

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2024/431

# Análise da Resistência não Drenada em Reservatórios de Rejeitos de Mineração de Bauxita Através de Ensaios CPTu e Palheta

Robert Nagai Gonçalves da Cruz

Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil, robertnagaig@gmail.com

Lúcio Flávio de Souza Villar

Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil, lvillar@etg.ufmg.br

Ecidinéia Pinto Soares de Mendonça

Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil, ecidineia@etg.ufmg.br

Antônio Ananias de Mendonça

Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil, aananias@etg.ufmg.br

**RESUMO:** Este artigo apresenta a comparação de valores de resistência ao cisalhamento não drenada ( $S_u$ ) obtidos através de ensaios CPTu e palheta em reservatório de rejeito de processamento de bauxita (lama vermelha) no Brasil. Através do ensaio de palheta, foi possível obter, de maneira direta, a  $S_u$  em profundidades especificadas. Através do ensaio CPTu não drenado, foi possível obter um perfil contínuo deste parâmetro ao longo da profundidade. O fator de capacidade de carga baseado na resistência de ponta medida no cone ( $N_{kt}$ ), que é utilizado na formulação para determinar a  $S_u$  a partir dos ensaios CPTu, foi determinado tanto por meio de calibração utilizando os próprios resultados do ensaio de palheta como, também, conforme as propostas de Robertson (2012) e Mayne e Peuchen (2018). Verificou-se que, em termos médios, as menores variações entre o perfil contínuo de  $S_u$  estimado com o ensaio CPTu em comparação com os resultados pontuais de  $S_u$  fornecidos pelo ensaio de palheta foram obtidas com o uso do fator  $N_{kt}$  estimado conforme proposto por Robertson (2012) quando o material se apresentava como mais argiloso (mais de 60% de fração argila). Porém, quando o material ensaiado apresentou em torno de 40% de fração argila, o melhor ajuste do perfil contínuo de  $S_u$  ao longo da profundidade via ensaio CPTu com as medições feitas pelo ensaio de palheta foi obtido utilizando o fator  $N_{kt}$  calibrado a partir dos resultados do ensaio de palheta.

**PALAVRAS-CHAVE:** Resistência ao cisalhamento não drenada; resíduo de mineração; ensaio piezocone; ensaio de palheta.

**ABSTRACT:** This paper presents a comparative analysis of the undrained shear strength ( $S_u$ ) obtained by CPTu and vane tests in two reservoirs of bauxite tailings (red muds) in Brazil. Through the vane test, it was possible to estimate  $S_u$  at specified depths. Through the CPTu test,  $S_u$  could be estimated using empirical formulations, thereby obtaining a continuous profile of  $S_u$ . Different methodologies were applied to determine the  $S_u$  of the mining waste from the results of the CPTu tests. The  $N_{kt}$  factor is an important input data for these methodologies and was estimated using different approaches. One approach was according to Schnaid and Odebrecht (2012), based on the results obtained from the vane test, and also by semi-empirical methods proposed by Robertson (2012) and Mayne and Peuchen (2018). It was found that, on average, the smallest variations for the  $S_u$  profile estimated with the CPTu test, compared to results provided by the vane test, were obtained using the  $N_{kt}$  factor estimated as proposed by Robertson (2012) when the waste was classified as clay, and using the  $N_{kt}$  factor estimated as proposed by Schnaid and Odebrecht when it was classified as silt, evaluating the effects of the drainage conditions in the tests.

**KEYWORDS:** undrained shear strength; mining tailings; piezocone tests; vane tests.

## 1 INTRODUÇÃO

Análises de estabilidade e do potencial de liquefação de barragens ou pilhas de disposição de rejeitos e/ou estéril de mineração exigem entendimento do comportamento geomecânico destes materiais. Considerando que eles, como pior hipótese, se encontram saturados ou quase, o que é comum dado o método

de disposição em geral ainda empregado, e considerando que eles podem ser submetidos a carregamentos não drenados, uma das propriedades geotécnicas necessárias para uso nas análises de estabilidade é a resistência ao cisalhamento não drenada ( $S_u$ ), especialmente para o caso de solos finos, como os rejeitos do beneficiamento da bauxita, material analisado neste trabalho. De acordo com Bello & Coutinho (2006), um dos principais aspectos a se considerar é que não existe um único valor de  $S_u$  para um solo, uma vez que esse parâmetro varia com a profundidade, além de outros fatores. E, além das propriedades intrínsecas do material avaliado, a definição do valor do  $S_u$  dependerá da técnica utilizada para sua determinação, se direta ou indireta, por exemplo, sendo que é importante a adoção de fatores de correção (PINTO, 2006).

