

Modelo Geológico-Geotécnico Tridimensional da Barragem I da Mina Córrego do Feijão com base em Ensaios de Piezocone

Ryan Oliveira da Cunha

Aluno de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, ryancunha@coc.ufrj.br

Mateus da Silva Scofano

Aluno de Graduação, POLI/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, mateus.scofano.20241@poli.ufrj.br

Leonardo De Bona Becker

Professor, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, leonardobecker@poli.ufrj.br

Marcos Barreto de Mendonça

Professor, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, mbm@poli.ufrj.br

RESUMO: As barragens de rejeito são estruturas utilizadas na mineração para armazenar resíduos do beneficiamento de minério, podendo ser alteadas por diferentes métodos. No método a montante, muito comum no passado recente, a execução iniciava-se pela construção de um dique de partida e lançamento dos rejeitos a partir da crista em direção à montante. Simplificadamente, a fração grossa (“rejeito grosso”) deveria se depositar próximo ao talude do barramento, formando uma praia. Por outro lado, a fração fina do rejeito (“rejeito fino”) acumular-se-ia em regiões mais distantes da crista, no lago de decantação. Entretanto, o processo operacional é dinâmico e a vida útil dessas estruturas pode se estender por décadas, resultando em disposições complexas e potencialmente diferentes dos modelos simplificados. Becker et al. (2023) sugeriram a presença de extensas camadas horizontais de rejeitos finos na Barragem I da Mina Córrego do Feijão, as quais propiciaram a formação de múltiplos lençóis freáticos suspensos. Neste contexto, o presente estudo almeja desenvolver um modelo geológico-geotécnico tridimensional da Barragem I utilizando dados de ensaios de campo. Para tanto, empregou-se o *Web Plot Digitizer* e o *AutoCAD* na conversão de dados brutos de ensaios de piezocone e topografia disponibilizados em Robertson et al. (2019). Posteriormente, as informações foram importadas para o software *Leapfrog Works*, permitindo a modelagem com ênfase na estratigrafia dos rejeitos. Como resultado do modelo tridimensional, foi possível inferir, frente a modelos bidimensionais, a distribuição espacial dos diferentes tipos de rejeitos nas direções longitudinal e transversal no interior da barragem.

PALAVRAS-CHAVE: Barragens de Rejeito, Ensaios de Piezocone, Modelo Tridimensional, Tipo de Comportamento do Solo, Estratigrafia.

ABSTRACT: Tailings dams are structures used in mining to store waste from ore processing and can be raised by different methods. In the upstream method, which was very common in the recent past, construction began by building a starter dam and discharging the tailings from the crest towards upstream. Simply put, the coarse fraction (“coarse tailings”) should be deposited near the slope of the dam, forming a beach. On the other hand, the fine fraction of the tailings (“fine tailings”) would accumulate further away from the crest, in the settling pond. However, the operational process is dynamic and the useful life of these structures can extend for decades, resulting in complex arrangements that are potentially different from the simplified models. Becker et al. (2023) suggested the presence of extensive horizontal layers of fine tailings in Dam I of the Córrego do Feijão Mine, which led to the formation of multiple suspended water tables. In this context, this study aims to develop a three-dimensional geological-geotechnical model of Dam I using data from field tests. To this end, Web Plot Digitizer and AutoCAD were used to convert the raw data from piezocone and topography tests available in Robertson et al. (2019). Subsequently, the information was imported into the Leapfrog Works software, allowing modeling with an emphasis on tailings stratigraphy. As a result of the three-dimensional model, it was possible to infer, compared to two-dimensional models, the spatial distribution of the different types of tailings in the longitudinal and transverse directions inside the dam.

KEYWORDS: Tailings Dams, Piezocone Tests, Three-Dimensional Model, Soil Behavior Type, Stratigraphy.

