

MODELAGEM GEOLÓGICO-GEOTECNICA 3D EM PILHA DE REJEITO-ESTÉRIL (PDER)

Orlando D. Prado¹; Ariel H. Pozzobon²; Ian K. N. Yonezawa³, Cristian N. Estevam, Luísa A. Araujo⁵ Diógenes Amaral⁶

Resumo – O trabalho apresenta um estudo geológico-geotécnico voltado à modelagem tridimensional de uma pilha de co-disposição de rejeito e estéril localizada em Brumadinho (MG), utilizando o *software* Leapfrog Works. Inicialmente, a pilha foi projetada para receber apenas estéril, mas, devido à alta geração de resíduos, passou a receber também rejeitos. Após análises de estabilidade que indicaram risco de liquefação, foi necessário realizar obras de reforço, incluindo retaludamento, injeção de colunas de solo-cimento (DSM) e outras medidas emergenciais. A modelagem da pilha foi baseada em 52 sondagens, convertidas para banco de dados, e considerou materiais antrópicos e naturais. A fundação foi subdividida em rocha, saprolito e solo residual, utilizando critérios baseados em ensaios de resistência à penetração (Nspt). O modelo final permitiu visualizar os volumes e a geometria dos diferentes materiais, incluindo os corpos heterogêneos, sendo essencial para o entendimento do comportamento mecânico da pilha em regiões com pouca informação geotécnica. Apesar da boa qualidade dos dados, o estudo destaca limitações como ausência de sondagens em rocha e inconsistências nas descrições geológicas. Assim, recomenda-se a continuidade das investigações para refinamento do modelo. O estudo reforça a importância da modelagem como ferramenta de apoio à segurança e ao planejamento de estruturas geotécnicas complexas, como pilhas de rejeito e estéril em áreas de mineração.

Palavras-Chave – Modelagem Geológica-geotécnica; Pilha; Rejeito; Estéril.

Abstract – The text presents a geological-geotechnical study focused on the three-dimensional modeling of a co-disposal pile of tailings and waste located in Brumadinho (MG), using the software Leapfrog Works. Initially, the pile was designed to receive only waste rock, but due to the high generation of residues, it also began to receive tailings. After stability analyses indicated the risk of liquefaction, reinforcement works were required, including regrading, injection of deep soil mixing (DSM) columns, and other emergency measures. The pile's modeling was based on 52 boreholes, converted into a database, and considered both anthropic and natural materials. The foundation was subdivided into rock, saprolite, and residual soil, using criteria based on Standard Penetration Test (SPT) results. The final model allowed for visualization of volumes and geometry of the different materials, including heterogeneous bodies, being essential to understanding the mechanical behavior of the pile in regions with little geotechnical information. Despite the good quality of the data, the study highlights limitations such as the absence of boreholes in rock and inconsistencies in geological descriptions. Therefore, continued investigations are recommended to refine the model. The study reinforces the importance of geotechnical modeling as a support tool for the safety and planning of complex geotechnical structures, such as tailings and waste piles in mining areas.

Keywords – Geological-geotechnical Modeling; Stack; Mining Waste; Tailings

1 Geól., MSc, Universidade Federal de Santa Catarina, (48) 99601-4222, orlandoprado.geologia@gmail.com

2 Geól, Universidade Federal de Santa Catarina, (48) 99137-2043, arielhpozzobon@gmail.com

3 Geól Geotécnico, Universidade Estadual Paulista (14) 99790-8743, ian.yonezawa@dam.

4 Geól., Msc, Universidade de São Paulo, (48) 99995-1361, cristianestavam@outlook.com

5 Eng., Civil Geotécnica – Universidade Federal de Viçosa (31)99819-8837, luisa.araujo@dam.com.br

6 Geól. Geotécnico,Msc., PUCMINAS:, (31) 98806-9891, diogenesgeologo@gmail.com

1. INTRODUÇÃO

O processo de extração e beneficiamento do minério de ferro gera uma elevada quantidade de resíduos, sejam eles estéreis ou rejeitos. Esses materiais são usualmente dispostos em forma de aterros conhecidos como pilhas, cuja principal função é o armazenamento definitivo dos resíduos gerados pelos processos de beneficiamento. As pilhas, em sua maioria, ocupam grandes áreas físicas, exigindo conhecimento geológico-geotécnico detalhado da fundação, por meio de investigações diretas e indiretas, para que seja possível projetar e executar uma estrutura segura. Devido à sua grande extensão geométrica, a realização de campanhas de sondagem que proporcionem um grau de certeza compatível com a dimensão do projeto tende a ser onerosa.

