

## MODELAGEM 3D DE UMA BARRAGEM DE REJEITO E ANÁLISE NUMÉRICA DO $N_{SPT}$

Marcos Rogério do Nascimento Júnior<sup>1</sup>; Silas Santos Salgado<sup>2</sup>; Alberto Ferreira Amaral Junior<sup>3</sup>

**Resumo** – Os recentes acontecimentos de rupturas de barragens no Quadrilátero Ferrífero têm motivado a estudos mais detalhados sobre as condições destas estruturas. Nesse intuito, este trabalho aborda a utilização da modelagem numérica do índice de resistência a penetração do solo ( $N_{SPT}$ ) da investigação geológico-geotécnica de uma barragem de mineração utilizando o *software Leapfrog Works*. Os resultados destes modelos contribuem para a compressão da variabilidade lateral das resistências destes materiais, além de contribuir para a avaliação de parâmetros geotécnicos utilizados em análises de estabilidade de maciços.

**Abstract** – The recent events of dam failures in the Quadrilátero Ferrífero have motivated more detailed studies on the conditions of such structures. In this sense, this work addresses the use of numerical modeling of the soil standard penetration index ( $N_{SPT}$ ) in the geological-geotechnical investigation of a waste dam using the Leapfrog Works software. The results of these models contribute to the understanding of the lateral variability of the strengths of these materials, in addition to the evaluation of geotechnical parameters used in the embankment stability analyses.

**Palavras-Chave** – Modelo Numérico; Barragem; Leapfrog Works.

---

<sup>1</sup> Geól., Esp, DF+ Eng. Geotéc. Rec. Hídricos, (31) 2519-1001, mnascimento@dfmais.eng.br

<sup>2</sup> Geól., PhD, DF+ Eng. Geotéc. Rec. Hídricos, (31) 2519-1001, ssalgado@dfmais.eng.br

<sup>3</sup> Geól., MSc, DF+ Eng. Geotéc. Rec. Hídricos, (31) 2519-1001, aamaral@dfmais.eng.br

## 1. INTRODUÇÃO

Os recentes acontecimentos de rupturas de barragens de mineração têm motivado, nas últimas décadas, estudos detalhados das condições destas estruturas. Muitas barragens, ao longo de décadas, foram construídas sem uma compreensão prévia da fundação ou dos materiais que constituem os maciços, sendo estes, uma das principais falhas nestas estruturas. Objetivando a compreensão especificamente da condição do maciço do barramento, este trabalho aborda a utilização da modelagem numérica do índice de resistência a penetração do solo ( $N_{SPT}$ ) do corpo do barramento.

## 2. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA ESTUDADA

### 2.1. Localização

A barragem, na qual se desenvolveu este estudo pertence a uma mineradora de ferro localizada no município de Brumadinho, Minas Gerais. Trata-se de uma barragem de rejeito com alteamento para montante, constituída de um maciço de aterro de rejeito. O local está aproximadamente 15 km de distância do município e cerca de 55 km distante da capital Belo Horizonte.

### 2.2. Geologia

O local de estudo está inserido na borda oeste da Serra do Curral, região noroeste do Quadrilátero Ferrífero. Em termos estruturais, a serra representa em grande parte, o flanco de um sinclinal invertido com vergência para NNW. O flanco normal dessa estrutura aflora nas suas extremidades nordeste e sudoeste, Alves (1961) e Romano (1989).

Do ponto de vista mesorregional a região é topograficamente elevada, cuja serra se compartimenta segundo a direção E-W, com uma elevação máxima da ordem de 1300 metros. É constituída por rochas metassedimentares, com núcleo de uma unidade subvertical de itabiritos (Formação Cauê) que correspondem à zona de crista da serra, e encaixantes, sotoposta à norte por filitos/quartzitos da Formação Cercadinho e sobreposta, a sul, por filitos pertencentes a Formação Batatal e ao Grupo Nova Lima, configurando a inversão estratigráfica do sinclinal invertido, conforme Sanglard (2013) e Sanglard *et al.* (2014).

