

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2024/443

Avaliação da Melhoria de Características Geotécnicas de Rejeitos Para Empilhamento Utilizando Aditivo Polimérico

Michel Moreira Morandini Fontes

Sócio Diretor, Fonntes Geotécnica, Belo Horizonte, Brasil, michel@fonntesgeotecnica.com

Ana Beatriz Silva Paolucci de Paiva

Engenheira Civil, Fonntes Geotécnica, Belo Horizonte, Brasil, ana.paiva@fonntesgeotecnica.com

Andreza Mara dos Santos

Engenheira Química, Fonntes Geotécnica, Belo Horizonte, Brasil, andreza.santos@fonntesgeotecnica.com

Gabriella Melo de Deus Vieira

Engenheira Geotécnica, Fonntes Geotécnica, Belo Horizonte, Brasil, gabriella.vieira@fonntesgeotecnica.com

Mariana Duarte de Oliveira Corrêa

Engenheira Química, Fonntes Geotécnica, Belo Horizonte, Brasil, mariana.correa@fonntesgeotecnica.com

RESUMO: Atualmente, no meio geotécnico, muito tem se desenvolvido a cerca dos processos de empilhamento de rejeitos de mineração, mesmo assim, uma grande dificuldade encontrada pelas mineradoras brasileiras concentra-se no tempo e nos custos advindos do processo de secagem para transporte e disposição dos rejeitos. Visando isso, uma das soluções propostas pela Fonntes Geotécnica é a utilização do produto HPA (High Performance Agglomerate), um aditivo à base de um polímero superabsorvente de substâncias desenvolvido no Japão, como novo material geotécnico atuante na melhoria das condições de trabalhabilidade dos rejeitos de mineração. O produto HPA, ao entrar em contato com o rejeito úmido, capta a água do meio e a mantém em sua estrutura, transformando-a em uma consistência gelatinosa e liberando a água gradativamente. Essa característica, em condições ideais de dosagem, permite uma melhoria significativa da trabalhabilidade do material, o que, conseqüentemente, pode otimizar os processos de mineração, como para a finalidade de empilhamento ou de transporte, e eventuais custos vinculados. Para isso, foram realizados testes de compactação em um rejeito de minério de ferro com diferentes dosagens de HPA (300, 600 e 1000 g/t) e após, foram construídas três pilhas em campo com o mesmo rejeito para fins de comparação, uma com o rejeito virgem e as outras com 200 e 500 g/t de aplicação do produto (valores menores visando o melhor custo-benefício). Dessa forma foi possível constatar um ganho na trabalhabilidade do rejeito com a adição do HPA e os ensaios de compactação mostraram vantagens em termos de aumento de umidade ótima com o aumento da adição do produto e as curvas de compactação se mostraram mais abertas, comprovando que o produto é promissor no ganho de características geotécnicas para a aplicação em pilhas.

PALAVRAS-CHAVE: Pilhas de rejeitos, mineração, polímero superabsorvente, geotecnia.

ABSTRACT: Currently, much has been developed in the geotechnical field regarding the stacking of mining tailings, but a major difficulty faced by Brazilian mining companies is the time and costs involved in the drying process for transporting and disposing of the tailings. With this in mind, one of the solutions proposed by Fonntes Geotécnica is the use of the product HPA (High Performance Agglomerate), an additive based on a substance-absorbing polymer developed in Japan, as a new geotechnical material to improve the workability of mining tailings. The HPA product, when it comes into contact with wet tailings, captures water from the environment and keeps it in its structure, transforming it into a gelatinous consistency and gradually releasing the water. This characteristic, under ideal dosing conditions, allows for a significant improvement in the workability of the material, which can consequently optimize mining processes, such as for the purpose of stacking or transport, and any associated costs. To this end, compaction tests were carried out on iron ore tailings with different dosages of HPA (300, 600 and 1000 g/t) and then three piles were built in the field with the same tailings for comparison purposes, one with the virgin tailings and the others with 200 and 500 g/t of

product application (lower values for the best cost-benefit ratio). The compaction tests showed advantages in terms of the increase in optimum humidity as the product was added, and the compaction curves were more open, proving that the product is promising in terms of gaining geotechnical characteristics for application in piles.

