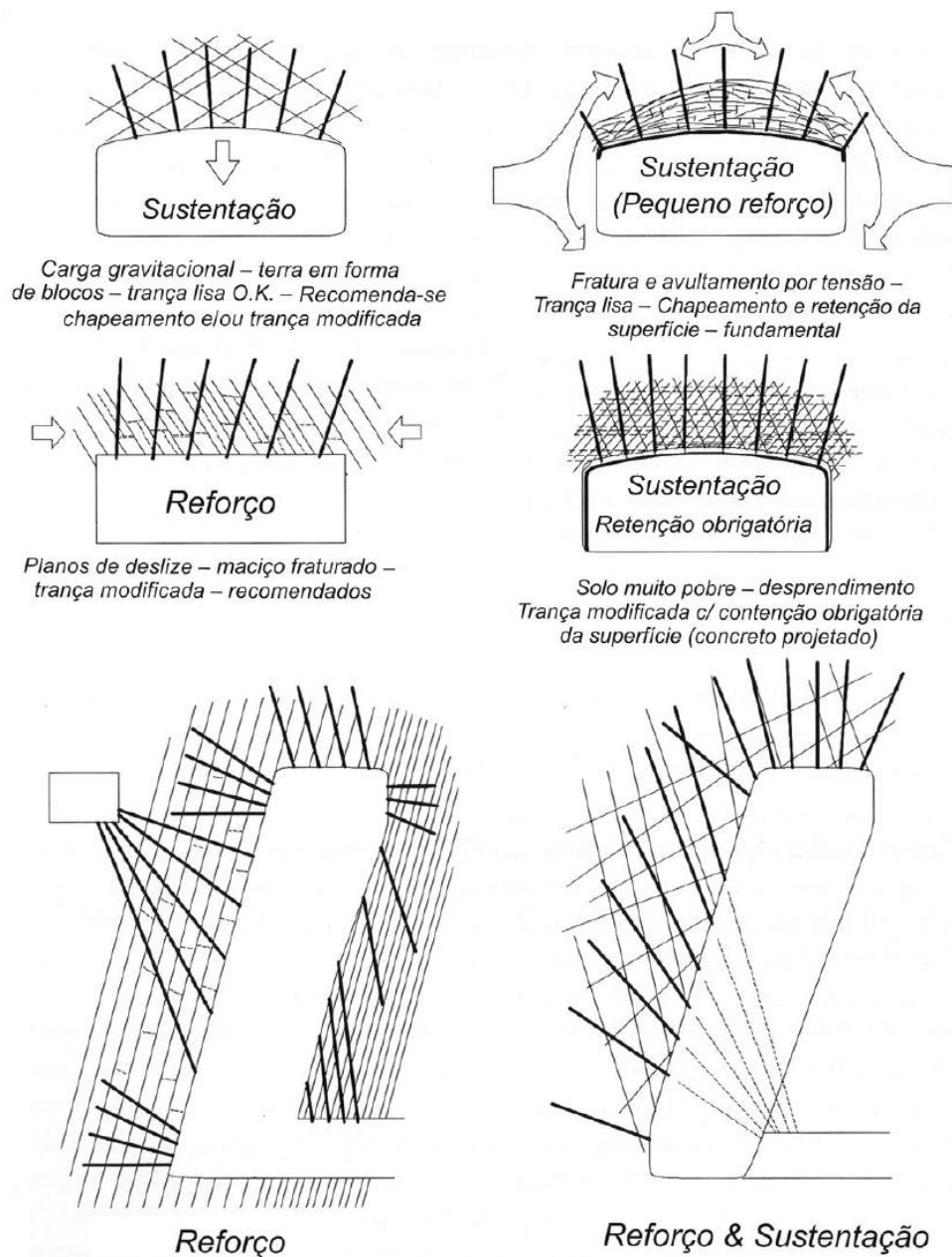


Figura 1: Funções típicas de cabo de aço - modificada Diederichs et al., (1996).

