

Avaliação do comportamento geotécnico da rocha máfica utilizando polímero para disposição de estéril em uma pilha não convencional

Alisson Carvalho Santos Brasil ^{1*} 

Resumo

O estudo visou avaliar o comportamento geotécnico da rocha máfica decomposta que será destinada para uma pilha de disposição de estéril (PDE) não convencional, empregando um polímero superabsorvente (SAP). A utilização do polímero foi motivada pela necessidade de melhorar o transporte de estéril nas correias transportadoras, já que reduz a umidade do material evitando obstruções nos chutes britadores. A PDE está projetada para receber um volume de estéril de 547 Mm³ caracterizando como uma pilha de grande porte necessitando de análises geotécnicas especiais, principalmente ao fato da inclusão de componentes não previstos ao projeto original. Foram realizados estudos comparativos com e sem a utilização de polímero em ensaios de laboratório. Os parâmetros geotécnicos foram submetidos à avaliação, abrangendo variáveis como resistência, coesão, deformação e poropressão. Os resultados iniciais indicaram que não houve um aumento significativo na resistência e alteração mínima na resistência ao cisalhamento e coesão. Contudo, a interpretação dos ensaios sugere que a presença do polímero pode resultar em uma maior retenção de água nos interstícios da rocha, prolongando o tempo de permanência da água na rocha máfica. Esse fenômeno pode levar à condição de saturação na pilha de estéril ao longo do tempo apontando possíveis restrições geotécnicas na operação da PDE para a utilização do polímero com a rocha máfica, já que poderá afetar a questão drenada e consequentemente trazer condições anômalas para a estabilidade geotécnica.

Palavras-chave: Pilha de estéril; Geotecnia; Polímero.

Evaluation of the geotechnical behavior of mafic rock using polymer for waste rock disposal in an unconventional pile

Abstract

The study aimed to evaluate the geotechnical behavior of the decomposed mafic rock that will be destined for an unconventional waste rock disposal pile (SWD), using a superabsorbent polymer (SAP). The use of the polymer was motivated by the need to improve the transportation of waste rock on conveyor belts, as it reduces the humidity of the material and prevents blockages in the crusher chutes. The PDE is designed to receive a volume of waste rock of 547 Mm³, characterizing it as a large pile requiring special geotechnical analyses, mainly due to the inclusion of components not foreseen in the original project. Comparative studies were carried out with and without the use of polymer in laboratory tests. Geotechnical parameters were evaluated, covering variables such as resistance, cohesion, deformation and poropressure. Initial results indicated that there was no significant increase in strength and minimal change in shear strength and cohesion. However, the interpretation of the tests suggests that the presence of the polymer may result in greater water retention in the interstices of the rock, prolonging the time the water remains in the mafic rock. This phenomenon can lead to saturation in the waste rock pile over time, pointing to possible geotechnical restrictions in the operation of the PDE for the use of the polymer with the mafic rock, since it could affect the drainage issue and consequently bring anomalous conditions for geotechnical stability.

Keywords: Rock pile; Geotechnics; Polymer.

¹Programa de Pós-graduação em Engenharia Geotécnica, Nugeo, Universidade Federal de Ouro Preto, UFOP, Ouro Preto, MG, Brasil.

*Autor correspondente: alisson_engh@yahoo.com.br



1 Introdução

Seja por método de lavra a céu aberto ou subterrânea, a mineração é comumente faseada em: exploração, exploração, desenvolvimento e lavra. É nas duas últimas etapas especificamente no desenvolvimento e na lavra, que se gera o maior volume de estéril composto por material rochoso e/ou solo não beneficiado removido da área de extração, para permitir o acesso ao corpo mineralizado. Este material precisa ser transportado e disposto em pilha de disposição de estéril (PDE), em local previamente designado e levando em consideração uma combinação de fatores econômicos, ambientais, segurança e performance.

