

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2024/521

Comparação Entre os Métodos de Aferição de Teor de Umidade *in loco* e Método da Estufa - Estudo de Caso

Rayala Lisboa Masensini
Engenheira Civil, BVP Geotecnia & Hidrotecnia, Belo Horizonte, MG, Brasil, rayala.lisboa@gmail.com

Djalma Rabelo Leite Neto
Engenheiro Geotécnico, BVP Geotecnia & Hidrotecnia, Belo Horizonte, MG, Brasil, djalmarabelo.eng@gmail.com

Nicolas Marques Aguiar Brandão
Geotécnico, BVP Geotecnia & Hidrotecnia, Belo Horizonte, MG, Brasil, nicolasmarquesbrandao@gmail.com

Marina Costa Medeiros
Engenheira Geotécnica, BVP Geotecnia & Hidrotecnia, Belo Horizonte, MG, Brasil, marinamedc@gmail.com

Antônio Serpa Freire
Engenheiro Geotécnico, BVP Geotecnia & Hidrotecnia, Belo Horizonte, MG, Brasil, antonio.asfreire@gmail.com

RESUMO: Após os recentes acidentes ocorridos envolvendo barragens de mineração foi preciso que as mineradoras buscassem alternativas para disposição de rejeitos, com destaque para as pilhas. Para isso, após filtragem, os rejeitos advindos do processo de beneficiamento, sejam misturas em diferentes proporções de rejeito arenoso e ultrafino ou somente rejeito arenoso, são compactados de acordo com faixas de umidade alvo. Um aspecto de grande importância no processo construtivo destas estruturas é o controle tecnológico de compactação dos rejeitos, a fim de garantir o bom desempenho da pilha. Portanto, torna-se rotineira a execução de ensaios para aferição do teor de umidade do material depositado. A rápida e assertiva definição deste parâmetro impacta diretamente nas decisões durante a fase de operação da estrutura, uma vez que é o parâmetro que governa a trabalhabilidade do rejeito, efetividade da compactação, e por consequência a estabilidade da estrutura. Este estudo visa a comparação de metodologias para aferição de umidade obtidas em campo e em laboratório, comparando-as com o método da estufa, sendo este amplamente aceito na mineração. Serão comparados os métodos do colchão de areia, micro-ondas, balança halogênica e *Speedy Test*, visando identificar uma metodologia auxiliar a estufa que garante a aferição rápida de umidade, com precisão e acurácia, visando a liberação de camadas para compactação. Sabe-se que a aferição de umidade pela estufa, por norma, demanda 24 horas e, por vezes, há necessidade de liberação rápida da camada para compactação ou para subida da pilha. Neste sentido, faz-se necessário a identificação de métodos alternativos para aferição rápida de umidade para rejeitos de mineração. Além disso, a aferição de umidade rápida pós compactação permite obter a densidade seca de campo da camada compactada e determinação do grau de compactação ou mesmo a comparação com a densidade seca mínima exigida para as camadas, garantindo um empilhamento seguro no ramo dilatante. A partir dos dados extraídos de Pilhas de Disposição de Rejeito (PDR) e aterros existentes, propõe-se uma correlação estatística utilizando as aferições dos ensaios mencionados para parametrizar o resultado obtido em campo e assim fornecer celeridade às tomadas de decisões frente a obra.

PALAVRAS-CHAVE: Teor de Umidade; Disposição de Rejeitos; Compactação de Rejeitos; Metodologias de Aferição; Densidade Seca de Campo; Correlação Estatística.