A dilatação é o segredo do desempenho do cabo de aço e é um processo complexo que depende da rigidez do graute, rigidez da rocha e resistência do graute. Com o relaxamento do maciço, pode ocorrer a remoção da adesão interface, causando o deslizamento do cabo em relação o graute. Se a rotação do cabo durante a tração for evitada, ocorrerá uma disparidade geométrica entre as estrias do cabo e as respectivas saliências do graute, logo, essa desigualdade acentua com o aumento do deslizamento. A medida que as saliências do graute precisarem percorrer os arames do cabo, o graute se comprimirá no furo confinado e, com isso, gerará uma pressão normal na interface entre graute/cabo. Essa pressão resulta em uma resistência ao deslizamento (figura 2). Dessa forma, o atrito – resistência ao cisalhamento dependente de pressão – se desenvolve ao longo dessa interface, oferecendo resistência a um posterior deslizamento. As pressões de dilatação se expandem até o ponto em que as saliências do graute são esmagadas Diederichs et al., (1996). A principal vantagem dos cabos modificados está relacionada a transferência de carga, ou seja, a introdução do bulbo no cabo de aço faz com que a eficiência da adesão na interface graute/cabo se mantenha de forma que seja necessário uma pressão superior ao cabo simples para que inicie o deslizamento.

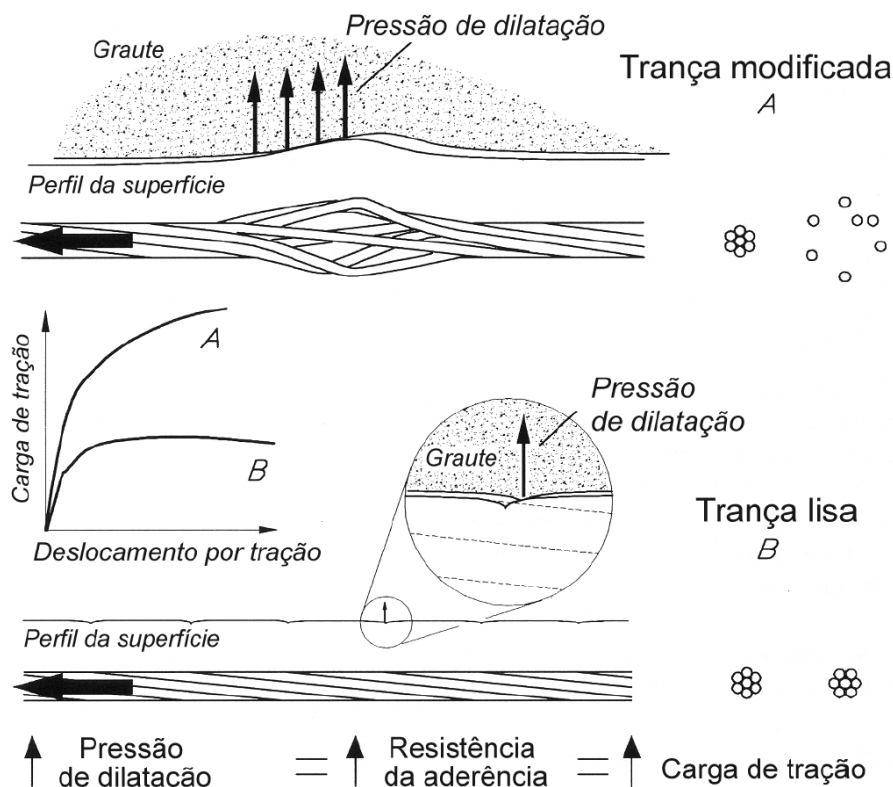


Figura 2: Mecanismo de aderência de cabos - modificado de Diederichs et al. (1996).

