

Modelo Tridimensional de uma Pilha de Estéril no Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais: Um Estudo de Caso.

Juliana Sales Frota

Mestranda – Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA). Engenheira Geotécnica – Vale.
Belo Horizonte, Brasil.
juliana.sales@vale.com

Paulo Scarano Hemsí

Professor Associado – Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA). São José dos Campos, Brasil.
paulosh@ita.br

Vinicius Figueiredo

Geólogo – Vale. Belo Horizonte, Brasil.
vinicius.figueiredo1@vale.com

Marcos André da Silva Domingues

Engenheiro Geotécnico – Vale. Belo Horizonte, Brasil.
marcos.domingues@vale.com

RESUMO: Análises de estabilidade em 2D são a abordagem mais comum para estruturas geotécnicas no contexto da mineração no Brasil, mesmo sabendo-se que esse tipo de análise pode não representar características do comportamento 3D que, por vezes, são importantes, como variações na geologia, no fluxo d'água etc. A modelagem em 3D permite correlacionar informações de diferentes fontes, aumentando a representatividade e confiabilidade das análises. Este artigo se propõe a apresentar um estudo de caso sobre um modelo 3D de uma pilha de estéril com cerca de 30 anos de existência e localizada a jusante de uma cava com nível de água do lago em recuperação. Os dados disponíveis possibilitaram modelar a fundação, bem como o empilhamento em si, pela correlação de dados de investigações diretas e indiretas, dados de instrumentação hidrológica e informações históricas. O projeto As Is da pilha forneceu informações do comportamento do solo, baseando-se em sondagens SPT, ensaios triaxiais e de infiltração. A análise conjunta da investigação e da geofísica permitiu identificar fluxos preferenciais internos à estrutura, incluindo um 'bolsão suspenso'. A abordagem 3D deste estudo de caso permitiu a análise da freática da estrutura, correlacionando a geofísica com as leituras dos Indicadores de Nível de Água e sua relação com a estrutura por meio de análises estatísticas e compartimentalização geomecânica, aumentando o entendimento do comportamento da pilha e reiterando a importância do uso de modelo tridimensional.

PALAVRAS-CHAVE: Pilha de estéril; Modelagem 3D; Mineração.

ABSTRACT: 2D stability analyses are the most common approach for geotechnical structures in the context of mining in Brazil. However, it is known that this type of analysis may not fully represent 3D behavior, which can be important in cases such as variations in geology and water flow. 3D modeling allows for the correlation of information from different sources, enhancing the representativeness and reliability of analyses. This article presents a case study on a 3D model of a tailings pile with approximately 30 years of existence, located downstream from a pit with water level recovery. Available data enabled the modeling of the foundation and the stacking itself by correlating direct and indirect investigation data, hydrological instrumentation data, and historical information. The 'As Is' project of the pile provided insights into soil behavior based on SPT (Standard Penetration Test) data, triaxial tests, and infiltration studies. The combined analysis of geophysical and investigative data allowed the identification of internal preferential flows within the structure, including a 'suspended pocket.' The 3D approach in this case study facilitated the analysis of the water table, correlating geophysics with water level indicator readings and their relationship with the

structure through statistical analyses and geomechanical compartmentalization. This approach enhances our understanding of pile behavior and underscores the importance of using a three-dimensional model.

KEYWORDS: Waste pile; 3D modelling; mining and geophysics.

1. INTRODUÇÃO

As análises de estabilidade em 2D são a abordagem mais comum em estudos a respeito de estruturas geotécnicas no contexto minerário do Brasil, o que faz que características inerentemente tridimensionais, como "bolsões suspensos" e variações na geologia de fundação e fluxo, tenham de ser segmentadas. A modelagem 3D, por sua vez, permite ganhos em contextualização e abordagem macro, correlacionando diferentes fontes e tipos de informação e incrementando confiabilidade às análises dela decorrentes.