Há diversos métodos e ensaios (laboratório ou campo) para a obtenção da  $S_u$ . Entre os ensaios de campo, cita-se o ensaio de palheta (*Vane Shear Test*) e o CPTu (*Cone Penetration Test with Pore pressure Measurement*). Eles são comuns de serem utilizados na determinação de parâmetros para muitas barragens e pilhas de disposição de rejeitos (Reid, 2016; Pinto et al. 2023), tanto para o barramento como para os reservatórios propriamente ditos. Segundo Reid (2016) e Pinto et al (2023), no entanto, os métodos disponíveis para avaliar a resistência não drenada diretamente dos resultados do CPTu possuem incertezas e, por isso, o ensaio de palheta é frequentemente usado para permitir o desenvolvimento de correlações entre os resultados do CPTu e a resistência ao cisalhamento não drenada para um local específico. Pinto et al. (2023) ainda alertam que a aplicabilidade destas correlações deve ser avaliada localmente, uma vez que rejeitos de mineração possuem características únicas, tais como sua composição geoquímica, que pode variar tanto com o avanço da lavra quanto com o processamento usado para obtenção do mineral de interesse; a compressibilidade; a estrutura da camada, que é afetada pela forma de disposição, dentre outros fatores.

O presente artigo compara os resultados de  $S_u$  determinados em profundidades específicas via ensaio de palheta com o perfil contínuo de  $S_u$  obtido via ensaio CPTu. Os ensaios foram executados em dois reservatórios de disposição de lamas vermelhas (rejeitos de processamento de bauxita). No caso do ensaio CPTu, a determinação do  $S_u$  foi feita variando o fator de capacidade de carga baseado na resistência de ponta medida no cone ( $N_{kt}$ ), que foi determinado tanto conforme as propostas de Robertson (2012) e Mayne e Peuchen (2018) como via calibração com os próprios valores medidos do ensaio de palheta. Não se pretendeu discutir os métodos de ensaio e da determinação do parâmetro em si, já que estão sendo usados métodos bastante difundidos para projeto e acompanhamento destes reservatórios (Pinto et al., 2023). O objetivo foi o de apresentar a ordem de grandeza do  $S_u$  para rejeitos de processamento de bauxita, já que não há muitos resultados publicados sobre mesmo, e verificar a correlação dos resultados do  $S_u$  fornecidos por estes dois ensaios tão utilizados em projetos de mineração, além de uma indicação sobre a determinação do fator de capacidade de carga do ensaio CPTu neste material, o que pode auxiliar na elaboração de anteprojetos futuros.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 Ensaio de palheta (*Vane Shear Test*)

O ensaio de palheta (*Vane Shear Test* - VST) é tradicionalmente empregado para a determinação da resistência ao cisalhamento não drenada ( $S_u$ ) de depósitos de argilas moles (SCHNAID e ODEBRECHT, 2012) e, no Brasil, é normatizado pela NBR 10905 (ABNT, 1989). O ensaio consiste na rotação de um conjunto de palhetas cruciformes cravadas em profundidades pré-definidas, podendo ser realizado com a palheta cravada diretamente no solo ou com perfuração prévia. De acordo com a norma, a rotação da palheta deve ser controlada, sendo requerido  $6 \pm 0,6^\circ/\text{min}$  de forma a solicitar de maneira não drenada o solo argiloso ensaiado. A resistência ao cisalhamento não drenada pode ser estimada em termos da condição indeformada do solo ( $S_u$ ) e, também, da amolgada ( $S_{ur}$ ).

Para aplicação em argilas moles, Bjerrum (1973) propôs uma correção do valor do  $S_u$  obtido através do ensaio de palheta. Representada pelo símbolo  $\mu$ , a correção de Bjerrum (1973) baseia-se na diferença de velocidade de deformação cisalhante entre o ensaio de palheta e a aplicação do carregamento em campo. Além disso, essa correção também considera os efeitos de anisotropia que podem ocorrer em argilas (SCHNAID e ODEBRECHT, 2012). O fator de correção empírico  $\mu$  pode ser determinado com auxílio da Figura 1, feita com base na retroanálise de rupturas em aterros e escavações em depósitos argilosos. A experiência brasileira na aplicação dessa correção é baseada em estudos de casos diversos, indicados na Figura 1, sendo seu uso, prática corrente no Brasil (Coutinho & Bello, 2006).

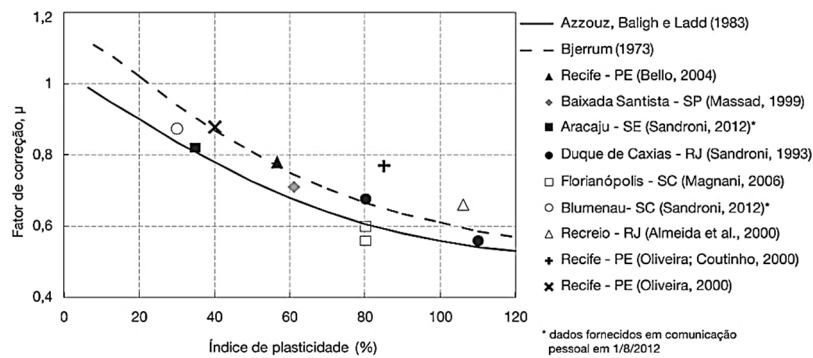


Figura 1. Fator de correção  $\mu$  de  $S_u$  obtido pelo ensaio de palheta. (FONTE: Schnaid e Odebrecht, 2012).