KEYWORDS: Tailings piles, mining, superabsorbent polymer, geotechnics.

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, muito se tem discutido acerca das novas técnicas de disposição dos rejeitos e estéreis advindos dos processos de mineração. Sabe-se que a técnica de empilhamento à seco de rejeitos de mineração (*dry stacking*), que consiste, como o próprio nome indica, no empilhamento de rejeitos compactados, garantindo assim melhores condições em termos de segurança operacional e de estabilidade, ambiental e técnica, é um dos métodos mais promissores em substituição ao método de barramento; contudo, as mineradoras brasileiras ainda enfrentam grandes problemas em seus processos.

A gestão de rejeitos na indústria de mineração enfrenta desafios significativos devido às diversas implicações ambientais, econômicas e de segurança associadas. Os rejeitos, subprodutos do processo de beneficiamento de minérios, variam em consistência - de lama a pasta ou torta - dependendo do teor de sólidos presentes. Essas variações influenciam diretamente as estratégias de disposição, que incluem empilhamento drenado, disposição subaérea, disposição de rejeitos espessados e empilhamento de rejeitos filtrados. No Brasil, especialmente no Quadrilátero Ferrífero, uma região de intensa atividade de mineração de ferro, o empilhamento de rejeitos filtrados tem se destacado como método preferencial.

Essa preferência pelo empilhamento de rejeitos filtrados é fundamentada nos benefícios ambientais e operacionais que oferece. Segundo estudos, como o de Stela et al. (2020), esse método é vantajoso principalmente por recuperar uma grande parte da água utilizada no processo de beneficiamento, permitindo sua reutilização. Isso não apenas reduz a necessidade de captação de novos recursos hídricos, mas também contribui para a redução do impacto ambiental associado ao descarte de efluentes. Além disso, ao condensar os rejeitos a uma forma mais sólida, o empilhamento de rejeitos filtrados diminui significativamente a área necessária para a disposição dos rejeitos, minimizando a necessidade de grandes estruturas de contenção.

Quando o rejeito passa pela filtragem, seja essa a vácuo, sob pressão, centrífuga, hiperbárica ou capilar, o material normalmente ainda possui uma umidade acima da estimada ótima para empilhamento, exigindo assim outros processos para secagem do material até a garantia das condições propícias para o empilhamento, o que conseqüentemente requer custos com a hora da mão de obra e custos com maquinários para revolvimento do material, demanda de grande volume no pátio de empilhamento, levando até interrupção do processo de disposição. Para isso, muitos estudos estão sendo voltados sobre a utilização de materiais para melhoria das condições de secagem/trabalhabilidade dos rejeitos, bem como na melhoria das características geomecânicas desses materiais. Um deles, é a utilização de polímeros como aditivos.

Os polímeros, sejam orgânicos e inorgânicos, estão cada vez mais sendo pesquisados na estabilização de rejeitos de mineração devido a sua ação como elemento coesivo entre os grãos, proporcionando, muitas das vezes, a redução da permeabilidade e aumento da estabilidade dos materiais aos quais são incluídos, ocasionando estruturas mais estáveis e reduzindo problemas como erosão e colapso.

O uso de polímeros no processo de disposição de rejeitos a seco tem sido amplamente estudado, e várias pesquisas destacam sua importância e eficácia nesse contexto. Estudos como o de Huang et al. (2017) demonstraram que a aplicação de polímeros pode melhorar significativamente as propriedades de engenharia dos resíduos sólidos municipais (MSW) e dos sistemas de cobertura de aterros, resultando em uma maior estabilidade e redução da permeabilidade dos rejeitos.

Além disso, o trabalho de Wang e Ng (2015) oferece uma visão abrangente sobre os materiais poliméricos utilizados em sistemas de barreira de aterros, destacando as tendências atuais de pesquisa e suas implicações para o futuro. Essa pesquisa destaca a importância dos polímeros na otimização dos sistemas de deposição de rejeitos a seco.

