

Caracterização Do *Backfill* Cimentado Para a Mina Aguilar

Marilia Abrão Zeni

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil, marilia.a.zeni@gmail.com

André Cezar Zingano

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil, andrezin@ufrgs.br

RESUMO: Com a crescente diminuição de recursos minerais e o alto custo envolvido na construção da estrutura de uma mina, a recuperação máxima possível de uma jazida vem se tornando fundamental. Para isso, além da escolha do método de lavra ter a necessidade de ser feito cautelosamente, é possível lançar mão de métodos adicionais de recuperação, como por exemplo, a recuperação de pilares. O objetivo dessa pesquisa foi definir a melhor dosagem de cimento que atenda as exigências de resistência do *backfill*, possibilitando a posterior recuperação de pilares adjacentes. A caracterização do enchimento é composta da determinação da resistência simples do *backfill* necessária para que enchimento seja eficiente, desenvolvimento de classificação granulométrica ótima para os agregados e dosagem de cimento e água para alcançar a resistência proposta. A metodologia desenvolvida para obter a nova caracterização é composta de varias etapas que incluem pesquisas em campo e trabalhos em laboratório. Primeiramente, foram obtidos através de análise em campo os parâmetros de dosagem de cimento, classificação granulométrica dos agregados já utilizados na planta de fabricação de enchimento, bem como sua resistência correspondente. Em seguida, definições teóricas da dosagem de cimento ideal e classificação granulométrica ótima foram realizadas com base na resistência à compressão simples que foi identificada como necessária para cumprir com as solicitações geomecânicas, então posteriormente, a nova caracterização definida teoricamente foi posta à prova através de execuções de ensaios de compressão. A resistência à compressão simples, calculada de 2,69 MPa, foi obtida com base no planejamento de longo prazo que prevê a total recuperação dos pilares existentes na mina. A dosagem de 4% de cimento em peso juntamente com a classificação granulométrica ótima garantirá que a estabilidade geomecânica da mina seja mantida nos próximos anos, satisfazendo assim a produção mineral.

PALAVRAS-CHAVE: Enchimento, *Backfill*, Granulometria, Resistência à compressão simples.

1 INTRODUÇÃO

Vários métodos de mineração subterrânea fazem o uso de pilares temporários ou permanentes como parte do suporte, dentre eles se podem citar os métodos câmaras e pilares, longhole, sublevel stoping (Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc. [SME], 2011). A utilização de pilares nesses métodos tem o objetivo de controlar movimentos no maciço rochoso dentro da área de influência da escavação.

Um bom projeto de dimensionamento de pilares deve comprometer o mínimo de minério sem deixar de cumprir com o requisito de segurança estabelecido para o projeto e também precisa considerar vários elementos, como propriedades de resistência da rocha ou rochas em questão e estruturas geológicas.

Porém, quando o valor econômico do que é deixado nos pilares é alto, (motivado pelo seu preço no mercado, sua tonelagem e o seu teor, ou quando o rendimento do que será minerado do depósito é baixo com relação ao seu

potencial devido a incapacidade de auto sustentação do corpo mineral ou das rochas encaixantes), alguns métodos adicionais de mineração e/ou recuperação de pilares entram em análise para assim obter-se um melhor aproveitamento do recurso oferecido pelo depósito sem comprometer os requisitos de segurança.

Dentre os métodos de suporte artificiais com melhor aproveitamento do corpo mineral, se destaca o *backfill*, que é o preenchimento de espaços vazios onde já foi realizada a mineração com material estéril proveniente em geral da própria mina ou de minas próximas. O *backfill* pode atuar de maneira superficial, local ou globalmente na estrutura da mina, dependendo das necessidades da operação, do tipo de deformação do maciço rochoso e também das propriedades de sua mistura.

O objetivo deste estudo é realizar uma nova caracterização do *backfill* cimentado para a utilização nos *stopes* da Mina Aguilar, permitindo assim a posterior recuperação de pilares, visando cumprir com os requerimentos de segurança, operacionais e financeiros.

