

XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
IX Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas
IX Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
VI Conferência Sul Americana de Engenheiros Geotécnicos Jovens
XI Congresso Luso Brasileiro de Geotecnia
23 a 26 de Agosto de 2022 – Campinas – SP



COBRAMSEG 2022
23 A 26 DE AGOSTO | CAMPINAS | SP | BRASIL
COBRAMSEG | SBMR | GEOJOVEM | CLBG

Estudo de Melhoria Contínua do Sistema de Enchimento dos Realces da Mina Vermelhos – Cemented Rock Fill

Daniel Santos de Santana

Engenheiro Geotécnico Pleno, Mineração Caraíba – Matriz, Jaguarari, Brasil,
daniel.santana@minacaraiba.com

Wesley Adroaldo Batista Reis

Engenheiro de Planejamento Sênior, Mineração Caraíba – filial Vermelhos, Jaguarari, Brasil,
wesley.reis@minacaraiba.com

Roberto Santos Lima

Gerente de Mina Subterrânea, Mineração Caraíba – filial Vermelhos, Jaguarari, Brasil,
roberto.lima@minacaraiba.com

RESUMO: Os métodos de lavra subterrânea, em sua maior parte, utilizam pilares temporários ou permanentes para a manutenção da estabilidade da mina e para limitação do vão máximo dos realces a serem lavrados. Em detrimento disso, parte da reserva do depósito pode não ser explorada, se mantendo em forma de pilares verticais. A implementação de métodos de suporte artificial, tal como o *cemented rock fill* – CRF, pode contribuir para garantir um melhor aproveitamento do corpo mineral, preenchendo os realces vazios, resistindo aos carregamentos estáticos e dinâmicos associados às atividades adjacentes na mina. Este trabalho tem como objetivo demonstrar o estudo de melhoria contínua implementado ao sistema de enchimento *cemented rock fill* da Mina Vermelhos, pertencente à Mineração Caraíba. Uma abordagem voltada para os impactos gerados ao plano de produção será discutida, a partir da investigação de necessidade de adotar uma sistemática de controle de qualidade adequada, passando pelas etapas de laboratório, planta, avaliação de campo e monitoramento de resultados.

PALAVRAS-CHAVE: Cemented Rock fill, Backfill, Recuperação de pilares, CRF, Borehole camera

ABSTRACT: Underground mining methods, for the most part, use temporary or permanent pillars to maintain the mine stability and to limit the maximum stope span that should be mined. As a result, part of the deposit reserve may not be exploited, remaining in the form of vertical pillars. The implementation of artificial support methods, such as cemented rock fill – CRF, can contribute to ensure an optimization of the ore extraction, filling the void stopes, resisting the static and dynamic loads associated with adjacent activities in the mine. This work aims to demonstrate the study of continuous improvement implemented to the cemented rock fill system at Mina Vermelhos, owned by Mineração Caraíba. An approach focused on the impacts generated by the production plan will be discussed, starting from the investigation of the need to adopt an adequate quality control system, going through the stages of laboratory, plant, field evaluation and monitoring of results.

KEYWORDS: Cemented Rock fill, Backfill, Pillar Recovery, Borehole camera.

1 Introdução

O preenchimento de realces é uma prática que vem sendo adotada ao longo de muitos anos, visando reduzir os custos com transporte de material estéril para a superfície e minimizar os impactos ambientais de disposição de pilhas. No entanto, o enchimento com estéril é utilizado apenas como suporte passivo às paredes do realce, quando não é requerido a exposição da parede lateral ou base da escavação adjacente. O tipo de enchimento conhecido como *cemented rock fill*, onde se tem a adição de 1-8% (peso do sólido) de cimento, em conjunto com água e material estéril, possibilita não apenas a estabilidade da escavação, mas também garante um suporte ativo quando há a exposição de realces adjacentes (Hassani & Archibald 1998; Liston 2014), contribuindo para um melhor aproveitamento da reserva, ao reduzir o uso de pilares verticais entre realces, como demonstrado na Figura 1.