No presente estudo, a modelagem foi realizada por meio do software Leapfrog Geo, o qual trabalha geoestatisticamente com interpolações definidas pela distribuição média global de informações no espaço. Deve-se salientar que se trata de uma metodologia de modelagem rápida, tanto no processo construtivo, como na atualização dos modelos. Tal fato se deve à atualização automática permitida pelo software, pois à medida que novos dados são adicionados (e.g. novas campanhas de sondagem), o algoritmo recalcula o modelo com base nas parametrizações de modelo previamente definidas e nas novas informações inseridas (A.-S. Høyer, et al. 2018; Wellmann, et al. 2018).

Outro ponto relevante no presente trabalho está relacionado à multidisciplinaridade das análises. Entender e extrair informações de dados isolados de uma única natureza é uma prática simplista que pode gerar lacunas interpretativas e abordagens enviesadas, uma vez que metodologias distintas de investigações diretas e/ou indiretas podem gerar respostas diferentes para uma mesma área de estudo. Portanto, a realização de análises multidisciplinares, envolvendo bancos de dados distintos e informações de diferentes naturezas tende a proporcionar menor erro interpretativo e riscos reduzidos de validação de projetos.

Neste trabalho, foi possível correlacionar informações provenientes de sondagens, instrumentação, seções 2D (As Is) e geofísica (para mapeamento de fluxo d'água), em um único modelo tridimensional, cujas etapas e pormenores serão apresentados a seguir. Reitera-se que, em função da limitação de tamanho do presente artigo, o conteúdo é aqui apresentado de forma objetiva, mantendo a descrição macro do processo e detalhando itens específicos de mais relevância no contexto do estudo desenvolvido.

2. ESTUDO DE CASO

Em 2022 o projeto As Is da Pilha de Estéril (PDE), objeto do estudo deste artigo, foi finalizado, fornecendo uma quantidade considerável de dados de diferentes fontes e naturezas, o que possibilitou a abordagem multidisciplinar da modelagem 3D apresentada neste artigo. Foram desenvolvidas análises sobrepostas e multidisciplinares de diferentes bancos de dados, correlacionando informações de sondagens, ensaios SPT, instrumentação (indicadores de nível d'água) e seções 2D, para garantir um maior nível de coerência cruzada no modelo gerado.

2.1. METODOLOGIA

Para o presente estudo, foram considerados bancos de dados de distintas naturezas, georreferenciados no mesmo sistema de coordenadas, os quais são citados abaixo:

- Topografia atualizada;
- 04¹ Seções Geológicas;
- 16 Sondagens com ensaios SPT;

¹ As 04 seções geológicas 2D advindas do As Is foram utilizadas para o desenvolvimento e refino do modelo, no entanto, para fins de objetividade, só será detalhada a seção XX, por possibilitar melhor observação do fenômeno associado ao nível freático da pilha.

- 16 Indicadores de Nível d'água (INAs), e
- Geofísica

Considerando as informações compiladas, o trabalho de modelagem parte da compartimentação do elemento “Fundação” e “Aterro”. As sondagens e desenhos advindos do As Is da pilha configuram bancos de dados de duas naturezas de informações, as quais podem ser “cruzadas” com intuito de definir a superfície de contato entre os dois elementos. Com a utilização das sondagens utiliza-se do algoritmo para interpolar os pontos de contato do aterro, identificados nos furos, com os materiais abaixo dele (fundação). Tal interpolação gera uma superfície, que pode ser ajustada com as linhas de fundação apresentadas nas regiões das seções do As Is, mantendo a coerência entre o modelo e o projeto. Dessa forma, o produto gerado é uma superfície que considera tanto os pontos de contato definidos pelas sondagens quanto os limites da fundação definidos no As Is. Deve-se salientar que, caso novas informações de sondagens sejam incorporadas no software, a superfície irá atualizar dinamicamente e gerar um produto distinto, o qual deverá ser revalidado pelo usuário. A Figura 1 e a Figura 2 ilustram esta etapa da modelagem.

