

Corrosão dos Swellex na Mina Lamego

David Ribeiro Lima

Anglogold Ashanti Brasil Córrego do Sítio Mineração Ltda, Sabará, Brasil,
drlima@anglogoldashanti.com.br

RESUMO: O tempo de vida útil de reforços temporários é um parâmetro que deve ser considerado em projetos de mineração subterrânea, porém, no Brasil a estimativa do prazo é feita de maneira imprecisa e não considera as condições ambientais do local onde o reforço é instalado. A Mina Lamego teve o início de suas atividades considerando um tempo de vida útil curto, utilizando o swellex como reforço. A geologia complexa do depósito exigiu novo aporte de informações após o início da lavra, revelando uma longevidade maior do que a prevista. Surgiu então o passivo de um desenvolvimento realizado com reforço temporário. O presente trabalho visa determinar o tempo de vida útil do swellex correlacionando o ambiente subterrâneo da Mina Lamego com o das minas australianas para aplicar o sistema de classificação da corrosão estabelecidos por Villaescusa *et al* (2007) e verificar os valores empíricos com os resultados dos testes de tração realizados em swellex de diferentes idades. Como o depósito aurífero da Mina Lamego contém minerais de sulfeto, é possível que o processo destrutivo do metal ocorra de maneira localizada e com intensidades variáveis. Mediante os resultados obtidos são feitas as seguintes conclusões: o ambiente subterrâneo da Mina Lamego é similar ao australiano e permite a aplicação do mesmo sistema de classificação da corrosão; o swellex não deve ser utilizado em locais com umidade e em locais secos deve ser monitorado com frequência.

PALAVRAS-CHAVE: Swellex, Tempo de vida útil, Corrosão, Testes de tração.

1 INTRODUÇÃO

A Mina Lamego, localizada na porção sudeste do município de Sabará-MG (vide figura 1), teve o início de sua lavra em 2009, com um tempo de vida útil previsto para 2019.

A rampa exploratória visando o corpo Carruagem, responsável pela maioria da produção, foi desenvolvida a partir de 2004, utilizando swellex como reforço, com o objetivo de diminuir o tempo de aquisição de dados geológicos para viabilizar a operação da mina. Após o início da lavra, o modelo geológico da mina passou por diversas reinterpretações que promoveram graduais aumentos no tempo de vida útil do empreendimento, sendo atualmente estimado em 2026. Em Setembro de 2015 teve início o uso de tirantes com resina no desenvolvimento de aberturas permanentes da Mina Lamego.

Existe o passivo de onze anos de aplicação de reforço temporário nas escavações. Os riscos

envolvidos são gerenciados com testes de tração por amostragem nos locais visualmente identificados como críticos devido à ação da corrosão.



Figura 1. Localização da Mina Lamego.

O tempo de vida útil do swellex depende das características que controlam a corrosão no ambiente onde o reforço é instalado. Estimativas ou valores médios desse parâmetro podem ser imprecisas quando um mesmo valor é aplicado para ambientes variados.

O estudo da corrosão da contenção no ambiente de mina subterrâneo, realizado por Villaescusa *et al* (2007) numa parceria entre o governo, universidades e as empresas de mineração, propôs um sistema de classificação da corrosão através da medição do grau de corrosão em campo e em câmaras de simulação do ambiente subterrâneo.

O objetivo desse trabalho é utilizar a classificação proposta por Villaescusa *et al* (2007) para estimar o tempo de vida útil dos swellex aplicados na Mina Lamego, comparando a corrosão classificada com os resultados dos testes de tração realizados em swellex com diferentes idades e ambientes de instalação, dentro da Mina Lamego.

2 CORROSÃO E O AMBIENTE SUBTERRÂNEO

A corrosão pode ser definida como “o resultado destrutivo de uma reação química entre um metal ou liga metálica e o ambiente” (Jones, 1996) e é causada pela instabilidade química dos metais nas suas formas refinadas (CISA 1994). O processo de corrosão eletroquímica que ocorre nos metais em temperatura ambiente envolve a transferência de carga eletrônica em solução aquosa, pode ser descrito como uma célula eletroquímica. Há quatro componentes básicos de uma célula eletroquímica: anodo, catodo, solução condutora e uma conexão condutora entre o anodo e o catodo. A corrosão acontece somente se um eletrólito comum cobrir os dois eletrodos (anodo e catodo) e eles precisam estar em contato elétrico, geralmente contato físico direto. Também é necessário haver diferença de potencial suficiente entre os eletrodos para provocar fluxo de corrente elétrica (modificado de CISA 1994).