ABSTRACT: Following recent accidents involving mining dams, mining companies have had to seek alternatives for waste disposal, with emphasis on waste piles. For this purpose, after filtration, the filtered waste from the beneficiation process, whether mixtures in different proportions of sandy and ultrafine waste or only sandy waste, is compacted according to target moisture ranges. An aspect of great importance in the

construction process of these structures is the technological control of waste compaction, in order to ensure the good performance of the pile. Therefore, it becomes routine to conduct tests to measure the moisture content of the deposited material. The rapid and accurate definition of this parameter directly impacts decisions during the operational phase of the structure, as it governs the workability of the waste, the effectiveness of compaction, and consequently, the stability of the structure. This study aims to compare methodologies for measuring moisture content in laboratory and field, comparing them with the oven method, which is widely accepted in mining. The methods of sand bed, microwave, halogen balance, and Speedy Test will be compared, aiming to identify a methodology complementary to the oven that ensures quick moisture measurement with precision and accuracy, aiming for the release of layers for compaction. It is known that moisture measurement by the oven method typically takes 24 hours and, sometimes, there is a need for quick release of the layer for compaction or for pile stacking. In this sense, it is necessary to identify alternative methods for rapid moisture measurement for mining waste. In addition, rapid moisture measurement post-compaction allows obtaining the field dry density of the compacted layer and determination of the degree of compaction or even comparison with the minimum dry density required for the layers, ensuring safe stacking in the dilatant zone. Based on data extracted from existing Waste Disposal Piles (PDR) and landfills, a statistical correlation is proposed using the measurements of the mentioned tests to parameterize the result obtained in the field and thus provide speed to decision-making in the face of the project.

KEYWORDS: Moisture Content; Waste Disposal; Waste Compaction; Measurement Methodologies; Field Dry Density; Statistical Correlation.

1 INTRODUÇÃO

Segundo o IBRAM (Instituto Brasileiro de Mineração) “*Dos investimentos da mineração previstos até 2027, o maior volume será direcionado ao minério de ferro: US\$ 17 bilhões, ou 24% a mais do que no período anterior (2022-2027)...*”. Considerando a crescente dos investimentos destinados ao setor da mineração, é razoável inferir que haverá um aumento na extração do minério de ferro, que será estudado no contexto deste trabalho. Portanto, partindo da premissa do aumento do beneficiamento do minério, surge a necessidade concomitante de lidar com os rejeitos que serão gerados durante esse processo. Nesse contexto, torna-se relevante que as mineradoras utilizem alternativas ecologicamente viáveis, seguras e economicamente vantajosas para a disposição desses materiais, ao mesmo tempo em que se destaca a importância de garantir um controle tecnológico adequado durante a execução das obras.

Para o caso de pilhas de rejeitos compactados, existem parâmetros de controle essenciais que devem ser considerados. Entre esses parâmetros, destaca-se o teor de umidade, cujo papel é fundamental para garantir a eficácia do processo de compactação e, conseqüentemente, o controle dos índices de vazios. É importante salientar que, por meio desse controle, é possível melhorar a eficiência da compactação, a qual, quando bem executada e seguindo os critérios de projeto, pode evitar que o material apresente comportamento borrachudo e contrátil. Isso contribui para manter a integridade da estrutura garantindo comportamento dilatante do rejeito filtrado e, favorecendo assim a segurança e redução de riscos associados à liquefação.

No estudo, será realizada uma comparação entre métodos alternativos utilizados para verificação do teor de umidade *in situ* e o método convencional de aferição do teor de umidade pela estufa, com o principal objetivo de otimizar o tempo necessário para a obtenção dos resultados. Este procedimento é crucial, uma vez que a camada de material precisa estar dentro da faixa de umidade alvo, previamente definida, para ser liberada. Com o intuito de agilizar o processo de execução das pilhas, é muito oneroso operacionalmente aguardar as 24 horas requeridas para a obtenção dos resultados pelo método da estufa. Como alternativa, foram avaliados métodos como colchão de areia, balança infravermelho, *Speedy Test*, balança halogênica e micro-ondas, os quais serão comparados ao método padrão da estufa.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Materiais

O ensaio que será utilizado como base para comparação será o método da estufa. Segundo a ABNT NBR 6457:2024, ele consiste na separação de uma porção de solo em seu estado natural – quantidade que pode ser determinada utilizando a tabela da Tabela 1 – pesar e deixá-lo para a secagem na estufa a temperatura entre 105°C e 110°C, com intervalo de 16h a 24h. Após este tempo, deixa-se a amostra no dessecador para que atinja a temperatura ambiente e pese novamente, obtendo o peso seco. Desse modo, subtraindo o peso da cápsula na massa inicial e da massa seca, divide-se ambos os valores encontrados e o resultado, representa o teor de umidade da amostra.

