



Nº do Arquivo: 062714_2254 - Jun/2014 - Lat: 20°7'34" S, - Long: 44°7'12" W - Datum SAD_69
Foto: Marcelo Rosa - (31) 9957 0027 - 3297 0582



OBRA: VALE

Estimativa de parâmetros geotécnicos

Barragem I de Mina do Feijão

RELATÓRIO: AN-2018-05-2A

Engenheiro Fernando Schnaid

Porto Alegre, Março de 2018.

Porto Alegre, 19 de Março de 2018

Geoconsultoria
A/C Eng. Paulo Abrão

Obra: Barragem I de Mina do Feijão
Proprietária: Vale

Estimativa de parâmetros geotécnicos

Barragem I de Mina do Feijão

SUMÁRIO

RESUMO EXECUTIVO

- 1. Introdução**
- 2. Documentação**
- 3. Parâmetros de resistência ao cisalhamento: Análise Estática**
- 4. Potencial de liquefação**
- 5. Parâmetros de resistência ao cisalhamento: Gatilho de liquefação**
- 6. Parâmetros de resistência ao cisalhamento: Liquefação**
- 7. Conclusões e recomendações**

Anexo I: Perfil de piezocone

Anexo II: Nível de água de equilíbrio

Anexo III: Interpretação dos piezocones

Anexo IV: Condições de drenagem

Anexo V: Potencial de liquefação

Anexo VI: Gatilho de liquefação

Anexo VII: Resistência ao cisalhamento liquefeita

1. Introdução

Neste Relatório são interpretados os resultados de ensaios de campo e laboratório executados nos rejeitos da Barragem I de Mina do Feijão, de propriedade da VALE, localizado no Estado de Minas Gerais. É objetivo do trabalho avaliar o potencial de liquefação dos rejeitos à luz da investigação geotécnica e estimar os parâmetros geotécnicos representativos do Estado do material.

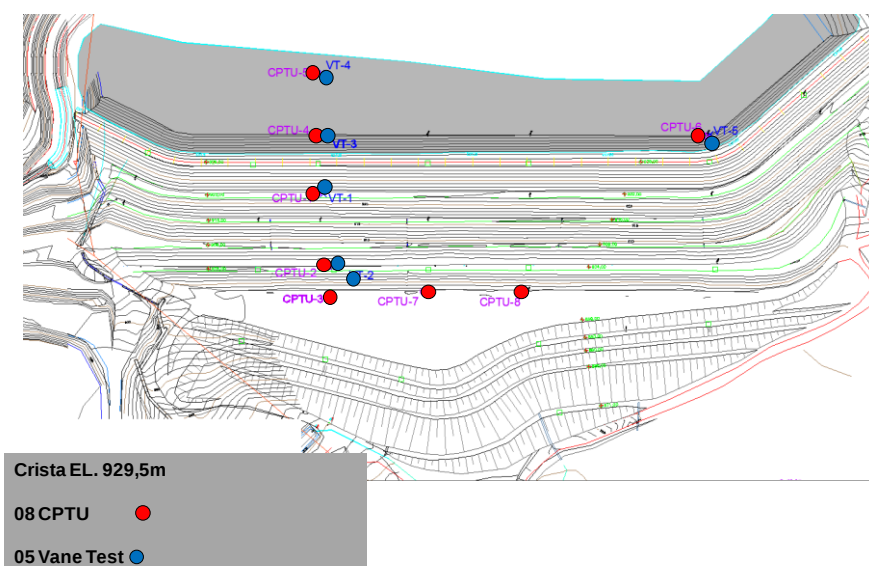
2. Documentação

Os documentos disponibilizados pela Contratante e avaliados no desenvolvimento dos trabalhos são relacionados abaixo:

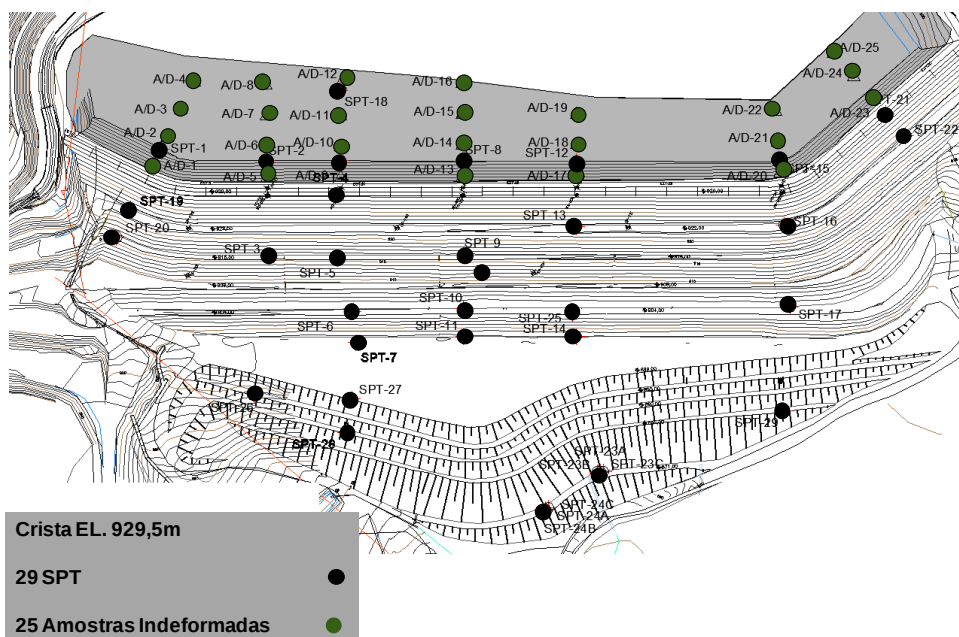
- a) Scoot Olson, Geotechnical Engineer. Memorandum Draft, 20/07/2016
- b) VL55-RT05 – Auditoria. Barragem I. Relatório Técnico da Auditoria Extraordinária. Relatório de Inspeção de Segurança Regular. Geoconsultoria. 30/08/2016.
- c) Cálculo do risco monetizado para barragens e diques. Barragem I. Nota Técnica. Discussão sobre os ensaios de campo e laboratório. POTVAL02G2-1-TC-RTE-0067, 12/01/2017
- d) GRC – Gestão de Riscos Geotécnicos. Estudo para Estabilização. Potamos Engenharia e Geologia. Apresentação Power Point, 11/12/2017
- e) Planilhas Excel com dados de ensaios enviadas por e-mail.

3. Parâmetros de resistência ao cisalhamento: Análise Estática

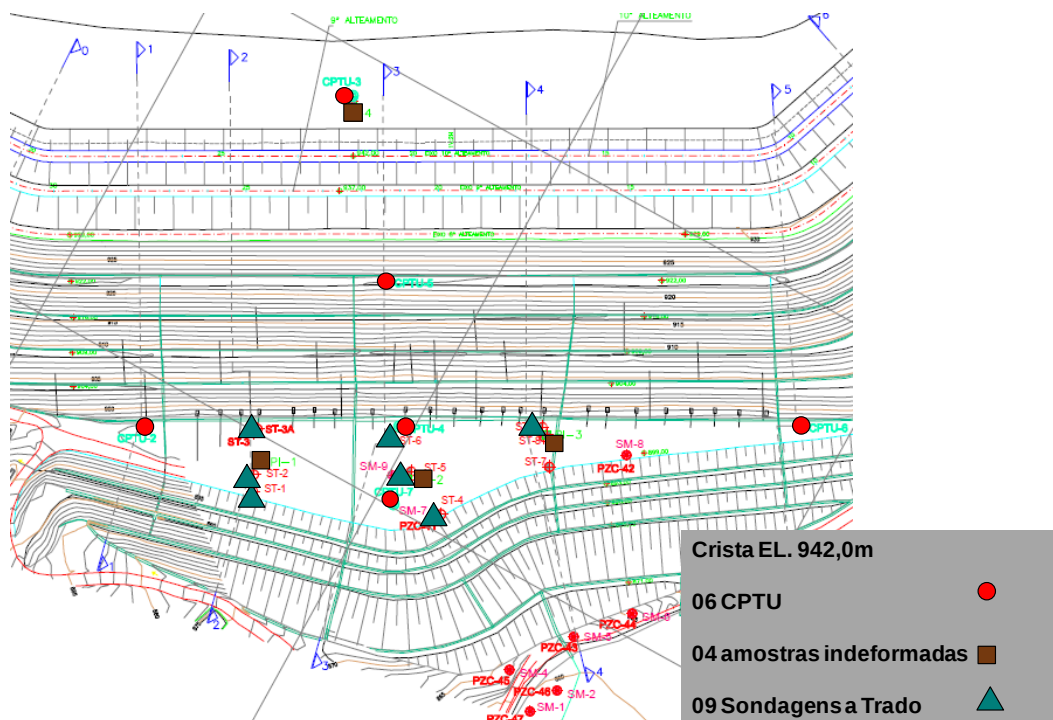
A planta de locação dos ensaios avaliados neste trabalho é mostrada na Figura 3.1, sendo as coordenadas dos ensaios listadas na Tabela 3.1. Existem campanhas executadas em 2005 e 20016. Neste trabalho foram contempladas as campanhas de investigação de 2016.



