XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF
DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.1/14

Avaliação da aplicabilidade da correlação de Robertson & Cabal (2010) para a definição do peso específico de rejeitos de minério de ferro.

Demetrius Chianello Cancella
Eng. Geotécnico, Walm, Belo Horizonte, Brasil, demetrius.chianello@walmengenharia.com.br

Lucas Almeida Campos
Eng. Geotécnico, Walm, Belo Horizonte, Brasil, lucas.campos@walmengenharia.com.br

Jhon Fredy Tiga Entralgo
Eng. Geotécnico, Walm, Belo Horizonte, Brasil, jhon.entralgo@walmengenharia.com.br

Renata Mattos Sampaio De Araujo Andrade
Eng. Geotécnica, Vale, Belo Horizonte, Brasil, renata.mattos.sampaio@vale.com

Amanda De Sales Marotta Da Silva
Eng. Geóloga, Progen, Belo Horizonte, Brasil, c0720185@vale.com

Ana Luiza Rezende Leal
Gerente de Engenharia, Vale, Belo Horizonte, Brasil, ana.leal@vale.com

RESUMO: A determinação da densidade dos materiais *in situ* é comumente realizada a partir de ensaios de campo e de laboratório. Essas determinações geralmente são obtidas por meio da coleta de amostras em superfície, a partir de blocos indeformados, ou em profundidade, por meio de amostradores acoplados a sondagens. No entanto, a determinação da densidade *in situ* de rejeitos de minério de ferro apresenta significativa dificuldade, tanto pela complexidade de se coletar amostras indeformadas em profundidade quanto pela limitação em reproduzir, em laboratório, as condições de campo que influenciam diretamente a densidade do material. Com o objetivo de auxiliar na determinação desses parâmetros em projetos conceituais, diversos autores propuseram correlações para a definição da densidade *in situ* de solos naturais. Dentre as metodologias, destaca-se a proposta por Robertson & Cabal (2010) para ensaios do tipo CPTu, que correlaciona a densidade relativa dos grãos, a resistência de ponta corrigida (qt) e o atrito lateral (fs). Diante disso, o presente artigo teve como objetivo avaliar a eficiência da determinação do peso específico de rejeitos de minério de ferro a partir da correlação proposta por Robertson & Cabal (2010). Para isso, foram consolidados trinta e seis conjuntos de ensaios de peso específico dos grãos, densidade *in situ* e caracterização granulométrica e mineralógica. Além disso, foram avaliadas faixas de variação da densidade obtidas a partir de ensaios triaxiais e oedométricos em amostras reconstituídas. Os resultados mostraram que os valores obtidos com a formulação de Robertson & Cabal (2010) apresentaram boa convergência entre os valores medidos e aqueles calculados indiretamente a partir dos ensaios CPTu. A correlação proposta fornece uma estimativa ajustada às medições laboratoriais, com a vantagem de oferecer valores contínuos ao longo da profundidade e captar a variabilidade do peso observada nos ensaios, representando assim uma alternativa prática frente às dificuldades de medição direta da densidade de rejeitos em campo.

PALAVRAS-CHAVE: Densidade *in situ*, Rejeitos de minério de ferro, Ensaios CPTu, Robertson & Cabal (2010), Peso específico, Correlação geotécnica.

ABSTRACT: The determination of in situ material density is commonly carried out through field and laboratory tests. These determinations are generally obtained by collecting samples at the surface, using

undisturbed blocks, or at depth through samplers attached to drillings. However, determining the in situ density of iron ore tailings presents significant challenges, both due to the difficulty of collecting undisturbed samples at depth and the limitations in reproducing, in the laboratory, the field conditions that directly influence material density. To support the determination of these parameters in conceptual designs, several authors have proposed correlations for defining the in-situ density of natural soils. Among these methodologies, the approach proposed by Robertson & Cabal (2010) for CPTu tests stands out, correlating the grain relative density, corrected cone resistance (qt), and sleeve friction (fs). Therefore, this study aimed to assess the effectiveness of determining the unit weight of iron ore tailings based on the correlation proposed by Robertson & Cabal (2010). For this purpose, thirty-six sets of tests were compiled, including unit weight of solids, in situ density, and granulometric and mineralogical characterization. Additionally, ranges of density variation obtained from triaxial and oedometer tests on reconstituted samples were evaluated. The results showed that the values obtained using the Robertson & Cabal (2010) formulation exhibited good convergence between measured values and those indirectly calculated from CPTu tests. The proposed correlation provides an estimate that aligns well with laboratory measurements, with the advantage of offering continuous values along depth and capturing the variability in unit weight observed in the tests, thus representing a practical alternative in light of the challenges associated with directly measuring the density of tailings in the field.

