

Análise geomecânica das rampas de acesso da mina Cuiabá da AngloGold Ashanti utilizando testes de hipóteses e os testes estatísticos t e f

Almir Donizette Vicente Gouvêa

Universidade Federal de Alfenas, Poços de Caldas, Brasil, almir.donizette@gmail.com

Luiz Carlos Rusilo

Universidade Federal de Alfenas, Poços de Caldas, Brasil, luiz.rusilo@unifal-mg.edu.br

Reuber Ferreira Cota

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

RESUMO: A mina Cuiabá da AngloGold Ashanti Córrego do Sítio Mineração Ltda. considerada uma das mais importantes minas subterrâneas de ouro do Brasil, com escavações a mais de 1.200 metros de profundidade utiliza os métodos de lavra de corte e enchimento e o de realce em sub-níveis. Ao longo dos anos diversos problemas de instabilidades como quebra mecânica (“*breakout*”) e capelamento (“*buckling*”) surgiram nas rampas de acesso dos corpos minerais da mina, sendo que atualmente os corpos de minério lavrados são: “Serrotinho”, “Fonte Grande Sul”, “Balancão” e “Galinheiro”. Para poder analisar a ocorrência desses fenômenos, nesse trabalho foram realizadas análises estatísticas diversas, aplicadas à Mecânica de Rochas, para correlacionar a variabilidade dos parâmetros geológicos, geométricos e de projeto em engenharia, considerando as seguintes características: o azimute do mergulho da foliação principal, o mergulho da foliação principal, a quantidade de foliações por seção, a quantidade de fraturas sistemáticas por seção, a quantidade de fraturas esparsas por seção, os parâmetros da classificação do sistema RMR, os parâmetros da classificação do sistema Q, as dimensões da escavação, a deformação da seção, a ocorrência ou não de “*breakout*” por seção, a ocorrência ou não de “*buckling*” por seção e a profundidade. Entre as análises estatísticas realizadas, considerou-se a hipótese de ocorrência de “*breakout*”, “*buckling*” e ruptura (“*breakout*” e ou “*buckling*”), analisou-se os intervalos de confiança, podendo assim definir se a variável segrega a situação (disjunto) ou se não segrega (sobrepосто), assim como realizaram-se os testes t e f, podendo assim definir o grau de influência de cada parâmetro em quatro níveis, sendo que quanto mais elevado é o grau maior é a influência que o parâmetro apresenta para a ocorrência do evento. Com isso verificou-se quais são as variáveis de controle na ocorrência de cada fenômeno (“*breakout*”, “*buckling*” e ruptura), definiu-se quais variáveis que podem ser utilizadas na previsão de outros pontos que podem apresentar problemas geomecânicos, além disso, foi possível perceber que os parâmetros que tem a maior influência na ocorrência desses problemas de instabilidade, na mesma intensidade, são os níveis de tensão estimados, segundo a profundidade, seguido por três parâmetros com o mesmo grau de influência (FF/m, índice RQD e RMR ponderado), tendo como subsequente a quantidade de fraturas esparsas apresentando grau um pouco mais baixo de influência. Além disso pode-se definir variáveis que isoladamente tem elevada correlação com os fenômenos de instabilidade geomecânicos e demonstra que as classificações geomecânicas estão apresentando boa performance.

PALAVRAS-CHAVE: AngloGold Ashanti, Mina Cuiabá, Mecânica de Rocha, Teste de hipóteses, Testes t e f, Grau de influência.

1 INTRODUÇÃO

Os maciços heterogêneos, por apresentarem anisotropia e se tratarem de meio descontínuo, apresentam maior complexidade em relação aos maciços homogêneos. Por conta disso, é necessário realizar estudo mais detalhado de suas características (Pinto Junior, 2011).

Os métodos computacionais de análise numérica são importantes para analisar como variam os parâmetros relacionados com a qualidade do maciço após abertura de galeria por desmonte com base nas suas características, podendo assim realizar diversas manipulações de modo que seja possível prever o comportamento durante as escavações (Bastos, 1998).

