

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2024/48

## Desafios para a estabilização e descaracterização de barragem de rejeito de minério de ferro, alteada a montante, localizada no quadrilátero ferrífero

Alexandre Batista de Souza Santos

FONNTES GEOTÉCNICA, Belo Horizonte, Brasil, [alexandre.santos@fonntesgeotecnica.com](mailto:alexandre.santos@fonntesgeotecnica.com)

Nelson Motta Vieira

FONNTES GEOTÉCNICA, Belo Horizonte, Brasil, [nelson.vieira@fonntesgeotecnica.com](mailto:nelson.vieira@fonntesgeotecnica.com)

Rafael Freitas Rodrigues

FONNTES GEOTÉCNICA, Belo Horizonte, Brasil, [rafael.rodrigues@fonntesgeotecnica.com](mailto:rafael.rodrigues@fonntesgeotecnica.com)

Michel Moreira Morandini Fontes

FONNTES GEOTÉCNICA, Belo Horizonte, Brasil, [michel@fonntesgeotecnica.com](mailto:michel@fonntesgeotecnica.com)

**RESUMO:** O presente trabalho consiste em estudo de caso acerca da estabilização de uma barragem alteada a montante, situada no quadrilátero ferrífero no estado de Minas Gerais, considerando os cenários hipotéticos e condições de contorno estudadas, que apontaram para performance não satisfatória da estrutura, com fatores de segurança abaixo do mínimo recomendado, conduzindo para a sua estabilização, como ação pretérita à descaracterização. Para viabilizar a descaracterização foi proposta uma metodologia de incremento dos níveis de segurança da estrutura, com medidas de rebaixamento do lençol freático por meio de poços tubulares e escavação e bombeamento a montante no reservatório. Para controle das ações e avaliação do comportamento da estrutura foi realizado o acompanhamento contínuo de deformações e da piezometria, o que subsidiou o entendimento do modelo da barragem por meio de análises comparativas em programas de elementos finitos. O modelo geológico-geotécnico da seção de análise foi desenvolvido por meio da setorização dos rejeitos do reservatório, de acordo com dados obtidos em campanhas de sondagens do tipo CPTu e classificados conforme Robertson (2016), além de dados de SPT. A setorização dos rejeitos considerou a forma de disposição dos rejeitos ao longo dos anos de operação da barragem. A calibração do modelo de elementos finitos se deu através da comparação dos resultados das simulações computacionais com leituras de marcos superficiais instalados ao longo do maciço da barragem, além do rebaixamento da linha freática, referentes às etapas iniciais de escavação. Os resultados encontrados mostraram que o modelo drenado foi o que melhor estimou os reais deslocamentos registrados. Constatou-se ainda que o modelo Mohr Coulomb tem por consequência uma majoração dos deslocamentos horizontais em 3 vezes ao real, corroborando com estudos similares. Conclui-se sobre a necessidade de modelos constitutivos específicos para projetos de remoção de desmontes destes depósitos.

**PALAVRAS-CHAVE:** Análise tensão-deformação, setorização de rejeitos, retroanálises, estabilização.

**ABSTRACT:** This work consists of a case study of the stabilization of an upstream raised dam, located in the Iron Quadrangle in the State of Minas Gerais, considering the hypothetical scenarios and boundary conditions studied, which indicated an unsatisfactory performance of the structure, with safety factors below the recommended minimum, leading to its stabilization, with de-characterization as the preferred action. In order to make the de-characterization feasible, a methodology was proposed to increase the safety level of the structure, with measures to lower the water level by means of tube wells and upstream excavation and pumping in the reservoir. In order to control the actions and evaluate the behavior of the structure, a continuous monitoring of deformations and piezometry was carried out, which helped to understand the dam model by means of retro analyses in finite element programs. The geological-geotechnical model of the analysis section

was developed by sectoring the tailings of the reservoir, according to data obtained from CPTu type drilling campaigns and classified according to Robertson (2016), as well as SPT borehole campaigns. The sectorization of the tailings considered how the tailings were disposed of over the years that the dam was in operation. The finite element model was calibrated by comparing the results of the computer simulations with readings from surface markers installed along the dam massif, as well as the grouting of the water table, referring to the initial stages of excavation. The results showed that the drained model was the one that best estimated the real recorded displacements. It was also found that the Mohr-Coulomb model leads to an increase in horizontal displacements of 3 times the real value, confirming similar studies. It is concluded that there is a need for specific constitutive models for mining projects in these reservoirs.