No ambiente das minas subterrâneas a solução condutora será sempre a água, cuja intensidade varia significativamente, dependendo de sua ocorrência no maciço

rochoso e na atmosfera. Dessa forma, é necessário separar a corrosão pela água subterrânea daquela pela umidade do ar (corrosão atmosférica).

3 PARÂMETROS INFLUENTES NA CORROSÃO

As propriedades do material e o ambiente com o qual se relaciona controlam o grau de corrosão. As condições ambientais nas minas subterrâneas não são sempre homogêneas e estão em constante mudança. A classificação desses ambientes pode ser feita apenas por aproximações que precisam ser revisadas continuamente. Existem três aspectos ambientais que afetam a corrosão da contenção nas minas subterrâneas: atmosfera, água subterrânea e o maciço rochoso.

3.1 Variáveis atmosféricas

Corrosão atmosférica é aquela que acontece com os materiais expostos ao ar e seus poluentes e tem sido responsável pela maioria dos custos envolvendo falha dos materiais sob seu efeito (Roberge, 2000).

Umidade é essencial para corrosão atmosférica, uma vez que, junto da temperatura, controla a condensação de água na superfície do metal (vide figuras 2 e 3).

A tabela 1 apresenta os intervalos de temperatura e umidade relativa do ar para as minas australizadas estudadas e para a Mina Lamego.

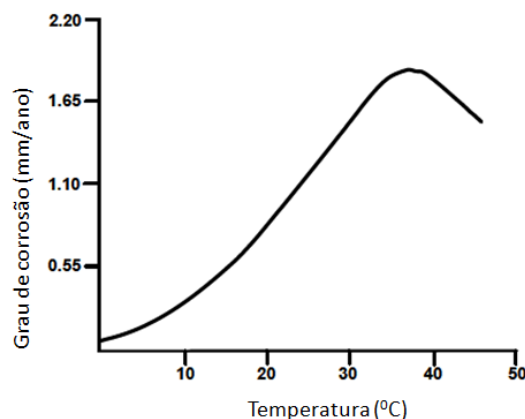


Figura 2. Influência da temperatura na corrosão atmosférica (Roberge, 2000).

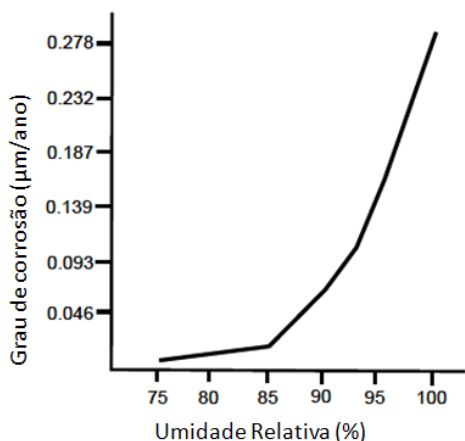


Figura 3. Influência da umidade na corrosão atmosférica (Roberge, 2000).

Tabela 1. Temperatura e umidade relativa do ar nas minas australianas estudadas por Villaescusa *et al* (2007) e na Mina Lamago.

Local	Temp. (°C)	Umidade relativa do ar (%)
Áustralia	15 - 45	44 - 95
Mina Lamago	19 - 21,5	63 - 83

3.2 Variáveis de água subterrânea

A água subterrânea está presente em quase todas as minas. Os elementos afetados pela água geralmente não estão submersos, mas estão localizados na interface entre a água e a atmosfera. Nesses locais os graus de corrosão são maiores do que aqueles onde o metal está totalmente submerso. A corrosividade das águas frescas ou salinas, não é controlada apenas por uma variável, mas por diversos parâmetros correlacionados. É necessário oxigênio dissolvido água para ocorrer corrosão em águas neutras e alcalinas. Dessa forma, quaisquer fatores que afetem a quantidade de oxigênio dissolvido vão afetar a corrosão do aço (Jones, 1996). O grau de corrosão do ferro e do aço em águas aeradas sob temperatura e salinidade constantes é função direta do oxigênio dissolvido como mostra a figura 4.