Estudos específicos, como o de Zhan et al. (2015), têm investigado o comportamento mecânico dos resíduos sólidos tratados com polímeros, fornecendo insights valiosos sobre como esses materiais afetam a estabilidade e manipulabilidade dos rejeitos durante o processo de deposição.

Além disso, pesquisas como a de Abichou et al. (2002) exploraram o uso de biopolímeros para reduzir a produção de lixiviados em aterros, destacando o potencial dos polímeros na gestão da umidade e na minimização dos impactos ambientais associados à disposição de rejeitos.

Levando todas essas questões em consideração, esse artigo possui como objetivo um estudo acerca de aplicação de um polímero superabsorvente de substâncias para melhoria das condições de trabalhabilidade de um rejeito de minério de ferro. Para isso, foram realizados ensaios de compactação em laboratório e em campo, por meio da construção de três pilhas de rejeito experimentais, bem como análises táteis visuais realizadas durante a aplicação do produto.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Rejeito de Minério de Ferro

As análises foram realizadas em um rejeito filtrado de minério de ferro proveniente de um beneficiamento localizado no sudoeste de Minas Gerais. O material de estudo foi coletado após desaguamento feito com uso de filtro prensa com umidade de 19%. Na Figura 1 é possível visualizar o estado do rejeito após filtragem.



Figura 1. Rejeito filtrado de minério de ferro na umidade de campo.

3.2 High Performance Agglomerate (HPA)

O HPA (*High Performance Agglomerate*) é um aditivo à base de um polímero superabsorvente e cinzas vulcânicas japonesas que é capaz de reter, de forma imediata, a água em sua estrutura e, conseqüentemente, promover solidificação e trabalhabilidade aos rejeitos provenientes do processo de filtragem na mineração.

O processo de liberação da água absorvida pelo polímero é lento, portanto, reduz a chance de que ocorram retrações nos materiais aditivados. Nas Figura 2 e Figura 3 estão ilustrados, respectivamente, o comportamento do HPA anterior e posterior à adição de água a sua estrutura.



Figura 2. HPA antes da adição de água.



Figura 3. HPA após a adição de água.

3.3 Estudo de Dosagem

O estudo consistiu em realizar primeiramente análises em escala laboratorial, para definir as dosagens que foram utilizadas no preparo de amostras no campo, em maior escala. A avaliação em ambos os ambientes teve como intuito observar o impacto de ambientes não controlados na reação do HPA no rejeito.

3.3.1 Amostras preparadas em laboratório

Como primeira fase dos testes, foram executados quatro ensaios de Compactação Proctor Normal, conforme a NBR 7182 (2020). Neste ensaio, variou-se a dosagem do HPA em relação a massa de rejeito utilizada para o ensaio. A Tabela 1 contempla a relação das amostras com a dosagem de polímero adicionada em laboratório.

Tabela 1. Amostras preparadas em laboratório.

Amostra	Dosagem de HPA (g/t)
Amostra 1	0
Amostra 2	300
Amostra 3	600
Amostra 4	1000

Por meio dos resultados de densidade máxima e umidade ótima das amostras testadas, foram definidas as dosagens a serem utilizadas na pilha teste, em campo.

3.3.2 Amostras coletadas da pilha teste

O teste consistiu em criar três pilhas que tinham, cada uma, dimensões próximas a 10 metros de extensão, 3 metros de largura e altura compactada de 0,3 metros, como apresentado na Figura 4.