**KEYWORDS:** Stress-strain analysis, reject sectorization, retro analyses, stabilization

## 1 INTRODUÇÃO

Os rompimentos de barragens ocorridos no Brasil, em especial no estado de Minas Gerais fizeram com que a legislação brasileira se tornasse mais restritiva quanto a construção, operação, diagnóstico/monitoramento e desativação de barragens. Neste sentido, destaca-se a resolução N°95 da Agência Nacional de Mineração (ANM), e a resolução N° 2784 da Fundação Estadual do Meio Ambiente (FEAM) que restringe o método construtivo denominado a montante e regulariza as etapas de descaracterização das estruturas existentes que foram implantadas sob este critério.

Entretanto, ao se deparar com a necessidade de descaracterização dessas estruturas, muitos desafios foram observados dentre eles a necessidade de estabilização e refoço prévio com vistas a minimizar os riscos de rompimento por liquefação ou reduzir o dano potencial associado a essas estruturas geotécnicas, tendo como balizador e obedecendo a todos os critérios de segurança da Resolução N°95 (ANM, 2022) e da Norma ABNT NBR 13.028/2017 que trata do projeto de barragens.

Neste contexto este artigo tem por objetivo apresentar os resultados alcançados em estudos e projetos de estabilização de uma barragem alteada a montante, já desativada, localizada em uma mina de ferro do quadrilátero ferrífero, estado de Minas Gerais.

A estrutura encontrava-se com fatores de segurança para as condições não-drenadas abaixo do mínimo requerido pela legislação e, portanto, ações de estabilização se mostraram necessárias. Ainda, tendo em vista que esta estrutura foi alteada sobre os rejeitos contráteis de outra estrutura à jusante a proposta de uma berm de reforço na base do talude de jusante foi descartada pois poderia ocasionar uma ruptura iminente durante a sua construção devido a possíveis incrementos das poropressões internas nos rejeitos, principalmente da fundação, os quais no início das atividades se apresentavam elevados.

Logo a proposta de estabilização da barragem teve como premissa promover o rebaixamento dos níveis freáticos no interior do reservatório e, conseqüentemente, no maciço da barragem, a partir de escavação e retirada dos rejeitos nas porções à montante do reservatório, mantendo um gradiente hidráulico para montante na busca de melhoria para os fatores de segurança, com inversão e rebaixamento da linha freática. Associado às atividades de escavação, foram implementados um sistema de bombeamento constante do fluxo superficial e subsuperficial concentrado em um sump na porção de montante, próximo ao pé das escavações realizadas no reservatório, e poços tubulares profundos instalados na porção intermediária do reservatório.

Neste contexto como forma de controle das deformações e recalques promovidos pelo processo de rebaixamento, o plano de estabilização previu o controle das taxas de rebaixamento da linha freática e das taxas de deformações do maciço, mantendo a segurança operacional do processo de estabilização proposto.

Diante do exposto, esse trabalho apresenta parte dos resultados das análises de tensão deformação realizadas para validação do modelo geológico geotécnico elaborada para essa estrutura que, por meio de análises comparativas, permitiu estabelecer os controles supracitados e subsidiaram as projeções de escavação e rebaixamento da freática, que seguem promovendo a estabilização da estrutura e possibilitarão que a mesma possa vir a ser descaracterizada em breve.

## 2 METODOLOGIA

### 2.1 Barragem alteada a montante em estudo e intervenções para rebaixamento do nível freático

A barragem deste estudo de caso está situada no quadrilátero ferrífero, estado de Minas Gerais, e possui um volume de rejeito armazenado da ordem de 4,5 milhões de metros cúbicos. Sua altura é da ordem de 30 metros e o método construtivo adotado foi o alteamento para montante. Na Figura 1 é apresentada a seção crítica de análise.