Dimensão dos grãos maiores contidos na amostra, determinada visualmente (mm)	Quantidade de material (em massa seca) a ser utilizada (und.)	Balança a ser utilizada	
		Capacidade nominal (g)	Resolução (g)
< 2	30	200	0,01
2 a 20	30 a 300	1500	0,1
20 a 73	300 a 3000	5000	0,5

Tabela 1 - Quantidade de material em função da dimensão dos sólidos (grãos) maiores (ABNT NBR 6457:2024)

O método do *Speedy Test*, visa determinar a umidade do material *in situ*, apresentando resultado imediato. O ensaio determina o teor de umidade da amostra a partir da adição de uma ampola com carbureto de cálcio, colocada em dispositivo medidor de pressão de gás, denominado "Speedy". Quando totalmente fechado, a ampola se quebra mediante agitação e contato com duas esferas de aço, liberando o carbureto de cálcio por todo o material e ao reagir com a água produz o gás acetileno, que aumenta a pressão interna do recipiente que é lida no manômetro e pode ser diretamente proporcional ao conteúdo de água na amostra de solo, conforme Tabela 2.

Tabela 2 – Peso amostra em função da umidade admitida (DNER-ME 052/94)

Umidade estimada, %	Peso da amostra, g
5	20
10	10
20	5
30 ou mais	3

O método do micro-ondas apresenta-se de forma similar à estufa. Contudo, é necessário atenção à potência do equipamento e ao tempo que a amostra é submetida ao aquecimento. Segundo a circular técnica 33 de São Carlos-SP, é possível notar que há sucesso e aderência ao método da estufa quando se submete uma porção de amostra ao micro-ondas em cenário de rampa de aquecimento, de por exemplo: 7 min a 626 watts e 3 min a 338 watts. Sobretudo, durante o processo de secagem, é necessário colocar a amostra no dessecador e aferir sua massa, pois, quando ela se apresentar estável, não é necessário submetê-la ao aquecimento.

O método da balança infravermelho consiste em uma balança especial provida de uma lâmpada infravermelha. A amostra é colocada no prato da balança e o tempo é regulado em 10 ou 15 minutos. Liga-se o aparelho e decorrido este tempo, a leitura é feita diretamente em porcentagem de umidade, na escala da balança.

O método da balança halogênica trata-se de um ensaio não normatizado, que utiliza de um equipamento que determina o teor de umidade da amostra a partir do princípio da termogravimetria. Para realizar esse ensaio é necessário adicionar uma massa de material em uma bandeja do equipamento. Posteriormente um radiador de halogênio, que faz parte do equipamento, realiza a secagem do material, sendo que a balança registra a perda de massa da amostra simultaneamente, até que o material perca toda a umidade.

O método do colchão de areia assemelha-se com o método do fogareiro. A ideia principal é forrar uma bandeja de metal - com tamanho suficiente para acomodar as cápsulas a serem ensaiadas – utilizando areia, em seguida, coloca-la sob um fogão de indução e aquecer até que a massa da cápsula permaneça constante. Posteriormente, é feita a comparação entre a massa seca e a massa inicial, para obtenção da massa de água e cálculo do teor de umidade.

Os materiais analisados tratam-se de quatro rejeitos distintos com granulometria apresentadas na Figura 1 e predominante arenosos, pertencente à locais diferentes do quadrilátero ferrífero. Além disso, possuem massa específica entre $3,0\text{g/cm}^3$ e $3,2\text{g/cm}^3$. Para essa análise foram selecionadas 1318 amostras de dois aterros experimentais, diferindo apenas o método de aferição do teor de umidade adotado.