### 2.3. Caracterização geológico-geotécnica

Na região da barragem ocorrem na fundação, solos residuais e saprólitos de rochas pertencentes ao Grupo Nova Lima em contato, na ombreira direita, com a Formação Batatal do Grupo Caraça, além de materiais antrópicos associados a barragem. São estes:

- a) Solo Residual e Saprólito de filito (Grupo Nova Lima), ocasionalmente com níveis milimétricos a centimétricos de quartzo, concordantes ou não com a foliação, coloração predominantemente avermelhada e lentes de quartzitos finos;
- b) Solo Residual e Saprólito de filito sericítico (Formação Batatal) cinza-amarelada a vermelha com intercalações centimétricas a métricas de quartzito cinza-esbranquiçado;
- c) Rejeito, correspondente ao material arenoso e areno-siltoso a areno-argiloso, cinza escuro que se encontra na base do maciço da barragem e em seu reservatório;
- d) Pilha, correspondente ao material da encosta da obreira direita do reservatório e parte da fundação entre o rejeito e o maciço inicial da barragem, caracterizado como silto-arenoso com grânulos, seixos e blocos de itabirito, coloração castanho escuro a cinza escura; e

e) Aterro da barragem, correspondendo ao maciço inicial e o 1º e 2º alteamento constituído por material arenoso e areno-siltoso a areno-argiloso, cinza escuro.

Na Figura 1 é apresentada a seção da barragem e sua fundação.

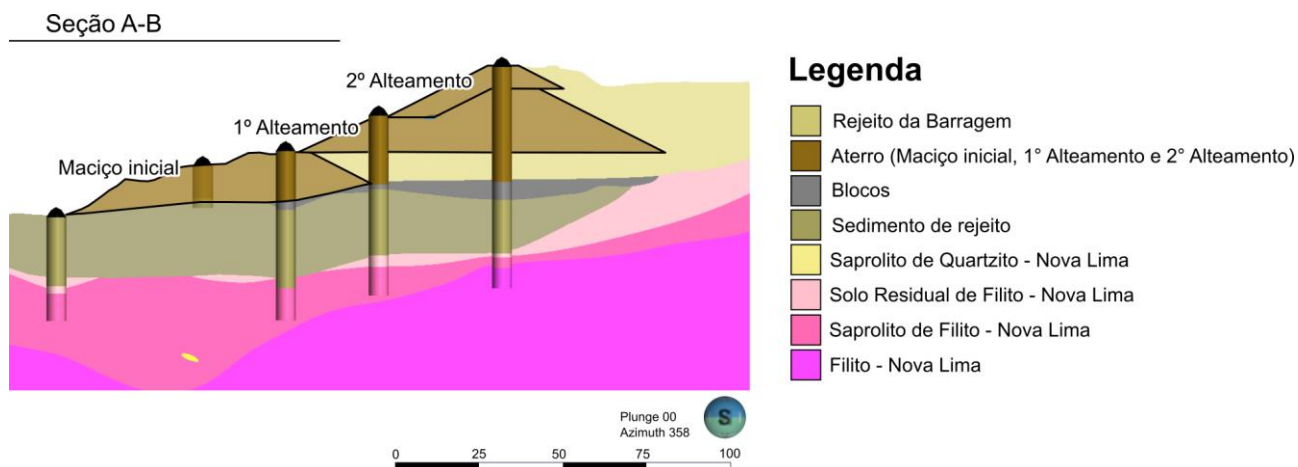


Figura 1. Seção A-B com as unidades da barragem.

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

Como premissa para o desenvolvimento deste trabalho, foi realizada a validação e a uniformização das informações das investigações de sondagens quanto as informações de localização, descrição dos materiais e ensaios ( $N_{SPT}$ ) realizados entre 2004 e 2021, totalizando um conjunto de 65 sondagens no entorno e maciço da barragem, sendo 38 sondagens mistas (SM) e 27 sondagens à percussão (SPT) que serviram para a elaboração inicial do modelo 3D da fundação e maciço da barragem. Destas investigações, utilizou-se para o modelo numérico apenas as sondagens no maciço e seus alteamentos.

Utilizou-se como ferramentas computacionais para o desenvolvimento da modelagem os softwares *software Autodesk Civil 3D*, *Micronime* e *software Leapfrog Works*.

#### 3.1. Processamento e etapas

Para a construção da estrutura da barragem, ou seja, o maciço inicial, alteamentos, dreno e rejeitos, utilizou-se do *software Autodesk Civil 3D*. A modelagem deu-se partir da interpolação e extrapolação das seções transversais previamente interpretadas da estrutura, permitindo assim a transformação de uma geometria bidimensional em superfícies tridimensionais.

Após a criação das superfícies em ambiente do *Autodesk Civil 3D*, foram construídos os sólidos do maciço no *software Micronime*, baseando na interseção das malhas trianguladas da superfície (Figura 2-A) e gerando um sólido (Figura 2-B) válido para importação no *software Leapfrog Works*. O input dos sólidos do maciço compôs o último passo de entrada para a elaboração do modelo numérico de  $N_{SPT}$ .