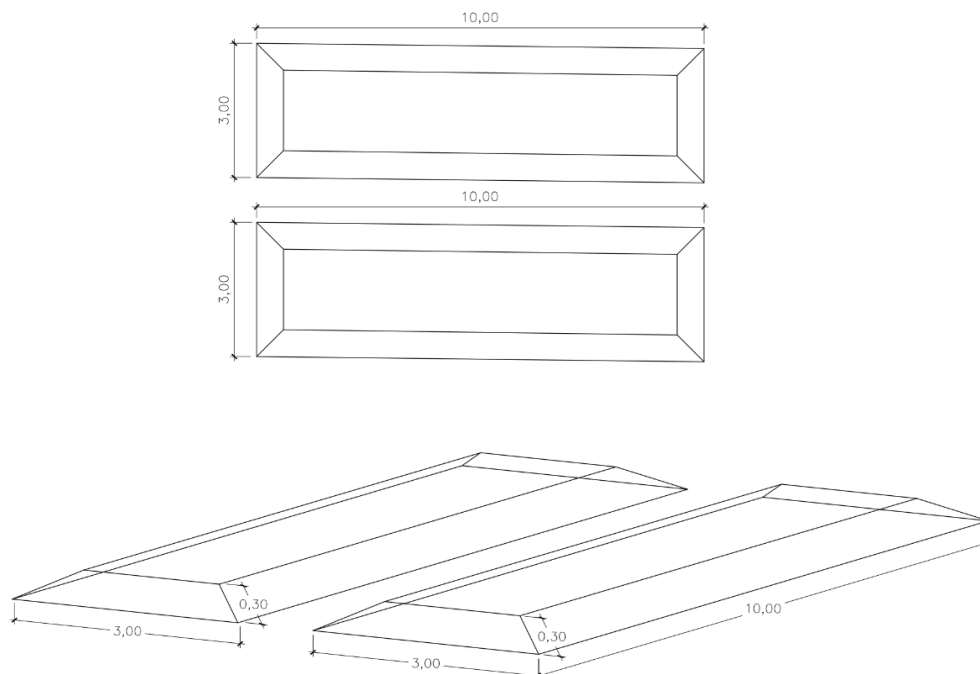


Figura 4. Planta das pilhas.

A primeira pilha, como forma de parâmetro de comparação, foi feita com rejeito virgem, nas seguintes foram adicionadas as dosagens de 200g/t e 500g/t, tais dosagens foram definidas pela faixa determinada nas compactações feitas anteriormente em laboratório.

A construção da pilha consistiu, primeiramente, na disposição do rejeito na área e adição do produto nas quantidades relativas a cada empilhamento. Para garantir homogeneização efetiva, utilizou-se o arado agrícola pela extensão das pilhas. Após a distribuição e homogeneização do rejeito, realizou-se 3 feixes (6 passadas) do rolo compactador pé de carneiro com o intuito de compactar o rejeito disposto. Nas Figura 5, 6 e 7 estão ilustrados, respectivamente, o rejeito sem adição de HPA, com 200g/t de HPA e com 500g/t após a compactação.



Figura 5. Rejeito sem adição de HPA pós compactação.



Figura 6. Rejeito com 200g/t pós compactação.



Figura 7. Rejeito com 500g/t pós compactação.

3.3.3 Ensaios de caracterização

Para a caracterização das amostras de rejeito e de rejeito com HPA, foram realizados, inicialmente, análises mineralógicas desses materiais, após, ensaios de caracterização como: Massa específica real dos grãos, granulometria, limites de Atterberg e compactação. Esses ensaios foram realizados utilizando-se as amostras indeformadas das três pilhas coletadas em campo. A identificação das amostras coletadas está resumida na Tabela 2.

Tabela 2. Amostras dos testes de campo.

Amostra	Dosagem de HPA (g/t)
Amostra 5	0
Amostra 6	200
Amostra 7	500

Os ensaios, bem como as respectivas metodologias utilizadas, foram:

- Teor de umidade – NBR 6457 (ABNT, 2024);
- Análises mineralógicas – Difração de raios-x (DRX) – técnica do pó em equipamento Shimadzu/LabX6000 do ISIPM;
- Massa específica real dos grãos – NBR 6458 (ABNT, 2017);
- Granulometria – NBR 7181 (ABNT, 2016);
- Limite de Liquidez – NBR 6459 (ABNT, 2016);
- Limite de Plasticidade – NBR 7180 (ABNT, 2016);
- Compactação Proctor Normal – NBR 7182 (ABNT, 1986).

