

Metodologia para Prever e Reduzir a Diluição Operacional em Realces Estreitos do Tipo Sublevel Stopping

Leandro Caio Barbosa Costa

AngloGold Ashanti, Santa Bárbara, Brasil, LCCosta@anglogoldashanti.com.br

Roberto Santos Lima

AngloGold Ashanti, Santa Bárbara, Brasil, RSLima@anglogoldashanti.com.br

Yulder Cardenas Vilca

AngloGold Ashanti, Santa Bárbara, Brasil, YCVilca@anglogoldashanti.com.br

Sandro Sander Chaves

AngloGold Ashanti, Santa Bárbara, Brasil, SSChaves@anglogoldashanti.com.br

Michele Márcia de Souza

AngloGold Ashanti, Santa Bárbara, Brasil, michellesouza88@hotmail.com

Letícia Cordeiro de Meneses

AngloGold Ashanti, Santa Bárbara, Brasil, LCMeneses@ag.ad.local

Priscila Aparecida Pessoa Machado

AngloGold Ashanti, Santa Bárbara, Brasil, PPMachado@anglogoldashanti.com.br

Jonathan David Rezende Correa

AngloGold Ashanti, Santa Bárbara, Brasil, JCorrea@anglogoldashanti.com.br

RESUMO: A diluição não planejada ou operacional é um índice de extrema relevância na economicidade de minas com veios estreitos, como é o caso da mina de ouro de Córrego do Sítio, de propriedade da AngloGold Ashanti. O seu aumento provoca um acréscimo considerável em custos de transporte e de tratamento, podendo inclusive inviabilizar a lavra de um determinado realce. Considerando as constantes flutuações na cotação do ouro, a eficiência no controle da diluição operacional se torna essencial para garantir uma margem operacional adequada. Deste modo, é essencial identificar o risco associado a esse fator nos planos de produção, assim como planejar estratégias para poder reduzi-lo. Diversos parâmetros geométricos e geomecânicos têm influência direta nos valores de diluição obtidos. Para estimar esse parâmetro em realces abertos usualmente adota-se o método do gráfico de estabilidade, porém esse método pode ter uma baixa confiabilidade para prever o valor de diluição em realces estreitos, uma vez que não leva em consideração outros fatores que são condicionantes para a variação desse indicador. A partir da avaliação da reconciliação, foram identificados diversos fatores que tem influenciado no valor da diluição não planejada. Com o intuito de verificar os parâmetros que tem maior influência nesse índice, foi criado um banco de dados, para que pudessem ser realizadas análises de correlação. Por meio de uma análise prévia dos *stopes* a serem executados é possível identificar os fatores de risco e assim definir ações específicas para cada realce de maneira a controlar a diluição operacional. A partir dessas análises, diversas ações foram realizadas ao longo de 2015 e assim foi possível uma redução da diluição operacional. O aumento da seletividade obtido contribuiu para os resultados

deste ano, assim como pode indicar uma oportunidade de viabilizar novas áreas de lavra devido à redução dos custos de transporte e tratamento de estéril.

PALAVRAS-CHAVE: Diluição Operacional, Lavra de Veios Estreitos, *Sublevel Stopping*, Seletividade, Mina Córrego do Sítio.

1 INTRODUÇÃO

A diluição não planejada ou operacional consiste na remoção de estéril que não estava contemplada nos limites do realce planejado, conforme apresentado na Figura 1. O seu aumento acarreta um acréscimo nos custos de transporte, tratamento do minério e deposição do rejeito, podendo inviabilizar algumas áreas de lavra. Uma pesquisa realizada em 1988, em minas subterrâneas do Canadá, indicou que a diluição elevada de minério foi a principal responsável pelo fechamento de minas (Pakalnis et al., 1995).

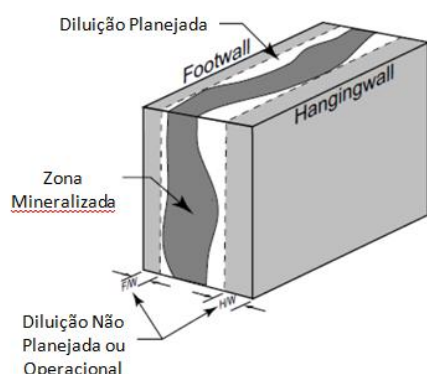


Figura 1. Definição de Diluição Planejada e Operacional.