A tabela 2 apresenta as variações de oxigênio dissolvido medidas nas minas australianas e na Mina Lamago.

A concentração dos íons principais influencia a condutividade elétrica da água. A salinidade total em geral é referida como os sólidos totais dissolvidos (STD), sendo expressa em partes por milhão (ppm). A alta condutividade das águas salinas significa que grandes áreas de superfície catódica exposta estão disponíveis para relativamente pequenas áreas anódicas nas quais ocorre corrosão intensa. Quanto maior a salinidade da água, mais prontamente os íons de cloreto iniciam a corrosão localizada (modificado de Heidersbach, 1990). A tabela 2 mostra as concentrações de STD para as minas australianas e para a Mina Lamago.

O controle que o pH exerce na corrosividade de um sistema depende do grau de solubilidade dos produtos de corrosão formados na superfície do metal. Em condições normais o grau de corrosão do aço é independente dos valores de pH entre 4 e 10, conforme mostrado na figura 5. Com o pH abaixo de 4 o óxido é solúvel e a corrosão aumenta devido à disponibilidade de íons H^+ . Com o pH acima de 10 o grau de corrosão é baixo porque forma-se uma película passiva de óxido ferroso na superfície do metal.

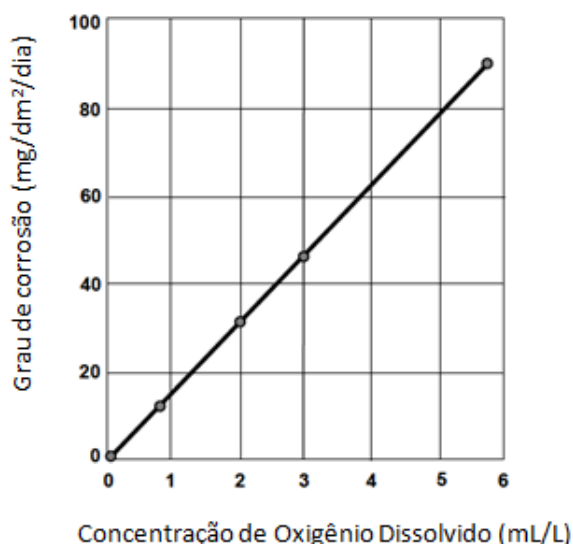


Figura 4. Grau de corrosão em função da concentração de oxigênio dissolvido sob temperatura e salinidade constantes (Uhlig & Revie, 1985).

Tabela 2. Concentração de oxigênio dissolvido e sólidos totais dissolvidos nas minas australianas estudadas por Villaescusa *et al* (2007) e na Mina Lamego.

Local	Concentração de oxigênio dissolvido (mg/L)	STD (mg/L)
Minas australianas	0,2 – 7,65	2790 – 130700
Mina Lamego	2,5	<50

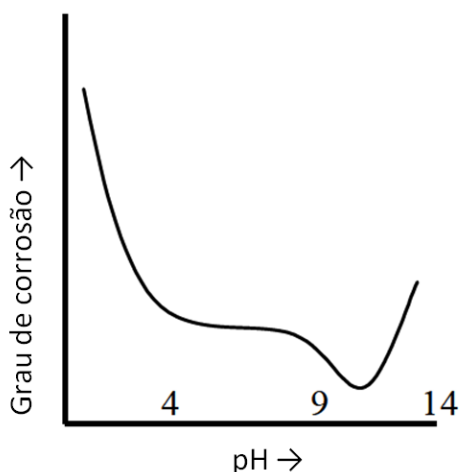


Figura 5. Efeito do pH no grau de corrosão (CISA, 1994).

Nas minas australianas a variação de pH medida foi de 4,25 a 8,9 e na Mina Lamego de 6,6 a 8,2.

