

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2024/287

Avaliação Geológica-Geotécnica para Tratamento de Fundação na Descaracterização de uma Barragem de Rejeito do Quadrilátero Ferrífero

Adriana Gomes Ribeiro

Engenheira geotécnica, Vale S/A, Belo Horizonte, Brasil, adriana.ribeiro1@vale.com

Vivian Souza Quito

Engenheira geotécnica, Vale S/A, Belo Horizonte, Brasil, c0635423@vale.com

Fernando Eduardo Rodrigues Marques

Engenheiro geotécnico, Universidade do Estado do Rio de Janeiro – UERJ; Geocoba Projetos de Engenharia, Rio de Janeiro, Brasil, fem@geocoba.com

Renata Mattos Sampaio de Araujo Andrade

Engenheira geotécnica, Vale S/A, Belo Horizonte, Brasil, renata.mattos.sampaio@vale.com

Frank Marcos da Silva Pereira

Engenheiro geotécnico, Vale S/A, Conselheiro Lafaiete, Brasil, frank.pereira@vale.com

RESUMO: No presente estudo será apresentada a descaracterização de uma barragem de rejeito alteada à montante por meio da execução de um aterro de descaracterização em estéril em seu maciço principal. Com a finalidade de investigar as condições geológico-geotécnicas da região da fundação do aterro de descaracterização em estéril foi desenvolvida uma vasta campanha de investigações, contemplando ensaios in situ, furos de sondagem e coleta de amostras para a realização de ensaios de laboratório. A motivação de uma campanha complementar das investigações foi o resultado de um furo de sondagem realizado em 1996, localizado na ombreira esquerda e à jusante do maciço principal, no qual foi identificada uma espessa camada de solo de baixa resistência cujo índice de resistência à penetração do solo (NSPT) encontrado foi inferior a 10. Foram identificados solos moles de origem aluvionares e coluvionares a jusante do maciço principal, região na qual passava um córrego, que requerem um melhor entendimento do seu comportamento geotécnico para o projeto de reforço deste maciço e, por isso, foram realizadas novas investigações concentradas a jusante da estrutura. A definição do tratamento de fundação é, naturalmente, interdependente da volumetria do aterro de reforço e das condições geológico-geotécnicas de fundação, requerendo, para uma otimização do projeto de tratamento de fundação, uma também otimização da geometria do reforço.

PALAVRAS-CHAVE: Descaracterização, barragem, fundação, investigações.

ABSTRACT: In the present study, the decharacterization of a tailings dam raised upstream will be presented through the execution of a sterile reinforcement landfill in its main massif. To investigate the geological-geotechnical conditions in the region where the decharacterization reinforcement should be built in natural terrain downstream of the dam, a vast campaign of geological-geotechnical investigations was developed, including in situ geotechnical testing, boreholes and extracting of samples for laboratory tests. The motivation for carrying out the field investigations was the result of a borehole carried out in 1996, located in the left shoulder and downstream of the main massif of the dam, in which a thick layer of soil of low resistance with a number of blows less than 10 was identified. Soft soils of alluvial and colluvial origin were identified downstream of the main massif that require a better understanding of their geotechnical behavior for the reinforcement project of this massif, so new investigations were carried out concentrated downstream of the structure. The definition of the foundation treatment is, of course, interdependent on the volume of the

reinforcement embankment and the geological-geotechnical conditions of the foundation, requiring, for an optimization of the foundation treatment project, an optimization of the reinforcement geometry as well.

KEYWORDS: Decharacterization, dam, foundation, investigations.

1 INTRODUÇÃO

A descaracterização de uma barragem de rejeito à montante é uma atividade que não era habitual na rotina de uma mineradora, porém após os últimos acontecimentos de casos de rompimentos de estruturas com estas características, a ANM através da Resolução N°13 de 2019 proibiu a instalação e operação destas barragens em nossos setores.

No processo de descaracterização a estrutura deixa de possuir características ou exercer atividades de barragem e engloba 4 etapas: o descomissionamento que é o encerramento das operações com a retirada das infraestruturas associadas, como por exemplo: espigotes e tubulações; o controle hidrológico e hidrogeológico; a estabilização física e química a longo prazo da estrutura que permanecer no local e o monitoramento por um período mínimo de 2 anos (Resolução 95/2022 – ANM).

