

Estudos de Caso da Aplicação de Injeções de Calda de Cimento para o Tratamento de Canga Detrito-Laterítica no Contexto de Fundação para Barragem de Enrocamento

Matheus Junio Silveira Alves

Geólogo, Tetra Tech South America, Belo Horizonte, Brasil, matheus.alves@tetratech.com

Renan Landim Campos

Engenheiro Civil, Tetra Tech South America, Belo Horizonte, Brasil, renan.campos@tetratech.com

Eduardo Hollerbach Klier

Engenheiro Civil, Tetra Tech South America, Belo Horizonte, Brasil, eduardo.klier@tetratech.com

Eisenhower da Silva Feio

Geólogo, VALE S.A., Congonhas, Brasil, eisenhower.feio@vale.com

Bárbara Fernanda Gonçalves Braz

Engenheira Civil, VALE S.A., Congonhas, Brasil, barbara.braz@vale.com

RESUMO: Este trabalho apresenta um estudo de caso da aplicação de injeções de calda de cimento para o tratamento de uma fundação parcialmente constituída por canga detrito-laterítica, em área de construção de uma barragem de enrocamento para contenção de sedimentos na região do Quadrilátero Ferrífero. Inicialmente, apresenta-se o projeto desenvolvido, com os critérios para definição da malha de furos, profundidades e aspectos executivos de segurança pensados para mitigar problemas gerados por fraturamento hidráulico. Na sequência, são compilados os resultados obtidos em campo, com a disposição final dos furos, indicação do volume de calda de cimento absorvida por cada um, e o status de execução das linhas secundárias. Adicionalmente, trata-se também os ensaios de controle tecnológico conduzidos, com procedimentos de perda d'água sob pressão e permeabilidade por infiltração. Espera-se, com isso, poder comparar o que foi projetado com a execução em campo, evidenciando o nível de efetividade atingido pelo conceito proposto.

PALAVRAS-CHAVE: Injeções, Calda de Cimento, Barragem, Canga Detrito-Laterítica, Fundação.

ABSTRACT: This work presents a case study of the application of cement grout injections for the treatment of a foundation partially covered by lateritic detritus in the construction area of a rockfill dam for sediment containment in Minas Gerais, Brazil. Initially, the detailed design is presented, including criteria for defining the borehole grid, depths, and safety execution aspects proposed to mitigate problems caused by hydraulic fracturing. Subsequently, the field results are compiled, including the final layout of boreholes, indication of the volume of cement grout absorbed by each, and the execution status of the secondary lines. Additionally, technological control tests are discussed, involving procedures for water loss under pressure and permeability through infiltration. The goal is to compare designed aspects with the field execution, highlighting the level of effectiveness achieved by the proposed concept.

KEYWORDS: Injections, Cement Grout, Dam, Lateritic Detritus, Foundation.

1 INTRODUÇÃO

A utilização de injeções de calda de cimento para o tratamento de fundação de barragens é uma prática centenária no Brasil. Usualmente, o objetivo dessa solução de engenharia é preencher os vazios e/ou anomalias existentes no material natural da fundação, provocando assim uma redução na permeabilidade, que tem papel importante no controle de gradientes hidráulicos para combater os processos erosivos. Todavia, grande parte das aplicações conhecidas para essa técnica são no contexto de barragens com fundação em topo rochoso, nas quais os problemas a serem corrigidos são diversas descontinuidades mais persistentes (fraturas, falhas) que podem colocar em risco todo o projeto.

No ambiente de mineração, barragens de rejeito e sedimentos são apoiadas majoritariamente em perfis de solos alterados, raramente atingindo uma condição de rocha sã. A ausência de estruturas geológicas da rocha matriz (foliação, fraturas) torna incomum a execução de linhas de injeção durante a construção das estruturas. Entretanto, na configuração geológica do Quadrilátero Ferrífero, em Minas Gerais, podem ser encontradas coberturas recentes do Cenozoico (colúvio, aluvião, canga detrito-laterítica) em áreas de potencial implantação de barramentos. Dessa observação retoma-se a necessidade de avaliar soluções capazes de tratar essa deficiência sem que seja necessária a remoção completa do material.