Nesse sentido, o desenvolvimento de um modelo geológico-geotécnico da fundação da pilha e, posteriormente, da sua geometria torna-se uma ferramenta poderosa, que auxilia não apenas na elaboração do projeto, mas também no acompanhamento técnico ao longo dos anos de operação.

Neste artigo, será apresentada e discutida uma rotina de modelagem envolvendo uma pilha de rejeito e estéril, desde a elaboração do banco de dados até o refinamento das geometrias geradas, utilizando modelagem implícita no software Leapfrog.

2. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA ESTUDADA

2.1. Localização da pilha em estudo

A Área de estudo corresponde a uma pilha de coodisposição de rejeito e estéril localizada no município de Brumadinho - MG. A Figura 1 mostra o mapa de localização da área.

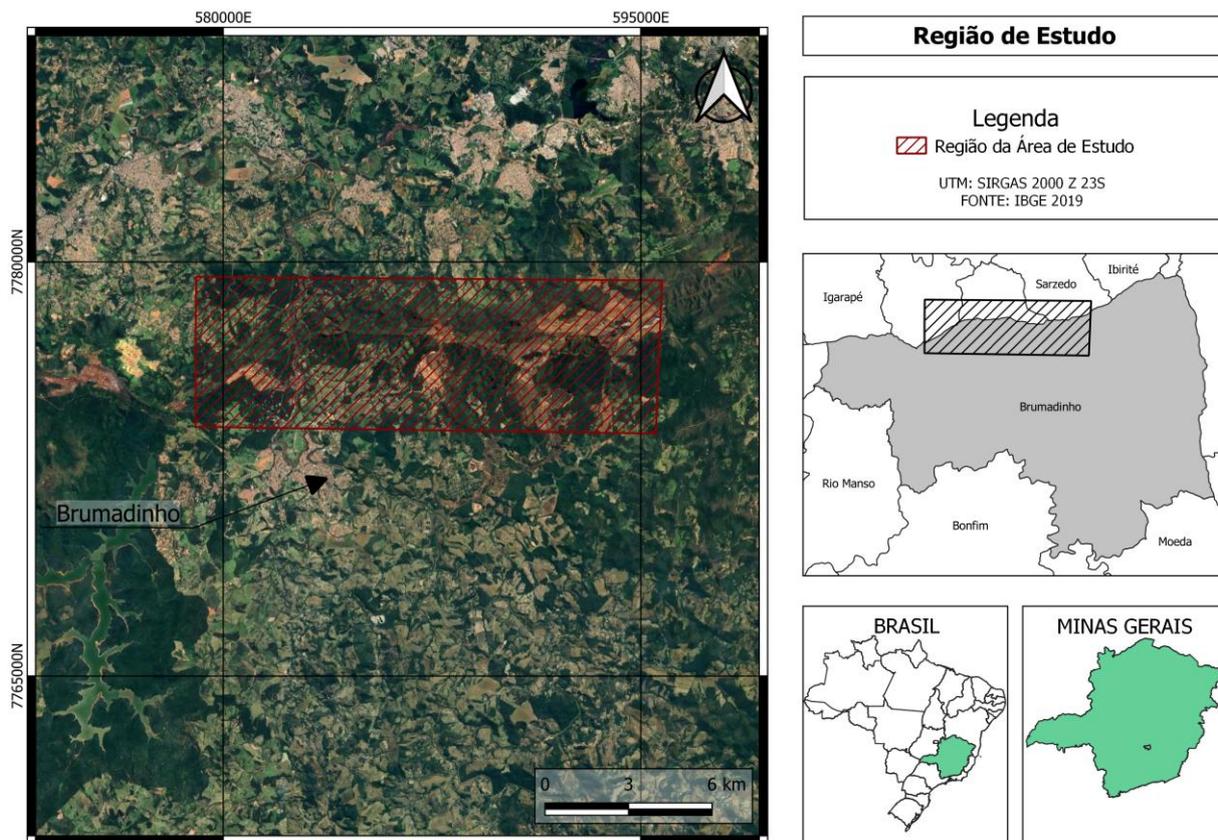


Figura 1 - Localização da área de estudo.

2.2. Histórico da estrutura

A pilha alvo deste estudo foi construída inicialmente para depósito de estéril gerados pela produção de minério de ferro. Devido a elevada produção de resíduos da mina a estrutura passou a operar como estrutura de coodisposição de rejeito e estéril.