Conforme preconizado nos decretos da ANM, é permitido manter estrutura remanescente no local desde que atenda o processo de descaracterização citado acima.

A estrutura abordada neste artigo está em processo de descaracterização e a solução consiste na construção de um aterro de descaracterização, cujas etapas englobam: tratamento de fundação a jusante do maciço principal, aterro de descaracterização na estrutura para retirar as características de barragem à montante e para aumentar o fator de segurança conforme preconizado na Resolução 95/2022, regreide e execução de canais no reservatório para não ter aporte de água na estrutura, revegetação e instrumentação para monitoramento.

A partir das análises das investigações geológicas-geotécnicas existentes foi constatada a necessidade de fazer um tratamento da fundação à jusante da estrutura antes de fazer o reforço. E para o desenvolvimento do projeto foram realizadas novas investigações para ter um embasamento técnico sólido para prosseguir com a descaracterização.

As investigações apontaram que o projeto original do aterro de descaracterização e do tratamento de fundação poderiam ter as suas seções otimizadas gerando maior segurança, menor tempo e otimização de recursos para a obra de descaracterização. O tratamento de fundação é interdependente da carga do reforço, logo, otimizar o tratamento de fundação depende de otimizar a seção do reforço.

2 DESCARACTERIZAÇÃO DE BARRAGENS

Barragens de Mineração são barragens, barramentos, diques, cavas com barramentos construídos, associados às atividades desenvolvidas com base em direito minerário, construídos em cota superior à da topografia original do terreno, utilizados em caráter temporário ou definitivo para fins de contenção, acumulação, decantação ou descarga de rejeitos ou de sedimentos provenientes de atividades de mineração com ou sem captação de água associada, compreendendo a estrutura do barramento e suas estruturas associadas.

Nestas barragens são dispostos os resíduos de mineração que são um subproduto e se não forem gerenciados de maneira responsável e segura podem representar riscos ao meio ambiente e à sociedade. As falhas que ocorrerem nestas estruturas nos últimos 40 anos ilustram esses riscos potenciais, que na maioria das vezes resultaram em danos à infraestrutura, perda de ecossistemas, fatalidades e deslocamento de comunidades (ICMM, 2021).

Os resíduos da mineração são dispostos em barramentos, podendo estes barramentos ser: de concreto, com um dique de partida inicial em solo compactado e alteamentos posteriores também em solo compactado, e com um dique de partida inicial em solo compactado e alteamentos posteriores com a porção mais grossa do próprio rejeito, através de ciclonagem.

A construção das barragens de rejeito é realizada em etapas, as quais, acompanham o ritmo de lavra, desta forma à medida que são gerados rejeitos, podem ser executados os alteamentos para aumentar a

capacidade de reservação (Duarte, 2008). Os métodos construtivos destas barragens com o próprio rejeito podem ser classificados como: alteadas pelo método de montante, alteadas pelo método de jusante e alteadas pelo método de linha de centro.

As barragens alteadas a montante consistem em estruturas cujos alteamentos são apoiados sobre o próprio rejeito da barragem, conforme representado na Figura 1.

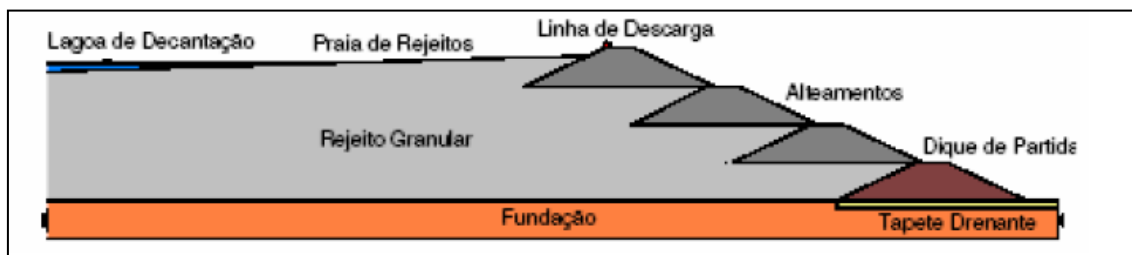


Figura 1. Método construtivo de montante (ALBUQUERQUE FILHO, 2004)

Conforme vem sendo muito discutido atualmente no meio acadêmico, após os últimos incidentes envolvendo barragens de rejeito, as barragens construídas pelo método à montante devem ser descaracterizadas.