Outra forma de se analisar as características do maciço é através da modelagem estatística e da geoestatística no qual é possível ponderar como os parâmetros estão correlacionados e se determinar quais deles têm maior interferência de acordo com a probabilidade de ocorrência (Rusilo, 2014).

Com base nesse contexto, a proposta do presente trabalho é realizar análises estatísticas diversas, aplicadas à Mecânica de Rochas, para correlacionar a variabilidade dos parâmetros geológicos, geométricos e de projeto em engenharia, bem como levar em conta as suas respectivas variabilidades.

Considerando os dados reais da Mina Cuiabá espera-se que seja possível verificar as relações de dependência e interdependência das diversas variáveis utilizando-se os métodos de análises estatísticos, em especial intervalos de confiança e testes de hipótese (t e f), além de análises discriminantes e regressões lineares. Além disso, espera-se encontrar um padrão de modo que seja possível classificar os dados em diferentes estratos estatísticos.

Um importante fator a se levar em conta é que a escavação em maciço rochoso é uma atividade complexa, que necessita intenso controle para garantir a eficiência na construção de túneis e galerias, sendo que a escavabilidade depende das características das fraturas existentes e da capacidade de resistência da rocha à ação por desmonte mecânico

(equipamentos) e/ou explosivos (Bastos, 1998).

As classificações geomecânicas são importantes para analisar as características geotécnicas do maciço, com destaque para as de Bieniawski (RMR) e de Barton (Q), devido à aplicação mais frequente, maior experiência acumulada, versatilidade e facilidade de utilização (Bastos, 1998).

Para se avaliar as características geotécnicas é importante elaborar uma análise de sensibilidade comparando os resultados das classificações geomecânicas considerando os parâmetros geológicos no comportamento do maciço rochoso (Bastos, 1998).

Existem diversas ferramentas que podem ser utilizadas para correlacionar a variabilidade dos parâmetros geológicos, geométricos e de projeto em engenharia como análises estatísticas diversas.

Utilizando essas ferramentas e considerando a variabilidade de cada parâmetro é possível a realização de análise inferencial de amostras e, assim, avaliar problemas de instabilidades da Mina Cuiabá quanto aos mecanismos de quebra mecânica (*“breakout”*) e capelamento (*“buckling”*).

Em 1998, a AngloGold Ashanti Córrego do Sítio Mineração Ltda. tornou-se proprietária da mina Cuiabá, que é considerada uma das mais importantes minas subterrâneas de ouro do Brasil.

A Mina Cuiabá está localizada no Quadrilátero Ferrífero, na BR 262 às margens da estrada Pompéu que liga a cidade de Sabará e de Caeté, aproximadamente 5,5 km do centro da cidade de Sabará, Figura 1.



Figura 1. Localização da mina “Cuiabá” no Google Earth.
Fonte: Google Earth.

Atualmente essa mina possui escavações a mais de 1.200m de profundidade e utiliza para lavra os métodos de “*cut and fill*” e “*sublevel stopping*”, sendo que o acesso a mina pode ser feito através de “*shaft*” localizado na superfície ou por rampas a partir do nível 3 da mina (Tropia, 2013).

A altura vertical dos painéis de lavra varia com de acordo com o nível, sendo que até o nível 9 esse valor é de 66m, entre os níveis 9 e 11 corresponde a 44m, e a partir do nível 11 para o corpo Fonte Grande Sul a altura é de 33m e para o corpo Serrotinho é de 60m (Tropia, 2013).

A mina Cuiabá possui sete corpos mineralizados formando uma geometria em planta quase elíptica que é denominada informalmente como “pera”, resultante de uma estrutura dobrada, sendo que os corpos explorados e lavrados atualmente são: Balancão (BAL), Galinheiro (GAL), Fonte Grande Sul (FGS) e Serrotinho (SERR), como mostra a Figura 2 (Tropia, 2013).

