

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2024/487

## Análise comparativa de métodos de determinação da resistência de cisalhamento não drenada em aterro sobre solos moles

Luana Dias Barbosa

Engenheira Civil, Fugro, Curitiba, Brasil, luana.barbosa@fugro.com

Juliana Lopes Gimouski

Graduanda em Engenharia Civil, Fugro, Curitiba, Brasil, juliana.gimouski@fugro.com

Heloísa Neres Lopes

Engenheira Civil, Fugro, Curitiba, Brasil, heloisa.lopes@fugro.com

**RESUMO:** A execução de diferentes ensaios de campo permite realizar a correlação dos dados para assegurar confiabilidade dos resultados e aprimorar a análise do local. O ensaio de palheta (*vane test*) é geralmente aplicado em áreas com presença de argila mole para determinar a resistência ao cisalhamento não drenada ( $S_u$ ). Paralelamente, os ensaios de *cone penetration test* (CPTu) também podem ser realizados nessas regiões, a fim de obter a estratigrafia do perfil do solo. Este estudo tem como objetivo a avaliação de ensaios de palheta e CPTu realizados em um aterro de solos moles em um terminal portuário no Brasil, de modo a determinar o grau de semelhança entre esses dois métodos, a partir da diferença entre os resultados de resistência ao cisalhamento não drenada no *vane test* obtida de forma direta e no CPTu de forma empírica. Os dois métodos utilizados para o cálculo do  $S_u$  pelo CPTu foram apresentados por Schnaid & Odebrecht (2012) e Robertson (2012). A análise demonstrou que o cálculo de  $S_u$  de forma empírica aproxima-se mais aos resultados obtidos pelo *vane test* para o método apresentado por Schnaid & Odebrecht (2012), porém recomenda-se a realização de análise estatística mais aprofundada.

**PALAVRAS-CHAVE:** Ensaio de palheta, ensaio CPTu, investigação geotécnica, resistência de cisalhamento não drenada, aterro sobre solos moles.

**ABSTRACT:** The execution of various in-situ tests allows to do the correlation of data to ensure the reliability of the results and enhance in-situ analysis. The vane test is commonly applied in areas with soft clay to determine undrained shear strength ( $S_u$ ). Meanwhile, Cone Penetration Tests (CPTu) can also be conducted in these regions to obtain soil stratigraphy. This study aims to evaluate vane and CPTu tests conducted on a soft soil embankment at a port terminal in Brazil, to determine the degree of similarity between these two methods, based on the undrained shear strength results obtained directly from the vane test and empirically from the CPTu. The two methods used to calculate  $S_u$  by the CPTu were presented by Schnaid & Odebrecht (2012) and Robertson (2012). The analysis demonstrated that the empirical calculation of  $S_u$  is closer for the method presented by Schnaid & Odebrecht (2012), however it is recommended that a more in-depth statistical analysis be carried out.

**KEYWORDS:** Vane test, CPTu test, geotechnical investigation, undrained shear resistance, embankment on soft soils.

### 1 INTRODUÇÃO

A aquisição de dados de propriedades e parâmetros de solos e rochas é essencial para elaboração de projetos geotécnicos e, para solos moles, é especialmente necessário conhecer os parâmetros de resistência, parâmetros de deformabilidade e condutividade hidráulica, devido à baixa capacidade de suporte e à alta compressibilidade desses solos, comumente encontrados em áreas costeiras (Almeida & Marques, 2010).

Em casos de obras realizadas sobre solos moles, é fundamental a determinação dos valores de resistência ao cisalhamento não drenada ( $S_u$ ) das argilas, parâmetro obtido do solo quando submetido a uma carga abrupta

e se demonstrando incapaz de drenar a água intersticial, portanto considerado o estado crítico do solo (Schnaid & Odebrecht, 2012). A obtenção desse dado pode ser realizada através de ensaios piezocone e palheta, também conhecido como *vane test*. Paralelamente é possível correlacionar os resultados obtidos por diferentes métodos, visando garantir a validação e a extrapolação dos dados que serão utilizados para os dimensionamentos de projeto.

O *vane test* determina o  $S_u$  de forma direta por meio da rotação e do respectivo torque de uma palheta de diâmetro específico em uma profundidade específica do maciço. Diferentemente do ensaio de palheta, a resistência ao cisalhamento não drenada obtida pelo CPTu é obtida de forma indireta e empírica, porém, como este ensaio é realizado de forma contínua ao longo da vertical do solo, pode ser atrativo a determinação dos parâmetros através deste ensaio. Este trabalho visa a determinação do parâmetro  $N_k$ , o qual representa o fator de capacidade de carga da camada argilosa a partir do ensaio *vane test* e a comparação com os valores apresentados pela literatura, assim como busca estimar os valores de  $S_u$  determinados pelos ensaios de CPTu por diferentes métodos e compará-los com o obtido por ensaio de palheta, verificando a diferença entre os valores obtidos, a corroboração dos parâmetros calculados entre si e a confirmação da correlação entre os ensaios.