(a) Campanhas de 2005



(b) Campanhas de 2005



(c) Campanhas de 2016

Figura 3.1. Planta de localização dos ensaios

Na Campanha de 2005 foram executados 8 ensaios CPTU e 5 ensaios Vane Test. A coleta de amostras e de ensaios realizada em 2005 contemplou a coleta de 4 blocos indeformados e 3 amostras indeformadas tipo Osterberg (seis, localizadas na praia de rejeitos e uma na berma) para a realização de ensaios com corpos de prova indeformados.

Na Campanha de 2016 foram coletados 4 blocos indeformados (três localizados ao longo da berma e um localizado na praia) para a realização de ensaios com corpos de prova indeformados e deformados com diferentes densidades em relação à densidade seca máxima do ensaio Proctor Normal. A Tabela 3.1 apresenta as amostras, os ensaios triaxiais realizados e as tensões confinantes utilizadas. A Tabela 3.2 apresenta os ensaios de campo de campo, que contemplam 9 ensaios CPTU e 3 Vane Test.

Tabela Erro! Nenhum texto com o estilo especificado foi encontrado no documento..1 Quantidade de amostras coletadas e ensaios triaxiais realizados – Campanha 2016.

Identificação das amostras			Amostras Indeformadas Ensaio tipo			Amostras Deformadas Ensaio Tipo	
			CK0U	CIU	CIU	CIU 79% do PN	CIU 83% do PN
ID	Furo	Localização	$\sigma'v$ / k	$\sigma'c$ (kPa)			
			50 kPa /0,46 100 kPa /0,46 200 kPa /0,55 400 kPa /0,49	50/100 200/400	50/200 400/800	100/300 800	100/300 800
9940	PI 01	Berma El. 900 m	1	1		1	1
9942	PI 01A	Berma El. 900 m					
9943	PI 02	Berma El. 900 m					
9944	PI 02A	Berma El. 900 m			1	1	1
9945	PI 03	Berma El. 900 m				1	1
9946	PI 03A	Berma El. 900 m			1		
10017	PI 04	Reservatório El. 940 m			1	1	1

Tabela Erro! Nenhum texto com o estilo especificado foi encontrado no documento..2 Investigações de Campo – Campanha 2016.

CPTU	Localização	VANE TEST	Localização
CPTU-2	Berma El.900	VT-16-11	Berma El.900
CPTU-3	Praia El. 942	VT-16-12	Berma El.900
CPTU-4	Berma El.900	VT-16-13	Alt. El.904
CPTU-5	Alt. El.929		
CPTU-6	Berma El.900		
CPTU-7	Berma El.900		
CPTU-16-7	Berma El.900		
CPTU-16-8	Berma El.900		
CPTU-16-9	Alt. El.904		

3.1 Ensaios de laboratório

Ensaios triaxiais CKoU foram executados em amostras indeformadas moldadas de blocos coletados em camadas superficiais do material de praia.

Os resultados de ensaios triaxiais adensados na linha K_0 e cisalhados em condições não drenadas (CKoU) são resumidos na Figura 3.1, na qual são observadas as variações de tensões cisalhantes com a deformação axial específica.

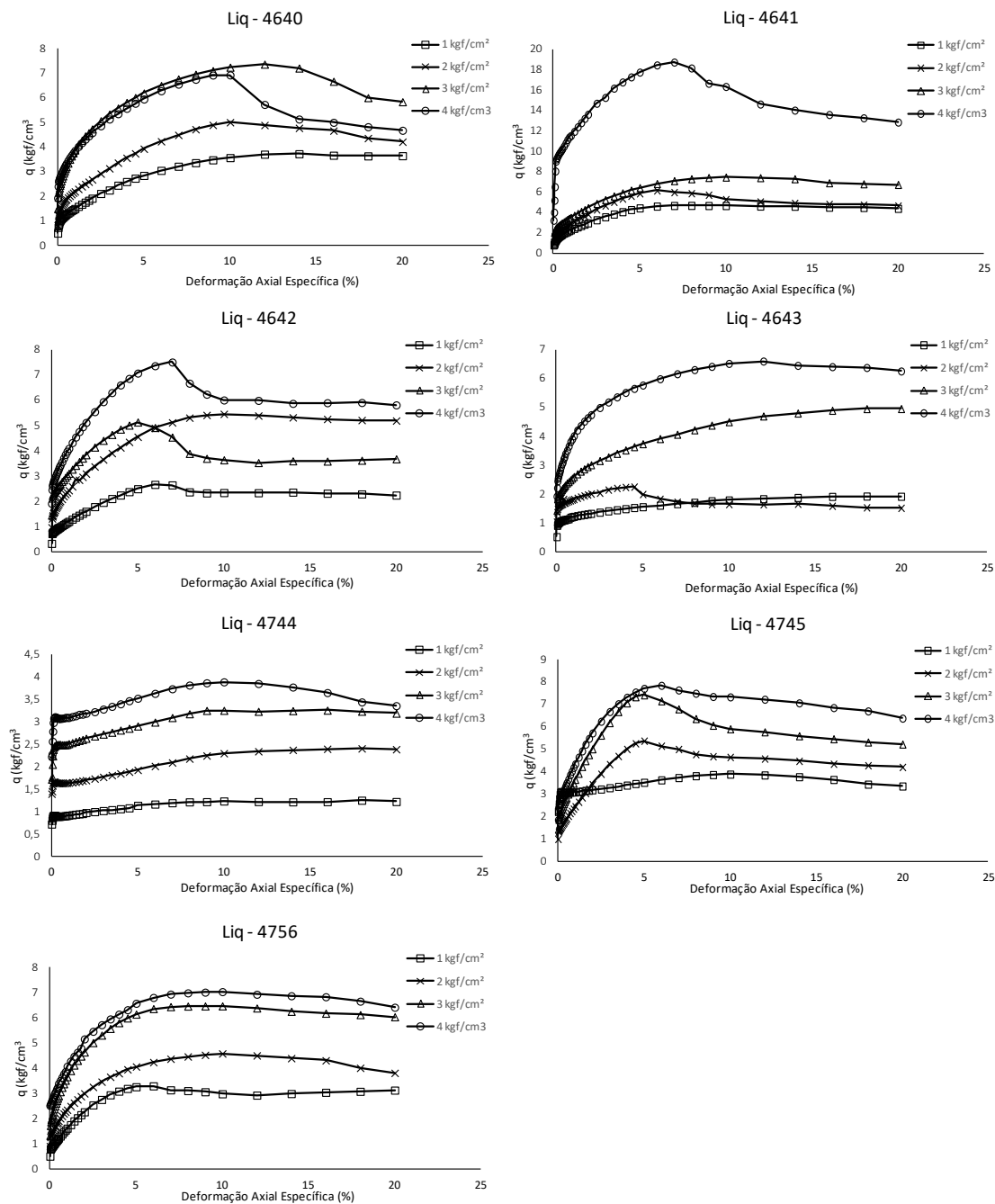


Figura 3.1 Curvas tensão x deformação dos ensaios CIU (a) ensaio Liq-3804 e (b) ensaio Liq-3805

Estes ensaios foram analisados e permitiram estabelecer parâmetros característicos dos rejeitos, expressos em termos de tensões efetivas:

- Ângulo de atrito interno estado crítico: $\phi_{\text{crit}} = 34,9^\circ$
- Coeficiente angular da linha de estado crítico: $\lambda = 0,15$ Índice de compressão oedométrico $C_c = 0,15$
- Volume específico sob pressão unitária: $\Gamma = 1,0$
- Coeficiente angular da linha de estado crítico: $M = 1,42$

Interpretação destes ensaios segundo Scoot Olson, Memorandum Draft (2016), alguns ensaios triaxiais mostram comportamento fortemente compressível, com parâmetro de estado ψ da ordem de 0,2 (Figura 3.4).

Em contrapartida, os ensaios triaxiais CIU não apresentam redução de tensões cisalhantes pós-pico (strain-softening), que resultam em parâmetro de estado ψ ligeiramente negativos, característico de solos que não apresentam potencial de liquefação.

