

## MODELO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICO DE PILHA DE ESTÉRIL UTILIZANDO O LEAPFROG WORKS

Arthur Campos Palhares <sup>1</sup>; Valter Casagrande <sup>2</sup>; João Pedro Delveux <sup>3</sup>; Gilvan Sá <sup>4</sup>

**Resumo** – A modelagem tridimensional (3D) tem se tornado uma ferramenta indispensável para a compreensão e gestão de estruturas geotécnicas complexas, como pilhas de estéril e barragens de mineração. Em um contexto em que a estabilidade dessas estruturas está diretamente ligada à segurança de comunidades e à sustentabilidade ambiental, a capacidade de representar com precisão as condições geológicas e geotécnicas de suas fundações é fundamental. Tradicionalmente, projetos geotécnicos baseavam-se em dados bidimensionais, como seções transversais e mapas, que, embora úteis, limitam a visualização espacial de descontinuidades, variações litológicas e estruturas geológicas. A modelagem 3D supera essas limitações ao integrar dados multidisciplinares – como sondagens, topografia, geofísica e mapeamento estrutural – em um ambiente virtual dinâmico. Através dessa abordagem torna-se possível a identificação de zonas críticas, através da visualização espacial de fraturas, falhas e zonas de fraqueza que podem comprometer a estabilidade; permite-se a otimização de projeto por meio de simulação de cenários para definição de geometrias construtivas mais seguras; e o monitoramento e gestão de riscos, fazendo uma atualização contínua do modelo com novos dados de campo ou instrumentação.

Para pilhas de estéril em áreas complexas como o Quadrilátero Ferrífero, a modelagem 3D é vital para entender a interação entre materiais dispostos e a fundação natural, considerando estruturas dobradas e litologias heterogêneas. Este trabalho demonstra como o Leapfrog Works possibilita a integração de dados históricos e recentes em modelos 3D robustos, auxiliando na redução de riscos e no planejamento de intervenções.

**Abstract** – Three-dimensional (3D) modeling has become an essential tool for understanding and managing complex geotechnical structures, such as waste rock piles and mining dams. In a context where the stability of these structures is directly linked to community safety and environmental sustainability, the ability to accurately represent the geological and geotechnical conditions of their foundations is crucial. Traditionally, geotechnical projects have relied on two-dimensional data, such as cross-sections and maps, which, although useful, limit the spatial visualization of discontinuities, lithological variations, and geological structures. 3D modeling overcomes these limitations by integrating multidisciplinary data – including boreholes, topography, geophysics, and structural mapping – into a dynamic virtual environment. This approach enables the identification of critical zones through the spatial visualization of fractures, faults, and weakness zones that may compromise stability; it allows for project optimization through scenario simulations to define safer construction geometries; and it supports risk monitoring and management by continuously updating the model with new field or instrumentation data.

For waste piles in geologically complex areas such as the Quadrilátero Ferrífero, 3D modeling is vital to understanding the interaction between the deposited materials and the natural foundation, considering folded structures and heterogeneous lithologies. This work demonstrates how Leapfrog Works enables the integration of both historical and recent data into robust 3D models, supporting risk reduction and the planning of interventions.

**Palavras-Chave** – Modelagem Geológica 3D; Geotecnia; Pilhas de Estéril; Quadrilátero Ferrífero.

<sup>1</sup> Eng. Geól., Universidade Federal de Ouro Preto, (31) 99719-4528, arthurcpalhares@gmail.com

<sup>2</sup> Eng., Pontifícia Universidade Católica de Goiás, (31) 99570-4277, valter.casagrande2@gmail.com

<sup>3</sup> Eng. Geól., Universidade Federal de Ouro Preto, (31) 996959897 joaopedrodelveux@gmail.com

<sup>4</sup> Geól., MSc, Universidade Federal de Ouro Preto, (31) 99498-3835, gilvansa1972@gmail.com

# 1. INTRODUÇÃO

Em obras geotécnicas pré-existentes, um grande desafio é a escassez de informações sobre suas fundações. Portanto, é fundamental utilizar ferramentas que permitam a representação dessas estruturas, como as barragens e pilhas de disposição de estéril e/ou rejeito. Isso possibilita um aumento significativo do conhecimento sobre o comportamento geotécnico dessas obras.

Por meio de investigações geológico-geotécnicas, aliadas a ferramentas de modelagem 3D, como o *Leapfrog Works*, é possível reproduzir essas estruturas em ambiente virtual, colaborando com o desenvolvimento de projetos. No presente trabalho, abordaremos as etapas para a confecção de um modelo geológico de fundação de uma pilha de disposição de estéril.

# 2. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA ESTUDADA

## 2.1. Geologia Regional

A primeira etapa desenvolvida, que antecede o desenvolvimento da modelagem está relacionada com os estudos pré-campo que buscam entender o contexto regional o qual a estrutura que será modelada está inserida. Nessa etapa, é fundamental entender o arcabouço geológico regional, sendo fundamental identificar os principais litotipos que ocorrem na área, de acordo com trabalhos anteriores, quando disponíveis, feições geomorfológicas, estruturas regionais, como ocorrências de falhas, dobras regionais, imagens históricas, dentre outras informações.

