

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2024/445

Avaliação do Comportamento de um Empilhamento Drenado de Rejeitos Através dos Resultados do Controle de Compactação e da Caracterização Física

Thiago Nunes Malaco

Engenheiro Civil, Walm BH Engenharia, Belo Horizonte, Brasil, thiago.malaco@walmengenharia.com.br

Juliana Martins Moura

Engenheira Geotécnica, Vale, Belo Horizonte, Brasil, juliana.moura3@vale.com

Marília Muniz Freire

Mestranda em Engenharia de Transportes, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, Brasil, marilia.freire@ime.eb.br

Marcus Vinícius Lima Dias

Gerente Técnico Sênior de Gestão de Rejeitos, Vale, Belo Horizonte, Brasil, marcus.dias1@vale.com

Maria Esther Soares Marques

Professora no Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, Brasil, esther@ime.eb.br

RESUMO: Com a finalidade de substituição da disposição de rejeitos, tal como preconiza a Lei Estadual 23.291 (MG, 2019), a construção de empilhamentos de rejeitos desaguados, acompanhada de um rigoroso controle tecnológico ao longo de sua construção, tem sido o foco do desenvolvimento de pesquisas tecnocientíficas. Entretanto, pontua-se que a previsibilidade do comportamento dos rejeitos apresenta limitações em virtude da sua considerável heterogeneidade. Este trabalho apresenta a comparação dos resultados de 50 ensaios de controle tecnológico, executados em um empilhamento drenado de rejeito, cujo material é submetido ao processo de peneiramento para o atendimento das faixas granulométricas de projeto. Foram avaliados os ensaios de controle de compactação realizados pelos métodos de Hilf e Proctor Normal em uma fase de operação da pilha, assim como a caracterização física dos rejeitos, através da análise granulométrica, limites de Atterberg e densidade real dos grãos. A variação da umidade observada foi entre 10% e 12% para ambos os métodos. As massas específicas aparentes secas avaliadas foram acima de 2,58 g/cm³, resultando em GC_≥98% em todas as amostras. Os resultados destacam a importância da realização do controle tecnológico no processo de compactação em rejeitos e apontam para a probabilidade de performance geotécnica satisfatória para a PDR.

PALAVRAS-CHAVE: empilhamento drenado de rejeitos, controle tecnológico, caracterização física, grau de compactação, densidade dos grãos.

ABSTRACT: With the purpose of replacing waste disposal, as recommended by State Law 23,291 (MG, 2019), the construction of dry stack tailings, accompanied by rigorous technological control throughout their construction, has been the focus of the development of techno-scientific research. However, it is noted that the predictability of tailings behavior presents limitations due to its considerable heterogeneity. This work presents the comparison of the results of 50 technological control tests, carried out in a drained waste pile, whose material is subjected to the sieving process to meet the project particle size ranges. The compaction control tests carried out using the Hilf and Proctor Normal methods were evaluated in a pile operation phase, as well as the physical characterization of the tailings, through granulometric analysis, Atterberg limits and real grain density. The humidity variation observed was between 10% and 12% for both methods. The dry apparent specific masses evaluated were above 2.58 g/cm³, resulting in GC_≥98% in all samples. The results highlight the importance of carrying out technological control in the tailings compaction process and point to the probability of satisfactory geotechnical performance for the dry stack.

KEYWORDS: dry stacking tailings, technological control, physical characterization, degree of compaction, specific gravity.

1. INTRODUÇÃO

De acordo com o Sumário Mineral Brasileiro da ANM de 2018, a produção brasileira de minério de ferro em 2017 atingiu 453,7 Mt (milhões de toneladas), com um teor médio de 63,7% de ferro. Portanto, há uma geração significativa de resíduos, os quais precisam ser dispostos de forma segura.

A maneira convencional de disposição de rejeitos em forma de polpa geralmente requer vastas áreas, causando significativo impacto ambiental e consequente dificuldade em se obter novos licenciamentos. Devido à proximidade de zonas urbanas e à pressão pública, surge a necessidade de explorar alternativas a essa abordagem (GUIMARÃES *et al.*, 2012).

De acordo com Pimenta (2011), a construção de uma pilha de rejeito pode oferecer uma disposição econômica e eficiente. A viabilidade de sua aplicação depende das características de permeabilidade/drenagem dos rejeitos e de um projeto de empilhamento que assegure sua estabilidade durante as operações e após o fechamento.