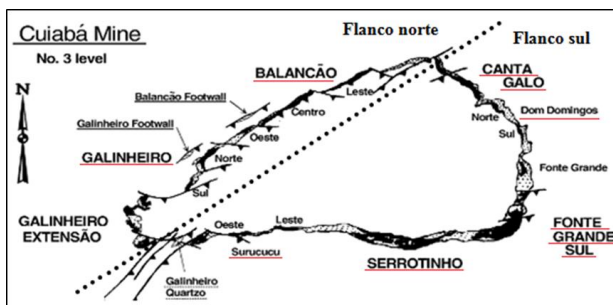


Figura 2. Corpos mineralizados na mina Cuiabá.
Fonte: Tropia (2013).

Em 2005, no corpo Fonte Grande Sul realizou-se um furo de ventilação a partir do nível 9 (cota 411 metros) até o nível 11 (cota 287 metros), sem proximidade com atividade de lavra, e após a sua conclusão surgiram rupturas contínuas, na parte superior e inferior, ao longo de toda porção de uma parede da extensão do furo de ventilação. Como as quebras eram diametralmente opostas em escavações circulares, foram consideradas como sendo rupturas ocasionadas por quebra mecânica (“*breakout*”), Figura 3 (Tropia, 2013).



Figura 3: Problema de Quebra mecânica (“*breakout*”).
Fonte: Tropia (2013).

Em regiões de alta tensão de maciços anisotrópicos, os planos da foliação que são aproximadamente paralelos à sua parede formam finas camadas de rochas, que podem ocasionar um mecanismo de ruptura denominado capelamento ou “*buckling*”, no qual a rocha tem suas camadas rompidas para dentro da escavação. Figura 4 (Tropia, 2013).

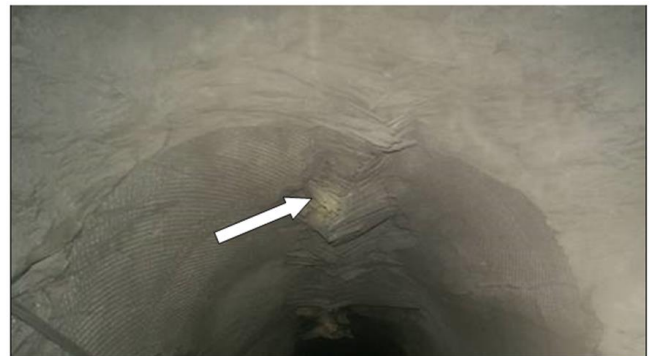


Figura 4: Problema de capelamento (“*buckling*”).
Fonte: Tropia (2013).

2 METODOLOGIA

2.1 Geral

Mediante ensaios *in situ* e de laboratórios realizados pela equipe de mecânica de rochas da AngloGold Ashanti foram obtidos os parâmetros de classificação geomecânica.

Em seguida esses parâmetros foram analisados e correlacionados para verificar as suas relações de dependências e interdependências utilizando os métodos de análises estatísticas considerando intervalos de confiança e testes de hipóteses para definir a influência de cada parâmetro.

Os parâmetros considerados e correlacionados foram: o azimute do mergulho da foliação principal, o mergulho da foliação principal, a quantidade de foliações por seção, a quantidade de fraturas sistemáticas por seção, a quantidade de fraturas esparsas por seção, os parâmetros da classificação do sistema RMR, os parâmetros da classificação do sistema Q, as dimensões da escavação, a deformação da seção, a ocorrência ou não de “*breakout*” por seção, a ocorrência ou não de “*buckling*” por seção e a profundidade.

2.3 Intervalo de confiança

Através da tabulação dos parâmetros calculados com base nas amostras pode-se encontrar uma distribuição normal de probabilidade e com isso pode-se criar o intervalo de confiança contendo a média da população sob uma confiança (α) de 95%, considerando o erro correspondente (e), a partir de um conjunto de dados amostrais, Figura 5, (Rusilo, 2003):

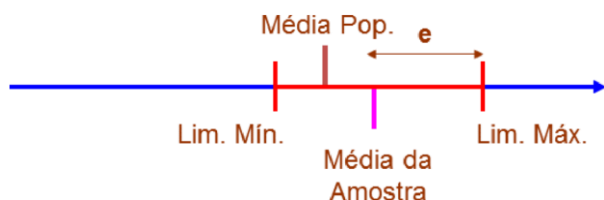


Figura 5: Ilustração do intervalo de confiança.
Fonte: Rusilo (2003).