No caso das análises mineralógicas, a fim de se detectar os minerais presentes na amostra de rejeito com o polímero, foi necessário utilizar de Silício metálico.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Conforme explicitado no item 3, inicialmente, foram realizadas análises mineralógicas dos materiais utilizados na pesquisa. Os resultados obtidos das análises mineralógicas podem ser observados na Tabela 3.

Tabela 3. Resultados das análises mineralógicas.

Amostra De Rejeito	Caulinita	Gibbsita	Goethita	Hematita	Quartzo	Sílica Metálica
Virgem Filtrado	2,70%	0,60%	16,00%	21,60%	59,00%	-
Virgem Filtrado com 1000 g/t de HPA	1,40%	0,80%	16,20%	21,40%	-	60,10%

Após isso, foram realizados os ensaios geotécnicos de caracterização. As primeiras análises realizadas foram quanto à massa específica real dos grãos das amostras de rejeito e de rejeito com polímero. A Tabela 4 revela os valores encontrados.

Tabela 4. Resultados dos ensaios de massa específica real dos grãos.

Amostra De Rejeito	Massa Esp.Real dos Grãos (g/cm ³)
Virgem Filtrado (AMOSTRA 5)	3,374
Tratada Filtrada com 200 g/t de HPA (AMOSTRA 6)	3,235
Tratada Filtrada com 500 g/t de HPA (AMOSTRA 7)	3,234

Em relação aos ensaios granulométricos, pode-se observar os resultados dos ensaios por meio da Figura 8 e da Tabela 5.

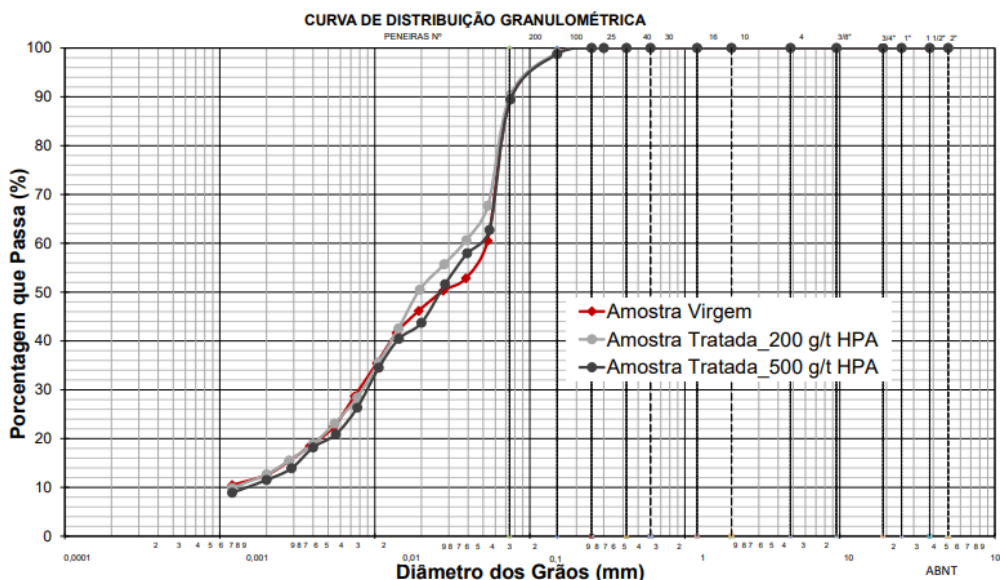


Figura 8. Curvas granulométricas das amostras de rejeito e de rejeito com polímero.

Tabela 5. Resultados dos ensaios de granulometria.

Amostra	Composição Granulométrica (%)						Classificação
	Argila	Silte	Areia			Pedregulho	
			Fina	Média	Grossa		
Virgem Filtrado (AMOSTRA 5)	12,6	56,7	30,1	0,5	0,0	0,0	Silte Arenoso
Tratada Filtrada com 200 g/t de HPA (AMOSTRA 6)	12,6	61,9	25,1	0,5	0,0	0,0	Silte Arenoso
Tratada Filtrada com 500 g/t de HPA (AMOSTRA 7)	11,4	58,2	29,8	0,6	0,0	0,0	Silte Arenoso

Também foram realizados ensaios para determinação dos limites de Atterberg, que em todas as amostras (tanto de rejeito bruto quanto de rejeito tratado com 200 e 500 g/t de HPA) se notou um comportamento não plástico.