Segundo o relatório do Mend (2017), as propriedades físicas dos rejeitos influenciam a eficiência e a viabilidade técnica dos métodos de disposição. As propriedades físicas podem variar de acordo com diferentes fatores, destacando-se as características do minério, a qualidade do mesmo e as operações de processamento realizadas.

Portanto, parâmetros como compactação, umidade ótima e altura da camada são definidos antecipadamente para a construção de aterros e devem ser verificados por meio do controle tecnológico, indispensável em projetos obras de terra.

Ainda, segundo Nicholson (2015), a compactação é vantajosa com a diminuição da compressibilidade e ganho de estabilidade e resistência, diminuindo a permeabilidade e consequente potencial de liquefação. Das (2015) ressalta a importância de estabelecer uma metodologia de aprovação dos ensaios realizados para validar o processo e promover o progresso na construção.

1.1. DESCRIÇÃO DO ESTUDO DE CASO

O empilhamento de rejeitos drenado (PDR), avaliado no presente documento, está localizado no Quadrilátero Ferrífero, mais especificamente no domínio estrutural da Serra do Curral. O empilhamento está assentado sobre os domínios geológicos: laterita, itabirito compactado, filito e um empilhamento de estéril. O empilhamento é executado pelo método ascendente com compactação mecânica de camadas com cerca de 60 cm de espessura.

A área da PDR conta com, aproximadamente, 10 hectares, nos quais foram dispostas, aproximadamente, 6,9 milhões de toneladas de rejeito. Para a garantia da sua performance geotécnica adequada, o empilhamento drenado foi projetado para ser executado contando com a seleção das faixas granulométricas dos rejeitos e com controle de compactação. Para que sejam atendidos os requisitos de projeto, foi estabelecido o ciclo operacional executivo, que consiste em:

1. Marcação topográfica de cada uma das camadas na praça previamente identificada.
2. Carregamento e transporte do rejeito através de caminhões fora de estrada até as praças de basculamento - pré-determinadas e sinalizadas.
3. Espalhamento dos materiais por trator de esteira (tipo D8, D10 ou similar), conforme as marcações topográficas.
4. Compactação da camada através do rolo compactador liso, de modo a viabilizar maior uniformidade na distribuição das energias de compactação ao longo do empilhamento.
5. Realização da coleta de amostras para a execução do controle tecnológico de campo (através dos métodos Hilf) e de laboratório (Através do método Proctor Normal).

Caso haja registros de índice pluviométrico superior a 10 mm durante o ciclo de compactação (etapas 1 e 2), é realizada a secagem do material com o auxílio de equipamentos com grade. As etapas 3 e 4 (espalhamento e compactação) só são realizadas quando o rejeito apresenta teores de umidade adequados e conforme os critérios de projeto.

O controle tecnológico da área para aferição do grau de compactação é realizado no topo, no meio e na base de cada camada avaliada. Os resultados expedidos são avaliados em um laboratório-container, localizado em região adjacente à PDR. Caso os resultados estejam aderentes aos intervalos de projeto, é liberada a continuação do empilhamento com o ciclo da camada subsequente.

O controle tecnológico proposto para a verificação dos critérios de projeto, consiste na realização de, no mínimo, dois ensaios de compactação e verificação do teor de umidade para cada camada de disposição de rejeitos – que possuem, aproximadamente, 0,60 m. Objetiva-se atingir um grau de compactação (GC) superior a 95% para todas as camadas da estrutura geotécnica. Já o teor de umidade, deverá apresentar desvios máximos de -2% e +2% em relação à umidade ótima.

Este trabalho visa comparar os resultados relacionados ao controle tecnológico realizado com os ensaios expeditos, de campo, com os resultados dos ensaios realizados em amostras indeformadas coletadas na PDR e realizados em laboratório. Desta forma, pretende-se realizar a calibração do grau de confiança nos resultados de resposta rápida, de campo, realizados para viabilizar a liberação das camadas e a construção do empilhamento drenado.

2. METODOLOGIA

Para que seja possível selecionar os ensaios de campo e de laboratório, cujos resultados serão comparados, foi realizada a setorização da área superficial (na Elevação 1.213 m) do empilhamento drenado em 6 praças, conforme a 1.