Sendo:

Lim. Mín.: limite mínimo ou inferior;

Média Pop.: média da população ou conjunto de dados;

Média da Amostra: média da amostra de dados analisado;

e: erro da estimativa;

Lim. Máx.: limite máximo ou superior.

2.2 Testes de hipóteses

Nos testes de hipóteses foram consideradas as seguintes premissas:

- Hipóteses: ocorrência somente de “*breakout*”, somente de “*buckling*” e os dois problemas simultaneamente;

- Testes estatísticos utilizados: t e f;

- Nível de significância dos testes: 95% (0,95);

- Estimativa ou valor correspondente ao teste: calculado para cada parâmetro, considerando todas as rampas de análise;

- Tomada de decisão: comparação entre a hipótese nula e o resultado do teste, avaliando assim a situação de cada parâmetro de acordo com o nível de significância pré-determinado;

- Conclusão da análise: segregação dos parâmetros em dois grupos, os disjuntos e os sobrepostos.

3 RESULTADOS OBTIDOS

Os valores correspondentes ao tipo de rocha e o tipo de estrutura mais distinta não foram considerados na análise, pois não apresentaram interferência significativa nesse estudo de caso.

As rampas consideradas foram: Rampa 7 – 8, Rampa 7 – 8 BAL, Rampa 8 – 9, Rampa 9 – 10 SERR, Rampa 9 – 11 FGS, Rampa 11 – 12 FGS, Rampa 11 – 12 SERR, Rampa 12 – 13 SERR e Rampa 12 – 13 FGS.

Considerando o resultado dos testes de hipóteses e a segregação dos dados, foi possível obter o grau de influência de cada parâmetro de acordo com a sua correlação com as condições de estabilidade, bem como seu tipo, se “*breakout*” (Tabela 1), “*buckling*” (Tabela 2) ou ruptura, indistintamente do mecanismo (Tabela 3).

Considerando as duas possibilidades (ocorrência ou não de “*breakout*”) e analisando os intervalos de confiança, pode-se definir se a variável segrega a situação (disjunto) ou se não segrega (sobreposto), realizar os testes “t” e “f” para verificar a variabilidade e com isso definir o grau de influência de cada parâmetro, Tabela 1.

Tabela 1. Análise dos intervalos de confiança, resultados dos testes e grau de influência de cada parâmetro em relação a ocorrência de quebra mecânica (“breakout”).

PARÂMETRO	Situação dos Intervalos	Resultados dos Testes		Grau de influência do parâmetro
		Teste t	Teste f	
Azimute do Mergulho da Foliação Principal (graus)	Sobrepastos	0,435381	0,000000	Grau 1
Mergulho da Foliação Principal (graus)	Sobrepastos	0,537567	0,000000	Grau 1
Quantidade de Foliações Totais	Sobrepastos	0,925767	0,738465	Grau 0
Quantidade de Fraturas Sistemáticas	Disjuntos	0,001585	0,174740	Grau 2
Quantidade de Fraturas Esparsas	Disjuntos	0,000000	0,041646	Grau 3
Espacamento Médio das Descontinuidades (m)	Disjuntos	0,000143	0,690554	Grau 2
FF/ m	Disjuntos	0,000002	0,027194	Grau 3
Índice RQD	Disjuntos	0,000003	0,011335	Grau 3
Peso atribuído RMR	Disjuntos	0,000053	0,003585	Grau 3
Índice RMR	Disjuntos	0,000004	0,415985	Grau 2
Relação Tamanho do Bloco	Sobrepastos	0,189558	0,259106	Grau 0
Relação Rugosidade de Atrito	Sobrepastos	0,227630	0,925702	Grau 0
Tensões	Disjuntos	0,000000	0,000000	Grau 3
Índice Q	Disjuntos	0,000007	0,000004	Grau 3
Peso Global Q	Disjuntos	0,000007	0,000004	Grau 3
Maior vão da escavação	Sobrepastos	0,238480	0,030181	Grau 1
Maior comprimento	Sobrepastos	0,935069	0,954410	Grau 0
Profundidade (Cota em m)	Disjuntos	0,000000	0,000051	Grau 3

Fonte: Autoria própria.