## 2 LOCALIZAÇÃO DOS ENSAIOS

Os ensaios foram realizados em um terminal portuário localizado na região sudeste do Brasil para realização de projeto básico para aterro sobre solos moles. Para cada ilha de ensaio, foram consideradas uma vertical de CPTu e uma vertical de *vane test*, identificadas por diferentes numerações, conforme indicado na Figura 1. No total, foram realizados 38 ensaios de palheta, distribuídos em 6 verticais, e 6 ensaios CPTu, totalizando 6 ilhas de ensaios.

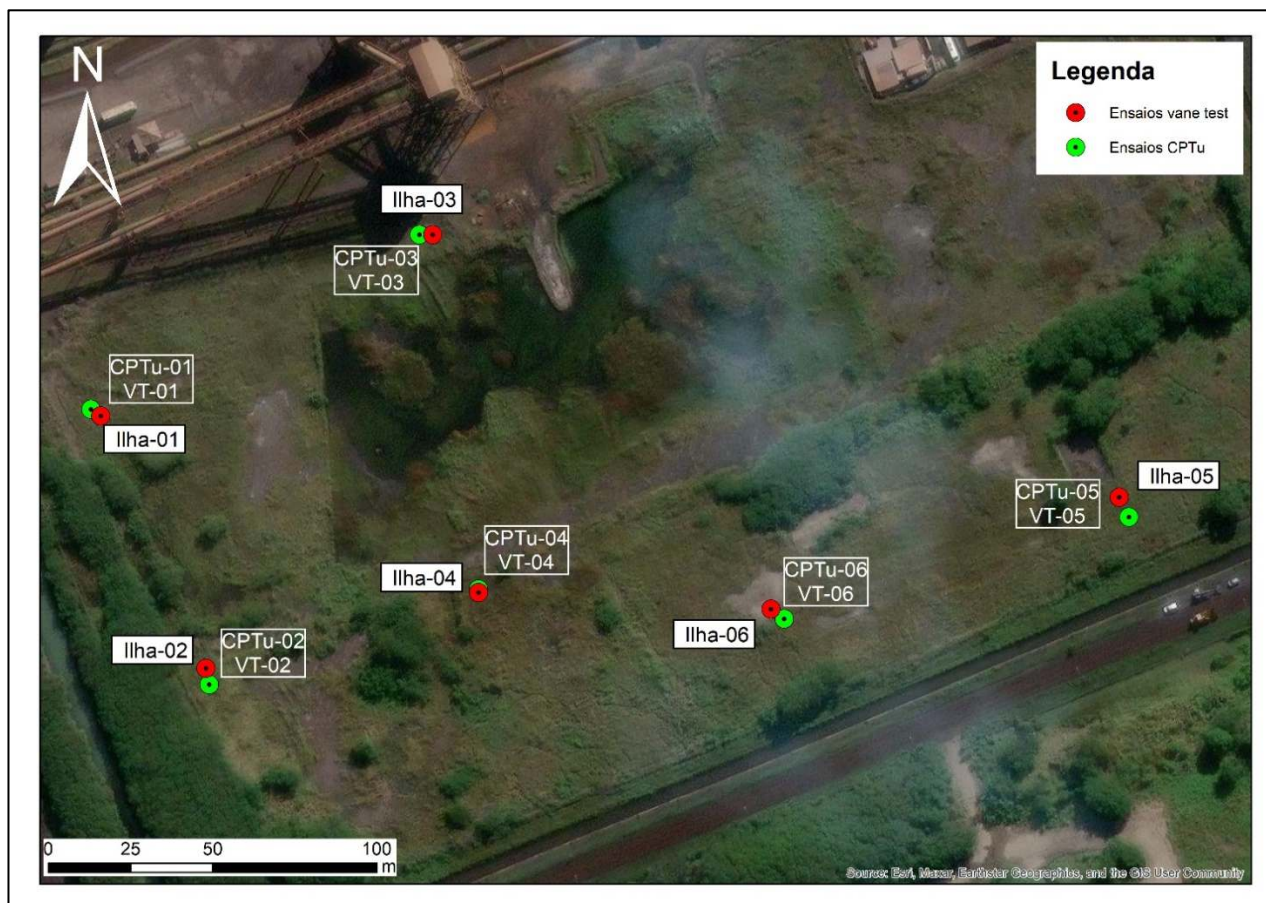


Figura 1. Mapa da região dos ensaios.