Descaracterizar uma barragem significa projetá-la para não receber, permanentemente, aporte de rejeitos e/ou sedimentos oriundos de sua atividade operacional, a qual deixa de possuir características ou de exercer função de barragem, sendo descomissionada, tendo seu aporte de água no reservatório reduzido ou eliminado, ter estabilidade física e química e ser monitorada por um tempo mínimo de 2 anos.

3 AVALIAÇÃO DE INVESTIGAÇÕES GEOLÓGICO-GEOTÉCNICAS

3.1 Investigações geológico-geotécnicas

As investigações geológico-geotécnicas são procedimentos e técnicas de campo e laboratório visando obter informações do meio físico de interesse aos estudos de projeto, construção, operação e manutenção de obra civil, minerária ou ambiental. As investigações incluem os ensaios realizados in situ e em laboratório. Com estas campanhas é pressuposto o desenvolvimento de uma campanha de sondagens e ensaios e/ou um levantamento geofísico.

3.2 Investigações geológicas-geotécnicas na barragem

3.1.1 Seções geológicas

Conforme já citado, após as análises das investigações geológicas-geotécnicas verificou-se a necessidade de novas investigações para o desenvolvimento do projeto do tratamento de fundação à jusante do maciço principal da barragem para a execução do reforço de descaracterização.

O que motivou esta nova campanha de investigação foi uma sondagem nomeada como SP-113 realizada antes da execução do projeto inicial da barragem, localizada à jusante do maciço principal na ombreira esquerda (Figura 2) onde o resultado apresentou uma espessa camada de solo de baixa resistência com número de golpes (N_{SPT}) inferiores a 10, descrito como aluvião argiloso, “com detritos vegetais e pedregulhos finos dispersos, cor predominantemente vermelha, mas também amarela e cinza, consistência mole a muito mole, eventualmente média.

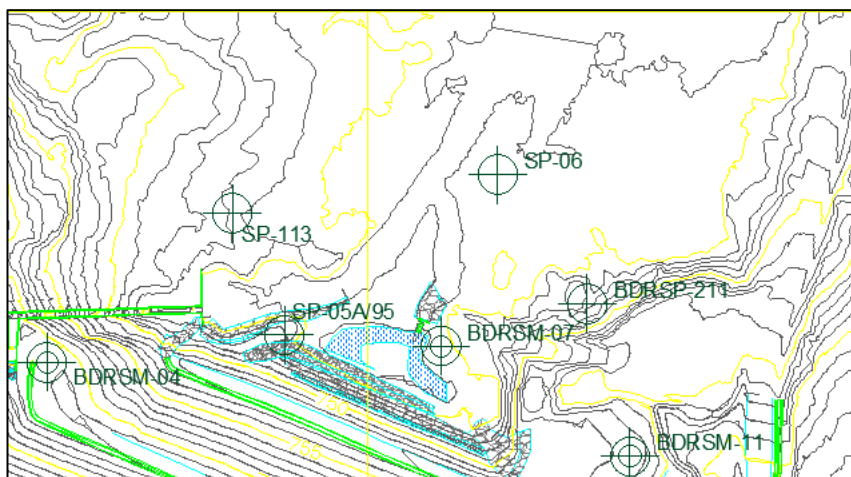


Figura 2. Campanha de sondagem para a elaboração do projeto.

Para esta avaliação complementar foram executadas 11 sondagens a percussão (Figura 3) com o objetivo de melhorar o conhecimento da fundação a jusante do maciço principal (WSP-01, WSP-02, WSP-03, WSP-04, WSP-05, WSP-06, WSP-07, WSP-08, WSP-09, WSP-10 e WSP-12).