A manutenção de bons procedimentos e qualidade durante a instalação do cabo de aço é crucial e de grande importância para a segurança e economia. A qualidade da instalação também deve ser monitorada pelos supervisores de subsolo, engenheiros e técnicos durante as visitas de verificação na área de trabalho enquanto a equipe estiver instalando os cabos de aço. Segue abaixo a tabela onde são relacionados as principais causas de redução na capacidade do cabo de aço conforme descrito por Diederichs et al. (1996).

Tabela 1: Reduções na capacidade no sistema cabeamento devido a controle de qualidade deficiente na instalação

Redução da capacidade no sistema de suporte	Ineficiência (%)
Cabos de aço enlameados, com graxa ou ferrugem (Lappalainen e Pulkkinen 1982; Leclair, 1995)	-50 a -70%
Tubo de suspiro não grauteado (DI 11 mm A/C = 0,45) (Goris, 1990)	-30%
Excesso de água na mistura do graute (Reichert <i>et al.</i> , 1992)	-15%
A/C aumentado de 0,35 a 0,4 A/C aumentado de 0,4 a 0,55	-45%
Coluna de graute incompleta	> -100%

### 2.3 SISTEMA DE SUPORTE DE CABOS PLANO E MODIFICADO

Atualmente na MSG é utilizado como suporte o cabo em áreas de lavra e desenvolvimento. As regiões de lavra que recebem o reforço pelo cabeamento são realces de corte & enchimento e galerias de minério em realces de sublevel. No desenvolvimento são utilizados cabos em alargamentos de rampa, entroncamentos e regiões onde há estruturas que possam vir a gerar cunhas. Segundo Diederichs et al. (1996) as características principais dos cabos planos e modificados, pode ser resumida na Tabela 2 abaixo:

Tabela 2: Características principais entre cabos de arranjo planos e modificado

	Cabo Planos		Cabo Modificado	
	Cabo único	Cabo duplo	Cabo único	Cabo duplo
<b>Relação A/C</b>	0,38		0,4	
<b>Φ min. furo (mm)</b>	00048	00064	00048	00064
<b>Capacidade de deslocamento</b>	Ruptura ocorre em 20mm		Ruptura ocorre entre 25@50 mm	
<b>Capacidade da carga</b>	Arrancamento 20@35 t/m; escoamento 20 t/cabo		Arrancamento 100-200% > cabo plano;	
<b>Sensibilidade</b>	Altamente sensível MR		Sensível MR < 10 GPa; Sensível ao tamanho da porca (max 16 mm).	
<b>Vantagens</b>	Barato e fácil de instalar; Pode ser embalado em carretel contínuo		Flexibilidade razoável; tamanho do furo menor;	
<b>Desvantagens</b>	Sensibilidade extrema; Resistência adesiva + baixa		Não pode ser fabricado em carretéis contínuos;	

## 2.4 SISTEMA DE SUPORTE CABOS DUPLOS

Na mineração subterrânea a utilização de sistemas de cabos de aço é comum, sendo amplamente utilizado a fim de manter o ambiente de trabalho seguro, promover sustentação do maciço rochoso e manter um controle de diluição em realces abertos, onde os cabos de aço podem conter possíveis blocos formados por descontinuidades além de promover um acréscimo de resistência ao maciço. A MSG implantou arranjos de cabos duplos, ou seja, dois cabos inseridos em um furo.

A resistência do cabo de aço segundo a ASTM A416-80 (1980) determina as especificações de desempenho para tranças de aço de 7 fios e estabelece que a resistência a tração de cabos duplos é aproximadamente duas vezes maior que a resistência a tração para cabos simples, sendo a resistência teórica para cabos simples de 25 toneladas e de 50 toneladas para cabos duplos. A figura 3 abaixo ilustra a carga de tração obtida para o cabo simples e cabo duplo.