## 2.2 Ensaio de Piezocone (*Cone Penetration Test with Pore Pressure Measurement – CPTu*)

Os ensaios de cone (*Cone Penetration Test - CPT*) e piezocone (*Piezocone Penetration Test - CPTu*), possuem grande aplicação na determinação da estratigrafia dos solos, fornecendo parâmetros mecânicos e hidráulicos. O ensaio de piezocone consiste na cravação contínua, a uma velocidade constante da ordem de 20 mm/s  $\pm$  5 mm/s, de um elemento cilíndrico com ponta cônica (60° de ápice), que mede, continuamente, a resistência de ponta ( $q_c$ ), a resistência por atrito lateral ( $f_s$ ), além de registrar os valores do excesso de poropressão gerada no interior do maciço durante a cravação, comumente medido atrás do cone ( $u_2$ ), mas também podendo ser medido diretamente na ponta cônica ( $u_1$ ), ou mesmo, em posição mais distante ainda desta ponta ( $u_3$ ), no seu fuste. No caso deste trabalho, foi utilizado equipamento com medição de poropressão imediatamente após a ponta cônica ( $u_2$ ). No caso do CPTu, os procedimentos, em geral, são realizados de acordo com a norma americana ASTM D5778-20 (ASTM, 2020).

Uma das informações relevantes fornecidas pelos ensaios CPTu é a classificação dos solos quanto ao comportamento mecânico em sua condição *in situ* (ROBERTSON e CABAL, 2014). A classificação comportamental dos solos proposta por Robertson (2016) é denominada *Soil Behaviour Type* (SBT). Por este ábaco de classificação, é possível avaliar qual o provável tipo de comportamento é esperado deste material em relação às suas características de resistência e compressibilidade. Essa classificação tem sido utilizada especialmente para a uma identificação do potencial de liquefação de rejeitos de mineração. Outra classificação importante, proposta por Robertson e Wride (1998), se refere ao Índice de Classificação de Comportamento (IC) e permite a classificação dos materiais em categorias comportamentais distintas, a saber: Argilas Sensíveis; Solo Orgânico; Argila a Argila Siltosa; Argila Siltosa a Silte Argiloso; Silte Arenoso a Areia Siltosa; Areia Siltosa a Areia; Areia Compacta ou Pedregulhosa; Areia Muito Compacta ou com Cimentação e Solos duros.

Para a determinação do  $S_u$  via ensaio CPTu, Lunne et al. (1997) apresentaram uma equação (ver a equação 1) que correlaciona algumas variáveis medidas e estimadas pelo ensaio de cone/piezocone e o fator de capacidade de carga baseado na resistência de ponta medida no cone ( $N_{kt}$ ).

$$S_u = (q_t - \sigma_{v0}) / N_{kt} \quad (1)$$

Onde:  $S_u$  – Resistência ao cisalhamento não drenada;  $q_t$  - Resistência de ponta corrigida medida pelo cone (kPa);  $\sigma_{v0}$  é a tensão vertical total (kPa) na profundidade considerada.

Pinto et. al (2021) avaliaram o  $S_u$  de um rejeito de processamento de bauxita, o mesmo tipo de rejeito aqui estudado, mas em um outro local, e concluíram que o valor de fator capacidade de carga  $N_{kt} = 11$  foi bom para a estimativa deste parâmetro utilizando o ensaio CPTu neste material.

De forma prática, o fator de capacidade de carga baseado na resistência de ponta ( $N_{kt}$ ) é comum de também ser estimado através do valor de  $S_u$  obtido por ensaios de palheta ou ensaios de laboratório, de acordo com a equação 2 (SCHNAID e ODEBRECHT, 2012). Deste modo, este valor de  $N_{kt}$  assim determinado é utilizado para calcular o  $S_u$  ao longo de toda a profundidade a partir dos resultados do ensaio CPTu,

$$N_{kt} = (q_t - \sigma_{v0}) / S_u \quad (2)$$

Onde:  $N_{kt}$  - Fator de capacidade de carga baseado na resistência de ponta do CPTu;  $q_t$  – Resistência de ponta corrigida medida pelo cone (kPa);  $\sigma_{v0}$  – Tensão vertical total, que também varia com a profundidade;  $S_u$  – Resistência ao cisalhamento não drenada obtida com o ensaio de palheta.