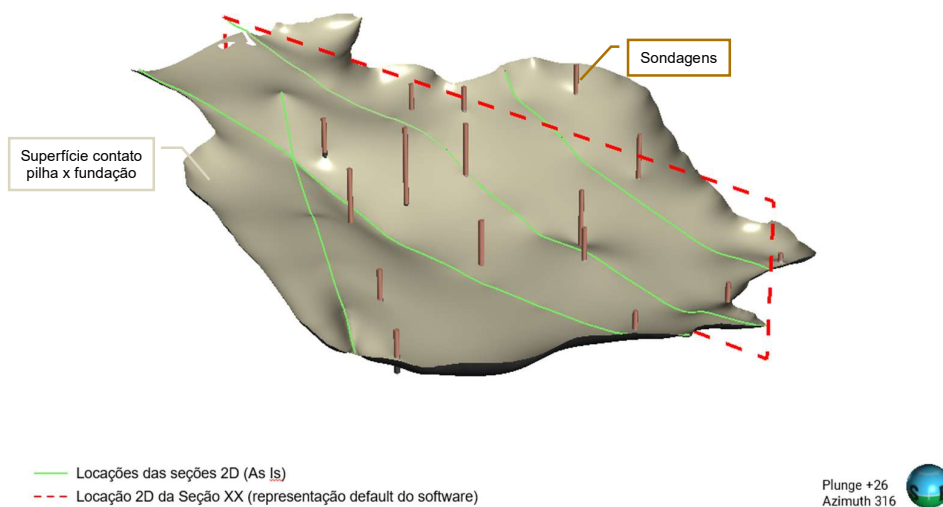


Figura 1. Contato pilha x fundação e inputs

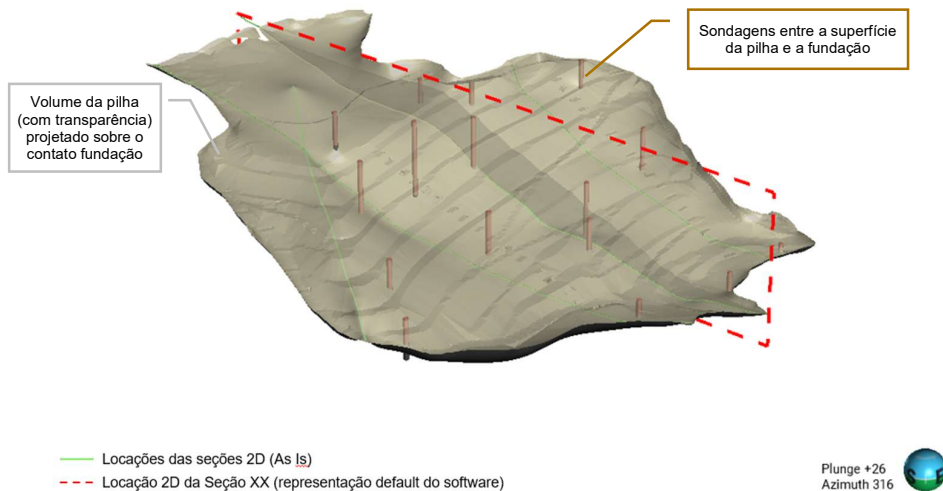


Figura 2. Projção do volume da pilha sobre o contato da fundação

Após a diferenciação entre os macro elementos (aterro e fundação), detalha-se a modelagem dos elementos menores que compõem a fundação. Com base no banco de dados disponível, um total de 6 elementos foram considerados nessa etapa da modelagem: Aterro (AT), Colúvio (COL), Solo Residual de Filito/Xisto (SR de FL_XI), Saprolito de Filito/Xisto (SAP de FL_XI), Saprolito de Quartzito (SAP de QZ) e Quartzito (QZ). De acordo com as informações obtidas, pode-se observar que a ocorrência de coberturas coluvionares se dá apenas na região noroeste da área modelada, muito similar à distribuição regional dos solos residuais. Por outro lado, a ocorrência de solo saprolítico de Filito/Xisto e de Filito/Xisto se distribui em profundidade por toda área de estudo, em contatos subparalelos. Por fim, os quartzitos se dispõem de forma a truncar todo o sistema, em uma camada contínua de aproximadamente 100 m de espessura com atitude média de 110/50. A presença de horizonte saprolítico de quartzito ocorre de forma subparalela sobre o QZ e limitado lateralmente em locais de ocorrência única e exclusiva de QZ, conforme observado Figura 3.

