

Modelo Implícito Tridimensional de uma Barragem de Rejeitos de Mineração

Gabriel Cruz de Martino

Engenheiro Civil Júnior, UFMG, Belo Horizonte, Brasil, gmartino@ufmg.br

Talita Caroline Miranda

Professora, Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, Brasil, talita@etg.ufmg.br

Ronderson Queiroz Hilario

Professor, Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, Brasil, ronderson@etg.ufmg.br

RESUMO: Este trabalho busca criar um modelo geomecânico detalhado de uma barragem de contenção de rejeitos, em que será utilizado o software Leapfrog Works para desenvolver um modelo tridimensional da estrutura. Foram utilizadas as informações geotécnicas oriundas de sondagens SPT e mistas para estimar correlações para ângulo de atrito, coesão e pesos específicos para condições tanto naturais, quanto saturadas para garantir uma representação espacial das características geológicas e geotécnicas do solo da região de interesse. Por fim, para validar o modelo proposto, foram utilizados ensaios laboratoriais realizados na área da barragem realizando-se comparações com os dados obtidos através da interpolação dos ensaios "in situ" utilizados na modelagem, a fim de verificar a precisão e a compatibilidade do modelo construído. Em complemento, será utilizado um modelo explícito da estratigrafia da região realizada por um especialista da área da geologia para verificar a compatibilização do modelo geológico da estratigrafia obtido pelo software.

PALAVRAS-CHAVE: Ensaios de Campo, Modelagem Implícita, Leapfrog Works, Modelo Geomecânico, Modelo Tridimensional.

ABSTRACT: This work aims to create a detailed geomechanical model of a tailings containment dam, utilizing Leapfrog Works software to develop a three-dimensional model of the structure. Geotechnical information from SPT and mixed boreholes will be used to estimate correlations for friction angle, cohesion, and specific weights for both natural and saturated conditions to ensure a spatial representation of the geological and geotechnical characteristics of the soil in the region of interest. Finally, to validate the proposed model, laboratory tests conducted in the dam area will be used to compare with data obtained through interpolation of "in situ" tests used in the modeling, in order to verify the accuracy and compatibility of the constructed model. In addition, an explicit model of the region's stratigraphy created by a geology expert will be used to verify the compatibility of the geological model of the stratigraphy obtained by the software.

KEYWORDS: Field Tests, Implicit Modeling, Leapfrog Works, Geomechanical Model, Three-Dimensional Model.

1 INTRODUÇÃO

A geotecnia desempenha um papel crucial na indústria de mineração, garantindo a estabilidade de estruturas como taludes, barragens e pilhas de rejeitos para prevenir acidentes. No Brasil, sua importância é ainda maior devido à complexidade do solo e à diversidade geológica do país. Paulo Teixeira da Cruz destaca a geotecnia como a ciência que estuda o comportamento de solos e rochas em obras de engenharia, essencial para avaliar a estabilidade de barragens (Cruz, 100 Barragens Brasileiras). O conhecimento das propriedades do solo, obtido por meio de ensaios de campo e laboratoriais, é fundamental para projetos seguros, permitindo a construção de modelos geotécnicos que representam seu comportamento (ABNT NBR 6484/2001). Este trabalho visa estabelecer um modelo implícito tridimensional das condições geológicas e geotécnicas de uma

barragem de rejeitos, utilizando o software Leapfrog Works da Seequent. Essa abordagem visa não apenas prevenir desastres, mas também garantir a eficiência e segurança das operações mineradoras no país.

2 METODOLOGIA

Com o objetivo de alcançar os propósitos deste trabalho, será adotado o fluxo metodológico segmentado e detalhado a seguir. Iniciou-se o estudo com a coleta de informações relevantes para o levantamento topográfico do reservatório, bem como para as seções típicas da estrutura, realizadas por meio de modelagem explícita e informações necessárias para a contextualização e compreensão do funcionamento da barragem em questão. Posteriormente, consolidaremos os dados obtidos por meio das investigações geológico-geotécnicas realizadas em laboratório, visando a estimativa dos parâmetros de resistência ao cisalhamento. Adicionalmente, coletaremos os dados provenientes das investigações de campo, obtidos através dos ensaios de SPT e sondagens mistas.

