

## ESTABILIZAÇÃO DE PILHA DE REJEITO E ESTÉRIL (PDER) COM DSM E CONTRAPILHAMENTO

Luísa A. Araújo<sup>1</sup>; Orlando F. Prado<sup>2</sup>; Rafael M. Carvalhais<sup>3</sup>; Ariel H. Pozzobon<sup>4</sup>; Ian K. N. Yonezawa<sup>5</sup>; Diógenes G. P. Amaral<sup>6</sup>

**Resumo** – A PDER avaliada neste estudo possuía um bolsão de rejeito saturado executado em sua berm de estabilização. Esta condição se apresentava como impeditivo para a ampliação da pilha, uma vez que o rejeito saturado provocava a instabilidade do contrapilhamento. Para estabilizar a estrutura foi dimensionado um reforço por meio de *Deep Soil Mixing* a ser executado na camada de rejeito saturado para que este apresentasse condições de resistência adequadas para a execução da ampliação da pilha. O dimensionamento do reforço e definições dos parâmetros do material tratado foram desenvolvidos a partir da metodologia de CHOBBASTI (2011). As análises de estabilidade demonstraram a elevação do fator de segurança com a execução do tratamento proposto. O contrapilhamento que inicialmente não apresentava estabilidade adequada, pôde ser executado após a execução do reforço.

**Palavras-Chave** – Estabilização, Pilha, *Deep Soil Mixing*

**Abstract** – The PDER evaluated in this study has a pocket of saturated waste executed in its stabilization berm. This condition presented itself as an impediment to the expansion of the pile, since the saturated waste caused the instability of the counter-pile. To stabilize the structure, a reinforcement was dimensioned by means of Deep Soil Mixing to be executed in the saturated waste so that it presents adequate resistance conditions for the execution of the pile expansion. The dimensioning of the reinforcement and definitions of the parameters of the treated material were developed based on the methodology of CHOBBASTI (2011). The stability analyses demonstrated the increase in the safety factor with the execution of the proposed treatment. The counter-pile that initially did not present adequate stability can be executed after the execution of the reinforcement.

**Key words** – Stabilization, Stack, *Deep Soil Mixing*

<sup>1</sup> Eng., Civil Geotécnica – DAM Projetos: Belo Horizonte-MG (31)99819-8837, [luisa.araujo@dam.com.br](mailto:luisa.araujo@dam.com.br)

<sup>2</sup> Geól., MSc, - DAM Projetos: Belo Horizonte-MG (48)99601-4222, [orlando.prado@dam.com.br](mailto:orlando.prado@dam.com.br)

<sup>3</sup> Eng., Civil Geotécnico, MSc – DAM Projetos: Belo Horizonte-MG (31) 31 8626-1919, [rafael.carvalhais@dam.com.br](mailto:rafael.carvalhais@dam.com.br)

<sup>4</sup> Geól, - DAM Projetos: Belo Horizonte-MG, (48) 99137-2043, [ariel.pozzobon@dam.com.br](mailto:ariel.pozzobon@dam.com.br)

<sup>5</sup> Geól, - DAM Projetos: Belo Horizonte-MG, (48) 99137-2043, [ian.yonezawa@dam.com](mailto:ian.yonezawa@dam.com)

<sup>6</sup> Geól. Geotécnico, PUCMINAS:, (31) 98806-9891, [diogenesgeologo@gmail.com](mailto:diogenesgeologo@gmail.com)

## 1. INTRODUÇÃO

A PDER foco deste estudo foi executada inicialmente apenas com estéril e, posteriormente passou a ser uma co-disposição de rejeito e estéril. O material era disposto sem controle, misturando rejeito desaguado ou em polpa com o estéril.