1 INTRODUÇÃO

Apesar de relevante para a economia brasileira, a mineração enfrenta desafios significativos como o destino adequado de rejeitos. No Brasil, em alguns casos, o subproduto da atividade mineradora é disposto em barragens de rejeito, usando para este fim o método do aterro hidráulico. Essas estruturas podem ser alteadas por métodos a jusante, linha de centro e montante. No método a montante, muito comum no passado recente, a execução iniciava-se pela construção de um dique de partida e lançamento dos rejeitos a partir da crista em direção à montante, mediante canhões hidráulicos. Simplificadamente, a fração grossa (“rejeito grosso”) – caracterizada por maior resistência e permeabilidade e menor compressibilidade – deveria se depositar próximo ao talude do barramento, formando uma praia. Por outro lado, a fração fina do rejeito (“rejeito fino”) – de sedimentação lenta, baixa permeabilidade e alta compressibilidade – acumular-se-ia em regiões mais distantes da crista da barragem, no lago de decantação.

De acordo com Vick (1990), a eficácia do processo de construção de barragens de rejeito pelo método a montante está intrinsecamente vinculada à disposição segregada dos materiais. Essa prática visa formar uma praia de rejeitos estruturalmente competente, que atuará como fundação para os alteamentos subsequentes. A segregação granulométrica resultante não apenas garante a estabilidade geotécnica da estrutura, mas também exerce papel crítico no controle das condições de fluxo. Como destaca Vick (1990), a posição do nível freático no corpo da barragem está diretamente associada ao grau de segregação dos grãos. Entretanto, o processo operacional é dinâmico e a vida útil dessas estruturas pode se estender por décadas, resultando em disposições complexas e potencialmente diferentes dos modelos simplificados. A concentração de partículas grossas próximas ao talude facilita a drenagem e reduz a saturação, mitigando riscos de elevação indesejada do lençol freático.

Ressalta-se que a formação de camadas estratificadas de rejeitos de granulometrias distintas pode favorecer o surgimento de lençóis freáticos suspensos. Becker et al. (2023) sugeriram a presença de extensas camadas horizontais de rejeitos finos na Barragem I da Mina Córrego do Feijão, as quais propiciaram a formação de múltiplos lençóis freáticos suspensos. Apresenta-se na Figura 1 uma imagem da Barragem I obtida em período anterior à ruptura (jan./2019) com o auxílio do Google Earth Pro.



Figura 1. Vista plana da Barragem I em jan./2019 obtida com Google Earth Pro em 10/07/2025.

2 METODOLOGIA

O trabalho foi desenvolvido a partir de três etapas: utilização da ferramenta *Web Plot Digitizer* para conversão de dados de ensaios de piezocone disponibilizados em arquivos pdf para arquivos csv, uso da metodologia proposta por Robertson (2009) para caracterização dos rejeitos represados com foco na definição

de estratigrafia e, por fim, o uso do software *Leapfrog Works* para a criação do modelo geológico-geotécnico da Barragem I.

2.1 Web Plot Digitizer

Os dados de ensaios de piezocone apresentados em Robertson et al. (2019) foram disponibilizados exclusivamente no formato pdf, sendo necessária a extração e a conversão das informações contidas nestes arquivos para dados numéricos passíveis de processamento, visando à definição da estratigrafia da Barragem I.

Para tal, empregou-se a ferramenta de digitalização, a qual permite a extração automatizada de dados numéricos a partir de gráficos, plotagens e imagens. Esse recurso atua como um digitalizador de gráficos, convertendo representações visuais de dados em valores numéricos, aplicáveis a análises e estudos subsequentes. A Figura 2 ilustra o resultado de um ensaio de piezocone (CPTu-2005-05) executado na Barragem I, especificamente o gráfico de elevação por poropressão medida (u_2).

Cabe ressaltar que a ferramenta foi empregada para extrair dados de resistência de ponta corrigida (q_t), atrito lateral (f_s) e poropressão (u_2) com respectivas elevações de 25 ensaios de piezocone, realizados em três campanhas distintas nos anos de 2005, 2016 e 2018 na Barragem I.