Percebe-se, então, que em todos os ensaios acima citados, as alterações encontradas entre os resultados das amostras de rejeito bruto e de rejeito tratado com HPA foram ínfimos, ou seja, a adição do produto nas dosagens de 200, 500 e 1000 g/t, nesses casos, não alteraram significativamente nas características físicas do rejeito.

A seguir, foram realizados ensaios de compactação em laboratório e campo. Cabe ressaltar que a amostra virgem ensaiada foi obtida da coleta após o filtro prensa e que no caso das amostras tratadas com HPA, foram adicionadas 300 g/t, 600 g/t e 1000 g/t de HPA nas amostras da mesma amostra virgem. Os resultados podem ser observados por meio da Figura 9 e da Tabela 3.

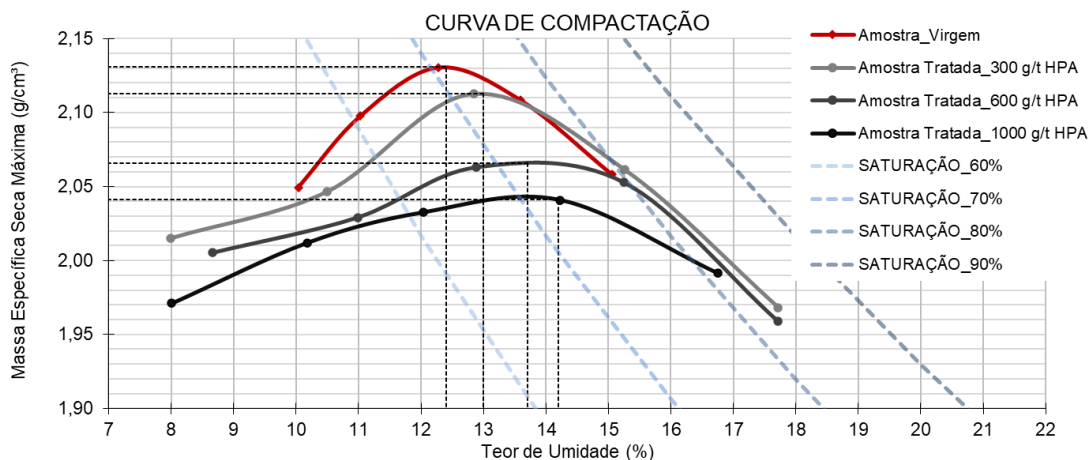


Figura 9. Curva de compactação das amostras laboratoriais.

Tabela 3. Resultados dos ensaios de compactação laboratoriais.

Amostra De Rejeito	Umidade Ótima (%)	Massa Esp. Seca Máx. (g/cm³)
Virgem Filtrado (AMOSTRA 1)	12,40	2,131
Virgem com adição de 300 g/t de HPA (AMOSTRA 2)	13,00	2,113
Virgem com adição de 600 g/t de HPA (AMOSTRA 3)	13,70	2,066
Virgem com adição de 1000 g/t de HPA (AMOSTRA 4)	14,20	2,041

Foi possível observar uma tendência de redução da massa específica seca máxima e de aumento da umidade ótima com o aumento no teor de produto adicionado ao rejeito. A redução da massa específica seca máxima pode ser explicada pela adição de um produto mais leve (massa real dos grãos de aproximadamente

0,8 g/cm³) à massa de rejeito. Já o aumento na umidade ótima pode estar associado ao comportamento do polímero superabsorvente, em que este aprisiona a água em sua estrutura. O aumento na umidade ótima é benéfico para o processo de filtração uma vez que é necessário menos tempo de secar ao ar e/ou tecnologias para alcançar uma umidade menor, bem como menor espaço para disposição no pátio de empilhamento e, conseqüentemente, menos interrupções nesse processo. Também, as curvas das amostras tratadas apresentaram curvatura mais aberta, dessa forma, tem-se uma faixa maior de teor de umidade com menor variação na massa específica seca máxima, o que em campo é muito benéfico devido ao controle das condições de compactação.