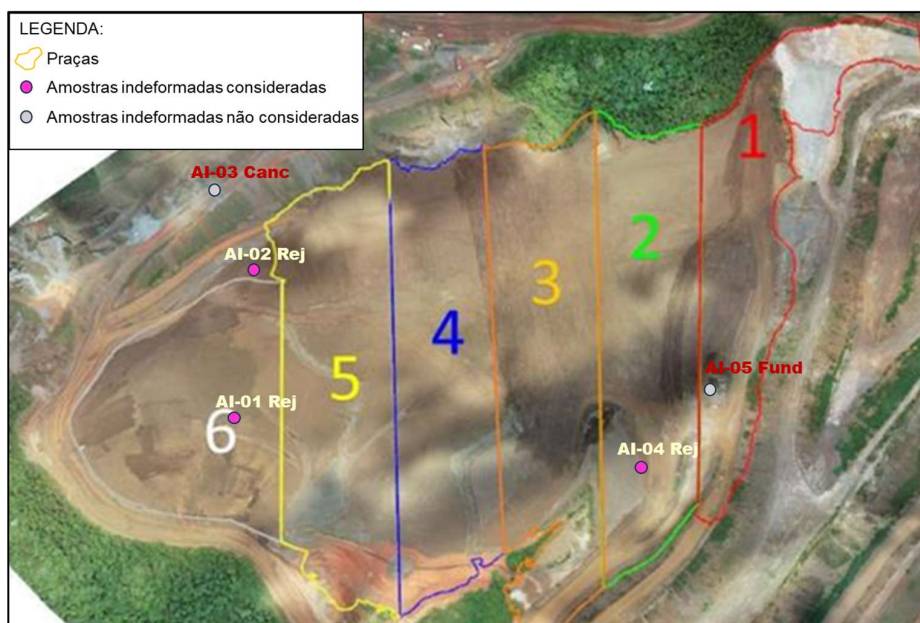


Figura 1: Divisão das praças de empilhamento e da localização das amostras indeformadas

Já os ensaios de campo, realizado pelo método Hilf e pela determinação do teor de umidade *in situ*, foram realizados em 175 pontos da PDR, tal como apresentado na Figura 2. Os pontos amostrados foram plotados a partir da rastreabilidade geotécnica e da validação conforme os critérios de projeto. Os ensaios cujos resultados estão contidos nos intervalos aceitáveis para a continuação da compactação, estão apresentados com o marcador na cor verde. Já os pontos para os quais os resultados estavam fora dos intervalos aceitáveis, possuem o marcador vermelho. Na mesma figura, é possível verificar a densidade de ensaios por praça avaliada e realizar a correlação com as amostras indeformadas, apresentadas anteriormente na 1.