Nessa etapa, também é fundamental realizar uma consolidação de todos os dados existentes da área, sejam eles anteriores a execução da estrutura investigada ou também posteriores. São fundamentais a análise, por exemplo, de topografias primitivas e mapeamentos pretéritos de entidades governamentais como é o caso da CPRM, ou trabalhos desenvolvidos em universidades como é o caso principal que subsidia o projeto que utilizaremos como exemplo.

De acordo com o Mapa Geológico do Quadrilátero Ferrífero (QF), publicado por Endo et al., 2019, a estrutura estudada está localizada na porção Nordeste do QF (Figura 1). Carregando o título de uma das mais importantes províncias minerais do mundo, essa região, delimitada por feições serranas depositadas e dobradas ao longo do período geológico, apresenta uma vasta complexidade lito-estrutural.

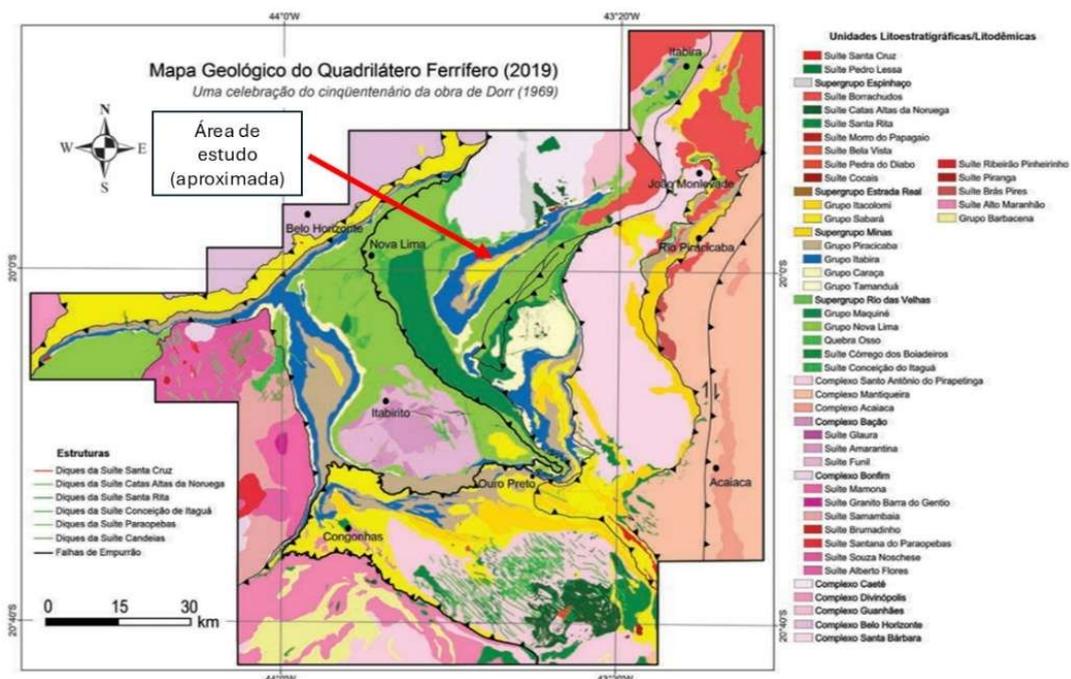


Figura 1 – Representação simplificada do mapa geológico do Quadrilátero Ferrífero, indicando localização aproximada da estrutura (Endo et al., 2019b)

A estrutura encontra-se no flanco noroeste de um sinclinal de dimensões regionais. Essa estrutura regional perfaz um sinforme com concavidade alongada na direção SW-NE. No que diz respeito as unidades litológicas, de acordo com as referências bibliográficas, ele é formado por uma sequência de rochas metassedimentares do Supergrupo Minas, com a presença de rochas do Grupo Sabará na porção central (Endo & Rocha Filho, 2003). Sua extensão perfaz cerca de 40 km de extensão, eixo com direção NE-SW e caimento para SE (Dorr, 1969).

## 2.2. Geologia local

Nessa etapa é fundamental adquirir os dados geológicos da área por meio de investigações geológicas-geotécnicas, sejam elas de mapeamento de campo, sondagens e métodos geofísicos. No presente trabalho foi realizado um mapeamento de campo antes da definição da campanha de sondagens, com o objetivo de subsidiar a locação das investigações previstas e o modelo geológico 3D.

No mapeamento de campo, foram identificadas litologias naturais das Formações Gandarela e Gongo Soco (Figura 2), além de depósitos de origem antrópica, como aterros, que foram integradas à modelagem para auxiliar na composição dos materiais inseridos no modelo. De idade cenozoica, denominada Formação Gongo Soco, essa unidade faz referência à deposição de um espesso pacote de sedimentos formados por fluxos de detritos associados a leques aluviais, no ambiente da “bacia terciária do Gongo Soco”. Composta por sedimentos laterizados, com matriz de textura argilo-arenosa, coloração avermelhada e contendo fragmentos angulosos de hematita e/ou níveis de siltitos amarelados, sobrepondo-se, portanto, as unidades da Formação Gandarela.