Foi recomendada a execução de um retaludamento e uma berma de contrapilhamento com rejeito desaguado e esteirado. Entretanto, foi verificado que esta berma estava sendo executada com rejeito em polpa, contido por um dique de rejeito desaguado, sem controle de compactação. Essa situação estava desfavorável à estabilidade da estrutura e, ainda, previa-se um estudo de ampliação da pilha.

Propôs-se a estabilização dessa berma com a utilização de Deep Soil Mixing (DSM), de forma a elevar a resistência do material e um retaludamento da pilha como um todo, com um contrapilhamento no pé, sobre a região tratada.

## 2. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA ESTUDADA

### 2.1. Caracterização geológica regional

A PDER está localizada ao sopé sul da Serra da Moeda e a oeste do Rio Paraopeba. A serra concentra as atividades de mineração de ferro a partir de rochas da Formação Itabirito, tendo como encaixantes ao sul, e geradoras de material estéril, os granitos gnaisse do Complexo Bomfim, principalmente. A norte a serra é limitada pelos xistos e filitos do Grupo Nova Lima e Gnaiss Belo Horizonte. A Figura 1 apresenta o mapa geológico simplificado do Quadrilátero Ferrífero.

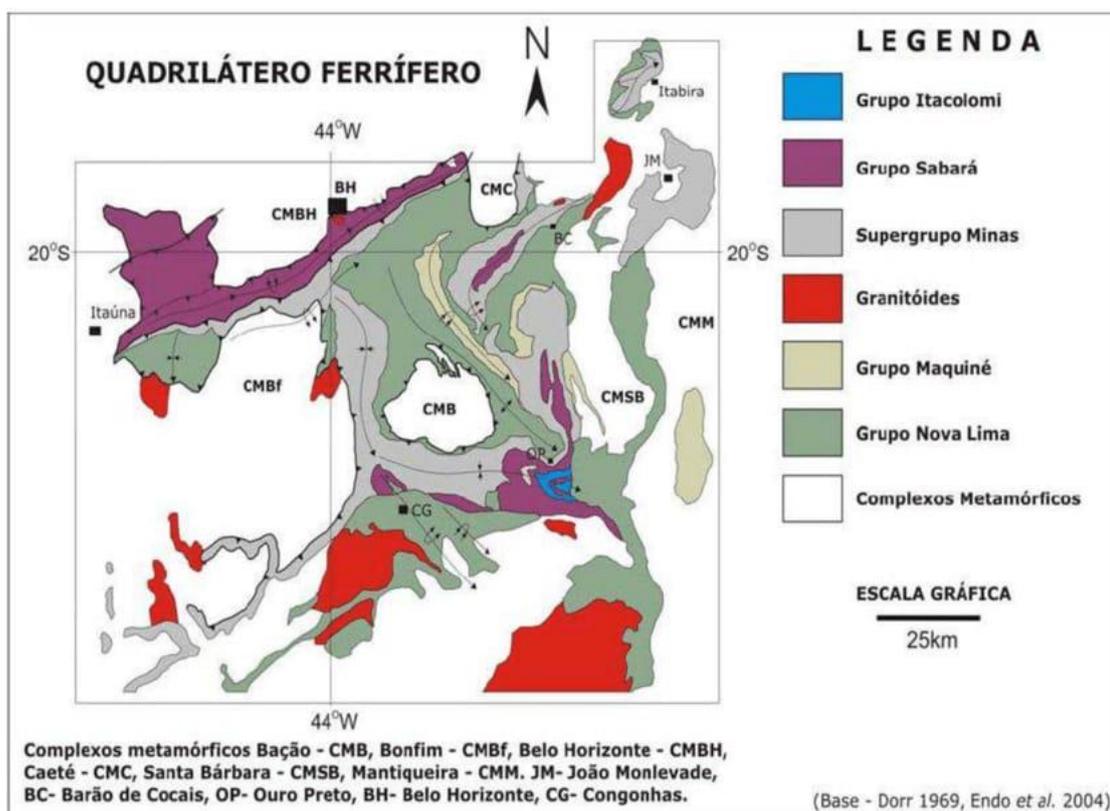


Figura 1 – Mapa Geológico Regional do Quadrilátero Ferrífero. Fonte: Dorr (1969), Endo et al. (2004).