### 3 METODOLOGIA

Para depósitos argilosos, segundo Schnaid & Odebrecht (2012), para determinar a resistência não drenada deve-se definir um valor do fator de capacidade de carga ( $N_k$ ), fator de ajuste determinado de forma empírica. Esse parâmetro pode ser calculado de acordo com a Equação 1, utilizando a resistência de ponta medida pelo cone do ensaio CPTu ( $q_c$ ), a tensão vertical total *in situ* ( $\sigma_v$ ) e resistência ao cisalhamento do solo obtida pelo ensaio de palheta. O cálculo do peso específico do material utilizado para determinação da tensão efetiva também é calculado a partir da resistência de ponta do cone, conforme apresentado por Robertson (2022).

$$N_k = \frac{(q_c - \sigma_v)}{S_u} \quad (1)$$

Robertson (2012) apresenta que o  $N_k$  é um fator que pode ser influenciado pela rigidez do solo, razão de sobre adensamento e a sensibilidade do solo. Por conta disso, o  $N_k$  pode ser calculado conforme Equação 2 com base na razão de atrito normalizada,  $F_r$ , parâmetro calculado conforme Equação 3 a partir do atrito lateral medido pelo cone ( $f_s$ ), da resistência de ponta medida pelo cone do ensaio CPTu ( $q_c$ ) e da resistência de ponta corrigida ( $q_t$ ) calculada de acordo com a Equação 4.

$$N_k = 10,5 + 7 \cdot \log(F_r) \quad (2)$$

$$F_r = \frac{f_s}{(q_t - \sigma_v)} \quad (3)$$

$$q_t = q_c + u_2(1 - a) \quad (4)$$

Onde:

$u_2$  = poropressão medida pelo cone, MPa;

$a$  = razão de área do cone, obtida a partir da calibração.

Como valores de referência, Schnaid & Odebrecht (2012) apresentam um levantamento de valores a partir da literatura, conforme apresentado na Tabela 1. Em parêntese, Robertson (2009) apresenta que os valores de  $N_k$  geralmente variam de 10 a 20.

Tabela 1. Fatores de cone de argilas brasileiras (Adaptado de Schnaid & Odebrecht, 2012).

Autor	Local/Solo	$N_k$	Ensaio
Rocha Filho e Alencar (1985)	Sarapuí/RJ	10-15	Palheta
Danziger (1990)	Sarapuí/RJ	8-12	Palheta
Árabe (1995b)	Vale Quilombo/SP	12-15	Palheta e CIU
Soares, Schnaid e Bica (1997)	Porto Alegre/RS	8-16	Palheta
Sandroni et al. (1997)	Sergipe	14-18	Palheta e CIU
Batista e Sayão (1998)	Salvador/BA	12-18	Palheta

### 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para estimar o perfil da resistência não drenada de cada ilha de ensaio foi utilizada a Equação 1, variando o  $N_k$  calculado pelo método de Schnaid & Odebrecht (2012) e pelo método de Robertson (2012). As Tabelas 2 a 7 apresentam o  $S_u$  obtido no ensaio de palheta, os valores  $N_k$  e  $S_u$  calculados para cada método, as médias dos fatores de capacidade de carga utilizadas para o cálculo do  $S_u$  das verticais de CPTu e as diferenças dos resultados de  $S_u$  obtidos, utilizando o valor adquirido pelo *vane test* (VT) com o solo em estado indeformado como referência, conforme apresentado na Equação 5. Devido à homogeneidade encontrada nos resultados dos ensaios *vane test* que foram relacionadas, para cada vertical foi considerada uma média dos valores de  $N_k$  calculados pelas equações 1 e 2.

$$\text{Diferença} = \frac{S_u^{VT} - S_u^{CPT}}{S_u^{VT}} \cdot 100 \quad (5)$$

Onde:

$S_u^{VT}$  = resistência não drenada obtida a partir do ensaio *vane test*, em kPa;

$S_u^{CPT}$  = resistência não drenada obtida a partir do ensaio CPTu, em kPa;

Tabela 2. Valores de  $S_u$  obtidos na ilha 1.