A origem da Formação Gongo Soco, de acordo com Endo (2019), está associada diretamente com leques aluviais, sendo dividida, da base para o topo, em cinco unidades, sendo elas: Diamictitos com fragmentos de dimensões entre 1 cm e 8 cm de hematita, itabirito e quartzo; Brechas com fragmentos de itabirito e hematita de dimensões que variam de 10 cm até 30 cm; Diamictitos com fragmentos de itabirito com tamanhos entre 15 cm e 20 cm, dispersos em matriz argilosa; Arenitos de granulação média e coloração amarelada e Diamictitos com fragmentos de itabirito e hematita, de matriz hematítica. Os sedimentos estão dispostos com mergulhos entre 25° e 55° para SSE, sendo afetados por estruturas como falhas inversas, falhas normais e dobras de arrasto (Maizatto et. Al, 1993).

Como previamente mencionado, a área mapeada está localizada no flanco noroeste de uma mega dobra regional, no entanto, na escala de mapeamento utilizada, devido à identificação de apenas um dos flancos, é possível interpretá-la como um homoclinal com mergulho para SSE e inclinação média entre 20° e 30°. Não foram observadas falhas ou zonas de cisalhamento.

As rochas da Formação Gandarela foram identificadas em várias áreas, incluindo a porção norte da área mapeada. Elas são compostas por xistos manganésíferos da era Paleoproterozóica, com granulometria variando de argila a areia média e xistosidade bem-marcada. Os afloramentos apresentam-se amplamente dobrados e foliação preferencialmente para SSE, com ângulo médio de 30 graus. Essa unidade é parte da fundação dos aterros da região e foi estudada detalhadamente através de investigações geológicas e geotécnicas. Em algumas áreas, é possível observar reentrâncias superficiais devido à erosão diferencial.

Feições estruturais deformacionais, como foliação e xistosidade, são observadas apenas nos Xistos da Formação Gandarela, ausentes nas unidades da Formação Gongo Soco, devido a idade de deposição, que é posterior a tais eventos de deformações regionais, como por exemplo o Brasileiro e o Transamazônico. Observações relativas a feições estruturais presentes na Formação Gongo Soco se restringem, em maior parte, a feições deposicionais primárias, como a orientação dos clastos preferencialmente para Sul/ Sudeste, indicando sentido de fluxo dos leques aluviais pretéritos, dispostos em um antigo vale encaixado. Ambas as estruturas, acamamento e xistosidade, quando presentes, se dispõem subparalelas.

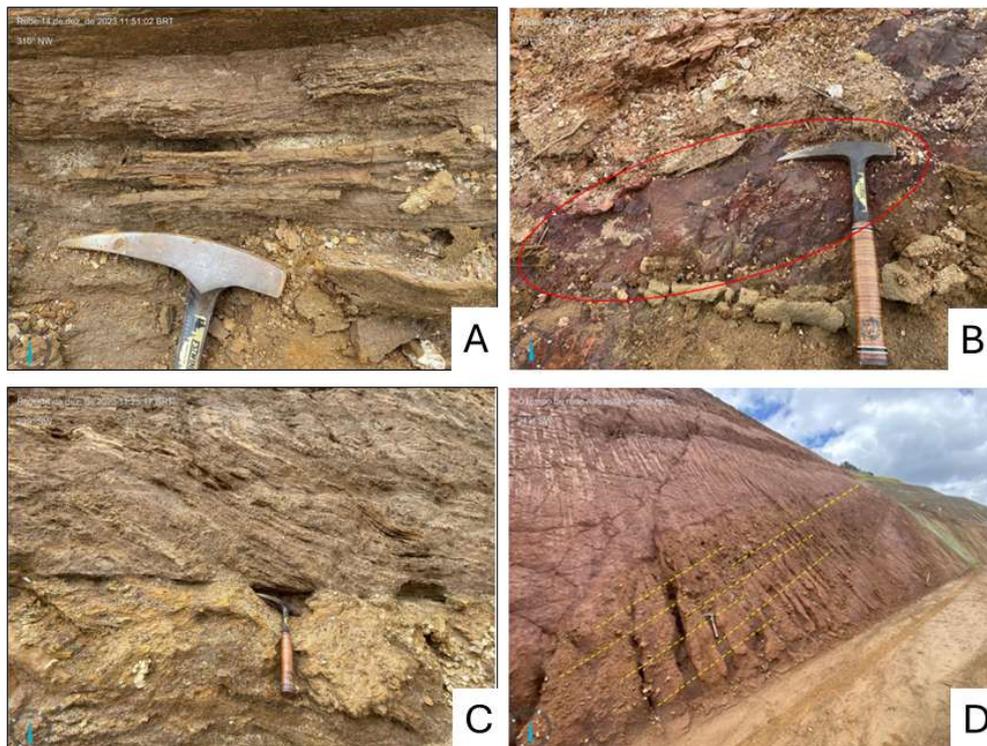


Figura 2 - A) Afloramento de Xisto Manganêsífero da Formação Gandarela. B) Porção laterizada da Formação Gongo Soco. C) Padrão de dobras e xistossidade presente nos Xistos Manganêsíferos. D) Padrão de imbricamento de clastos refletindo a direção do paleofluxo (SE).

### 3. MODELO GEOLÓGICO

#### 3.1. Mapeamento e Ortofotos

Para o desenvolvimento do modelo 3D o mapa geológico desenvolvido no entorno da estrutura foi utilizado como base, assim como as ortofotos levantadas da área (Figura 3). O objetivo dessa etapa é deixar o modelo virtual mais preciso possível, de acordo com as observações feitas pelo geólogo em campo e no escritório.