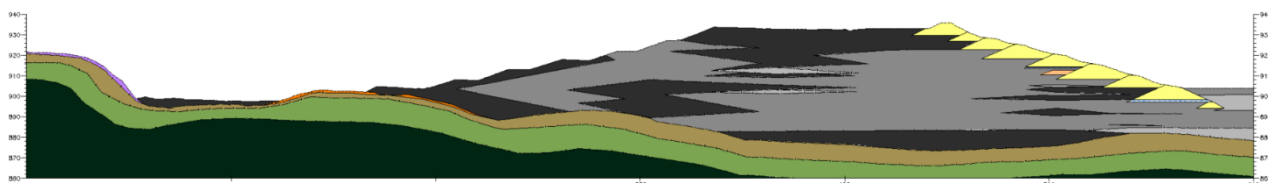


Figura 1. Seção crítica – dimensões em metros.

A partir do ano de 2021 foram realizadas escavações no reservatório a montante e instalados poços de bombeamento dentro do reservatório e no pé da estrutura com o objetivo de promover, de maneira controlada, o rebaixamento do nível freático e, conseqüentemente, influenciar na estabilidade da estrutura.

Para esse estudo apresenta-se os resultados da modelagem e análises de tensão deformação realizadas no software Plaxis2D, para a seção considerada crítica.





### 2.2 Modelagem geológico-geotécnica

O modelo geológico-geotécnico existente foi elaborado com base nas informações obtidas nas campanhas de investigação executadas entre 2011 e 2023. Neste contexto, o reservatório da barragem em estudo está posicionado sobre uma fundação composta por solo residual de xisto com textura silto-argilosa, coberto por uma estreita camada de tálus. Sotoposto ao horizonte de solo residual ocorre o horizonte de saprolito do xisto, de textura silto-arenosa a siltosa. Sob o saprolito encontra-se o xisto alterado (A4) a moderadamente alterado (A3), muito fraturado (F5), com resistência muito branda superior (R1+) a medianamente resistente (R3). O reservatório é composto por rejeitos de minério de ferro que apresentam diferentes comportamentos geotécnicos, como mostraram os resultados dos ensaios de CPTu. Por este motivo, esta unidade foi dividida em 3 subunidades, a saber: rejeito argiloso; rejeito transicional de padrão estratificado dado pela alternância de camadas arenosas e argilosas e rejeito arenoso, conforme a classificação de Robertson (2016).

### 2.3 – Parâmetros de resistência e deformabilidade das camadas

Os parâmetros de resistência dos materiais foram determinados a partir de ensaios especiais de laboratório, investigações de campo e através da experiência dos profissionais. Já os parâmetros de deformabilidade foram obtidos por meio da metodologia de Teixeira e Godoy (1996), utilizando sondagens SPT, que leva em consideração as características granulométricas do solo. A Tabela 1 e a Tabela 2 apresentam, respectivamente, os parâmetros de resistência efetivos e não drenados. A Tabela 3 apresenta os parâmetros de deformabilidade obtidos.

Tabela 1. Parâmetros de resistência efetivos.

MATERIAL	LEGENDA	PESO ESPECÍFICO (KN/M <sup>3</sup> )	PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA	
			c' (kPa)	φ' (°)
Aterro		18,81	17,5	29,8
Lastro de enrocamento		20	0	32
Tálus		19	7	32
Rejeito		19	0	33



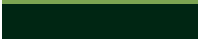
Solo Residual de Xisto		19,6	4	30
Saprolito de Xisto		20	37	32
Xisto		20	80	32

Tabela 1. Parâmetros de resistência não drenados.

SEÇÃO	Su (pico)/ $\sigma'_{v}$		
	Rejeito argiloso	Rejeito transicional	Rejeito arenoso
SEÇÃO CRÍTICA	0,274	0,233	0,248

Tabela 1. Parâmetros de deformabilidade efetivos.