A diluição também é fonte de custos indiretos, pois pode reduzir a recuperação do metal de interesse, o teor do concentrado e sobrecarregar a planta de processamento, que tem capacidade limitada (Villaescusa, 2014).

A medida que ocorreram desenvolvimentos tecnológicos nos equipamentos de perfuração, tem-se optado por realizar perfurações mais longas em realces do tipo *sublevel stopping* e esse tem sido, portanto, um desafio cada vez mais constante nas operações com essas particularidades (Stewart, 2005).

Apesar de serem bem conhecidos os impactos decorrentes da diluição não planejada de minério, não existe um nível que seja

considerado aceitável para este parâmetro. A depender do teor da substância útil contida no minério e do preço da *commodity*, valores distintos podem ser definidos para cada operação. Caso o teor e o preço da *commodity* de interesse sejam elevados, valores mais altos de diluição podem ser considerados aceitáveis (Charbel, 2015).

Deste modo, conhecer os riscos associados a esse fator e definir ações para mitigar a diluição operacional é essencial para que se tenha confiabilidade nos planos de produção de uma mina, assim como para garantir a sustentabilidade e uma margem operacional adequada em uma mina de veios estreitos.

O gráfico de estabilidade é uma metodologia usualmente utilizada para estimar os riscos associados à diluição. A versão atual do método, baseado na análise de mais de 350 casos históricos coletados em minas subterrâneas do Canadá, considera os fatores chave que influenciam o projeto de realces abertos. Informações sobre a resistência da rocha e presença de estruturas, a tensão ao redor da abertura e o tamanho, formato e orientação da escavação são utilizados para determinar se o realce será estável sem suporte, estável com suporte ou instável, mesmo que suportado (Hoek, Kaiser, & Bawden, 1995). A Figura 2 apresenta o gráfico de estabilidade, onde são indicados estes limites de estabilidade.

De acordo com Villaescusa (2014), o gráfico de estabilidade pode não consistir em uma metodologia de projeto ótima, mas sim em um ponto de partida para cada ambiente geotécnico específico. Em algumas situações particulares, parâmetros locais, que podem não ser considerados por essa metodologia, condicionam a instabilidade dos realces. A mina de Olympic Dam exemplifica uma situação onde não é observada uma correlação entre a estabilidade dos realces e o gráfico de estabilidade (Figura 3), sugerindo que um

parâmetro local, que não é bem considerado por essa metodologia, controla a estabilidade das paredes dos realces (Villaescusa, 2014).

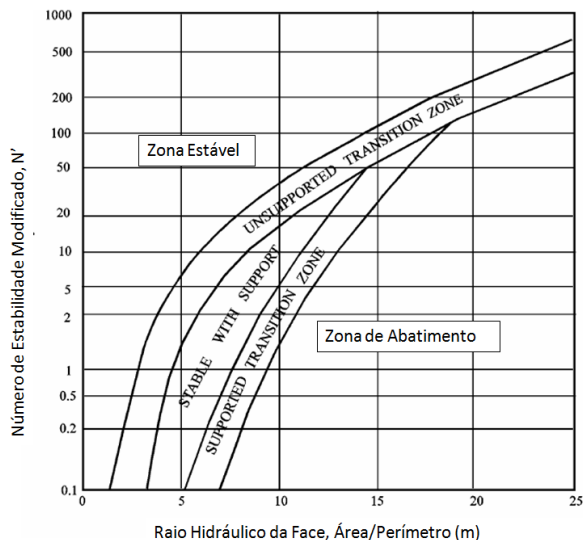


Figura 2. Gráfico de estabilidade mostrando os limites de estabilidade, de abatimento e de realce que necessita de suporte. Após Potvin (1988) e modificado por Nickson (1992).

Portanto, pretende-se utilizar um banco de dados constituído na mina Córrego do Sítio com os principais parâmetros que tem impactado a diluição operacional e quantificar por meio de análises de correlação qual a influência de cada um deles na variação desse índice, de maneira a ter uma estimativa mais assertiva dessa variável. Considerar os riscos associados à diluição é essencial para que se tenham planos de produção mais confiáveis assim como para que sejam executadas medidas de controle de maneira a minimizá-la.