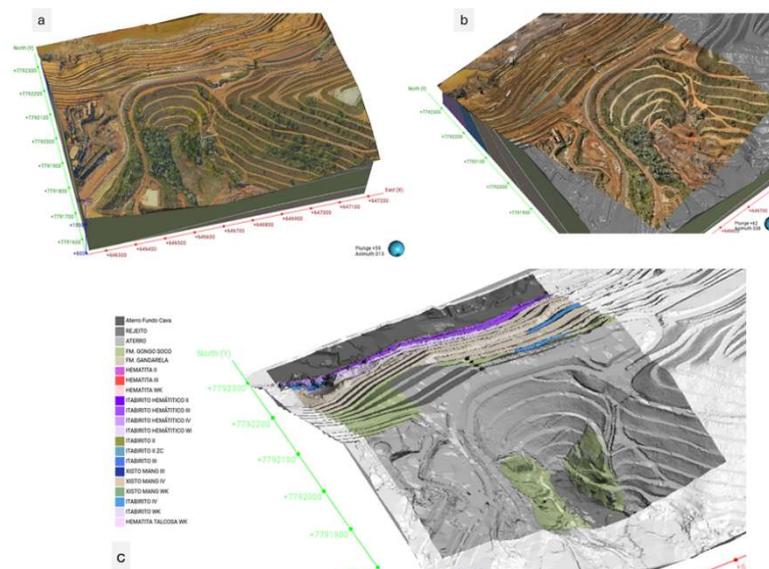


Figura 3 – A) Primeira ortofoto disponibilizada da área. B) Segunda ortofoto disponibilizada da área, com o avanço do projeto. C) Mapeamento Geológico representado na topografia.

Através da definição dos contatos geológicos observados em superfície, e auxiliados através das imagens aéreas é possível definir os respectivos limites dentro do modelo, facilitando as etapas posteriores com a inserção das investigações geológicas-geotécnicas.

### 3.2. . Topografia

No desenvolvimento de modelos geológicos, em projetos geotécnicos, é comum a utilização de uma topografia atual, geralmente de alta precisão que definirá a superfície do terreno dentro do modelo, além de uma topografia primitiva, responsável por direcionar a topografia anterior a construção das obras. Entretanto, como é comum, se ela for objeto de restituição ou apresentar algumas áreas com um detalhe não tão elevado, torna-se interessante realizar uma análise, sendo possível o refinamento do modelo em áreas de interesse, tendo em vista representar de maneira fiel a morfologia da fundação da estrutura.

De maneira inicial essa topografia é inserida no nosso modelo após passar por uma validação de Datum e qualidade, para posterior análise. O refinamento que será realizado pode ser feito através de diversos fatores, entre eles um dos mais usais são a descrição das sondagens como guia, a partir da interpretação do contato aterra e terreno natural.

Para a construção do modelo foi utilizado um levantamento topográfico de 1966 e outro utilizando a tecnologia LIDAR, em setembro de 2024. Ambos os levantamentos foram incorporados no modelo tridimensional com o objetivo de fornecer a relação entre o terreno natural e os materiais antrópicos, sendo posteriormente refinados no software Leapfrog e utilizados para definir a boundary (limite) do modelo. (Figura 4).

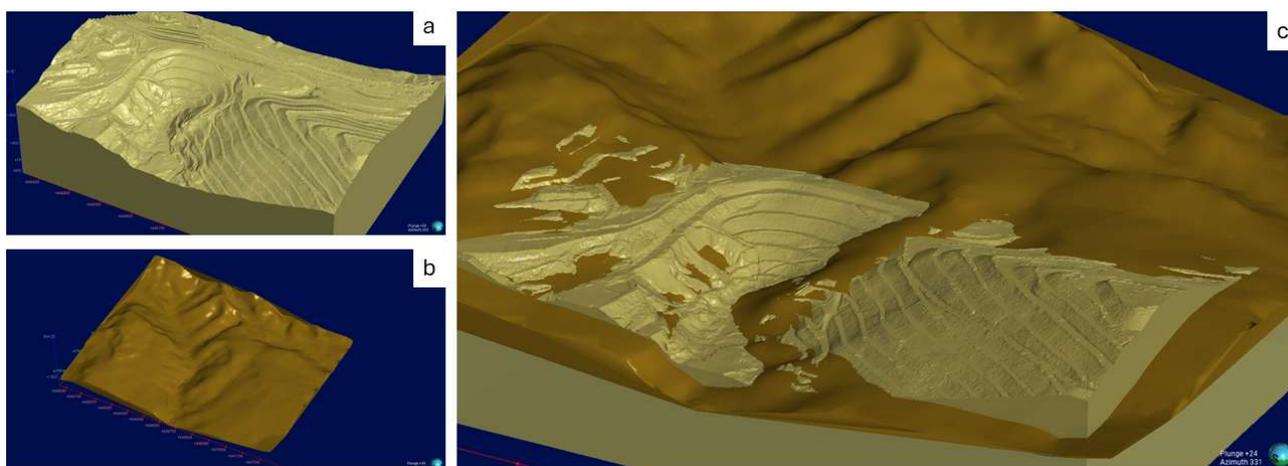


Figura 4 – A) Topografia atualizada, limite do modelo. B) Topografia primitiva. C) Sobreposição das topografias dentro do modelo.