Com esse objetivo, o projeto executivo para implantação de uma barragem de enrocamento para a contenção de sedimentos no Quadrilátero Ferrífero, contou com o dimensionamento de linhas de injeção de calda de cimento, retratadas como um estudo de caso para este trabalho. Em termos geológico locais, a canga detrito-laterítica apresentava-se através de uma crosta superficial compacta de espessura variável entre 0,50 m e 1,5 m aproximadamente, com continuidade lateral e transversal praticamente em toda a geometria de construção da barragem.

No trecho do vale, que compõe o piso da fundação, optou-se por remover mecanicamente através de um trator tipo D-10 e rompedor hidráulico todo o material ferruginoso detrítico-laterítico, assentando o maciço sobre a camada de saprólito de filito exposta. Todavia, na região da ombreira esquerda, as condições de estabilidade da encosta não permitiam o avanço da escavação ou a execução de *cut-offs*. Analogamente, no trecho da ombreira direita, a existência de uma interferência com a estrutura de concreto do sistema extravasor também não permitia a remoção completa do horizonte. Dessa maneira, para as duas ombreiras recorreu-se ao tratamento por injeção de calda de cimento.

Em campo, as atividades foram executadas com sucesso durante o período de estiagem de 2023. A Figura 1 ilustra a área de implantação da estrutura antes do início dos trabalhos de injeções de calda de cimento.



Figura 1. Vista aérea da fundação com exposição do saprólito de filito, e com detalhe tracejado em amarelo indicando a área de tratamento.

Em continuação, apresentam-se os principais elementos para o entendimento da solução. Inicialmente, é apresentada a caracterização geológico-geotécnica da canga em questão. Na sequência, são discutidas as definições advindas do projeto executivo, que tratam sobre a calda de cimento, o posicionamento e

profundidade dos furos, bem como as recomendações construtivas. A execução da solução é então abordada, qualitativamente a partir de imagens e descrições dos processos, e quantitativamente pela apresentação dos resultados. Por fim, são apresentadas considerações a respeito da comparação entre projetado e executado, sinalizando elementos que podem contribuir para a avaliação de efetividade dessa técnica para problemas similares em situações da engenharia geotécnica.

2 CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICA

No contexto geológico regional do Quadrilátero Ferrífero (QFe), a área de estudo se insere no extremo sul da Sinclinal Moeda (Figura 2), localizando-se na interface de depósitos detríticos recentes, como no caso de colúvios, chapadas de canga, formação ferrífera bandada, e a maiores profundidades, sobre filitos e xistos pertencentes ao Supergrupo Minas.