SEÇÃO	Módulo de elasticidade E' (KPa)		
	Rejeito argiloso	Rejeito transicional	Rejeito arenoso
SEÇÃO CRÍTICA	2000	12300	14300

## 2.4 Ensaio de piezocone (CPTu) e Ensaio SPT

Ao longo dos anos foram realizadas inúmeras campanhas de investigação *in situ* no maciço e no reservatório da barragem. Sendo assim, foi possível conhecer com boa precisão os materiais dos alteamentos e dique inicial, o terreno natural e a distribuição dos rejeitos na estrutura. Os rejeitos do reservatório foram classificados conforme seu comportamento, de acordo com a metodologia de Robertson 2016 (ensaios CPTu), sendo classificados em arenoso, transicional ou argiloso. A Figura 2 apresenta o ábaco de Robertson para um dos ensaios avaliados na definição do comportamento do rejeito do reservatório.

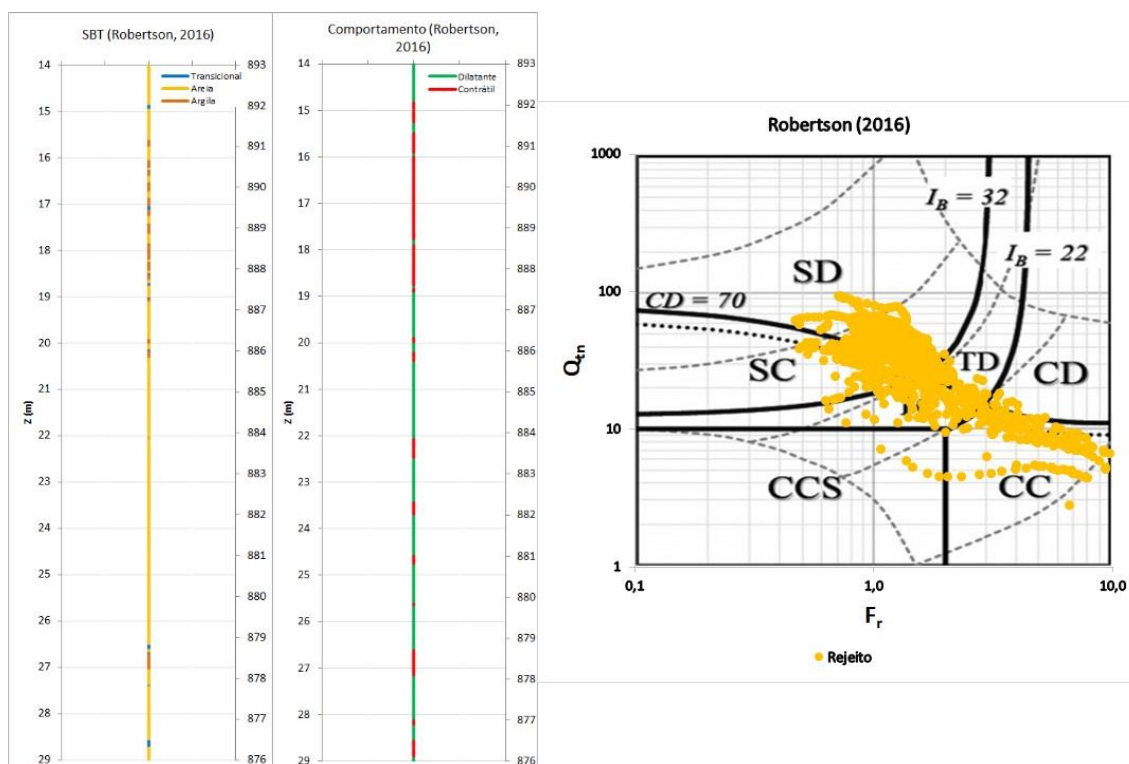


Figura 1. Classificação comportamental do rejeito – Robertson 2016.

## 2.5 Slide2 e Plaxis 2D

Foi definido o modelo geológico-geotécnico das seções representativas da estrutura, sendo estes utilizados nas análises numéricas. Periodicamente foram realizadas análises de estabilidade pela teoria do equilíbrio limite no *software* Slide 2. Para entender o comportamento da estrutura em termos de deformação e deslocamento, foram realizadas análises tensão deformação no *software* Plaxis 2D.