Nos anos iniciais de operação os rejeitos eram dispostos tanto em polpa quanto desaguados, de forma randômica. Após a interrupção da disposição de rejeito em polpa, foi elaborado um projeto de retaludamento com a construção de uma berma de contra-pilhamento com rejeito desaguado e compactado, com drenos de fundo na forma de tapete drenante.

A operação envolvia lançamento de rejeito em polpa em baias para desaguamento inicial, remoção e transporte do material para outra baía e, posteriormente, lançamento do rejeito desaguado na praça de disposição de rejeito + estéril em forma de blend.

Após algumas inspeções de segurança foi identificada a necessidade de se fazer uma obra de reforço na estrutura pois foi constatado através de análises de estabilidade que os coeficientes de segurança estavam abaixo da norma vigente da época (NBR 13029:2017) evidenciando um risco potencial de liquefação.

Algumas medidas emergenciais foram implementadas tais como: retaludamento, desativação da estrutura mais próxima à berma e reaterro da lagoa de clarificação. Além disso foi elaborado um projeto de tratamento do bolsão de rejeito disposto em polpa sem controle tecnológico na berma de elevação 815,00 m através da injeção de cerca de 2000 colunas de solo-cimento pelo método *Deep Soil Mixed* (DSM).

Atualmente a estrutura está estável e em operação com método de coodisposição de rejeito e estéril, compactando os materiais e executando ensaios de controle tecnológico em cada berma executada.

2.3. Caracterização geológico-geotécnica

2.3.1. Caracterização Geológica Regional

A estrutura em epígrafe está inserida no contexto geológico do Quadrilátero Ferrífero, no sopé da Sinclinal Moeda com elevações máximas próximas de 1.000 metros, a oeste do Rio Paraopeba.

A principal formação mineralizadora e objeto da mineração na Serra da Moeda é a Formação Cauê, compostas por itabiritos ricos em ferro, intercalados com lentes de hematita que constituem o principal alvo da mineração.

Na vertente sul da Serra da Moeda, predominam rochas do Grupo Piracicaba, destacando-se a Formação Cercadinho, que é composta por filitos e quartzitos ferruginosos, os quais são limitados pelos metassedimentos da Formação Fecho do Funil. A presença de carapaças de canga é comum, desempenhando um papel fundamental na sustentação da crista da serra. Depósitos de tálus ocorrem preferencialmente nos sopés das serras, enquanto solos aluvionares são encontrados principalmente às margens do Rio Paraopeba, sobrepostos às rochas gnáissicas arqueanas do Ortognaisse Souza Nouchese e do Gnaisse Alberto Flores (Endo *et al.*, 2020).

A região da pilha apresenta um relevo acidentado, caracterizado por picos agudos e vertentes subverticais, com altitudes variando entre 900 e 1.000 metros. A rede de drenagem é do tipo dendrítica, sendo influenciada pelas variações litológicas e pelas estruturas geológicas que interceptam o local (Azevedo *et al.*, 2012).

Geomorfologicamente a Pilha está implantada sobre pequenos talwegues naturais, com vales encaixados em vertentes íngremes de topo arredondados os quais se estendem até a planície aluvionar associada ao Rio Paraopeba.

2.3.2. Caracterização Geológica Local

A composição da fundação da pilha foi definida a partir de sondagens mista dispostas em boletins de sondagens que foram categorizados através de um banco de dados, contendo um total de 52 sondagens, utilizadas para a elaboração do modelo geológico-geotécnico objeto de estudo deste trabalho (Figura 2).

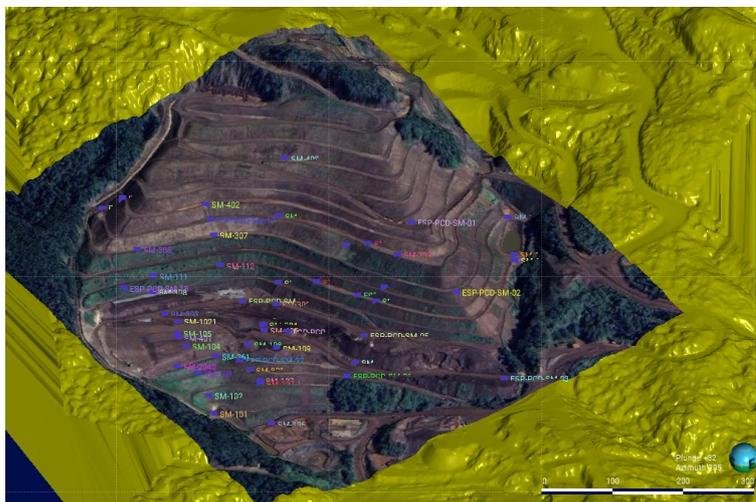


Figura 2 – Localização das Sondagens incorporadas a topografia da pilha.