O maciço rochoso é o material no qual o reforço é instalado e influencia indiretamente o potencial corrosivo do ambiente da mina. Estruturas do maciço rochoso funcionam como condutos para o fluxo de água. A extensão da área afetada pela água é aumentada pela presença de estruturas geológicas dilatadas (juntas) interconectadas, permitindo que a água seja dispersada por distâncias significativas da fonte. As juntas podem ser abertas durante a excavação inicial ou posteriormente, devido às detonações ou mudanças no estado de tensões. A mineralogia dos diferentes maciços rochosos não influencia o potencial de corrosão de um ambiente. A maioria dos minerais é geralmente inerte e não reforça o processo de corrosão. As exceções são os minerais de sulfeto que oxidam produzindo condições ácidas localizadas quando expostos ao ar e à água. A reação de oxidação pode ainda criar uma célula de

corrosão eletroquímica com o reforço, acelerando o processo. Essas ocorrências são específicas de águas onde o conteúdo de sulfetos do maciço rochoso é elevado.

4 CLASSIFICAÇÃO DA CORROSÃO

No trabalho realizado por Villaescusa *et al* (2007), o grau de corrosão em oito minas do oeste australiano foi determinado através da instalação de cupons de corrosão em diversos locais das aberturas subterrâneas e em câmaras que simularam o ambiente da mina estudada.

Os resultados obtidos foram comparados com diversos sistemas de classificação da corrosão utilizados por outros ramos da indústria, incluindo aqueles que separam a corrosão causada pela água da corrosão atmosférica. Não foram encontradas correlações plausíveis, pois os sistemas disponíveis foram desenvolvidos para o ambiente urbano e industrial e consideram diversos parâmetros que não são significativos nas minas subterrâneas. Dessa forma, Villaescusa *et al* (2007), propuseram um sistema de classificação que considera a intensidade da água subterrânea, o teor de oxigênio dissolvido na água e o grau de umidade do ar (vide tabela 3 e figura 6), fatores que mostraram influência significativa na variação dos graus de corrosão obtidos em campo e nas câmaras de corrosão.

A similaridade entre os parâmetros atmosféricos e de água subterrânea entre os dois ambientes subterrâneos (australiano e Lamego) permite a aplicação do sistema de classificação desenvolvido por Villaescusa *et al* (2007) na Mina Lamego. A ressalva nessa abordagem é a diferença significativa da concentração de STD, devendo-se principalmente à diferença nos mecanismos de abastecimento dos lençóis freáticos. Na Austrália há uma forte contribuição de paleocanais em ambiente desértico, promovendo a percolação de águas com teores elevados de sais para o aquífero, enquanto na Mina Lamego a principal contribuição é pluvial. Porém, aplicar a classificação desenvolvida para salinidade maior num ambiente com salinidade menor é uma postura conservadora e pode guiar os projetos de mina e planos de ação de reposição

de reforços oxidados de maneira a antecipar problemas ligados à falha no sistema de reforço.

Tabela 3. Classificação da corrosão atmosférica nas minas subterrâneas da Austrália (Villaescusa *et al*, 2007).

Umidade relativa do ar (%)	< 60	60 – 90	> 90
Grau de corrosão do aço (mm/ano)	< 0,002	0,002 – 0,010	0,010 – 0,020
Grau de corrosão do zinco (µm/ano)	< 0,100	0,100 – 0,350	0,350 – 0,700

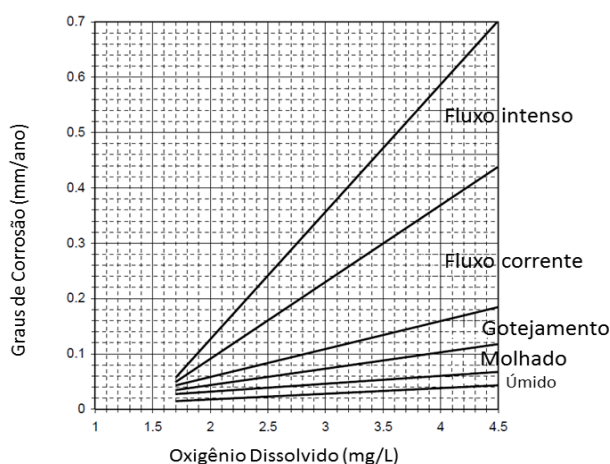


Figura 6. Classificação da corrosão da água nas minas subterrâneas da Austrália (Villaescusa *et al*, 2007).