Os resultados obtidos de compactação das amostras coletadas das pilhas podem ser observados por meio da Figura 9 e da Tabela 4 a seguir.

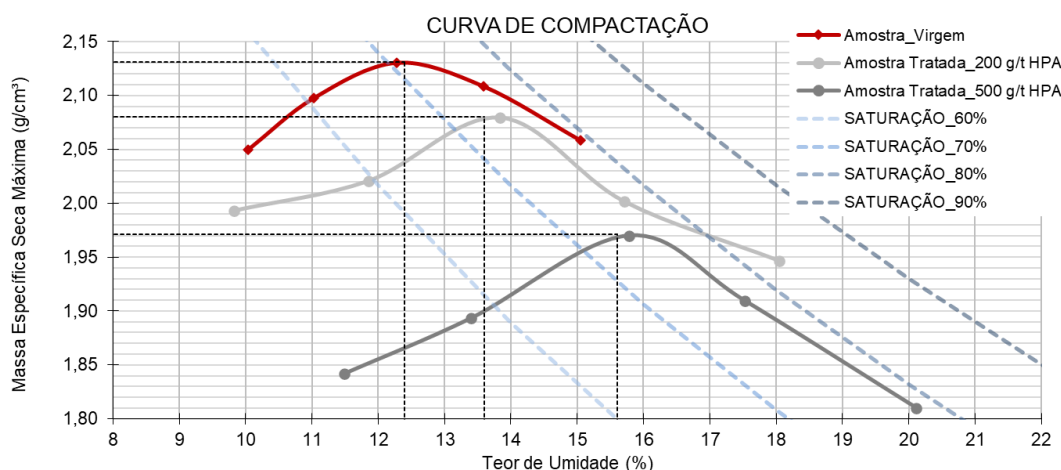


Figura 10. Curva de compactação das amostras de campo.

Tabela 4. Resultados dos ensaios de compactação das amostras de campo.

Amostra De Rejeito	Umidade Ótima (%)	Massa Esp. Seca Máx. (g/cm ³)
Virgem Filtrado (AMOSTRA 5)	12,40	2,131
Tratada Filtrada com 200 g/t de HPA (AMOSTRA 6)	13,60	2,080
Tratada Filtrada com 500 g/t de HPA (AMOSTRA 7)	15,60	1,971

Os resultados das amostras de campo apenas confirmaram o comportamento dos materiais, viu-se novamente um aumento nos teores de umidade e redução da massa específica seca máxima para o caso das amostras tratadas, o que indica, um aumento do volume da pilha quando da adição do produto, o que pode demandar um maior espaço de disposição da pilha. Essa questão deve ser avaliada de forma técnica e econômica de acordo com os ganhos dos processos integrados, visto que a aplicação do produto elimina a necessidade de etapas convencionais, como a secagem ao ar e o revolvimento mecânico. Essa maior redução da massa específica seca máxima também pode estar associada a ação do produto sob condições ambientes (mudanças em sua estrutura devido a ação direta do sol, por exemplo, o que pode afetar em sua capacidade de absorção), mesmo assim, os resultados se mostraram promissores para que uma nova campanha, com ensaios geotécnicos mais complexos, seja realizada. Também foi realizada uma análise tátil visual das pilhas em campo e conforme visto no item 3.1.2., a diferença foi praticamente instantânea (após aplicação do produto, homogeneização e compactação), cujas pilhas com produto apresentaram aspecto seco.