Com o objetivo de propor uma estimativa do fator de capacidade de carga baseado na resistência efetiva de ponta medida em ensaios CPTu, Mayne e Peuchen (2018) estudaram argilas naturais categorizadas em grupos como: argilas rijas, argilas sensíveis, argilas marinhas, argilas continentais e argilas fissuradas. Os dados foram obtidos por meio de ensaios triaxiais em conjunto com ensaios CPTu no mesmo material. A equação 3 relaciona o parâmetro de poropressão  $B_q$  (equação 4) e o fator de capacidade de carga  $N_{kt}$  dos solos ensaiados.

$$N_{kt} = 10,5 - 4,6 \ln (B_q + 0,1) \quad (3)$$

Onde  $B_q > -0,1$ , sendo calculado pela equação (4)

$$B_q = (u_2 - u_0) / (q_t - \sigma_{v0}) \quad (4)$$

Onde:  $B_q$  - parâmetro de poropressão;  $u_2$  - Poropressão medida logo atrás da ponta do cone (kPa);  $u_0$  - poropressão hidrostática na profundidade do ensaio (kPa);  $q_t$  - Resistência de ponta corrigida medida pelo cone (kPa);  $\sigma_{v0}$  - Tensão vertical total (kPa).

Robertson (2012) apresentou uma equação para obtenção da variável  $N_{kt}$  a partir do ensaio de piezocone, conforme apresentado na equação 5. Esta proposição inclui a consideração da razão de atrito normalizada ( $F_r$ ), apresentada na equação 6.

$$N_{kt} = 10,5 + 7 \log(F_r) \quad (5)$$

Onde:  $N_{kt}$  - fator de capacidade de carga baseado na resistência de ponta do CPTu;  $F_r$  é a razão de atrito, dada pela equação 6.

$$F_r = (f_s \cdot 100\%) / (q_t - \sigma_{v0}) \quad (6)$$

Onde:  $F_r$  – Razão de atrito;  $f_s$  – resistência por atrito lateral medida no cone (kPa),  $q_t$  – Resistência de ponta corrigida medida pelo cone (kPa);  $\sigma_{v0}$  – tensão vertical total.

Uma revisão de valores de  $N_{kt}$  obtidos na prática nacional e internacional, citada por Schnaid e Odebrecht (2012), indicou que para argilas normalmente adensadas a ligeiramente pré-adensadas, de alta plasticidade, os valores de  $N_{kt}$  geralmente variam na faixa entre 12 e 15, com ocorrências na faixa entre 10 e 20.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 Material

Os ensaios foram realizados em lama vermelha, resíduo de beneficiamento de bauxita. Foram coletadas amostras do tipo Shelby em dois reservatórios, sendo realizados dois furos em um deles, denominados de SH-A (4 a 11 metros de profundidade) e SH-B (10 a 14 metros de profundidade), e um furo em um segundo reservatório, SH-C (2 a 10 metros de profundidade). A caracterização geotécnica do rejeito foi realizada de acordo com as normas ABNT vigentes. A Tabela 1 resume os resultados médios obtidos. Destaca-se que não foram observadas grandes variações nos valores ao longo da profundidade, com os perfis se apresentado relativamente homogêneos. Porém, percebe-se que o furo SH-B foi realizado em material silto-argiloso de acordo com a classificação SUCS, enquanto os outros dois, em material argilo-siltoso. Este furo também apresentou uma maior densidade dos grãos, menor teor de umidade *in-situ* e menor índice de plasticidade (IP), indicando realmente ser um material menos argiloso.

Tabela 1. Resumo dos resultados médios da caracterização geotécnica do resíduo

Amostra	Pedregulho (%)	Areia (%)	Silte (%)	Argila (%)	$\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	W (%)	$\rho_{nat}$ (g/cm <sup>3</sup> )	LL (%)	LP (%)	IP (%)	SUCS
SH-A	2	1	28	69	2,78	74,6	1,61	75	41	34	CH
SH-B	0	6	50	44	3,03	60,3	1,69	38	29	9	ML
SH-C	0	1	35	64	2,96	77,7	1,59	44	27	17	CL

## 3.2 Ensaios de campo

Foram avaliados ensaios de campo realizados em dois reservatórios, chamados de “Reservatório 1” e “Reservatório 2”. No Reservatório 1, foram realizados 9 ensaios de piezocone, que atingiram de 6 metros a em torno de 16 metros de profundidade, e 4 ensaios de palheta. Já no Reservatório 2, foram realizados 4 ensaios de piezocone, que atingiram de 6 a 15 metros de profundidade e 2 ensaios de palheta. Como um dos métodos de calibração do fator de capacidade de carga  $N_{kt}$  foi feito utilizando os resultados dos ensaios de palheta, somente os ensaios de CPTu que possuíam correspondência com os ensaios de palheta foram considerados. Portanto, foram utilizados resultados de 4 ensaios de piezocone do Reservatório 1 e dois no Reservatório 2.