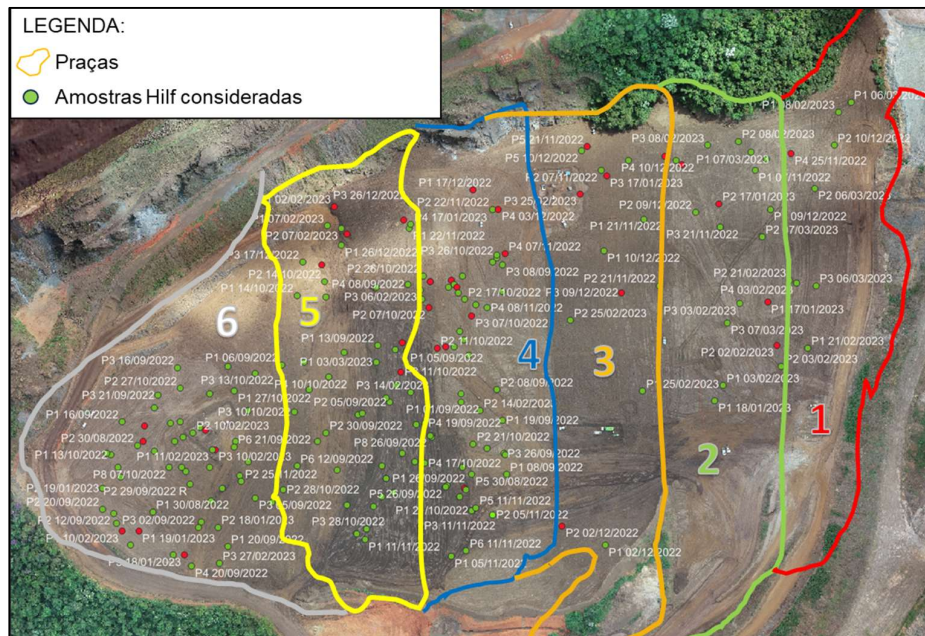


Figura 2: Localização dos pontos de ensaios Hilf

Dado o exposto, esse trabalho irá apresentar a comparação entre os resultados obtidos para os ensaios de campo e de laboratório, executados nas praças 2 e 6, para as amostras indeformadas do rejeito AI-01, AI-02 e AI-4. Hilf, foram realizados 35 ensaios na praça 2 e 20 ensaios na praça 6. A Tabela 1 apresenta a relação entre as praças, as amostras indeformadas e os ensaios expeditos de campo.

Tabela 1: Relação entre as praças, as amostras indeformadas e os ensaios expeditos de campo

Praça	Ensaio de laboratório	Ensaio de campo
	Ensaio de caracterização física e compactação (Proctor Normal)	Hilf e determinação do teor de umidade <i>in situ</i>
2	AI-04	20
6	AI-01, AI-02	35

A NBR 12.102 (ABNT, 2020) apresenta as diretrizes para a realização do controle de compactação através do método de Hilf. Este método é aplicável quando o controle de compactação é referente à energia normal de compactação. Já a NBR 7182 (ABNT, 2016 – versão corrigida em 2020) apresenta as diretrizes para a realização do ensaio de compactação através do método Proctor. Para o presente trabalho, os ensaios de compactação foram realizados com a energia normal.

Os cálculos referentes à determinação do controle tecnológico das amostras indeformadas, ensaiadas no campo e no laboratório, foram determinados conforme às normas supracitadas.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados dos ensaios de laboratório e dos ensaios expeditos de campo serão discutidos a seguir.

3.1. ENSAIOS DE LABORATÓRIO

Para a avaliação das características físicas do rejeito, foram consolidados os resultados dos ensaios de laboratório, sendo os dados agrupados para a avaliação global do material em estudo. Dessa forma, essa análise irá contemplar os ensaios de granulometria, plasticidade, teor de umidade natural, compactação Proctor Normal, densidade *in situ* e massa específica dos grãos.

Tabela 2: Relação entre as praças, as amostras indeformadas e os ensaios expeditos de campo

Praça	Ensaio de laboratório	Ensaio de campo
	Ensaio de caracterização física e compactação (Proctor Normal)	Hilf e determinação do teor de umidade <i>in situ</i>
2	AI-04	20
6	AI-01, AI-02	35

A Tabela 3 e a Tabela 4, a seguir, apresentam os resultados obtidos para a caracterização física dos rejeitos dispostos nas praças 2 e 6, da PDR avaliada no presente estudo.

Tabela 3: Resultados da distribuição granulométrica e dos limites de Atterberg

Praça	Amostra	$\rho_{sól}$ g/cm ³	Granulometria (%)						Limites de Atterberg		
			Argila	Silte	Areia fina	Areia média	Areia Grossa	Pedregulho	LL	LP	IP
6	AI-01	3,88	-	-	-	-	-	-	17	12	5
6	AI-02	3,94	11	48	28	7	2	4	18	13	5
2	AI-04	3,85	12	49	25	7	3	4	19	14	5

Tabela 4: Resultados dos índices físicos

Praça	Amostra	ρ_{nat} g/cm ³	w_{nat} (%)	ρ_d (1) g/cm ³	e_{nat} (2) -	γ_{nat} (3) kN/m ³	γ_d (3) kN/m ³	γ_s (3) kN/m ³	$G_s = \delta$
6	AI-01	2,72	12,14	2,42	0,603	26,65	23,76	38,08	3,9
6	AI-02	2,60	8,20	2,40	0,641	25,51	23,57	38,68	3,9
2	AI-04	2,54	13,66	2,23	0,721	24,92	21,92	37,73	3,8

Considerando os valores médios dos rejeitos ensaiados na praça 6, tem-se 11% de fração argila, 48% de fração de silte, 28% fração de areia fina, 7 % de areia média, 2% de areia grossa e o restante (4%) de fração pedregulhosa (ASTM D422). No que tange a plasticidade do material, considerando valores médios, o material apresenta Limite de Liquidez igual a 17,5% e Limite de Plasticidade igual a 12,5%, os quais resultam no Índice de Plasticidade médio de 5%. A partir dos dados médios, o material é classificado como Silte Arenoso, conforme ASTM D2487-17.

