

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2024/442

Aterros Experimentais de Rejeitos Filtrados com Diferentes Proporções de Arenosos e Finos

Matheus Hermont Pedrosa

Engenheiro Geotécnico, Samarco, Ouro Preto - MG, Brasil, matheushermont@gmail.com

Wanderson Silverio Silva

Engenheiro Especialista Geotecnia, Samarco, Mariana – MG, Brasil, wanderson.silverio.silva@gmail.com

Juliano Fagner Santana

Engenheiro Geotécnico, Samarco, Ouro Preto - MG, Brasil, juliano.fagner@hotmail.com

RESUMO: O processo de beneficiamento do minério de ferro geram rejeitos arenosos, provenientes da flotação, e rejeitos finos, resultantes da deslamagem. Os rejeitos finos são transportados em polpa para cavas ou barragens, enquanto os arenosos passam por filtragem e são dispostos em pilhas. Contudo, a disposição de rejeitos em barragem tornou-se problemática devido às recentes rupturas de estruturas de contenção de rejeitos em Minas Gerais e no mundo. Além disso, a disposição da lama (rejeitos finos) em cavas, apesar de segura, tem vida útil limitada e implica custos de remoção pós-fechamento. Portanto, este estudo visa analisar o comportamento de misturas filtradas de rejeitos arenosos e lama em aterros experimentais com o objetivo de desenvolver diretrizes para a construção de empilhamentos de rejeitos filtrados de forma segura e sustentável. Realizaram-se seis testes variando as proporções de mistura arenoso/lama (95/5, 93/7, 90/10 e 92/8), espessuras de camadas, energias e umidades de compactação. O controle tecnológico abrangeu ensaios de densidade aparente in situ, densidade dos grãos, compactação pelo método de Hilf e Proctor Normal, determinação de umidade e granulometria. Os resultados permitiram avaliar a trabalhabilidade, trafegabilidade, grau de compactação e índices de vazios das camadas. Conclui-se que as misturas apresentam potencial para disposição em empilhamentos de rejeitos filtrados, com destaque para a mistura 95/5. Os resultados servirão de base para futuros projetos de disposição de rejeitos filtrados, contribuindo para práticas mais sustentáveis no manejo dos rejeitos da mineração.

PALAVRAS-CHAVE: Disposição de rejeitos, Mistura de rejeitos, Rejeitos filtrados, Aterro experimental, Rejeitos de mineração, Dry stacking, Empilhamento de rejeitos filtrados.

ABSTRACT: The iron ore processes studied in this article generate sandy tailings from flotation and fine tailings from desliming. The slimes (fine tailings) are transported as slurry to pits or dams, while the sandy tailings undergo filtration and are disposed of in piles. However, the disposal of slurry tailings inside dams has become problematic due to recent tailings storage facilities breaches in Minas Gerais and in the world. Moreover, the disposal of slimes in pits, although safe, has a limited lifespan and entails post-closure removal costs. Therefore, this study examines the behavior of filtered mixtures of sandy tailings and slimes from iron ore beneficiation in experimental landfills. The goal is to develop safe and sustainable guidelines for the construction of filtered tailings facilities. Six tests were conducted, varying the sandy/slime mixture proportions (95/5, 93/7, 90/10, and 92/8), layer thicknesses, compaction energies, and moisture contents. The technological control included the tests of apparent density, specific gravity, Hilf and Proctor compaction methods, moisture content determination, and particle size distribution. The results allowed the assessment of workability, trafficability, compaction degrees, moisture content and void ratio. Tailings mixtures were found to be potentially successful in filtered tailings facilities, especially with the 95/5 mixture. The findings will serve as a basis for future projects for the filtered tailings disposal, contributing to safer and more sustainable practices in tailings management.

KEYWORDS: Tailings disposal, Tailings mixture, Filtered tailings, Experimental landfill, Mining tailings, Dry stacking, Filtered tailings facilities (FTF),.