A aplicação do enchimento *cemented rock fill* na Mina Vermelhos se iniciou no ano de 2019 nos realces primários, onde a exposição de parede do *backfill* somente ocorreu no ano de 2020 com o desenvolvimento de travessas dos realces secundários. A exposição do CRF demonstrou um material de baixa coesão, sem capacidade de suportar ao carregamento estático, ocasionando ruptura por cisalhamento, gerando impacto significativo ao plano de produção. A partir dessa ocorrência, foi observada a necessidade de se repensar na composição da receita e implementar uma sistemática de controle de qualidade, partindo da investigação da distribuição granulométrica do material estéril britado, avaliação da razão água/cimento, porcentagem de cimento, resistência requerida, entre outros. Também foi conduzida uma investigação via *borehole camera* para compreender o comportamento interno do *backfill* pós enchimento e tempo de cura, realizando exposições de paredes de menor dimensão.

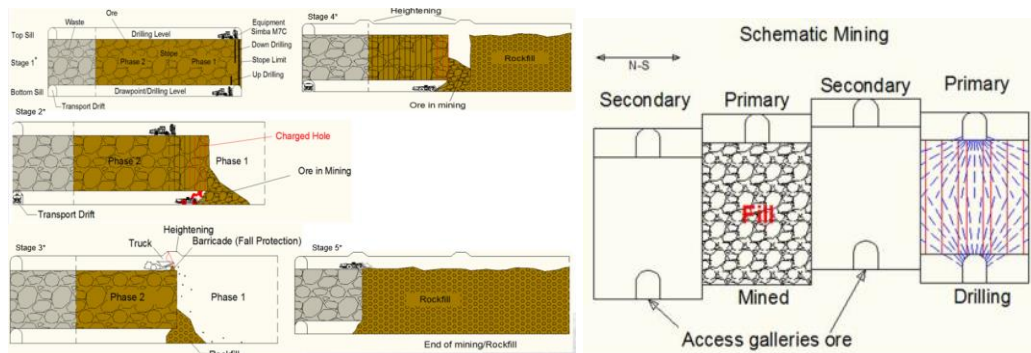


Figura 1: Representação do método de enchimento com CRF (à esquerda) e a sequência de enchimento dos realces primários com exposição de face (à direita).

2 Revisão Bibliográfica

Os parâmetros de avaliação que devem ser considerados na composição do *cemented rock fill* são, basicamente: a resistência requerida, que é uma função do método de lavra, geometria do realce, bem como o possível modo de ruptura (Cordova et al, 2016), as características do estéril em termos de distribuição granulométrica, porcentagem de cimento e a relação água/cimento (Vennes, 2014).

Para a análise da resistência requerida, existem métodos analíticos e numéricos utilizados para definição da resistência necessária às dimensões da face exposta. O método convencional mundialmente utilizado é a Análise da Cunha Simplificada do autor Mitchell (1983), conforme Figura 2, onde se estima a resistência a partir da aplicação do fator de segurança e das dimensões da face, baseado na teoria do limite de equilíbrio de um bloco deslizante de massa de enchimento e a resistência ao cisalhamento do enchimento cimentado. O método gráfico de Stone e Moss (1993), baseado nas formulações pseudo-3D de Mitchell e Roettger (1989) também possui aplicação para o caso do *cemented rock fill*, onde se avalia a altura da face exposta, levando em consideração apenas a possibilidade de ruptura por tração na vertical. Com base na metodologia de Mitchell (1983), a equação que define a resistência requerida, tem-se FS como o Fator de Segurança, B e H correspondente à largura e altura da face exposta, respectivamente, γ é a densidade do enchimento e UCS é a resistência à compressão uniaxial do enchimento:

$$UCS = \frac{FS\gamma}{1 + \frac{B}{H}} \quad (1)$$

A distribuição granulométrica das partículas é o fator que tem o maior efeito na resistência do enchimento. A redução na taxa de vazios através da distribuição granulométrica representa uma diminuição no uso de cimento “desperdiçado” que preencheria os vazios ao invés de revestir as partículas dos agregados, além de aumentar a área de contato entre as partículas de agregado, consequentemente aumentando sua resistência (Vennes, 2014), portanto a classificação granulométrica do material agregado usado para o CRF é recomendada.