Após foi realizada a compatibilização das informações e estimativa de parâmetros geotécnicos. Esse procedimento consistiu em uma análise criteriosa das informações contidas nas sondagens selecionadas. Cabe ressaltar que todos os aspectos geológicos e texturais identificados foram devidamente compatibilizados. Concluída a classificação geológica e textural, foram consultadas referências bibliográficas relevantes para a realização de correlações entre os valores dos N_{spt}'s (Standard Penetration Resistance) obtidos nas sondagens e a estimativa de parâmetros geotécnicos contemplados.

Na sequencia definiu-se o modelo geométrico e estratigráfico, que permitiu uma representação precisa das características do terreno e da distribuição dos materiais geológicos. No presente estudo, será adotada uma abordagem específica para alcançar um modelo mais coerente, levando em consideração a estrutura geológica da região. Nesse contexto, a superfície topográfica passará por ajustes a fim de otimizar o modelo. Essa modificação envolverá a divisão da topografia em duas partes distintas. Sendo elas, a superfície dos solos da região estudada, e a topografia relacionada ao reservatório de rejeitos, inserido como uma falha para que seja segregado das interpolações realizadas pelo Leapfrog Works, já que nessa região se apresenta apenas o rejeito da barragem estudada. Por fim, a superfície topográfica será convertida em um bloco volumétrico delimitado pelo rejeito e pelo volume a ser dividido em camadas segundo os dados das sondagens de campo inseridas, sendo obtido um modelo implícito da estratigrafia da região do estudo.

Por fim foi realizada a modelagem implícita a partir dos dados obtidos por meio das investigações geotécnicas realizadas no modelo escolhido foram tratados por meio da criação de um modelo de blocos para cada parâmetro estudado. A modelagem de blocos é uma abordagem que representa a distribuição espacial das propriedades geotécnicas do subsolo e dos parâmetros condicionados. Para cada parâmetro, o modelo de blocos será criado com base nos dados coletados durante as investigações geotécnicas, levando em consideração a variação espacial dos valores. Cada bloco no modelo representará uma porção do subsolo, com parâmetros geotécnicos atribuídos de acordo com as características identificadas, permitindo uma análise espacial e compreensão do comportamento geotécnico do terreno.

Para validação do resultado obtido, será comparado o modelo implícito com dados de ensaios triaxiais para verificar sua precisão e acurácia na representação das propriedades geotécnicas do terreno estudado.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A coleta e classificação de dados são fundamentais no processo de desenvolvimento de um modelo implícito geotécnico. Tais etapas fornecem informações para a compreensão das características do terreno e precisão da modelagem. Os dados utilizados como entrada consistiram em uma superfície topográfica, bem como informações coletadas por meio de sondagens mistas e sondagens SPT (Standard Penetration Test). A área em análise, possui um histórico de sondagens realizadas ao longo de diferentes anos e por empresas distintas. Contudo, durante o processo de coleta de dados, algumas sondagens tiveram que ser desprezadas, por conta da existência de sondagens localizadas fora da área de prioridade e sem informações relevantes para a modelagem. As locações das sondagens consideradas no modelo estão apresentadas na Figura 1.

Os resultados dos ensaios laboratoriais também foram considerados e utilizados na validação do modelo proposto, permitindo a análise da confiabilidade das condições geotécnicas estimadas a partir do modelo implícito definido.

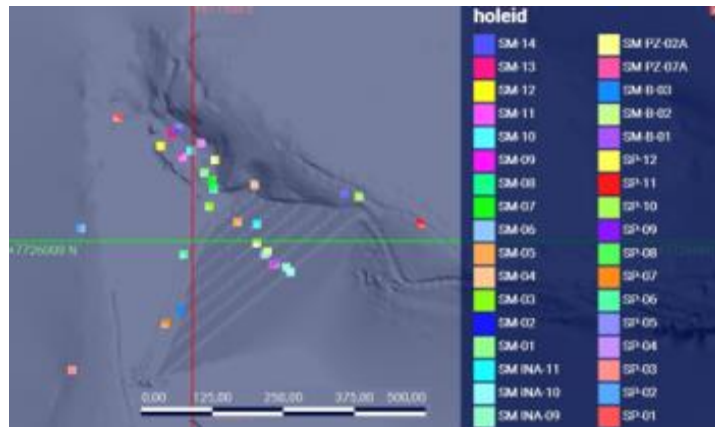


Figura 1. Localização das sondagens consideradas no modelo em planta.