1 INTRODUÇÃO

A gestão de rejeitos provenientes da mineração é um desafio significativo para a indústria, o meio ambiente e a geotecnia de rejeitos. Tradicionalmente, os rejeitos de processos de beneficiamento de minério de ferro são dispostos em barragens. No entanto, essa metodologia, que requer extensos recursos hídricos, tornou-se problemática devido aos riscos associados às falhas de barragens, como evidenciado pelo colapso da barragem em Brumadinho, Brasil, em 2019.

A disposição de rejeitos filtrados em pilhas surge como uma alternativa mais segura e sustentável. Segundo Pedrosa (2019), essa abordagem envolve a deposição de rejeitos filtrados em áreas designadas, onde são compactados e cobertos para controle de erosão e infiltração de água. Embora esse método seja considerado mais seguro, ele requer mais espaço e pode ter custos operacionais mais elevados.

A disposição em pilhas de rejeitos filtrados ganha destaque, como ressaltado por Ulrich e Coffin (2013), que enfatizam a necessidade de ensaios *in situ* para avaliar a quebra de partículas e suas consequências na permeabilidade e comportamento das pilhas. O empilhamento drenado, uma técnica utilizada principalmente para rejeitos arenosos, visa à obtenção de um maciço estável e não saturado, minimizando os riscos de ruptura (Oliveira-Filho, 2017; Pimenta, 2011 apud Portes, 2013).

Neste contexto, a disposição de misturas de rejeitos arenosos e lama surge como uma alternativa promissora para superar os desafios tradicionais da gestão de rejeitos na mineração. Esta metodologia oferece o potencial de mitigar impactos ambientais adversos e contribui para um melhor entendimento das propriedades geotécnicas das misturas, que são cruciais para o desenvolvimento de técnicas mais eficientes e seguras de disposição de rejeitos.

Portanto, o objetivo desta pesquisa é investigar a utilização de diferentes proporções de misturas de rejeito arenoso e lama em aterros experimentais, buscando aprofundar o entendimento das propriedades geotécnicas dessas misturas e avaliar sua aplicabilidade para a disposição de rejeitos de mineração.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Foram realizados 6 testes com diferentes misturas. Nos três primeiros com 95% de rejeito arenoso e 5% de lama, 93/07 para o quarto teste, 90/10 para o quinto e 92/08 para o sexto. A Tabela 1 abaixo mostra a ordem dos testes suas datas e proporções nominais de arenoso e lama respectivamente.

Tabela 1 - Datas e proporções nominais dos 6 testes realizados.

PROPORÇÕES PRODUZIDAS (Referências Nominais)					
95/05		93/07	90/10	92/08	
14/11/23	20/11/23	28/11/23	05/12/23	13/12/23	19/12/23

O estudo seguiu o fluxograma de processos indicado na Figura 1.