A curva de referência utilizada para determinar a distribuição granulométrica do *cemented rock fill* é a Curva de Talbot (1923), construída a partir da seguinte equação:

$$P(D) = 100 \times \left(\frac{D}{D_m}\right)^n \quad (2)$$

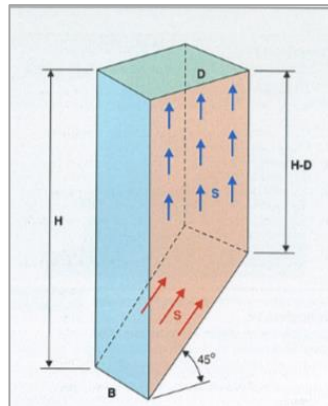


Figura 2: Modelo de cunha deslizante proposto por Mitchell (1983).

Onde se tem:

- P = porcentagem de agregado passante na peneira D;
- D_m = tamanho máximo do agregado;
- D = tamanho do agregado na fração sob investigação;
- n = constante experimentalmente definida.

Para o concreto, a granulometria ótima é obtida com um valor k de 0.5 (densidade máxima). Para o *Rockfill*, o valor de “n” depende da metodologia de enchimento do realce. No caso do método *Longhole*, investigações conduzidas na mina de Nevada indicam que o *Rockfill* performa melhor com excesso de finos, com valor de “n” variando entre 0.35 – 0.45 (Venees, 2014).

O cimento é comumente o tipo de elemento ligante (*binder*) utilizado para a composição do *cemented rock fill*. A pasta de cimento que reveste o agregado possui cerca de 1-6% de cimento. Geralmente, quando o CRF possui uma quantidade inferior a 1.5% de cimento, essa quantidade é considerada inadequada para revestir o agregado, ao passo que, quando a porcentagem de cimento excede 6%, fatores econômicos do projeto podem ser impactados (Emad, 2015). Um incremento adicional de cimento na mistura tem maior efeito na resistência do CRF quanto maior for a proporção de finos do agregado (Venees, 2014).

A razão água/cimento afeta a viscosidade da pasta e a trabalhabilidade do enchimento. A razão requerida para atender a hidratação do cimento é de apenas 0.22 – 0.25. Para o método de lavra *longhole*, a pasta de cimento deve ter capacidade de revestir o agregado (ser “molhada”) e ser fluída, o que requer uma razão água/cimento em torno de 0.7 – 1.2, a depender das condições ambientais – 0.8 para ambientes úmidos e 1.2 para ambientes secos (Venees, 2014; Emad, 2015).

3 Contexto do CRF na Mina Vermelhos

Os estudos prévios do projeto de composição da receita do CRF da Mina Vermelhos foram baseados no *benchmarking* realizado na Mina Iscaycruz no ano de 2014. A partir da receita sugerida nessa mina, como demonstrado na Tabela 1, e avaliações no laboratório de Geotecnia da Mineração Caraíba, pode-se constatar que a resistência mínima requerida para as dimensões dos projetos de realces de Vermelhos (50 L x 30 H), utilizando um fator de segurança de 1.2 e densidade de 2100kg/m³ poderia ser atingida através da receita implementada na Mina Iscaycruz (0.45 Mpa).



A planta de britagem do *rockfill* da Mina Vermelhos era composta por um britador primário e um conjunto de peneiras com passante em 75mm. O material agregado é proveniente do estéril, composta basicamente por rochas com resistência à compressão uniaxial superior a 120Mpa.

A disposição da receita prévia no interior dos realces primários ocorreu a partir de maio de 2019 e se estendeu até o final de 2020, com algumas alterações em termos de porcentagem de cimento e tamanho dos agregados, a partir da incorporação do britador secundário cônico na planta, onde se teve a redução do tamanho do agregado para a dimensão máxima de 50mm. Em Agosto de 2020, foram desenvolvidas travessas em dimensões de 4.50 x 5.0m visando verificar a qualidade do *rockfill* depositado nos realces primários.