Para os rejeitos ensaiados na praça 4, tem-se 12% de fração argila, 49% de fração de silte, 25% fração de areia fina, 7 % de areia média, 3% de areia grossa e o restante (4%) de fração pedregulhosa (ASTM D422). No que tange a plasticidade do material, considerando valores médios, o material apresenta Limite de Liquidez igual a 19% e Limite de Plasticidade igual a 14%, os quais resultam no Índice de Plasticidade médio de 5%. A partir dos dados médios, o material é classificado, também, como Silte Arenoso, conforme ASTM D2487-17.

A Figura 3 apresenta as curvas de compactação Proctor Normal, considerando as amostras indeformadas coletadas na praça 6. Além disso, foram plotadas as isolinhas de saturação de 70%, 80%, 90% e 100%, de forma a viabilizar avaliação da proximidade da densidade seca máxima e do teor de umidade ótimo em relação às curvas elaboradas. Como pode ser observado ambas as amostras apresentaram resultados coerentes para os parâmetros avaliados – conforme o esperado. Já na Figura 4 é apresentada a curva de compactação, assim como as isolinhas de saturação, a massa específica aparente seca máxima e o teor de umidade ótimo para a amostra AI-04, situada na praça 2. Observa-se que os resultados obtidos para as três amostras, localizadas nas duas diferentes praças da PDR apresentaram resultados similares. Para a garantia da performance da adequada da PDR, essa condição de proximidade dos resultados é desejável, uma vez que, dessa forma, esperam-se comportamentos também similares em termos de resistência, percolação e deformabilidade.

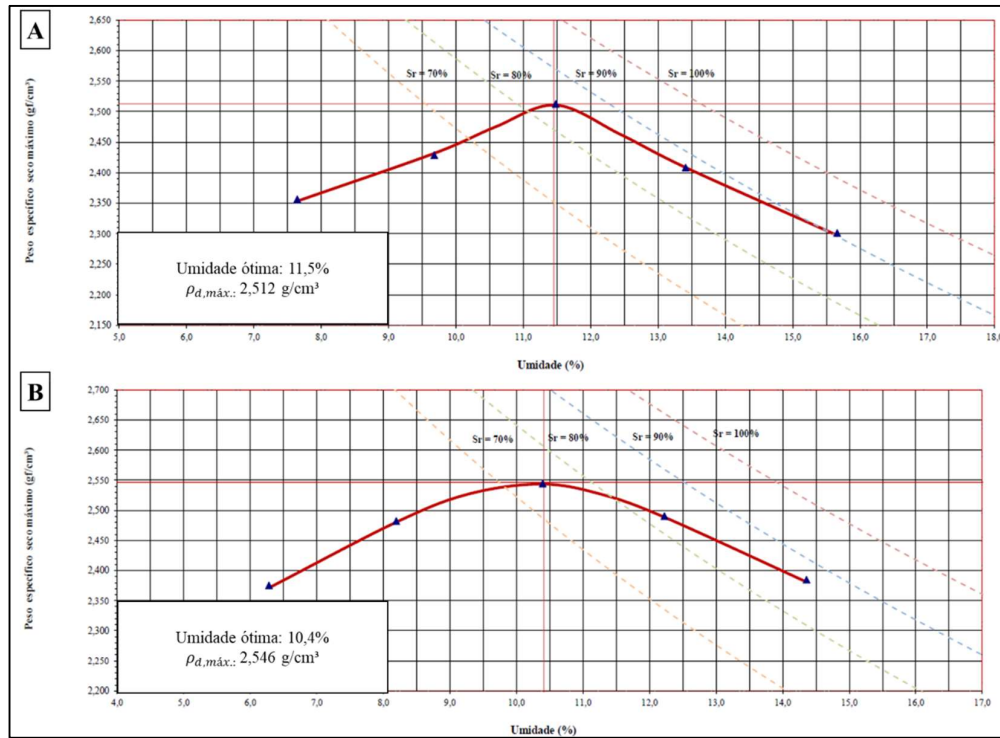


Figura 3: A) Curva de compactação da amostra AI-01; B) Curva de compactação da amostra AI-02