O gerenciamento do estoque de estéril requer precauções e medidas preventivas, especialmente relacionadas à sua estabilidade geotécnica e aos potenciais impactos socioambientais. No Brasil, a atividade de disposição de estéril é regulada pela Norma Regulamentadora de Mineração NRM 19 [1], com apoio da norma NBR 13029 [2]. Estas diretrizes fornecem um arcabouço regulatório essencial para garantir a segurança e a sustentabilidade das operações de disposição de estéril no contexto da mineração nacional.

O transporte do estéril da mina para a PDE é tradicionalmente conduzido por caminhões rodoviários e/ou fora de estrada. No entanto, com a crescente adoção de políticas de ESG (*Environmental, Social, and Governance*), que abrangem práticas ambientais, sociais e de governança, têm-se observado melhorias nas operações mineradoras visando uma maior sustentabilidade e geração de valor ao negócio. Estas melhorias incluem a implementação de práticas como: operação autônoma de equipamentos para aumento da segurança; redução de custos por meio da utilização de equipamentos mais eficientes no processo; ações para redução das emissões de carbono [3]. Tais iniciativas estão transformando a forma como as atividades mineiras são planejadas, direcionando-as para uma abordagem mais sustentável e eficiente.

Uma metodologia não convencional adotada em minas de grande porte para o sistema de lavra e disposição de estéril é o uso de correias transportadoras para o transporte tanto do estéril quanto do minério. O princípio operacional desse método envolve a extração do material por meio de equipamentos modulares interligados, os quais utilizam correias transportadoras para o deslocamento do material (Figura 1).

O principal desafio operacional enfrentado pelo sistema de disposição não convencional é o transporte da rocha máfica decomposta em condições úmidas, o que aumenta o risco de entupimento nos chutes do britador. Para contornar essa dificuldade, foi proposta a utilização do polímero superabsorvente (SAP Polyacrylate B-BASF) para auxiliar no manuseio e transporte da rocha máfica através das correias transportadoras até a PDE. A principal função desse polímero é absorver e reter água em quantidades centenas de vezes superiores ao seu próprio peso [4]. No entanto, essa solução levanta a preocupação sobre como a água será liberada da pilha de estéril (Figura 2).

Essa questão ressalta a necessidade premente de estudos geotécnicos específicos para avaliar o comportamento da rocha máfica quando utilizado o polímero em uma pilha de estéril não convencional. Essas investigações são cruciais para compreender como a presença do polímero afeta o comportamento geotécnico do depósito de estéril e para desenvolver estratégias e estudos eficazes para a estabilidade da operação da pilha.

2 Materiais e métodos

Foram coletados 120 kg de rocha máfica decomposta diretamente de uma frente de lavra em maio de 2023, e ensaios de laboratório foram conduzidos em setembro do mesmo ano, com o objetivo de comparar o comportamento geotécnico da rocha máfica decomposta com e sem a



Figura 1. Sistema de operação de lavra contínua para estéril em pilha de disposição de estéril controlada.