5 CONCLUSÕES

A integração de polímeros superabsorventes no processo de empilhamento de rejeitos filtrados de mineração representa uma inovação significativa com potencial para revolucionar as práticas de gestão de resíduos na indústria. A capacidade desses polímeros de absorver grandes quantidades de água e incorporá-la em sua estrutura molecular modifica radicalmente o manuseio e a disposição dos rejeitos de mineração, oferecendo um método mais eficiente e ambientalmente sustentável. Ao eliminar a necessidade de etapas convencionais, como a secagem ao ar e o revolvimento mecânico, não apenas simplifica o processo, mas também resulta em economias consideráveis de tempo e custos operacionais. Essa abordagem promove uma gestão de rejeitos mais ágil e menos dependente de recursos, alinhando-se com as diretrizes atuais de sustentabilidade e eficiência que direcionam a indústria mineira.

No entanto, é crucial reconhecer que a aplicação de polímeros superabsorventes não é uma solução universal e requer adaptação e estudos detalhados para cada cenário específico. As dosagens ideais e o impacto no comportamento geomecânico dos rejeitos variam conforme o tipo de material e as condições locais. Portanto, a implementação bem-sucedida dessa tecnologia demanda uma investigação minuciosa, incluindo testes em diferentes condições e análises personalizadas para cada projeto de empilhamento. Dessa forma, enquanto a adição de polímeros superabsorventes apresenta uma perspectiva promissora para a melhoria da gestão de rejeitos de mineração, seu sucesso depende do comprometimento com uma abordagem metódica, baseada em pesquisa e adaptação às necessidades específicas de cada aplicação.

Ainda neste contexto, vê-se que a aplicação de um polímero superabsorvente auxilia de forma substancial no processo de empilhamento de rejeitos filtrados de mineração. Cabe ressaltar que outros estudos envolvendo esse polímero apontam que com dosagens baixas, como as utilizadas nas aplicações deste artigo (200 a 1000 g/t), não afetam significativamente nas características geomecânicas do rejeito, sendo assim, o produto pode atuar no ganho de trabalhabilidade sem causar prejuízos à estabilidade do material, mas para cada tipo de rejeito, aplicação e projeto de pilha, deverão ser estudados com um maior nível de detalhe.

AGRADECIMENTOS

Agradecimento a toda a equipe da Fontes Geotécnica, em especial a de Pesquisa, Inovação e Desenvolvimento, à todas as equipes dos laboratórios CI&ALab e CIT, bem como a parceria com todos os clientes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abichou, T., Barlaz, M. A., Foose, G. J., & Thurner, R. L. (2002). Application of a biopolymer to reduce leachate production in landfills. *Environmental Science & Technology*, 36(17), 3721-3728.
- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas (2024). NBR 6457: *Solo – Preparação de amostras para ensaios de compactação, caracterização e determinação do teor de umidade*.
- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016). NBR 6458: *Versão Corrigida 2:2017 – Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm - Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água*.
- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas (2018). NBR 7181: *Solo – Análise granulométrica*.
- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016). NBR 6459: *Solo – Determinação do limite de liquidez*.
- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016). NBR 7180: *Solo – Determinação do limite de plasticidade*.
- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2020). NBR 7182: *Solo – Ensaio de Compactação*. Rio de Janeiro.

- Cossu, R., & Lai, T. (2018). Polymeric materials for waste containment. In *Geomembranes* (pp. 73-119). Springer, Cham.
- Huang, Q., Zhang, W., Xue, Q., & Gersberg, R. M. (2017). Effect of polymer application on the engineering properties of municipal solid waste (MSW) and landfill cover systems. *Waste Management*, 59, 414-422.
- Stela, L. H.; Duarte, J. C. & Pereira, C. O. (2020). Métodos De Disposição Dos Rejeitos De Minério De Ferro Alternativos Ao Método De Barragens: Uma Revisão Revista Brasileira de Processos Químicos, 1(1) p. 34-45. Disponível em: <<https://www.fateccampinas.com.br/rbpq/index.php/rbpq/article/view/8>>. Acesso em: 18 mar 2024.
- Wang, L., & Ng, C. W. W. (2015). Polymeric materials in waste landfill barrier systems: Current research and future trends. *Waste Management*, 45, 171-185.
- Zhan, L. T., Feng, S. J., & Wang, Y. H. (2015). Mechanical behavior of polymer-treated municipal solid waste. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 27(9), 04014219.