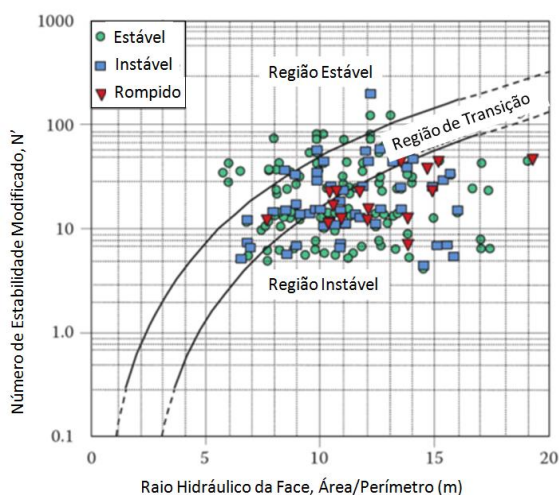


Figura 3. Gráfico de estabilidade para realces não suportados na mina de Olympic Dam. Modificado de Villaescusa, 2014

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Área de Estudo

Sendo de propriedade da AngloGold Ashanti, a mina de ouro de Córrego do Sítio – Portaria I, se situa próximo à cidade de Santa Bárbara e a aproximadamente 120 km da cidade de Belo Horizonte (Figura 4).

O método de lavra aplicado em Córrego do Sítio I é o *sublevel stopping* (realces por subníveis). Um painel de lavra é composto por subníveis consecutivos e por pilares horizontais (*sill pillars*) na base e no topo do painel. São também definidos pilares verticais (*rib pillars*) entre os stopes quebrando a continuidade da lavra ao longo da direção do corpo mineralizado. A Figura 5 (Vieira & Barbosa, 2009) exemplifica uma configuração típica do método de lavra aplicado em Córrego do Sítio.

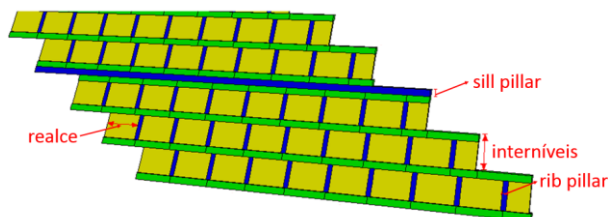


Figura 5. Configuração típica da lavra pelo método *sublevel stopping* executada na mina Córrego do Sítio. Modificado de Vieira & Barbosa, 2009

2.1.3 Reconciliação

A reconciliação consiste na comparação entre uma estimativa de massa e teor obtidas utilizando uma escavação planejada e um modelo de blocos, com uma medida executada por levantamentos topográficos ou a partir da produção indicada pela planta de processamento.

De acordo com Morley (2003) a reconciliação tem como objetivo medir a performance da operação, validar as estimativas de recursos e reservas minerais e fornecer indicadores chaves de desempenho.

Na mina Córrego do Sítio, a reconciliação é executada comparando o levantamento topográfico por meio de um CMS (*Cavity Monitoring System*) com o modelo de reserva, conforme apresentado na Figura 6. Como pode-se observar, a diluição é definida como a razão entre a massa escavada que encontra-se fora do planejado e do modelo de recurso dividida pela massa que era planejada e que realmente foi escavada (recuperado). A meta atualmente adotada para a diluição operacional na mina Córrego do Sítio é de 20%.

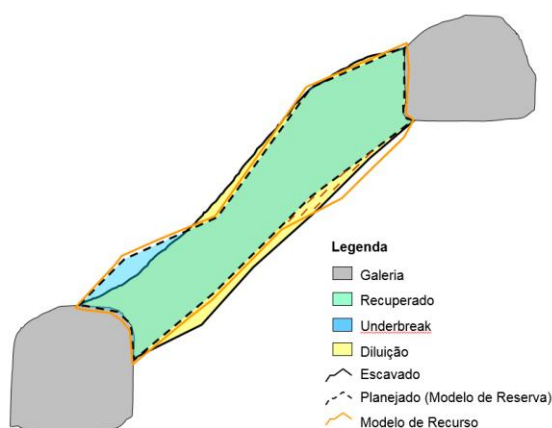


Figura 6. Perfil esquemático da reconciliação executada pela equipe de geologia

São realizadas pela equipe de geologia de mina reuniões semanais com a participação das equipes de planejamento, operação de mina e mecânica de rochas, para avaliar os resultados das reconciliações, onde são identificadas as possíveis causas das anomalias e definidas ações para poder evitá-las.