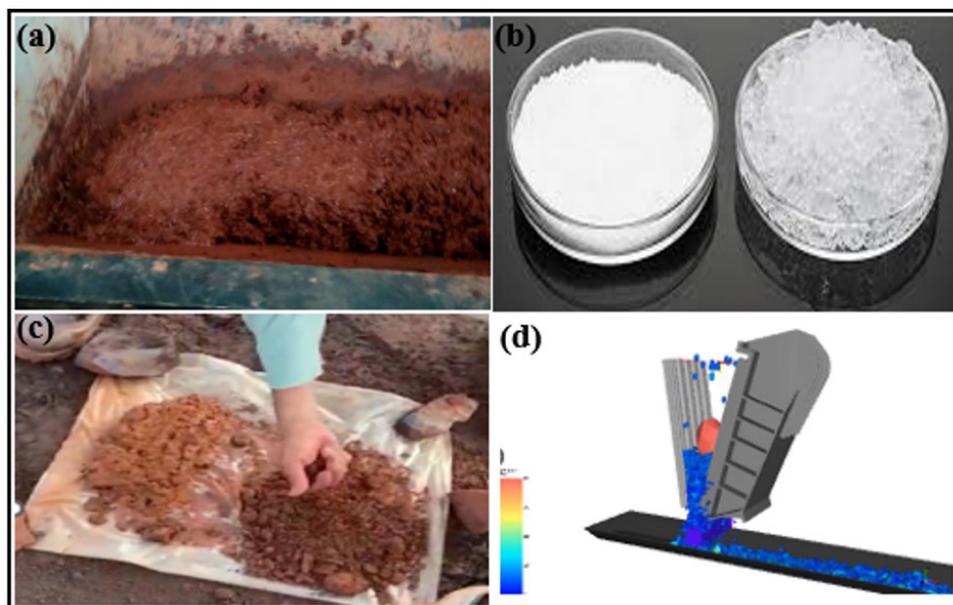


Figura 2. (a) rocha máfica decomposta; (b) polímero super absorvente; (c) mistura da rocha decomposta e polímero super absorvente; (d) entupimento dos chutes do britador devido à rocha máfica decomposta úmida.

utilização de polímero. Em sete ensaios a rocha máfica decomposta apresentou resistência variando de 1 a 3 MPa, sendo classificada como “*weak rock*” de acordo com a escala R1 [5], ou seja, uma rocha muito branda com resistência comparável à do solo.

Para avaliar a máfica decomposta misturada ao SAP, procedeu-se com a compactação das amostras simulando as condições de campo estabelecidas. Quanto à concentração dos polímeros, foi adotada a proporção atualmente empregada nos testes de manuseio já realizados (500g/ton), conforme preconizado pela norma técnica mais recente (Tabela 1).

A primeira fase das amostras esteve centrada na realização dos seguintes tipos considerados de ensaios:

- Simples: massa específica aparente; granulometria completa; umidade; índice de vazios; limite de liquidez; limite de plasticidade (04 corpos de prova);
- Especiais: compactação; adensamento unidimensional; cisalhamento direto; triaxial adensado não drenado com medição de poropressão (04 corpos de prova);

3 Resultados e discussões

Inicialmente, procedeu-se à verificação da caracterização física das amostras por meio de um agitador eletromagnético e peneiramento com malha de abertura de nº 200 [14]. Esse processo resultou na análise das curvas granulométricas típicas e na determinação dos limites de Atterberg (Tabela 2), o que permitiu avaliar o comportamento do material em relação à sua moldabilidade [15]. Para tanto, foram calculados os seguintes índices físicos: Índice de Plasticidade (IP), Índice

de Consistência (IC) e Índice de Liquidez (IL) para os diferentes tipos de amostras (Equações 1-3).

Limites de Atterberg

$$IP = LL - LP \quad (1)$$

$$IC = \frac{LL - h}{LL - LP} \quad (2)$$

$$IC = \frac{h - LP}{LL - LP} \quad (3)$$

em que: *IP*: Índice de Plasticidade; *IC*: Índice de Consistência (%); *IL*: Índice de Liquidez (%); *LP*: Limite de plasticidade; *LL*: Limite de Liquidez; Teor de umidade (%).

A classificação do material foi baseada pelo Sistema Unificado de Classificação de USCS Internacional [14], demonstrando que a amostra sem polímero esteve caracterizada como argila inorgânica de média plasticidade (CL-OL), já a amostra com polímero foi descrita como argila inorgânica de baixa plasticidade (CL-ML) (Figura 3).

O Índice de Consistência (IC) foi calculado conforme a Equação 2 para ambas as amostras (com e sem polímero), em que foi classificado como “mole” ($0 < IC < 0,50$), indicando uma característica do estado plástico em que o material é facilmente moldado pelos dedos.

Para os ensaios triaxiais, procedeu-se à reconstituição das amostras com a umidade correspondente ao Limite de Liquidez (LL), determinado por meio dos ensaios de caracterização e saturação por contrapressão.

A resistência de pico na ruptura em geral para cada corpo de prova, ocorreu até 5% de deformação.