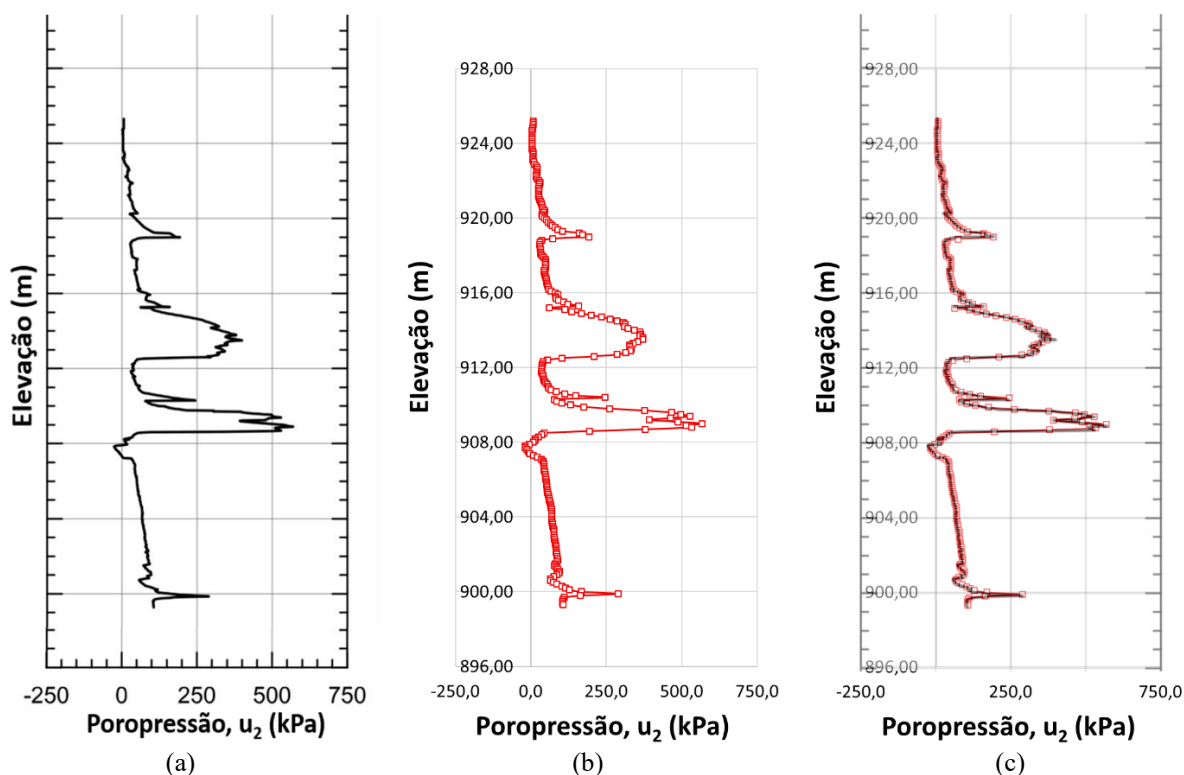


Figura 2. CPTu-2005-05: (a) Gráfico original disponibilizado em pdf por Robertson et al. (2019); (b) Dados extraídos mediante ferramenta de digitalização de dados e (c) Superposição de (a) e (b).

2.2 Tipo de Comportamento do Solo (SBT) - Robertson (2009)

Com os dados dos ensaios de piezocone convertidos em valores numéricos utilizando a ferramenta de digitalização, procedeu-se à análise para a definição estratigráfica dos materiais constituintes da estrutura. Para isto, adotou-se a metodologia proposta por Robertson (2009) que possibilita, a partir de um processo iterativo, inferir o tipo de comportamento do material e caracterizar a estratigrafia por meio de ábacos de correlação entre parâmetros de cone e tipologia sedimentar, conforme ilustrado na Figura 3. Os materiais foram agrupados e classificados em dois grupos distintos – “rejeito grosso” e “rejeito fino”, adotando-se como critério divisor o índice de material (I_c) de 2,60. Atribuiu-se a designação “rejeito grosso” aos materiais com $I_c \leq 2,60$ e “rejeito fino” àqueles com $I_c > 2,60$.