2.2 Custo da Diluição

A diluição operacional consiste na massa de estéril não planejada contida no material extraído, trazendo como consequência uma redução no teor médio lavrado e custos adicionais desnecessários.

Dentre os gastos adicionais relativos à diluição não planejada podemos citar: custo variável de transporte (carregadeiras e caminhões), custo variável de planta de processamento e maior demanda para disposição de rejeito. A Tabela 1 apresenta uma estimativa do custo da diluição operacional da

mina Córrego do Sítio, sendo este obtido somando os custos variáveis de tratamento, de transporte da mina até o pátio de estocagem e do pátio de estocagem até a planta. O custo por tonelada diluída ficou em US\$38,44 e o custo anual de 1% de diluição não planejada foi de aproximadamente US\$87.000,00, considerando uma produção anual de lavra de 272.302 toneladas, que foi a massa planejada para o ano de 2016.

Tabela 1. Estimativa do custo anual de 1% de diluição não planejada.

Parâmetros	Custo
Custo variável de tratamento (US\$/ton)	31,00
Custo variável de transporte mina - pátio (US\$/ton)	6,31
Custo variável de transporte pátio - planta (US\$/ton)	1,13
Custo de 1t de diluição (US\$)	38,44
Produção anual média de lavra (ton)	272.302
Produção anual média de lavra sem a diluição operacional (ton)	226.918
Custo anual de 1% de diluição (US\$)	87.227,28

2.3 Banco de Dados

Como ponto de partida, foi criado um banco de dados de realces para dar subsídio à construção de um gráfico de estabilidade específico para a mina Córrego do Sítio, de maneira a se ter uma estimativa inicial da diluição.

Para cada um dos realces estudados foi obtido o número de estabilidade, utilizando informações do mapeamento geotécnico, e o raio hidráulico do *hanging wall* e foi plotado no gráfico de estabilidade de Nickson (1992).

Foram utilizados 35 casos de realces cabeados que foram plotados no gráfico para realces com cabeamento (Figura 7). Outros 22 realces sem cabeamento foram plotados no gráfico para realces sem cabeamento (Figura 8). Foram considerados como estáveis os realces com diluição inferior a 15%, como instáveis os com diluição acima de 20% e como pertencentes à zona de transição os que obtiveram uma diluição entre 15 e 20%.

Como pode-se observar, não foi observada uma correlação clara entre os limites de

estabilidade e os valores obtidos de diluição. Possivelmente porque outras variáveis que não são contempladas no gráfico de estabilidade possam ter uma influência considerável nos valores obtidos. Como no banco de dados utilizado por Nickson (1992), existem poucos registros de lavras estreitas, outras variáveis que controlam a instabilidade nesses realces podem ter uma influência maior do que os parâmetros utilizados no método do gráfico de estabilidade.

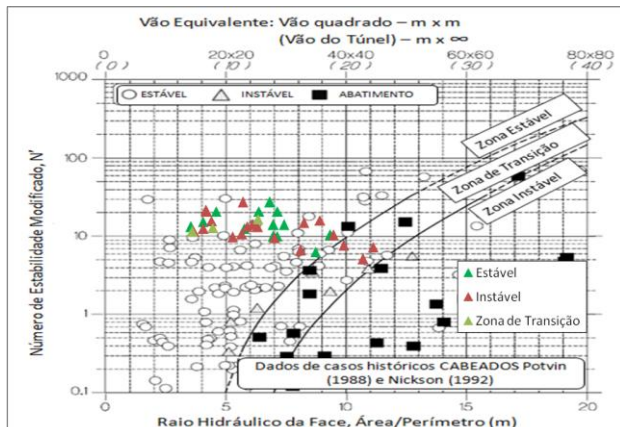


Figura 7. Realces cabeados da mina Córrego do Sítio plotados no gráfico de estabilidade para realces com cabeamento
Modificado de Hutchinson & Diederichs, 1996

Com o intuito de se obter uma correlação que fosse mais assertiva para estimar a diluição operacional, foi criado um banco de dados com variáveis adicionais, que de acordo com as análises das reconciliações e as observações de campo, aparentam ter uma influência substancial na variação desse índice.