Tabela 1. Principais ensaios realizados

Principais ensaios a serem realizados e sua correspondente norma técnica			
Ensaio	Tipo	Norma técnica	Tipo Norma Técnica
1	Granulometria por peneiramento e sedimentação	ABNT NBR	6502 [6]
2	Massa específica dos grãos	ABNT NBR	6458 [7]
3	Limites de liquidez	ABNT NBR	6459 [8]
4	Limite de plasticidade	ABNT NBR	7180 [9]
5	Teor de umidade natural	ABNT NBR	6457 [10]
8	Ensaio de permeabilidade	ABNT NBR	14545 [11]
9	Ensaio Triaxial CIUSAT	ASTM	D4767 [12]
10	Adensamento Edométrico Unidimensional	ABNT NBR	12007 [13]

Tabela 2. Principais informações da rocha máfica com e sem polímero

Amostra	Descrição Granulométrica	Massa	Umidade	Granulometria (ABNT NBR 6502/1995) (%)					Limites de Atterberg (%)			
		específica dos grãos (G)		#200	Argila	Silte	Areia	Pedregulho	LL	LP	IP	IC
Sem polímero	Silte arenoso, com argila e pedregulho, amarronzado	3,33	14,90	50,20	11,00	39,20	23,00	26,80	49	28	21	48
Com polímero	Areia de granulometria variada, siltosa com pedregulho, amarronzado	4,38	15,90	24,20	2,00	22,40	40,90	34,80	22	11	11	21

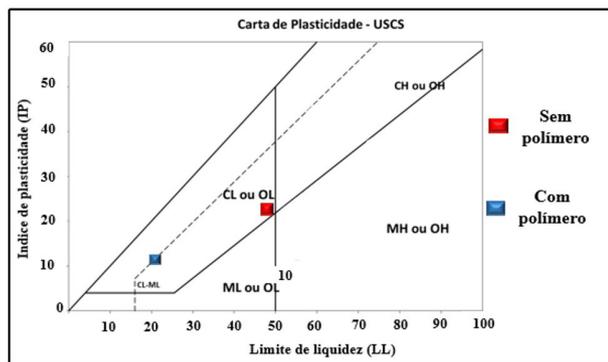


Figura 3. Carta de plasticidade para as amostras de rocha com e sem o polímero.

Para a maior tensão de confinamento de 600 KPa, o comportamento da amostra com o polímero foi menos frágil do que a amostra sem polímero. Após a realização dos ensaios triaxiais, verificou-se que o incremento de resistência com a adição do polímero foi praticamente o mesmo que o observado na amostra sem a utilização do polímero com uma tensão aproximada para ambos os ensaios (Figura 4).

Os resultados obtidos a partir do ensaio de cisalhamento direto revelaram que a adição do polímero não influencia significativamente o comportamento da resistência ao

cisalhamento e à coesão, com uma diferença de aproximadamente 10% observada para ambos os materiais (Figura 5).

O ensaio de adensamento é realizado em um consolidômetro (às vezes de edométrico) revelou que não houve alterações significativas para ambas as amostras. No entanto, observou-se um aumento no tempo de adensamento para a amostra com polímero e uma possível redução na permeabilidade. Como resultado inicial é possível que o tempo necessário para a saída da água do material com polímero seja prolongado, o que pode levar a uma tendência de piora no comportamento do material em resposta a condições de sollicitação não drenada.

É essencial antecipar um efeito geotécnico crucial relacionado às futuras condições de estabilidade que podem surgir devido ao aumento do tempo de residência da água, resultante da utilização do polímero em conjunto com a rocha máfica. Este aspecto merece uma análise cuidadosa, considerando seu potencial impacto na segurança e na performance do sistema de disposição de estéril (Figura 6).