### 3.2.1 Interpretação dos ensaios de palheta

A interpretação dos ensaios de palheta foi realizada plotando o gráfico de Torque x Rotação para a obtenção do torque máximo na profundidade de cada teste. Destaca-se que não foram realizados ensaio de palheta na condição amolgada do rejeito. Os valores de  $S_u$  foram calculados diretamente pela formulação proposta pela NBR 10905 (ABNT, 1989), para as condições de pico ( $S_u$  pico), de acordo com a equação 7.

$$S_u = 0,86 \cdot T / \pi \cdot D^3 \quad (7)$$

Onde:  $S_u$  - Resistência ao cisalhamento não drenada em cada profundidade (kPa); T - Torque máximo medido pelo ensaio (KNm); D - Diâmetro da palheta (m).

Conforme caracterização do rejeito apresentada no item 3.1, o rejeito é fino, argiloso e plástico, tendo o índice de plasticidade médio das amostras em torno de de 20%. Sendo assim, conforme apresentado no item 2, para esta condição, o fator de correção de Bjerrum ( $\mu$ ) é aproximadamente 1 (ver a Figura 1).

### 3.2.2 Interpretação dos ensaios CPTu

O valor do  $S_u$  para os ensaios CPTu foram calculados utilizando a equação 1. Foi estimado um valor de  $N_{kt}$  médio para cada ensaio CPTu utilizando 3 metodologias, sendo: (1)  $N_{kt1}$ : Conforme proposto por Robertson (2012) (equação 5); (2)  $N_{kt2}$ : de acordo com a equação 2, apresentada em Schanid e Odebrecht (2012); (3)  $N_{kt3}$ : Conforme proposto por Mayne e Peuchen (2018) (baseado na Figura 4 e equação 4). Depois de calculados os três valores, obteve-se a média simples para cada um dos métodos em cada reservatório. Para verificar a variação relativa entre os resultados obtidos, fixou-se o resultado do  $S_u$  obtido do ensaio de palheta e os demais foram comparados a ele. Isso permitiu avaliar a variação relativa dos resultados conforme a equação (8).

$$\text{Variação (\%)} = [(S_u \text{ CPTu} / S_u \text{ palheta}) - 1] * 100 \quad (8)$$

## 4 RESULTADOS

O rejeito no Reservatório 1 foi classificado, conforme proposto por Robertson (2016), como exibindo comportamento diverso, apresentando tanto características contráteis como dilatantes. Quanto à classificação comportamental, segundo a proposta deste autor, este rejeito varia de solo arenoso dilatante, passando por uma região de transição com comportamento dilatante ou contrátil, até alcançar a classificação de argila contrátil e sensitiva, conforme apresentado na Figura 2. Fica evidente a dispersão, mas foi predominante a classificação do material como argila contrátil e com características de argila a argila siltosa. Destaca-se que, esta dispersão é relativamente comum em reservatórios de rejeito dispostos na forma de lama (Villar, 2002). A mesma dispersão foi observada no Reservatório 2, tendo a predominância da classificação como argila contrátil segundo este método proposto por Robertson (2016).

A Tabela 2 apresenta o resumo dos valores de  $N_{kt}$  obtidos para os Reservatórios 1 e 2, de acordo com cada uma das metodologias utilizadas, bem como as variações, em termos médios, na obtenção de  $S_u$  via ensaio CPTu em comparação com os valores obtidos no ensaio de palheta. Para cada ensaio CPTu, foram plotados os perfis de  $S_u$  obtidos, aplicando a variação do fator  $N_{kt}$ , em comparação com o valor de  $S_u$  do ensaio de palheta. A Figura 3 apresenta os perfis de  $q_t$ ,  $F_r$ ,  $u_2$  e  $B_q$  para o CPTu-A, executado no Reservatório 1, e a Figura 4, apresenta o perfil de  $S_u$  em comparação com o ensaio de palheta VT-A, bem como o Índice de Classificação de Comportamento ( $I_c$ ), conforme proposto por Robertson e Wride (1998) (ver a equação 9).

$$I_c = [(3,47 - \log q_t)^2 + (1,22 + \log F_r)^2]^{0,5} \quad (9)$$

Onde:  $S_u$  - Resistência ao cisalhamento não drenada em cada profundidade (kPa);  $q_t$  - Resistência de ponta corrigida medida pelo cone (kPa);  $F_r$  - Razão de atrito.