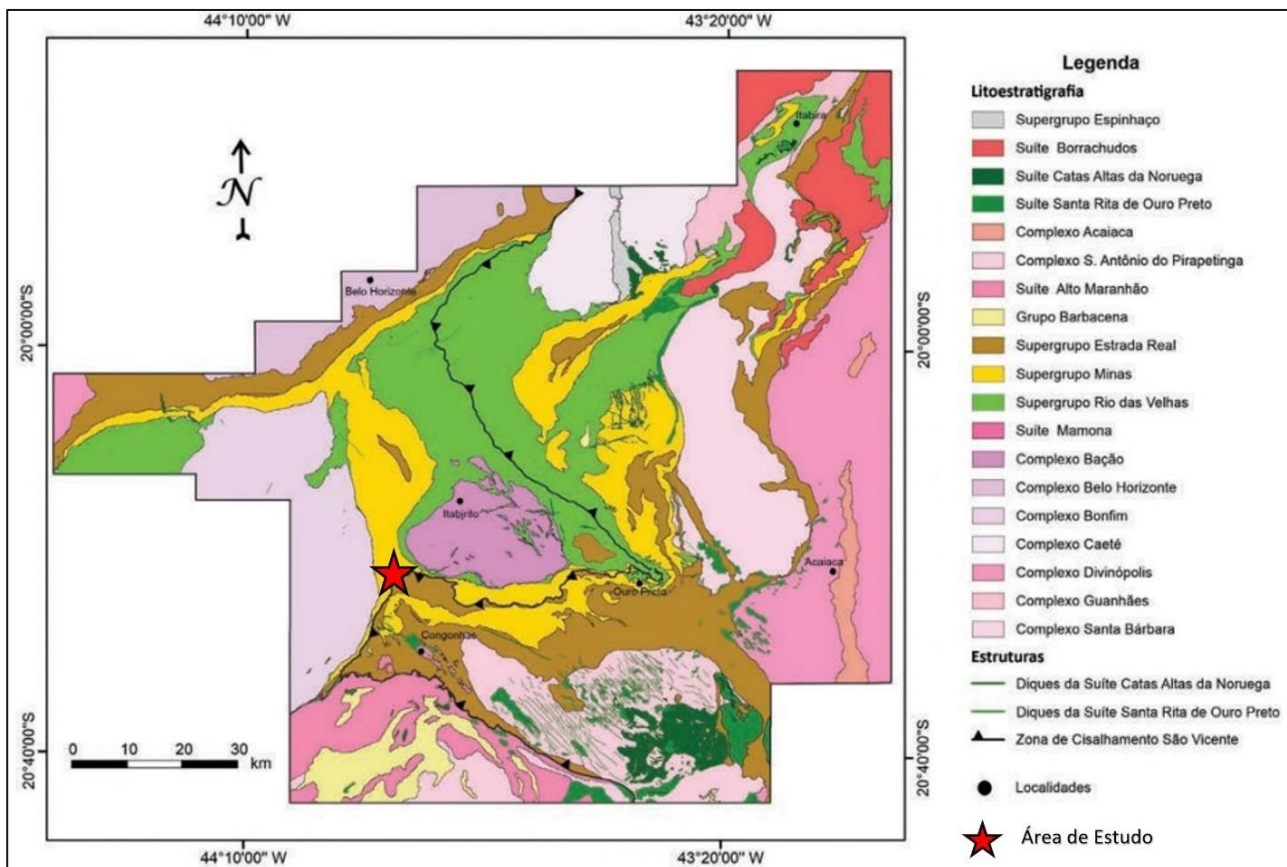


Figura 2. Mapa geológico do Quadrilátero Ferrífero, com detalhe em vermelho indicando a área de estudo no extremo Sul da Sinclinal Moeda. Modificado de Endo *et al.* (2019a).

Conceitualmente o termo canga é descrito por diversos autores (Dorr, 1964; 1969; McFarlane, 1976; Meyer, 1997), como formações superficiais compostas por fragmentos de outras rochas adjacentes, cimentadas por limonita e hematita, originadas a partir de transporte, deposição, processos químicos e mecânicos, bem como do enriquecimento supergênico de Fe, Al e outros elementos residuais, conforme verificado em regiões tropicais do Brasil e do mundo.

A canga remanescente tratada e exposta nos taludes das ombreiras esquerda e direita, conforme se observa na Figura 3, exibe macroscopicamente uma cor marrom-avermelhado. Apresenta porosidade, matriz de textura argilo-arenosa a areno-argilosa, com raros traços de areia grossa de quartzo, e fragmentos detríticos lateríticos de composição ferruginosa (formação ferrífera, hematita), de tamanho variados entre 20 e 60 mm, angulosos a sub-angulosos, esparsos sobre sua matriz fortemente cimentada por óxidos e hidróxidos de ferro, que reflete em um material duro e compacto, atingindo o impenetrável quando executa sondagem percussiva.

Em termos mecânicos baseado na classificação da (ISRM, 1981), com o uso do martelo de geólogo, define-se a canga de resistência média (R3) e resistente (R4), incluindo como material de 1ª e 2ª categoria.