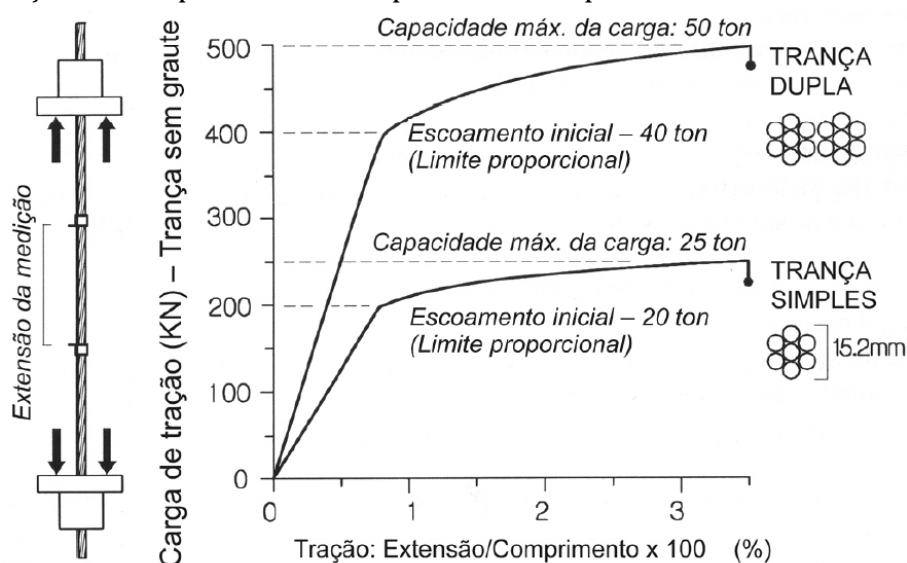


Figura 3: Especificações de desempenho mínimo da trança de aço para aplicações de cabeamento - modificado de Diederichs et al., 1996

Vale ressaltar que o arranjo com cabo duplo faz necessário modificação do diâmetro de perfuração de 48mm para 64mm. Com o sistema de suporte com carga de ruptura superior ao cabo simples, existe a

possibilidade de modificação do espaçamento da contenção com intuito de obter o mesmo fator de segurança, trabalho direcionado a esse assunto na MSG pode ser verificado em Lima (2014).

### 3. METODOLOGIA

A MSG em 2014 apresentava altos índices de diluição em seus realces lavrados em SLOS. Para tal, a definição do projeto de redução da diluição operacional para o fechamento do ano envolveu eventos estatísticos, caracterização do maciço, compartimentação das informações, propostas técnicas e melhorias operacionais. No âmbito geotécnico, a definição do projeto ocorreu a partir da setorização das áreas por quantificação da diluição; classificação do maciço; identificação das descontinuidades regionais; retroanálise das condições de estabilidade dos vãos livres nos realces de lavra; eficácia do sistema de cabeamento; identificação dos processos de instabilidade e proposta das melhorias de layout e suporte. O processo simplificado pode ser verificado na tabela 3 abaixo aonde mostra as responsabilidades de cada setor da mineração.

Tabela 3: Tabela de redução da diluição operacional implantada na Mineração Serra Grande em 2014

Dilution Reduction Study		Date	
		Started	Finished
Statistical of Events	Data analysis	19/08/14	.
	Modelling of excavations	27/08/14	.
Rockmass behaviour	3D analysis of regions high dilution	27/08/14	.
	Backanalysis based on rockmass classify	09/08/14	.
Study possibilities	identify probable regions of high dilution	30/08/14	.
	Propose kriging	28/08/14	.
	Data validation (Mine and planning)	06/09/14	.
Brake thru	Changes model propose	22/09/14	.
	Rock mechanics validation on mine projects	03/10/14	.
	Involve the mine plan team on changes	03/10/14	.
Operation	Operation	04/10/14	.

No que define esse artigo, será explanado a eficácia do sistema de cabeamento, identificação dos processos de instabilidade e proposta das melhorias de layout e suporte.