O presente trabalho foi desenvolvido na Mina Aguilar, pertencente à empresa Glencore International AG, que extrai e beneficia Zinco, Chumbo e Prata na província de Jujuy – Argentina. A mina Aguilar trabalha com o método de mineração conhecido como Transverse Stopping. As câmaras foram projetadas com pilares adjacentes e são minerados conforme a necessidade de produção, (considerando seu teor e tonelagem) e também observando os critérios geomecânicos para o sequenciamento, evitando assim o risco de qualquer colapso.

A mina subterrânea Aguilar subterrânea atualmente é composta por duas seções distintas, uma seção chamada Capa A que possui três setores denominados 15, 18 e Sub-18 e outra seção chamada Pique Inferior. A seção que será alvo desse estudo será Capa A.

A produção total mensal de Capa A é de aproximadamente 5.900m³ de minério, enquanto a produção mensal de *backfill* cimentado para a Capa A é de aproximadamente 5.500m³. Isso deixa evidente que a mina produz mais espaços vazios do que consegue preenchê-los, gerando um grande

passivo de câmaras vazias existentes nessa seção, o que a longo prazo vem provocando grandes deslizamentos e setores em condições instáveis.

A planta de *backfill* do setor Capa A é da marca BetonMac e foi fabricada no ano 2012. A capacidade de produção é de 220m³ por dia (considerando 2 turnos de 10 horas cada), opera de maneira automática ou manual e necessita de 3 operários trabalhando na planta e 2 operários trabalhando no controle de agregados.

A operação para fabricação do *backfill* consiste em: classificação dos agregados em superfície, onde duas grelhas são alimentadas com material de uma das pilhas de estéril da mina. A primeira grelha possui 1 ½”, o material retido nessa grelha passa pela segunda grelha que possui 3 ½”. O material passante na segunda grelha será o agregado utilizado na planta de *backfill*. Posteriormente o material já classificado é transportado via poço por aproximadamente 300m até a planta de *backfill* que se encontra no nível 13 subterrâneo do setor Capa A e é enviado por correia transportadora até o tambor de mistura, onde uma balança controla automaticamente a quantidade de material a ser adicionada por mistura.

Ao mesmo tempo bolsas de 1000kg de cimento são enchidas por dois silos que estão localizados em superfície e são transportadas via trolley até a entrada de Capa A que seria o equivalente ao nível zero. A partir daí uma pá carregadeira faz o transporte até o nível 13 onde se encontra a planta de *backfill*. A pá carregadeira que faz esse transporte é capaz de transportar três bolsas em cada ciclo. O nível 13 possui um pequeno estoque de bolsas de cimento. Um guincho faz o transporte de uma bolsa até outro silo, de menor dimensão que possui uma tubulação que leva à calha de descarga, onde uma balança adiciona a quantidade exata de cimento à mistura. Além de cimento e agregado, água é adicionada em determinada proporção e após aproximadamente 1 minuto e meio dentro do tambor a mistura está pronta e é vertida pelo poço de transporte de *backfill* para os níveis inferiores.

2 METODOLOGIA

A metodologia para análise das características do *backfill* atualmente aplicado na mina Aguilar, foi composta de investigação em campo e posterior análise dos resultados obtidos em laboratório. Primeiramente ao visitar a planta de *backfill* buscou-se identificar a dosagem de água e cimento utilizada, através de perguntas aos responsáveis pela planta e acompanhamento da operação de produção do enchimento. Posteriormente agregados utilizados para confecção do *backfill* foram coletados em diferentes dias para a realização de peneiramento e obtenção da curva granulométrica.