## 2.2. Caracterização da estrutura

A PDER executada inicialmente como pilha de estéril, atualmente se trata de uma co-disposição de rejeito e estéril. A proporção utilizada na mistura de rejeito desaguado com o estéril é de 1:1.

A Tabela 1 apresenta a Ficha Técnica da PDER.

Tabela 1 – Ficha Técnica da Estrutura

Cota de Topo (m)	Cota de Base (m)	Altura Total (m)	Inclinação Geral dos Taludes
927,00	775,00	152,00	1,8H:1,0V

Fonte: Elaborado pelos autores

A Figura 2 apresenta a Seção da PDER que apresenta um bolsão de rejeito, impeditivo para as obras de ampliação da pilha.

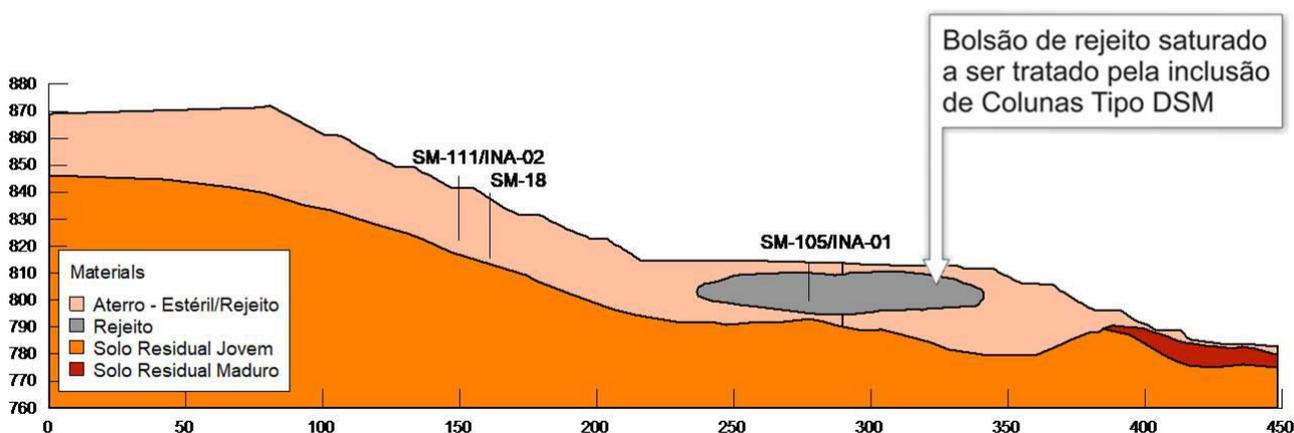


Figura 2 – Seção de análise. Fonte: Elaborado pelos autores.

## 3. DIMENSIONAMENTO DO REFORÇO

Optou-se pela execução das colunas solo-cimento, Deep Soil Mixing (DSM), uma vez que esta técnica proporciona a melhoria do solo sem a necessidade de escavação prévia, ao misturar um aglutinante (calda de cimento) com o solo em profundidade, transformando-o em um material de melhores características mecânicas e menor permeabilidade que o solo original (KITAZUME & TERASHI, 2001). Segundo Oliveira et al. (2012), o DSM aumenta a estabilidade do solo e reduz o recalque, é uma metodologia de rápida execução e baixo custo associado.

A Figura 3 apresenta fotografia do equipamento que executa o DSM. A haste possui algumas pás que servem para revolver o material, enquanto a ponta injeta a calda de cimento a medida em que se aprofunda no solo. Dessa forma, enquanto o equipamento realiza a “quebra” do solo, já realiza a sua mistura com a calda de cimento.