Profundidade (m)	Vane Test	Schnaid & Odebrecht (2012)			Robertson (2012)		
	$S_u$ (kPa)	Nk	$S_u$ (kPa)	Diferença (%)	Nk	$S_u$ (kPa)	Diferença (%)
3,00	39,19	12,55	39,62	-1,08	16,67	34,86	11,07
5,00	27,19	11,01	24,10	11,39	14,21	21,20	22,03
7,00	31,64	8,29	21,12	33,26	14,41	18,58	41,28
9,00	23,03	14,49	26,86	-16,63	16,25	23,63	-2,62
11,00	56,03	11,23	50,65	9,61	11,95	44,56	20,47
13,00	55,04	8,39	37,18	32,45	11,92	32,71	40,57
15,00	81,75	12,26	80,55	1,33	15,33	70,97	13,19
17,00	60,00	21,16	102,20	-70,34	12,20	89,92	-49,87
Média		12,42			14,12		

Tabela 3. Valores de  $S_u$  obtidos na ilha 2.

Profundidade (m)	Vane Test	Schnaid & Odebrecht (2012)			Robertson (2012)		
	$S_u$ (kPa)	Nk	$S_u$ (kPa)	Diferença (%)	Nk	$S_u$ (kPa)	Diferença (%)
3,00	13,90	11,03	18,04	-29,83	17,30	10,75	22,66
5,00	18,61	11,14	24,40	-31,11	15,47	14,54	21,89
7,00	40,26	4,73	22,39	44,38	13,23	13,34	66,87
11,00	37,10	9,34	40,77	-9,89	13,48	24,29	34,53
13,00	47,83	6,25	35,18	26,45	11,83	20,96	56,19
Média		8,50			14,26		

Tabela 4. Valores de  $S_u$  obtidos na ilha 3.

Profundidade (m)	Vane Test	Schnaid & Odebrecht (2012)			Robertson (2012)		
	$S_u$ (kPa)	Nk	$S_u$ (kPa)	Diferença (%)	Nk	$S_u$ (kPa)	Diferença (%)
3,50	37,96	11,78	41,41	-9,09	16,98	30,32	20,13
5,00	22,50	10,28	21,41	4,85	15,24	15,67	30,33
7,00	29,44	17,72	48,29	-64,07	13,94	35,36	-20,13
11,00	72,36	6,82	45,71	36,83	13,69	33,47	53,75
13,00	43,27	7,52	30,14	30,36	13,29	22,06	49,01
15,00	31,85	10,68	31,49	1,12	15,37	23,06	27,60
Média		10,80			14,75		

Tabela 5. Valores de  $S_u$  obtidos na ilha 4.

Profundidade (m)	Vane Test	Schnaid & Odebrecht (2012)			Robertson (2012)		
	$S_u$ (kPa)	$N_k$	$S_u$ (kPa)	Diferença (%)	$N_k$	$S_u$ (kPa)	Diferença (%)
3,00	26,34	13,12	37,64	-42,93	16,79	24,61	6,56
5,00	24,84	8,43	22,82	8,15	14,79	14,92	39,95
7,00	46,97	6,58	33,68	28,29	14,26	22,02	53,12
11,50	60,69	9,70	64,11	-5,64	12,55	41,91	30,94
13,00	61,49	8,07	54,04	12,12	11,83	35,33	42,54
Média		9,18			14,04		

Tabela 6. Valores de  $S_u$  obtidos na ilha 5.

Profundidade (m)	Vane Test	Schnaid & Odebrecht (2012)			Robertson (2012)		
	$S_u$ (kPa)	$N_k$	$S_u$ (kPa)	Diferença (%)	$N_k$	$S_u$ (kPa)	Diferença (%)
3,00	24,13	9,76	29,88	-23,81	16,58	16,59	31,24
5,00	20,09	9,58	24,43	-21,61	14,88	13,57	32,46
7,00	41,45	7,31	38,46	7,20	13,09	21,36	48,46
8,50	34,35	9,57	41,71	-21,43	13,18	23,16	32,56
11,00	37,95	8,43	40,59	-6,97	13,52	22,54	40,59
13,00	57,90	6,29	46,21	20,19	13,26	25,67	55,67
15,00	44,36	6,47	36,41	17,91	14,77	20,22	54,41
16,50	89,22	5,63	63,78	28,52	14,22	35,42	60,30
Média		7,88			14,19		

Tabela 7. Valores de  $S_u$  obtidos na ilha 6.