A amostragem dos agregados foi realizada em cinco dias aleatórios durante os meses de agosto e outubro de 2015 e foi realizada diretamente na correia transportadora. Posteriormente foi realizado o peneiramento e classificação de todo o material amostrado, para isso foi utilizado os seguintes tamanhos de malha: 88,90mm; 50,80mm; 12,70mm; 6,35mm; 4,76mm; 0,60mm. Os tamanhos de malha foram escolhidos com base na disponibilidade de peneiras no laboratório de mecânica de rochas. Todo material classificado foi pesado em balança analítica e com base nesses valores foram traçadas curvas granulométricas para cada amostragem. Para determinação do teor de argila nos agregados, 4 amostras foram enviadas ao laboratório de análises químicas onde a porção argila foi classificada com malha de #200 (0,074mm), seguindo as normas argentinas de estudos geotécnicos.

Os corpos de prova de *backfill* utilizadas nos ensaios de compressão foram confeccionados na mina durante a operação de enchimento das câmaras. O material foi amostrado diretamente do balde da pá carregadeira antes de ser disposto dentro da câmara e então foram preparados quatro corpos de prova que foram ensaiados aos 7, 14, 21 e 28 dias. Foi realizada a média dos resultados de compressão simples para cada tempo de cura dos corpos de prova, ou seja, a resistência média para 7, 14, 21 e 28 dias. Com as informações obtidas anteriormente em campo foi possível observar as causas dos resultados obtidos em laboratório.

Para realizar o cálculo de resistência à compressão simples necessária para a seção Capa A pelo método de estabilidade de Mitchell (Earth Structures Engineering, 1983), primeiramente foi utilizado o software AutoCAD para obtenção das dimensões dessa seção da mina. Como o projeto de recuperação de pilares engloba toda a seção Capa A, ou seja, ao final da mina, todo o setor estará preenchido com *backfill*, optou-se por considerar toda a seção como apenas um bloco.

Para determinar o valor da resistência à compressão simples do *backfill* para Capa A foi aplicada a equação (1) desenvolvida por Mitchell (1983).

$$UCS = (F \times B \times \gamma_b) / (1 + B/H) \quad (1)$$

Onde F é o fator de segurança, γ_b é a densidade Bulk dos agregados, B é a largura do bloco e H sua altura.

Para elaboração da curva granulométrica ótima para o *backfill* da seção Capa A, primeiramente foi realizada uma investigação em campo do tamanho máximo de partícula presente no agregado. Essa informação foi corroborada pelos ensaios granulométricos feitos na primeira etapa da pesquisa. A partir da obtenção desse dado a curva foi construída fazendo o uso da equação (2), (Potvin, 2005).

$$P = 100 \times [d/d_{max}]^{0,5} \quad (2)$$

Onde: d é o tamanho da partícula em milímetros, d_{max} é o tamanho máximo de partícula também em milímetros e P é a porcentagem de agregado menor que o tamanho d .

Os valores de tamanho granulométrico utilizados para o cálculo foram os mesmos das malhas dos ensaios de classificação da primeira etapa, devido ao fato de posteriormente poder realizar a classificação granulométrica e comprovar a curva elaborada.

Para determinar a dosagem de cimento se aplicou a equação (3) determinada em 1995 pelo Canadian Rockburst Research Program (CRRP).

$$UCS = 27 (c/n)^{1,57} \quad (3)$$

Onde UCS é a resistência à compressão simples, c é a dosagem de cimento e n é a porosidade dos agregados obtida através de uma tabela desenvolvida por Potvin (2005).

A última etapa da pesquisa foi comprovar em laboratório se as novas características calculadas teoricamente do *backfill* atingirão os valores calculados de resistência. Para isso, agregados foram coletados da planta de *backfill* e classificados segundo os tamanhos de malha de 88,90mm; 50,80mm; 12,70mm; 6,35mm; 4,76mm; 0,60mm que foram utilizados no peneiramento da primeira etapa e a essas malhas se adicionou outro tamanho de malha de 74 μ m (#200) para retirar a fração de argila dos agregados.