#### 3.1 RELAÇÃO ÁGUA/CIMENTO (A:C)

A proporção água/cimento (A:C) é a propriedade mais importante do graute. Ela é definida como a proporção da massa composta de água com a massa do pó de cimento anidro usado na mesma mistura. Assim, tem-se uma proporção de água versus cimento.

A densidade úmida é a massa por unidade de volume do graute recém misturada. Para calcular esse valor inicie por um recipiente de volume conhecido com cimento fresco obtendo a massa do recipiente cheio. Subtraia deste volume a massa do recipiente vazio. Divida a massa restante (massa do cimento) pelo volume do recipiente para obter a densidade úmida. Existe uma relação teórica entre a proporção A:C e a densidade úmida conforme Hyett et al. (1992):

$$A:C = 0,757 \times \ln (\rho_g - 1,0) - 0,333 \quad (1)$$

Onde  $\rho_g$  é a densidade do graute fresco.

A relação de A:C é verificada através da coleta de amostras do graute fresco em cilindros de pvc com volume conhecido. Uma vez coletada, a amostra é pesada e sua relação A:C é definida com base na expressão proposta por Hyett et al. (1992).

Para validação da expressão 1, foi realizado em laboratório ensaios com razões A:C específicos. Sua massa foi obtida para se estimar a  $\rho_g$  e obter o resultado da relação A:C pela expressão 1. Através da Figura 4 abaixo, é visível a relação da expressão para o graute utilizada na MSG.