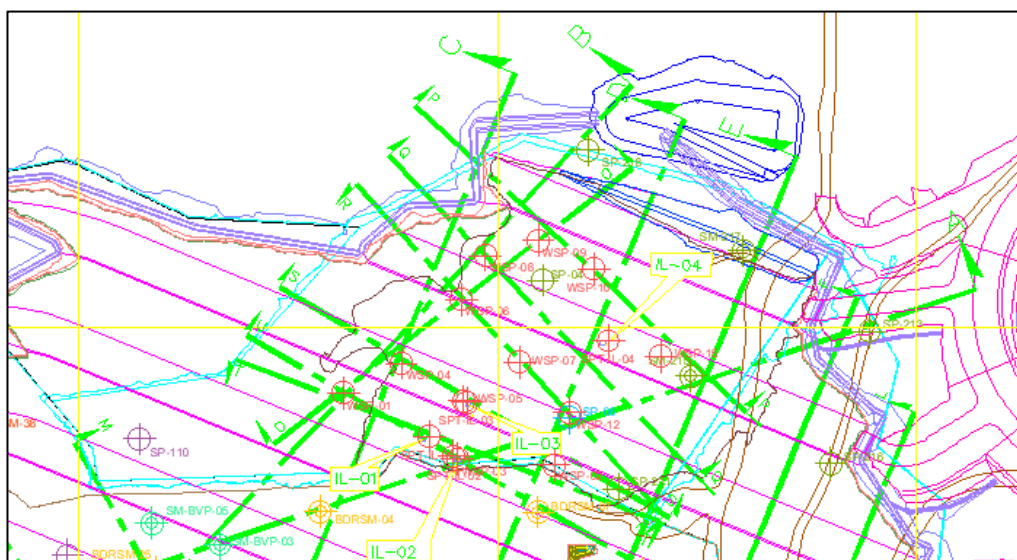


Figura 3. Nova campanha de sondagens e locação das seções geológicas (2022/2023).

A partir do resultado das sondagens foi possível constatar a jusante do maciço principal a existência de camadas de solo com N_{SPT} abaixo de 8 golpes em regiões pontuais, sendo caracterizados como depósitos aluvionares restritos a ombreira esquerda e depósitos coluvionares originários da erosão/deposição da rocha presente na margem esquerda, conforme apresentado na seção representada na Figura 4.

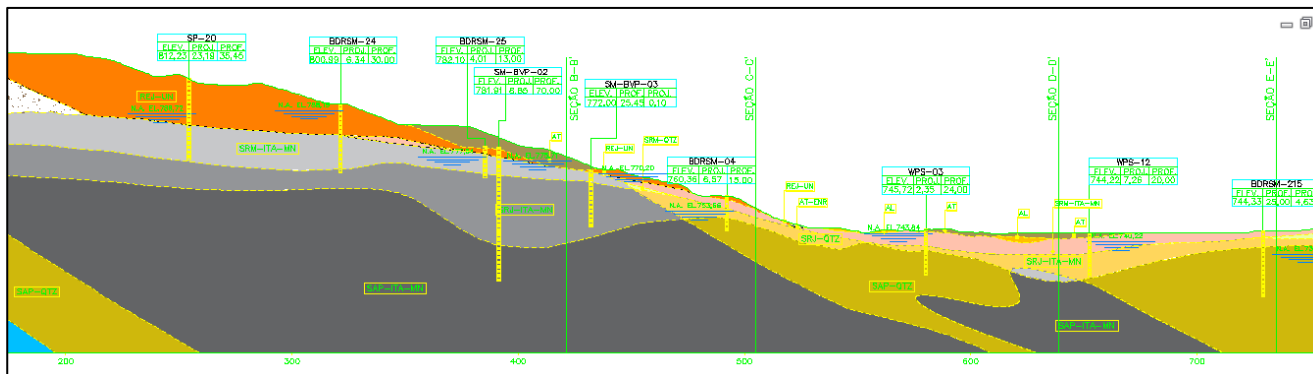


Figura 4. Seção geológica A-A'.

Para confirmação da existência de depósitos aluvionares e coluvionares e o contato com os litotipos existentes e subsidiar o projeto de tratamento do reforço a jusante do maciço principal, foram programados furos de sondagem à percussão (SP). Além das sondagens de SPT (Sondagem de Simples Reconhecimento), foram realizados também 4 ilhas de investigações contemplando os ensaios de piezocone (CPTu), de palheta (*Vane Test* – VT), de dilatométrico de Marchetti (DMT) e retirada de amostras com o amostrador Shelby (SH) para ensaios de laboratório (Figura 3).