A decisão de retirar a fração argila foi tomada após análise visual dos agregados onde se identificou que essa porção poderia estar afetando a qualidade do *backfill* e consequentemente sua resistência. Tendo em mãos agregados classificados e a curva granulométrica ótima, foram fabricados 40 corpos de prova segundo a norma técnica ASTM C 31 – C 31M (Procedimento padrão para produção e cura de amostras de concreto). Os moldes utilizados na fabricação dos corpos de prova possuem 15cm de diâmetro e 30cm de altura.

Após alcançar o tempo de cura estipulado, os corpos de prova foram encabeçadas com uma mistura de enxofre grafitado que é aquecido e despejado em um molde onde o corpo de prova é posicionado. Esse encabeçamento foi realizado para que as bases do cilindro estejam o mais planas e paralelas possível. Passado aproximadamente 2 minutos o encabeçado está seco e o corpo de prova está pronto para o ensaio de compressão simples. O ensaio de compressão simples foi realizado em uma prensa hidráulica da marca Cosacon com capacidade de 100 kN e sem controle do carregamento. O valor da força máxima aplicada, ou seja, momento em que o corpo de prova se rompe foi registrada em kN (quilonewton) em um relógio analógico e anotada em uma planilha. A Figura 1 mostra um corpo de prova já devidamente posicionado na prensa para realização do ensaio.



Figura 1. Corpo de prova sendo ensaiado.

3 RESULTADOS

No trabalho de investigação em campo se identificou que a dosagem de cimento no *backfill* é de 5% e que a relação água/cimento atualmente aplicada é de 1:1. Tanto a quantidade de cimento quanto a quantidade de água são bastante razoáveis e comumente utilizadas em outras minas segundo (Potvin, 2005). Apesar da relação água/cimento não ser a recomendada teoricamente que é de 0,8:1; não chega a representar um inconveniente, já que comumente essa relação é utilizada alcançando bons valores de resistência simples.

Após o peneiramento dos agregados amostrados na planta de *backfill* e sua devida pesagem, procedeu-se a construção das curvas granulométricas que podem ser visualizadas na Figura 2. O que se pode notar é que a maior variabilidade na granulometria ocorre na porção abaixo de 50mm, onde algumas das curvas não possuem nem ao menos a mesma tendência.

Posteriormente, devido ao aspecto visual dos agregados aparentarem possuir um grande conteúdo de argila, amostras dos agregados foram levadas ao laboratório de análises químicas e foi solicitado ensaios de determinação de conteúdo de argila. O conteúdo de argila médio nos agregados representa 1,82% em peso, o que é bastante representativo considerando que as dosagens de cimento no *backfill* são bastante baixas. A argila presente

nos agregados impede a formação da película de cimento que une as partículas diminuindo, logo a resistência do *backfill*, dessa forma é necessário que essa porção seja eliminada dos agregados em via seca ou via húmida.

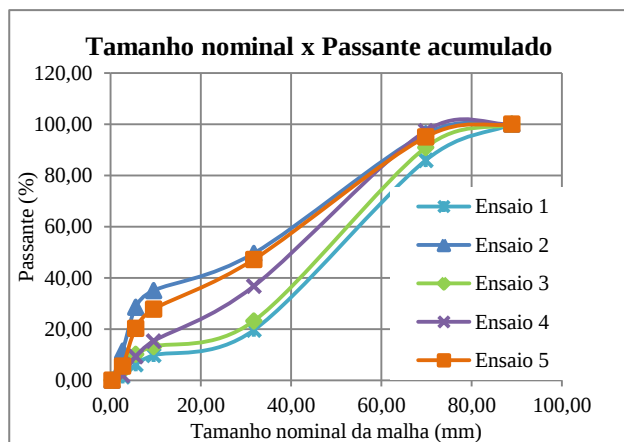


Figura 2. Curvas granulométricas dos agregados utilizados para *backfill*.