KEYWORDS: In situ density, Iron ore tailings, CPTu tests, Robertson & Cabal (2010), Unit weight estimation, Geotechnical correlation.

1 INTRODUÇÃO

A segurança de barragens de rejeitos de mineração consolidou-se como uma das principais preocupações da engenharia geotécnica contemporânea, especialmente após eventos recentes de ruptura que evidenciaram a elevada vulnerabilidade dessas estruturas e suas graves consequências socioambientais (Morgenstern et al., 2016; Robertson et al., 2019; Santamarina et al., 2019). Nesse contexto, tornou-se imprescindível o desenvolvimento e a aplicação de metodologias de investigação capazes de fornecer uma caracterização confiável e contínua dos rejeitos depositados, considerando sua elevada heterogeneidade, anisotropia e histórico de deposição predominantemente hidráulica (Vick, 1990; Blight, 2010).

Entre os parâmetros geotécnicos fundamentais para a avaliação da segurança dessas estruturas, destaca-se a determinação da densidade in situ (ou peso específico), uma vez que esse parâmetro influencia diretamente o estado de tensões efetivas, o comportamento tensão–deformação, o potencial de liquefação estática ou cíclica e, consequentemente, a estabilidade global das barragens de rejeitos (Jefferies & Been, 2015). Em depósitos de rejeitos, variações espaciais de densidade podem ocorrer de forma significativa, associadas a processos de segregação granulométrica, mudanças operacionais ao longo do tempo e diferentes mecanismos de adensamento pós-deposição (Fourie et al., 2001).

A obtenção de amostras representativas para ensaios laboratoriais em rejeitos dispostos por via hidráulica é frequentemente limitada por distúrbios de amostragem, colapsabilidade e dificuldade de preservação da estrutura original do material (Schnaid, 2009; Reid et al., 2021). Diante dessas restrições, métodos de investigação in situ contínuos, em especial o ensaio de piezocone (CPTu), tornaram-se amplamente adotados como padrão na indústria de mineração para a caracterização geotécnica de rejeitos e solos moles associados a barragens (Lunne et al., 1997; Mayne, 2007).

O ensaio CPTu fornece perfis contínuos de resistência de ponta corrigida (qt), atrito lateral (Fs) e poropressão (u), permitindo a estimativa indireta de parâmetros físicos e mecânicos por meio de correlações empíricas. Dentre essas, destacam-se as metodologias propostas por Robertson & Cabal (2010), posteriormente aprimoradas por Robertson (2016; 2022), que relacionam o peso específico do solo ao índice de comportamento do solo (Ic) e aos parâmetros normalizados do CPTu. Tais abordagens são amplamente difundidas na prática geotécnica, sobretudo em projetos envolvendo solos naturais sedimentares.

Entretanto, a aplicação direta dessas correlações a rejeitos de mineração apresenta limitações relevantes. Rejeitos possuem características particulares, como densidade real dos grãos distinta dos solos naturais, distribuição granulométrica frequentemente mal graduada, presença de partículas angulares e mineralogia específica, além de trajetórias de tensões e processos de consolidação não convencionais (Carrera et al., 2011; Bedin et al., 2012). Estudos recentes têm demonstrado que rejeitos classificados como sand-like ou clay-like

segundo critérios baseados no *Ic* podem apresentar respostas mecânicas significativamente diferentes daquelas observadas em solos naturais com classificação equivalente (Reid et al., 2021), o que introduz incertezas adicionais na estimativa de parâmetros como o peso específico.

Nos últimos anos, diversos trabalhos têm se dedicado à reavaliação crítica das correlações baseadas em CPTu quando aplicadas a rejeitos de mineração, buscando ajustes regionais, calibração com dados laboratoriais e integração com métodos complementares, como ensaios sísmicos (SCPTu), ensaios de campo de densidade e técnicas baseadas em aprendizado de máquina. Revisões recentes (por exemplo, Jefferies & Been, 2020; Robertson, 2022; Pineda et al., 2021; Oliveira et al., 2023) apontam que, embora o CPTu continue sendo uma ferramenta robusta para investigação de rejeitos, a estimativa do peso específico permanece associada a incertezas relevantes, especialmente em materiais finos, contractivos e suscetíveis à liquefação.