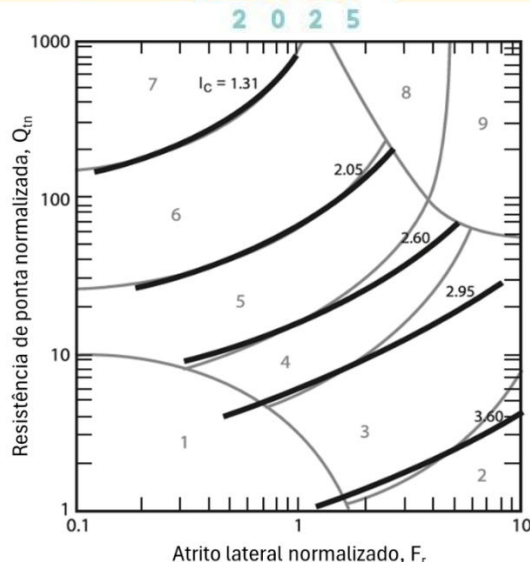


Figura 3. Contornos do índice de material (I_c) - linhas grossas, no ábaco normalizado, zonas de *SBT* baseadas em Robertson (1990) – adaptado de Robertson (2009).

2.3 Leapfrog Works e o modelo tridimensional (3D)

O *Leapfrog Works* é um software que pode ser usado para modelagem geológico-geotécnica 3D e análise geoespacial, com aplicações em geotecnia, hidrogeologia, gestão de rejeitos de mineração e estudos ambientais. Para a construção do modelo tridimensional, seguiram-se etapas específicas. Inicialmente, procedeu-se à importação dos dados de piezocone por meio de arquivos nos formatos de nomenclatura exigidos pelo software: *collar* (contendo identificação do furo, coordenadas UTM, elevação da boca e profundidade máxima), *survey* (identificação do furo, profundidade, inclinação e orientação) e *interval* (identificação do furo, profundidade de início/fim da amostragem e parâmetros medidos como teores ou dados geotécnicos e/ou geológicos).

Para a importação dos dados, adotou-se o formato de arquivo *csv* e, paralelamente, gerou-se a superfície topográfica da Barragem I a partir de curvas de nível disponíveis em Robertson et al. (2019) no formato pdf. Este arquivo foi convertido para o formato *dwg* tendo passado por ajustes e georreferenciamento para extração exclusiva das curvas de nível. As polilinhas resultantes foram então importadas para o software de modelagem geológico-geotécnica como *GIS lines*, base para a construção da superfície topográfica, conforme ilustrado na Figura 4.

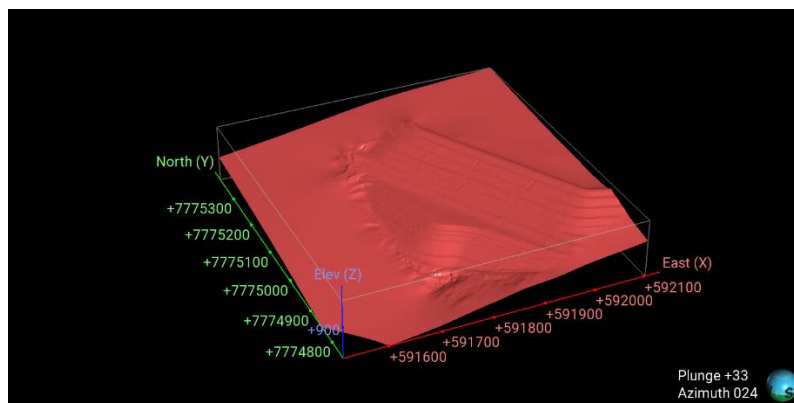


Figura 4. Superfície topográfica da Barragem I criada com software de modelagem geológico-geotécnica.

Quanto melhor definido o formato dos alteamentos no modelo geológico-geotécnico, mais condizente com a realidade será o modelo criado. Dessa forma, a etapa subsequente consistiu na definição do fluxo de

trabalho para representação dos alteamentos da estrutura no modelo. Ressalta-se que a modelagem geológico-geotécnica apresenta limitações na criação direta de volumes com geometrias específicas, contudo o software permite a importação de modelos volumétricos externos, desde que em formatos compatíveis. Considerando que Robertson et al. (2019) não disponibilizaram dados volumétricos dos alteamentos da Barragem I, optou-se por reconstruí-los com base nas seções transversais e curvas de nível contidas no referido estudo – previamente processadas em software de desenho técnico (Figura 5).