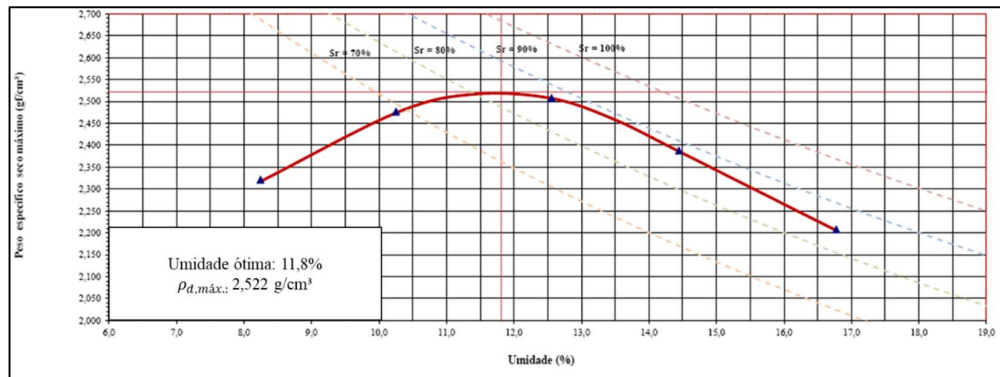


Figura 4: Curva de compactação da amostra AI-4

Para o primeiro entendimento dos resultados de compactação obtidos, na Tabela 3 constam as quantidades de amostras e porcentagens de aprovação para cada ponto ensaiado (topo, meio e base da camada).

Tabela 3. Quantidades de amostras aprovadas e reprovadas por camada

Camadas	Praça 6			Praça 4		
	Qtd.	$GC_{méd.}$ (%)	$\Delta\omega_{méd.}$ (%)	Qtd.	$GC_{méd.}$ (%)	$\Delta\omega_{méd.}$ (%)
Topo	20	101,22% (desv. = 0,02)	-0,66% (desv. = 0,01)	30	100,10% (desv. = 0,02)	0,01% (desv. = 0,01)
Meio	20	100,15% (desv. = 0,02)		30	98,75% (desv. = 0,02)	
Base	20	99,82% (desv. = 0,03)		30	97,01% (desv. = 0,03)	

Através dos dados avaliados, é possível observar que, para ambas as praças (6 e 4) o grau de compactação médio na base das camadas pode chegar a 3% de redução, quando comparado com o grau de compactação do topo da camada. Esse resultado era esperado, em função da espessura de 60 cm para cada camada de compactação, dada a dissipação da energia de compactação ao longo da sua espessura. Entretanto, cabe ressaltar que nenhum dos valores obtidos foi inferior ao intervalo de projeto ($GC \geq 95\%$).

Já em relação aos desvios do teor de umidade, a Praça 6 apresentou maiores desvios, em comparação à praça 1. Entretanto, os desvios observados foram negativos (ou seja, a compactação foi levemente deslocada para o tramo seco) e, para as características do rejeito empilhado, resultou em GC superiores aos determinados para a Praça 4.

A Figura 5 apresenta o resultado das curvas de compactação das amostras ensaiadas pelo método Hilf, para obtenção dos graus de compactação e desvios de umidade para as 6 praças da PDR avaliada.