## 3 RESULTADOS

### 3.1 Calibração do modelo

Para o estudo de calibração do modelo foi realizada uma análise comparativa do comportamento observado na seção crítica do barramento a fim de calibrar o modelo mais representativo de comportamento dos rejeitos, por meio da avaliação das repostas do maciço frente às escavações e rebaixamento das linhas freáticas registradas no período compreendido entre setembro de 2021 e julho de 2022, materializados pelos dados de topografias bimestrais e leituras dos instrumentos existentes a saber: marcos superficiais, indicadores de nível d' água e piezômetros, além do controle dos níveis do bombeamento.

### 3.2 - Análises de estabilidade

A Figura 2 apresenta a variação do nível freático e do avanço das escavações de montante na estrutura ao longo dos anos de 2022 e 2023.

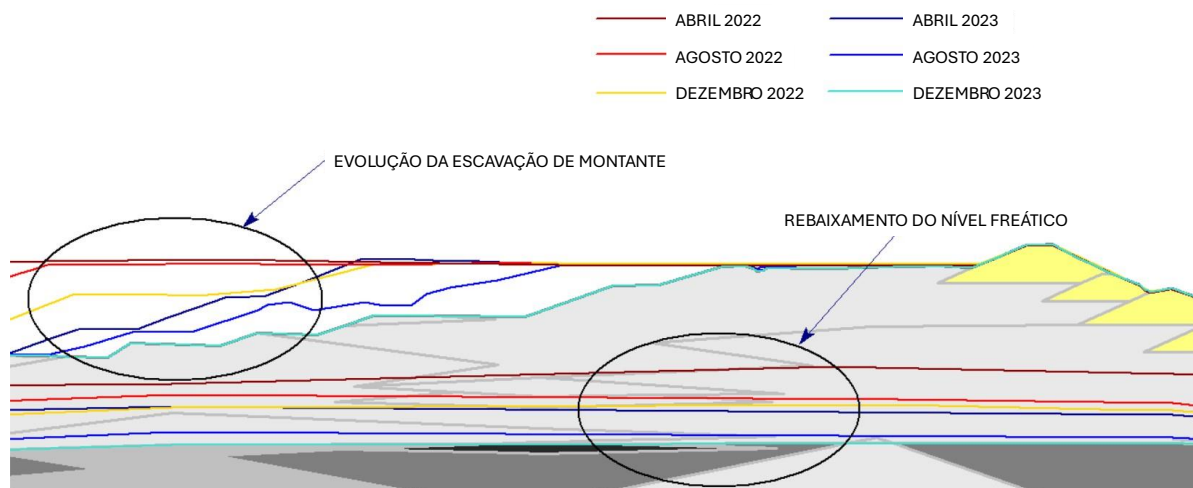


Figura 2. Evolução das escavações e do rebaixamento freático para a seção crítica da estrutura.

A diminuição dos volumes armazenados e o efetivo rebaixamento do nível freático ocasionaram em maior segurança da estrutura. A Figura 3 apresenta a variação dos fatores de segurança obtidos nas análises de estabilidade pela teoria do equilíbrio limite realizadas no *software* Slide 2, com superfícies de ruptura circulares e pelo método de Bishop Simplificado. Os cenários avaliados nas análises de estabilidade foram definidos de acordo com a NBR 13.028/2017 e, mais recentemente, a Resolução ANM 95/2022, sendo eles: estático com parâmetros drenados, estático com parâmetros não drenados de pico e pseudoestático com parâmetros não drenados de pico.

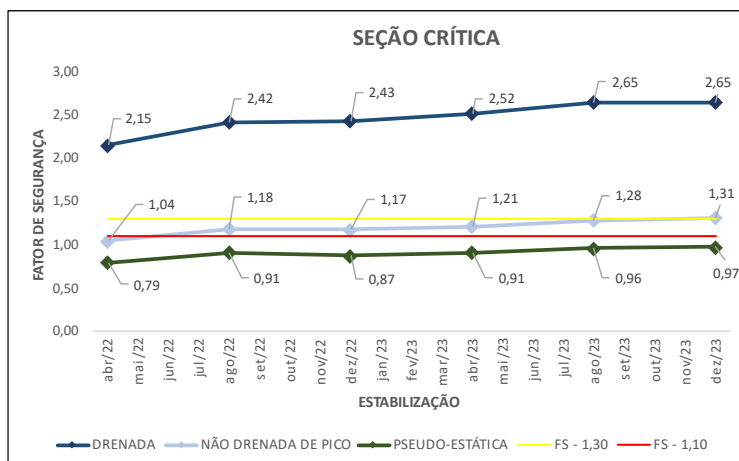


Figura 3. Evolução dos fatores de segurança para a seção crítica.