Uma vez realizada a adequada seleção das sondagens, foi possível avançar para a etapa de compatibilização dos dados. Esse procedimento consistiu em uma análise das informações contidas nas sondagens selecionadas. Cabe ressaltar que todos os aspectos geológicos e texturais identificados foram devidamente compatibilizados. Na Figura 2 estão evidenciadas as sondagens divididas a partir da geologia considerada no estudo.

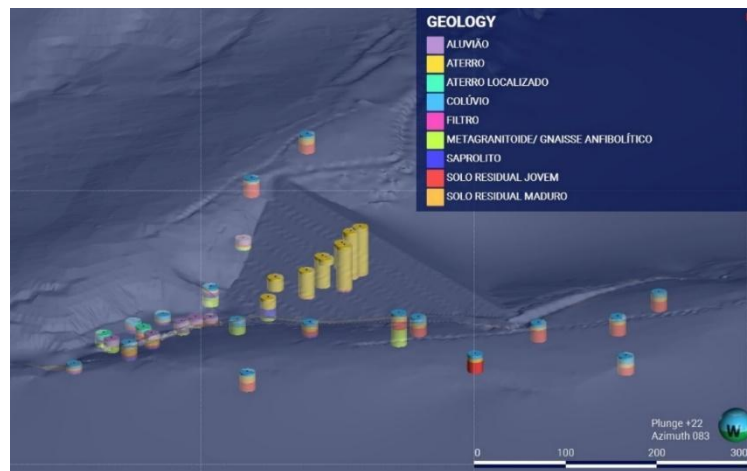


Figura 2. Sondagens divididas a partir da geologia considerada no estudo.

Uma vez concluída a classificação geológica e textural, foram consultadas referências bibliográficas relevantes para a realização de correlações entre os valores dos N_{spt}'s (Standard Penetration Resistance) obtidos nas sondagens e a estimativa de parâmetros geotécnicos, tais como ângulo de atrito, coesão (total e efetiva) e peso específico, tanto para condições naturais quanto saturadas. Essas referências bibliográficas estão evidenciadas na Tabela 1 e Tabela 2.

Por fim, foram realizadas interpolações utilizando os dados das tabelas com o objetivo de obter uma visão abrangente do contexto do solo na região de estudo. Dessa forma, foi possível estimar valores desconhecidos entre os pontos de dados observados, proporcionando uma representação mais completa e contínua das características do solo presente na estratigrafia do modelo geomecânico.

Tabela 1. Parâmetros médios do solo. Fonte: Joppert (2007).

Tipo de solo	Parâmetros médios do solo					
	Faixa de N _{spt}	Módulo de elasticidade (t/m ²)	Peso específico (kN/m ³)		Ângulo de atrito efetivo (graus)	Coesão efetiva (kPa)
			Natural	Saturado		
Areia pouco siltosa/ pouco argilosa	0 – 4	2000 – 5000	17	18	25	-
	5 – 8	4000 – 8000	18	19	30	-
	9 – 18	5000 – 10000	19	20	32	-
	19 – 41	8000 – 15000	20	21	35	-
	> 41	16000 – 20000	20	21	38	-
Areia média e fina muito argilosa	0 – 4	2000	17	18	25	0
	5 – 8	4000	18	19	28	5
	9 – 18	5000	19	20	30	7,5
	19 – 41	10000	20	21	32	10
Argila porosa vermelha e amarela	0 – 2	200 – 500	15	17	20	7,5
	3 – 5	500 – 1000	16	17	23	15
	6 – 10	1000 – 2000	17	18	25	30
	> 10	2000 – 3000	18	19	25	30 a 70
Argila siltosa pouco arenosa	0 – 2	100	17	18	20	7,5
	3 – 5	100 – 250	18	19	23	15
	6 – 10	250 – 500	19	19	24	20
	11 – 19	500 – 1000	19	19	24	30
	20 – 30	3000 – 10000	20	20	25	40
> 30	10000 – 15000	20	20	25	50	
Argila arenosa pouco siltosa	0 – 2	500	15	17	15	10
	3 – 5	500 – 1500	17	18	15	20
	6 – 10	1500 – 2000	18	19	18	35
	11 – 19	2000 – 3500	19	19	20	50
	> 20	3500 – 5000	20	20	25	65
Argila orgânica/ Turfa	0 – 1	40 – 100	11	11	15	5
	2 – 5	100 – 150	12	12	15	10
Silte arenoso pouco argiloso (residual)	5 – 8	8000	18	19	25	15
	9 – 18	10000	19	20	26	20
	19 – 41	15000	20	20	27	30
	> 41	20000	21	21	28	50