Os dados cadastrais dos furos de sondagens foram agrupados de acordo com as características correlatas dos intervalos amostrados. Os dados dos parâmetros utilizados para a classificação geológica foram subdivididos em relação à gênese: antrópicos (aterro e rejeito) e naturais de acordo com respectivos graus de resistência e intemperismo variando desde solo residual à saprólito de quartzito/filito. Para a rocha de fundação foi adotado uma litologia genérica como nome de “rocha” para todo o conjunto.

Para a caracterização geotécnica do material foi utilizado os valores de Nspt medidos durante a execução das sondagens, utilizando os critérios descritos na *Tabela 1*.

Tabela 1 - Intervalo e média de NSPT dos matérias do modelo

MATERIAL	INTERVALO NSPT	MÉDIA NSPT
Rejeito antes do reforço DSM	Nspt < 4	3,13
Pedregulho (Estéril Blocoso)	Nspt > 50 ou impenetrável	-
Aterro (Estéril)	5 > Nspt	16,53
Solo Residual	17 > Nspt < 30	18
Saprolito-	30 > Nspt < 50	46

3. Modelagem

As sondagens recebidas em formato de boletim PDF foram convertidas para o formato de banco de dados ".csv", divididas em três tabelas distintas. A tabela "Collar" contém as informações de locação das sondagens, incluindo o nome da sondagem, coordenadas UTM, elevação e profundidade máxima do furo. Por fim, a tabela "Intervals" classifica os intervalos de

sondagem, especificando o nome da sondagem, profundidades inicial e final, além da litologia interpretada para cada intervalo.

Algumas sondagens foram reinterpretadas para validar a consistência dos materiais de fundação e esclarecer o posicionamento dos contatos geológicos. A validação dos dados foi feita considerando a segregação dos materiais descritos nos boletins, analisando a interpretação descritiva, o índice de resistência à penetração do solo e os registros fotográficos dos testemunhos. Como resultado, alguns materiais de fundação foram reclassificados, como o colúvio, que foi alterado para solo residual, e a segregação do solo residual e saprolítico foi realizada com base em critérios objetivos, devido à diversidade de termos usados nas diferentes campanhas de sondagens.

Para a elaboração do modelo geológico tridimensional da estrutura, utilizou-se o software Leapfrog Works na versão 2023.1, que se utiliza de modelagem implícita através dos dados de sondagem gerando-se sólidos das unidades geológicas-geotécnicas. O modelo teve como objetivo representar as unidades geológicas da fundação da pilha, o maciço de estéril da pilha e os corpos heterogêneos (DSM, Pedregulhos e Rejeito) presentes no interior da pilha. Sendo assim, o modelo geológico levou em consideração preferencialmente a reinterpretação das sondagens e não o que estava descrito nos boletins.

Devido às dificuldades técnicas encontradas na modelagem dos corpos heterogêneos da pilha, especificamente nas superfícies descontínuas dos “bolsões” de pedregulho e rejeito presentes no aterro, optou-se por construir essas superfícies em um projeto auxiliar, a fim de evitar interferências no fluxo de trabalho do Leapfrog.

O modelo foi desenvolvido em três fases:

- Momento inicial: A construção das superfícies dos materiais antrópicos (pedregulhos e rejeitos) no aterro da pilha foi feita a partir de um projeto espelho, utilizando os mesmos dados apresentados.
- Segundo momento: Realizou-se a modelagem do aterro de estéril e da fundação da pilha. Em seguida, as superfícies (*mashes*) exportadas do projeto espelho foram incorporadas ao modelo principal.
- Terceiro momento: Foi criado um novo projeto espelho, denominado "ajuste fino", onde as superfícies do aterro de estéril e solo residual foram detalhadas, ajustando a resolução das superfícies de 20 para 5 metros. Esses ajustes foram feitos pontualmente no controle estrutural do contato, com o objetivo de conformar as bordas do aterro existente no terreno, evitando que a litologia de aterro interfira no terreno natural.