Profundidade (m)	Vane Test	Schnaid & Odebrecht (2012)			Robertson (2012)		
	$S_u$ (kPa)	$N_k$	$S_u$ (kPa)	Diferença (%)	$N_k$	$S_u$ (kPa)	Diferença (%)
3,00	29,59	6,31	25,70	13,12	17,23	12,82	56,65
5,00	24,23	8,47	28,25	-16,59	14,86	14,10	41,83
7,00	27,39	5,24	19,76	27,86	16,50	9,86	64,01
11,00	57,73	7,70	61,25	-6,09	12,66	30,56	47,07
13,00	54,10	8,47	63,12	-16,69	12,27	31,49	41,78
15,00	61,97	7,38	62,96	-1,60	13,81	31,41	49,31
Média		7,26			14,55		

Considerando as informações fornecidas por Robertson (2009) e os dados apresentados na Tabela 1 por Schnaid & Odebrecht (2012), é observado que os valores de  $N_k$  podem variar de 8 a 20. Apenas os valores médios de  $N_k$  calculados conforme a Equação 1 para as ilhas 5 e 6 permaneceram abaixo da faixa típica na literatura, os quais são valores atípicos para solos brasileiros. No entanto, todos os valores médios de  $N_k$  calculados com base na Equação 2 mativeram-se dentro da faixa esperada de acordo com a literatura apresentada.

Os valores de  $S_u$ , conforme determinados pelo método proposto por Schnaid & Odebrecht (2012), variaram de 1,08% a 70,34%, com uma média geral de 21,04%. Por outro lado, utilizando o método de Robertson (2012), esses valores oscilaram de 2,62% a 66,87%, com uma média geral de 38,04%. De forma geral, as discrepâncias nos valores de  $S_u$  foram inferiores ao utilizar o método de Schnaid & Odebrecht (2012), o que pode ser atribuído ao fato deste método realizar o cálculo com base no *vane test* realizado na vertical, o qual obtém a resistência não drenada das argilas de forma direta. A partir das análises, é possível observar que a definição dos valores de  $N_k$  é o um grande desafio para a obtenção de  $S_u$  a partir dos resultados do ensaio CPT.

A fim de visualização, as Figuras 2, 3, 4 e 5 apresentam os resultados obtidos dos perfis de resistência não drenada dos CPTu pelos dois métodos considerados em comparação com a resistência de ponta medida

pelo cone do CPTu para as Ilhas 1, 2, 5 e 6, respectivamente. As ilhas apresentadas foram as consideradas com resultados mais representativos, visto que foram os que tiveram maiores profundidades atingidas no ensaio CPTu, chegando a 27,00 m, 25,73 m, 26,42 m e 21,34 m, respectivamente, e é possível notar que todos os ensaios seguiram a mesma tendência.

A realização de ensaio CPT permite a classificação do tipo do solo, geralmente a resistência do cone é maior em areias e menor em argilas (Robertson, 2022). De acordo com a classificação do tipo de comportamento ( $I_c$ ) apresentado por Robertson (2012), conforme Tabela 7, o material das profundidades nos quais foram realizados vane test pode ser classificado com comportamento que varia de argila a argila siltosa, visto que apresentam índice de comportamento ( $I_c$ ) maiores que 2,95, o qual indica um material sensível e de baixa resistência.

Tabela 7. Classificação do tipo de comportamento do solo (Adaptado de Robertson, 2022).

Tipo de comportamento do solo	$I_c$
Solos ôgânicos – argila	$> 3,60$
Argilas – argila siltosa a argila	$2,95 - 3,60$
Mistura de siltes – silte argiloso a argila siltosa	$2,60 - 2,95$
Mistura de areias – areia siltosa a silte arenosa	$2,05 - 2,60$
Areias – areia a areia siltosa	$1,31 - 2,05$
Cascalho a areia compacta	$< 1,31$

Nos gráficos é possível observar que as diferenças entre os dois métodos se apresentam maiores nas camadas mais resistentes do perfil do solo, principalmente para os valores calculados a partir da Equação 2, as quais nesta área estão a partir de aproximadamente 16 metros. As resistências não drenadas calculadas de forma indireta se ajustam melhor nas camadas moles, os quais apresentam valores inferiores a 4 MPa de resistência de ponta, entre 3 metros e 16 metros, e que também foram escolhidas na campanha para realização de *vane test*.