Tabela 2. Correlações para estimativa de parâmetros. Fonte: Godoy (1983) e Teixeira (1996).

Referência	Parâmetro	Correlação
Godoy	Ângulo de atrito não drenado	$\phi = 28^\circ + 0,4 N_{spt}$
Teixeira	drenado	$\phi = \sqrt{20 N_{spt}} + 15^\circ$

Como resultado, foi gerado o bloco volumétrico correspondente à região de interesse, que foi dividido em camadas, além da correta delimitação do rejeito como uma falha no modelo. O presente trabalho tem como finalidade realizar uma análise comparativa da estratigrafia em um estudo geotécnico, considerando dois modelos distintos. Sendo um deles, um modelo 2D derivado de um mapeamento geológico realizado por um especialista na área, e o outro, o modelo 3D obtido a partir das análises e estimativas feitas pelo software Leapfrog Works 2023.1. O foco dessa comparação é identificar possíveis diferenças nos estratos de solo representados por cada modelo, levando em consideração as simplificações, estimativas e limitações de ambos os estudos.

Portanto, os resultados provenientes dessa comparação foram apresentados e discutidos, destacando as diferenças e semelhanças identificadas entre os estratos de solo representados por cada modelo. A interpretação desses resultados será conduzida levando em consideração as limitações inerentes a cada abordagem, com o

intuito de fornecer uma visão mais abrangente da estratigrafia da área de estudo. A Figura 3 ilustra o modelo 3D segmentado de acordo com a estratigrafia geológica da região em estudo, que será submetido a seccionamentos apropriados para a realização das análises comparativas atreladas ao estudo.