Type	ID	Depth (m)	γ_d / γ_d max (%)	Triaxial CIUsat			Perm.
				Su/ σ' c	c'(kPa)	ϕ' (°)	k x 10 ⁻³ cr
Conventional Triaxial Test							
undeformed specimen	PI01	1.3-1.5	81.1	0.84-0.66	5.5	29.6	1.42
undeformed specimen	PI02A	1.2-1.5	104.3	4.76-1.45	28.0	38.8	1.11
undeformed specimen	PI03A	1.2-1.5	107.5	6.74-1.62	85.5	37.6	1.04
Triaxial with rupture by additional poropressure							
undeformed specimen	PI01	1.3-1.5	81.1		0.5	32	
undeformed specimen	PI02A	1.2-1.5	104.3		0.5	37	
undeformed specimen	PI03A	1.2-1.5	107.3		4.5	38	

2.2. Ensaios de campo

Os resultados de ensaios de piezocone são utilizados para determinação estratigráfica dos perfis de rejeitos da Barragem I de Minas do Feijão. Um perfil característico é apresentado na Figura 3.5, na qual é possível observar um material cujas características variam com a profundidade, caracterizando materiais arenosos, siltsosos e eventualmente argilosos. Na camada argilosos valores de resistência à penetração são da ordem de 300kPa, representativos de argilas compressíveis. Os perfis de todos os piezocone são apresentados no Anexo I.

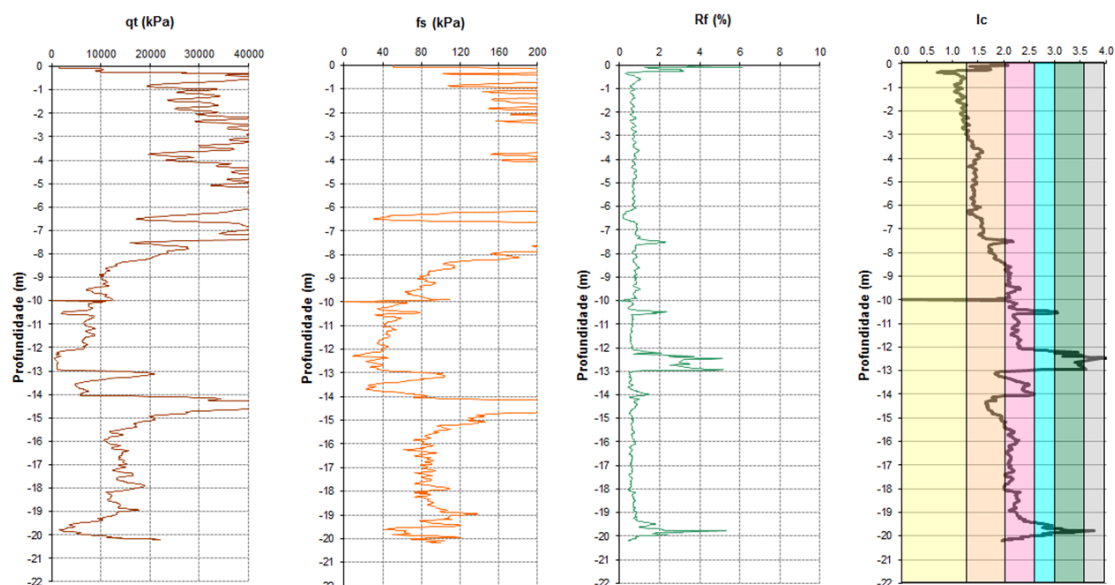


Figura 3.5 Perfil característico de ensaio de piezocone (CPTU5 – campanha 2016)

Os ensaios de piezocone possibilitam também avaliar as condições de drenagem do depósito e estimar as propriedades de comportamento necessárias à análise de estabilidade da barragem em condições de carregamento estático.

A interpretação de um ensaio típico de piezocone é apresentada na Figura 3.6, incluindo os valores de resistência não-drenada s_u e ângulo de atrito interno ϕ' .

No ensaio, as condições de drenagem variam ao longo da profundidade. Neste local o lençol freático é encontrado na profundidade em torno de 10m. Acima do freático a resistência à penetração é relacionada ao ângulo de atrito interno do solo (ϕ'). Abaixo da linha freática, ocorre geração de excesso de poro pressão (u_2) durante a cravação do piezocone caracterizando comportamento essencialmente não-drenado. Subjacente a esta camada, a cravação ocorre novamente em condições predominantemente drenadas.

Importante notar que a poro pressão de equilíbrio situa-se abaixo da linha freática, indicando que há drenagem de fundo no reservatório. Análise detalhada é mostrada no Anexo II. Neste anexo são apresentados todos os perfis de piezocone utilizado neste trabalho, sendo que para cada perfil é plotado o excesso de poro pressão gerado durante a cravação do piezocone (u_2), o perfil de poro pressão hidrostático apresentado nos relatórios de sondagem recebidos e aqui denominados de (u_0) e o perfil de poro pressão de equilíbrio (u_{equi}). Todos estes valores são plotados contra a profundidade. Para facilitar o entendimento, na obtenção das poro-pressões de equilíbrio são apresentados alguns resultados de ensaios de dissipação.

Destaca-se que foi adotado no presente trabalho, em todas as análises, a poro pressão de equilíbrio. Esta consideração tem impacto direto e importante em todas as análises efetuadas doravante.

Adicionalmente, após a inspeção dos resultados de ensaio de laboratório, foi adotado em toda a interpretação o peso específico do rejeito do minério de ferro como sendo de 23 kN/m³.

No Anexo III são apresentados resultados e interpretação de todos os ensaios de piezocone.

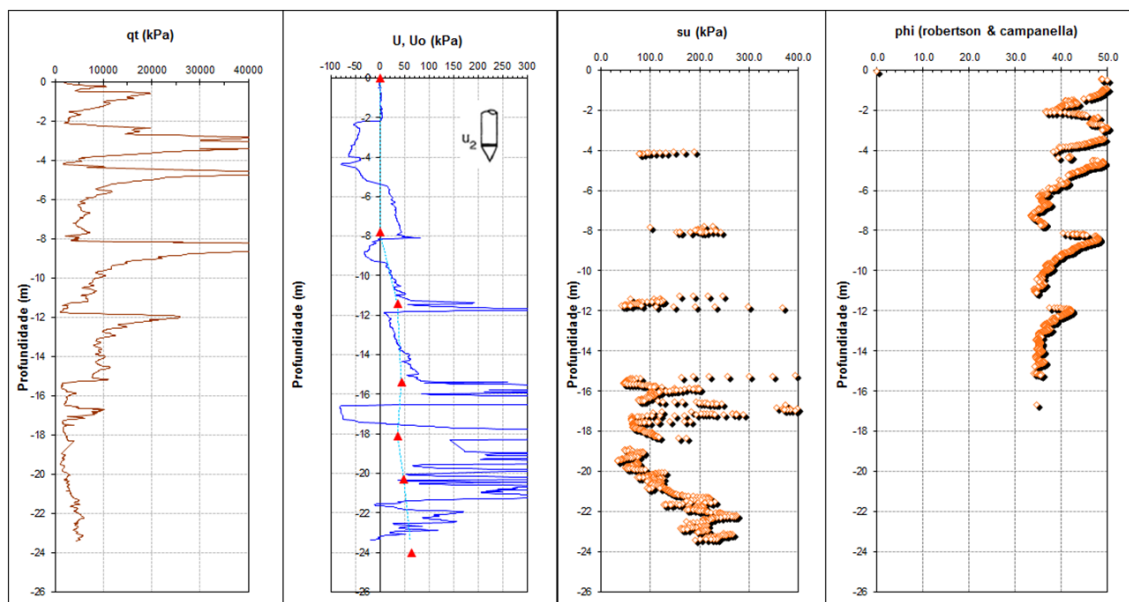


Figura 3.6 Interpretação dos ensaios de piezocone, incluindo parâmetros característicos de projeto para análises de estabilidade em condições estáticas (CPTU 6/2016).

Quanto aos parâmetros, na camada superior a resistência ao cisalhamento é representada pelo ângulo de atrito interno (ϕ') do rejeito, estimado a partir da equação (Mayne, 2006):

$$\phi' = \arctan[0,1 + 0,38 \cdot \log(q_t/\sigma'_{vo})] \quad [2.1]$$

Entre as profundidades de 16m a 26m estima-se a resistência ao cisalhamento não-drenada, calculada em função da resistência à penetração q_t :

$$S_u = \frac{(q_t - u_2)}{N_{ke}} \quad [2.2]$$

sendo $N_{KT}=18$ (calibrado em relação aos ensaios de palheta). Conforme descrito na sequencia, pode ter havido drenagem parcial durante a penetração e, neste caso, a resistência não corresponde a condição não drenada. Apesar disto o termo S_u é adotado genericamente em todas as comparações.

Adicionalmente, são apresentados os resultados de ensaios de palheta (Figura 3.7), tanto para resistência de pico como para resistência amolgada. Valores de $S_u/\sigma'_{vo}=0,31$

são obtidos para resistência de pico e $S_u/\sigma'_{vo}=0,04$ para resistência amolgada. Se descartados os valores discrepantes, de resistência elevada, é obtida uma envoltória mais conservadora de $S_u/\sigma'_{vo}=0,25$.