3.1. Materiais Antrópicos Internos ao Aterro da Pilha

As premissas e critérios utilizados para a modelagem dos corpos de pedregulhos foram baseados no uso do interpolador “*New Intrusion*” e do item “*from base lithology*”, com resolução de superfície de 2,0. A superfície interior foi definida como pedregulho, enquanto a superfície exterior abrangeu todos os materiais presentes na lista de *Litologies*, resultando em superfícies descontínuas e esferoidais. Considerando que a disposição desse material ocorreu de forma gravitacional, semi-compactada sobre o terreno, foi empregado um plano preferencial de orientação sub-horizontal, com um caimento de 5°, direção do caimento de 132° e Pitch de 90°. Além disso, foi definido um raio elipsoidal máximo e intermediário de 3.

Na região onde foi executado o DSM, devido à dificuldade de incorporar as colunas no ambiente do Leapfrog, considerando o caráter homogêneo do tratamento quanto a espessura e profundidade, que cria um bloco coeso de solo/cimento, foi definida uma malha poligonal simplificada a partir dos dados de “*As Built*”, utilizando as cotas de boca e fundo do tratamento. Essa malha foi incorporada como *meshs* ao projeto, permitindo a delimitação da região onde o DSM está localizado.

Para a modelagem dos corpos de Rejeito, foi utilizado o mesmo critério de plano preferencial de orientação, dado que o rejeito foi depositado hidraulicamente. Após alguns testes foi ajustado um plano com ângulo de mergulho de 6, direção de caimento de 89° e Pitch de 90°, com raio elipsoidal máximo e intermediário de 3.

Essas definições permitiram a criação da *Surface Chronology*, onde as superfícies de pedregulho e rejeito/solo mole foram habilitadas, possibilitando o cálculo dos *Output Volumes* do modelo geológico. Esses volumes foram posteriormente utilizados para exportação individual das *mashes* de cada tipo de corpo dentro do modelo. A *Figura 3* apresenta os corpos de matérias antrópicas modelados no interior da topografia.

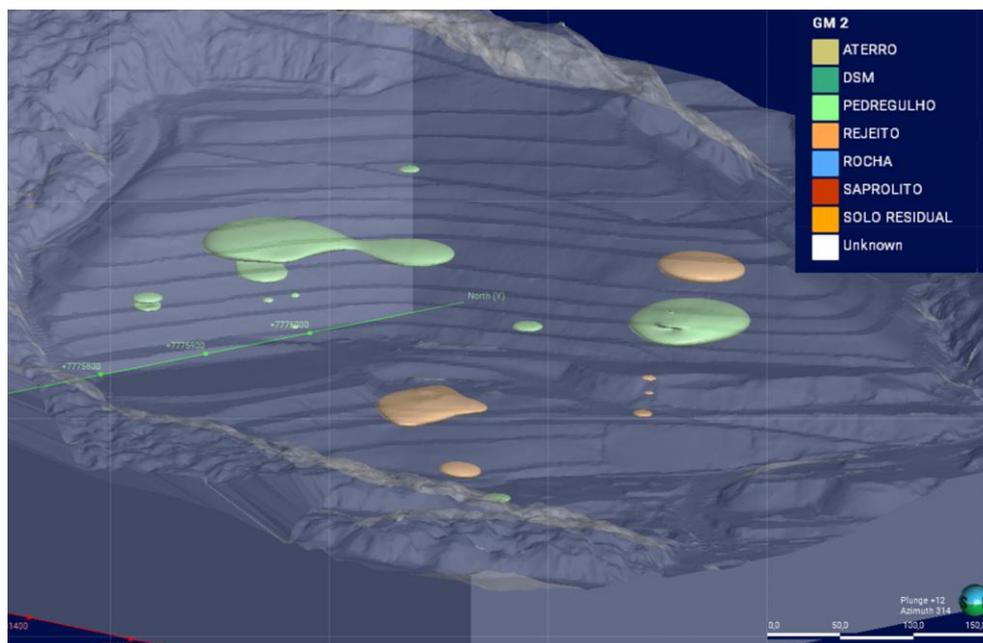


Figura 3 - Volumes dos corpos heterogêneos no interior do modelo simplificado.

8.3.2 Modelagem da Pilha de Estéril e Fundação

A modelagem das unidades geológicas e do aterro da pilha se consistiu na criação da superfície do contato rocha-saprolito no modelo, utilizando o interpolador "*New Deposit*", a partir do item "*from base lithology*", com resolução de 10,0 metros. A superfície primária foi definida como Saprolito, com os contatos inferiores habilitados e a litologia de contato definida como Rocha. A criação da superfície de Saprolito-Solo Residual seguiu um processo semelhante, com a superfície primária sendo Solo Residual em contato com o Saprolito, gerando uma superfície contínua.