Durante os ensaios de poropressão e deformação axial, foi observado um aumento significativo da poropressão das amostras com polímero durante o cisalhamento em todas as tensões de confinamento 75 KPa, 150 KPa, 300 KPa e 600 KPa (Figura 7). Notavelmente, a poropressão registrada na amostra com uma pressão de confinamento de 600 KPa foi de 260 KPa para a amostra sem polímero e 530 KPa para a amostra com polímero, representando um aumento de 105% para essa variável.

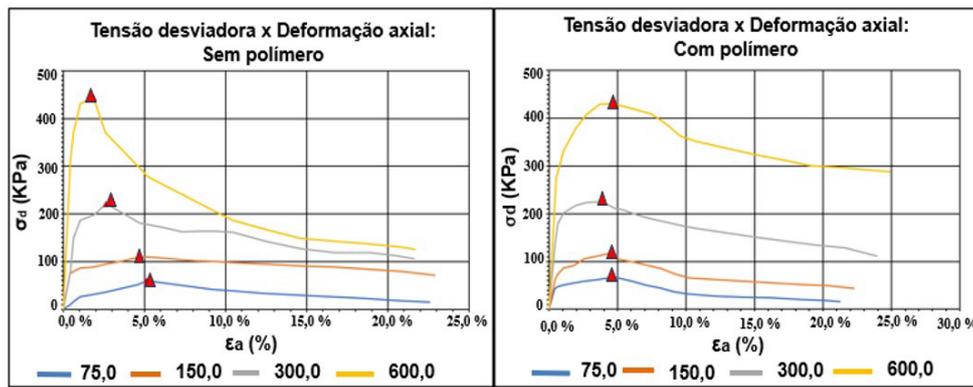


Figura 4. Ensaios triaxiais com a trajetória de tensões efetivas da rocha máfica com e sem polímero.

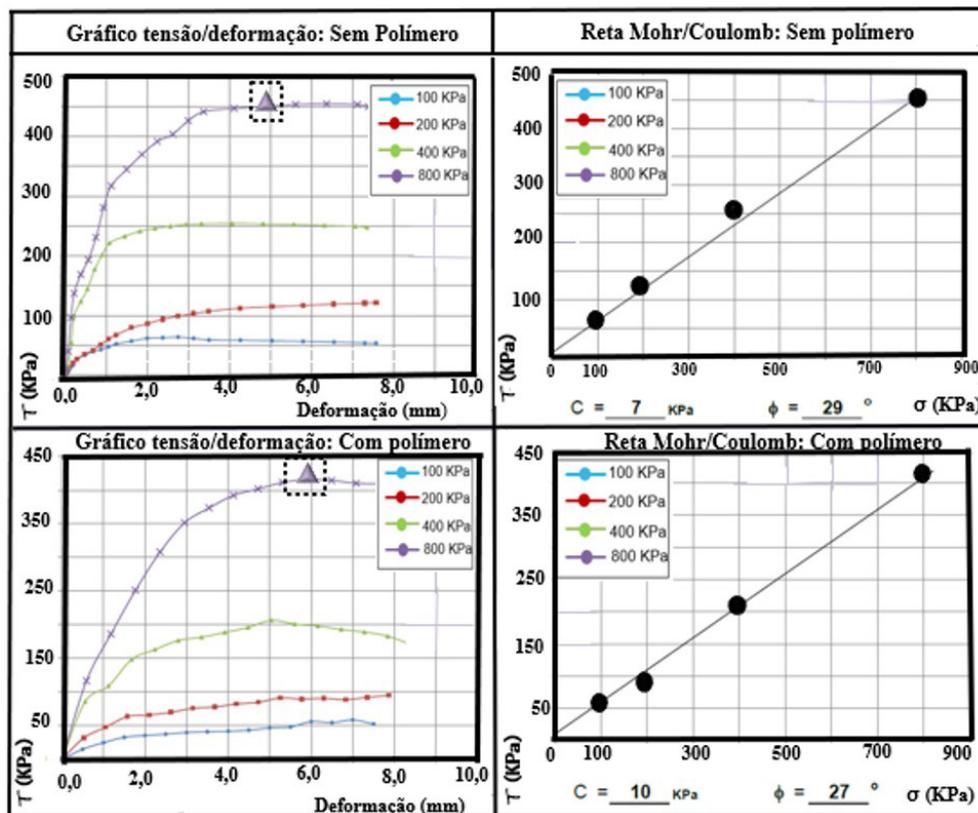


Figura 5. Ensaio de cisalhamento direto para amostra com e sem polímero.