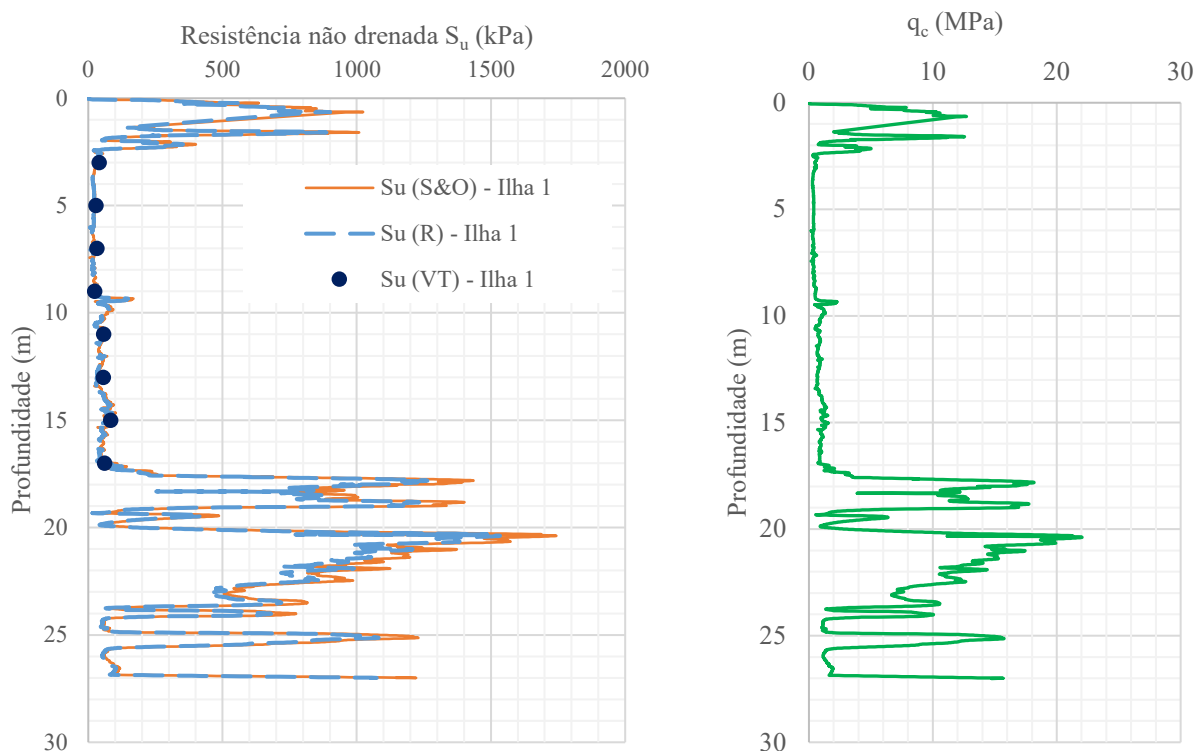


Figura 2 – Comparação de  $S_u$  entre o ensaio de palheta e pelos CPTus com  $q_c$  para a Ilha 1.