Tabela 1: Receita do *rockfill* proposta através do *benchmarking* na Mina Iscaycruz

Receita	Unidade	Quantidade
Agregado	(Kg)	2500.0
Cimento	(Kg)	127.0
Água	(L)	89.0
Água/Cimento	-	0.7
Cimento	(%)	5

Observou-se que após a abertura das travessas, ocorreu a ruptura por cisalhamento do enchimento, demonstrando um material sem coesão e sem evidências claras de ligação das partículas do agregado através do cimento, como evidenciado na Figura 3. No entanto, os ensaios de compressão uniaxial demonstravam que a resistência do enchimento obtida era em média de 6.28Mpa com 28 dias de cura. Tal situação em campo, levou as equipes de Geotecnia, Operação, Planejamento e Manutenção da Planta a investigar as causas e propor novos estudos para a receita do CRF. Foram preenchidos ao total 7 realces primários com a receita, o que requereu se adotar uma investigação preliminar com abertura de travessas e execução de furos para interceptar o *rockfill*, objetivando filmar o interior dos furos através da *borehole camera*. Tais ações foram tomadas visando entender se a ocorrência se repetiria em todos os casos e antecipar os riscos ao plano de produção, propondo ações mitigadoras aos possíveis impactos na reserva para a lavra dos realces secundários. Uma das decisões foi a de se adotar pilares verticais entre os realces para que não ocorresse a contaminação do minério com o material inconsolidado.

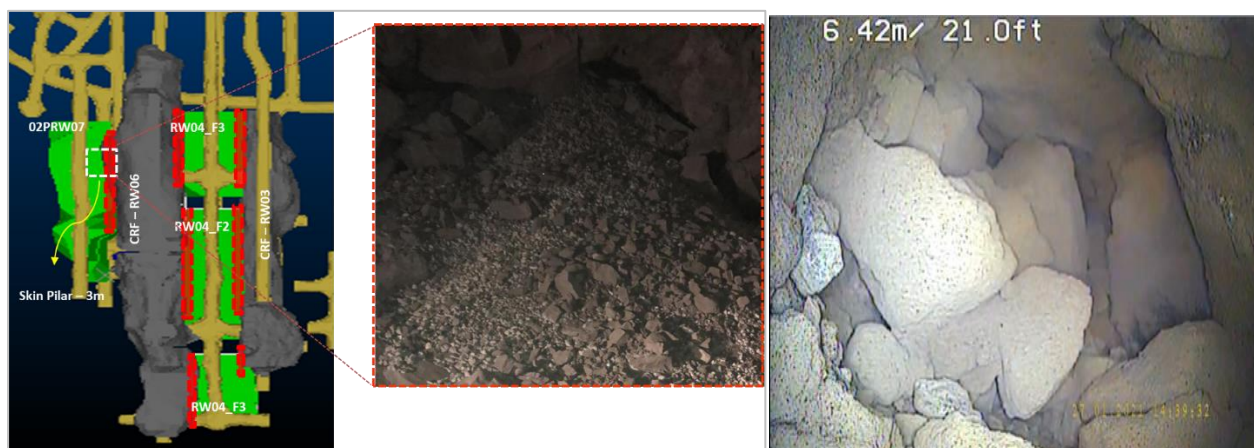


Figura 3: Representação do *rockfill* pós abertura da travessa (esquerda) e imagem representativa do furo via *borehole camera* (à direita) indicando um material inconsolidado.

4 Metodologia

A primeira etapa da avaliação da composição da receita se deu a partir da investigação dos resultados de resistência à compressão uniaxial obtidos através dos ensaios de laboratório. Notou-se que, embora o *rockfill* atingia valores superiores à resistência requerida, o desmolde e serragem dos corpos de prova



apresentava em alguns casos um material com granulometria mal distribuída, como apresentado na Figura 4 e, após a inclusão do britador secundário cônico, onde se tem a produção de uma quantidade maior de finos (fração abaixo de 10mm), alguns corpos de prova foram descartados devido à desintegração (falta de coesão) entre as partículas. A resistência requerida foi redimensionada utilizando a equação (1), usando um Fator de Segurança igual a 2, devido aos efeitos da segregação do CRF e ao potencial para uma eventual mistura com variações do material fonte estéril (Cordova et all, 2016). A resistência requerida para as dimensões dos realces passou a ser então equivalente a 0.7 Mpa.