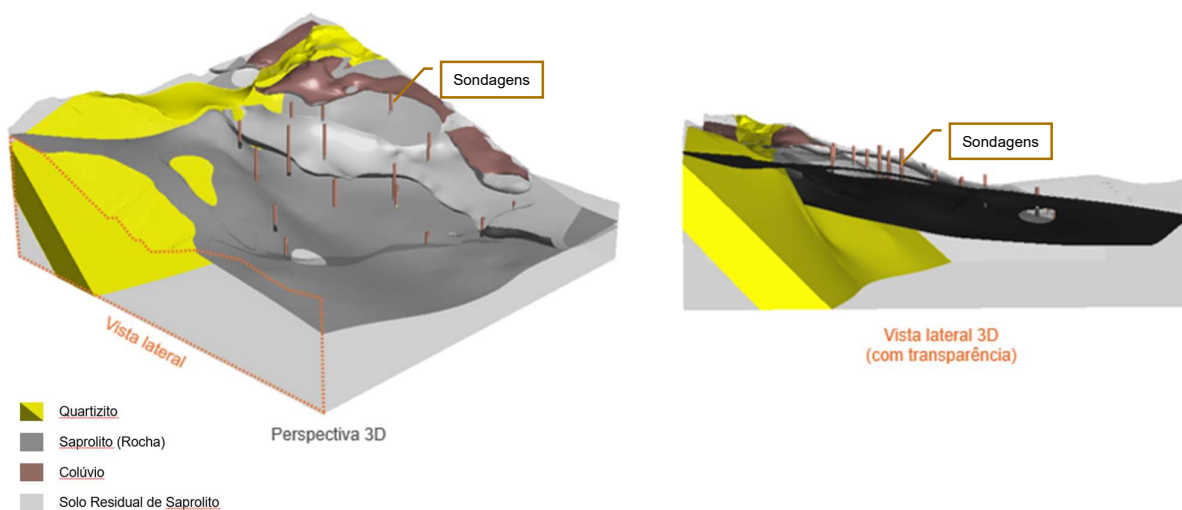


Figura 3. Visão 3D da diferenciação dos elementos constituintes da fundação.

Após as superfícies de contato entre os horizontes pedológicos e litológicos serem definidas, deve-se organizar a estratigrafia entre eles para a extração dos volumes referentes à cada material. Nota-se em seção que o resultado mostra coerência, não só ao banco de dados de sondagem previamente importado, como aos contatos pré-definidos no projeto As Is, como mostra a Figura 4 com o exemplo da seção XX'.

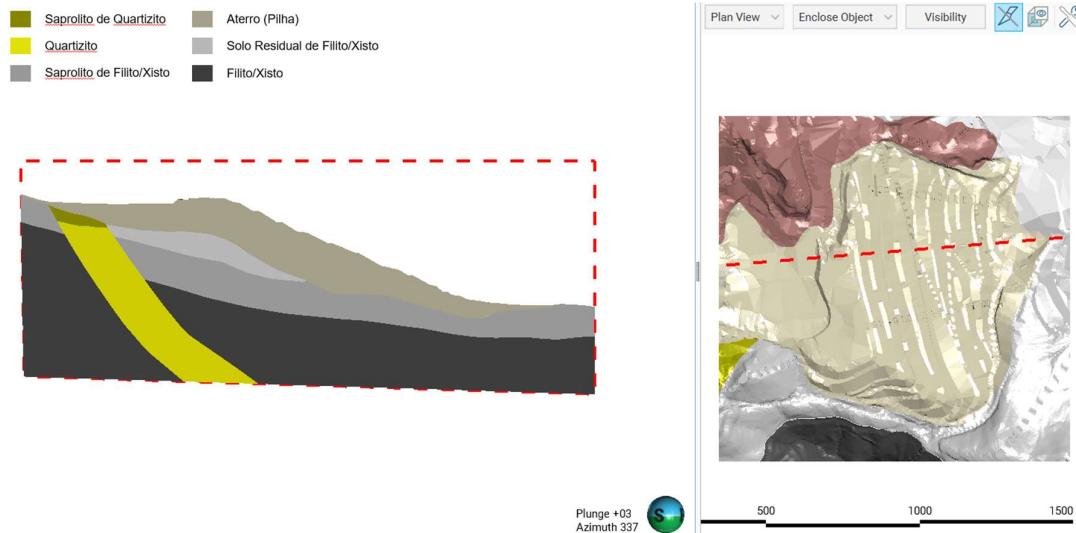


Figura 4. Corte - seção XX' (modelo), sobreposto à seção XX' 2D (As Is) e localização em planta.