A partir dos resultados obtidos nas sondagens das ilhas a jusante do maciço principal, foi possível confirmar a existência de camadas de solo de baixa competência em regiões pontuais e não em toda a região de tratamento conforme análise das investigações anteriores. Os solos foram caracterizados como depósitos aluvionares e depósitos coluvionares originários da erosão/deposição da rocha (quartzo mica-xisto) presente na margem esquerda. Essa baixa competência é, por vezes, mascarada pela existência de um horizonte resistente (com $N_{SPT} > 15$) de pedregulhos e fragmentos de canga, que ocorrem geralmente entre 4 m e 6 m de profundidade nos furos. Estes depósitos apresentam profundidade média de 7 m, podendo atingir até 9 m. Abaixo desses depósitos sedimentares não-consolidados, ocorre o contato de solo residual maduro e solo residual jovem de Quartzo mica-xisto e Itabirito manganêsífero (Figura 5).

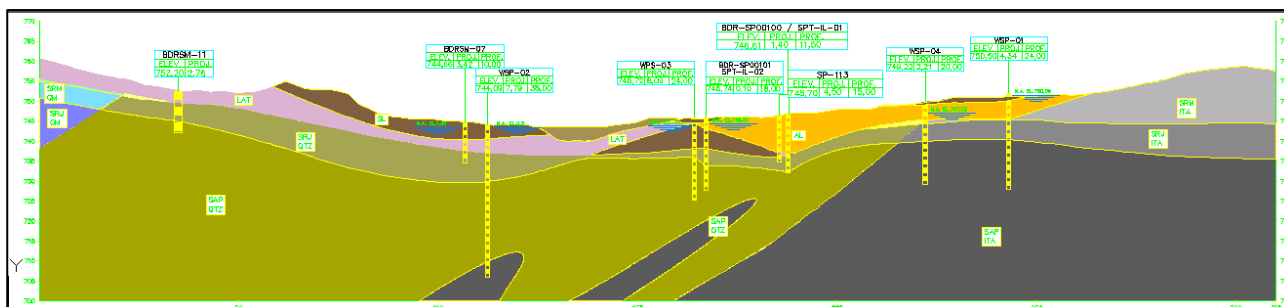


Figura 5. Seção U-U'.

As novas sondagens auxiliaram em um entendimento mais aperfeiçoado da região à jusante do maciço principal da barragem, proporcionando o devido subsídio para a otimização do projeto do reforço e do tratamento de fundação da estrutura.

3 PROJETO DO TRATAMENTO DE FUNDAÇÃO

O projeto original do reforço e tratamento de fundação da barragem elaborados em 2022 sofreram revisões após os resultados das investigações geológicas-geotécnicas apresentadas no item anterior.

Na época o projeto estava em desenvolvimento concomitantemente com a execução das investigações complementares que forneceriam dados para elaboração dos modelos constitutivos das formações geológicas da fundação do reforço.

A análise das investigações permitiu uma otimização considerável na seção do aterro de descaracterização, reduzindo o volume de aproximadamente 5,5 Mm³ para um volume aproximado de 2 Mm³. Por consequência foi possível otimizar também o tratamento de fundação pois com a redução da carga do aterro de reforço a estrutura sofrerá tensões e recalques menores, conforme será apresentado abaixo.

A geometria inicial definida em projeto (volume de aproximadamente 5,5 Mm³) implicava num carregamento demasiado elevado sobre o terreno de fundação natural a jusante, assim como sobre o próprio corpo do maciço atual da estrutura e, conseqüentemente, recalques demasiado elevados, com valor máximo próximo de 70 cm (ver linha a traço interrompido vermelho na Figura 9).

De modo a controlar os recalques ao nível da fundação do aterro de reforço foi então definido um tratamento de fundação que contemplava a escavação e substituição de solos até uma profundidade de 4,0 m (sendo que essa escavação tinha início a uma distância de 20 m do pé do maciço atual) e a execução de um conjunto de estacas de *jet grouting* com 90 cm de diâmetro, de modo a melhorar as características mecânicas em profundidade. Com essa solução de tratamento de fundação conseguia-se uma redução do nível de recalques na região a jusante do maciço atual, evidenciada pela linha a traço contínuo vermelho na Figura 9. Apesar da redução nos recalques, o valor máximo ainda era da ordem de 60 cm, ocorrendo junto ao pé do maciço atual.