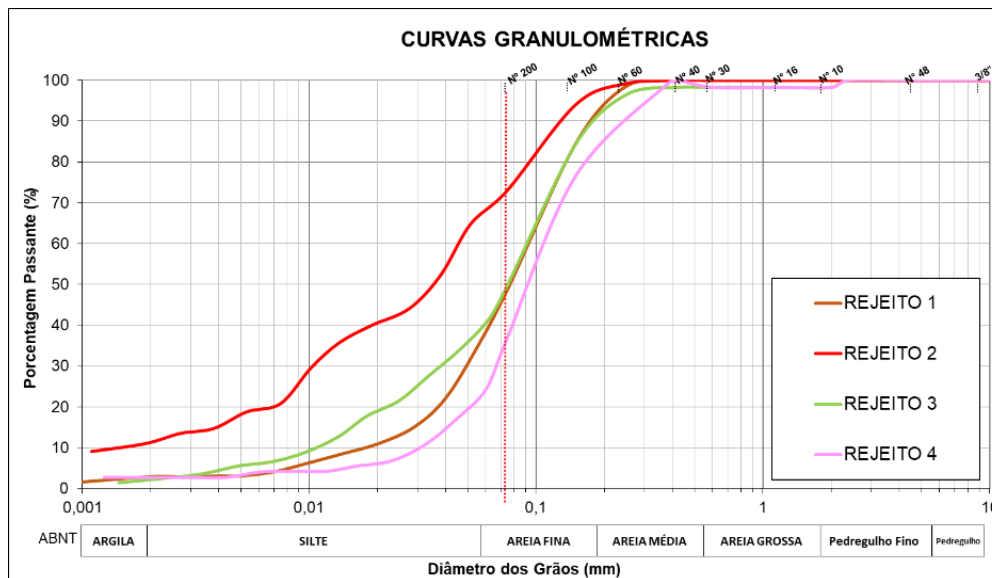


Figura 1 – Granulometria dos materiais

2.2 Método

Para realizar a análise dos dados, foram elaborados gráficos para comparar o método convencional da estufa - considerado como padrão neste estudo, embora apresente um tempo prolongado para a liberação dos resultados - com outros métodos realizados *in situ*, que proporcionam resultados imediatos. Posteriormente, foram definidos manualmente os limites superior e inferior para visualizar o intervalo no qual as amostras estavam contidas. Além disso, foi empregada a técnica da regressão linear como um parâmetro adicional para analisar o comportamento das amostras, buscando compreender a relação entre as variáveis dependentes e independentes. O objetivo primordial foi encontrar a melhor linha reta que representasse essa relação. Após esta etapa, procedeu-se para análise adicional baseada na diferença do teor umidade obtido nas amostras de cada método comparado com a estufa, com o intuito de compreender o desvio entre eles. Os gráficos abaixo exibem esses desvios e proporcionam a visualização das disparidades identificadas:

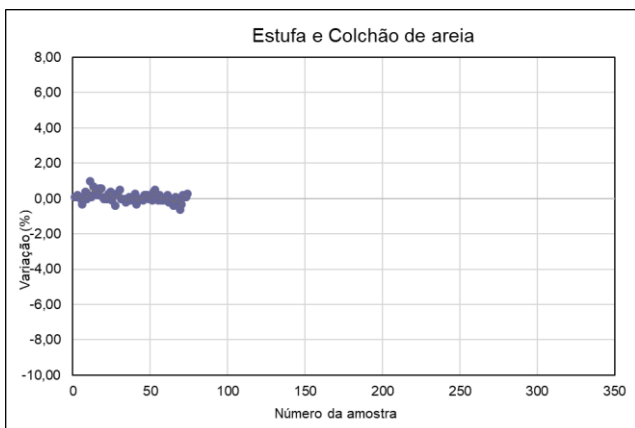


Figura 2 – Desvio entre o método da estufa e colchão de areia

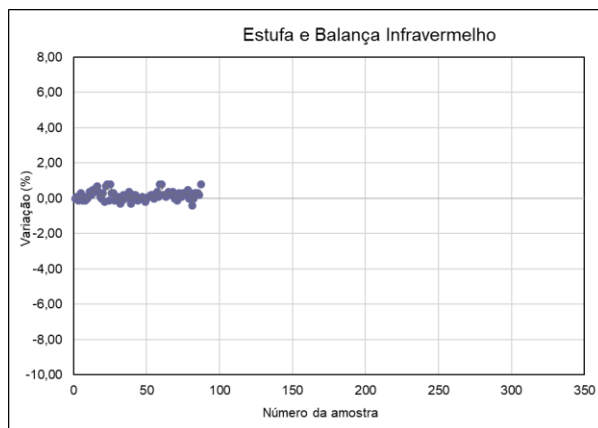


Figura 3 - Desvio entre o método da estufa e balança infravermelho

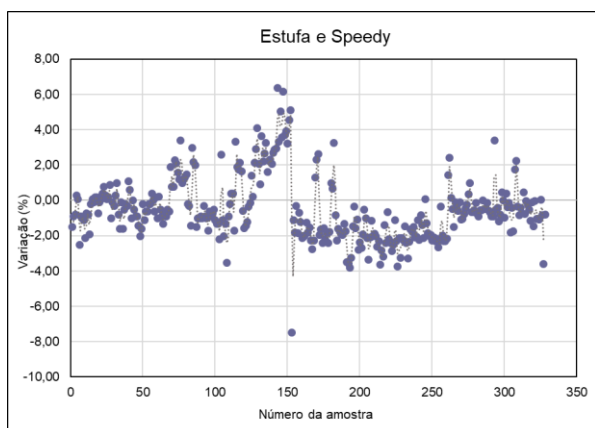


Figura 5 – Desvio entre o método da estufa e Speedy

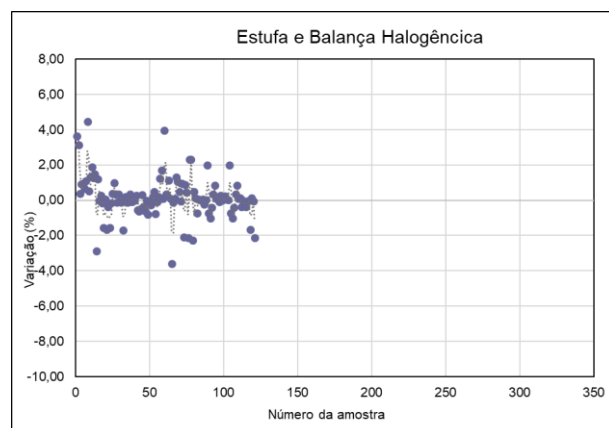


Figura 4 - Desvio entre o método da estufa e balança halogênica

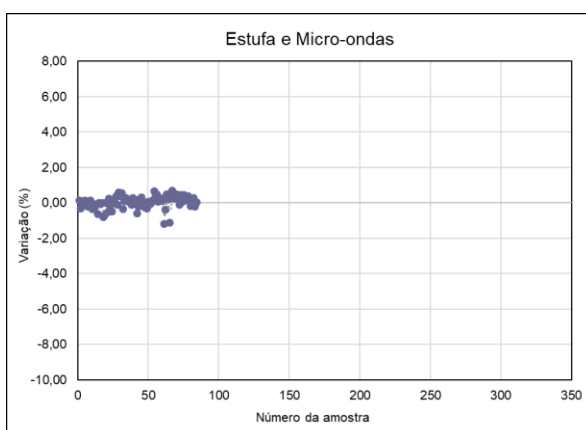


Figura 6 - Desvio entre o método da estufa e micro-ondas

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após a compilação dos dados, foi realizada uma avaliação crítica para interpretar os resultados. Inicialmente, foram elaborados gráficos com o teor de umidade medido pelo método em estufa como variável independente (eixo x) e o resultado dos demais métodos como variável dependente (eixo y). Posteriormente, foram delimitadas retas para os limites inferior e superior dos dados. Essas retas foram determinadas manualmente, de forma a englobar a maior parte dos resultados. Depois, foi possível definir uma equação linear para cada reta. Feito isso, as equações derivadas dos limites superior, inferior e regressão linear têm