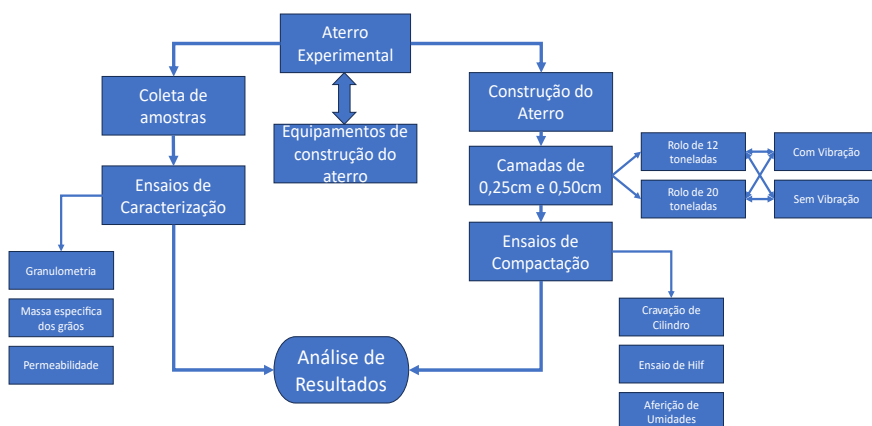


Figura 1 - Fluxograma de construção, ensaios e análises do Aterro Experimental

2.1 Materiais

Os materiais analisados neste estudo são provenientes do processo de beneficiamento de minério de ferro, diferenciados pelo método de processamento. O rejeito fino, ou lama, origina-se do processo de deslamagem, enquanto o rejeito arenoso é resultado do processo de flotação. Os dois rejeitos foram submetidos a mistura, nas proporções pretendidas, em tanque de homogeneização e posteriormente submetidos ao processo de filtragem de discos a vácuo. Toda mistura de rejeito filtrada foi disponibilizada em pilha cônica.

O rejeito arenoso é caracterizado como silte-arenoso com densidade média de grãos de aproximadamente $2,75\text{g/cm}^3$, teores de ferro entre 8% e 12%, e percentual de sílica acima de 80%. Por outro lado, a lama é definida como silte argiloso com densidade média dos grãos em torno de $3,84\text{g/cm}^3$ e teores de ferro variando entre 48% e 52%.

2.2 Métodos

A mistura de rejeito pós filtragem foi distribuída nas praças designadas para disposição, sendo dispostas em estratos sobrepostos ou não, de espessuras de 0,25 metros. Subsequentemente, procedeu-se à obtenção da umidade de cada camada lançada para verificar se a umidade estava dentro da faixa especificada para o teste, etapa crucial para o processo subsequente de compactação. Após a compactação, as camadas foram submetidas a uma série de ensaios geotécnicos. Estes ensaios foram realizados em estrita aderência às normas e especificações técnicas, garantindo assim a adequação e a segurança do método de disposição empregado. Os ensaios foram conduzidos com amostras coletadas e transportadas ao laboratório geotécnico de campo, seguindo os seguintes procedimentos da ABNT:

- Preparação para ensaios de compactação e de caracterização - NBR 6457/2016;
- Determinação do limite de liquidez - NBR 6459/2013;
- Determinação do limite de plasticidade - NBR 7180/2020;
- Ensaio de compactação - NBR 7182/2016;
- Análise Granulométrica – NBR 7181/2020.

Adotou-se normativas para solos, devido à ausência de normas específicas para rejeitos de mineração.

2.3 Equipamentos

A realização de um ensaio em escala industrial que emulasse com elevada fidelidade as condições operacionais foi imperativa. Portanto, implementou-se o uso de equipamentos habitualmente empregados em grandes obras de terraplanagens. Esta abordagem assegura a replicação do ambiente operacional durante a fase de testes. Abaixo segue um resumo dos principais equipamentos utilizados no estudo:

- Motoniveladora Cat 140h;
- Rolo compactador Dynapac CA250D 12 toneladas - Liso LP120;
- Trator de esteira D6 TR-29;
- Trator de pneus 180CV com grau TP-006 (16 discos de 32");
- Caminhão basculante com capacidade 33 toneladas;
- Pá carregadeira Cat 924;
- Caminhões pipas de com capacidade de 20 mil litros.

2.3 Sequência Construtiva

O material foi transportado para as áreas de disposição previamente estabelecidas, onde ocorreu o lançamento e o nivelamento do rejeito em 5 praças com dimensões de 50 metros por 80 metros cada, cada

praça foi subdividida em duas (A e B) sendo uma para testes com rolo compactador com vibração e outra sem vibração, seguindo a seguinte sequência:

- **Monitoramento da Umidade:** Realizou-se a coleta sistemática de material da pilha cônica, com intervalos regulares, a fim de determinar a umidade inicial do rejeito;
- **Transporte e Disposição:** O material foi transportado para as áreas de disposição previamente estabelecidas, onde ocorreu o lançamento e o nivelamento do rejeito, seguindo as especificações do projeto;
- **Verificação Topográfica:** Procedeu-se com a conferência topográfica para assegurar a precisão da espessura das camadas de rejeito dispostas;
- **Aferição de Umidade Pós-Disposição:** Após o espalhamento, realizou-se uma nova coleta de material para determinar a umidade através do método de colchão de areia e também na estufa para confirmação;
- **Correção de umidade:** Quando necessário, procedeu-se à umectação do material disposto ou o gradeamento com trator agrícola, ajustando a umidade dentro do intervalo desejado, com o objetivo de alcançar as condições para a compactação definidas para o teste;
- **Compactação:** A compactação foi efetuada aplicando-se um número variável de passadas do rolo compactador, com e sem vibração, a depender da energia necessária para se atingir o grau de compactação mínimo especificado para o teste;
- **Coleta para Caracterização:** Amostras foram coletadas do material compactado para uma caracterização completa, incluindo análises granulométricas e físico-químicas.
- **Ensaio de Compactação Método Hilf:** Por fim, realizou-se o ensaio de compactação seguindo o método de Hilf para avaliar a densidade e a estabilidade do rejeito compactado. As camadas, de espessura de 0,50m foram ensaiadas no topo e na base.

3 RESULTADOS

A filtragem das misturas de rejeito ocorreu em seis dias distintos, com os três primeiros testes dedicados à mistura de 95% de rejeitos arenosos e 5% de lama (95/05) e nos outros três dias, às misturas 93/07, 90/10 e 92/08.

A umidade resultante do processo de filtragem foi rigorosamente monitorada, com determinação realizada para determinar tanto a umidade de processo quanto a umidade geotécnica. A umidade do processo é calculada como a massa de água dividida pela massa total da mistura (solo mais água), enquanto a umidade geotécnica é calculada como a massa de água dividida pela massa do solo seco. A Tabela 2 resume as médias das umidades observadas para cada mistura testada.

Tabela 2 - Tabela de umidades de saída do Filtro Fonte: Samarco

Data	Mistura	Umidade de processo (%)	Umidade Geotécnica (%)
14/11/23	95/05	13,0	14,9
20/11/23	95/05	13,3	15,3
28/11/23	95/05	13,4	15,5
05/12/23	93/07	12,3	14,0
13/12/23	90/10	12,7	14,6
19/12/23	92/08	11,9	13,5

3.1 Granulometria e Massa Específica dos Grãos

Os resultados dos ensaios granulométricos realizados nas amostras estão ilustrados na Figura 2. A análise granulométrica é crucial para compreender a distribuição do tamanho das partículas e seu impacto potencial nas propriedades físicas e mecânicas do material compactado. As curvas granulométricas obtidas

indicam que o percentual passante na peneira de 10 micrômetros varia entre 10% e 15% para a mistura 95/5 e entre 12% e 18% para as misturas 93/7, 90/10 e 92/8. Estes resultados são representativos das características de finura do rejeito arenoso após a adição da lama, refletindo uma distribuição de tamanho de partículas que pode influenciar a densidade, permeabilidade e resistência mecânica dos aterros compactados.