Seguindo a mesma premissa da Tabela 1, foi possível analisar a situação dos intervalos, realizar os testes (t e f) e definir o grau de influência dos parâmetros para o problema de instabilidade denominado capelamento (“buckling”), conforme Tabela 2. Nesse caso é importante analisar que no parâmetro “Tensões” não foi possível realizar o teste f, pois a variância dos dados é nula.

Tabela 2. Análise dos intervalos de confiança, resultados dos testes e grau de influência de cada parâmetro em relação a ocorrência de capelamento (“buckling”).

PARÂMETRO	Situação dos Intervalos	Resultados dos Testes		Grau de influência do parâmetro
		Teste t	Teste f	
Azimute do Mergulho da Foliação Principal (graus)	Sobrepastos	0,552944	0,000000	Grau 1
Mergulho da Foliação Principal (graus)	Sobrepastos	0,242119	0,000000	Grau 1
Quantidade de Foliações Totais	Sobrepastos	0,049654	0,656527	Grau 1
Quantidade de Fraturas Sistemáticas	Disjuntos	0,000065	0,587473	Grau 2
Quantidade de Fraturas Esparsas	Disjuntos	0,000593	0,379253	Grau 2
Espacamento Médio das Descontinuidades (m)	Disjuntos	0,000315	0,892444	Grau 2
FF/ m	Disjuntos	0,000140	0,516458	Grau 2
Índice RQD	Disjuntos	0,000296	0,552234	Grau 2
Peso atribuído RMR	Disjuntos	0,000169	0,305338	Grau 2
Índice RMR	Disjuntos	0,000323	0,396982	Grau 2
Relação Tamanho do Bloco	Sobrepastos	0,549459	0,010075	Grau 1
Relação Rugosidade de Atrito	Sobrepastos	0,580882	0,735767	Grau 0
Tensões	Disjuntos	0,000000	#DIV/0!	Grau 3
Índice Q	Sobrepastos	0,019285	0,059794	Grau 1
Peso Global Q	Sobrepastos	0,019285	0,059794	Grau 1
Maior vão da escavação	Sobrepastos	0,999036	0,012823	Grau 1
Maior comprimento	Sobrepastos	0,409599	0,246810	Grau 0
Profundidade (Cota em m)	Disjuntos	0,000000	0,000107	Grau 3

Fonte: Autoria própria.

Com isso, foi possível segregar os parâmetros em 4 grupos de acordo com o grau de influência, sendo que quanto mais elevado é o grau maior é a influência que o parâmetro apresenta para a ocorrência de “buckling”.

Os intervalos de confiança podem ser definidos considerando a ocorrência de rupturas (“breakout” + “buckling”), Tabela 3.

Seguindo a mesma premissa da Tabela 2, foi possível analisar a situação dos intervalos, realizar os testes (t e f) e definir o grau de influência dos parâmetros para o problema de instabilidade denominado ruptura. Tabela 3.

Tabela 3. Análise dos intervalos de confiança, resultados dos testes e grau de influência de cada parâmetro em relação a ocorrência de ruptura.