Foram analisados os resultados de compressão simples dos corpos de prova preparados em mina com 5% de cimento, relação água/cimento 1:1 e granulometria variável conforme as curvas granulométricas apresentadas anteriormente. Foi analisado um total de 92 corpos de prova preparados e ensaiados entre maio e setembro de 2015, a média dos resultados para diferentes tempos de cura estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Médias dos resultados dos ensaios de resistência simples para distintos tempos de cura.

Resistência média (MPa)	7 dias	14 dias	21 dias	28 dias
	1,42	1,36	1,60	1,85

Os valores das resistências médias não aparentam ser tão baixos, porém devido a grande variabilidade granulométrica, inúmeros corpos de prova rompem antes mesmo de serem ensaiados, o que representa um enchimento de baixa qualidade. A variância para o tempo de cura de 28 dias é de 8,74, o que confirma a grande variabilidade dos resultados, já o desvio padrão de 2,96 representa um grande espalhamento nos resultados de resistência, assim como o coeficiente de variação de 160% demonstra a grande heterogeneidade nos resultados aos 28 dias.

A Figura 3 mostra o gráfico de dispersão de todas as amostras analisadas com a relação resistência versus seu tempo de cura. Dos 92 corpos de prova, um total de 20 não pôde ser ensaiado porque romperam ao desmoldar ou durante o transporte.

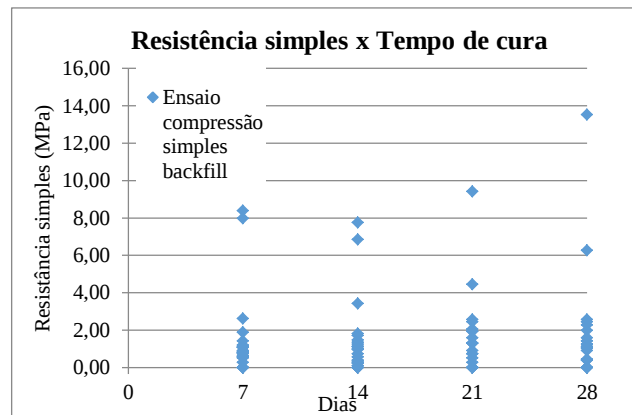


Figura 3. Resistência à compressão simples versus tempo de cura.

Para o cálculo da resistência necessária, a densidade Bulk foi fornecida pela empresa e o fator de segurança é o usualmente utilizado no projeto. Considerando: largura do bloco – B = 330m; altura do bloco – H = 220m; densidade Bulk – $\gamma_b = 1,6t/m^3$, fator de segurança – F = 1,3 e aplicando a equação (1) temos que a resistência à compressão simples necessária é de 274,56t/m² ou 2,69MPa. Sendo assim se percebe que a caracterização do *backfill* necessita de melhoras, já que pela análise realizada nos resultados da resistência simples, a média alcançada pelo *backfill* atualmente produzido é de 1,85MPa, apresentando uma diferença bastante relevante já que quando o enchimento seja exposto, é muito provável que não possa fornecer a estabilidade que a operação exige.

Seguindo a metodologia para obtenção da curva granulométrica ótima e aplicando a equação (2) temos a classificação ideal para os agregados do *backfill* produzido em Aguilar. Os seguintes tamanhos de malha que foram utilizados: tamanho máximo de partícula: $d_{max} = 88,90mm$; $d_r = 50,80mm$; 12,70mm; 6,35mm; 4,76mm; 0,60mm, 0,074mm. Os tamanhos de malha foram definidos com base nas malhas disponíveis no laboratório de mecânica de rochas, visto que posteriormente foram

realizados ensaios do *backfill* aplicando a curva granulométrica ótima. A Tabela 2 mostra os resultados obtidos de passante para cada malha citada e a Figura 4 sua respectiva curva granulométrica.

Tabela 2. Classificação granulométrica ótima.