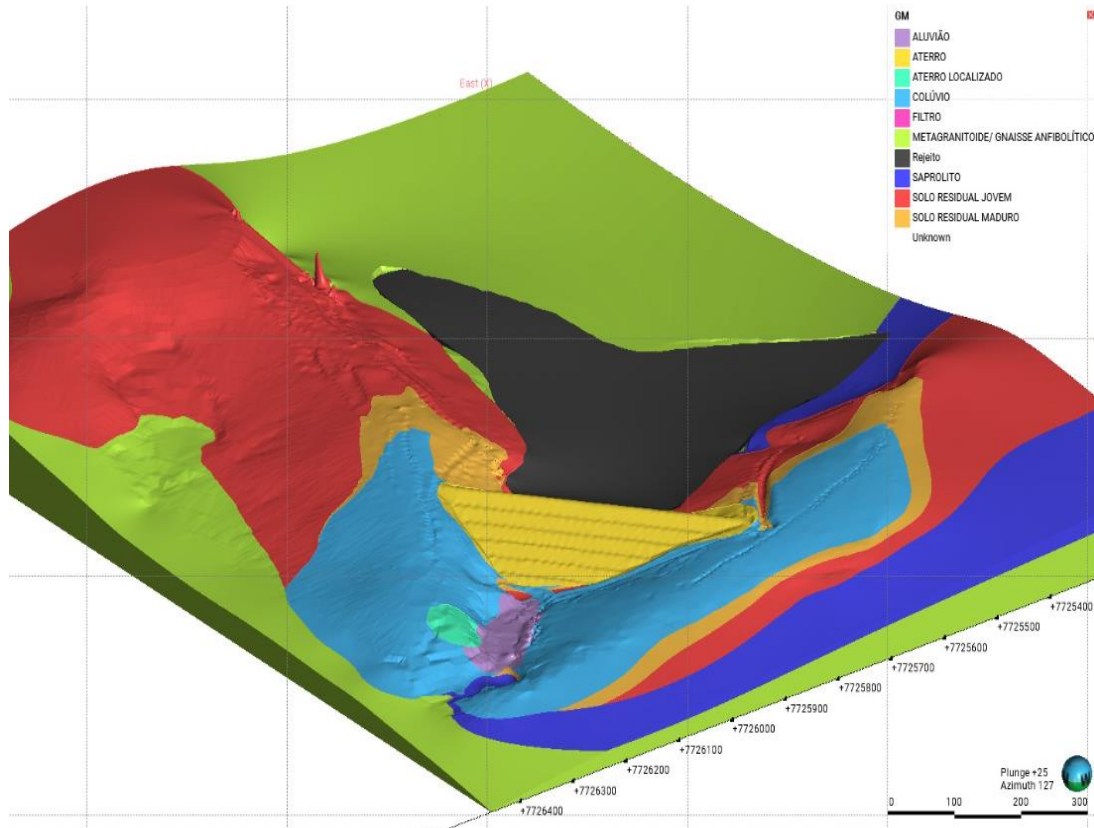


Figura 3. Planta da região de estudo segregada pela geologia interpolada pelo software.

Sendo assim, observa-se na Figura 4 e na Figura 6 a seção D e B, respectivamente, realizadas manualmente por um geólogo especializado. Já na Figura 5 e na Figura 7, podem-se analisar a estratigrafia das mesmas regiões, porém estimadas com o uso do software Leapfrog Works. As diferenças encontradas da topografia se devem ao fator escala exagerado na vertical para os perfis criados manualmente e os criados pelo softwares as escalas vertical e horizontal seguem a mesma escala.

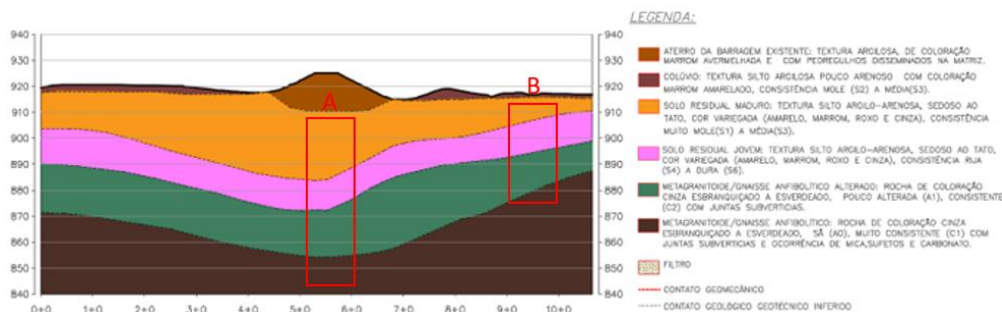


Figura 4. Seção D realizada manualmente por um especialista (Direita) e realizada pelo software Leapfrog Works 2023.1.

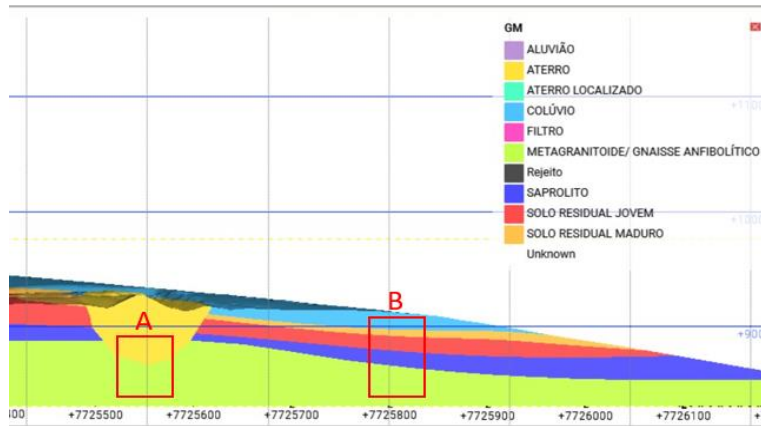


Figura 5. Seção D realizada pelo software Leapfrog Works 2023.1. .