Figura 4: Demonstração dos corpos de prova após implementação do britador cônico (à esquerda) e antes do britador cônico (à direita) representando casos de segregação e má distribuição granulométrica.

A distribuição granulométrica foi estudada entre os meses de Agosto a Dezembro de 2020, onde foram realizados 65 testes de granulometria dos agregados, visando avaliar a densidade de empacotamento do material e a porcentagem de finos, com base na aplicação da Curva de Talbot, por meio da equação (2) para um tamanho máximo de partícula de 50mm. Observa-se através da Figura 5 que o material proveniente da britagem e classificação produz em média 40% de finos (abaixo de 10mm), apresentando um desvio padrão maior que 5% para a faixa entre 19.1mm e 2.36mm. A variabilidade da distribuição é inerente ao método de classificação, onde se tem o uso de apenas um conjunto de *decks* de 50mm para a composição do produto final. É possível notar que o fator “n” da curva de Talbot está entre 0.55 e 0.65, demonstrando que ainda há oportunidade de otimização da distribuição granulométrica do material britado para atingir resistências maiores com menor consumo de cimento. A análise granulométrica passou a ser sistematizada de forma semanal como parte da implementação do controle de qualidade de CRF.

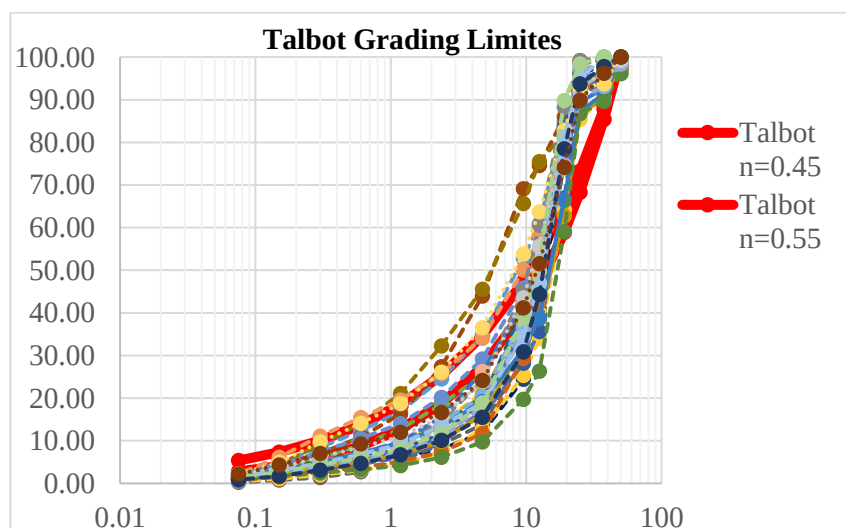


Figura 5: Análise granulométrica do estéril britado e classificado representado na Curva de Talbot.

O próximo passo consistiu em avaliar a razão água/cimento, utilizando-se 5% de cimento na composição do CRF. O principal objetivo de interesse era conseguir que a pasta revestisse o agregado e garantisse



trabalhabilidade ao enchimento, tendo assim a capacidade de fluir no interior do realce, mantendo a resistência requerida. Foram conduzidos inicialmente ensaios em laboratório, onde se observou que a energia de rotação da betoneira não era capaz de reproduzir a capacidade de mistura do misturador de duplo eixo da planta, que possui dois eixos horizontais internos sobre o qual são montados os braços e pás responsáveis pela mistura de agregados em sentido oposto e de forma helicoidal. Dessa forma, os testes passaram a ser conduzidos na planta, variando-se a razão água/cimento de 0.8 a 2.0. Notou-se que a concentração de finos (<10mm) em 40% associado a um ambiente seco e com agregados de alta absorção, exige que a quantidade de água presente na mistura seja suficiente maior para os fins de trabalhabilidade e revestimento do agregado. Uma opção para reduzir o consumo de água adicionado à mistura seria o de aspergir água no agregado antes de introduzir no misturador. Em virtude da infraestrutura do local não comportar os aspersores, a quantidade de água foi então adicionada diretamente à mistura, o que poderia influenciar na resistência final do CRF. Os ensaios da planta demonstraram que uma razão água/cimento de 1.8 seria ideal para o revestimento dos agregados.