como objetivo estabelecer uma correlação entre os valores obtidos pelo método da estufa e sua equivalência em cada método alternativo. Isso permite estimar o que se pode esperar dos ensaios da estufa após a realização dos ensaios de campo, isto é, a partir do resultado rápido obtido pelos métodos alternativos, é possível ter uma estimativa do teor de umidade “real” obtido pelo método padronizado da estufa. Os gráficos para cada comparativo estão representados entre as Figura 8 e Figura 11.

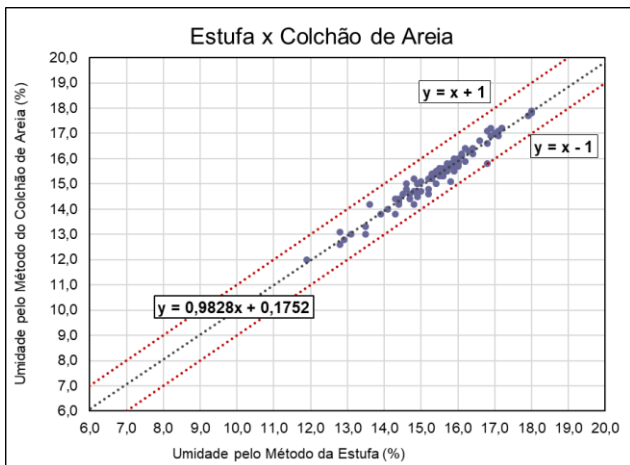


Figura 8 – Comparação entre método da estufa e colchão de areia

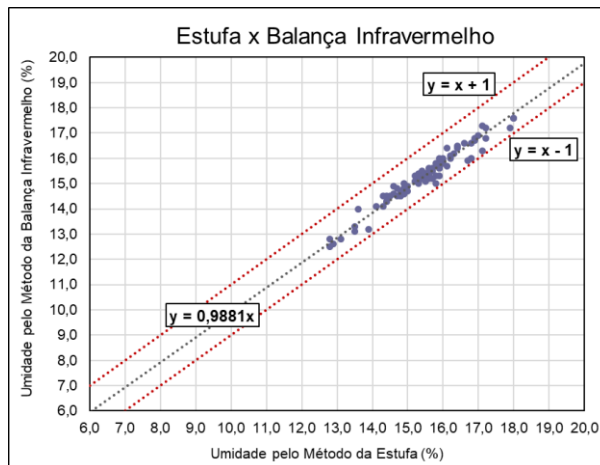


Figura 7 – Comparação entre método da estufa e balança infravermelho

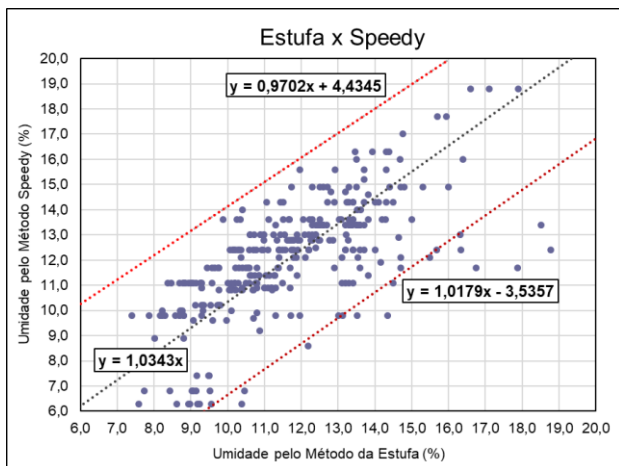


Figura 10 – Comparação entre método da estufa e Speedy

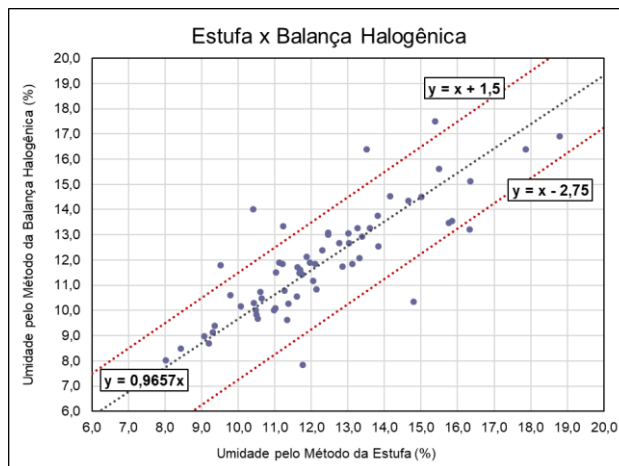


Figura 9 - Comparação entre método da estufa e balança halogênica

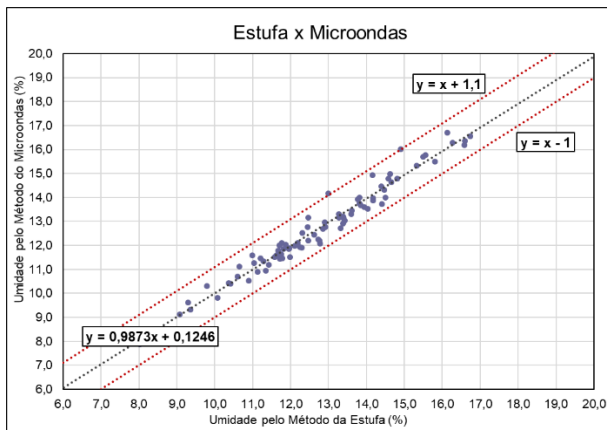


Figura 11 – Comparação entre método da estufa e micro-ondas

A Tabela 3 a seguir apresenta todas as equações encontradas para cada método comparado:

Tabela 3 – Equações obtidas

Método	Equação		
	Limite superior	Regressão linear	Limite inferior
Estufa x Colchão de Areia	$y = x + 1$	$y = 0,9828x + 0,1752$	$y = x - 1$
Estufa x Balança Infravermelho	$y = x + 1$	$y = 0,9881x$	$y = x - 1$
Estufa x Speedy	$y = 0,9702x + 4,4345$	$y = 1,0343x$	$y = 1,0179x - 3,5357$
Estufa x Balança Halogênica	$y = x + 1,5$	$y = 0,9657x$	$y = x - 2,75$
Estufa x Microondas	$y = x + 1,1$	$y = 0,9873x + 0,1246$	$y = x - 1$