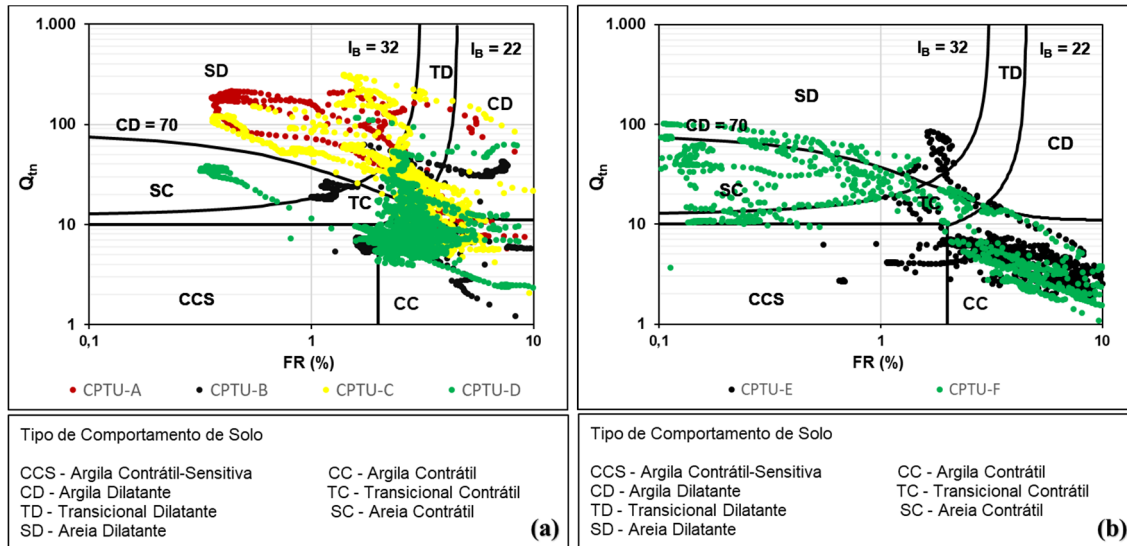


Figura 2. Classificação do Comportamento do Material Conforme Robertson (2016): (a) Reservatório 1 - CPTu-A ao CPTu-D - e (b) Reservatório 2 – CPTu-E e CPTu-F.

Tabela 2. Valores médios de  $N_{kt}$  e variações da obtenção de  $S_u$  em comparativo com o ensaio de palheta

Reservatório 01	Variação média de $S_u$	Reservatório 02	Variação média de $S_u$
$N_{kt1}$ (Robertson, 2012): 13	0%	$N_{kt1}$ (Robertson, 2012): 12	-11%
$N_{kt2}$ (calibrado ensaio palheta): 15	-12%	$N_{kt2}$ (calibrado com o ensaio de palheta): 11	-3%
$N_{kt3}$ (Mayne e Peuchen, 2018): 16	-17%	$N_{kt3}$ (Mayne e Peuchen, 2018): 16	-33%

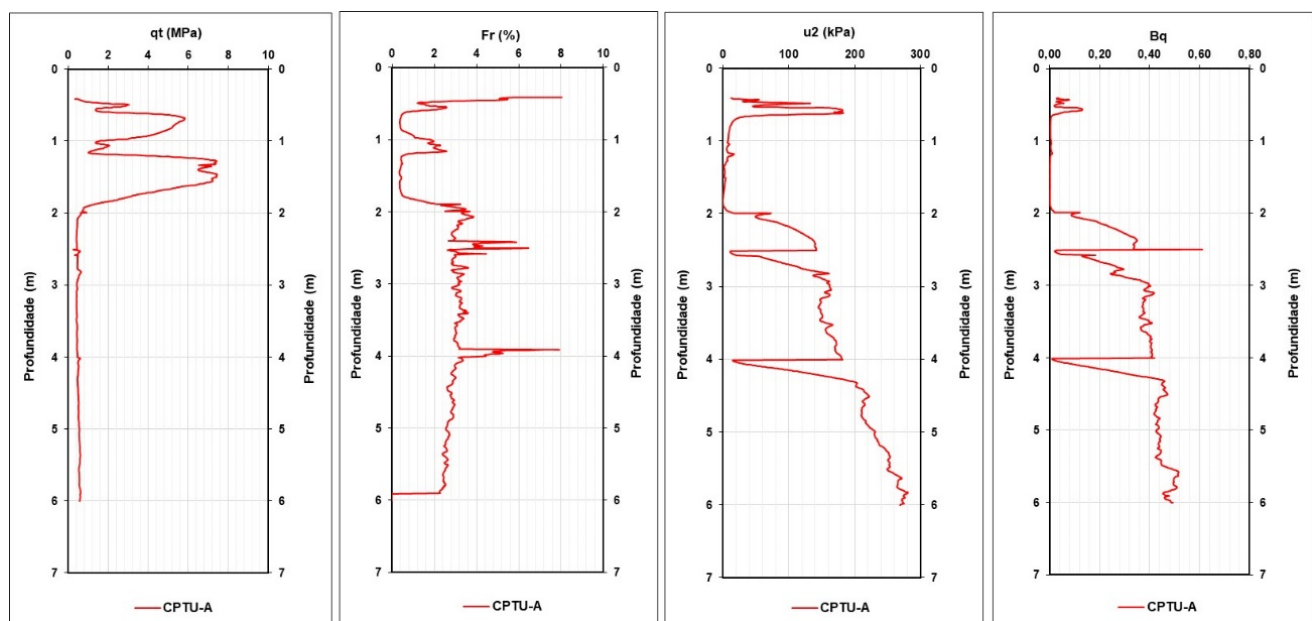


Figura 3. Reservatório 1 - CPTu-A - Perfis de  $q_t$ ,  $F_r$ ,  $u_2$  e  $B_q$ .