Foram realizadas coletas do material para a composição do corpo de prova e posterior ruptura, de acordo as normas NBR 5738 e NBR 5739 visando avaliar a resistência à compressão uniaxial do enchimento, conforme demonstrado na Figura 6.



Figura 6: Material do enchimento pós mistura (à esquerda) com razão água/cimento de 1.8 em teste na planta e corpos de prova com 28 dias de cura (à direita).

5 Resultados e Discussões

A avaliação da composição do CRF teve como resultado a produção de um enchimento com melhor trabalhabilidade e características de revestimento total da pasta no agregado, o que representa o principal impacto observado em campo após a ruptura por cisalhamento da parede exposta na travessa e por meio da avaliação via câmera de furo. Os ensaios conduzidos na planta e o aspecto visual dos moldes de corpo de prova já demonstravam que o CRF, seguindo a nova receita proposta, poderia resultar numa parede autoportante coesa. O resultado de resistência à compressão uniaxial da coleta feita em campo em moldes de 100 mm x 200 mm e a nova receita proposta segue nas Tabelas 02 e 03, respectivamente:

Tabela 2: Resultados dos ensaios de compressão uniaxial das coletas obtidas a partir dos testes realizados na planta

Resistência UCS	
Dias	Valor (Mpa)
7	4.35
14	5.08
28	5.15

A partir de janeiro de 2021 os realces primários começaram a ser preenchidos com a nova receita. Após 56 dias de cura, foi realizada a exposição da parede por meio do desenvolvimento de travessas e investigações



via *borehole camera* foram conduzidas ao longo do ano para validar a qualidade do material depositado, como demonstrado na Figura 7. Os ensaios de compressão uniaxial demonstravam resistência adequada e a desagregação das partículas não foi mais observada na desmoldagem e serragem dos corpos de prova.

Tabela 3: Proposta de receita para o CRF considerando as alterações sugeridas

Receita	Unidade	Quantidade
Agregado	(Kg)	2415.0
Cimento	(Kg)	121.0
Água	(L)	217.0
Água/Cimento	-	1.8
Cimento	(%)	5



Figura 7: Face da travessa exposta (à esquerda) demonstrando a coesão e capacidade autoportante da face exposta e filmagem do furo via *borehole camera* (à direita) indicando preservação das paredes do furo e coesão do material.

A nova receita do CRF foi implementada nos realces primários e validada também através dos ensaios de compressão uniaxial ao longo do ano de 2021, demonstrando resistência superior à 1.5Mpa com 7 dias de cura, indicando pouco ganho de resistência aos 56 dias de cura. Foram expostas 4 faces autoportantes em dimensões de 30m H x 50m L demonstrando estabilidade e coesão da parede, indicando a qualidade e sucesso da nova receita, como visto na Figura 8. Ao total, no ano de 2021, foram preenchidos 7 realces primários com a nova receita.