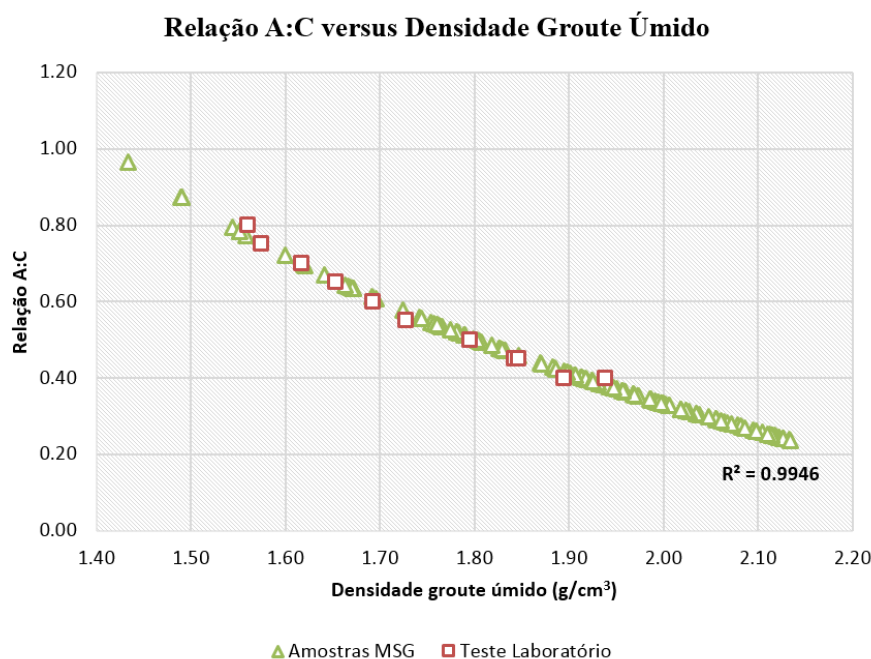


Figura 4: Curva densidade graute úmido x Relação razão água cimento

### 3.2 EFETIVIDADE DO SISTEMA DE CONTENÇÃO

Anualmente na Mineração Serra Grande são realizados cerca de 600 testes de arrancamento em tirantes, cavilhas e cabos. O teste consiste em aplicar uma força de tração nos cabos através de cilindro hidráulico até que haja o deslizamento ou rompimento do cabo. Os dados apresentados são resultados de testes realizados em cabos de comprimento de 0.5, 1.0 e 2.0m normalizados para cabos de 0.5m. Foram realizados um total de 316 testes, sendo 182 realizados em cabos planos sendo os demais em cabos modificados. Foi utilizado um conjunto de cilindro e bomba da Enerpac de alumínio com capacidade de 30t. Os cabos foram instalados principalmente em grafita xistos (encaixante do minério) com cerca 10 a 20% de quartzo, módulo de Elasticidade (E) de 40 Gpa e Ensaio Compressão Uniaxial (UCS) de 100 Mpa; e em metagrauvacas (hospedeira do minério) com cerca de 40% de quartzo, E de 45 Mpa e UCS de 125 MPa. Na figura 5 é possível identificar a melhoria dos resultados no decorrer de 2012 até 2016, devido principalmente a três fatores: utilização de um novo arranjo de cabos modificados; monitoramento da relação A:C do graute e treinamento da operação envolvidos no cabeamento.

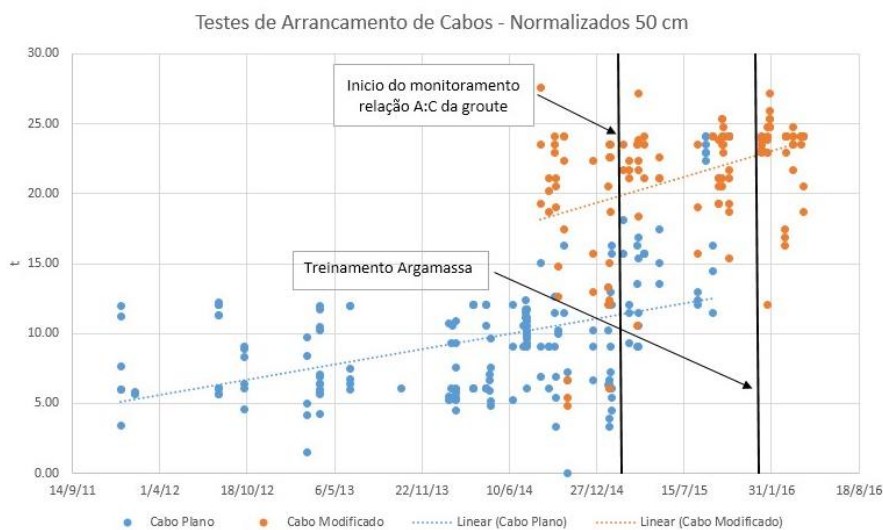


Figura 5: Teste de arrancamento em cabos planos e modificado

Através da Figura 5 é notória a melhoria da aderência dos cabos desde 2012, o que foi extremamente importante para permitir a extração do minério de forma sustentável. A melhoria mais significativa foi a adoção de um arranjo modificado no cabeamento permitindo o incremento de 70% na aderência. Com intuito de apresentar o sistema dos arranjos de cabo, a figura 6 representa o comportamento da argamassa em cabo simples e em cabo modificado.

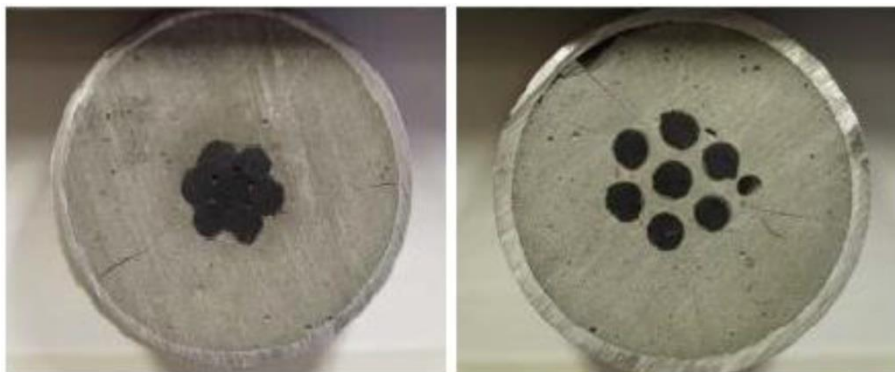


Figura 6: Seção cabo simples e cabo modificado em amostra de laboratório. Relatório interno da MSG elaborado pela MecRoc Engenharia [8].