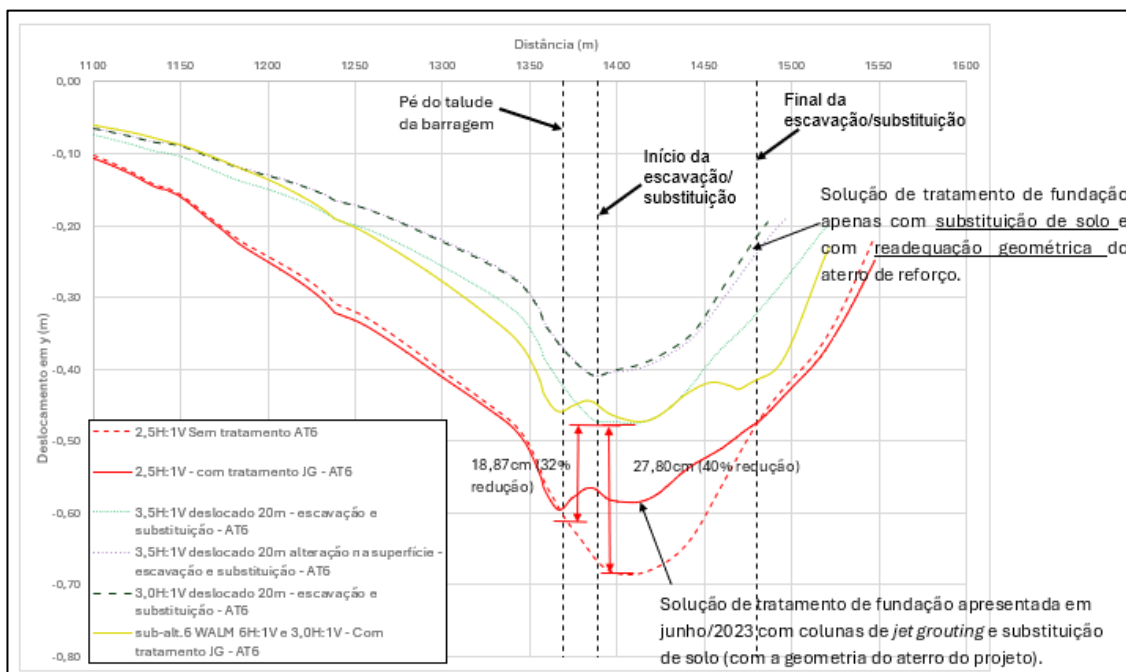


Figura 9. Recalques na fundação do aterro de reforço – seção D-D (seção central do maciço principal).

Em função dos valores ainda elevados dos recalques totais observados nos estudos de tensão-deformação desenvolvidos utilizando o programa Plaxis 2D e levando em consideração os dados das novas investigações geológico-geotécnicas foi realizado um estudo de sensibilidade estudando novas geometrias para o aterro de reforço, que permitissem reduzir o nível de carregamento da fundação, mas ao mesmo tempo garantindo os fatores de segurança admissíveis definidos em norma para os cenários de carregamento nas análises de equilíbrio limite. Os recalques obtidos para essas geometrias estão igualmente representados na Figura 9, o que evidencia a importância da otimização da geometria de reforço na resposta da fundação. Como os resultados apresentados na Figura 9 bem ilustram, a redução do carregamento transmitido pelo aterro de reforço, tem como impacto uma redução mais acentuada dos recalques do que a implantação de um tratamento de fundação complexo, dispendioso e demorado de executar como é a execução de colunas de *jet grouting*.

Após a realização desses primeiros estudos de sensibilidade em relação à geometria do aterro de reforço, foram definidas novas geometrias, com um contorno externo idêntico, mas diferindo um pouco no detalhe dos materiais aplicados. Essas diferenças no zoneamento, no entanto, não apresentam impactos de relevância no que diz respeito à magnitude nos recalques observados.