### 3.2 Análises tensão deformação

Para o controle das deformações e dos deslocamentos da estrutura, foram realizadas análises tensão deformação no *software* Plaxis 2D. Com topografias quinzenais e leituras semanais dos indicadores de nível d' água e dos piezômetros instalados na estrutura, foram criados inúmeros estágios no programa que permitiram reproduzir as intervenções feitas ao longo dos últimos anos.

Para os rejeitos foram realizadas tanto análises com os parâmetros drenados quanto com os parâmetros não drenados. Para a análise não drenada o tipo de drenagem selecionada no programa foi o *Undrained A*, que permite calcular o comportamento não drenado a partir dos parâmetros efetivos de resistência e de rigidez.

Os deslocamentos obtidos na análise comparativa considerando a condição drenada dos rejeitos do reservatório foram comparados com as leituras dos marcos superficiais existentes na crista e nas bermas da estrutura. A Figura 4 mostra a avaliação dos deslocamentos obtidos no modelo e em campo.

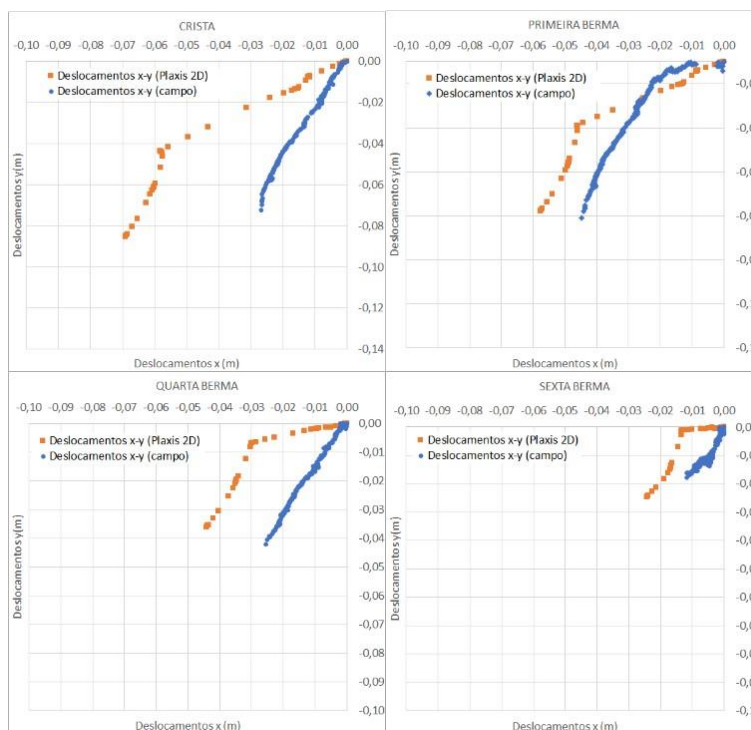


Figura 4. Deslocamentos entre modelo e marcos superficiais para a análise tensão deformação drenada.

Para a análise comparativa com parâmetros não drenados, o modelo número não apresentou um comportamento coerente em termos de magnitude e sentido quando comparados às leituras de campo dos marcos superficiais (Figura 5).