Figura 3 – Equipamento de Execução do DSM. Fonte: Elaborado pelos autores.

### 3.1. Critérios de Dimensionamento

A primeira tentativa de resolver o problema com solo reforçado por técnicas de homogeneização foi feita por Mitchell & Huber (1985) apud Choobbasti et al (2011). Priebe (1976) apud Choobbasti et al (2011) propôs um método para estimar recalques em fundações apoiadas em malhas de colunas baseado no modelo da célula unitária. Nesse conceito, a coluna e o solo que a circunda são considerados como um material único, isto é, como uma célula unitária. A análise dessa célula unitária depende de seu espaçamento.

A metodologia adotada no dimensionamento foi desenvolvida por Choobbasti et al (2011). Consiste na adoção de um sistema homogêneo equivalente ao conjunto solo/coluna, distribuído em uma malha pré-determinada. Assim, determina-se a área de influência da coluna na região do solo e obtém-se a célula unitária que será utilizada no cálculo para a parametrização do solo tratado.

A malha adotada está diretamente relacionada ao diâmetro equivalente e área de influência do tratamento. A Figura 4 apresenta as possibilidades de malhas a serem adotadas, com os respectivos diâmetros equivalentes e áreas de influência, sendo  $l$  o espaçamento entre as colunas.

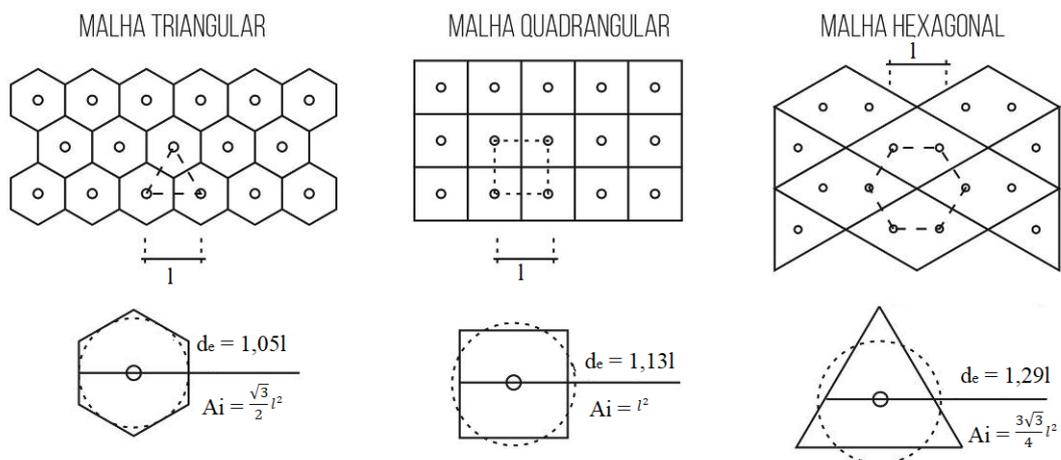


Figura 4 – Distribuição em malhas das colunas DSM, com indicação dos diâmetros equivalentes e áreas de influência. Fonte: Lima (2012), adaptado pelos autores.

A definição dos parâmetros equivalentes é obtida a partir de uma razão de substituição de áreas ( $a_c$ ) adimensional, definida como sendo a razão entre a área da seção transversal da coluna ( $A_c$ ) em  $m^2$  e a área de influência da coluna ( $A_i$ ) em  $m^2$  (Choobbasti et al, 2011), conforme apresentado abaixo:

$$a_c = A_c / A_i \quad (\text{equação 1})$$

A partir da razão de substituição, Choobbasti et al (2011) propões que as propriedades do solo reforçado sejam calculadas conforme equação 2. A unidade de medida se adequa ao parâmetro utilizado.

$$P_{eq} = a_c * P_c + (1 - a_c) * P_s \quad (\text{equação 2})$$

Onde:

$P_{eq}$  é o parâmetro equivalente (parâmetro que se deseja obter)

$P_c$  é o mesmo parâmetro da coluna

$P_s$  é o mesmo parâmetro do solo

Essa formulação genérica pode ser aplicada para qualquer parâmetro do material, seja ele peso específico, coesão, atrito, permeabilidade etc.