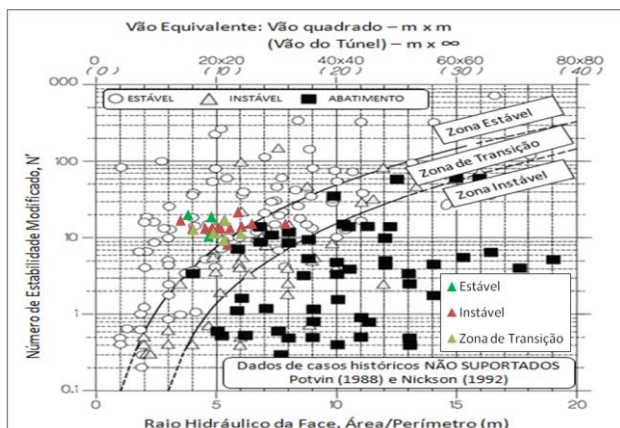


Figura 8. Realces não cabeados da mina Córrego do Sítio plotados no gráfico de estabilidade para realces sem cabeamento

Modificado de Hutchinson & Diederichs, 1996

Nesse banco de dados foram inseridos além dos parâmetros tradicionais utilizados no gráfico de estabilidade, outros parâmetros como a largura média da galeria de desenvolvimento, a espessura média do realce, a classificação Q (Barton *et al*, 1974) e RMR (Bieniaswski, 1989), parâmetros referentes ao plano de fogo, dentre outros.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Análise do Banco de Dados

Nesta nova análise com variáveis adicionais foram utilizados 23 casos de realces. Após simular diversas combinações destes parâmetros, a melhor regressão linear encontrada foi com a razão entre a largura da galeria (L_g) e a espessura do realce planejado (E_r), que são apresentados esquematicamente na Figura 9. O resultado da regressão pode ser visto na Figura 10 e os coeficientes obtidos são mostrados na equação 1.

$$\text{Diluição Operacional} = 14,64 \times (L_g/E_r) - 3,77 \quad (1)$$

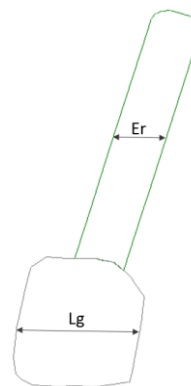


Figura 9. Realces não cabeados da mina Córrego do Sítio plotados no gráfico de estabilidade para realces sem cabeamento

O coeficiente de determinação (R^2) obtido de 0,307 indica que aproximadamente 31% da variação na diluição não planejada é descrita pela variação na razão entre a largura da galeria pela espessura do realce. Mesmo sendo este um valor baixo, já que 69% da variação da variável dependente não é descrita pela variável independente, esta regressão será útil, pois trata-se de uma estimativa melhor do que uma

simples média aritmética do histórico de diluição operacional.

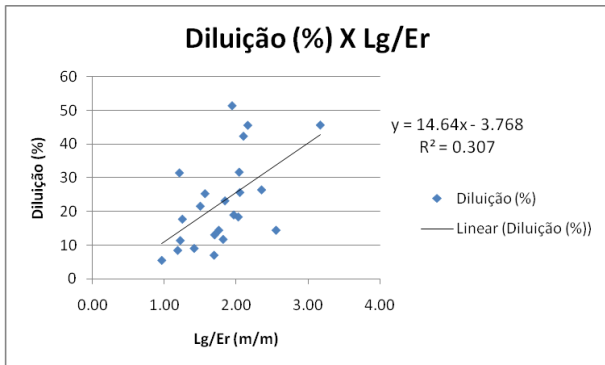


Figura 10. Regressão linear entre a razão entre a largura da galeria e a espessura do realce e a diluição operacional.