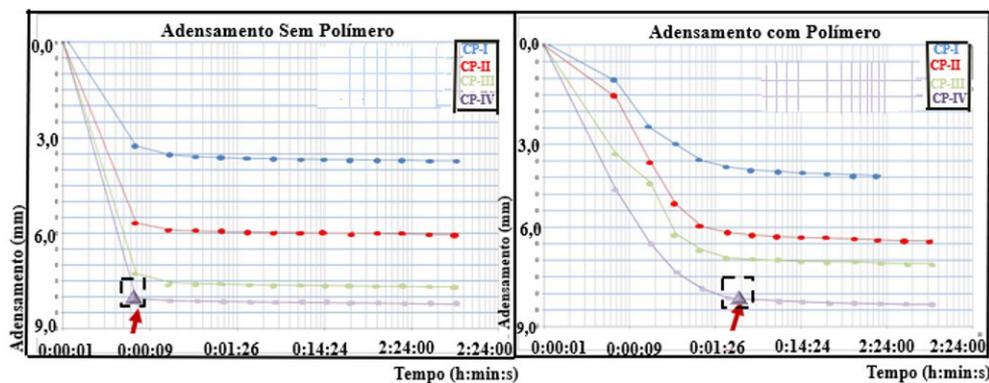


Figura 6. Ensaios de adensamento.

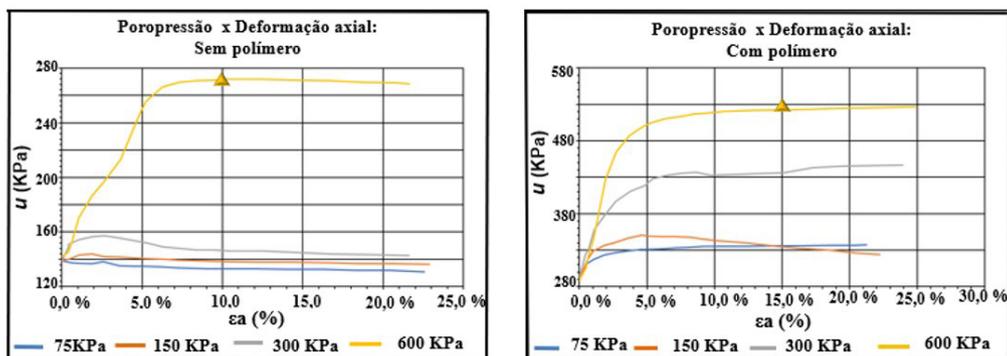


Figura 7. Poropressão \times deformação axial para as amostras de rocha máfica com e sem a utilização de polímero.

4 Conclusões

O estudo investigou, por meio de ensaios de laboratório, o comportamento da rocha máfica decomposta com e sem a presença do polímero, cujo propósito é facilitar as condições de trabalhabilidade durante o transporte e o lançamento de materiais hidratados até a pilha de estéril. Para tal fim, utilizou-se o polímero SAP Polyacrylate B-BASF. Os resultados dos ensaios indicaram que, em ambas as amostras, o índice de consistência (IC) revelou características plásticas da rocha, denotando uma alta compressibilidade e a possibilidade de recalques devido ao adensamento. Ao analisar os resultados do ensaio de cisalhamento, constatou-se que a adição do polímero não promoveu alterações significativas no comportamento do material em relação aos parâmetros de resistência ao cisalhamento e coesão. Em outras palavras, não foi observado um aumento na resistência associado à presença do polímero.