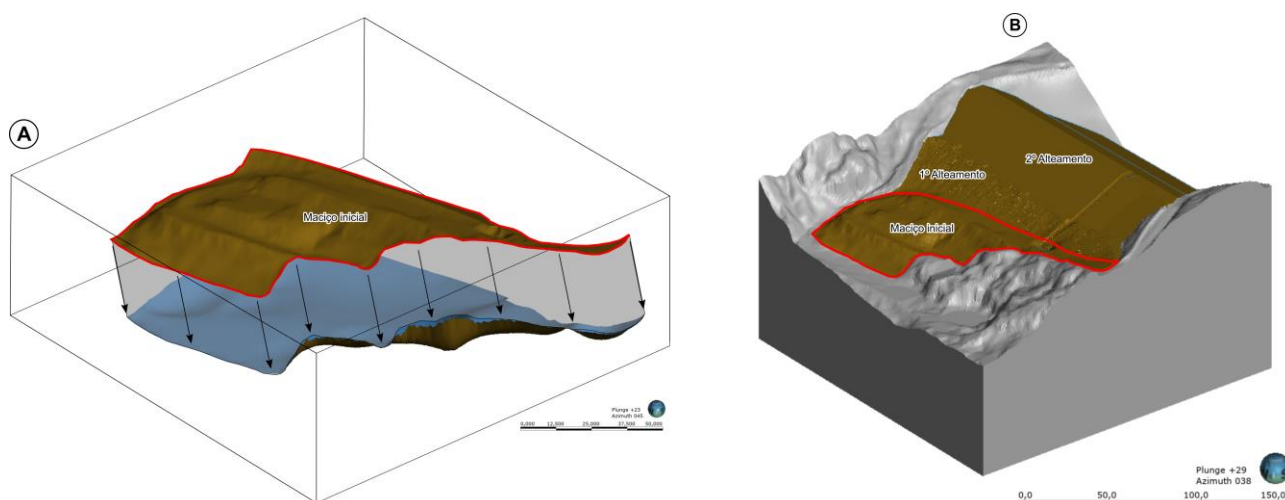


Figura 2. Exemplo da construção do sólido do maciço inicial da barragem; em A) interseção das malhas trianguladas da superfície; e B) sólidos do maciço da barragem.

#### 4. Modelo numérico do $N_{SPT}$

Para a construção do modelo numérico, partiu-se da interpolação dos valores de  $N_{SPT}$  obtidos nas sondagens, considerando o limite ou volume de um modelo existente. Neste caso, os sólidos da estrutura da barragem (maciço inicial, 1º alçamento e 2º alçamento) que foram construídos conforme explicado no item anterior.

A operação de modelagem dos valores numéricos de  $N_{SPT}$  foi realizada no *Leapfrog Works* utilizando o interpolador RBF (Função de Base Radial). Esse algoritmo interpola os valores numéricos de forma radial buscando todas as informações numéricas no entorno do espaço amostral. Cowan *et al.* (2004), expõe sobre as vantagens da ferramenta e a construção de modelos de forma rápida, especificamente utilizando a função de base radial. A parametrização de entrada são os valores de  $N_{SPT}$  definidos por intervalos amostrados. Desta forma, configurou-se no interpolador as amostras numéricas levando em consideração o filtro de superfície que exclui as amostras que estão fora do limite do modelo evitando estimativas não representativas. A resolução do modelo foi definida em 1m com base nos valores de amostras de  $N_{SPT}$  realizado a cada metro do furo de sondagem.

Após a parametrização, o modelo foi configurado em intervalos de  $N_{SPT}$  conforme o histograma dos valores amostrais, respeitando a NBR 6484/2020, Tabela 1. Assim, considerou-se três intervalos:  $N_{SPT} < 9$ ,  $9 \geq N_{SPT} \leq 18$  e  $N_{SPT} > 18$ , representando as características de resistência  $N_{SPT}$  do maciço de aterro conforme a característica arenosa do material.

Tabela 1. Estado de compactidade e resistência conforme NBR6484/2020.