Figura 3. Visada para a exposição da canga detrito-laterítica em contato geológico com o saprólito de filito.

3 PROJETO DETALHADO

A distribuição dos furos de injeção na face do maciço de canga detrito laterítico, na ombreira esquerda e direita, foi definida com base nos arranjos propostos por Xanthakos *et al.* (1994). Esses arranjos indicam uma malha retangular de pontos de injeção primários que, a depender do volume de calda absorvido, é complementada por furos secundários intermediários. A profundidade de cada furo foi feita pela modelagem geológica de subsuperfície, a partir de investigações realizadas durante o histórico da estrutura, buscando que cada furo atinja apenas as camadas de interesse.

A distância entre os furos primários foi especificada tomando como base as características granulométricas dos materiais alvo das injeções, seguindo recomendações de Xanthakos *et al.* (1994). A canga detrito laterítica, conforme discutido, possui granulometria bastante heterogênea, textura variável entre argilo-arenosa e areno-argilosa, com presença de pedregulhos cimentados por óxidos e hidróxidos de ferro. Dessa forma, propôs-se a realização de linhas de furos primários com distanciamento de 3,0 m e, quando a absorção em algum trecho for superior a 50 kg de cimento por metro, conforme recomendação de Naresi (2011), seriam executados furos secundários (R igual a 1,5 m).

O material de injeção para tratamento foi definido como calda (ou argamassa) de cimento, que compreende uma mistura de cimento e água. Conforme exposto por Xanthakos *et al.* (1994), esse material pertence à categoria de argamassas particuladas possuindo um comportamento reológico de fluidos de Binghamian. A principal característica que determina suas propriedades como estabilidade, fluidez, resistência e durabilidade é a proporção (traço) entre água e cimento. As injeções foram projetadas para execução em duas fases após o preenchimento da bainha. A primeira utilizando calda com relação A/C (água/cimento) de 1:1. A segunda dispendo de uma relação A/C mais reduzida, igual 0,7:1. Esse faseamento é recomendável para garantir o atingimento de profundidades maiores e para assegurar um melhor preenchimento dos poros e/ou fraturas existente na canga. A Figura 5 e a Figura 6 abaixo ilustram, respectivamente, o arranjo de furos propostos para cada ombreira.

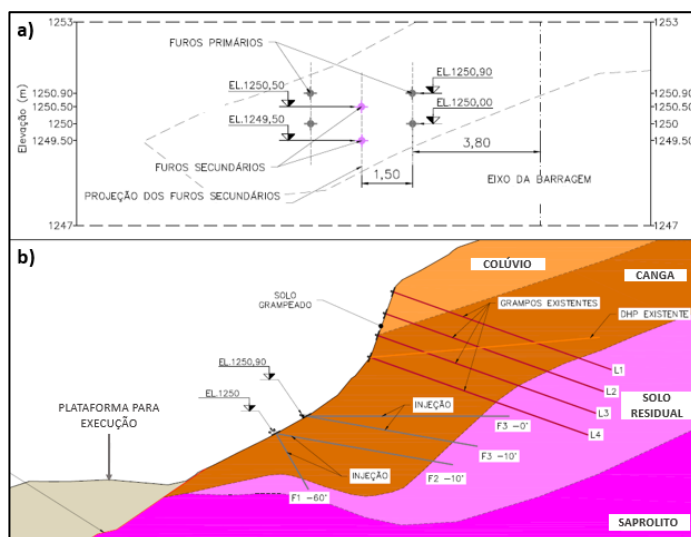


Figura 5. A) Vista frontal em planta do arranjo de projeto para os furos de injeções na ombreira esquerda. B) Seção geológica local com a exibição das unidades remanescentes.