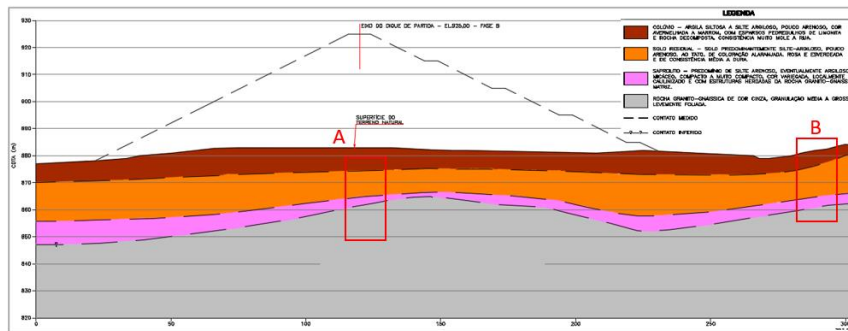


Figura 6. Seção B realizada manualmente por um especialista. Fonte: Relatório técnico da estrutura (2023).

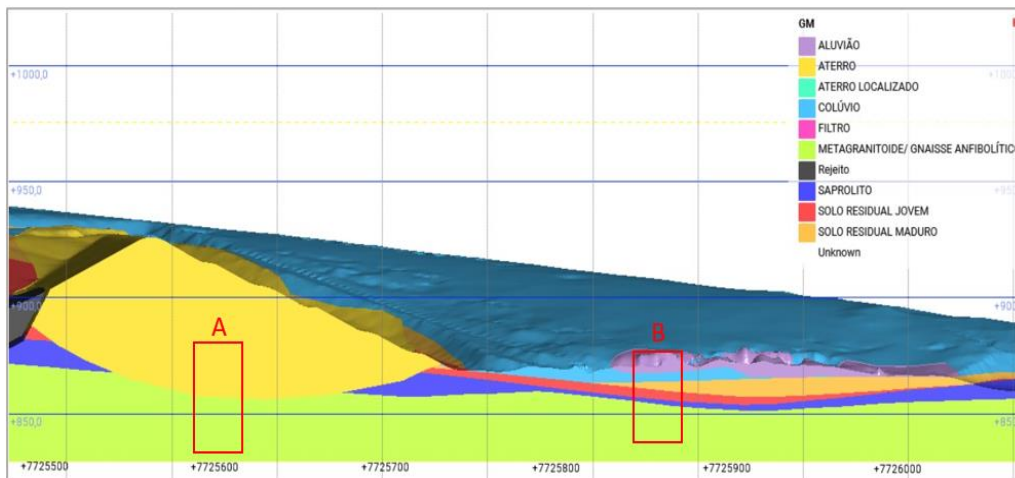


Figura 7. Seção B realizada pelo software Leapfrog Works 2023.1.

Ao comparar as seções, é possível identificar algumas discrepâncias na estratigrafia das respectivas regiões. No modelo gerado pelo Leapfrog, observa-se uma extensão mais profunda do aterro (regiões destacadas com a letra A), o que pode ser atribuído à distribuição das sondagens utilizadas no modelo. Devido à concentração dessas sondagens na área central do maciço, a falta de informações resulta em interpolações realizadas pelo software, conforme ilustrado nas seções do modelo. Analogamente, essa falta de informações também prejudicou a coerência da região à montante da estrutura, estabelecendo assim algumas divergências também significativas. Por outro lado, a região a jusante da barragem (regiões destacadas com a letra B) apresenta uma maior coerência, pois conta com uma densidade de informações mais distribuída. Como resultado, para essa região analisada é observada uma maior concordância entre os modelos, com diferenças interpretativas esperadas para as regiões que possuem lacunas de informações.

O outro objetivo da pesquisa consistiu em desenvolver um modelo implícito para a estimativa de parâmetros geotécnicos na região estudada, tais como ângulo de atrito, coesão (total e efetiva) e peso específico, tanto para condições naturais quanto saturadas e validar esses valores com os ensaios de laboratório realizados.