### 3.2. Dimensionamento

Para o dimensionamento foram avaliadas diferentes malhas com diferentes diâmetros. A partir dos parâmetros equivalentes obtidos, realizou-se análises de estabilidade para a verificação se aquele tratamento apresentava o ganho de resistência adequado para a estabilização da pilha.

O tratamento com DSM adotou como parâmetros das colunas um peso específico ( $\gamma_c$ ) de  $20 \text{ kN/m}^3$ , coesão ( $C_c$ ) de  $300 \text{ kPa}$  e ângulo de atrito ( $\phi_c$ ) de  $25^\circ$  (Pinto, 2016). Foi considerado um consumo de cimento de  $300 \text{ kg/m}^3$  de calda, com razão de água de  $0,8$ , conforme identificado na experiência japonesa (Sanchez, 2012). A alteração desta composição influencia nos parâmetros adotados para a calda de cimento.

Foram executados três ensaios triaxiais tipo CIUsat no rejeito em amostras do tipo Shelby. O resultado dos ensaios apresentou uma coesão de  $7 \text{ kPa}$  e ângulo de atrito de  $33^\circ$ . Entretanto, conforme sondagens executadas, em que foi identificado um material mole, optou-se por minorar os parâmetros de resistência, adotando-se  $24,5 \text{ kN/m}^3$  de peso específico ( $\gamma_s$ ), coesão ( $C_s$ ) nula e ângulo de atrito ( $\phi_s$ ) de  $18^\circ$ .

Foram estudadas as malhas triangular e quadrada para a execução da coluna DSM, com espaçamento de  $1,6 \text{ m}$  e  $2,5 \text{ m}$  e diâmetros de  $0,6$  a  $1,0 \text{ m}$ . Diante dos parâmetros equivalentes obtidos, adotou-se uma malha triangular, com espaçamento de  $2,0 \text{ m}$ , com as colunas possuindo diâmetro de  $0,8 \text{ m}$ . Assim, determinou-se a razão de substituição da seguinte forma:

A Tabela 2 apresenta o resumo dos dados considerados.

*Tabela 2 – Determinação da Razão de Substituição de Áreas*

<i>Espaçamento (l)</i>	<i>Diâmetro das colunas</i>	<i>Área da coluna (Ac)</i>	<i>Área de Influência (Ai)</i>	<i>Razão de Substituição (ac)</i>
<i>2,0 m</i>	<i>0,8m</i>	<i>0,5m<sup>2</sup></i>	<i>3,46m<sup>2</sup></i>	<i>0,145</i>

*Fonte: Elaborado pelos autores*

Com a razão de substituição de áreas determinada,  $a_c = 0,145$ , calculou-se os parâmetros equivalentes do solo tratado correspondentes ao peso específico, coesão e atrito, uma vez que se avaliaria a estabilidade ao cisalhamento do material. Considerou-se a equação (2)

A Tabela 3 apresenta o resumo dos parâmetros adotados e encontrados.

Tabela 3 – Determinação dos Parâmetros do Solo Tratado

Material	Peso Específico ( $\gamma$ )	Coesão (c)	Ângulo de atrito ( $\phi$ )
Rejeito	24,5 kN/m <sup>3</sup>	0 kPa	18°
DSM	20 kN/m <sup>3</sup>	300 kPa	25°
Solo Tratado	24 kN/m <sup>3</sup>	44 kPa	19°

Fonte: Elaborado pelos autores

#### 4. ANÁLISE DE ESTABILIDADE

A existência do bolsão na berma da pilha não se apresenta como condição crítica para a estrutura na conformação atual. Entretanto, inviabiliza sua ampliação. Sendo assim, foi analisada a seção que intercepta o bolsão de rejeito, considerando o avanço do contrapilhamento da PDER, com estéril.