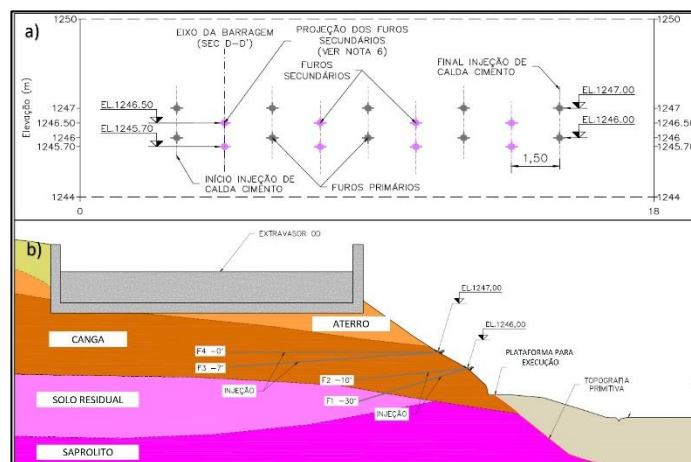


Figura 6. A) Vista frontal em planta do arranjo de projeto para os furos de injeções na ombreira. B) Seção geológica local com a exibição das unidades remanescentes.

Para evitar fraturamento hidráulico, foi proposta uma limitação da pressão de injeção igual a 2 vezes a tensão principal menor média. Esta foi calculada pela equação (1), que envolve a profundidade de injeção (L), a inclinação do furo em relação à horizontal ($\alpha = 60^\circ$), o coeficiente de empuxo em repouso (adotado $k_0 = 0,5$ m) e o peso específico ($\gamma = 23 \text{ kN/m}^3$) da canga detrito laterítica.

$$P(\text{kPa}) = 2 * \sigma_3 = 2 * (L \sin \alpha * k_0 * \gamma) = 20 * L \quad (1)$$

Por fim, definiu-se que a taxa de injeção nas duas ombreiras poderia variar entre 0,2 e 1,8 m³/h a depender das condições de permeabilidade do meio. O valor máximo admissível seria aquele produzido pela pressão de injeção máxima estabelecida. O controle de qualidade da execução das injeções de calda de cimento foi concebido a partir de ensaios do tipo Lugeon, conforme procedimento padrão ABGE (1975) e ensaios de infiltração, conforme procedimento padrão ABGE (1996), e de acordo com o apresentado na Tabela 1. Segundo Fell *et al.* (2005), sob condições ideais (por exemplo, meio homogêneo e isotrópico), um Lugeon (1LU) é equivalente a 1,3E-05 cm/s (ou 1,3E-07 m/s).

Tabela 1. Estágios e pressões para realização do ensaio Lugeon.

Valor de Lugeon	Classificação	Condutividade Hidráulica (cm/s)	Rock discontinuity condition
<1	Muito baixa	< 1E-05	Muito apertada

Valor de Lugeon	Classificação	Condutividade Hidráulica (cm/s)	Rock discontinuity condition
1 – 5	Baixa	1E-05 – 6E-05	Apertada
5 – 15	Moderada	6E-05 – 2E-04	Pouco parcialmente aberta
15 – 50	Média	2E-04 – 6E-04	Alguma abertura
50 – 100	Alta	6E-04 – 1E-03	Muito aberta
>100	Muito alta	>1E-03	Aberta com espaço ou vazios

Para determinar a estanqueidade é calculada o parâmetro “UA”, conforme equação (2), que considera absorção (A), tempo (t), profundidade (l) e pressão (p). Trechos com “UA” inferiores a 1,0 seriam considerados estanques.

$$UA = \frac{A \text{ (litros por 10 minutos)}}{t \text{ (minutos)} * l \text{ (metros)} * p \left(\frac{Kgf}{cm^2}\right)} \quad (2)$$

4 EXECUÇÃO DA OBRA

As injeções de calda de cimento foram executadas durante o período de estiagem de 2023. Para atingir as elevações necessárias, foram usadas plataformas em aterro compactado construído com materiais de sacrifício. O equipamento utilizado foi a Perfuratriz PWH-5000 com rotator pneumático (martelo de fundo). A Figura 7 e a Figura 8 apresentam registros fotográficos da execução na ombreira esquerda e direita, respectivamente. Observou-se que as profundidades previstas em projeto, definidas a partir de investigações geológicas na área, se confirmaram, com os litotipos de interesse sendo encontrados nos trechos próximos aos esperados.