Dessa forma, o modelo de blocos foi elaborado utilizando-se blocos com dimensões de 1 metro em todas as direções para cada parâmetro mencionado e para cada camada de solo abordada no estudo. São apresentados na Figura 8, Figura 9, Figura 10, Figura 11, Figura 12 e Figura 13, os modelos de blocos para as correlações realizadas para a geologia do maciço da barragem (aterro).

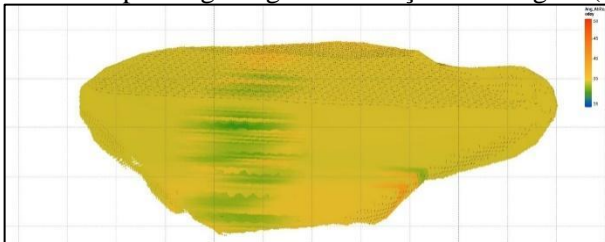


Figura 8. Modelo de blocos da camada de aterro calculado para o ângulo de atrito de Godoy.

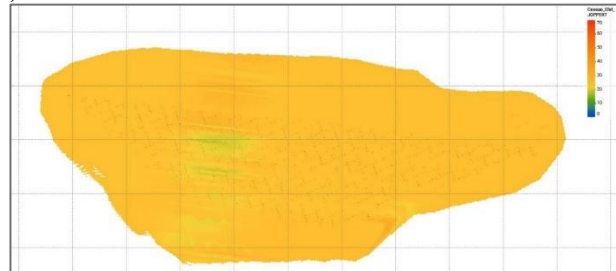


Figura 11. Modelo de blocos da camada de aterro calculado para a coesão efetiva de Joppert.

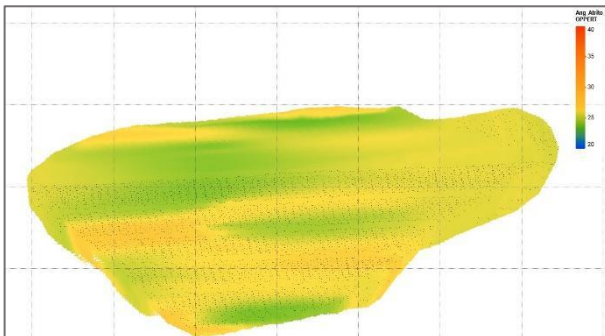


Figura 9. Modelo de blocos da camada de aterro calculado para o ângulo de atrito de Joppert.

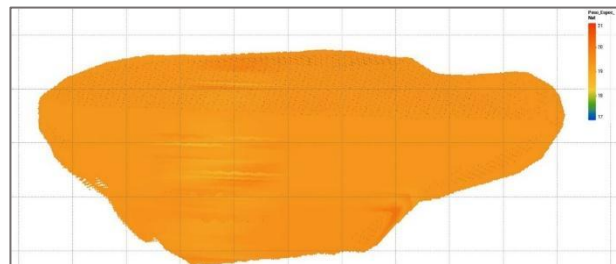


Figura 12. Modelo de blocos da camada de aterro calculado para o peso específico natural de Joppert.

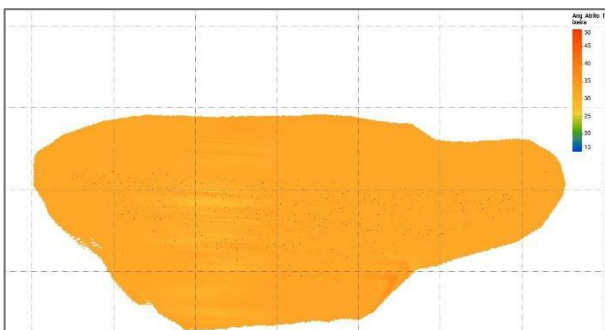


Figura 10. Modelo de blocos da camada de aterro calculado para o ângulo de atrito de Teixeira.

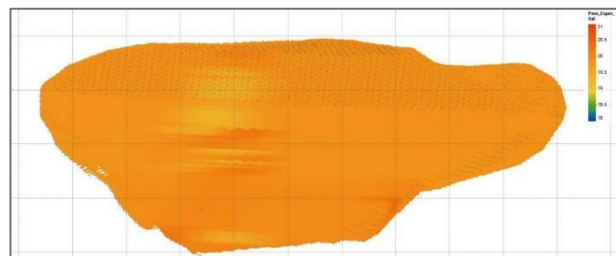


Figura 13. Modelo de blocos da camada de aterro calculado para o peso específico saturado de Joppert.