Como a investigação geofísica representa o ‘retrato’ da estrutura no momento em que é executada, foram então adotadas as leituras dos INAs no mesmo período de realização da geofísica, visando à preservação da coerência entre informações e correta calibração do modelo.

Após a compilação dos INAs e inserção no ambiente tridimensional, foi possível observar dois comportamentos de níveis d’água: o primeiro (“Elevado”), com a provável existência de regiões saturadas em cotas superiores da pilha, principalmente na seção central, aqui denominada seção XX’; e o segundo (“Baixo”), associado à linha freática observada nas porções inferiores da pilha, como mostra a Figura 5.

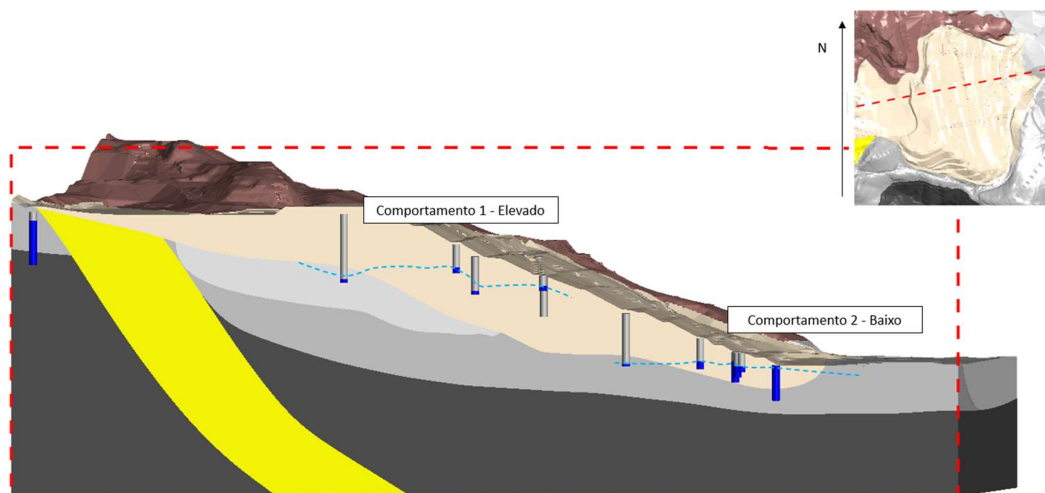


Figura 5. Seção XX' - Comportamentos de níveis d’água internos e localização em planta.

Como os INAs, apesar de próximos, possuem leituras muito díspares, traçar uma superfície contínua para o nível d’água não seria coerente, o que também não seria representativo de um maciço heterogêneo, característica inerente das pilhas de estéril (Hawley & Cunning, 2017).

Além disso, foi utilizada uma campanha geofísica com o método Willowstick para o mapeamento dos caminhos preferenciais de fluxo d’água no interior da PDE.

Nesse método, são feitas medições do campo magnético produzido pelo fluxo aplicado de corrente elétrica dentro do maciço. As leituras permitem criar imagens tridimensionais da distribuição do fluxo de corrente elétrica (ECD, “electric current distribution”) em subsuperfície, o qual, por sua vez, se associa à presença da água no material (Willowstick Technologies, 2016).

A Figura 6 mostra a distribuição espacial das informações advindas da geofísica, em que cada ponto representa um valor de densidade de corrente medida, indicada quantitativamente na escala de cores utilizada. Valores elevados de densidade de corrente (tons quentes) representam regiões possivelmente saturadas, ao passo que regiões de baixa densidade (tons frios) caracterizam locais com baixa probabilidade de saturação.