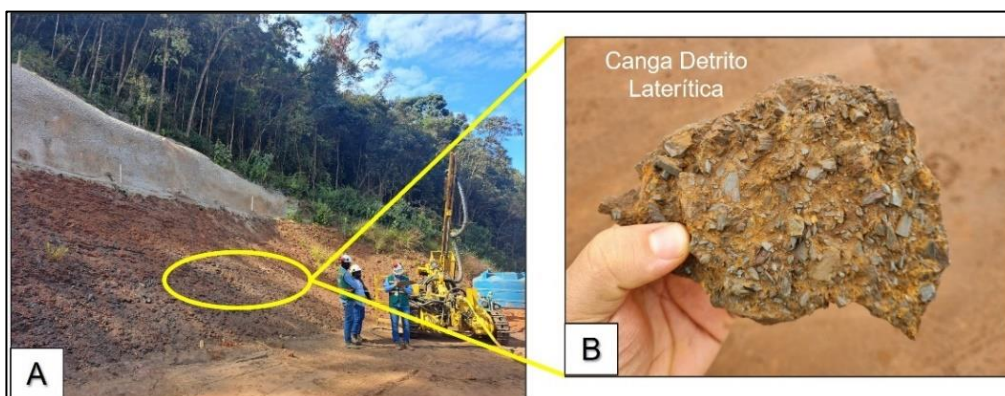


Figura 7. A) Vista da praça de aterro compactado utilizado como plataforma de apoio para a execução das injeções na ombreira esquerda. B) Amostra de mão da canga detrito-laterítica tratada.

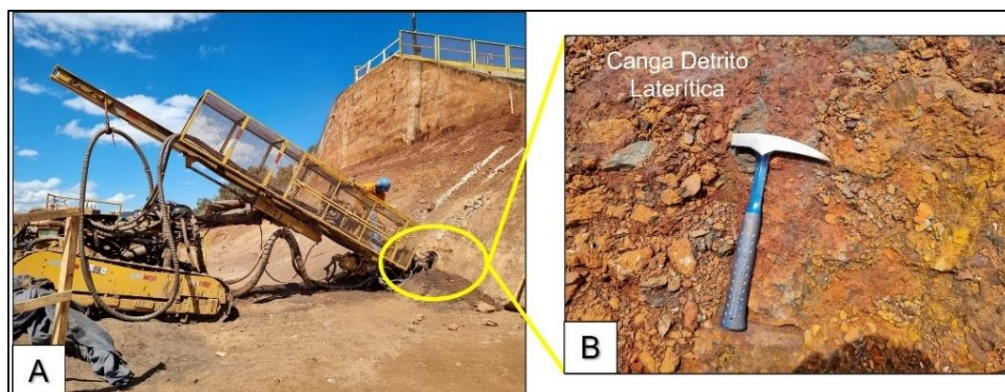


Figura 8. A) Visada para a praça de aterro compactado utilizado como plataforma de apoio para a execução das injeções na ombreira direita. B) Amostra de mão de canga detrito-laterítica tratada.

Para determinar a condutividade hidráulica preliminar do maciço antes da fase tratamento, foram realizados ensaios exploratórios sob pressão tipo Lugeon quando identificado o litotipo canga, e para horizontes inconsolidados como aterro, e solos transportados (colúvio), foram executados ensaios de infiltração pelo método de carga constante. Os furos de sondagem escolhidos para a análise de pré-tratamento foram aqueles da extremidade e/ou na porção central limitados a região de tratamento.

Após a execução dos serviços de injeções com calda de cimento, a Figura 9 apresenta os resultados do consumo e calda de cimento em kg/m para cada furo da ombreira esquerda. A Figura 10 demonstra informação análoga para a ombreira direita.