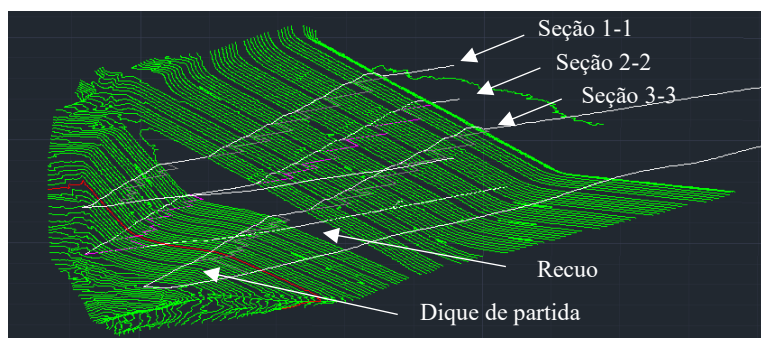


Figura 5. Curvas de nível e seções transversais da Barragem I em software de desenho técnico.

O volume dos alteamentos foi modelado sequencialmente: inicialmente para os alteamentos desenvolvidos após o recuo da estrutura, e, posteriormente, para o dique de partida e alteamentos iniciais.

(i) Modelagem no trecho posterior ao recuo

Em virtude da geometria praticamente retilínea do segmento, onde as seções transversais exibiam mínima variação, adotou-se a seção 2-2 (Figura 5) como referência única. A modelagem do volume foi então realizada mediante extrusão deste perfil em software de desenho técnico – utilizando a ferramenta *extrude* –, abrangendo integralmente a área de estudo, conforme demonstrado na Figura 6.

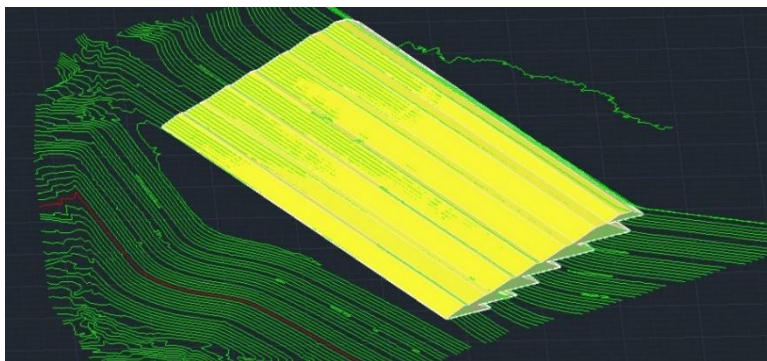


Figura 6. Volume dos alteamentos gerado (em amarelo) pela ferramenta *extrude* com software de desenho técnico.

(ii) Modelagem no trecho anterior ao recuo

A modelagem do trecho anterior ao recuo demandou abordagem distinta face à sua curvatura pronunciada e insuficiência de dados. Para contornar essas limitações, geraram-se seções intermediárias entre os perfis existentes preservando a cota da crista e variando apenas a altura do dique de partida, Figura 7 (a). A disposição espacial dessas seções – calibrada pela topografia local – permitiu a extrusão adaptativa do volume através do comando *loft* com software de desenho técnico, Figura 7 (b), solucionando a descontinuidade de informações. Após gerados todos os volumes necessários para a criação do modelo tridimensional, eles foram importados para o software específico. A Figura 8 apresenta os volumes finais do dique de partida e dos alteamentos na região anterior e posterior ao recuo.

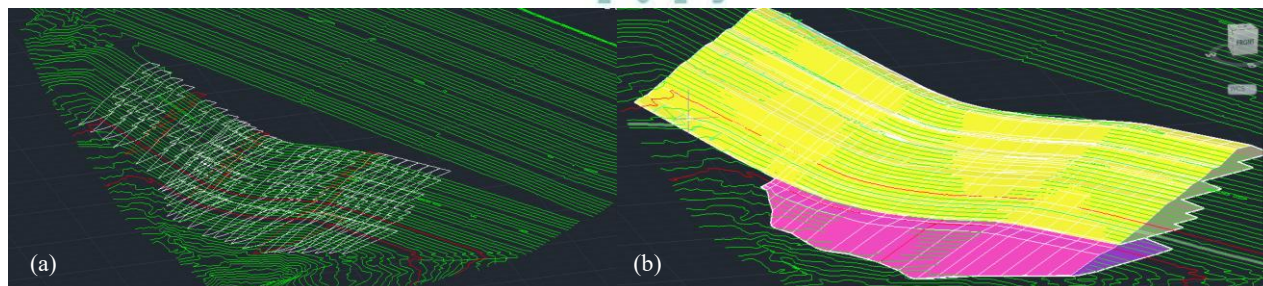


Figura 7. (a) Seções transversais na região anterior ao recuo; (b) Volume gerado com comando *loft*, em magenta o dique de partida e em amarelo os alteamentos.