As medidas de torque do ensaio de palheta devem, no entanto, ser avaliadas criticamente pois os valores são influenciados por amolgamento e pela velocidade de cisalhamento. Em princípio todos os ensaios de palheta refletem condições drenadas, sendo que alguns ensaios foram inclusive executados acima do lençol freático.

Figura 3.7 Ensaios de palheta

Condições de drenagem

Os ensaios de dissipação realizados durante as fases de interrupção da cravação do piezocone permitem definir a posição do nível de equilíbrio do lençol freático (nem sempre coincidente com a linha hidrostática), além de estimar o coeficiente de adensamento horizontal C_h (e.g. Houlsby e Teh, 1992)

Na formulação foi adotado um valor médio de índice de rigidez I_r de 200 e 300, $RR/CR = 0.15$ e $K_h/k_v = 1$.

Os resultados de C_h são mostradas no Anexo IV, juntamente com os valores de velocidade normalizada ($V = \frac{v \cdot d}{c_v}$). Em muitos casos os valores de V são inferiores a 10, indicando haver provável influência de drenagem parcial durante a cravação dos piezocones. Nestes casos, a resistência ao cisalhamento não-drenada obtida é ligeiramente sobre-estimada.

4. Potencial de liquefação

O potencial de liquefação pode ser avaliado a partir de diferentes métodos de análise, considerando os resultados de ensaios de piezocone e de cone-sísmico (Plewes, 1992; Davis 1999, Robertson, 2009; Schnaid, 2009). Todos os métodos são baseados no conceito de parâmetro de estado Ψ , sendo o valor de $\psi=-0.05$ adotado como limite seguro para identificar materiais com potencial de liquefação. Cabe salientar que todos os métodos acima descritos, com exceção de Schnaid (2009), foram desenvolvidos com base em bancos essencialmente constituídos de solos granulares de origem sedimentar e não para rejeitos.

No método de Plewes (1992) o valor de Ψ é estimado com base na resistência à penetração, poro pressão e atrito mobilizado na luva:

$$\psi = \frac{\ln \left[\frac{Q(1-Bq)}{3.6 + \frac{10.2}{F}} \right]}{(1.33F - 11.9)}$$

Gráficos de caracterização desenvolvidos por Davis (1999) e Robertson (2009), ambos baseados no Parâmetro de Estado Ψ , são adotados na tentativa de classificar materiais de comportamento contrátil e dilatante.

Um exemplo de aplicação é mostrado para o CPTU 1, realizado na campanha de 2016. No Anexo V são apresentados os resultados de todas as análises.

(a) Método de Plewes (1992)

(a)

(b) Método de Davies (1999)

(c)

(c) Método de Robertson (2009)

Figura 4.1 Previsão de potencial de colapso (CPTU 1, campanha de 2016)

Um método alternativo consiste na interpretação de ensaios de cone sísmico, caracterizando o rejeito a partir do módulo de cisalhamento a pequenas deformações (G_0) e da resistência à penetração (q_t),

Fig. 4.2 Caracterização do rejeito (Schnaid, 2009)

Uma avaliação cuidadosa destes gráficos permite concluir que:

- a) As análises são em geral convergentes, mostrando materiais contráteis ($\psi > 0$) que apresentam potencial de liquefação e materiais dilatantes ($\psi < 0$) que não são susceptíveis à liquefação.
- b) A observação cuidadosa das informações provenientes da Figura 4.1 indica que os valores de $\psi > 0$ são observados predominantemente em solos mais finos, argilo-siltosos, que por princípio não são susceptíveis à liquefação. No método de Plewes (1992) ψ positivo está relacionado a I_c entre 3,0 e 3,5. Nos métodos de Davis (1999) e Robertson (2009) os maiores valores de ψ ocorrem em solos com baixos valores de Q e altos valores de f_s .
- c) No método de Schnaid (2009), baseado no cone-sísmico, os materiais mostram-se predominantemente não-plásticos e neste caso mais sensíveis a liquefação.

As condições da barragem variam espacialmente, alternando estratos contráteis e dilatantes. É necessário, portanto, desenvolver um modelo da Barragem de Forquilha, geométrica e fisicamente consistente, para avaliar as condições de estabilidade, separando os extratos de acordo com seu comportamento mecânico.

5. Parâmetros de resistência ao cisalhamento: Gatilho de liquefação

Para verificação do “gatilho” de liquefação podem ser realizadas análises expressas em termos de tensões efetivas ou em termos de tensões totais.

Análises realizadas em termos de tensões efetivas utilizam modelos tipo Cam-Clay, são mais rigorosas, e tem como parâmetros constitutivos M , λ , Γ , K associados a uma lei constitutiva para descrever a geração de poro pressões.

No Brasil, as análises são em geral realizadas com base em tensões totais, para as quais é necessário estimar resistência ao cisalhamento, $S_u(yield)$. Assim, quando o solo apresenta características contráteis o método consiste na avaliação da possibilidade das tensões cisalhantes estáticas excederem a resistência ao cisalhamento, $S_u(yield)$, mobilizada nas camadas susceptíveis à liquefação.

Não há método consagrado para determinar $S_u(yield)$, sendo recomendável comparar resultados de ensaios de campo e de laboratório. A resistência não drenada pode ser determinada em compressão triaxial, cisalhamento e extensão triaxial. Ladd e Foott (1974) sugeriram que a resistência ao cisalhamento não drenada ao longo de uma superfície de ruptura deve ser determinada por diversos ensaios de laboratório, para obter uma melhor representação das condições de carga em diferentes áreas da superfície de deslizamento, na modelagem da resistência ao cisalhamento e deformação do solo ao longo da superfície de deslizamento.

A resistência não-drenada $S_u(yield)$ calculada a partir dos resultados dos ensaios de laboratório CIU e CAU resultam em $S_u(yield)/\sigma'_{vo}$ de 0,42 e 0,51, respectivamente.

É comum na prática de engenharia utilizar a resistência à compressão triaxial quando se considera a estabilidade de taludes, no entanto pode-se argumentar que trajetórias em cisalhamento representam com mais precisão as condições de cisalhamento ao longo da superfície de ruptura. Com base no modelo Cam Clay é possível calcular teoricamente a resistência ao cisalhamento não-drenada na trajetória de cisalhamento (DSS) a partir do ângulo de atrito interno do solo.

$$S_u/\sigma'_{vo} = \frac{1}{2} \tan \phi'_{crit}$$

Para avaliar a resistência associada ao gatilho de liquefação adota-se como referência o ângulo de atrito interno no Estado Crítico ($34,9^\circ$) que resulta em uma resistência normalizada de 0,28.

Quanto aos ensaios de campo, para os ensaios de palheta a resistência normalizada é de aproximadamente 0,25 (descartando-se os valores mais elevados de torque medido nas camadas superficiais). Importante notar que a trajetória das palhetas se aproxima daquela obtida em ensaios DSS.

Um resumo dos valores calculados de resistência normalizada (S_u/σ'_{vo}) medidos nestes ensaios é mostrado na Figura 5.1.

Figura 5.1 Valores de resistência normalizada (S_u/σ'_{vo}) para ensaios de laboratório CIU, CK0U e DSS e ensaios de palheta.

Na análise subsequente, estes valores de resistência normalizada, são comparados às estimativas de resistência obtidas de resistência obtidas dos ensaios de piezocone. Duas abordagens são adotadas: Método Convencional (usando fator de capacidade de carga N_{kt}) e Método Empírico de Olsen.

Nas análises adota-se $N_{kt}=18$, valor calibrado pelas resistências mobilizadas nos ensaios de palheta. No Método de Olsen a resistência $S_u(yield)$ é calculada diretamente de q_t , corrigido pelo nível de tensões.

Exemplo típico de aplicação é mostrado nas Figura 5.2 e 5.3, sendo todos os resultados resumidos no Anexo VI. Para o exemplo da figura observa-se que o Método de Olsen produz uma envoltória mínima de resistência que resulta em um valor normalizado de $S_u(yield)/\sigma'_{vo}$ de 0,23. A resistência calculada por N_{kt} resulta em padrão de dispersão, com valores sempre iguais ou superiores a 0,23.