O próximo passo foi a criação da superfície do contato do Aterro, utilizando o interpolador *New Erosion*, também com resolução de 10,0 m. A superfície primária foi o Aterro da pilha, habilitando a função contatos inferiores indicando as litologias de contato o Saprolito e o Solo Residual, resultando assim, em uma superfície contínua.

Por fim, foi criada uma cronologia de formação das superfícies, estabelecendo uma sequência de superfícies conforme a Tabela 2, que foi inserida no modelo geológico. A cronologia ascendente determinou a ordem das superfícies de Intrusão, Depósito e Erosão, resultando nos volumes preliminares para o modelo gerado.

Tabela 2 *Surface Chronology* utilizadas para o modelo

Cronologia (Ascendente)	Superfície	Tipo de Superfície
6°	DSM	INTRUSÃO
5°	REJEITO	INTRUSÃO
4°	PEDREGULHO	INTRUSÃO
3°	ATERRO	EROSÃO
2°	SAPROLITO-SOLO RESIDUAL	DEPOSITO
1°	ROCHA-SAPROLITO	DEPOSITO

A Figura 4 apresenta o modelo geológico - geotécnico preliminar, indicando as inconsistências do modelo onde as áreas sinalizadas indicam a extrapolação do aterro para áreas de relevo escarpado, indicando a necessidade de refinamento adicional nas superfícies geradas, especialmente na área norte e noroeste da pilha, e também nas regiões de vegetação ao sul e sudoeste.

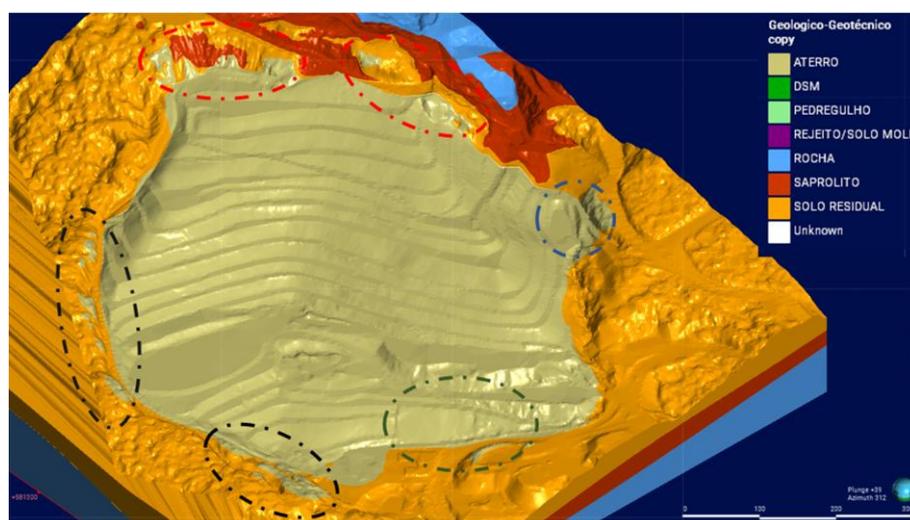


Figura 4 - Volumes preliminar do modelo gerado

3.2. Ajuste Fino do Modelo

Para preservar o banco de dados original do projeto e a sequência de trabalho (*workflow*) utilizada até o momento, foi optado pela criação de um projeto espelho.

Inicialmente foram feitas mudanças nas opções de processamento das superfícies utilizando a opção "*Treat unspecified intervals as*" como "*primary*", além de ajustes na resolução da superfície através da janela de edição (*Edit contacts*). Essas modificações resultaram na suavização das superfícies, ajustando os contatos entre o solo residual e a pilha em segmentos, onde a camada abaixo desses corpos heterogêneos foi conformada de acordo com os bolsões de rejeito e pedregulho sobre o terreno natural.

Além disso, foram utilizados furos de controle na região norte da pilha, adotando-se as litologias interceptadas pelas sondagens mais próximas de acordo com a topografia primitiva e atual.

Os ajustes manuais relatados não resolveram as extrapolações do material de aterro. Como solução, optou-se pela utilização de planos de controle estrutural (*Planar Structural Data*) para aplicar uma tendência nas bordas da superfície do aterro e promover o confinamento adequado da pilha nas áreas conhecidas.

O processo de ajustes foi repetido diversas vezes, com a adição ou não de novos pontos, até que o modelo atingisse um nível satisfatório. Os ajustes realizados estão apresentados na *Figura 5*, nota-se a eliminação das extrapolações do aterro a norte (detalhe em azul), noroeste (detalhe em vermelho), e a correção da interpolação de aterro no pé da barragem (detalhe em verde). Além disso, foi reduzida significativamente a extrapolação de aterro no relevo rugoso da topografia (vegetação) ao sul formando pequenos “borrões” de superfície na copa da vegetação.