Observando a tabela acima, o comparativo entre o método da estufa e o método Speedy foi utilizado como exemplo para desenvolver os cálculos. Adotou-se valores de $x = 14$, que representa a umidade obtida no ensaio da estufa. O objetivo é determinar qual valor o método Speedy deveria apresentar. Abaixo, estão representados os cálculos realizados:

Limite superior:

$$\begin{aligned}
 y &= 0,9702x + 4,4345 \\
 x &= 14 \\
 y &= 0,9702 * 14 + 4,4345 \therefore y = 18,0173 \cong 18
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

Limite inferior:

$$\begin{aligned}
 y &= 1,0179x - 3,5357 \\
 x &= 14 \\
 y &= 1,0179 * 14 - 3,5357 \therefore y = 10,7149 \cong 11
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

Portanto, um teor de umidade de 14% obtido pelo método da estufa poderia resultar em valores de umidade entre 11% e 18%, quando aferidos pelo método Speedy. É importante destacar que essa diferença é significativa, uma vez que para os intervalos de umidade alvo é comum haver variações de cerca de até 4%.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Tendo em vista o aumento da produção de rejeitos pelo processo de beneficiamento do minério de ferro é preciso propor métodos alternativos para disposição, e consequentemente, ter agilidade para execução dessas obras. Desse modo, tem-se para controle tecnológico alguns ensaios que auxiliam quanto ao atendimento das premissas de projeto. Este estudo foi realizado com o intuito de comparar os resultados obtidos pelo ensaio da estufa com outros ensaios de aferição do teor de umidade que são realizados durante o empilhamento afim de não prolongar a liberação das praças mediante conferência deste parâmetro dos materiais.