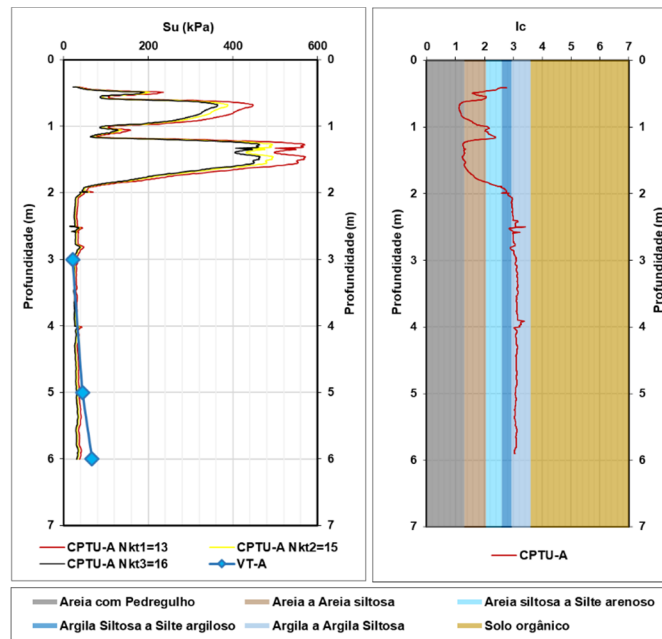


Figura 4. Comparação dos valores de  $S_u$  obtidos para diferentes  $N_{kt}$  e os resultados de ensaios de palheta e perfil de comportamento IC para o CPTu-A.

Em relação ao Reservatório 1, foi possível observar variações médias entre os resultados de  $S_u$  do ensaio CPTu em relação aos valores fornecidos pelos ensaios de palheta entre 0% e -17%. O  $N_{kt1}$  estimado pelo método proposto por Robertson (2012) apresentou a menor variação. Isso indica que a utilização desse fator proporcionou uma estimativa do  $S_u$  mais próxima dos valores fornecidos pelo ensaio de palheta para esse reservatório em particular. Já para o Reservatório 2, observou-se variações médias entre -3% a -33%. O fator  $N_{kt2}$ , calibrado com o ensaio de palheta (equação 2) apresentou menor variação, enquanto a proposta de Mayne e Peuchen (2018) levou a uma determinação de  $S_u$  mais de 30% menor dos valores de  $S_u$  via ensaio CPTu que a dos obtidos via ensaios de palheta. A proposta de Robertson (2012) apresentou valores de  $S_u$  de ensaios CPTu, em média 11% menores que os fornecidos pelo ensaio de palheta. Cabe destacar que este Reservatório 02 teve o material classificado como menos argiloso que o do material 1 (ver a Tabela 1). A utilização do fator  $N_{kt2}$  (apresentado por Schnaid e Odebrecht, 2012) neste tipo de material se ajustou melhor, enquanto no material mais argiloso, o  $N_{kt1}$ , conforme proposta de Robertson (2012) forneceu resultados de  $S_u$  via resultados de ensaios CPTu mais próximos dos resultados de ensaios de palheta.

## 5 CONCLUSÕES

Neste artigo, foi pesquisada qual metodologia usada para determinar o fator de capacidade carga ( $N_{kt}$ ), usado na interpretação de resultados de ensaios CPTu para a obtenção de um perfil contínuo de  $S_u$ , resistência ao cisalhamento não drenada, forneceria resultados que melhor se ajustariam aos valores pontuais de  $S_u$  medidos via ensaios de palheta em um rejeito de processamento de bauxita. Não foram discutidos os métodos de ensaio e da determinação do  $S_u$  em si, já que foram utilizados métodos bastante difundidos e empregados no projeto e acompanhamento de reservatórios de disposição de rejeitos de mineração (Pinto et al., 2023). Destaca-se que este tipo de rejeito tem como fluido intersticial, um subproduto industrial de pH básico, consequência do processamento industrial ao qual a bauxita é submetida para a extração da alumina, o que o pode diferenciar bastante o seu comportamento de um solo natural.