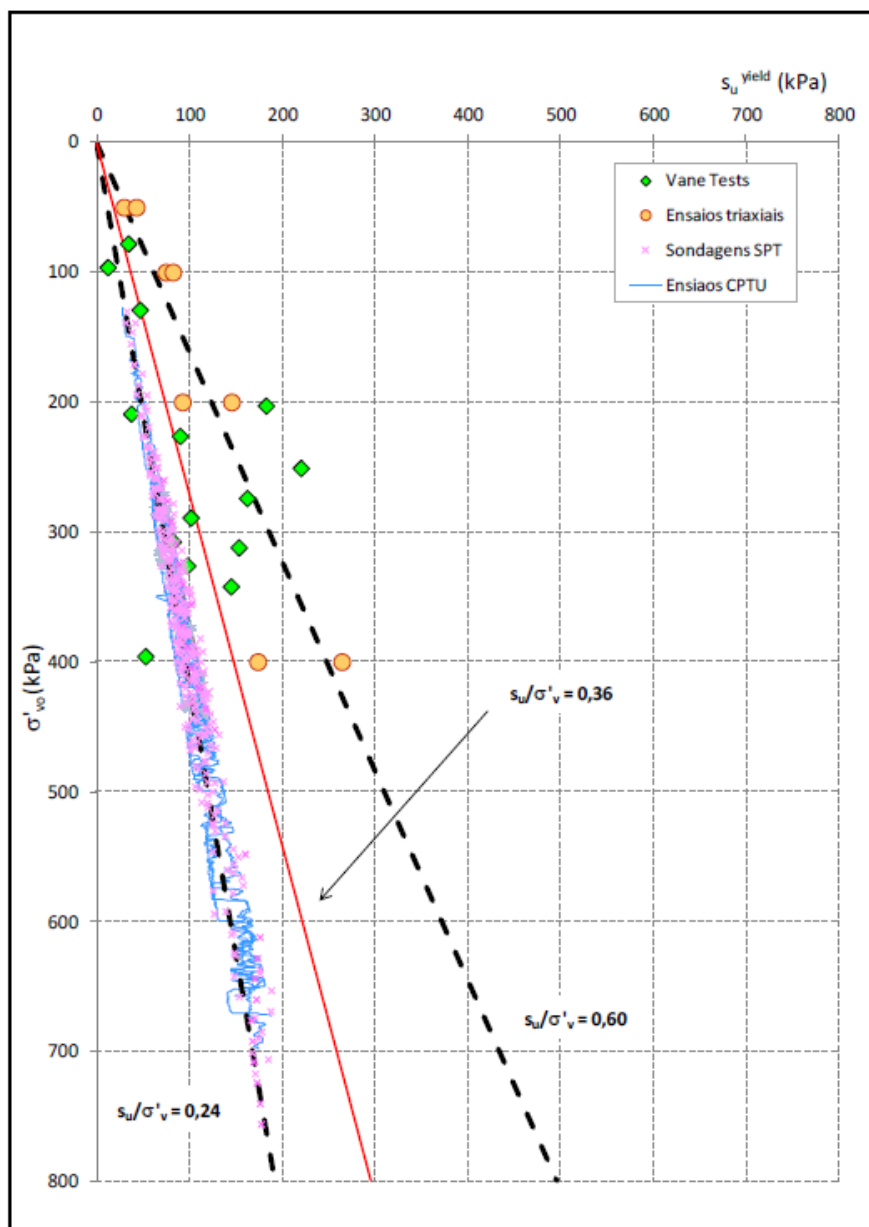


Figura 13 – Envoltórias de resistência não drenada.

Figura 5.2 Resistências normalizadas incluindo o Método de Olsen para interpretação das resistências não-drenadas (yield) dos ensaios de piezocone.

Figura 5.3 Resistências normalizadas incluindo a interpretação das resistências não-drenadas (yield) dos ensaios de piezocone (Nkt=18)

Todas as análises são resumidas na Tabela 5.1. Desconsiderado o valor dos ensaios CIU, os valores superiores de torque dos ensaios de palheta e as todos os picos de resistências dos CPTUs (abordagem conservadora), calcula-se um valor médio de $S_u(yield)/\sigma'_{v0} = 0,28$.

Tabela 5.1 Resistências normalizadas $S_u(yield)/\sigma'_{vo}$

Tipo Ensaio	$S_u(yield)/\sigma'_{vo}$	Observação
Triaxial CAU	0,46	
DSS (Cam Clay)	0,29	Valor característico para Análise de Estabilidade
Palheta	0,23	Risco de ensaios drenados Valores superiores excluídos
CPTU (Olsen)	0,23	Valor mínimo (empírico)
CPTU (Nkt=18)	$\geq 0,23$	Valores consideravelmente superiores ao longo da profundidade
Média	0,28	Triaxial CIU desconsiderado (conservador) CPTU (Nkt) desconsiderado (conservador)

As análises de estabilidade devem ser realizadas de acordo com as recomendações de normas de barragens.

- Análises de estabilidade estática em condições de operação da barragem devem resultar em fatores de segurança mínimos de 1,5. Para os *rejeitos da Praia*, os parâmetros de resistência a serem adotados são o ângulo de atrito interno (ϕ' da ordem de 30°) e resistência ao cisalhamento não drenada de pico crescente com a profundidade com S_u/σ'_{vo} da ordem de 0,30.
- Para verificação de avaliação de Gatilho quanto à liquefação, no caso de análise em termos de tensões totais, recomenda-se adotar resistência ao cisalhamento, $S_u(yield)/\sigma'_{vo}$ de 0,28 e verificar os Fatores de Segurança exigidos em Projeto.
- Complementarmente, realizar análises complementares de gatilho para valores mínimos $S_u(yield)/\sigma'_{vo}$ de 0,23. Os fatores de segurança para condições extremas devem ser superiores à unidade.

Atenção deve ser dada a distribuição espacial dos rejeitos na Barragem de Forquilha III, identificando materiais contráteis e dilatantes. Esta representação espacial é fundamental à precisão dos fatores de segurança a serem estabelecidos nas análises de estabilidade.

6. Parâmetros de resistência ao cisalhamento: Liquefação

A resistência ao cisalhamento não drenada liquefeita normalizada é calculada a partir das formulações de Olsen e Stark (2002) e Robertson (2009).

Os resultados são apresentados no Anexo VII.

Na Figura 6.1 é mostrado um resultado típico das estimativas de resistência liquefeita obtida pelo piezocone. Os valores pode ser comparados à resistência última dos ensaios triaxiais CK_0U e à resistência amolgadas dos ensaios de palheta.

Os valores de $S_u(liq)/\sigma'_{vo}$ variam na faixa entre 0,05 e 0,10, exibindo picos de maior resistência.

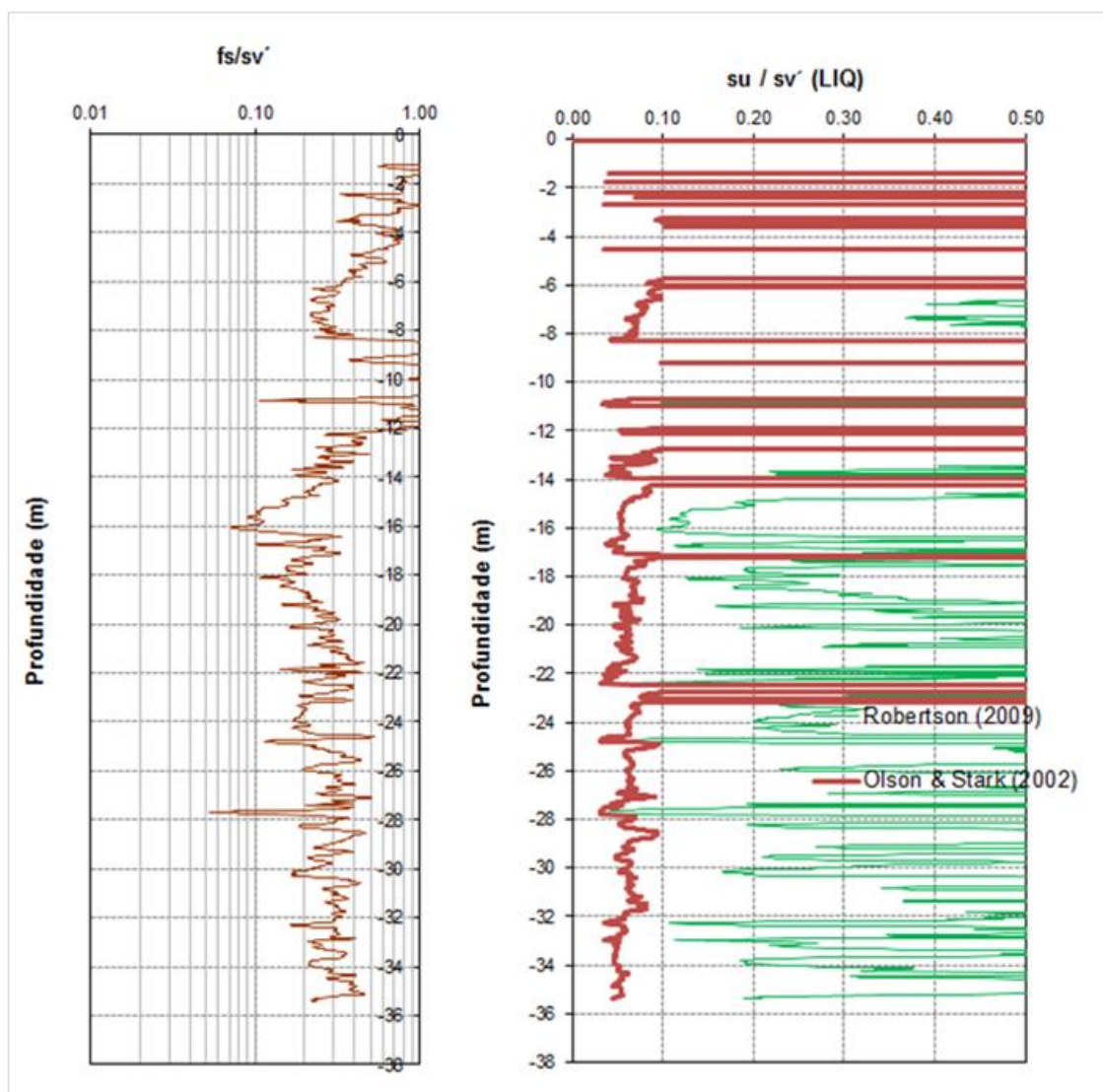
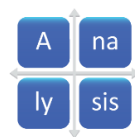