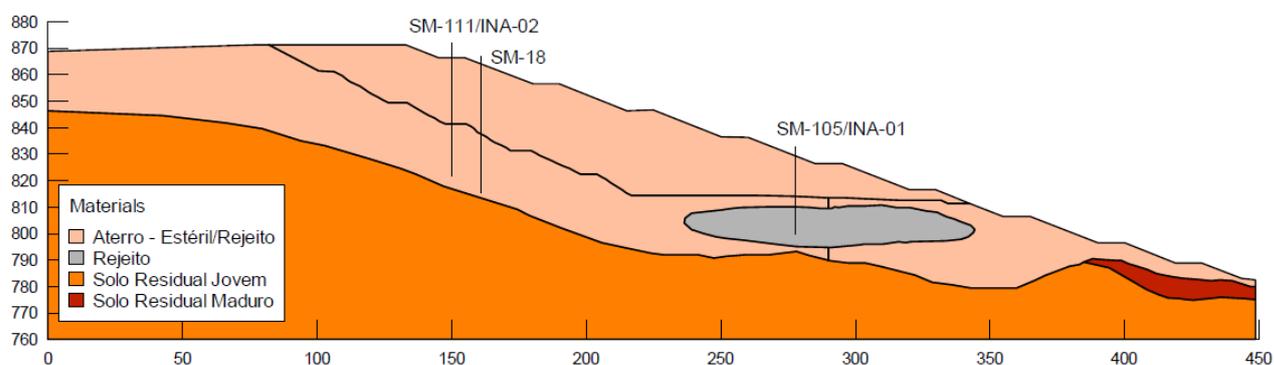


Figura 5 – Seção de análise. Fonte: Elaborado pelos autores.

##### 4.1. Parâmetros Adotados

Para os materiais do aterro e solo residual maduro foram adotados os parâmetros obtidos através dos ensaios de laboratório. Embora o rejeito tenha sido ensaiado em laboratório, optou-se por considerar a coesão do material como nula, uma vez que as sondagens que interceptam o rejeito indicam material mole (NSPT < 3). O colúvio e o solo residual jovem tiveram seus parâmetros estimados, com base nos valores de SPT obtidos nas sondagens realizadas. Sendo o Nspt médio do colúvio igual a 28 e do solo residual jovem superior a 50 golpes.

Tabela 4 – Parâmetros Adotados

Material	$\gamma_{nat}$ (kN/m <sup>3</sup> )	Parâmetros de Resistência	
		C' (kPa)	$\Phi'$ (°)
Aterro/Estéril	21,5	14,0	30,0
Rejeito (Sem tratamento)	24,5	0,0	18,0
Rejeito Tratado	24,0	44,0	19,0
Blocos de Rocha	23,0	0,0	35,0
Colúvio	16,0	15,0	27,0
Solo Residual Maduro	17,0	6,5	25,5
Solo Residual Jovem	19,0	18,0	30,0

Fonte: Elaborado pelos autores

## 4.2. Método de Cálculo

As análises de estabilidade ao escorregamento foram realizadas por equilíbrio limite, utilizando o método de Morgenstern & Price, através do programa de computador SLOPE/W, desenvolvido pela Geo-Studio International Ltd., em Calgary, Alberta, no Canadá. O método de Morgenstern & Price satisfaz às condições de equilíbrio de forças e de momentos. Adotou-se cunha de ruptura não circular.

Está sendo avaliada a ampliação da PDER por meio do contrapilhamento até o topo. Sendo assim, considerou-se uma superfície freática mais elevada, seguindo o fluxo indicado pela instrumentação, acrescida em 10m a elevação.