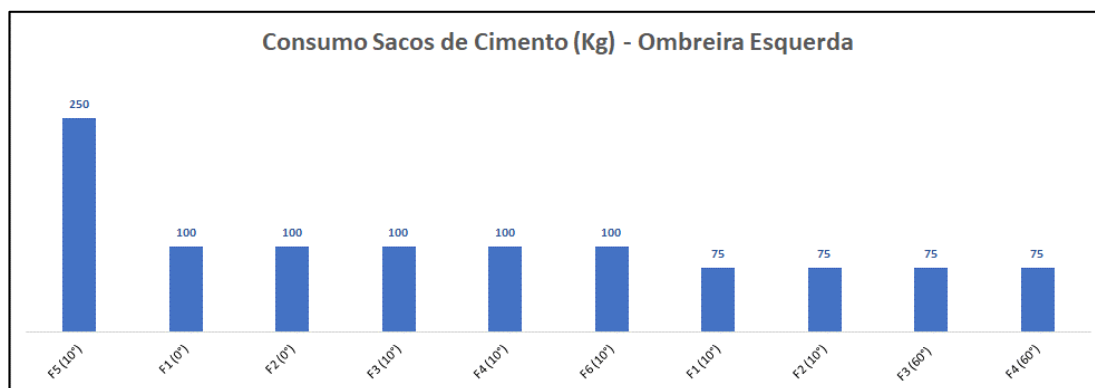


Figura 9. Consumo de calda de cimento no talude da ombreira esquerda.

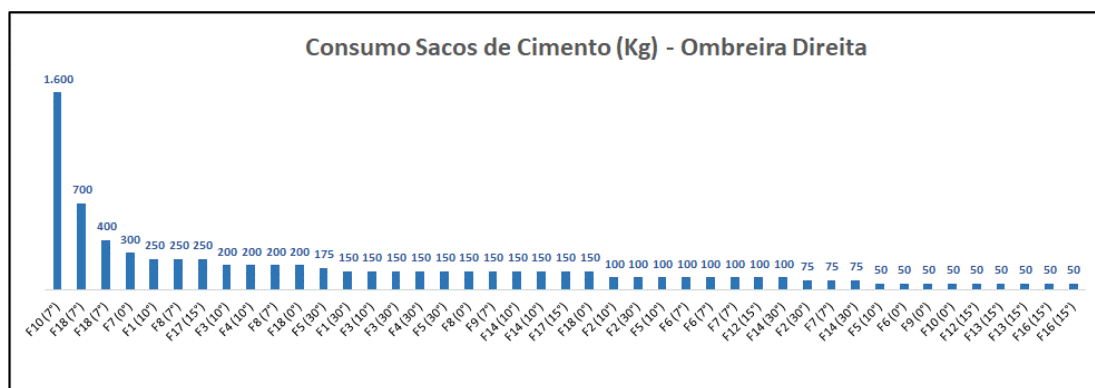


Figura 10. Consumo de calda de cimento no talude da ombreira direita.

De forma geral, todos os furos primários e secundários foram realizados conforme especificado no projeto, com ajustes nas dosagens quando necessário. Após análises dos resultados, nota-se baixas taxas de infiltração nos furos com absorção inferior a 150 kg/m, devido, possivelmente, às características geológicas locais dos maciços com baixa porosidade e conectividade entre os poros da canga, o que consiste em um obstáculo em relação à transmissão da calda de cimento mais densa e grossa.

Para os consumos superiores a 150 kg/m, especificamente nos furos da ombreira direita, conclui-se que a absorção é resultado da presença de materiais antrópicos remanescentes, conforme demonstrado na seção geológica (Figura 6). No caso do furo F5 (10°) na ombreira esquerda, o consumo excedente está relacionado às fraturas naturais e/ou pequenas aberturas que foram tratadas.