Solo	Índice de resistência à penetração ( $N_{SPT}$ )	Designação
Areias e siltes arenosos	$\leq 4$	Fofo
	5 a 8	Pouco Compacta
	9 a 18	Medianamente compacto
	19 a 40	Compacto
	$>40$	Muito compacto
Argilas e Siltes argilosos	$\leq 2$	Muito mole
	3 a 5	Mole
	6 a 10	Média
	11 a 19	Rija
	20 a 30	Muito rija

Dentre os parâmetros de interpolação, foi definido a “deriva constante”, que considera a média de valores onde não se tem informação, e o parâmetro “linear”, que melhor representa uma configuração de camadas laterais ao longo de sólido (neste caso, os aterros da barragem). Configurou-se ainda o valor do “range” da camada = 2,5x a média de distâncias entre os furos de sondagem (maciço inicial = 25m; 1° alteamento = 30m; e 2° alteamento = 37m). Por fim, utilizou-se a ferramenta *trend* com configuração ( $0^\circ/270^\circ$ , *pitch*  $0^\circ$ ) e raio de elipsoide (maciço inicial: 60/60/2; 1° alteamento: 60/60/2; e 2° alteamento: 60/60/3) que submete uma força ao *range* do interpolador nas 3 direções para melhor representar os horizontes geotécnicos de  $N_{SPT}$ . Na Figura 3 é apresentado o modelo numérico do maciço da barragem.

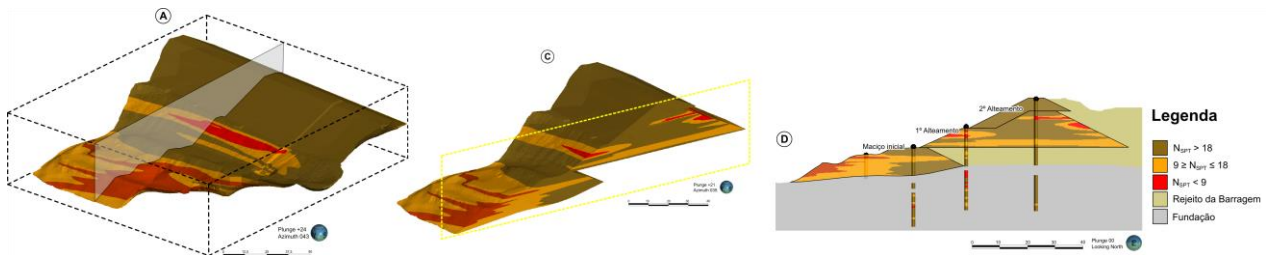


Figura 3. Modelo Numérico 3D do  $N_{SPT}$  da barragem. A) Modelo numérico de  $N_{SPT}$ , vista do *plunge*  $+24^\circ$  / *Azimuth*  $43^\circ$ ; B) Transecto da seção A-B no modelo numérico de  $N_{SPT}$ , vista do *plunge*  $+21^\circ$  / *Azimuth*  $35^\circ$ ; e C) Seção A-B do modelo numérico de  $N_{SPT}$ .

## 5. RESULTADOS

Os resultados da modelagem da barragem contribuíram para desenvolver a geometria dos valores de  $N_{SPT}$ , visto a complexidade do material constituintes do maciço e seus alteamentos serem difíceis de serem interpretadas em análises tátil-visuais. Contudo, as análises dessas interpretações são importantes para o conhecimento geral do material constituinte.

Com relação ao modelo proposto, o maciço inicial e o 1° alteamento aparentam ser constituído dos 3 horizontes de  $N_{SPT}$  definidos nos intervalos baseados na NBR 6484/2020, para solos arenosos. O 2° alteamento evidenciou horizontes de  $9 \leq N_{SPT} \leq 18$  e  $N_{SPT} > 18$ , representando a sua totalidade um maciço mais resistente que os anteriores apresentados, conforme a Figura 4.

A estrutura é atravessada por 28 sondagens, sendo destas, 10 interceptam o maciço inicial, 15 atravessam o 1° alteamento e 10 o 2° alteamento. A distribuição das sondagens no corpo da barragem é melhor representada no maciço inicial e no 1° alteamento e apesar de até existir um número razoável de sondagens no 2° alteamento, esta é bem menor em distribuição, refletindo talvez nas condições mais resistentes que os outros maciços.

Os resultados dos sólidos distinguem corpos lenticulares que apresentam variações laterais bem significativas quando visualizadas juntamente com as sondagens e seus valores de resistência  $N_{SPT}$ . O maciço inicial apresenta aterros menos resistentes a moderados na face, seguindo para um núcleo moderadamente resistente com porções a montante muito resistentes. O 1° alteamento tem aterros base de moderada resistência ressaltando um contato resistente com os rejeitos da primeira deposição. O núcleo é muito resistente com face moderada, assim como as porções a montante do material. Já o 2° alteamento é exclusivamente muito resistente, isso se dá ao fato da baixa distribuição das sondagens dentro deste material e os resultados resistentes deste material de aterro. Na Tabela 2 é apresentado a estatística do  $N_{SPT}$  de cada unidade do maciço da barragem.