5 TESTES DE TRAÇÃO EM SWELLEX NA MINA LAMEGO

Na Mina Lamego, os testes de tração em swellex são feitos com dois objetivos: controle de qualidade da instalação e verificação da eficácia do reforço. O controle de qualidade é feito nos swellex instalados recentemente (dentro do mês) e que ainda não sofrem efeitos significativos da corrosão. A verificação da eficácia é feita em trechos antigos da mina, onde a corrosão dos swellex pode tornar o sistema de reforço ineficaz, fazendo-se necessárias intervenções de adequação da contenção. Nesses locais há swellex com idades de instalação variando de 1 a 11 anos, em locais secos e com umidade variada. Os testes nesses locais só eram feitos para swellex com idades a partir de 5 anos (tempo de vida útil sugerido informalmente por alguns fornecedores do

produto).

Nesse trabalho serão utilizados os dados dos testes de tração nos trechos antigos da mina cujo resultado final foi a ruptura do swellex, descartando-se os eventos nos quais houve escorregamento do reforço, com o objetivo de eliminar falhas de instalação. Os locais onde os swellex foram testados também foram classificados de acordo com a ocorrência de água subterrânea, conforme a figura 6 ou como secos.

Os resultados para os testes de tração em locais secos mostram uma tendência de diminuição da capacidade de carga do swellex conforme aumenta o tempo de instalação (vide figura 7).

A classificação geomecânica e a análise cinemática das famílias de descontinuidades do maciço rochoso da Mina Lamego estabelece que os reforços nas galerias de desenvolvimento precisam suportar uma carga mínima de 9,5ton para serem considerados eficazes. Dessa forma, é possível estimar através da linearização proposta na figura 7, o tempo de vida útil de cerca de 15 anos para os swellex sem a influência de umidade.

Nos locais secos, a diminuição da eficácia do swellex é devido apenas à corrosão atmosférica. A umidade relativa nesses locais foi medida e seus valores variam de 65,8 a 83,3%. Na tabela 3, para os valores de umidade mencionados, o grau de corrosão do aço varia de 0,002 a 0,010mm/ano. Após quinze anos de instalação, o swellex teria a espessura original de sua casca (2mm) diminuída de 0,031 a 0,145mm, tornando-se assim, ineficaz.

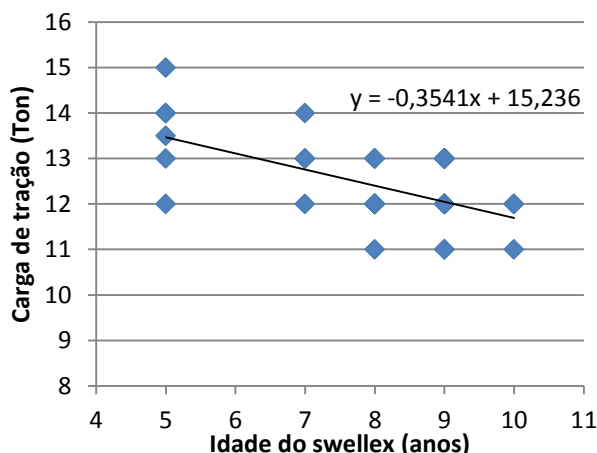


Figura 7. Resultados dos testes de tração (rompimento)

para swellex em locais antigos e sem umidade da Mina Lamego.

Nos locais onde ocorre umidade a relação entre a diminuição da capacidade de carga e o tempo de instalação (vide figura 8) não é linear como nos locais secos. Foram testados swellex com idades entre sete e dez anos. Todos os swellex rompidos obtiveram resultados inferiores a 9,5ton. A condição gotejante ocorreu apenas nos swellex com sete anos devido ao trecho de maior ocorrência de água ser limitado à proximidade com as drenagens superficiais.