Para a análise drenada, considerou-se o fator de segurança mínimo aceitável de 1,5, conforme NBR 13.029/2024.

## 4.3. Resultados

As figuras abaixo mostram os resultados das análises de estabilidade para a condição sem reforço e com reforço. Como pode se observar, na Figura 5, o fator de segurança encontrado de 1,4 é inferior ao exigido por norma de 1,5. Dessa forma, entendia-se que a ampliação da pilha seria inviabilizada devido ao bolsão de rejeito.

Na Figura 6, em que se são adotados os parâmetros referentes ao material tratado, o fator de segurança foi elevado para 1,7, atendendo ao mínimo preconizado por norma. Assim, nota-se o ganho de resistência e estabilidade adquiridos pela pilha com o tratamento do rejeito. Ressalta-se que o cenário avaliado considerou a ampliação da PDER.

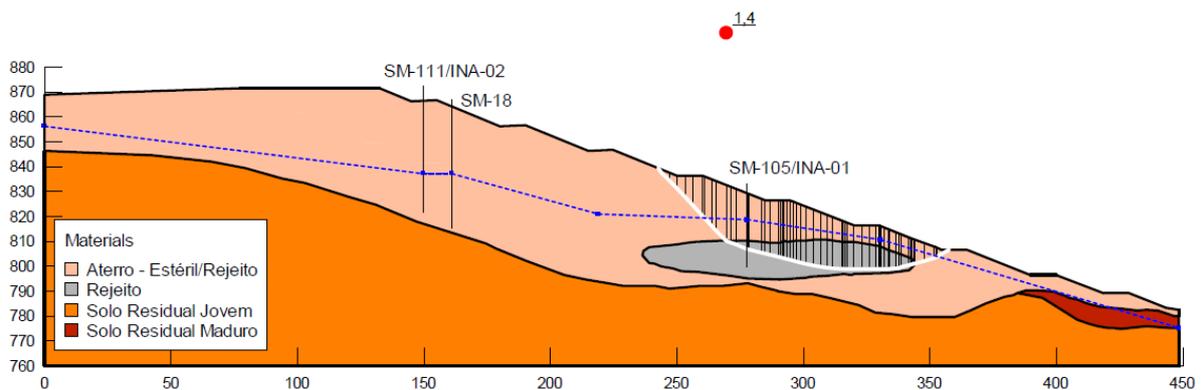


Figura 6 – Análise Drenada com o Rejeito Sem Tratamento. Fonte: Elaborado pelos autores.

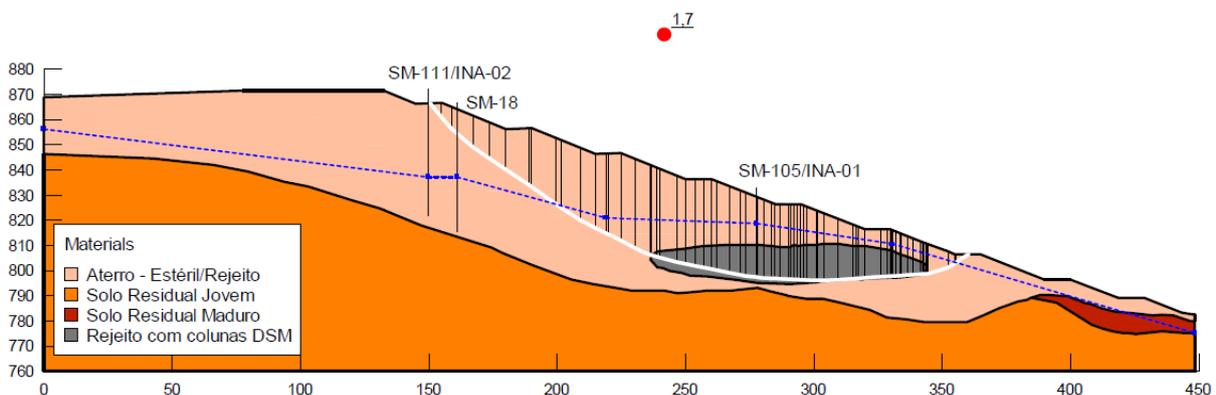


Figura 7 -Análise Drenada com o Rejeito Tratado. Fonte: Elaborado pelos autores.