Tabela 2. Estatística do NSPT de cada unidade do maciço da Barragem.

Unidade	Maciço Inicial	1º Alçamento	2º Alçamento
Intervalos	72	157	23
Comprimento	75,74	171,91	28
Média	14,95	17,25	39,96
Desvio Padrão	8,02	11,55	10,97
Coefficiente de Variação	0,53	0,67	0,27
Variância	64,47	133,51	120,49
Mínimo	2	3	8
Quartil Inferior	10	8	36
Mediana	13	14	40
Quartil Superior	18	23	50
Máximo	50	50	50

## 6. CONCLUSÕES

O Desafio de se obter modelos construtivos dos maciços de barragens incorpora desde a aquisição de dados, a qualidade e experiência das pessoas envolvidas nas atividades desde a investigação à interpretação dos dados. A construção de modelos bidimensionais já corriqueira nesses estudos proporciona o conhecimento de um determinado objetivo e seu problema. No entanto a construção de modelos tridimensionais além de compreender a variação geológico-geotécnica da fundação e do maciço, é possível realizar análises dos parâmetros ao longo destes corpos, neste caso o  $N_{SPT}$ , como outros parâmetros (ensaios de infiltração, CPTu, Vane Test, RQD, RMR) e também o seu comportamento visto a estes dados. Ainda é possível programar novas investigações com intuito de refinar os modelos ainda imprecisos devido a baixa informação.

Neste trabalho, ficou evidente que o resultado obtido na modelagem pode contribuir de certa forma para a avaliação dos parâmetros geotécnicos do maciço para fins de análises de estabilidade por equilíbrio limite, tensão deformação e percolação, e assim compreender espacialmente os seus comportamentos, além de verificar a veracidade dos resultados de estabilidade.

Com relação as utilidades deste modelo, ressalta-se a sua utilização, combinando com outras informações geotécnicas e a possibilidade de testar diversos cenários. Desta maneira pode-se testar cenários envolvendo correlações entre dados geofísicos como anomalias geofísicas de resistividades e sísmicas, a combinação com modelos hidrogeológicos. monitoramento dos instrumentos com a modelagem do N.A ou da superfície piezométrica a partir das leituras periódicas. Essa automatização lincada a modelagem pode contribuir para o controle da variação da superfície piezométrica ao longo do tempo, além de conhecer as diferentes cargas hidráulicas de cada instrumento. Entre outras análises, o comportamento do fluxo d'água subsuperficial nas unidades do maciço da barragem.

Por fim, ressalta-se a automação dinâmica do input de novas informações de sondagem que contribuem com a atualização e o refinamento constante do modelo por meio da modelagem implícita, desde que se tenha um banco de dados consolidado.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a DF+ Engenharia Geotécnica e Recursos Hídricos pelo apoio no desenvolvimento e divulgação desses estudos.

## REFERÊNCIAS

ABNT NBR6484 (2020) Sondagem de Simples Reconhecimento com SPT - Método de Ensaio. Soil — Standard Test Method for Standard Penetration Test (SPT) — Test Procedure. Associação Brasileira de Normas técnicas, 32p.

ALVES, B. P. (1961) “*Sumário sobre estratigrafia e estrutura das quadrículas de Caeté e Serra da Piedade*”. Publicação da Sociedade de Intercâmbio Cultural e Estudos Geológicos, 1, 257-260. Ouro Preto: SICEG.

COWAN, E. J. et al. (2004) “*Leapfrog's implicit drawing tool: a new way of drawing geological objects of any shape rapidly in 3D*”, in Mining Geology 2004 Workshop (eds: M.J. Berry and M.L. Quigley), Australian Institute of Geoscientists Bulletin, 41: 23–25.

ROMANO, A. W. (1989) “*Evolution Tectonique de la region nord-ouest du Quadrilatère Ferrifère*” – Minas Gerais – Brésil. Tese (Doutorado). Nancy: Université de Nancy.

SANGLARD, J. C. D. et al. (2014) “*A estrutura do segmento oeste da Serra do Curral, Quadrilátero Ferrífero, e o controle tectônico das acumulações compactas de alto teor em Fe*”. Geologia USP - Serie Científica. 14. 81-95.

SANGLARD, J. C. D. (2013) “*Geologia estrutural do segmento oeste da Serra do Curral, Quadrilátero Ferrífero, e o controle tectônico das acumulações de alto teor em Fe*” - Minas Gerais - Brasil. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geologia, Universidade Federal de Minas Gerais. 108p.