Para realizar a comparação dos parâmetros obtidos pelo modelo com os resultados dos ensaios laboratoriais, foram colhidos os valores interpolados pelo modelo de blocos nas mesmas coordenadas e profundidades dos ensaios laboratoriais.

4 CONCLUSÕES

A criação de um modelo geomecânico visa reduzir incertezas na região da barragem de rejeitos, proporcionando uma distribuição precisa dos parâmetros do solo através de correlações empíricas. A análise comparativa da estratigrafia não visa invalidar nenhum modelo, mas sim aprimorar o entendimento das condições geológicas e geotécnicas da área. Embora o modelo 2D tenha sido desenvolvido com base em

mapeamento especializado realizado por equipe de geólogos, enfrentou desafios devido à falta de detalhes em algumas áreas. O modelo 3D, construído com dados do estudo, enfrentou incertezas na interpolação dos dados, especialmente para os parâmetros de coesão e peso específico.

Aproximações satisfatórias foram obtidas para o ângulo de atrito, alinhadas com correlações propostas, porém, as estimativas para coesão e peso específico foram menos precisas, destacando a importância de ajustar correlações para melhorar a precisão das estimativas. Ensaios CPTu são recomendados para aprimorar a acurácia das estimativas de coesão.

Inconsistências foram observadas no modelo estratigráfico devido à falta de dados detalhados do solo. A inclusão da camada de aterro como uma falha poderia melhorar as interpolações nessa região e, conseqüentemente, os ajustes para outras camadas do solo. Apesar dos desafios, a interpolação do modelo de blocos foi satisfatória, especialmente para o ângulo de atrito, indicando a eficiência do modelo tridimensional, apesar das simplificações adotadas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Mello, V. F. B. (1975). *Maçãos e Obras de Terra. anotações de apoio às aulas*. São Paulo: EPUSP.
- Gaioto, Nélio (2003). *Introdução ao Projeto de Barragens de Terra e de Enrocamento*. Depto. de Geotecnia da Escola de Engenharia de São Carlos – USP.
- Cruz, Paulo Teixeira da (2004). *100 Barragens Brasileiras..*
- Massad, Façal (2010). *Obras de Terra - Curso básico de Geotecnia*. São Paulo: Oficina de Textos.
- Agência Nacional de Mineração – ANM (2022). *Resolução Nº 95, de 07 de fevereiro de 2022*. Brasília, DF.
- Robertson, Peter K.; Cabal, K.L (2015). *Guide to cone penetration testing for geotechnical engineering*. 6. ed. Signal Hill: Gregg Drilling & Testing, Inc.
- Schnaid, Fernando; Odebrecht, Edgar (2012). *Ensaio de campo e suas aplicações à Engenharia de Fundações*. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos.
- De Sousa Pinto, Carlos (2016). *Curso básico de Mecânica dos Solos*. Oficina de Textos.
- Das, Braja M.; Sivakugan, Nagarathnam (2007). *Livro Fundamentos de Engenharia Geotécnica*. São Paulo: Thomson Learning.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT (2020). *NBR 6484: Solo - Sondagens de simples reconhecimento com SPT - Método de ensaio*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT (2017). *NBR 13028: Elaboração e apresentação de projeto de barragens para disposição de rejeitos, contenção de sedimentos e reservação de água - Requisitos*. Rio de Janeiro.
- Brasil (2010). *Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010*. Estabelece a política nacional de segurança de barragens. Brasília, DF.
- Cintra, José Carlos A.; Aoki, Nelson; Henrique, José (2011). *Fundações Diretas Projeto Geotécnico*. São Paulo: Oficina de Textos.
- Joppert Jr., Ivan (2007). *Fundações e Contensões de Edifícios*. São Paulo: PINI.
- Nogueira, Joao Baptista et al (2005). *Mecânica dos solos: ensaios de laboratório*.
- Barreto, Fernanda Souto (2021). *A Modelagem Implícita no Aprimoramento do Modelo Conceitual de uma Área Contaminada*. São Paulo: USP.