Figura 6.1 Resistência normalizada pós-liquefação



Anexo I: Perfil de piezocone

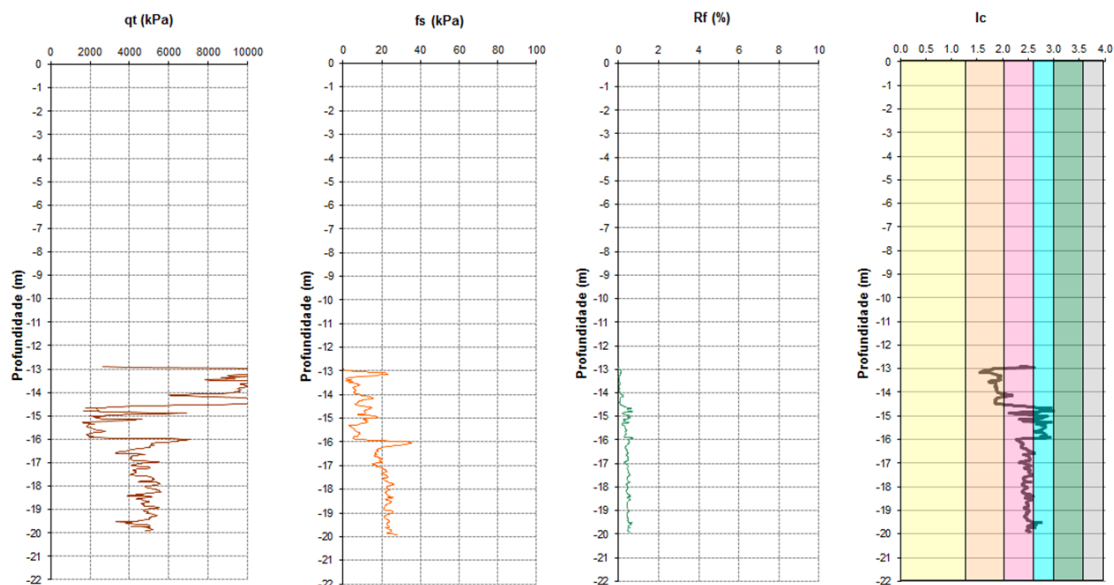


Fig. 1 Anexo I – Perfil CPTu 02.

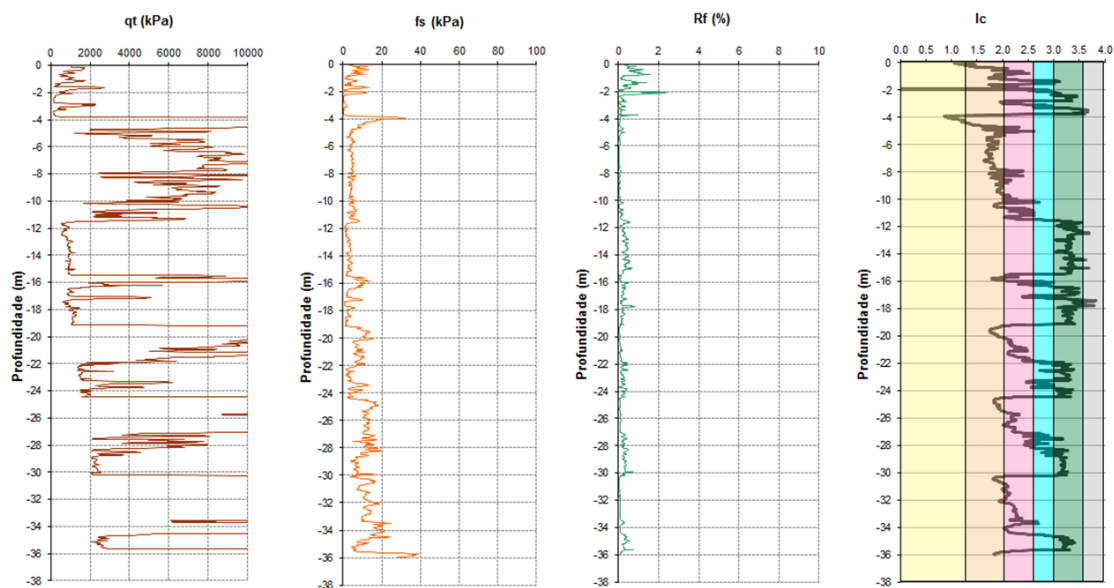


Fig. 2 Anexo I- Perfil CPTu 03.

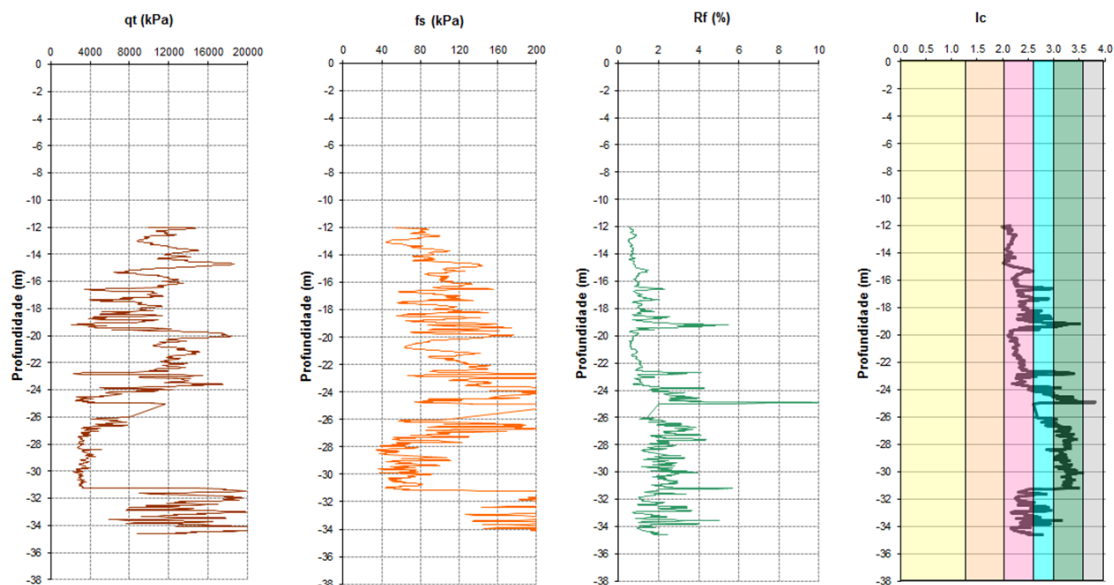


Fig. 3 Anexo I- Perfil CPTu 04 – 2016.