A partir da avaliação dos resultados, é notório que alguns métodos alternativos se apresentaram com maior variação que outros, mostrando-se não confiáveis para aferição rápida, e consequentemente, liberação das camadas em campo. Exemplificando, o método do *Speedy Test* demonstrou elevada variação em relação ao método da estufa. Estas diferenças podem penalizar a estabilidade da pilha durante a vida útil, considerando que, em casos de altas umidades, não é possível atingir o índice de vazio necessário, e para garantir o comportamento dilatante do material.

Tendo isso em vista as análises feitas, cabe ressaltar a importância da utilização consistente do método da estufa como uma base de comparação para os métodos alternativos, visando aprimorar os resultados e manter a conformidade com os parâmetros estabelecidos no projeto. Entretanto, é crucial reconhecer que os métodos alternativos representam soluções que otimizam as atividades de campo, eliminando a necessidade de aguardar o tempo prolongado para a liberação dos resultados.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar minha sincera gratidão à Marina Medeiros, Fernanda Matarazo e Antônio Freire, cuja colaboração e dedicação foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho. Também sou imensamente grata à BVP Engenharia, pelo apoio contínuo e recursos fornecidos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CAPUTO, Homero Pinto. *Mecânica dos Solos e Suas Aplicações*. Rio de Janeiro: LTC, 6ª edição, 1996.
- PINTO, Carlos de Sousa. *Curso básico de mecânica dos solos em 16 aulas*. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006. 355 p.
- MASSAD, Faíçal. *Mecânica dos solos experimental*. São Paulo: Oficina de Textos, 2016. 287 p., il. Inclui bibliografia. ISBN 9788579752001
- ABNT. NBR 6457: *Solos - Preparação de amostras para ensaios de compactação, caracterização e determinação do teor de umidade*. Rio de Janeiro, 2024.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM. DNER-ME 052/94 – *Solos e agregados miúdos – determinação da umidade com emprego do “Speedy”*. DNER, 1994
- UDesc. *Apostila Sobre Umidade Dos Solos*. Disponível em: <https://www.udesc.br/arquivos/cct/id_cpmenu/1036/Apostila_Umidade_dos_solos_15816259409124_1036.pdf>. Acesso em: 18 mar. 2024.
- Oliveira, L. F. C., & Roque, C. G. (2016). *Determinação Da Umidade Do Solo Por Micro-Ondas E Estufa Em Três Texturas De Um Latossolo Vermelho-Amarelo Do Cerrado*. *Revista De Agricultura Neotropical*, 3(4), 60–64. <https://doi.org/10.32404/rean.v3i4.1163>
- Revista UEG: Biociências e Ciências da Saúde. *Comparação De Métodos Para Determinação De Umidade Em Queijos: Método Tradicional E Balança Determinadora De Umidade Por Infravermelho*. [s.l.], [s.d.]. Disponível em: <<https://www.revista.ueg.br/index.php/biociencia/article/view/3684>>. Acesso em: 18 mar. 2024.
- EMBRAPA. *Produção de mudas de maracujazeiro*. Cruz das Almas: EMBRAPA Mandioca e Fruticultura, 1998. 36 p. (Circular Técnica, 33). Disponível em: <<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/46448/1/CrcularTecnica33.pdf>> Acesso em: 18 mai. 2024.
- Instituto Brasileiro de Mineração (IBRAM). *Desempenho da mineração tem queda em 2022, mas setor cria mais empregos e aumentará investimentos para US\$ 50 bi até 2027* [online]. Disponível em: <<https://ibram.org.br/noticia/desempenho-da-mineracao-tem-queda-em-2022-mas-setor-cria-mais-empregos-e-aumentara-investimentos-para-us-50-bi-ate-2027>>. Acesso em: 19 mar. 2024.