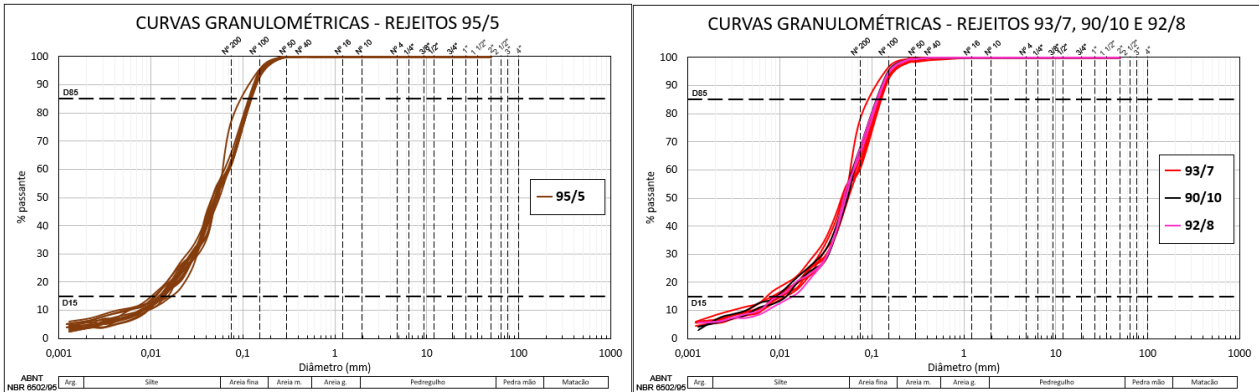


Figura 2: Curvas granulométricas dos testes com as misturas de arenoso/lama.

A massa específica dos grãos das misturas variou entre 2,8 e 2,9g/cm³, sem muita discrepância entre as misturas 95/5 até 90/10.

3.2 Curvas de Compactação do Proctor Normal

As curvas de compactação Proctor Normal são fundamentais para determinar as especificações para a compactação dos aterros. Para a mistura 95/5, os resultados mostraram uma massa específica seca máxima média de 1,765g/cm³ e uma umidade ótima média de 15,7%.

As misturas 90/10, 92/08 e 93/07, exibiram comportamentos variados. A mistura 92/08 atingiu uma massa específica seca máxima média de 1,850g/cm³ e uma umidade ótima média de 13,0%. Já a mistura 93/07 apresentou uma massa específica seca máxima média semelhante à 95/5, de 1,76g/cm³, com uma umidade ótima média de 15,3%, evidenciando um comportamento bastante similar com o da mistura 95/5.

Os ensaios da mistura 90/10, contudo, apresentaram resultados discrepantes entre si, indicando que a apresentação de uma média para estes não seria representativa. Este fato pode estar relacionado a dificuldades em manter a proporção alvo da mistura nas fases iniciais do teste 90/10, resultando em variações significativas na composição da mistura.

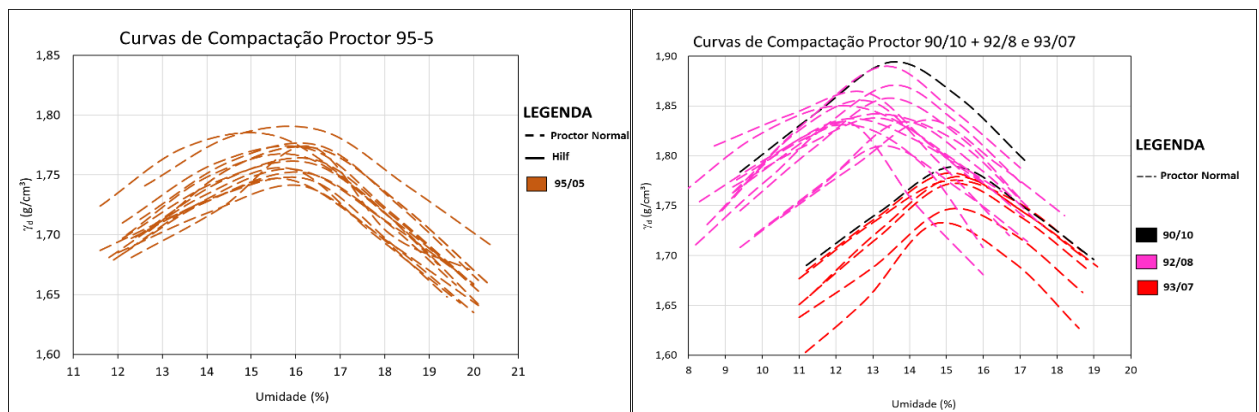


Figura 3: Curvas de compactação Proctor normal para as misturas.

3.3 Ensaios de Compactação de Campo (Hilf e Densidade de Campo)

A análise dos resultados de compactação para camadas de 25cm, utilizando um rolo liso de 12 toneladas, para mistura 95/5 é apresentada na Figura 4. Observe-se um aumento no grau de compactação até o equivalente a dois fechas (4 passadas), sem ganhos além desse ponto. Considerando que um grau de compactação de 98% é geralmente o mínimo exigido nas especificações para aterros compactados, um único fecha seria suficiente para atingir a compactação desejada.