PARÂMETRO	Situação dos Intervalos	Resultados dos Testes		Grau de influência do parâmetro
		Teste t	Teste f	
Azimute do Mergulho da Foliação Principal (graus)	Sobrepastos	0,432817	0,000000	Grau 1
Mergulho da Foliação Principal (graus)	Sobrepastos	0,560991	0,000000	Grau 1
Quantidade de Foliações Totais	Sobrepastos	0,022964	0,808575	Grau 1
Quantidade de Fraturas Sistemáticas	Disjuntos	0,000759	0,214287	Grau 2
Quantidade de Fraturas Esparsas	Disjuntos	0,000000	0,066221	Grau 2
Espacamento Médio das Descontinuidades (m)	Disjuntos	0,000175	0,634869	Grau 2
FF/ m	Disjuntos	0,000003	0,031865	Grau 3
Índice RQD	Disjuntos	0,000005	0,012435	Grau 3
Peso atribuído RMR	Disjuntos	0,000053	0,004780	Grau 3
Índice RMR	Disjuntos	0,000005	0,376242	Grau 2
Relação Tamanho do Bloco	Sobrepastos	0,429163	0,969806	Grau 0
Relação Rugosidade de Atrito	Sobrepastos	0,236388	0,846216	Grau 0
Tensões	Disjuntos	0,000000	0,000000	Grau 3
Índice Q	Disjuntos	0,000016	0,000007	Grau 3
Peso Global Q	Disjuntos	0,000016	0,000007	Grau 3
Maior vão da escavação	Sobrepastos	0,275921	0,038437	Grau 1
Maior comprimento	Sobrepastos	0,901047	0,889575	Grau 0
Profundidade (Cota em m)	Disjuntos	0,000000	0,000919	Grau 3

Fonte: Autoria própria.

Neste ponto foi também possível segregar os parâmetros em 4 grupos de acordo com o grau de influência, sendo que quanto mais elevado é o grau maior é a influência que o parâmetro apresenta para a ocorrência de quebra mecânica, capelamento e ruptura.

Analizando o grau de influência dos parâmetros mostrados nas Tabelas 1, 2 e 3, foi possível correlacionar essas informações e com isso definir quais os parâmetros que são mais abrangentes e influenciam nas três situações, Tabela 4.

Tabela 4. Correlação entre os parâmetros de acordo com o grau de influência e o problema de instabilidade.

PARÂMETRO	Grau de influência na ocorrência de “Breakout”	Grau de influência na ocorrência de “Buckling”	Grau de influência na ocorrência de rupturas
Azimute do Mergulho da Foliação Principal (graus)	Grau 1	Grau 1	Grau 1
Mergulho da Foliação Principal (graus)	Grau 1	Grau 1	Grau 1
Quantidade de Foliações Totais	Grau 0	Grau 1	Grau 1
Quantidade de Fraturas Sistemáticas	Grau 2	Grau 2	Grau 2
Quantidade de Fraturas Esparsas	Grau 2	Grau 2	Grau 2
Espacamento Médio das Descontinuidades (m)	Grau 2	Grau 2	Grau 2
FF/ m	Grau 3	Grau 2	Grau 3
Índice RQD	Grau 3	Grau 2	Grau 3
Peso atribuído RMR	Grau 3	Grau 2	Grau 3
Índice RMR	Grau 2	Grau 2	Grau 2
Relação Tamanho do Bloco	Grau 0	Grau 1	Grau 0
Relação Rugosidade de Atrito	Grau 0	Grau 0	Grau 0
Tensões	Grau 3	Grau 3	Grau 3
Índice Q	Grau 3	Grau 1	Grau 3
Peso Global Q	Grau 3	Grau 1	Grau 3
Maior vão da escavação	Grau 1	Grau 1	Grau 1
Maior comprimento	Grau 0	Grau 0	Grau 0
Profundidade (Cota em m)	Grau 3	Grau 3	Grau 3

Fonte: Autoria própria.

Considerando a premissa de que quanto mais alto é o valor, maior é o grau de influência e analisando a Tabela 4, pode-se perceber que os parâmetros que mais influenciam na ocorrência desses problemas, na mesma intensidade, são as tensões e a profundidade, seguido por três parâmetros com o mesmo grau de influência (FF/m, índice RQD e Peso Atribuído RMR), tendo como parâmetro subsequente a quantidade de fraturas esparsas. FF/m corresponde a quantidade de fraturas esparsas por metro, enquanto que o Peso atribuído RMR corresponde a valores relativos que são

atribuídos aos parâmetros de acordo com as suas características e as subdivisões definidas por Bieniawski.