Os ensaios comparativos realizados contribuíram para uma compreensão inicial dos três principais parâmetros envolvidos: resistência, poropressão e adensamento. Observou-se um aumento significativo na poropressão quando o polímero

foi empregado, indicando a necessidade de uma análise mais aprofundada e a realização de ensaios em escala ampliada para confirmar as conclusões iniciais. Outro resultado comparativo foi o adensamento, revelando que possivelmente a permeabilidade com a amostra com polímero tenha diminuído, podendo gerar um pior comportamento geotécnico devido ao maior tempo de residência da água no material.

Durante o ensaio, uma das observações principais diz respeito à poropressão e à deformação das amostras. Notou-se um excesso de poropressão na amostra contendo polímero durante o cisalhamento, em todas as tensões de confinamento (75 KPa, 150 KPa, 300 KPa, 600 KPa) testadas. Esse resultado sugere uma maior compressibilidade do material na amostra com polímero, o que pode levar a recalques no terreno quando comparado com o comportamento da amostra sem polímero. É essencial realizar estudos mais aprofundados sobre essa variável, especialmente considerando sua aplicação prática. Nesse contexto, é recomendado a realização de testes e ensaios específicos para determinar os recalques do terreno através da teoria do adensamento, além de conduzir testes de campo para a disposição controlada do material utilizando o polímero.

Referências

- 1 Agência Nacional de Mineração. NRM 19: disposição de estéril, rejeitos e produtos. Recife: NRM; 2002.
- 2 Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. ABNT NBR 13029: mineração: elaboração e apresentação de projeto de disposição de estéril em pilha. Rio de Janeiro: ABNT; 2017. 7 p.
- 3 Galindo F, Zenkner M, Kim YJ. Fundamentos do ESG: geração de valor para os negócios e para o mundo. 1ª ed. Belo Horizonte: Fórum; 2022. 322 p.
- 4 BASF. Ficha de Informações de Segurança de Produtos Químicos (FISQP). Produto: SAP Polyacrylate B 2023 [Internet]. São Paulo: BASF; 2024. 11 p. [acesso em 13 out. 2023]. Disponível em: https://download.basf.com/p1000000000030720159_SDS
- 5 Castro LM, Carvalho J, Sá G. Discussion on how to classify and estimate strength of weak rock masses. In: Dight PM, editor. Proceedings of the 2013 International Symposium on Slope Stability in Open Pit Mining and Civil Engineering; 2013; Brisbane, Australia. Brisbane: ACG; 2013. p. 205-218.
- 6 Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. ABNT NBR 6502: solos e rochas: terminologia. Rio de Janeiro: ABNT; 2022. 40 p.

- 7 Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. ABNT NBR 6458: grãos de pedregulhos retidos na peneira de abertura de 4,8 mm: determinação da massa específica, da massa aparente e da absorção de água. Rio de Janeiro: ABNT; 2017. 10 p.
- 8 Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. ABNT NBR 6459: solo: determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro: ABNT; 2017. 5 p.
- 9 Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. ABNT NBR 7180: solo: determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro: ABNT; 2016. 3 p.
- 10 Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. ABNT NBR 6457: amostra de solo: preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro: ABNT; 2016. 8 p.
- 11 Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. ABNT NBR 14545: solo: determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos à carga variável. Rio de Janeiro: ABNT; 2016. 16 p.
- 12 American Society for Testing and Materials – ASTM. ASTM D4767-11(2020): standard test method for consolidated undrained triaxial compression test for cohesive soils. West Conshohocken: ASTM; 2020. 6 p.
- 13 Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. ABNT NBR 12007: solo: ensaio de adensamento unidimensional. Rio de Janeiro: ABNT; 2015. 21 p.
- 14 Das BM, Sobhan K. Fundamentos de engenharia geotécnica. 1ª ed. São Paulo: CENGAGE; 2014. 612 p.
- 15 Massad F. Mecânica dos solos experimental. 1ª ed. São Paulo: Oficina de Textos; 2016. 288 p.

Recebido em: 28 Fev. 2024

Aceito em: 26 Maio 2024