Sabe-se que outros fatores de risco também podem aumentar a probabilidade de ocorrência de uma diluição elevada, como estruturas geológicas críticas ou um posicionamento inadequado do minério. Baseado na experiência prática em realces similares, esses demais fatores também devem ser considerados no momento de realizar uma análise de risco referente à diluição operacional.

3.2 Ações para Reduzir a Diluição

As principais ações realizadas para reduzir a diluição não planejada são descritas de maneira simplificada a seguir:

- Posicionamento otimizado dos pilares verticais (*rib pillars*);
- Posicionamento dos pontos de carga preferencialmente no *foot wall*;
- Análise de risco de diluição para cada realce do mês em questão;
- Mapeamento geotécnico detalhado de cada realce, obtendo-se a classificação do maciço rochoso, assim como levantando as principais estruturas geológicas singulares;
- Realização de um projeto de cabos específico para cada stope, levando em consideração os dados do mapeamento geotécnico, assim como o projeto de perfuração;
- Projeto de leques privilegiando furos paralelos em relação a furos em formato

de leque;

- Checagem periódica em campo da relação água:cimento utilizada na injeção do cabeamento;

A primeira etapa realizada na mina Córrego do Sítio para mitigar o risco de uma elevada diluição consiste no posicionamento dos pontos de carga no *foot wall* da galeria de minério. Pontos de carga no *hanging wall* ocasionaram diversas rupturas em realces de Córrego do Sítio devido ao acréscimo da zona de alívio de tensões no mesmo, assim como pela perda da base de sustentação da laje de rocha potencialmente instável.

O posicionamento dos *rib pillars* também é essencial para garantir uma lavra seletiva. Estes devem ser posicionados nos trechos com maior potencial de desarticulação, que podem ser desde pequenas travessas cruzando a galeria de minério assim como locais com estruturas geológicas de baixa qualidade sub-paralelas ao realce. A Figura 11 apresenta um exemplo desse dimensionamento de pilares.

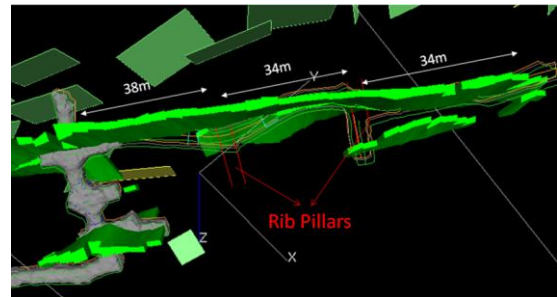


Figura 11. Posicionamento otimizado dos *rib pillars*, que são indicados pelas linhas vermelhas, de maneira a reduzir os pontos de desarticulação.

A segunda fase consiste em realizar uma análise de risco prévia dos realces planejados para determinado mês, indicando quais são os realces mais críticos, e que necessitam, portanto, de alguma ação específica.

A análise de risco é realizada inicialmente inserindo a largura da galeria e a espessura do realce planejado na equação 1 para estimar a diluição não planejada. Caso o valor estimado esteja acima da meta de Córrego do Sítio que é de 20%, este realce é considerado crítico.

Adicionalmente, é verificado se existem outros fatores de risco em cada um dos realces que possam condicionar uma elevada diluição

ou desarticulação, como um posicionamento inadequado da galeria em relação ao corpo de minério ou a presença de estruturas geológicas (contatos, falhas, fraturas ou venulações) com uma posição e orientação consideradas críticas. Caso algum destes outros fatores seja observado, podem ser realizados ajustes no valor da diluição estimada.

Após realizar todas essas etapas é apresentado juntamente com o plano mensal de produção da mina o risco de diluição de cada um dos realces planejados para o mês (Tabela 2). O valor de diluição operacional estimado deve ser utilizado para o cálculo do teor dos realces.

Tabela 2. Exemplo (valores fictícios) de um plano de produção com os valores estimados de diluição operacional.