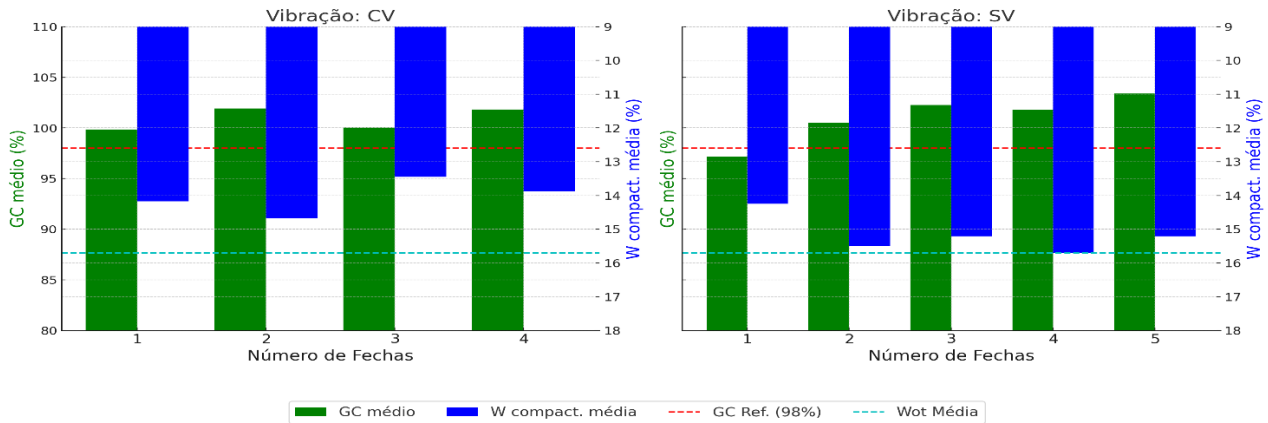


Figura 4: Comparativo Fechas - 95/5 - 25cm - Rolo 12t.

Os resultados para camadas de 25cm compactadas com rolo liso de 12 toneladas para as misturas 93/7 e 92/8 são apresentados na Figura 5.

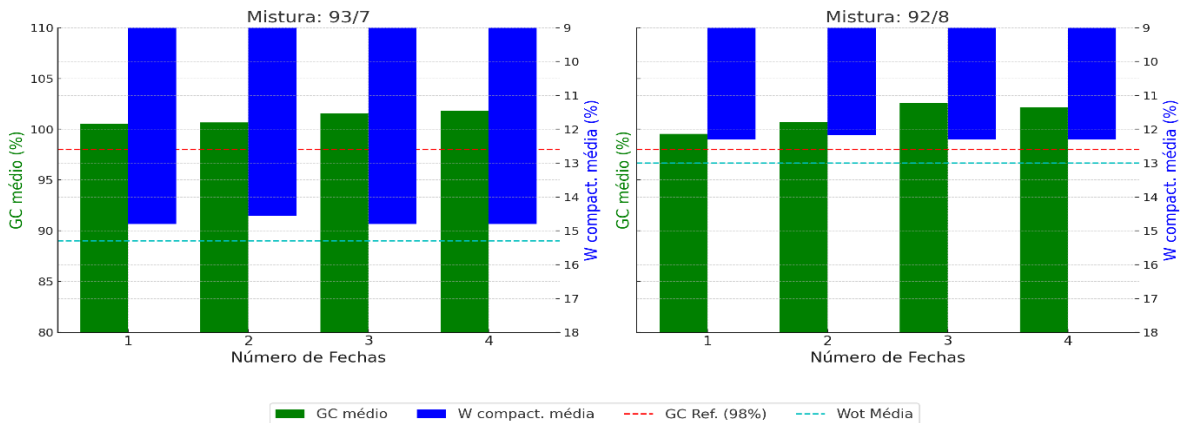


Figura 5: Comparativo Fechas - 93/7 e 93/8 - 25cm - Rolo 12t.