Tendo como base as informações topográficas fornecidas foram então interpoladas as superfícies de maneira a limitar os materiais acima da primitiva como sendo materiais antrópicos (aterro) e os materiais abaixo da primitiva como terreno natural (rochas e solos). No entanto, entende-se que por se tratar de uma reconstituição, a precisão da topografia primitiva não é muito elevada, sendo assim, foram utilizadas informações de mapeamento e investigações geológica-geotécnicas para refinar os materiais identificados.

### 3.3. . Campanhas de investigação

Um dos pontos chave para a elaboração dos modelos geológicos são as campanhas de investigações, que são necessárias por evidenciar através de amostragens diretas ou indiretas os materiais ali presentes. Para elaboração deste estudo, foram consideradas a descrição geológica-geotécnica de 31 furos de sondagem representados na Figura 5.

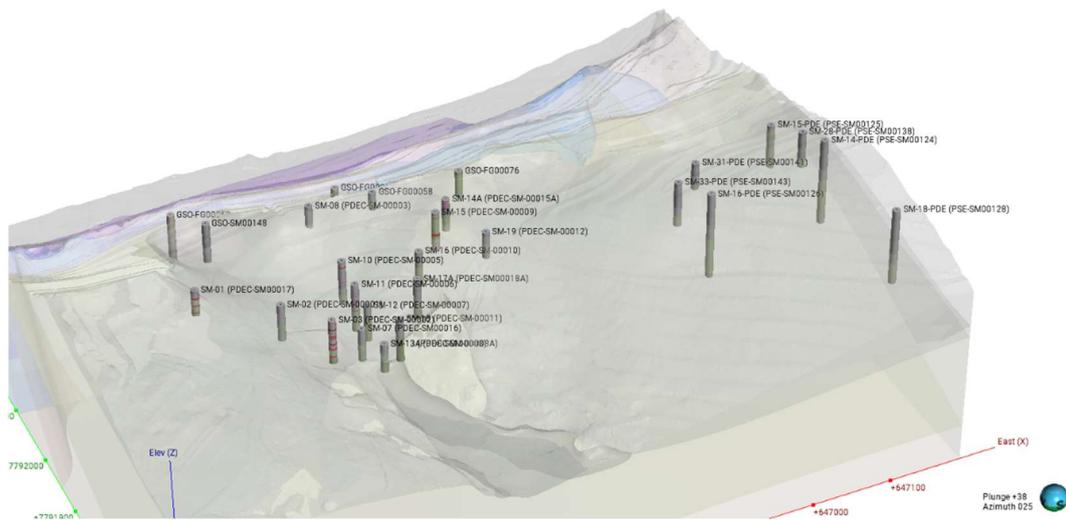


Figura 5 – Sondagens utilizadas no modelo geológico da Estrutura.

Para a confecção do banco de dados utilizado na modelagem, referente as sondagens, foram utilizadas as descrições realizadas por Geólogo em campo, o qual acompanhou a execução e descreveu todos os furos de sondagem, quanto suas características tácteis visuais e propriedades geomecânicas. Os furos de sondagem foram classificados de acordo com a tabela de resistência ISRM modificada pela BVP (Figura 6) tendo em vista que todo o material encontrado na fundação, durante as investigações, se incluiu na classificação de rochas brandas (*Weak Rocks*).

ÍNDICE DE RESISTÊNCIA <sup>2</sup>	Descrição	Rc (MPa)	LS. (MPa)	ISRM (ADAPTADO POR BVP)						
				AVALIAÇÃO DE CAMPO						
				(1) martelo	(2) risco canivete <sup>1</sup>	(3) queda canivete	(4) raspagem canivete <sup>1</sup>	(5) risco unha	(6) pressão manual	
R6	Extremamente resistente	>250	>10	lascada	-	-	-	-	-	<b>RMR 2011</b>
R5	Muito resistente	100-250	4-10	quebra com dificuldade com varios golpes	-	-	-	-	-	
R4	Resistente	50-100	2-4	quebra com vários golpes	risco superficial	-	-	-	-	
R3	Mediamente resistente	25-50	1-2	quebra com dificuldade com um golpe	ponto pequeno	com muita dificuldade	-	-	-	
R2 <sup>+</sup>	Pouco Resistente	10-25	-	quebra com um golpe	risco	com dificuldade	-	-	-	<b>Weak</b>
R2 <sup>-</sup>	Branda	5-10	-	fragmenta com um golpe	ponto grande	produz pó	risco superficial	-	-	
R1 <sup>+</sup>	Muito branda superior	3-5	-	-	risco fundo	com facilidade produz muito pó	risco	quebra pontualmente	-	
R1 <sup>-</sup>	Muito branda inferior	1-3	-	desagrega	corta (separa)	penetra	descasca entalha	penetra	quebra as bordas	<b>Very Weak</b>
R0	Extremamente branda	0.25-1	-	-	-	penetra	-	corta	desagrega	<b>Extremely Weak</b>

Método de Avaliação de Campo da Consistência das Rochas

1- Reação ao golpe com o martelo de geólogo	4- Reação à raspagem do canivete na borda da amostra	Resposta ao método	
2- Reação ao risco com a ponta do canivete	5- Reação ao risco com a unha		Alta
3- Reação à queda da ponta do canivete	6- Reação à pressão dos dedos		Média
			Baixa

<sup>1</sup> A resposta à utilização do martelo em amostras muito ricas em minerais lamelares é mais significativa que do canivete.  
<sup>2</sup> Referências típicas: R0 - R1<sup>-</sup> (saprolitos); R1<sup>-</sup> (tijolo); R2<sup>-</sup> (solo-cimento); R2<sup>+</sup> (concreto comum); R3 (concreto especial)

Figura 6 – Tabela de Resistência ISRM modificada (BVP 2012 apud Franca et. al. 2018). Sendo assim foi possível classificar os materiais da seguinte forma (Tabela 1):

Tabela 1. Índices físicos e parâmetros de resistência dos solos investigados.