Diante desse cenário, o presente artigo tem como objetivo analisar e comparar a aplicabilidade de diferentes correlações de estimativa de densidade baseadas em dados de CPTu, com ênfase na metodologia clássica de Robertson & Cabal (2010) e em abordagens mais recentes propostas na literatura entre 2016 e 2024. O estudo é aplicado a rejeitos de minério de ferro com alto teor (50%) dispostos em uma barragem em processo de descaracterização, buscando validar as estimativas obtidas a partir do CPTu por meio de dados laboratoriais provenientes de amostras coletadas em campo. Adicionalmente, pretende-se identificar a metodologia que apresenta maior confiabilidade para fins de análise de estabilidade e avaliação do potencial de liquefação em barragens de rejeitos.

3 METODOLOGIA

A presente pesquisa fundamenta-se na análise comparativa da densidade do solo obtida por meio de diferentes métodos laboratoriais e de campo. O objetivo é correlacionar massas específicas obtidas a partir de diferentes procedimentos.

Em termos de ensaios de laboratório, foram utilizados os ensaios oedométricos e as etapas de adensamento dos ensaios triaxiais drenados e não drenados CIUsat e CIDsat realizados em corpos de prova reconstituídos.

Os ensaios triaxiais foram realizados sob as condições Consolidados Isotropicamente e Drenados (CID) e Consolidados Isotropicamente e Não Drenados (CIU). Após a moldagem dos corpos de prova, procedeu-se à fase de saturação e, subsequentemente, ao adensamento isotrópico sob tensões confinantes pré-determinadas. O cálculo da densidade pós-adensamento foi calculado a partir da variação de volume medida pela bureta (no caso de corpos saturados) ou pela variação de volume total estimada via transdutores de deslocamento.

O ensaio edométrico seguiu as diretrizes da NBR 12007. As amostras foram inseridas em anéis metálicos rígidos e submetidas a estágios crescentes de carga vertical. A densidade para comparação foi extraída ao final do estágio de tensão correspondente às tensões de campo.

O peso específico *in situ* do rejeito foi determinado a partir dos resultados dos ensaios de caracterização do controle tecnológico realizados em 2021, 2022 e 2023. Durante o processo de descaracterização foi realizado ensaios de caracterização e densidade *in situ* a partir dos métodos de frasco de areia e cilindro biselado em 12 pontos selecionados a cada 2,5 metros de escavação.

Por último, foi a avaliado o peso específico do solo *in situ,* usando a proposta de Robertson & Cabal (2010) que correlaciona o peso específico *in situ* com a densidade relativa dos grãos, a resistência de ponta corrigida qt e o atrito lateral *fs*, como mostra a Equação (1):

$$\frac{\gamma}{\gamma_w} = \frac{G_s}{2{,}65}\left[0{,}27 log R_f + 0{,}36 log \frac{q_t}{p_a} + 1{,}236\right] \quad (1)$$

Donde,
Rf= Razão de atrito = (*fs*/*qt*)100%,
γw= Peso específico da água nas mesmas unidades de *γ*,
pa=Pressão atmosférica nas mesmas unidades da resistência real mobilizada, *qt*,
Gs=Gravidade específica dos grãos.

3 RESULTADOS

Com o acesso aos dados necessários para a realização das análises, foi realizada a consolidação dos dados seguidos das avaliações, calibrações e estatísticas para a correlação entre a metodologia proposta por Robertson & Cabal (2010) e os resultados da desnidade *in situ* dos rejeitos estudados.

A Figura 1. reúne todos os resultados dos cálculos separados por amostra, indicando o tipo de ensaio e a variação do peso específico dos grãos, o D50 e conteúdo de hematita de cada amostra.