Os resultados para camadas de 25cm compactadas com rolo liso de 12 toneladas para as misturas 90/10 são apresentados na Figura 6.

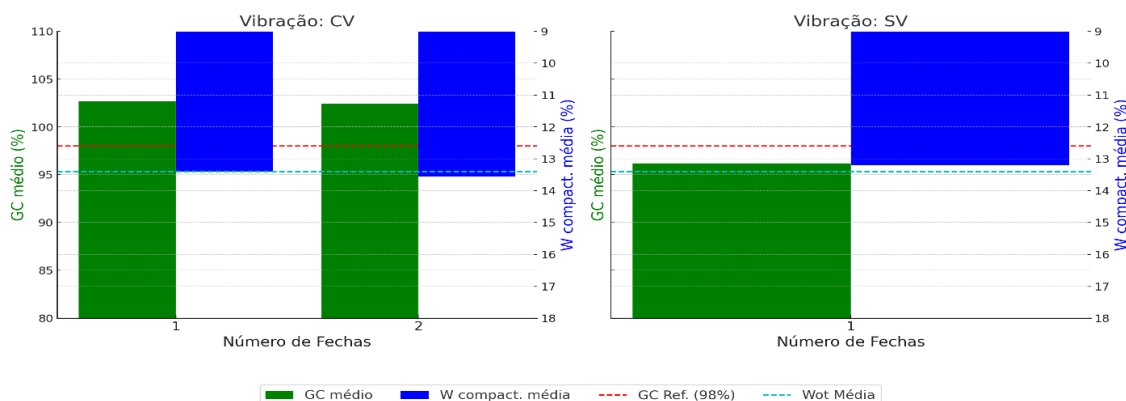


Figura 6 - Comparativo Fechas - 90/10 - 25cm - Rolo 12t.

3.4 Discussão dos Resultados

Este estudo demonstrou que a umidade de filtragem está muito próxima da umidade ótima do material, indicando que nas condições ideais de operação, não será necessário adicionar água para a compactação. Observou-se que sob estas condições ótimas, não ocorre perda de produtividade, inclusive quando comparado com operações utilizando rejeito 100% arenoso. A investigação revelou boas condições de suporte e trafegabilidade para os equipamentos em campo, e a trabalhabilidade e produtividade não foram comprometidas mesmo sob precipitações de até 50 mm durante os testes. As permeabilidades medidas correspondem à ordem de grandeza do rejeito 100% arenoso (10^{-6} m/s).

No que tange à compactação os melhores resultados foram obtidos trabalhando-se no ramo seco da curva de compactação, obtendo-se resultados mais consistentes com 2 fechas (4 passadas) do rolo compactador. Entende-se ser possível aumentar a espessura da camada de 25 cm (para 30 ou 35 cm) e ainda assim obter-se GC adequados.

Uma informação relevante já observada no processo é que a constante variabilidade do material, em termos de granulometria e mineralogia oriundas do beneficiamento e das diversas frentes de lavra, pode dificultar a identificação do ponto ótimo de trabalho, afetando diretamente a produtividade e o desempenho geotécnico. Isso implica na necessidade de rastrear os dados químicos e físicos do minério (RoM e Frentes de Lavra) e do rejeito em todo o processo a fim de prever melhor essas variações.

Os resultados das misturas com maiores teores de lama testados (93/7, 92/8, e 90/10) apresentaram bons valores de graus de compactação, entretanto observa-se o efeito da variabilidade nos resultados, muitas vezes com mudança no ponto ótimo de trabalho no campo e, às vezes, resultados pouco coerentes com as variações esperadas entre as misturas.