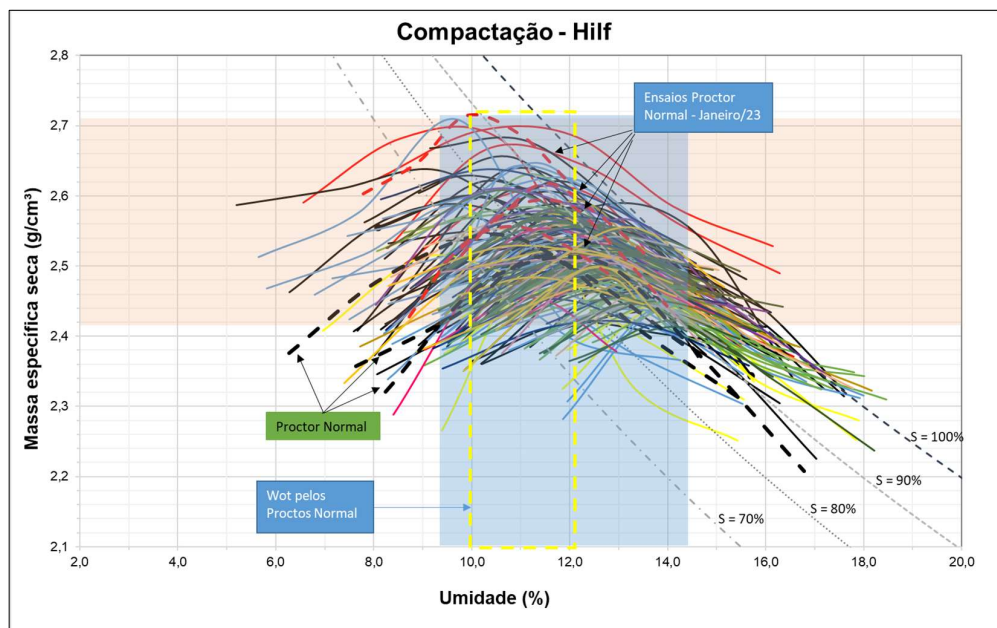


Figura 5: Curvas de compactação - Hilf

Através da análise do gráfico, observa-se a concentração dos resultados das curvas de compactação próximas aos valores de massa específica aparente seca máxima ($2,4 \text{ g/cm}^3$ a $2,7 \text{ g/cm}^3$) e de teor de umidade ótimo (10% a 12%), determinados nos ensaios de laboratório.

4. CONCLUSÕES

Ao comparar os resultados do controle de compactação realizado pelos dois métodos discutidos no presente trabalho (Hilf e Proctor Normal), conclui-se que, para o material ensaiado, há efetividade e convergência nos resultados. Destaca-se, ainda, que com o grau de saturação menor, tem-se um menor índice de vazios para uma mesma umidade ótima, evidenciando uma melhor compactação e um aumento da massa específica aparente seca. Pode-se prever que as amostras compactadas com essa condição, venham a apresentar parâmetros de resistência superiores às amostras com maiores índices de vazios (considerando que a comparação seja realizada para o mesmo tipo de material e para as mesmas condições de compactação).

Para estudos futuros, sugere-se que sejam avaliados, também, os parâmetros de resistência, de percolação e de deformabilidade dos rejeitos compactados. Assim como devem ser realizados ensaios de caracterização dos rejeitos localizados nas camadas inferiores, quando a construção da PDR se aproximar à elevação final de projeto. Essa caracterização pode viabilizar a reinterpretação do estado do material e viabilizar a previsibilidade do seu comportamento frente aos carregamentos impostos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2020) NBR 12102. *Solo – Controle de compactação pelo método de Hilf*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016) NBR 7182. *Solo – Ensaio de Compactação*. Rio de Janeiro.
- Agência Nacional de Mineração – ANM (2018) *Sumário Mineral Brasileiro*. Disponível em: <https://www.gov.br/anm/pt-br/assuntos/economia-mineral/publicacoes/sumario-mineral/pasta-sumario-brasileiro-mineral-2018/ferro_sm_2018>
- Boscov, M.E. (2008) *Geotecnia Ambiental*. Ed. Oficina de Letras. São Paulo, v.1, n 2, 248p
- Das, BRAJA M., Sobhan, K. (2015) *Fundamentos de Engenharia Geotécnica*, 8 ed. Cengage Learning. São Paulo,
- Guimarães, N. C.; Valadao, G. E.S.; Peres, A.E.C (2012). *Filtragem de rejeitos de minério de ferro visando à sua disposição em pilhas*. Rem: Rev. Esc. Minas, Ouro Preto, v. 65, n. 4, p. 543-548.
- Mine Environment Neutral Drainage Project – MEND (2017) Report 2.50.1 *Study of Tailings Management Technologies*. Klohn Crippen Berger. The Mining Association of Canada (MAC), Canadá, 2017.
- Nicholson, P. G. (2015) *Soil Improvement and Ground Modification Methods*. Elsevier Inc. EUA.
- PIMENTA, J. (2011) *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. 11p.