Seguindo as análises, a Tabela 2 indica os resultados obtidos de estanqueidade dos maciços (ombreira esquerda e direita), através da condutividade hidráulica pós-tratamento. Com base nesses valores após a injeção de calda de cimento na fundação, conclui-se que houve redução na permeabilidade e eficácia dos serviços de injeção, apontando para uma distribuição mais homogênea e isotrópica da tendência de fluxo por percolação, equivalente a uma condutividade hidráulica do conjunto na ordem de 10^{-5} cm/s. Além disso, é importante ressaltar as características favoráveis das ombreiras, onde sotoposto a camada de canga, ocorre o solo residual e saprólito de filito, material que colabora significativamente também para baixos valores de condutividade hidráulica.

Tabela 2. Resultados com os valores de Lugeon (LU) obtidos nos ensaios pós-tratamento.

Furo	Prof. (m)	UA	Litotipo
EPA-F2-45° (OD)	3,40	0,85	Canga detrítico-laterítica
EPA-F4A-45° (OD)	3,00	0,28	Aterro de matriz argila siltosa pouca arenosa com matéria orgânica e pedregulhos
EPA-F4-30° (OE)	4,00	0,08	Canga detrítico-laterítica

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir do exposto, conclui-se que as injeções de calda de cimento para o tratamento da canga detrítico-laterítica se mostraram viáveis, e que os critérios de projeto adotados se confirmaram efetivos em campo. As ombreiras foram caracterizadas como uma condutividade hidráulica adequada e consideradas estanques pelo controle tecnológico, o que significa que a calda percolou pelas fraturas e/ou poros existentes, transformando a fundação de apoio lateral da barragem em um meio mais homogêneo e isotrópico.

É importante salientar, contudo, que a aplicação das injeções não deve substituir a escavação do horizonte como principal solução de engenharia para quando são identificados materiais de baixa competência mecânica em áreas de fundação de barragem. Sua execução é recomendada para trechos específicos, em pontos cujas condições de contorno não permitem que a remoção seja adotada como alternativa.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Tetra Tech e à VALE pela oportunidade de desenvolver este trabalho e por fomentar o avanço científico na área de engenharia.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Associação Brasileira de Geologia de Engenharia – ABGE (1975): Ensaios de Permeabilidade em Solos – Orientações para sua Execução no Campo – 3a Edição, São Paulo.
- Associação Brasileira de Geologia de Engenharia – ABGE (1975): Ensaios de Perda D'água sob Pressão – Diretrizes – Boletim 02, São Paulo.
- Dorr, J. v.N. (1964). Supergênese iron ores of Minas Gerais, Brazil. *Economic Geology*, 59 (7): 1203-1240.
- Dorr, J.v.N. (1969). Physiographic, stratigraphic and structural development of Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil. USGS. Prof. Paper 641-A. Washington. 110 p.
- Endo I., Delgado C. E. R. Oliveira M.T. A., Suita; M. T. de F., Barbosa M. S. C., Lana C. E., Moura L. G. de B. de. (2019a). Estratigrafia e Arcabouço Estrutural do Quadrilátero Ferrífero: Nota Explicativa do Mapa Geológico do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil. Escola de Minas – UFOP.
- Fell, R., Macgregor, P., Stapledon, D., Bell, G. (2005). *Geotechnical Engineering of Dams*. Taylor & Francis. London. UK.
- Isrm (1981). *Rock Characterization Testing and Monitoring*. Brown, E., Ed. Pergamon Press, Oxford, 211 p.
- Mcfarlane, M.J. (1976). *Laterite and Landscape*. London: Academic Press. 151p.
- Meyer, R. (1997). *Paleolaterites and Paleosols*. Rotterdam: Balkema, A.A. 151p.
- Naresi, L.A. (2011). *Infraestrutura – projetos, custos e construção*. Editora Pini, nº 7, ano 1.
- Xanthakos, P.P., Abramson, L.W., Bruce, D.A. (1994). *Ground Control and Improvement*. Wiley.