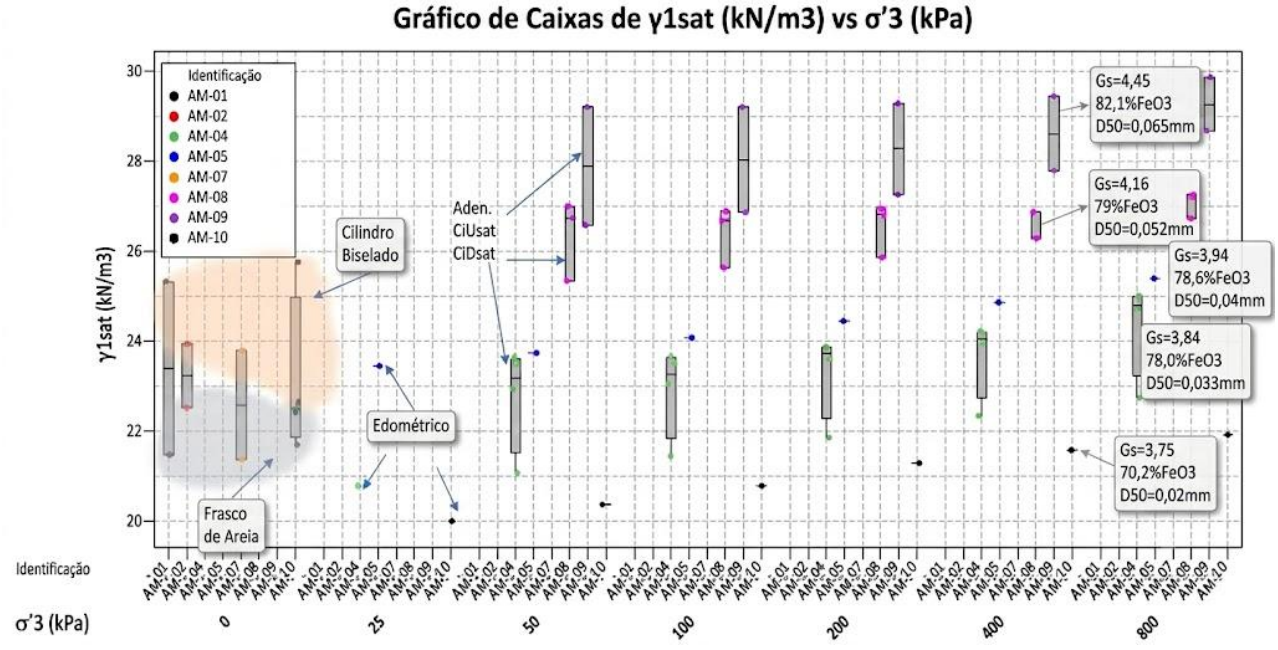


Figura 1. Variação do peso específico saturado do rejeito com a tensão de adensamento para 8 amostras.

Os resultados indicam uma grande variabilidade do peso específico saturado in situ, influenciada pela granulometria e pelo peso específico dos grãos (conteúdo de ferro). O rejeito próximo à crista é composto por material mais grosso, com maior conteúdo de ferro, e, consequentemente, mais pesado. Este rejeito grosso é semelhante à amostra AM-09. O rejeito mais fino e abundante é representado pelas amostras AM-04 e AM-05. A amostra AM-08 representa um solo transicional entre o grosso e o fino.

Para umas condições médias e uma tensão efetiva de 400 kPa (aprox. entre 17 e 24 metros de profundidade) e considerando que a tensão de adensamento final $\sigma'3$ é igual a tensão vertical efetiva pre-falha, $\sigma'v0$, os resultados mostram que podem ser encontrados pesos específicos *in situ* variando entre 22 kN/m³ e 30 kN/m³ com valor médio de 25 kN/m³ com um intervalo de confiança de 95% igual a ± 0,8kN/m3, como mostra a regressão da Figura 2. que exclui os valores medidos *in situ*.