Nos anos de 2004 e 2009 foram conduzidos estudos hidrogeológicos na Mina Lamego com finalidade ambiental, nos quais houve algumas medidas de oxigênio dissolvido na água. Para esse trabalho, apenas um resultado foi considerado representativo da água subterrânea por ter sua coleta realizada em local onde ocorre infiltração de água através das descontinuidades. O valor considerado foi de 2,5mg/L. Considerando que as intensidades de água subterrânea observadas foram molhado e gotejante, os graus de corrosão, de acordo com a figura 6 seriam entre 0,04 e 0,08mm/ano. Para que a corrosão promova diminuição da espessura do swellex a ponto de torná-lo ineficaz (0,031 a 0,145mm) seria necessário um tempo entre 4,5 meses e 3,6 anos.

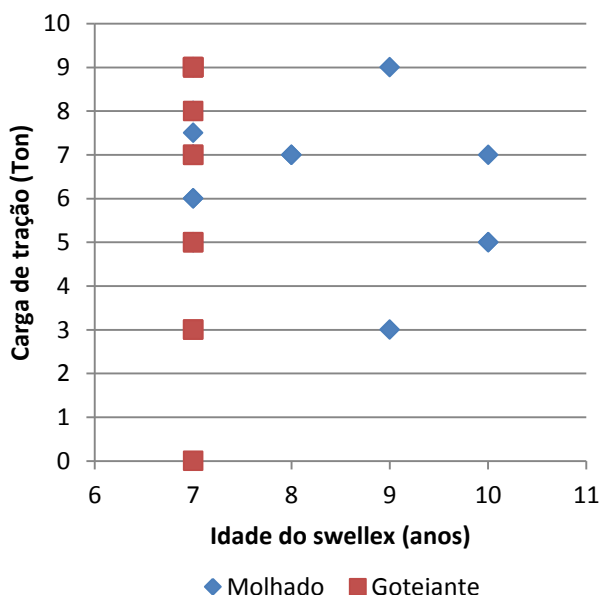


Figura 8. Resultados dos testes de tração (rompimento) para swellex em locais antigos com umidade da Mina Lamego.

4 CONCLUSÕES

Os parâmetros que influenciam a corrosão no ambiente subterrâneo são a intensidade da água subterrânea, a concentração de oxigênio dissolvido na água e a umidade relativa do ar.

A aplicação de sistemas de classificação da corrosão utilizados na indústria não é representativa para o fenômeno no ambiente subterrâneo porque os sistemas disponíveis foram desenvolvidos para o ambiente urbano e industrial e consideram parâmetros que não são significativos nas minas subterrâneas.

A aplicação do sistema de classificação da corrosão no ambiente subterrâneo desenvolvido por Villaescusa *et al* (2007) na Mina Lamego é aceitável devido à similaridade dos parâmetros influentes na corrosão entre as minas australianas e a Mina Lamego.

A aplicação do trabalho realizado por Villaescusa *et al* (2007) na Mina Lamego permitiu esboçar o tempo de vida útil do swellex no local e confirmar sua caracterização como reforço temporário. Seu uso em locais com umidade não deve ser praticado pois não é possível estabelecer uma correlação entre o tempo de instalação e sua eficácia.

Nos locais onde é utilizado swellex, ou outro tipo de reforço temporário com fixação por atrito, os testes de tração devem ser realizados mensalmente, principalmente nos locais onde ocorre umidade, pois é possível que os reforços percam sua eficácia num período de tempo inferior a um ano.

A presença de sulfetos na mineralização da área de Lamego faz necessário avaliação da concentração dos íons desses minerais na água, pois sua presença pode criar células eletroquímicas com o reforço, acelerando o processo de corrosão.

REFERÊNCIAS

- Villaescusa, E. *et al* (2007) *Corrosion of Rock Reinforcement in Underground Excavations*, Minerals and energy Research Institute of Western Australia, report 263.
- Jones, D.A. (1996) *Principles and Prevention of Corrosion*, Prentice-Hall, Upper Saddle Rive, USA.
- CISA 1994, *Corrosion Control in Southern Africa*, Mintek, South Africa.
- Roberge, P.R. (2000) *Handbook of Corrosion*

- Engineering*, McGraw-Hill, New York.
- Heidersbach, R.H. (1990) *Marine Corrosion*, Metals Handbook Ninth Edition Corrosion, ASM International, OHIO, Vol. 13, p. 893-926.
- Uhlig, H.H. e Revie, R.W. (1985) *Corrosion and Corrosion Control*, 3rd ed, Wiley-Interscience.