Tamanho(mm)		(mm)	(%)
Malha (-)	Malha (+)	Tamanho Nominal	Passante
-	88,90	88,90	100,0
88,90	50,80	69,85	75,6
50,80	12,70	31,75	37,8
12,70	6,35	9,53	26,7
6,35	4,76	5,56	23,1
4,76	0,60	2,68	8,2
0,60	0,074	0,33	2,9

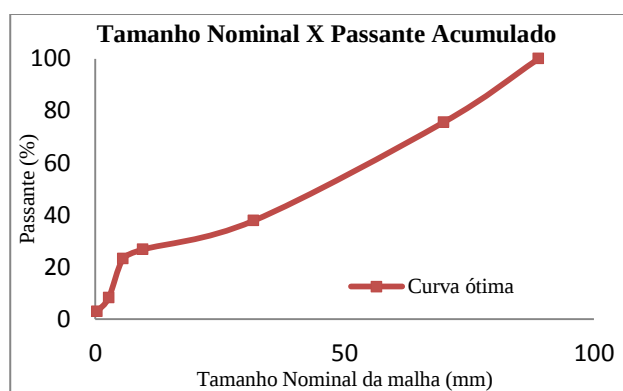


Figura 4. Curva granulométrica ótima para agregados do *backfill*.

Realizando a análise entre as curvas granulométricas obtidas através do peneiramento dos agregados na primeira etapa dessa pesquisa e a curva granulométrica ótima, se percebe que além de os agregados não possuírem uma classificação constante, não se acercam do ideal calculado teoricamente.

Utilizando a equação (3) obteve-se a dosagem de cimento necessária para alcançar a resistência a compressão simples de 2,69MPa. Considerando a porosidade $n = 0,22$; obteve-se que a dosagem de cimento c deve ser de 4% em peso.

Finalmente os 40 corpos de prova foram confeccionados com a nova caracterização e a média dos resultados dos ensaios de compressão simples podem ser vistos na Tabela 3.

Tabela 3. Médias dos resultados dos ensaios de resistência simples para distintos tempos de cura.

Resistência média (MPa)	7 dias	14 dias	21 dias	28 dias
	1,03	1,50	2,24	2,72

Aos 28 dias a variância dos resultados obtidos é de 0,06, o que representa uma grande uniformidade nos valores de resistência. O desvio padrão obtido de 0,25 e o coeficiente de variação sendo igual a 9,19% demonstra o quão homogêneo são os resultados de resistência aos 28 dias, sendo assim a resistência obtida com a dosagem de 4% de cimento e curva granulométrica ótima é bastante satisfatória.

A Figura 5 mostra o gráfico de dispersão da relação resistência versus seu tempo de cura de todos os corpos de prova ensaiados que possuem a nova caracterização, se pode observar uma menor dispersão para o mesmo tempo de cura, o que já era esperado devido ao resultado da variância.

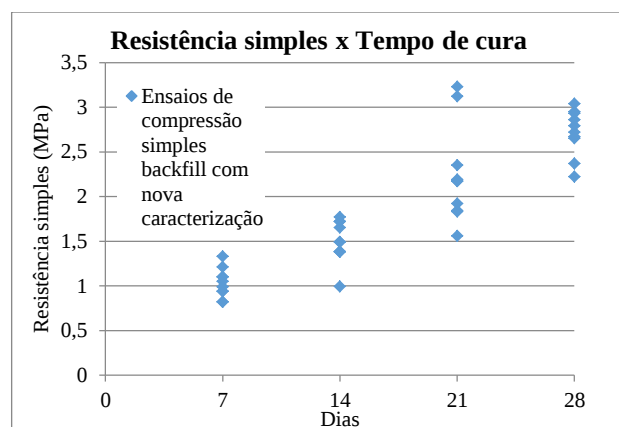


Figura 5. Resistência à compressão simples versus tempo de cura para nova caracterização.