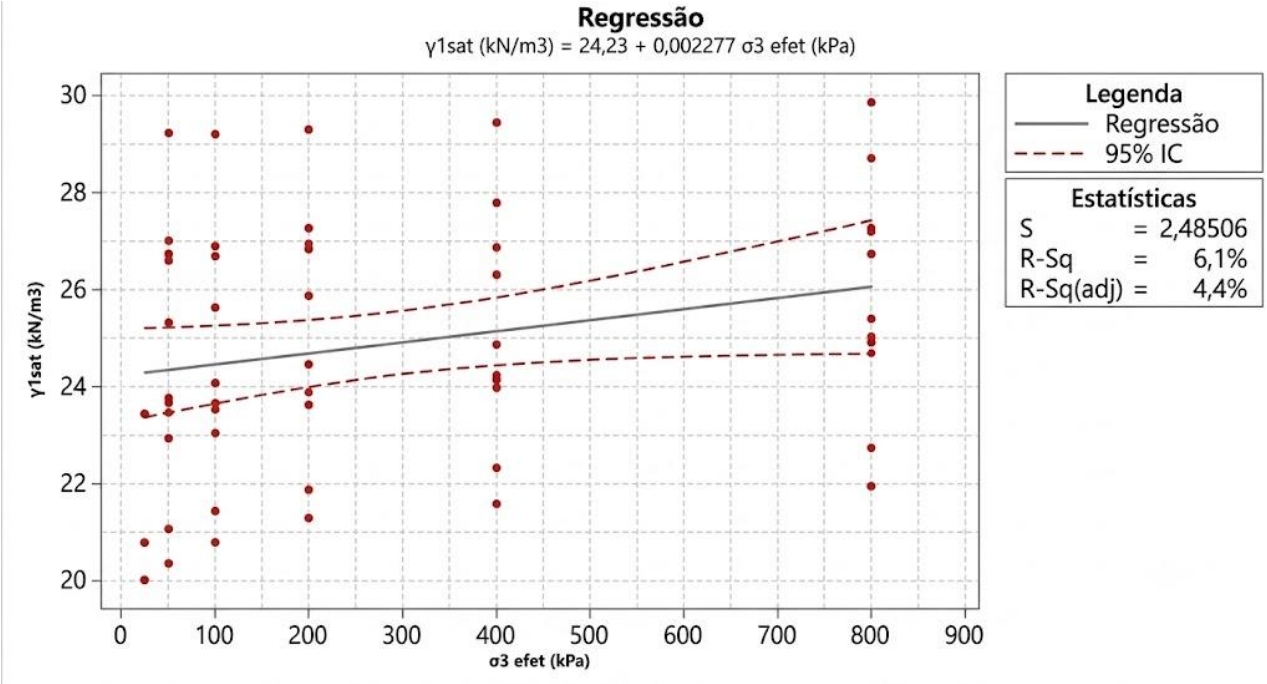


Figura 2. Regressão linear do peso específico variando com a tensão efetiva de adensamento para todas as medições em laboratório.

Finalmente, foi calculado o peso específico do rejeito usando a equação de Robertson & Cabal (2010), adotando um Gs ajustado igual a 4,0 g/cm³, conforme obtido em laboratório**Erro! Fonte de referência não encontrada.**. As estatísticas básicas do peso específico calculado com a equação de Robertson & Cabal (2010) ilustras na figura a seguir foram definidas a partir de 81.732 medições do CPTu. Observa-se que as frequências dos valores calculados apresentam uma distribuição normal com média de 26,7kN/m3 e desvio padrão de 1,82kN/m3.

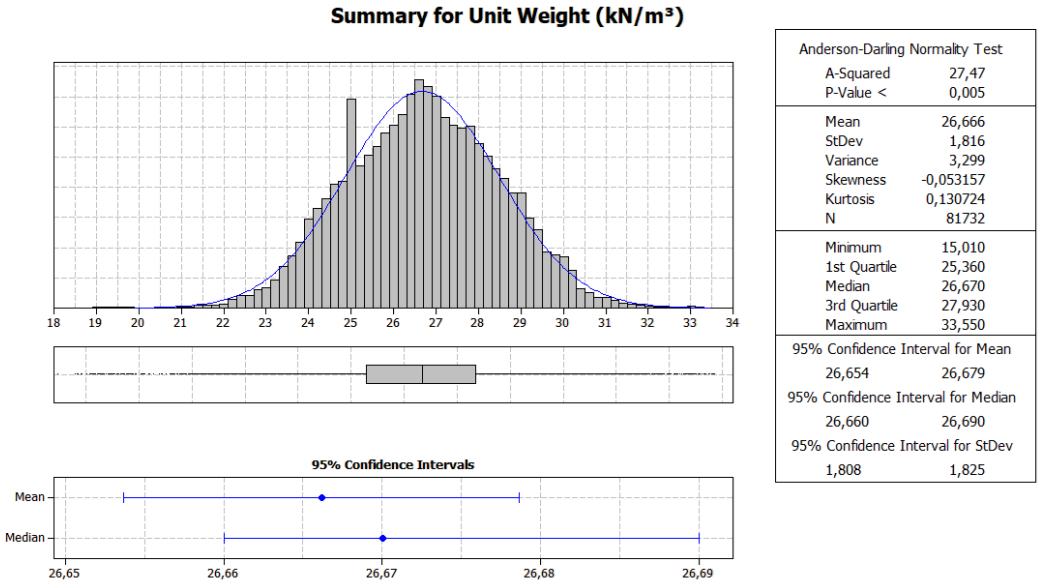


Figura 3. Estatísticas básicas dos valores calculados do peso específico do Rejeito usando a proposta de Robertson & Cabal (2010).