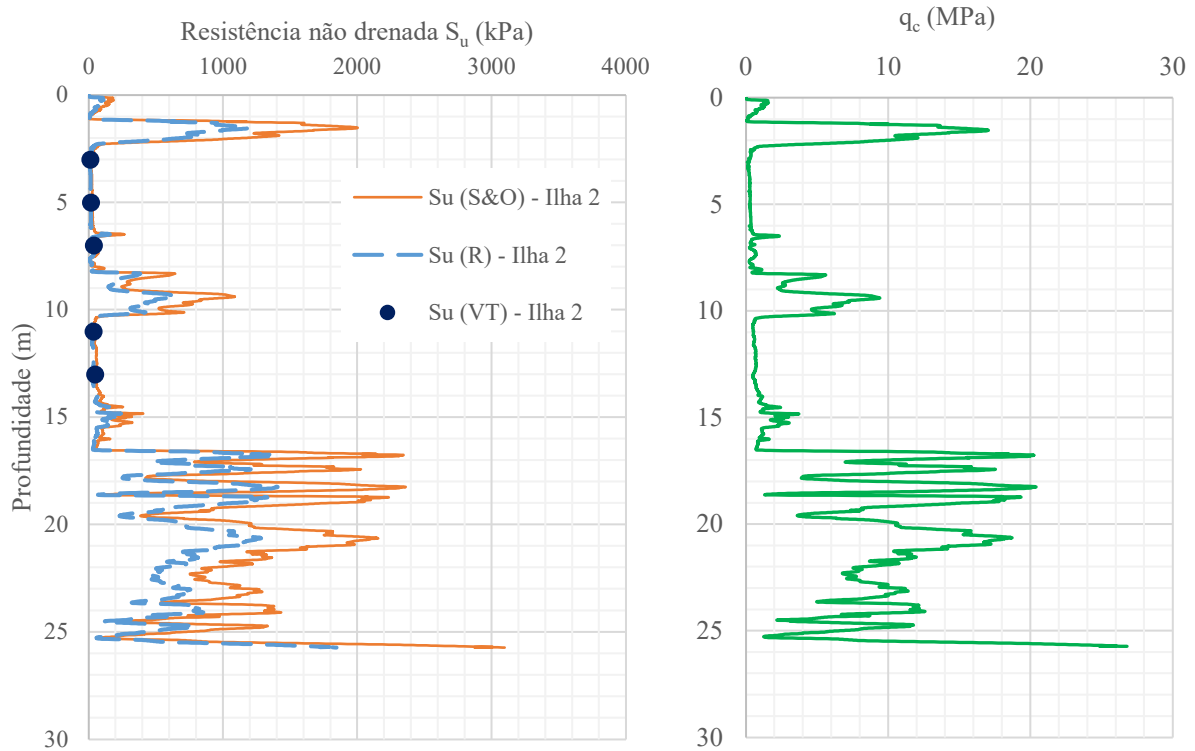


Figura 3 – Comparação de  $S_u$  entre o ensaio de palheta e pelos CPTus com  $q_c$  para a Ilha 2.

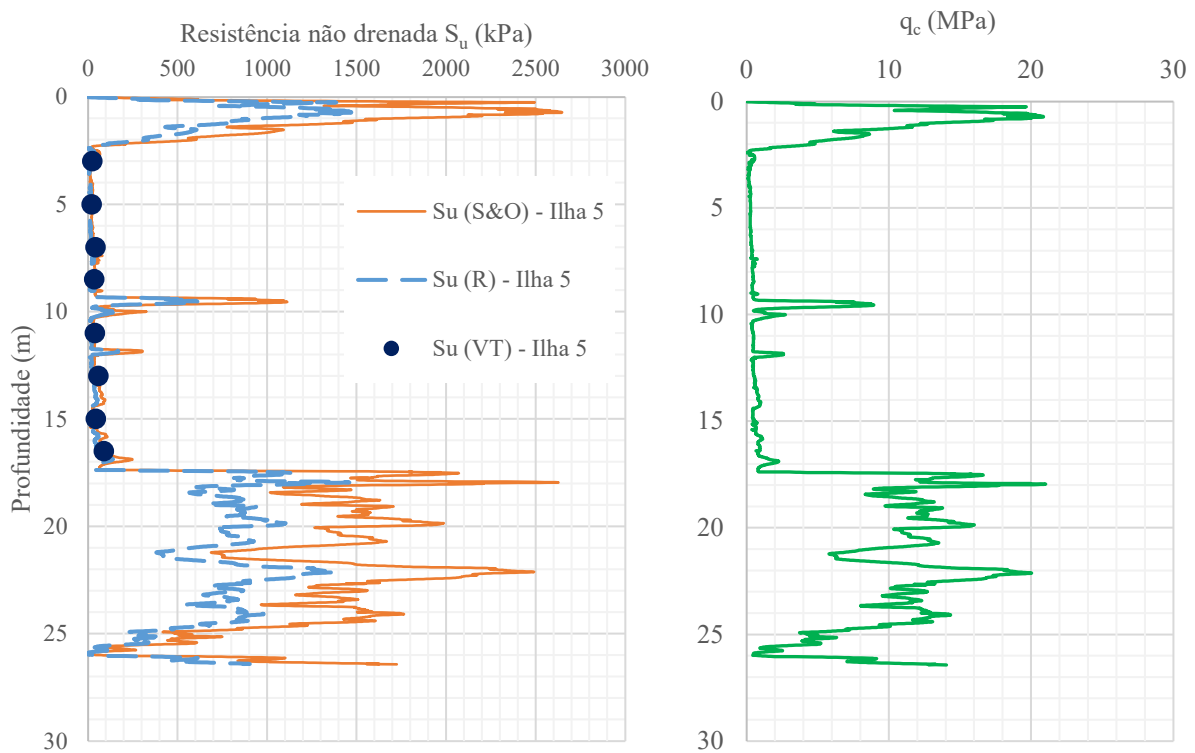


Figura 4 - Comparação de  $S_u$  entre o ensaio de palheta e pelos CPTus com  $q_c$  para a Ilha 5.