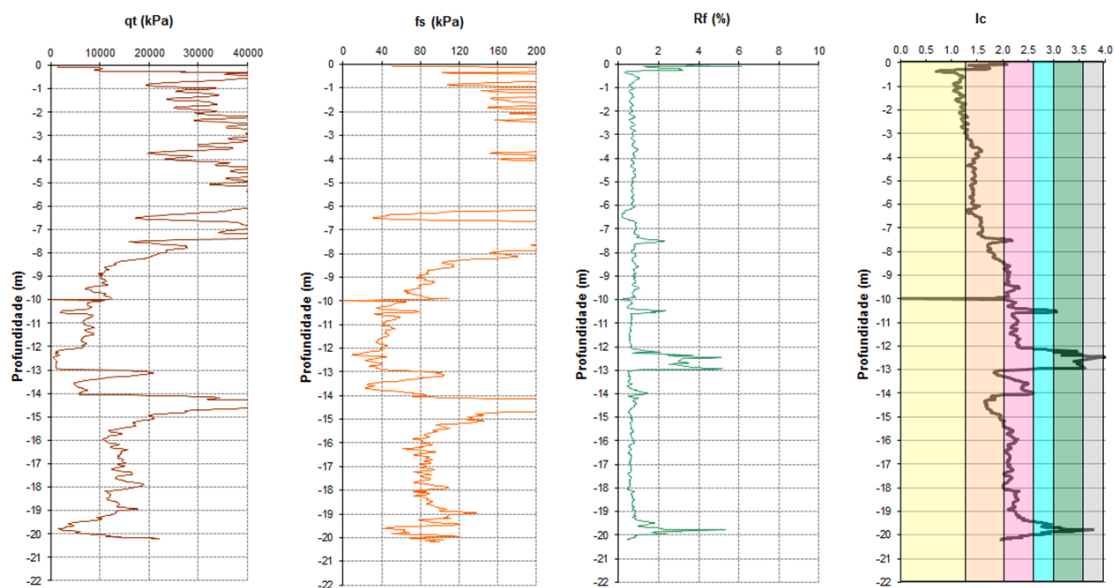


Fig. 4 Anexo I- Perfil CPTu 05 – 2016.

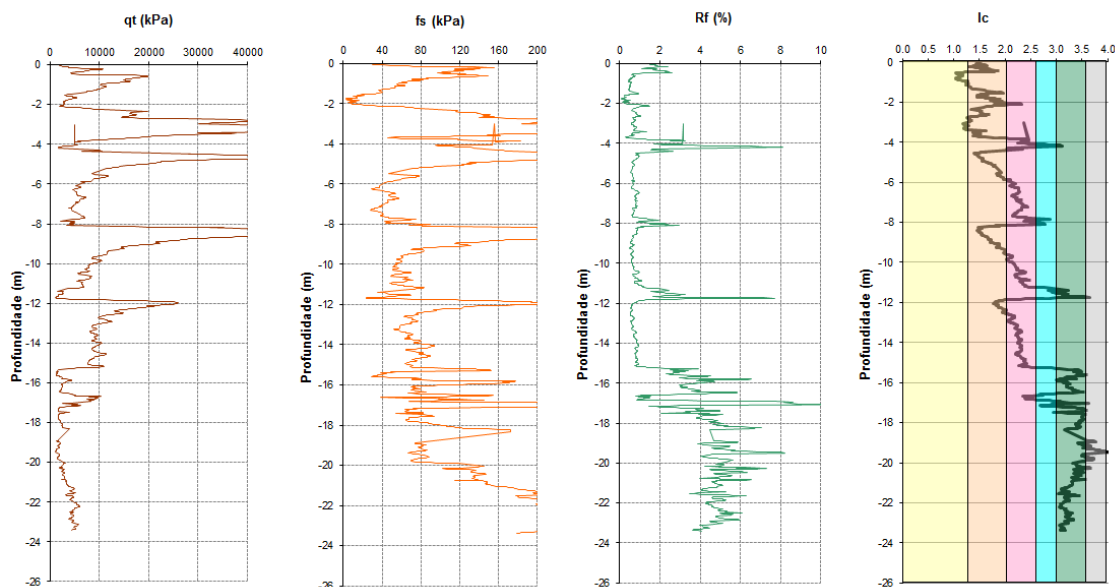


Fig. 5 Anexo I- Perfil CPTu 06.

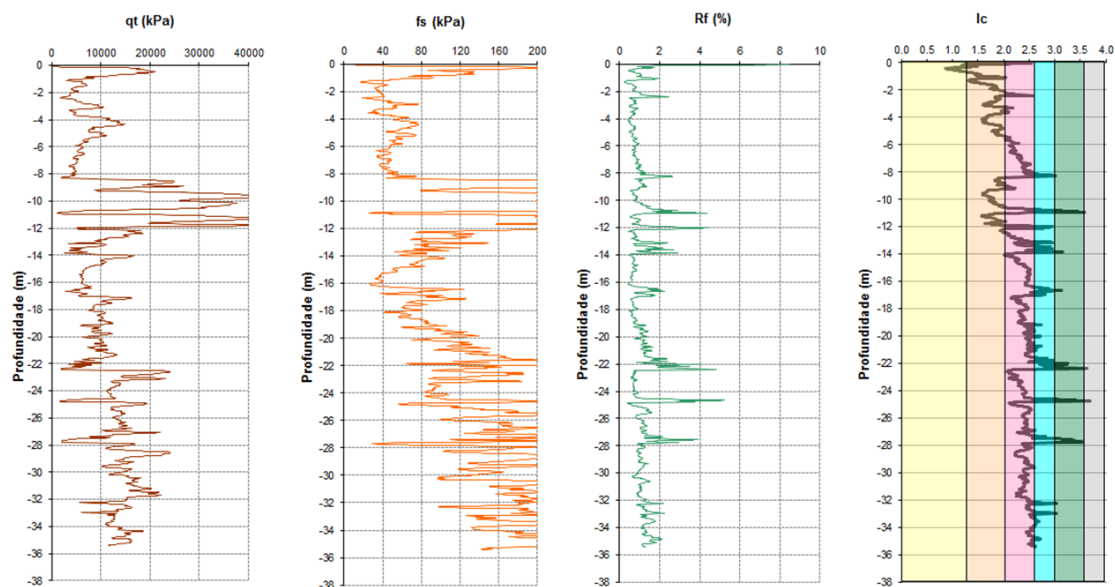


Fig. 6 Anexo I- Perfil CPTu 07.

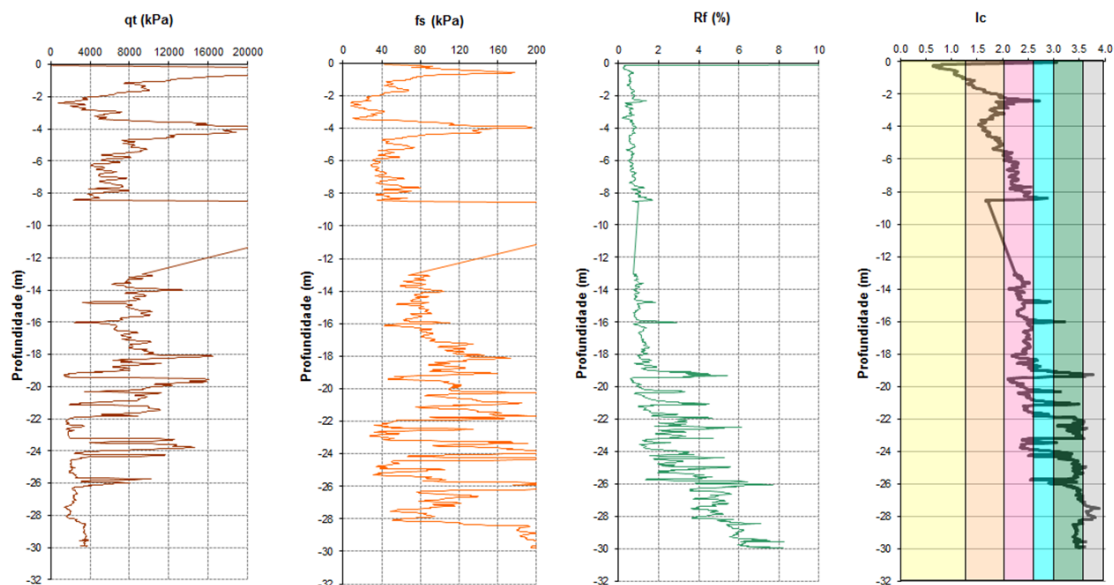


Fig. 7 Anexo I- Perfil CPTu 08.