4 CONCLUSÕES

Fica evidente que a caracterização atual do *backfill* produzido atualmente na mina Aguilar não está de acordo com as exigências de resistência, isso se deve ao fato de não haver um controle granulométrico adequado dos agregados utilizados. A proporção de partículas tamanho argila nos agregados é bastante elevada em média 1,82% e mesmo que a dosagem de cimento seja aumentada esse problema não é sanado. A única maneira de melhorar estes resultados é primeiramente

retirando a fração argila dos agregados para que o cimento possa aderir adequadamente aos agregados e controlar para que sua curva granulométrica seja a mais próxima possível da curva ótima.

A resistência máxima atual do enchimento produzido na mina Aguilar é de 1,85MPa em 28 dias usando 5% de cimento, diminuindo a dosagem de cimento para 4%, retirando a fração argila e controlando a distribuição granulométrica de acordo com a curva ótima é possível alcançar uma resistência de 2,72MPa como foi visto nos resultados dos ensaios de laboratório através da confecção de corpos de prova de *backfill*.

Como foi explicado anteriormente, a resistência mínima que o enchimento deve possuir para que todos os pilares possam ser recuperados deve ser de 2,69MPa, portanto o controle granulométrico é urgente, pois o *backfill* produzido atualmente não cumprirá com as solicitações dos esforços geomecânicos da mina.

A metodologia apresentada nessa pesquisa foi desenvolvida especialmente com o intuito de melhorar os resultados obtidos pelo enchimento, primando pela estabilidade geomecânica da mina que está intimamente relacionado à segurança da operação e também visando o melhor aproveitamento do depósito mineral. A mesma metodologia pode e deve ser aplicada em caso de modificações nas dimensões das câmaras e/ou mina para uma nova determinação da resistência necessária para o *backfill*.

Esse trabalho irá continuar com a aplicação do *backfill* e monitoramento in-situ das cargas nos pilares de rocha e cimento para medir a variação de tensões nos pilares durante as operações de enchimento e recuperação dos pilares de rocha. Com esse monitoramento será possível simular o comportamento dos pilares em outros locais da mina para o planejamento de lavra.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador e coautor deste trabalho professor Dr. André Zingano que sempre esteve à disposição para sanar minhas

dúvidas. Agradeço a Universidade Federal do Rio Grande do Sul especialmente aos professores do DEMIN pelo auxílio e também à Companhia Minera Aguilar por autorizar a divulgação dos dados dessa pesquisa.

REFERÊNCIAS

- Association for Testing Materials (2003). ASTM C 31/C 31M: *Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Field*. Pennsylvania, USA.
- Brady, B. H. G., & Brown, E. T (2005). *Rock Mechanics for Underground Mining*. (3rd ed.). USA: Springer Science.
- Camiro Mining Division (1995). *Canadian Rockburst Research Program*. Mining Research Directorate, Canada.
- Centro de investigação de regamentos nacionais de segurança para obras civis (CIRSOC) (2006). *Reglamento Argentino de Estudios Geotécnicos, Maio de 2006. Anteproyecto de reglamento argentino de estudios geotécnicos CIRSOC 401*, Buenos Aires, Vol. 1, p. 157-180.
- Hamrin, H. (2001). Underground mining methods and applications. *Underground Mining Methods: Engineering Fundamentals and International Case Studies*. Society for Mining, Metallurgy and Exploration: Littleton, Colorado.
- Mitchell, R. J. (1983). *Earth Structures Engineering*. (1st ed.). Winchester, USA: Allen Unwin Inc.
- Potvin Y., Thomas E. & Fourie A. (2005). *Handbook on Mine Fill* (1st ed.). Australian Centre of Geomechanics, WA, Australia.
- Quesnel, W. J. F., Deruiter, H., & Pervik, A. (1989). *The Assessment of Cemented Rock Fill for Regional and Local Support in a Rockburst Environment*. Proceedings of the 4th International Symposium on Mining with Backfill, Montreal, October 1989, pp.217-224.
- Society for Mining, Metallurgy, and Exploration Inc. (2011). *SME Mining Engineering Handbook*. (3rd ed.). USA.