Os recalques obtidos para duas novas geometrias (curvas 1 e 2 nas Figuras 10 e 11) são representados nas Figuras 10 e 11, sendo que na Figura 10 se representam os recalques ao longo de uma linha de levantamento que acompanha a fundação do aterro de reforço incluindo ao longo da face do maciço atual) e na Figura 11 se representam os recalques ao longo de uma linha de levantamento horizontal, que passa inclusive na base do maciço atual. Nessas figuras são ainda representados os recalques observados na geometria mais reduzida do estudo de sensibilidade apresentado na Figura 9 (curva 4) e os recalques obtidos quando considerada a geometria inicial do aterro de reforço e o tratamento de fundação com as colunas de jet grouting (curva 3). Acrescente-se que nas geometrias correspondentes às curvas 1 e 2 consideram além de uma geometria reduzida do aterro de reforço (cerca de 1/3 do volume do projeto inicial) um tratamento de fundação com a escavação de 1,0 m da camada de solo superficial.

Como as Figuras 10 e 11 bem ilustram, a redução do nível de recalques com a redução da geometria do aterro de reforço é extremamente importante, mesmo considerando um aligeiramento do tratamento de fundação. Estes resultados mostram, portanto, que a incorporação dos dados geológico-geotécnicos complementares feitos ao projeto, aliados a uma otimização da geometria do aterro de reforço e, conseqüentemente, do tratamento de fundação, foram fundamentais para uma redefinição do projeto do aterro de reforço, definindo uma solução menos dispendiosa, com menos riscos associados, dado tratar-se de uma solução corrente de terraplenagem e, ao mesmo tempo, de mais rápida execução.

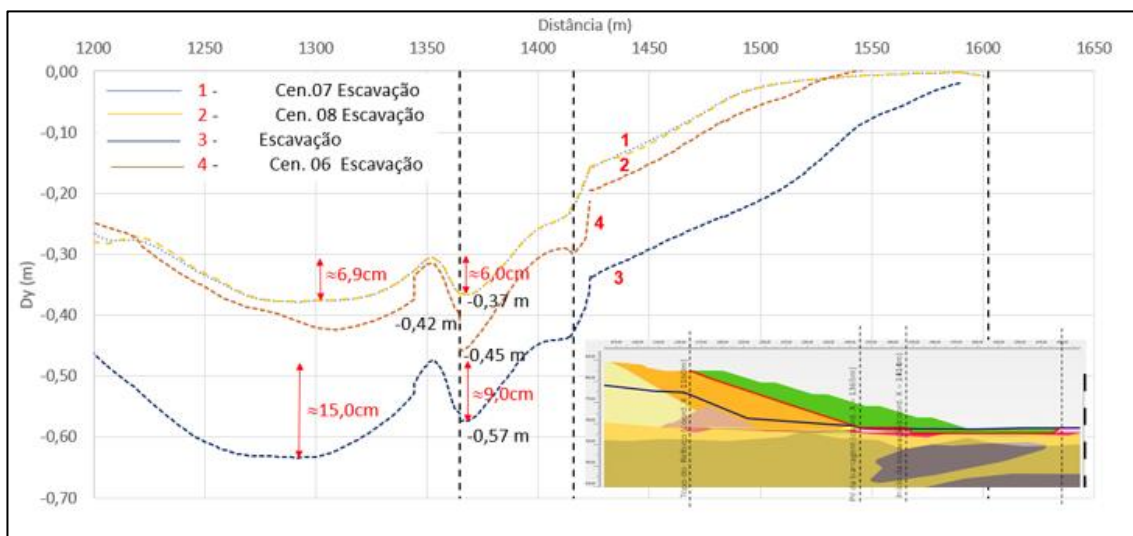


Figura 10. Recalques obtidos na análise de tensão-deformação ao longo da Linha 1 – seção D-D (seção central do maciço principal).