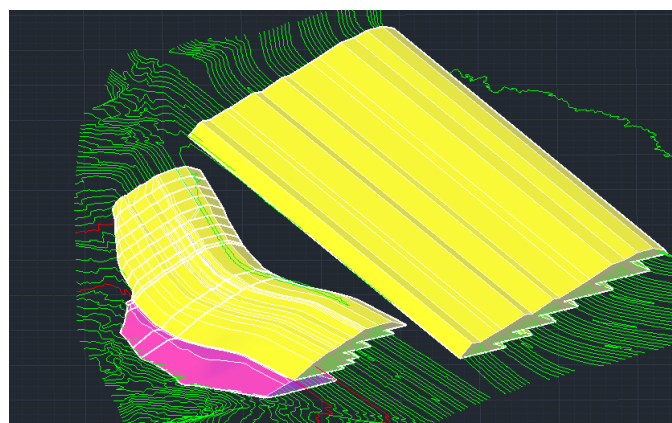


Figura 8. Volumes finais do dique de partida e alteamentos.

Na sequência, em função da ausência de dados estruturados para importação no software, modelou-se a superfície de fundação da Barragem I a partir de um processo de interpolação usando 7 seções (3 transversais e 4 longitudinais) que continham em sua base polilinhas com a informação da fundação da barragem antes da construção. Essas informações foram apresentadas em Robertson et al. (2019) e combinadas às polilinhas que representavam as bases de cada seção de dique de partida nos perfis intermediários da Figura 7 (a). Aplicou-se o mesmo protocolo utilizado para a superfície topográfica (Figura 4), obtendo-se o modelo da Figura 9.

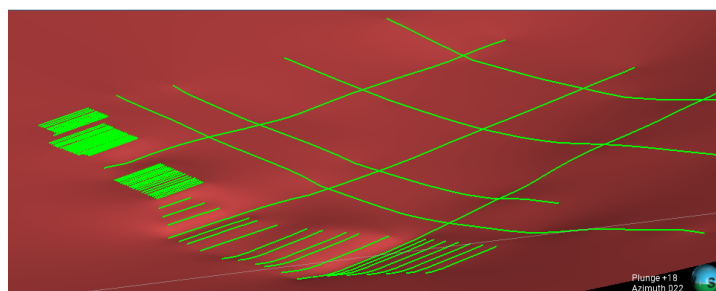


Figura 9. Superfície de fundação da Barragem I (vermelho) e polilinhas (verde) usadas para criá-la.

Definidas as superfícies topográfica e de fundação da Barragem I, bem como os volumes do dique de partida, alteamentos e fundação, procedeu-se à modelagem das superfícies e volumes dos rejeitos, definindo-se, assim, sua estratigrafia. Cabe destacar que o programa para modelagem geológico-geotécnica oferece quatro funções primárias para a modelagem de superfícies de contato: *deposit* (depósito), *erosion* (erosão), *intrusion* (intrusão) e *vein* (veio), além de outros tipos de superfícies complementares que não serão aqui apontadas já que fogem ao escopo deste trabalho. Cada tipologia apresenta funcionalidades específicas, demandando avaliação criteriosa quanto à adequação ao projeto. Na presente modelagem, todos os volumes foram gerados a partir de superfícies do tipo *intrusion* – recomendadas para dados de piezocone –, devido à sua capacidade de representar geometrias complexas, ainda que a configuração real não corresponda literalmente a uma intrusão.

Para evitar que as superfícies dos rejeitos invadissem volumes já modelados, como os alteamentos e o da fundação, foi utilizada a ferramenta de “modelo refinado”. Essa função permite detalhar volumes específicos em um modelo previamente definido. Assim, os volumes de rejeitos finos e grossos foram modelados dentro do volume “Unknown”, excluído da modelagem inicial do dique, alteamentos e fundação. A ferramenta é acessada via árvore de projeto da seguinte maneira: “Geological Models → New Refined Model”, onde se seleciona o modelo-base, o volume a ser refinado, os dados de sondagem e o nome do modelo. A Figura 10 ilustra o modelo tridimensional com os elementos previamente definidos e o início da modelagem dos rejeitos.