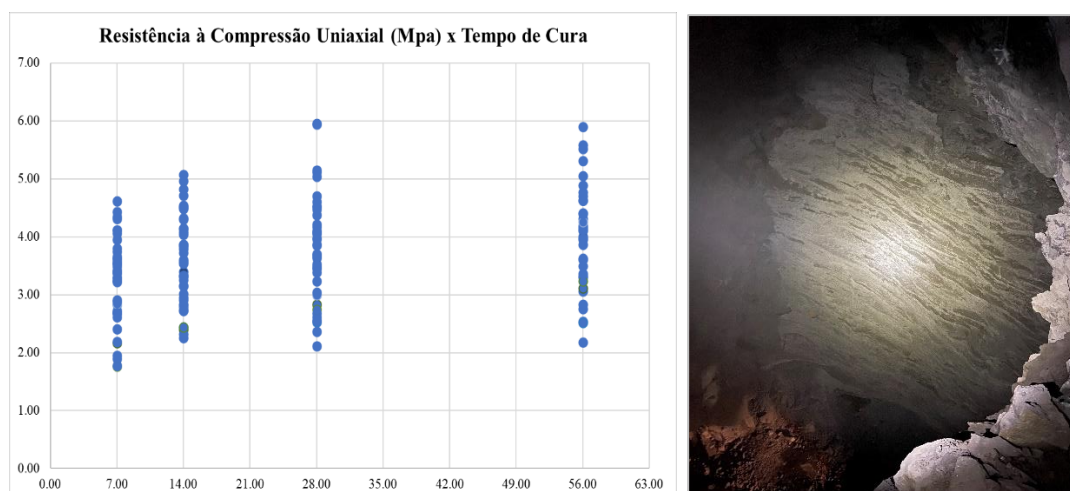


Figura 8: Resultados dos ensaios de compressão uniaxial em 2021 (à esquerda) e exposição da parede de 30m H x 15m L autoportante do CRF (à direita).



6 Considerações Finais

O sistema de enchimento CRF possibilita o aumento da recuperação do minério e da taxa de conversão de Recurso para Reserva, tendo como principal característica o uso do estéril britado proveniente do desenvolvimento das escavações no subsolo na Mina Vermelhos, numa mistura com água e cimento. Embora represente uma metodologia de *backfill* simples, o CRF apresenta variáveis qualitativas que podem implicar ao objetivo de atender a capacidade de parede autoportante, o que requer uma sistemática de controle de qualidade e monitoramento contínuo. As características visuais dos corpos moldados e a investigação visual de exposição de parede teste, bem como as investigações através da *borehole camera* constatou um CRF coeso e com capacidade de suportar cargas estáticas após implementação da nova receita. A definição desse estudo possibilitou a exposição das paredes de CRF de forma a garantir a estabilidade dos realces secundários durante a lavra e a recuperação do minério de maneira segura, com aderência ao plano de produção, representando um significativo ganho para o projeto.

O estudo apresentado ainda contempla oportunidades de melhorias futuras, que podem reduzir o consumo de cimento mantendo resistências elevadas, utilizando-se de técnicas de aspersão de água no agregado e investindo na classificação do agregado para a geração de mais de um único produto, garantindo melhor distribuição granulométrica, maior densidade de empacotamento e menor porosidade.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos à Mineração Caraíba pelos dados fornecidos para a composição desse estudo e por contribuir com a oportunidade de desenvolvimento de temas técnicos de valor significativo para o setor de Geotecnia. Agradecemos também à Gerência da Mina Vermelhos e todo corpo técnico que participou desse trabalho, bem como à equipe do Laboratório de Geotecnia da Mineração Caraíba pelo apoio, incentivo, dedicação e perseverança na busca por resultados cada vez melhores que possam trazer impactos positivos à empresa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Cordova, M.; Saw, H.; Villaescusa, E. *Laboratory testing of cemented rock fill for open stope support*. In: Proceedings of the Seventh International Conference & Exhibition on Mass Mining. 2016. p. 755-762.
- Emad, Muhammad Zaka; Mitri, Hani; Kelly, Cecile. *State-of-the-art review of backfill practices for sublevel stoping system*. International Journal of Mining, Reclamation and Environment, v. 29, n. 6, p. 544-556, 2015.
- Hassani, F., and Archibald, J. (1998). Mine backfill (CD-ROM), Canadian Institute of Mine, Metallurgy and Petroleum, Montréal
- Liston D. (2014) *Utilisation of cemented rockfill, cemented hydraulic fill and paste to successfully achieve ore production expansion to 2 Mtpa at Chelopech Mine*. Mine Fill 2014, Y Potvin & AG Grice (eds), ACG, Perth, Australia
- Mitchell, R.J. (1983). Earth Structures Engineering. Allen Unwin Inc, 9. Winchester Tce, Winchester, Mass 01890, USA.
- Stone, D.M.R., 1933. *The optimization of mix design for cemented rockfill*, Proc. Minefill 93, (Ed. Glen H. W.), The South African Institute of Mining and Metallurgy, pp. 249-243.
- Talbot, A.N. and E.D. Richart, The Strength of Concrete and its Relation to the Cement, Aggregate, and Water, in University of Illinois. Engineering Experiment Station. Bulletin ; no. 137 1923.
- Vennes, Isaac. *Determination of cemented rockfill strength with large scale UCS tests under in-situ conditions*. 2014.