Mina	Stope	Série	Massa (Ton)	Diluição Operacional Estimada
CB	512/532	102S	2000	40%
CV	628/648	330S	3000	30%
CB	739	200S	4000	25%
LJ	560/580	300S	5000	20%
CB	464/484	211N	1500	15%
LJ	580/560	110N	1500	25%
CV	607	330S	3600	15%
LJ	560/580	300N	7000	10%
LJ	620/600	110S	70	15%
CV	607	330N	3300	10%
Total			30970	19%

Com essa avaliação concluída é possível definir ações específicas para cada local. Dentre as medidas possíveis podemos citar: adequações no projeto de leques e/ou planos de fogo que danifiquem menos o maciço rochoso.

Os projetos de leque devem priorizar sempre furos paralelos, de maneira a garantir uma distribuição de carga de explosivos mais constante.

Posteriormente, para cada realce a ser lavrado é realizado um mapeamento geotécnico detalhado, obtendo-se a classificação do maciço rochoso segundo os sistemas Q e RMR,

levantamento estrutural das principais famílias de descontinuidade e elaboração de modelos das principais estruturas singulares observadas.

Após a realização do mapeamento, é realizada o projeto dos cabos para conter a diluição. O dimensionamento dos cabos é iniciado pela obtenção do bloco potencialmente instável. No caso de Córrego do Sítio, onde a mineralização está inserida em rochas metamórficas e, consequentemente, anisotrópicas, são observadas rupturas com o formato de lajes delimitadas pela foliação principal e/ou alguma outra estrutura singular sub-paralela com a foliação. Os cabos são então simulados e é considerada a contribuição de cada um deles para suportar este bloco. Atualmente, o projeto é realizado de maneira a obter um fator de segurança mínimo de 1,3. A Figura 12 representa as estruturas mapeadas ao longo da galeria de minério, assim como a simulação do cabeamento.

Adicionalmente, foram realizados acompanhamentos em campo da execução do cabeamento para garantir que as melhores práticas estavam sendo seguidas. Dentre as quais, pode-se ressaltar o controle da proporção água:cimento, com o intuito de maximizar a resistência da argamassa.

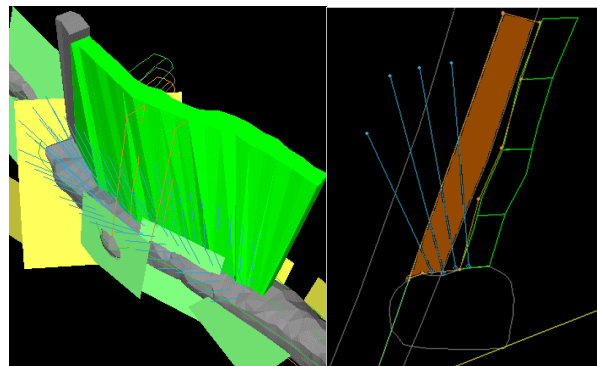


Figura 12. Projeto de cabos específico para determinado realce, considerando o modelo de reserva, assim como estruturas geológicas mapeadas. O bloco potencialmente instável é indicado pela cor laranja, a escavação do realce pela cor verde e os cabos pelas linhas azuis.

4 CONCLUSÕES

A diluição não planejada tem um impacto

considerável nos custos de transporte, processamento do minério e na disposição de rejeitos. Portanto, a identificação dos riscos associados a esse fator é essencial para que se tenha um plano de produção confiável. Medidas para mitigar a diluição operacional também são essenciais para garantir uma margem operacional otimizada.

Nesse contexto, a metodologia apresentada

para prever e reduzir a diluição operacional por meio de uma análise de risco prévia, seguida de uma proposição de ações, se mostrou efetiva, pois foi implantada em Junho de 2015 e promoveu uma redução na diluição não planejada de um patamar de 27% no primeiro semestre de 2015 para 14% no segundo (Figura 12).