A comparativa entre os valores obtidos com a formulação de Robertson & Cabal (2010) e os valores obtidos dos ensaios de adensamento e triaxiais, mostra uma boa convergência entre os valores medidos e os calculados indiretamente a partir dos ensaios CPTu, como pode ser observado na Figura 4.

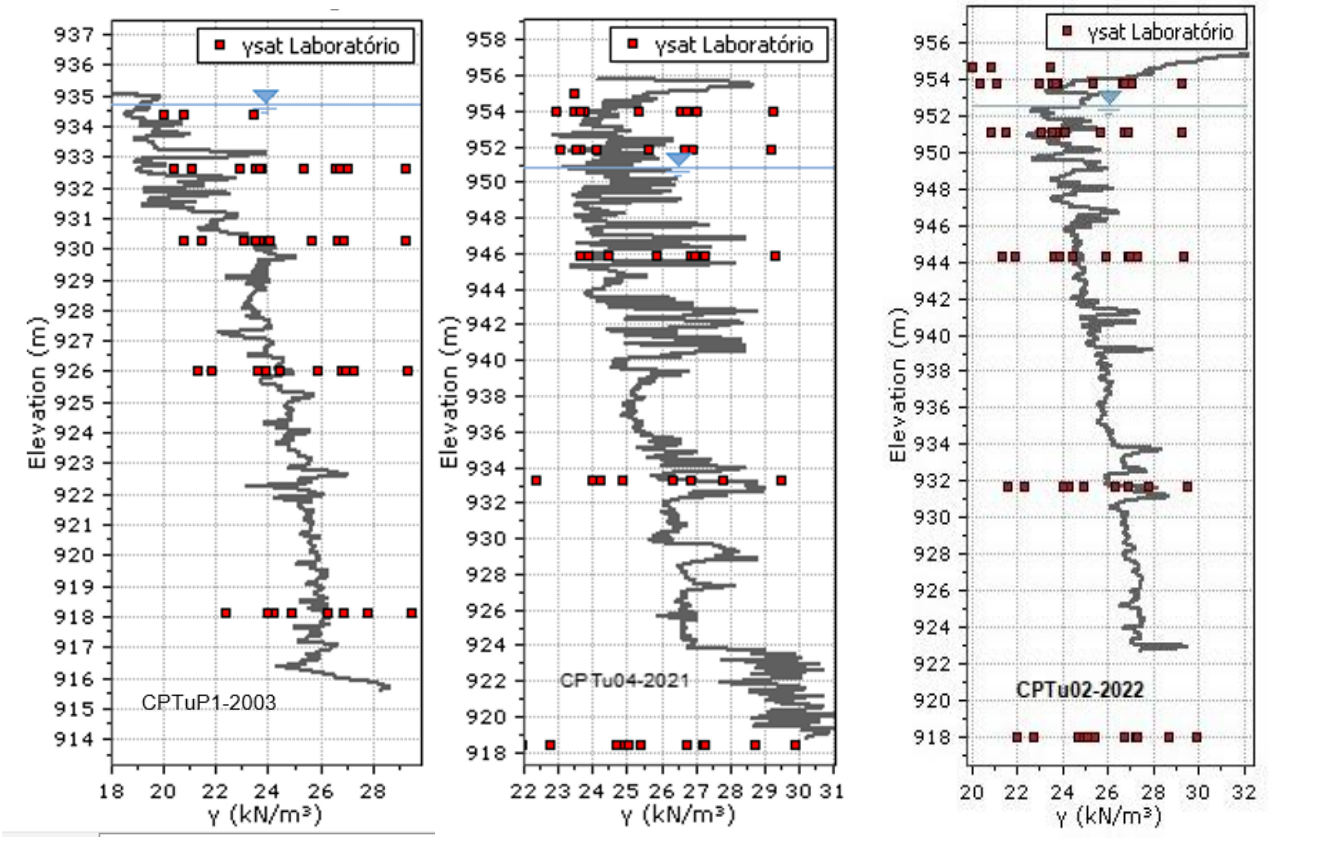


Figura 4. Comparativa para três ensaios CPTu entre peso específico do Rejeito usando a proposta de Robertson & Cabal (2010) e os valores obtidos em laboratório.