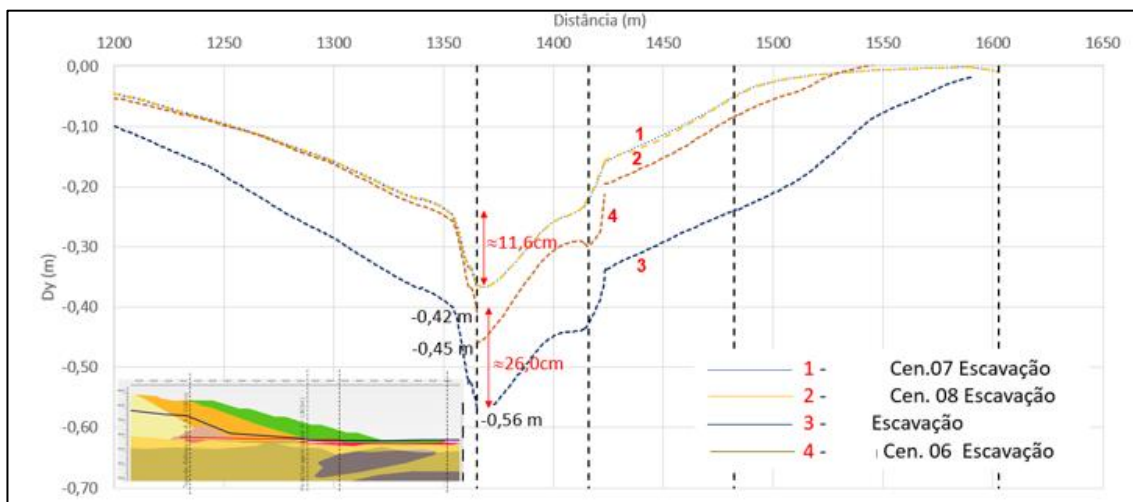


Figura 11. Recalques obtidos na análise de tensão-deformação ao longo da Linha 2 – seção D-D (seção central do maciço principal).

4 CONCLUSÃO

A intenção do presente trabalho foi mostrar que uma investigação geológica-geotécnica mais detalhada e robusta pode auxiliar em uma solução mais segura tecnicamente além de ser possível conciliar com a redução de custo e tempo de obra.

Na maioria das vezes as investigações geológicas-geotécnicas são questionadas na fase conceitual/básica de um projeto e acabam sendo reduzidas por questões de custos e cronograma. O investimento em investigações só traz impactos positivos para o projeto, pois é possível otimizar soluções nos casos de solos com capacidade de suporte e pode garantir a segurança de um projeto nos casos de solos de baixa competência.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de expressar sua sincera gratidão à Vale S.A. pelo apoio e pelo fornecimento de dados e equipe técnica para a realização deste estudo. Gratidão particular à liderança da Vale pelo seu compromisso com os estudos de segurança de barragens e pelo apoio contínuo a este projeto. Sem o seu comprometimento e visão, este trabalho não teria sido possível.

Por fim, os autores agradecem a todos os colegas que, de alguma forma, contribuíram para o desenvolvimento deste estudo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALBUQUERQUE FILHO, L. H. (2004) *Avaliação do Comportamento Geotécnico de Barragens de Rejeitos de Minério de Ferro através de Ensaios de Piezocone*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Departamento de Engenharia Civil, Escola de Minas / UFOP, 194 p.
- ANM. Resolução nº 13, de 8 de agosto de 2019. *Estabelece medidas regulatórias cautelares objetivando assegurar a estabilidade de barragens de mineração, notadamente aquelas construídas ou alteadas pelo método denominado "a montante" ou por método declarado como desconhecido*. Brasília, 2019. Disponível em: https://www.dnpm-pe.gov.br/Legisla/Res_13_19.htm. Acesso em: 27/02/24.
- ANM. Resolução nº 95, de 7 de fevereiro de 2022. *Consolida os atos normativos que dispõem sobre segurança de barragens de mineração*. Brasília, 2022. Disponível em: https://www.dnpm-pe.gov.br/Legisla/Res_95_22.htm. Acesso em: 11/03/24.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA AMBIENTAL (ABGE). *Investigações Geológico-Geotécnicas – Guias de Boas Práticas*. Editor João Jerônimo Monticelli. São Paulo, 2021.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13.028: *Mineração — Elaboração e apresentação de projeto de barragens para disposição de rejeitos, contenção de sedimentos e reservação de água — Requisitos*. Rio de Janeiro, 2017.
- Duarte, A. P. (2008) *Classificação Das Barragens De Contenção De Rejeitos De Mineração E De Resíduos Industriais No Estado De Minas Gerais Em Relação Ao Potencial De Risco*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Escola de Engenharia / UFMG, 130p.
- PINHEIRO, M. A. *Diretrizes para Elaboração de Estudos Hidrológicos e Dimensionamentos Hidráulicos em Obras de Mineração*. Porto Alegre - ABRH, 2011.
- PINI. *Fundações: Teoria e Prática – 2ª Edição*. São Paulo, 1998.
- VALE (2023). *Relatório técnico – Estudos Geológicos*. Walm Engenharia, 71 p.