Os valores que se sucedem correspondem à quantidade de fraturas sistemáticas, ao espaçamento médio das descontinuidades e ao índice RMR apresentam o mesmo grau de influência.

Os valores imediatamente depois são: índice Q e Peso Global Q, sendo que o Peso Global Q corresponde a normalização dos valores em uma escala de 0 a 100%, considerando que o máximo equivale ao maior valor obtido para o índice Q, que é 12,513.

Por fim, pode-se observar que os valores do azimute do mergulho da foliação principal, mergulho da foliação principal, quantidade de foliações totais, relação do tamanho do bloco, relação da rugosidade de atrito, maior vão da escavação e o maior comprimento tem um grau de influência muito baixo na ocorrência desses problemas de estabilidade.

4 CONCLUSÕES

Considerando os intervalos de confiança, a média e o desvio padrão, foi possível analisar a situação dos intervalos, realizar os testes (t e f) e definir o grau de influência dos parâmetros para os problemas de instabilidade denominados “*breakout*” (quebras mecânicas) e “*buckling*” (capelamento), sendo que os intervalos sobrepostos significam que a respectiva variável não apresenta capacidade discriminante para a ocorrência da respectiva variável, enquanto que os intervalos disjuntos significam que a variável segrega a ocorrência e a não ocorrência desse problema de instabilidade e, por estarem em uma faixa superior a 0,05, ou seja, acima do limite superior do intervalo de confiança considerando uma confiabilidade de 95%.

No caso do problema de quebra mecânica (“*breakout*”) observa-se que as variáveis de controle são basicamente as relacionadas à presença e densidade de faturamento, assim como as próprias classificações geomecânicas.

Em relação ao capelamento (“*buckling*”), as variáveis de controle são basicamente as tensões e a profundidade.

As variáveis que são altamente correlacionadas com quebra mecânica (“*breakout*”) mas não com o capelamento (“*buckling*”), podendo então ser utilizadas como guias para distinção entre os dois fenômenos, são o Índice Q e o Peso Global Q (“Q Ponderado”).

- As variáveis que se correlacionam com problemas geomecânicos, independentemente de sua natureza são FF/ m, Tensões e Profundidade, além dos próprios Índices Q e RMR e suas ponderações.

Assim o estudo, além de apresentar variáveis que isoladamente tem elevada correlação com os fenômenos de instabilidade geomecânicos, demonstra que as classificações geomecânicas estão apresentando boa performance em relação a variáveis diversas, inclusive que não são incorporadas nos sistemas de classificação RMR ou Q.

AGRADECIMENTOS

À empresa AngloGold Ashanti Córrego do Sítio Mineração Ltda., pela disponibilização dos resultados dos ensaios *in situ* e de laboratórios.

A toda equipe de mecânica de rochas e de geologia da AngloGold Ashanti, em especial para Rodrigo Padula e Diogo Brandini por darem todo o suporte necessário na triagem de dados.

REFERÊNCIAS

- Bastos, M. J. N. (1998). A geotecnia na concepção, projecto e execução de túneis em maciços rochosos, Lisboa, 166 p.
- Pinto Junior, A. J. N. (2011). Desenvolvimento de um Modelo Físico para Simulação de Processos de Erosão a Jusante de Estruturas de Vertedouros, Rio de Janeiro, Brasil, 133 p.
- Rusilo, L. C. (2003) Aplicação da lógica paraconsistente à análise da estabilidade de estruturas em rocha. Dissertação de doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral – PPGEMin, Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brazil, 266 p.
- Rusilo, L. C. (2014). Modelagem numérica de maciços rochosos. Unifal-MG: Poços de Caldas, Brazil, 35 p.
- Tropia, I. R. (2013). Análise das tensões *in situ* em

ambiente de lavra subterrânea - Mina Cuiabá –
Sabará/MG, Ouro Preto, Brazil, 218 p.