Litologia	Formação	Classificação Geomecânica
Brecha matriz suportada/Lamitos	Gongo Soco	R1+ a R1-
Xisto manganífero	Gandarela	R1+ a R1-
Itabirito Friável	Cauê	R1- a R0

### 3.4. Modelos adjacentes

A existência de modelos adjacentes é algo comum em áreas com estruturas geotécnicas e, portanto, devem ser levados em consideração na execução dos modelos produzidos em sequência. O avanço do conhecimento é inerente ao avanço de campanhas de investigação, mas não se deve ignorar trabalhos pretéritos, que devem ser avaliados e compatibilizados sempre que possível. Essa abordagem pode significar muita otimização e significar soluções mais integradas. Sendo assim, após validado, um modelo pré-existente pode ser incorporado e posteriormente refinado.

O modelo desenvolvido nesse trabalho visou compatibilizar um modelo pré-existente de uma estrutura adjacente. Apesar de ser incorporado, como o objeto de estudo do modelo anterior foi diferente, algumas modificações foram realizadas, baseadas nas novas investigações realizadas. Desta forma, as litologias com ocorrência na área modelada foram inseridas no modelo como sólidos estáticos e ajustadas de acordo com a topografia atual, como pode ser visualizado na Figura 6.

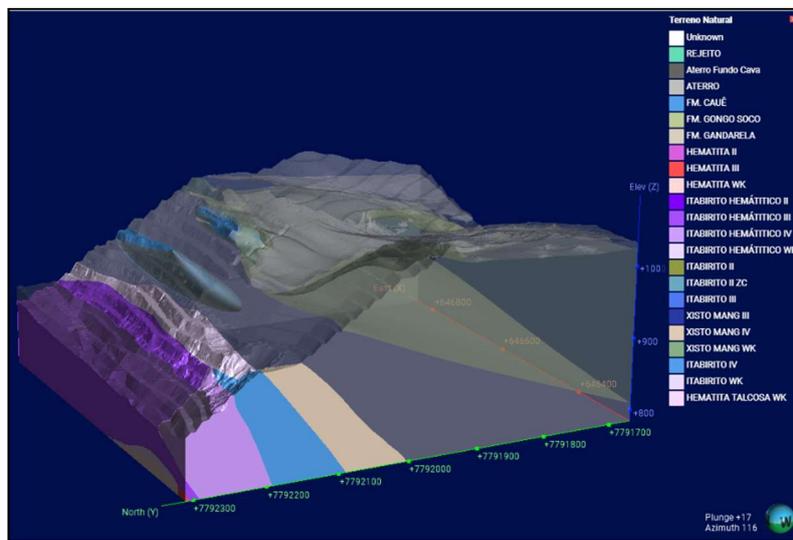


Figura 6 – Detalhe para as unidades geológicas importadas no modelo geológico da estrutura através do modelo geológico adjacente.

Através das análises realizadas ao longo das investigações foi possível observar pelas sondagens, mapeamento e análises topográficas que a estrutura foi disposta ao longo de um vale encaixado, o qual em sua conformidade atual apresenta além de materiais ao longo da vertente SE, também materiais de aterro localizados a NW (Figura 7). Tal fato também pode ser observado quando confrontado com a topografia primitiva, reforçando a ideia de que a estrutura se encontra em um eixo aproximadamente SW-NW ao longo da topografia primitiva.

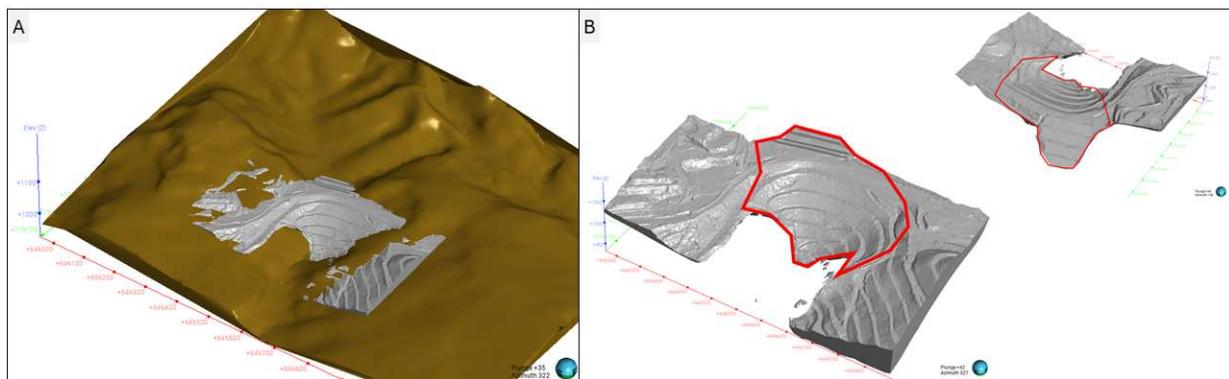


Figura 7 – A) Relação dos materiais de aterro acima da topografia primitiva B) Aterro refinado por meio das investigações realizadas.