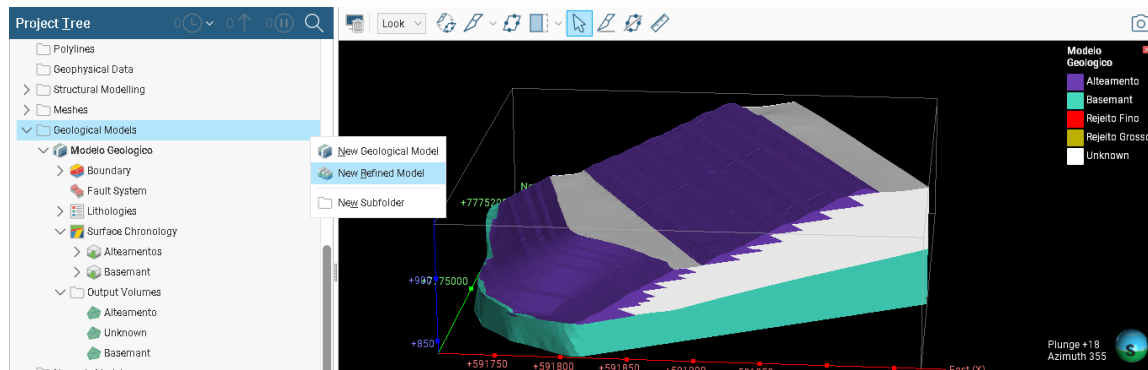


Figura 10. Caminho para utilização da ferramenta de Modelo Geológico Refinado.

3 RESULTADOS

Como resultado deste trabalho, apresenta-se o modelo geológico-geotécnico da Barragem I na Figura 11. Verifica-se que o modelo exhibe as regiões dos alteamentos, da fundação e dos rejeitos claramente demarcados. Ressalta-se, ainda, que neste estudo não se estabeleceu distinção explícita entre o dique de partida e os alteamentos subsequentes para o modelo apresentado, uma vez que o objetivo principal do trabalho era definir a estratigrafia dos rejeitos represados pela estrutura.

Apresentam-se ainda duas seções da estrutura: uma transversal, mostrada na Figura 12 (a), obtida na região da ombreira esquerda, conforme indicado na Figura 11; e outra longitudinal, ilustrada na Figura 12 (b), extraída imediatamente após a área do recuo no pé do talude de jusante, de acordo com Figura 11.

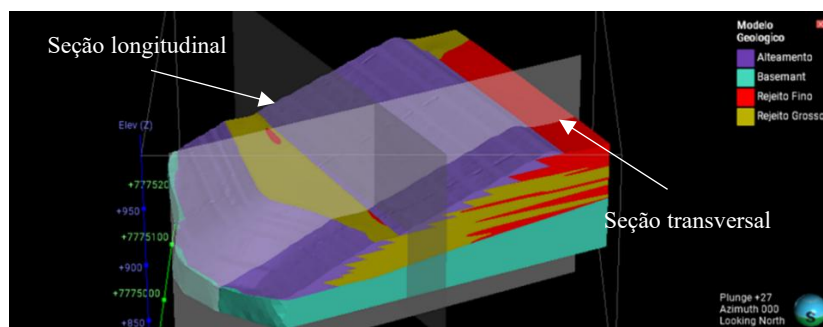


Figura 11. Modelo geológico-geotécnico da Barragem I.