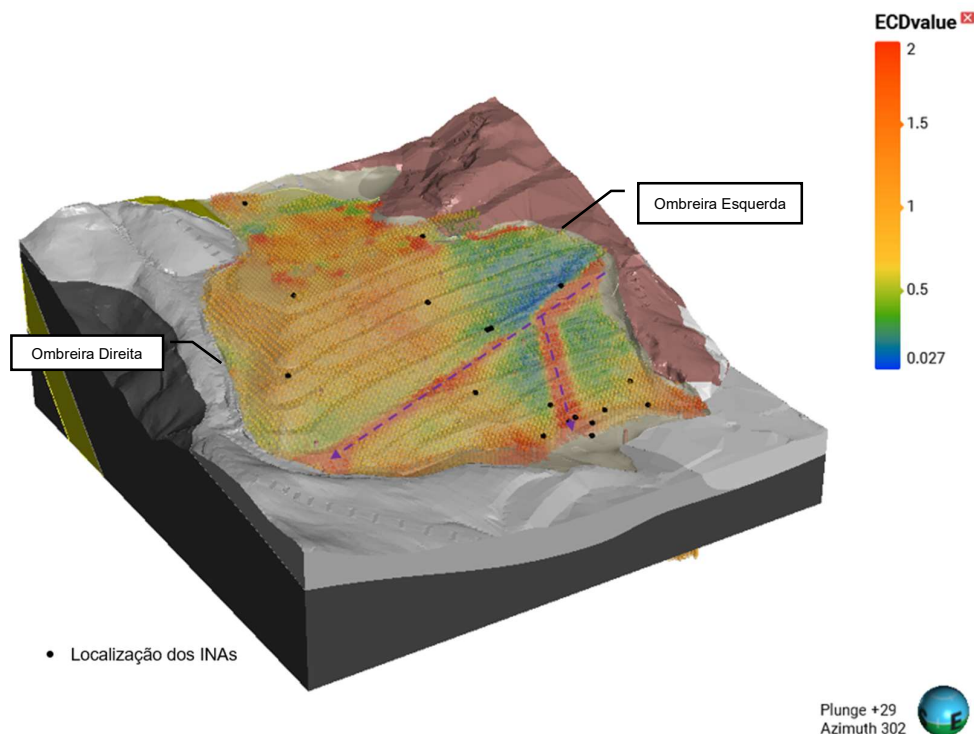


Figura 6. Visão 3D do modelo pedo-litológico incorporado à investigação geofísica.

São observados valores de elevada densidade de corrente partindo aproximadamente do meio da elevação da ombreira esquerda, registrando assinaturas que caracterizam uma geometria em “Y” sentido a ombreira direita, possivelmente indicando fluxos nas direções caracterizadas pelas setas representadas em roxo na Figura 6.

Nas porções a montante da pilha também há registro de elevada densidade de corrente, provavelmente associada ao lago em recuperação da cava de mineração já exaurida, localizada próximo à PDE, porém, uma análise em profundidade ainda se faz necessária para observar o comportamento de subsuperfície nesta região, bem como um balizamento das assinaturas geofísicas com a instrumentação local direta. A coerência interpretativa é de que regiões de elevada densidade de corrente se correlacionem espacialmente com pontos onde os INAs apresentem leituras coerentes com tal saturação.

Vale ainda ressaltar que, o corpo de quartzito, presente na litologia de fundação da área em que a pilha se encontra, funciona como uma espécie de barreira hidráulica, de tal forma que o nível d’água da cava a montante não se comunica diretamente com o nível freático da pilha, conforme análise dos INAs, fato que é também reiterado pelas diferentes densidades de corrente apresentadas, como ilustrado na Figura 7.