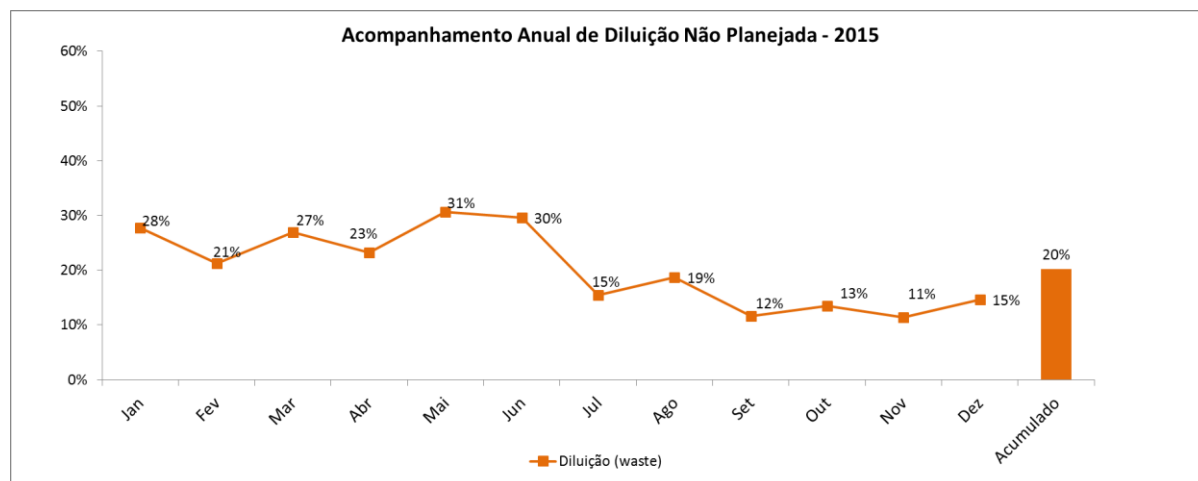


Figura 12. Resultado mensal da diluição não planejada ao longo de 2015

AGRADECIMENTOS

O trabalho apresentado não seria possível caso não fosse o esforço conjunto das áreas de mecânica de rochas, planejamento, operação e geologia de mina. Portanto, agradecemos a todos da AngloGold Ashanti que contribuíram direta ou indiretamente com este projeto. Gostaríamos de ressaltar também o apoio dado pela gerência de mineração e gerência geral de operações, que acreditaram e incentivaram a realização deste estudo.

REFERÊNCIAS

- Barton, N. R. (1974). A review of the shear strength of filled discontinuities in rock. *Norwegian Geotech. Inst. Publ. No. 105*. Oslo: Norwegian Geotech. Inst.
- Bieniawski Z.T., 1989, Engineering rock mass classifications. *John Wiley & Sons*, New York, 251 pages.
- Charbel, P. A. (2015). Gerenciamento de Risco Aplicado à Diluição de Minério - *Tese de Doutorado em Geotecnia*. Brasília: Universidade de Brasília - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.
- Hoek, E., Kaiser, P., & Bawden, W. (1995). *Support of underground excavations in hard rock*. Rotterdam: A.A.Balkema.
- Hutchinson, D. J., & Diederichs, M. S. (1996). *Cablebolting in Underground Mines*. Richmond, British Columbia: BiTech Publishers Ltd.
- Morley, C. (3-5 de Novembro de 2003). *Beyond Reconciliation - A Proactive Approach to Using Mining Data*. Fifth Large Open Pit Mining Conference, pp. 185-192.
- Nickson, S. (1992). Cable support guidelines for underground hard rock mine operations. M.A.Sc Thesis, Dept. Mining and Mineral Processing, University of British Columbia, 223.
- Pakalnis, R., R., P., & Hadjiogeorgiou, J. (1995). *Quantifying the cost of dilution in underground mines*. SME Annual Meeting - Denver, CO, pp. 1136-1141.
- Potvin, Y. (1988). Empirical open stope design in Canada. *Ph.D. Thesis, Dept. Mining and Mineral Processing, University of British Columbia*, 343 p.
- Stewart, P. C. (2005). Minimising Dilution in Narrow-Vein Mines - *Tese de Doutorado*. Universidade de Queensland.
- Vieira, F., & Barbosa, K. (2009). *Avaliação Geotécnica das Variantes do Sublevel Stopping para o Projeto Sulfetado da Mina Córrego do Sítio*. Nova Lima: Centro Técnico Operacional e Projetos (CTOP) - AngloGold Ashanti Mineração Ltda.
- Villaescusa, E. (2014). *Geotechnical Design for Sublevel Open Stopping*. Boca Raton, Flórida: CRC Press.