A melhoria na qualidade do graute também foi muito importante para o processo de fortalecimento do maciço, visto que incrementou em cerca de 60% a aderência de cabos de arranjo plano e melhoria significativa na aderência do arranjo modificado.

### 3.3 DILUIÇÃO

Como é sabido, o cabeamento se comporta como um reforço do maciço rochoso e a diluição está relacionada com a dimensão das escavações, com a qualidade do maciço e com o layout das escavações. Podemos assim supor que a melhoria no sistema de cabeamento deve resultar numa melhoria (diminuição) da diluição. Segue abaixo a tabela 4 que exemplifica essa relação com base em levantamentos de dados no período da implantação do sistema de contenção.

Tabela 4: Levantamento de dados da diluição por realces de lavra utilizando cabos duplos

<b>Mina</b>	<b>Local</b>	<b>Data</b>	<b>Toneladas</b>	<b>Diluição</b>
Mina III	SL 204N	October	6 534	<b>3.20%</b>
Mina III	SL 114S	September	11 152	<b>7.00%</b>
Mina III	SL 722S	September	3 748	<b>2.00%</b>
Mina III	SL 154S	August	3 092	<b>6.10%</b>
Mina III	SL 204B	August	11 159	<b>3.70%</b>
Mina III	SL 204N	July	13 429	<b>3.90%</b>
Pequizeão	SL 268CS	October	5 324	<b>8.70%</b>

Devido aos resultados alcançados em 2014 ficou mais claro a relação de dependência entre qualidade do sistema de cabeamento e a diluição. Com os sistema de suporte implantado e as propostas de melhoria estabelecidas no projeto geraram bons resultados. Em junho de 2014 o acumulado era de 16.6% e meta de 15% de diluição operacional, alcançando em dezembro a diluição acumulada de 13.7%, conforme pode ser verificado na figura 7.