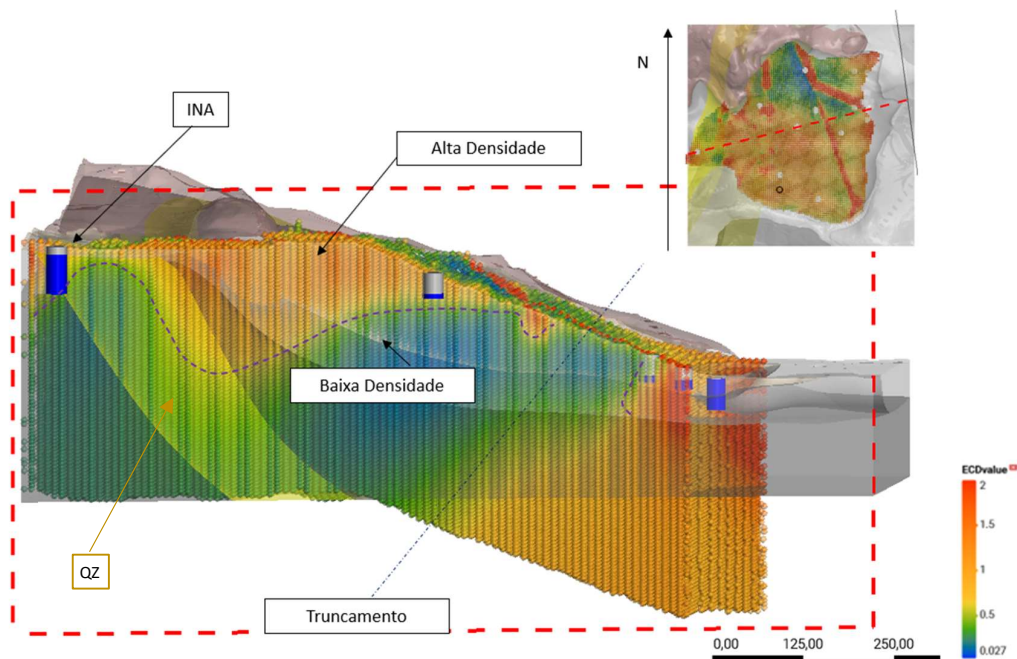


Figura 7. Seção XX' - Comparação dos Indicadores de Nível d'Água e Geofísica.

Contextualizando as informações em ambiente 3D e realizando um corte transversal à pilha, aproximadamente na seção XX', é possível observar coerência entre as respostas geofísicas de elevadas densidades com regiões onde a instrumentação denotou a presença de água (Figura 7). Observa-se ainda que tais respostas não representam uma continuidade no espaço, com pontos inclusive indicando truncamento entre densidades elevadas em cotas superiores e densidades elevadas em cotas inferiores. Tal fato já corrobora a hipótese de que um fluxo subsuperficial único não seria bem representativo da pilha.

Ante as informações advindas da geofísica, sondagens, análise de histórico, leituras de instrumento e observações de campo (surgências de água nas bermas superiores), foi modelado de forma 2D, no As Is da estrutura um “bolsão suspenso” de material saturado na porção superior, localizado na seção XX'. Esta representação, por sua vez, está de acordo com o modelo 3D, o qual mostra que, próximo à seção XX', pode-se estimar uma região saturada na porção superior da pilha, a zona de “Alta Densidade” de corrente, conforme a Figura 8.