#### 4. CONSOLIDAÇÃO DO MODELO

Para a elaboração do modelo geológico tridimensional da Pilha e fundação da estrutura foi utilizado o *software Leapfrog works* versão 2024.1, onde foram inseridas as sondagens, utilizando-se da metodologia de modelagem implícita. Vinte e quatro (24) sondagens foram utilizadas na construção do modelo na região da pilha e sete (7) sondagens foram utilizadas para construção do modelo na região de uma outra pilha de disposição de estéril, adjacente a estrutura de estudo.

Os materiais provenientes do aterro foram gerados utilizando-se inicialmente da topografia primitiva como a superfície que delimitaria o contato entre os materiais naturais (fundação) e os antrópicos (aterros), entretanto observou-se que a sua precisão não era adequada sendo necessário construir um modelo refinado, que permitisse ajustar os contatos de acordo com as sondagens existentes (Figura 8).

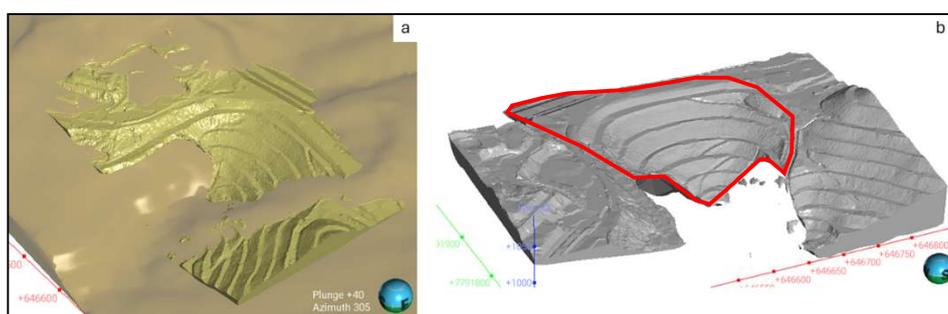


Figura 8 – A) Geração inicial do material de aterro através da topografia primitiva. B) Refinamento do material de aterro levando em considerações sondagens e mapeamento.

A unidades mais representativas na fundação da pilha foram descritas como Formação Gongo Soco e Formação Gandarela, e foram modeladas a partir do contato encontrado entre elas nas sondagens, incorporado um mergulho as camadas de aproximadamente 25 graus para SSE, de acordo com o mapeamento (Figura 9A).

A Formação Cauê foi incorporada ao modelo, além do sólido do modelo geológico adjacente, a partir dos dados de duas sondagens que interceptaram um corpo de itabirito. Seguiu-se seguindo a tendência estrutural do entorno (Figura 9B).

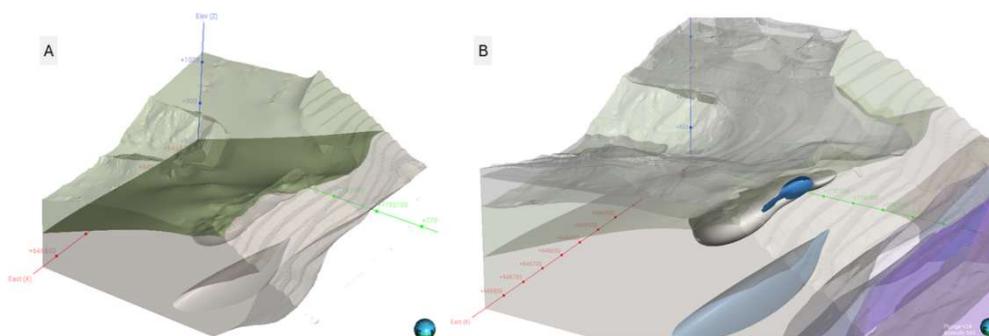


Figura 9 – A) Modelagem da formação Gongo Soco. B) Modelagem da formação Cauê.

Por fim, o aterro do fundo da cava e o rejeito foram modelados a partir dos seus limites, estabelecidos por meio dos dados de mapeamento e fointerpretações (Figura 10). No caso do aterro do fundo cava ainda foi possível estabelecer a relação entre as unidades previamente modeladas e o que estaria acima da antiga topografia, permitindo a modelagem com maior precisão.

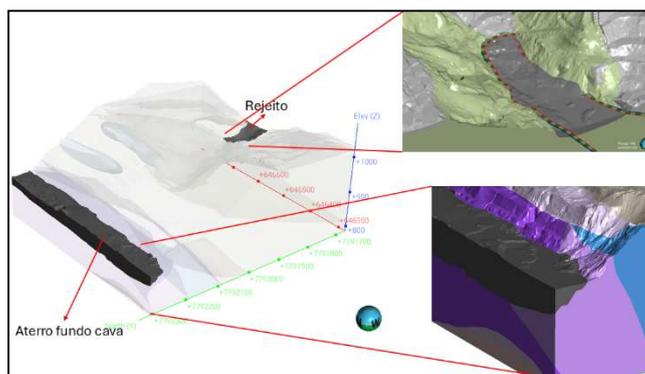


Figura 10 – Modelagem do aterro no fundo da cava e do rejeito.