4 CONCLUSÕES

Com base nos resultados discutidos, este estudo evidenciou que a umidade de filtragem se aproxima consideravelmente da umidade ótima do material, indicando que em condições ideais de operação não será necessário adicionar água para a compactação. Além disso, sob essas condições ótimas, não foi observada perda de produtividade, mesmo em comparação com operações utilizando rejeito 100% arenoso. A investigação revelou condições satisfatórias de suporte e trafegabilidade para os equipamentos em campo, sem comprometer a trabalhabilidade e a produtividade, mesmo sob precipitações de até 50 mm durante os testes. As permeabilidades medidas foram compatíveis com as encontradas no rejeito 100% arenoso (10^{-6} m/s).

Em relação à compactação, os melhores resultados foram obtidos trabalhando-se no ramo seco da curva de compactação, alcançando consistência com duas fechas (quatro passadas) do rolo compactador. Isso sugere que é viável aumentar a espessura da camada de 25 cm para 30 ou 35 cm e ainda obter graus de compactação adequados.

Observou-se, no entanto, que a constante variabilidade do material em termos de granulometria e mineralogia, influenciada pelo beneficiamento e pelas diferentes frentes de lavra, pode dificultar a

identificação do ponto ótimo de trabalho, afetando diretamente a produtividade e o desempenho geotécnico. Portanto, é crucial monitorar os dados químicos e físicos do minério (RoM e Frentes de Lavra) e do rejeito ao longo de todo o processo para prever melhor essas variações.

Os resultados das misturas com maiores teores de lama testadas (93/7, 92/8 e 90/10) apresentaram graus de compactação satisfatórios, porém a variabilidade influenciou os resultados, levando, às vezes, a mudanças no ponto ótimo de trabalho no campo e resultados menos coerentes com as variações esperadas entre as misturas.

Neste sentido, a proporção de 95/5, até por ter sido a mais testada, encontra-se com resultados mais consistentes sendo sugerido sua adoção durante o período inicial da operação. Desta foram, poder-se-á estabelecer um banco informações que permita entender os limites da variabilidade de todo o processo que associados a estudos de engenharia, podem estabelecer os limites adequados e seguros nos incrementos percentuais de lama na mistura de rejeitos.

Este estudo reforça a complexidade do gerenciamento de rejeitos na mineração, destacando a importância de uma abordagem metódica e adaptativa para otimizar a produtividade e sustentabilidade das operações de disposição e em especial, compactação de rejeitos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016). NBR 6457. *Amostra de solo - Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização*. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016). NBR 7180. *Determinação do limite de plasticidade*. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016). NBR 7181. *Análise Granulométrica*. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016). NBR 7182. *Ensaio de compactação*. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016). NBR 9813. *Determinação da massa específica aparente in situ, com emprego de cilindro de cravação*. Rio de Janeiro.

FIGUEIREDO, M. M. Estudo de metodologias alternativas de disposição de rejeitos para a mineração Casa de Pedra – Congonhas - MG. 2007. 100 f. Dissertação (Mestrado em Geotécnica) – Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto. 2007.

OLIVEIRA-FILHO, W. L. Manejo de Estéreis e de Rejeitos de Mineração. Notas de aula. MIN741. Departamento de Engenharia de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto. 2017.

PEDROSA, M. H. et al. (2020). Análise Técnica e Crítica dos Sistemas de Disposição de Rejeitos da Mineração. Em: Anais do XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica.

PIMENTA, J. The drained stacking of granular tailings: a disposal method for a low degree of saturation of the tailings mass. *Proceedings Tailings and Mine Waste*, Vancouver: BC, 2011.

PORTES, A. M. C. Avaliação da disposição de rejeitos de minério de ferro nas consistências polpa e torta. 2013. 154 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia e Transportes) – Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. 2013.

ULRICH, B.; COFFIN, J. Considerations for Tailings Facility Design and Operation Using Filtered Tailings. In: JEWELL, R.; FOURIE, A.B.; CALDWELL, J.; PIMENTA, J. (Eds.). *Paste 2013: Proceedings of the 16th International Seminar on Paste and Thickened Tailings*. Perth: Australian Centre for Geomechanics, 2013. pp. 201-210.