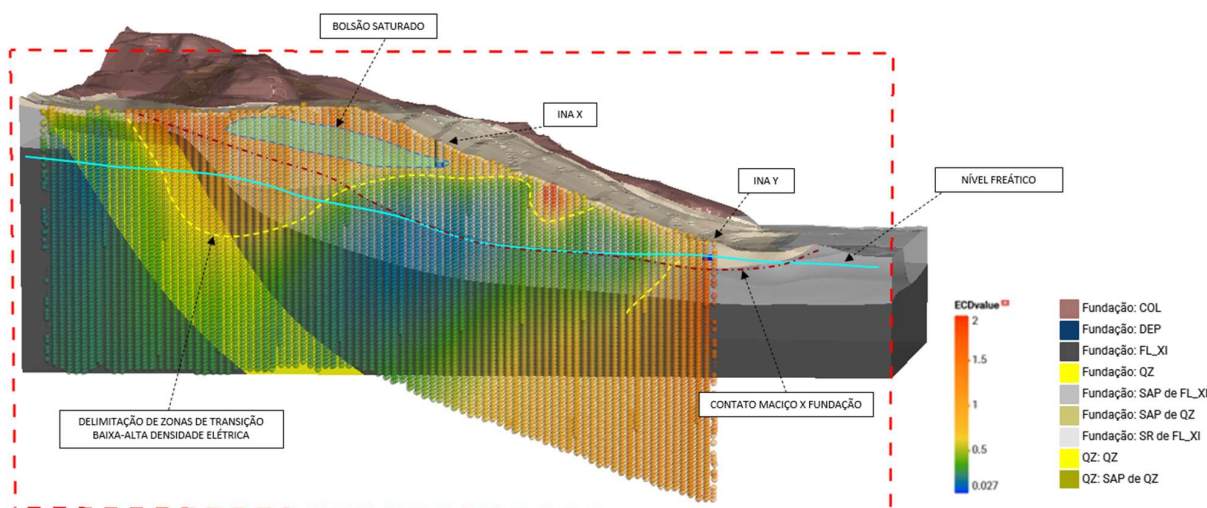


Figura 8. Seção XX' – Representação do bolsão suspenso.

3. CONCLUSÃO

Dentre as dificuldades encontradas na elaboração do modelo, pode-se citar as diferenças de datum entre informações, o que é caminho crítico para viabilização da compatibilização entre elas; a rotação e georreferenciamento em escala das seções 2d do projeto As Is, o que requer conhecimento específico e deve ser feito em software de desenho específico, como AutoCAD ou Civil 3D, antes de sua importação para o Leapfrog; e ainda, a construção do banco de dados a ser importado para o Leapfrog Geo, a qual teve de ser feita manualmente em função do formato em que se encontravam dos dados originais, muitas vezes em boletins (pdf) e não arquivos processáveis pelo software.

O estudo apresentado reitera a importância de abordar informações de fontes diversas e de diferentes naturezas dentro de um mesmo contexto/produto, uma vez que a análise isolada de informações pode limitar a interpretação, não produzindo representatividade da situação real. A verificação cruzada de dados aumenta a assertividade e confiabilidade para tomada de decisões.

A estrutura, objeto do estudo neste artigo, é inerentemente heterogênea, uma vez que pilhas de estéril são compostas por diferentes materiais depositados ao longo do tempo, décadas até, com variações nos métodos de empilhamento e equipamentos utilizados. Esses tipos de estruturas são rotineiramente tratados como um corpo uniforme, o que não é observado no modelo, já que por meio dele foi possível identificar uma zona específica (bolsão), dentro do próprio estéril constituinte do maciço da pilha, com características diferentes de saturação, o que não se vê na seção 2D. Também foi possível melhor elucidar alguns aspectos do comportamento da estrutura, como a presença de surgências de água em bermas superiores, as quais estão associadas ao bolsão suspenso com material saturado, representado de forma 3D no modelo.

Ainda, pode-se citar que outro ponto relevante do estudo está relacionado ao emprego adequado de ferramentas de modelagem 3D, as quais possibilitam criar superfícies e volumes com base em funções matemáticas que consideram análises geostatísticas. A utilização do software, aliada à modelagem implícita, reduz significativamente a subjetividade dos modelos, assim como o tempo necessário para sua construção. Devido à natureza implícita e dinâmica do software Leapfrog Geo, torna-se possível atualizar os modelos dinamicamente, com a inserção ou substituição de informações (sondagens, topografia, geofísica), o que permite um refinamento futuro.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- A.-S. Høyer, K.E.S. Klint, G. Fiandaca, P.K. Maurya, A.V. Christiansen, N. Balbarini, P.L. Bjerg, T.B. Hansen, I. Møller (2019). *Development of a high-resolution 3D geological model for landfill leachate risk assessment*, *Engineering Geology*. 249. 45-59.
- Hawley, M., & Cuning, J. (2017). *Guidelines for mine waste dump and stockpile design*. CSIRO Publishing.
- Wellmann F., Caumon G. (2018). 3-D Structural geological models: Concepts, methods, and uncertainties. *Advances in Geophysics*. 59: 1–121.
- Willowstick Technologies, LLC White Paper: A Patented Non-invasive Process to Accurately Model Preferential Groundwater Flow in Three Dimensions. 2016.