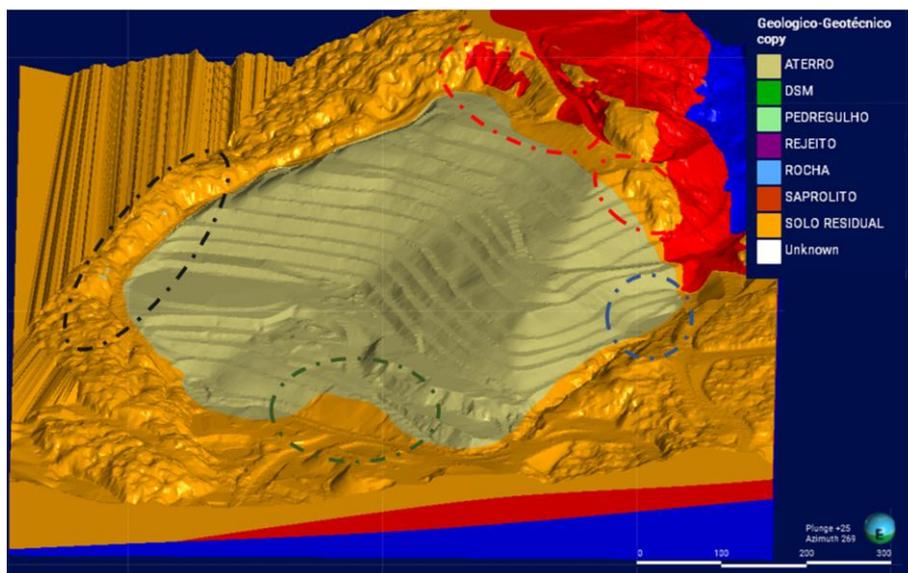


Figura 5 - Detalhe do volume final de aterro na topografia.

4. Resultado

O modelo geológico-geotécnico proposto foi elaborado a partir de um banco de dados de sondagem mista, contemplando 52 furos dispostos em 1713,00 metros amostrados.

As sondagens recebidas em formato de boletim PDF foram convertidas para o formato de banco de dados ".csv", divididas em três tabelas distintas. A tabela "*Collar*" contém as informações de locação das sondagens, incluindo o nome da sondagem, coordenadas UTM, elevação e profundidade máxima do furo. Por fim, a tabela "*Intervals*" classifica os intervalos de sondagem, especificando o nome da sondagem, profundidades inicial e final, além da litologia interpretada para cada intervalo.

Os sólidos internos a pilha apresentam uma tendência a uma geometria lenticular elipsoidal, com exceção do DSM que sua geometria foi interpolada através de uma mesh conhecida (Figura 6).

Os resultados da modelagem da área de estudo contribuíram para o desenvolvimento de toda a geometria do aterro da pilha, contemplando as unidades internas ao aterro os corpos de rejeito e pedregulho, e também, a individualização de sua fundação entre solo residual, saprolito e rocha. Este modelo é uma importante ferramenta para o conhecimento do comportamento mecânico da Pilha em regiões que não se tem esta informação, seja por meio de investigações diretas ou indiretas (Figura 7).