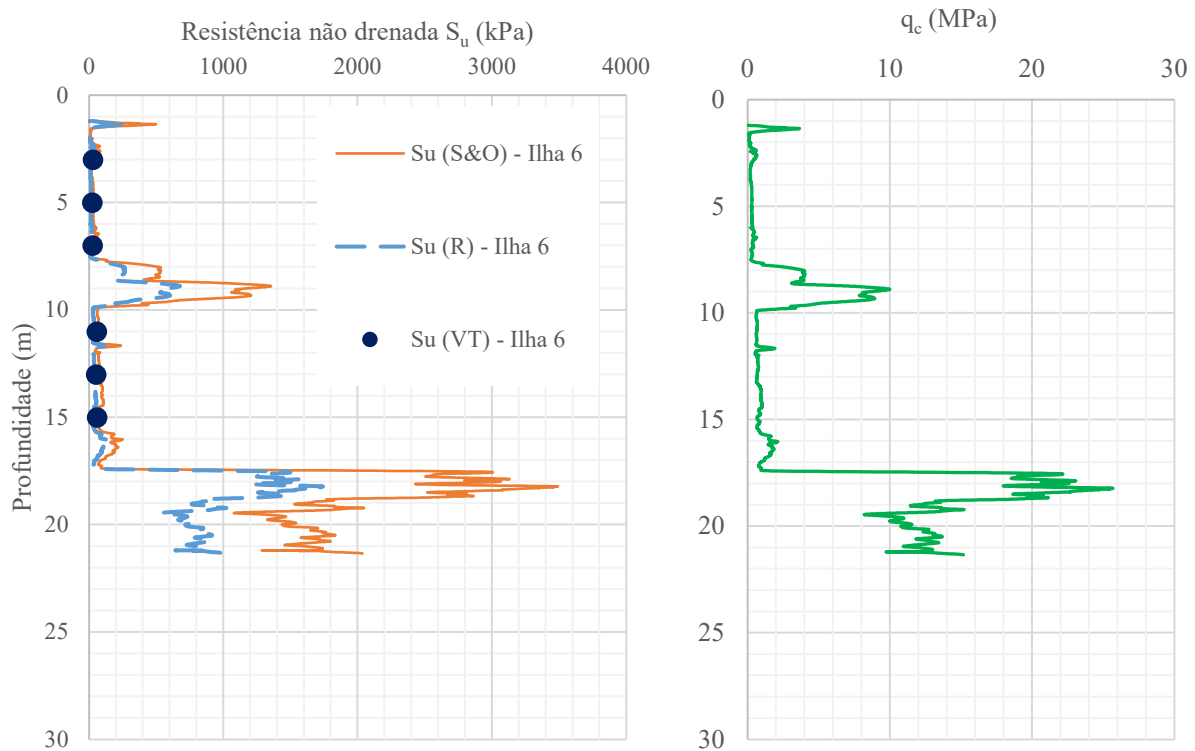


Figura 5 – Comparação de  $S_u$  entre o ensaio de palheta e pelos CPTus com  $q_c$  para a Ilha 6.

Pelos resultados obtidos, é notável uma alta dispersão nos resultados das diferenças entre os valores de  $S_u$  calculados indiretamente e diretamente. Para futuros trabalhos, sugere-se a realização de análise estatística mais aprofundada com o objetivo de entender melhor as correlações entre as diferenças dos métodos e os outros resultados obtidos.

## 5 CONCLUSÃO

Os valores de resistência não drenada ( $S_u$ ) variaram altamente dependendo do método utilizado para cálculo, porém ambos os métodos seguiram tendências similares nos perfis de solo analisados, até mesmo nas camadas mais resistentes, especialmente em profundidades superiores a 16 metros, que apresentaram diferenças mais pronunciadas. Após a análise comparativa realizada, o método de Schnaid & Odebrecht (2012) forneceu valores mais próximos ao ensaio de palheta, porém a escolha do método a ser utilizado pode variar de acordo com o projeto.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Almeida, M. S. S. e Marques, M. E. S. (2010). *Aterros sobre solos moles: projeto e desempenho*. São Paulo, Oficina de Textos.
- Robertson, P. K. (2009). *Interpretation of cone penetration tests – unified approach*. Canadian Geotechnical Journal. v 46. p. 1337-1355.
- Robertson, P. K. (2012). *Interpretation of in-situ tests – some insights*. The James K. Mitchell Lecture. Geotechnical and Geophysical Site Characterization 4. ISC 4. Brasil. p. 3-24.
- Robertson, P. K. (2022). *Guide to Cone Penetration Testing*. Gregg drilling LLC. 7º edition.
- Schnaid, F. e Odebrecht, E. (2012). *Ensaio de campo e suas aplicações à Engenharia de Fundações*. São Paulo, Oficina de Textos. 2ª edição. p. 195-196.