A Figura 11 representa o produto referente aos materiais que compõem a região da fundação e entornos da PDE, onde os materiais encontrados na fundação são compostos, em ordem cronoestratigráfica, por: Itabiritos friáveis (R0 a R1-) da Fm. Cauê; Xistos Manganésiferos da Formação Gandarela (R1+ a R1-), e por fim, Brechas matriz suportadas da Formação Gongo Soco (R1+ a R1-).

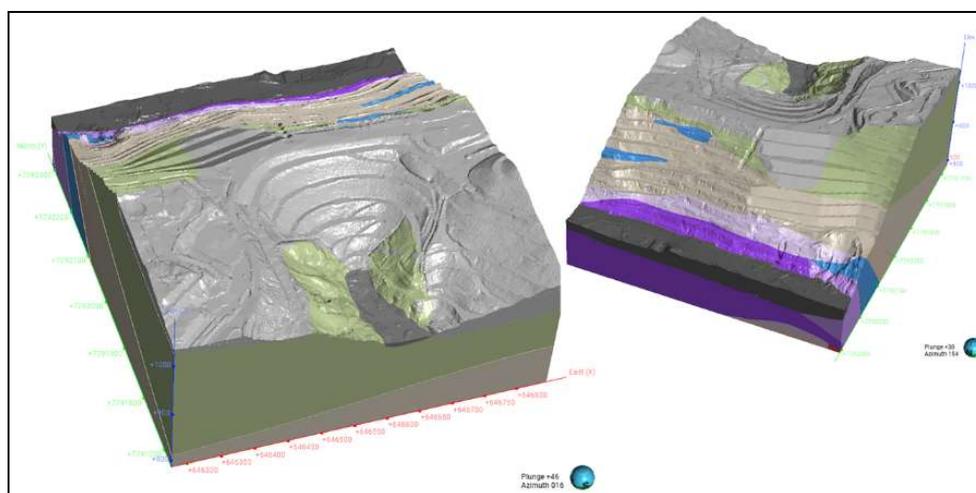


Figura 11 – Modelo Geológico Final.

## 5. CONCLUSÕES

O modelo geológico tridimensional da pilha e da fundação da estrutura foi elaborado com base em uma análise detalhada de 31 sondagens, complementada pelos dados obtidos durante o mapeamento geológico em campo. As interpretações geológicas foram realizadas com base nas informações geológico-geotécnicas das investigações realizadas ao longo do tempo na região analisada. Essas informações foram reavaliadas e validadas para melhor adequação do modelo.

Através dos levantamentos de campo, foi possível determinar as litologias aflorantes em superfície e nos entornos da estrutura, corroborando para o andamento dos estudos de sua fundação e entornos. Desta forma, foi possível identificar e classificar as características das principais unidades. No contexto geológico do Quadrilátero Ferrífero, as rochas que compõem a fundação da estrutura incluem unidades compostas, localmente, por xistos manganésiferos da Formação Gandarela. Já a Formação Gongo Soco é caracterizada como um depósito terciário com feições típicas de leques aluviais, apresentando brechas suportadas por matriz com clastos polimícticos.

A importância dos modelos geológicos para a definição da fundação dessas estruturas é inestimável. Eles permitem uma compreensão detalhada das condições do subsolo, facilitando a identificação de possíveis riscos e a tomada de decisões informadas durante o planejamento e execução das obras. Além disso, esses modelos são essenciais para o monitoramento contínuo e a manutenção das estruturas, garantindo sua estabilidade e segurança ao longo do tempo.

## REFERÊNCIAS

DORR II, J. V. N. Physiographic, stratigraphic, and structural development of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. Washington: US Geol. Surv., 1969. 110 p. (Prof. Pap. 641-A).  
EHRlich, M.; COSTA, D. P.; SILVA, R. C. Behavior of a Colluvial Slope Located in Southeastern Brazil. *Landslides Journal*, Springer Berlin Heidelberg, 2018. 19 p.

ENDO, I.; DELGADO, C. E. R.; OLIVEIRA, M. M. F. de; ZAPPAROLI, A. de C.; CARLOS, D. U.; GALBIATTI, H. F.; CASTRO, P. de T. A.; SUITA, M. T. de F.; BARBOSA, M. S. C.; LANA, C. E.; MOURA, L. G. B. de. Estratigrafia e Arcabouço Estrutural do Quadrilátero Ferrífero: Nota Explicativa do Mapa Geológico do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil. Escala 1:150.000. Ouro Preto: Departamento de Geologia da Escola de Minas – UFOP - Centro de Estudos Avançados do Quadrilátero Ferrífero, 2019b.

ENDO I & ROCHA FILHO OG. 2003. Estratigrafia, arcabouço estrutural e controle da mineralização ferrífera da mina de Gongo Soco, MG. 48p. Relatório Interno.

FRANCA, P. COSTA, T. & STACEY, P. (2018). Soft Iron Ores and Other Leached Rocks. Guidelines for Open Pit Slope Design in Weak Rocks, D. Martin and P. Stacey (eds.), CSIRO Publishing, Melbourne, Australia, 269-308.