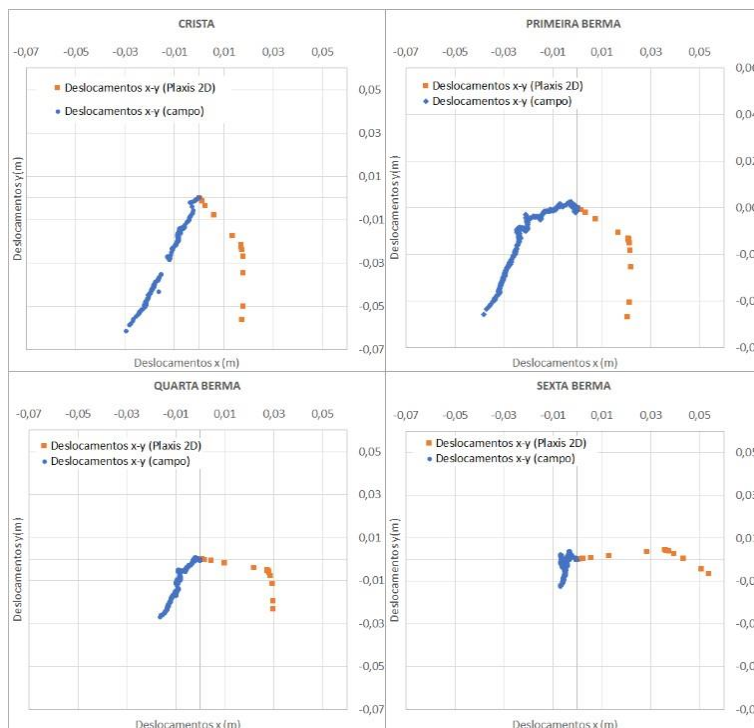


Figura 5. Deslocamentos entre modelo e marcos superficiais para a análise tensão deformação não drenada.

Com base nos resultados apresentados na modelagem numérica, entende-se que o comportamento da estrutura é drenado e que as intervenções realizadas vem sendo efetivas. Ademais, pela magnitude dos deslocamentos dos marcos superficiais, a estrutura tem maior movimento na região da crista e uma redução no sentido de jusante, ou seja, o deslocamento da crista é maior do que o apresentado na sexta berma.

#### 4 CONCLUSÃO

A descaracterização das estruturas geotécnicas alteadas a montante vem se mostrando um grande desafio para as mineradoras e projetistas. O presente estudo apresentou algumas das intervenções necessárias para melhorar a condição de estabilidade da estrutura em questão.

As intervenções propostas mostraram-se efetivas para o aumento de segurança da estrutura. As escavações e o rebaixamento do nível freático permitiram que a seção crítica da estrutura pudesse atender o fator de segurança mínimo estipulado na Resolução ANM 95/2022. As análises pseudo-estáticas também registraram ganhos significados de segurança, mas ainda se encontram abaixo da unidade, reiterando que as intervenções devem ser mantidas e ampliadas.

As análises tensão-deformação mostraram que atualmente a estrutura tem um comportamento drenado, com deslocamentos no sentido de montante do reservatório, o que era esperado devido à inversão do fluxo d'água e das escavações realizadas na porção de montante do reservatório (alívio de tensões). Caso a estrutura passe a ter um comportamento não drenado, as avaliações indicam um deslocamento no sentido de jusante, que, dependendo da intensidade, podem levar a deformações excessivas e comprometer a estabilidade.

Ademais, o modelo drenado estimou de forma satisfatória o recalque. Entretanto, o deslocamento no plano Norte – Leste foi majorado. Sendo assim, novas avaliações que consideram o módulo de deformabilidade

no carregamento/descarregamento e modelos constitutivos pautados no comportamento do rejeito estão sendo discutidas, sendo esperados deslocamentos ainda mais próximos dos evidenciados em campo.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a FONNTES GEOTÉCNICA pela oportunidade de atuar em um projeto dessa escala e importância, com todo o apoio para seu correto andamento.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT NBR 13028:2017 – Mineração - Elaboração e apresentação de projeto de barragens para disposição de rejeitos, contenção de sedimentos e reservação de água - Requisitos. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 2017.;
- AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO. Resolução n° 95, de 7 de fevereiro de 2022: consolida os atos normativos que dispõem sobre segurança de barragens de mineração. Brasília, DF: ANM, 2022;
- OLSON, Scott Michael. Liquefaction analysis of level and sloping ground using field case histories and penetration resistance. University of Illinois at Urbana-Champaign, 2001
- ROBERTSON, P., & Cabal, K. (2015). Guide to Cone Penetration Testing for Geotechnical Engineering, Prepared for Gregg Drilling & Testing Inc. (6th Edition ed.).
- TEIXEIRA, A. H.; Godoy, N. S. de; Análise, projeto e execução de fundações rasas. Fundações: teoria e prática. 1996.