Ao comparar os valores de  $S_u$  obtidos a partir do ensaio CPTu com os valores de  $S_u$  obtidos no ensaio de palheta, foi observado que, usando o fator de capacidade de carga  $N_{kt}$  determinado conforme proposto por Robertson (2012), obteve-se um ajuste melhor entre os resultados dos dois ensaios em um material de comportamento mais argiloso (IP variando entre 17 e 34, fração tamanho argila acima de 60%), sendo que os resultados do ensaio CPTu apresentaram uma variação média máxima de 17% inferior aos valores do ensaio de palheta, mas com uma média geral para a aproximação bem próxima de zero. Já quando o material ensaiado

tinha IP em torno de 9 e fração tamanho argila em torno de 40%, o fator de capacidade de carga  $N_{kt}$  calibrado com o ensaio de palheta levou a um melhor ajuste entre os resultados de  $S_u$  dos dois ensaios, com uma variação média global de -3% dos valores do ensaio CPTu em comparação com os resultados do ensaio de palheta. Também pôde ser verificado que os valores de fator de capacidade de carga  $N_{kt}$  obtidos neste estudo estão dentro do já proposto por outros autores, sendo igual a 13 (definido pelo método de Robertson, 2012) para o rejeito mais argiloso (em torno de 60% de fração argila) e igual a 11, definido por um ajuste baseado nos resultados do ensaio de palheta, quando o material apresentou em torno de 40% de fração argila, ou seja, menos argiloso que o primeiro, tendo sido avaliados os efeitos da condição de drenagem dos ensaios CPTu. A ordem de grandeza do  $S_u$  nestes rejeitos de processamento de bauxita, que não possui muitos resultados publicados, variou basicamente entre 15 a 40kPa, mas atingiu quase 600 kPa em alguns trechos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Associação Brasileira De Normas Técnicas. NBR 10905 (código secundário ABNT/MB 3122) - Solo - Ensaio de Palheta In Situ - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1989.
- ASTM (2020). ASTM D5778-20 Standard Test Method for Electronic Friction Cone and Piezocone Penetration Testing of Soils. ASTM International.
- Bello, M.I.M & Coutinho, R.Q. Correção da resistência não drenada obtida a partir do ensaio de palheta de campo em argilas moles do Recife e Rio de Janeiro. XII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica (COBRAMSEG). Curitiba – PR, 2006.
- Bjerrum, L. Problems of soil mechanics and construction on soft clays. Proceedings of the 8th Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng., Moscow, v. 3, p. 111-159, 1973.
- Lunne, T.; Powell, J. JM; Robertson, P. Cone penetration testing in geotechnical practice. CRC Press, 1997.
- Mayne, P. W.; Peuchen, J. Evaluation of CPTU  $N_{kt}$  cone factor for undrained strength of clays. Proc. 4th Intl. Symposium on Cone Penetration Testing (Delft), CRC Press/Balkema, 2018.
- Pinto, C. S. Curso Básico de Mecânica dos Solos - 3ª edição. São Paulo: Oficina de Textos, 2006. 367p.
- Pinto, G. H. S.; Santos JR, M. P. S.; Brandão, H. A.; Resende, H. M. Characterization and evaluation of the undrained shear strength of a bauxite mine tailings. Tailings and mine Waste - Proceeding of the Twenty-Fifth International Conference on Tailings and Mine Waste, 7-10 November 2021, Banff, Alberta, Canada. Disponível em: <https://www.pimentadeavila.com.br/characterization-and-evaluation-of-the-undrained-shear-strength-of-a-bauxite-mine-tailings/>. Acesso em: 30 jun. 2023.
- Reid, D. Effect of rotation rate on shear vane results in a silty tailings. Geotechnical and Geophysical Site Characterization 5 – Lehane, Acosta-Martínez & Kelly (Eds) © 2016 Australian Geomechanics Society, Sydney, Australia, ISBN 978-0-9946261-1-0. Pp 369-374.
- Robertson, P. K. Cone Penetration test (CPT) - based soil behavior type (SBT) classification system - an update. Canadian Geotechnical Journal, 2016. 1910-1927.
- Robertson, P. K.; CABAL, K. L. Guide to Cone Penetration Testing for Geotechnical Engineering. 6ª. ed. Signal Hill, California: Gregg Drilling & Testing, Inc., 2014.
- Robertson, P.K. The James K. Mitchell Lecture: Interpretation of in-situ tests—some insights. Geotechnical and Geophysical Site Characterization 4, ISC 4, Brasil, p. 3-24, 2012.
- Robertson, PETER KAY.; WRIDE, C. E. Evaluating cyclic liquefaction potential using the cone penetration test. Canadian geotechnical journal, v. 35, n. 3, p. 442-459, 1998.
- Schnaid, F.; Odebrecht, E. Ensaios de Campo. 2ª ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2012.
- Villar, L. F. S. Estudo do Adensamento e Ressecamento de Resíduos de Mineração e Processamento de Bauxita. Tese de doutorado, Pontifca Universidade Católica do Rio de Janeiro. 461p, 2002.