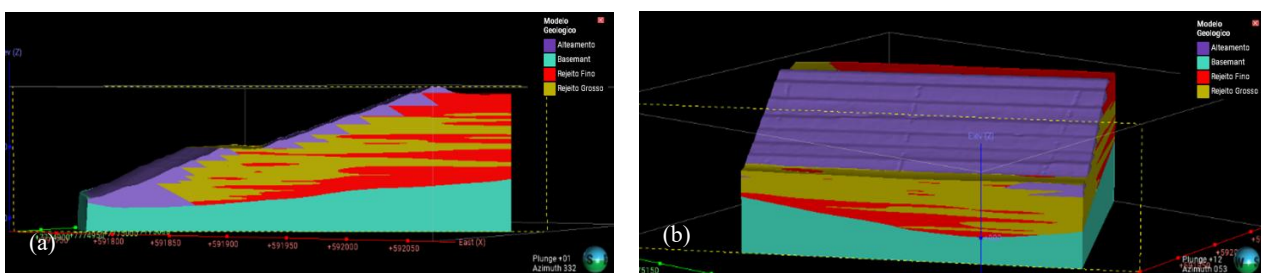


Figura 12. (a) Seção transversal e (b) Seção longitudinal da Barragem I.



4 CONCLUSÕES

No desenvolvimento deste trabalho, foi inicialmente empregada uma ferramenta de digitalização, por meio da qual foi possível extrair dados de ensaios de piezocone apresentados em Robertson et al. (2019). A utilização dessa ferramenta mostrou-se bastante eficiente, uma vez que os dados obtidos apresentaram excelente concordância com as informações originais.

Adotando-se a abordagem proposta por Robertson (2009) para a caracterização do tipo de comportamento dos materiais presentes na estrutura (“rejeito fino” e “rejeito grosso”), foi possível elaborar, com o uso do software de modelagem, um modelo geológico-geotécnico tridimensional da Barragem I da Mina Córrego do Feijão apresentado na Figura 11 e Figura 12 (a) e (b), destacam-se as seguintes contribuições:

- (i) A possibilidade de traçar quaisquer seções – transversais, longitudinais ou em outras orientações – em qualquer ponto da estrutura e a qualquer momento;
- (ii) Identificação da continuidade estratigráfica nas seções transversais e longitudinais;
- (iii) A partir da interpolação realizada, foi possível identificar camadas de “rejeito fino” do tipo *clay-like* entremeadas com camadas de “rejeito grosso” nas proximidades dos alteamentos;
- (iv) É possível verificar a presença (ou ausência) de lençóis empoleirados;
- (v) Viabilidade de realização de futuras análises de estabilidade e/ou fluxo, tanto em duas quanto em três dimensões, com base nas seções extraídas do modelo ou diretamente no próprio modelo tridimensional;
- (vi) Aumento significativo da qualidade das informações disponíveis para análise, permitindo a identificação das seções mais críticas da estrutura; e
- (vii) Como resultado do modelo tridimensional, foi possível inferir, frente a modelos bidimensionais, a distribuição espacial dos diferentes tipos de rejeitos nas direções longitudinal e transversal no interior da barragem.

Vale destacar que a pesquisa associada a este trabalho continua em andamento, de maneira que as informações aqui apresentadas constituem o resultado parcial. O modelo estratigráfico definitivo será comparado com modelo de fluxo que considere a extensão lateral das camadas. Dessa forma, será possível complementar e validar a estratigrafia com base nos dados de poropressão obtidos por meio de ensaios de piezocone, de dissipação de poropressão e piezômetros do tipo Casagrande.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro e a Bentley, uma vez que a análise de dados para o artigo foi gerada com a utilização do Software da Bentley. Copyright © Bentley Systems, Incorporated.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Becker, L.D.B., Ehrlich, M., Barbosa, M.C. Discussion of “Stability Analysis of Upstream Tailings Dam Using Numerical Limit Analyses”. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, v. 149, n. 3, p. 07023001, 2023.
- Robertson, P.K. (1990) Soil classification using the cone penetration test. *Canadian Geotechnical Journal*, v. 27, n. 1, p. 151-158, 1990.
- Robertson, P.K. (2009) Interpretation of cone penetrometer tests – a unified approach. *Canadian Geotechnical Journal*, v. 46, n. 11, p.1337-1355.
- Robertson, P.K., Melo, L., Williams, D.J., Wilson, G.W. (2019) *Relatório do painel de especialistas sobre as causas técnicas do rompimento da Barragem I do Córrego do Feijão*. Disponível em: <<http://www.b1technicalinvestigation.com/pt/report.html>>. Acesso em: 07 de jul. 2025.
- Vick, S.G. *Planning, design, and analysis of tailings dams*. BiTech Publishers Ltd., 1990.