## 5. CONCLUSÕES

A metodologia inicialmente desenvolvida para o tratamento de solos moles com a injeção de colunas de brita pode ser aplicada para outros tipos de reforço, como por exemplo as colunas de mistura solo-cimento, conhecidas como Deep Soil Mixing (DSM). Os parâmetros do solo tratado dependem do traço adotado na calda de cimento, de forma a determinar os parâmetros de resistência do material, da malha de distribuição das colunas e de suas dimensões, além dos próprios parâmetros do solo.

Neste caso, não se tratava de um solo mole e sim de um rejeito saturado. Recomenda-se a realização de ensaios que simulem a mistura rejeito/cimento para compreender melhor se a realmente podem ser considerados os dimensionamentos do solo para o rejeito.

Devido à injeção de cimento, o ganho de resistência do material é expressivo no que diz respeito à coesão. Entretanto, deve-se avaliar o comportamento hidrogeológico da região a ser tratada, uma vez que este tratamento proporciona uma espécie de barreira, de baixíssima permeabilidade.

Para o objetivo do estudo, de garantir a estabilidade da PDER diante de sua expansão, o tratamento do rejeito saturado com DSM foi adequado, atingindo-se os fatores de segurança exigidos por norma. O tratamento foi concluído, executando-se cerca de 2000 colunas DSM, com diâmetro de 0,8m e espaçamento de 2,0m na malha triangular.

## REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, M. S. S., MARQUES, M. E. S. (2010). Aterros Sobre Solos Moles – projeto e desempenho. Editora UFRJ. Rio de Janeiro, RJ.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13029:2024 – Mineração – Elaboração e apresentação de projetos de disposição de estéril em pilha. Rio de Janeiro, 2024.
- CHOOBBASTI, A. J.; ZAHMATKESH, A.; NOORZAD, R. Performance of Stone Columns in Soft Clay: Numerical Evaluation. *Geotechnical and Geological Engineering*, v. 29, n. 5, p. 675–684, 18 maio 2011.
- DORR, J. V. N. (1969). Physiographic, stratigraphic, and structural development of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil.
- Endo I., Silva L. G., Zavaglia G. 2004. Estratigrafia e arcabouço estrutural do Complexo Ferrífero Brucutú-Dois Irmãos – segmento NE do sinclinal Gandarela. 20p. Relatório Interno.
- LIMA, B. T. 2012. Estudo do Uso de Colunas de Brita em Solos Argiloso Muito Moles. Dissertação de Doutorado de Engenharia Civil, COPPE-UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil.
- KITAZUME, M. AND TERASHI, M. (2001). "Factors Affecting Strength Increase", In: Costal Development Institute of Technology (CDIT), *The Deep Mixing Method: principle, design and construction*, chapter 2, Tokyo, Japan, Costal Development Institute of Technology
- OLIVEIRA, P. J. V., PINHEIRO, J. L. P., AND CORREIA, A. A. S. (2012) Parametric Study of an Embankment Built on Soft Soil Reinforced with Deep Mixing Columns. *Grouting and Deep Mixing 2012*: pp. 211-220
- PINTO, L. S. S. 2016. Comparação entre Aterros Reforçados por Colunas de Brita e por Colunas de Deep Soil Mixing para um Caso Específico. Projeto de Graduação em Engenharia Civil. UFRJ.
- SANCHEZ, S. I. D. P. Reforço de Solos Moles de Fundação de Aterro em Deep Soil Mixing. Modelação de Caso de Estudo. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Universidade do Porto, 2012.