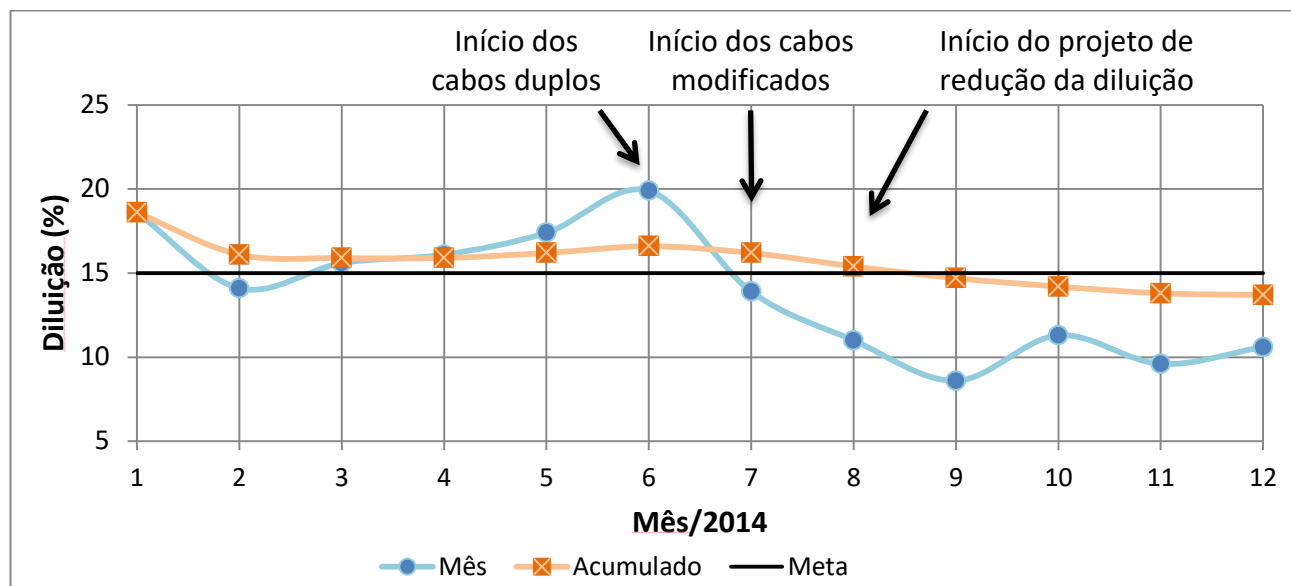


Figura 7: Diluição mensal dos stopes de lavra da Mineração Serra Grande

## 4. DISCUSSÕES

O cabeamento deve ser visto não somente como um reforço de um maciço, mas também como uma importante ferramenta no atingimento de metas de produção, como volume extraído, recuperação, diluição, sustentabilidade das operações e segurança de pessoas. Um bloco com potencial para desarticular sobre o minério pode esterilizar a região, causar um dano ao equipamento ou ainda aumentar a diluição.

A redução da diluição foi alcançada com o sistema de suporte mais eficiente ao utilizado anteriormente e acompanhamento dos indicadores de qualidade, a exemplo, relação A:C e teste de arrancamento. O projeto de redução da diluição possibilitou o entendimento de todo processo e assegurou que todos envolvidos estejam direcionados para mitigar a diluição.

## 5. AGRADECIMENTOS

A Mineração Serra Grande por permitir a publicação dos dados contidos nesse artigo em especial ao gerente de Geologia e Exploração Diogo Costa, Gerente Geral Ricardo de Assis; ao Gerente de Mineração Rodrigo Fideles pelo apoio na implantação das melhorias e a equipe de Mecânica das Rochas.

## 6. REFERÊNCIAS

- [1] BATISTA, G.A.P & CAMPOS, M.P., Metodologia Aplicada Para Dimensionamento De Realce Em Sublevel Open Stope Utilizando Análise De Estabilidade, XIV Simpósio de Geologia do Centro-Oeste, 2015.
- [2] HARIM, H. Choosing an underground mining method, Sec. 16 in Underground Mining Methods Handbook, ed. por W. A. Hustrulid, p. 362 – 363. New York: SME-AIME, 1982.
- [3] POTVIN, Y. Empirical open stope design in Canada. Ph.D. Thesis. The University of British Columbia p.350, 1988.
- [4] HUTCHINSON, D.J.; DIEDERICH, M.S. Cablebolting in Underground Mines. Richmond: Bitech Publishers Ltd, 1996
- [5] A.S.T.M. *Standard specification for uncoated seven-wire stress-relieved steel strand for prestressed concrete*. Standard # A 416-80, 1980
- [6] LIMA, T.C.A., Análise Técnica e Econômica para Utilização de Cabos Duplos em Realces de Sublevel na Mina Pequizeiro - Mineração Serra Grande, Crixás - GO. Dissertação (mestrado em Geotecnia) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2016
- [7] HYETT, A.J., A.L. COULSON & W.F. BAWDEN. Physical and mechanical properties of normal Portland cement pertaining to fully grouted cable bolts. Proc. Int. Symp. on Rock Support, Sudbury, 1992.
- [8] MECROC ENGENHARIA LTDA, Acompanhamento, Instrução e Análise Técnica da Operação de Cabeamento na Mineração Serra Grande. Informe Técnico Mineração Serra Grande - AngloGold Ashanti, 2016

**Author1:** Geólogo, Gustavo Batista

**Place of work:** AngloGold Ashanti

**E-mail address:** gabatista@anglogoldashanti.com.br

**Author2:** Mst. Geólogo, Marcelo Campos

**Place of work:** AngloGold Ashanti

**E-mail address:** mpcampos@anglogoldashanti.com.br