A correlação de Robertson & Cabal (2010) fornece uma estimativa ajustada às medições em laboratório, com a vantagem de oferecer valores contínuos ao longo da profundidade e que captam a variabilidade do peso observada nos ensaios de laboratório.

3 CONCLUSÕES

Os presente estudo realizou uma comparação entre resultados obtidos na determinação da densidade dos rejeitos a partir de amostras reconstituidas em laboratório, ensaiadas através de densidade *in situ* e por meio da correlação proposta por Robertson & Cabal (2010) ajustadas para o Gs de 4,0 g/cm³ do rejeito.

Em geral, a correlação de Robertson & Cabal (2010) forneceu uma estimativa ajustada às medições em laboratório e de campo, com a vantagem de oferecer valores contínuos ao longo da profundidade e que captam a variabilidade do peso observada nos ensaios de laboratório.

Entretanto é imprescindível que a caracterização de densidade em rejeitos de minério de ferro não tenha uma abordagem híbrida, ou seja, os ensaios realizados em campo devem ser calibrados e avaliados de forma conjunta ente o CPTu e os ensaios especiais de Laboratório.

Nesse contexto, os ensaios de campo (Frasco e Cilindro) fornecem a realidade física imediata e o controle de deposição. O CPTu oferece a estratigrafia contínua e a resposta em larga escala. Os ensaios especiais em laboratório (Triaxial/Edométrico) irão proporcionar as informações para a definição dos limites de deformabilidade e resistência sob tensões confinantes dos materiais ensaiados *in situ*, permitindo, assim, uma melhor calibração dos dados e avaliações mais precisas sobre as condições atuais e extremas do rejeito.

Ressalta-se que a aplicabilidade das formulações de Robertson & Cabal (2010) para este cenário depende estritamente de uma calibração local. As constantes empíricas globais, desenvolvidas majoritariamente para solos naturais, foram substituídas por coeficientes específicos do rejeito de ferro. calibração foi alcançado por meio da regressão matemática entre os dados dos ensaios de laboratório (triaxiais), perfis contínuos de penetração (CPTu) e ensaios de densidade *in situ*, assegurando que o modelo represente com fidelidade a mecânica e comportamento do material depositado na barragem à montante. Sem essa

calibração, as análises de estabilidade podem operar com margens de segurança ilusórias, subestimando as tensões atuantes e o estado de compacidade real do depósito.

O artigo traz uma comparação entre diferentes abordagens e faixas de valores obtidos por diferentes métodos e, apesar da correlação proposta por Robertson & Cabal (2010) estar dentro da faixa encontrada pelos diferentes métodos, estudos complementares considerando amostras indeformadas de rejeito mostra-se uma abordagem promissora para a estimativa e calibração das densidades obtidas em campo com a equação ajustadas de Robertson & Cabal (2010). A calibração da equação tem potencial para auxiliar na estratificação dos materiais em larga escala e, consequentemente, auxiliar na identificação tridimensional de materiais com comportamentos geotécnicos distintos, auxiliando no entendimento geotécnico e controle de estruturas suscetível à liquefação,

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a WALM Engenharia e VALE S.A. pela disponibilização dos dados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Been, K., & Jefferies, M. (2021). State parameter interpretation in tailings. *ASCE Geo-Congress Proceedings*.

Jefferies, M. G., & Been, K. (2020). Soil Liquefaction: A Critical State Approach. CRC Press.

Robertson, p. K.; Cabal, k. L. Estimating soil properties using CPT - a companion to the guide to CPT design. 1. ed. Signal Hill, CA: Gregg Drilling & Testing, Inc., 2010.

Robertson, p. K. Cone penetration test (CPT)-based soil behaviour type (SBT) classification system — an update. Canadian Geotechnical Journal, v. 53, n. 12, p. 1910-1927, 2016. Disponível em: Canadian Science Publishing.

Robertson, p. K.; Cabal, K. L. Guide to Cone Penetration Testing. 7. ed. Signal Hill, CA: Gregg Drilling LLC, 2022. Disponível em: CPT-Robertson Publications.

Pineda, J. A., Robertson, P. K., & Shuttle, D. (2021). CPT-based characterization of tailings deposits. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering.

Oliveira, L. F. S., Gomes, R. C., & Futai, M. M. (2023). Applicability of CPT-based correlations for tailings dams. Soils and Rocks.