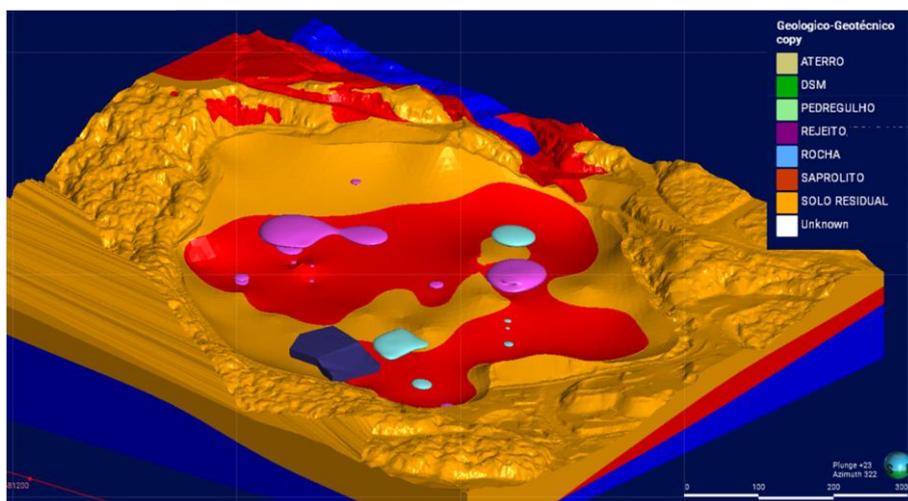


Figura 6 - Modelo final da pilha sem o aterro de estéril habilitado

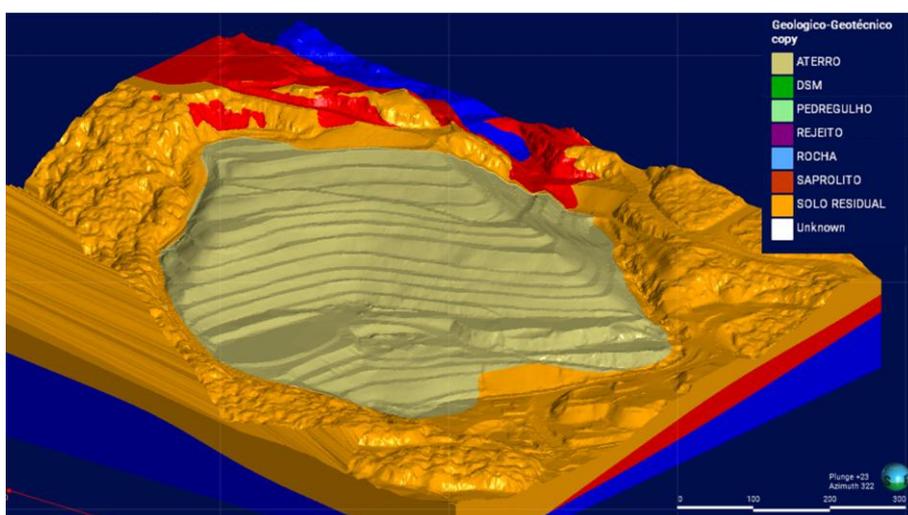


Figura 7 - Modelo final da pilha com o aterro de estéril habilitado.

5. CONCLUSÕES

As campanhas de investigações geológicas-geotécnicas foram realizadas na estrutura partir de 2012 e tiveram como o objetivo de se caracterizar geológico-geotecnicamente o aterro, os corpos heterogêneos e a fundação.

Os resultados dessas investigações foram incorporados no modelo geológico apresentado neste relatório. A existência de dúvidas em relação à informações dos furos de sondagem, em razão, por vezes, da falta de clareza na descrição geológico-geotécnica concisa ou deficiências no registro fotográfico dos testemunhos, para validação do conteúdo descrito, além da ausência de sondagens em rocha é uma justificativa para a importância de uma análise crítica e integral além da necessidade de buscar mais dados para melhorar a confiabilidade do modelo.

O modelo reflete a situação atual das investigações, com base na topografia utilizada e na análise crítica da Declaração Ambiental de Mineração, quanto à qualidade das informações. É indicado que, futuramente, será necessário um modelo refinado para convergir com os resultados das investigações propostas. Este novo trabalho poderá apresentar discrepâncias quanto ao contato geológico-geotécnico das litologias e, conseqüentemente, nos volumes aqui apresentados.

Embora a estrutura tenha sido classificada como de risco, alvo de projeto de reforço com o DSM, atualmente a Pilha encontra-se estável e em processo de expansão (alçamento a jusante com contrapilhamento). com controle tecnológico completo das camadas de aterro dispostas.

Por fim, o modelo atual permitiu um maior esclarecimento sobre porções de corpos heterogêneos dentro do aterro de estéril, os quais se encontram dispersos internamente na pilha. Além disso, a modelagem 3D proporcionou uma compreensão mais representativa do material de fundação da pilha (solo residual e saprolito), dada a dificuldade de representação desses elementos nas seções geológico-geotécnicas bidimensionais.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13029:2017 – Mineração – Elaboração e apresentação de projetos de disposição de estéril em pilha. Rio de Janeiro, 2017.

AZEVEDO, Úrsula Ruchkys de, et al. "Geoparque Quadrilátero Ferrífero (MG): proposta." CPRM, 2012.

ENDO, Issamu et al. Estratigrafia e evolução estrutural do quadrilátero ferrífero, Minas Gerais. **Quadrilátero Ferrífero: avanços do conhecimento nos últimos 50 anos**, p. 70-113, 2020.

Seequent, 2017, *User Manual for Leapfrog Works*: Seequent.