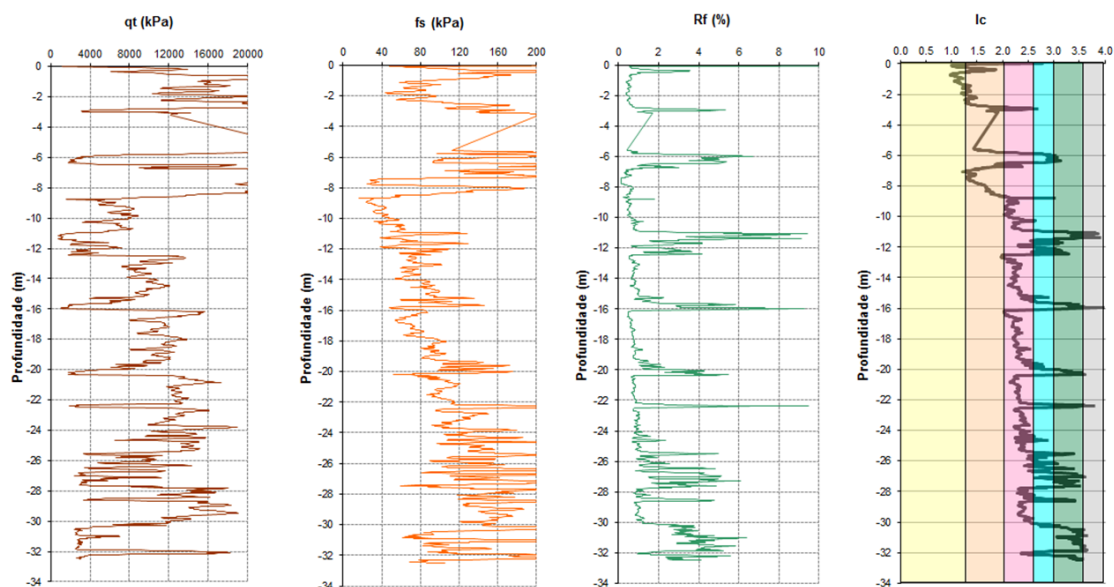


Fig. 8 Anexo I- Perfil CPTu 09.

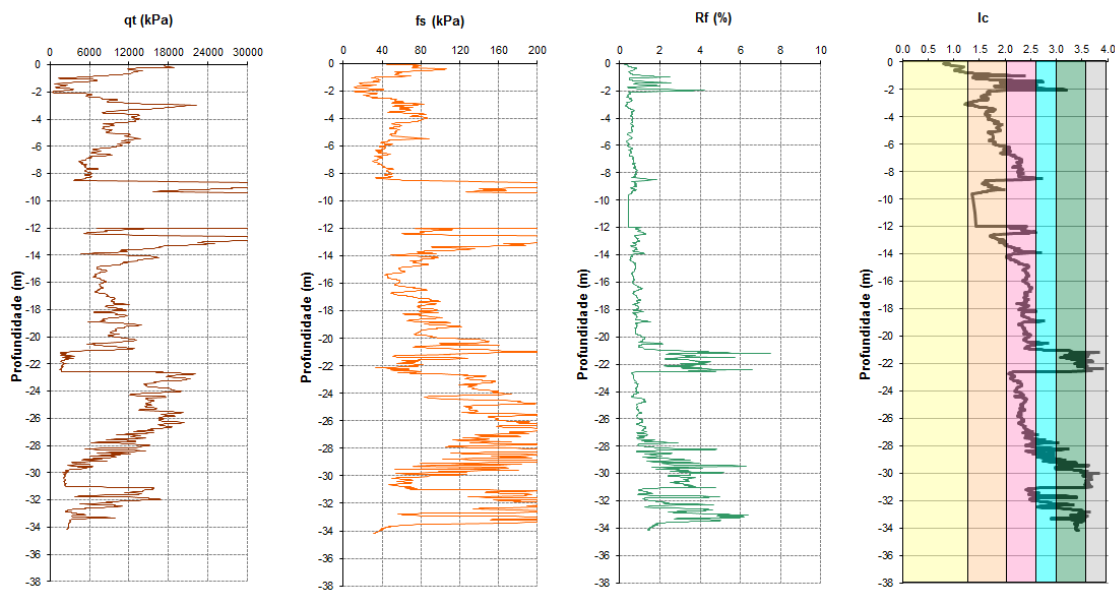


Fig. 9 Anexo I- Perfil CPTu 010.

Anexo II: Nível de água de equilíbrio

Fig. 1 Anexo II - Poro pressões CPTu 01 – 2016.

Fig. 2 Anexo II- Poro pressões CPTu 02 – 2016.

Fig. 3 Anexo II- Poro pressões CPTu 03 – 2016.

Fig. 4 Anexo II- Poro pressões CPTu 04 – 2016.

Fig. 5 Anexo II- Poro pressões CPTu 01 – 2015.

Fig. 6 Anexo II- Poro pressões CPTu 02 – 2015.

Anexo III: interpretação dos piezocones

Anexo IV: Condições de drenagem

Condições de drenagem do ensaio CPTU – Ir = 200

			Ir 200	CR/RR 7	kh/kv 1.5		
	prof (m)	t50 (sec)	ChPA (cm ² /sec)	ChNA (cm ² /sec)	CvNA (cm ² /sec)	V	condição
cptu02	14.75	6	1.907541	0.272506	0.181671	3.743039	drenado
cptu03	11.7	112	0.10219	0.014599	0.009732	69.87005	não drenado
	15	171	0.066931	0.009562	0.006374	106.6766	não drenado
	17.8	221	0.051788	0.007398	0.004932	137.8686	não drenado
	22.5	50	0.228905	0.032701	0.0218	31.19199	não drenado
	28.7	51	0.224417	0.03206	0.021373	31.81583	não drenado
	30	147	0.077859	0.011123	0.007415	91.70445	não drenado
	35	97	0.117992	0.016856	0.011237	60.51246	não drenado
cptu 04	19.2	36	0.317924	0.045418	0.030278	22.45823	não drenado
	22.8	148	0.077333	0.011048	0.007365	92.32829	não drenado
	24.6	15	0.763016	0.109002	0.072668	9.357597	parc drenado
	27	16	0.715328	0.10219	0.068126	9.981436	parc drenado
	30	77	0.14864	0.021234	0.014156	48.03566	não drenado
cptu05	12.6	83	0.137895	0.019699	0.013133	51.7787	não drenado
	19.8	36	0.317924	0.045418	0.030278	22.45823	não drenado
cptu06	11.4	17	0.67325	0.096179	0.064119	10.60528	não drenado
	15.4	147	0.077859	0.011123	0.007415	91.70445	não drenado
	18.12	96	0.119221	0.017032	0.011354	59.88862	não drenado
	20.3	8	1.430656	0.204379	0.136253	4.990718	parc drenado
cptu07	22.9	64	0.178832	0.025547	0.017032	39.92575	não drenado
	24.65	117	0.097823	0.013975	0.009316	72.98925	não drenado
cptu16/8	19.3	54	0.211949	0.030278	0.020186	33.68735	não drenado
	22	171	0.066931	0.009562	0.006374	106.6766	não drenado
	25	100	0.114452	0.01635	0.0109	62.38398	não drenado
	30	7	1.635035	0.233576	0.155718	4.366878	parc drenado
cptu16/9	11.2	181	0.063233	0.009033	0.006022	112.915	não drenado
	16	57	0.200794	0.028685	0.019123	35.55887	não drenado
	26.9	64	0.178832	0.025547	0.017032	39.92575	não drenado
	30.4	73	0.156784	0.022398	0.014932	45.5403	não drenado
cptu16/10	21.2	18	0.635847	0.090835	0.060557	11.22912	não drenado
	22.4	111	0.10311	0.01473	0.00982	69.24621	não drenado
	29.3	24	0.476885	0.068126	0.045418	14.97215	não drenado
	30	69	0.165873	0.023696	0.015797	43.04494	não drenado
	35	133	0.086054	0.012293	0.008196	82.97069	não drenado

Condições de drenagem do ensaio CPTU – Ir = 300

			Ir 300	CR/RR 7	kh/kv 1.5		
	prof (m)	t50 (sec)	ChPA (cm2/sec)	ChNA (cm2/sec)	CvNA (cm2/sec)	V	condição
cptu02	14.75	6	2.336251	0.33375	0.2225	3.056178	drenado
cptu03	11.7	112	0.125156	0.017879	0.01192	57.04866	não drenado
	15	171	0.081974	0.011711	0.007807	87.10108	não drenado
	17.8	221	0.063428	0.009061	0.006041	112.5692	não drenado
	22.5	50	0.28035	0.04005	0.0267	25.46815	não drenado
	28.7	51	0.274853	0.039265	0.026176	25.97751	não drenado
	30	147	0.095357	0.013622	0.009082	74.87637	não drenado
	35	97	0.14451	0.020644	0.013763	49.40821	não drenado
cptu 04	19.2	36	0.389375	0.055625	0.037083	18.33707	não drenado
	22.8	148	0.094713	0.01353	0.00902	75.38573	não drenado
	24.6	15	0.9345	0.1335	0.089	7.640446	parc drenado
	27	16	0.876094	0.125156	0.083438	8.149809	parc drenado
	30	77	0.182046	0.026007	0.017338	39.22095	não drenado
cptu05	12.6	83	0.168886	0.024127	0.016084	42.27713	não drenado
	19.8	36	0.389375	0.055625	0.037083	18.33707	não drenado
cptu06	11.4	17	0.824559	0.117794	0.078529	8.659172	parc drenado
	15.4	147	0.095357	0.013622	0.009082	74.87637	não drenado
	18.12	96	0.146016	0.020859	0.013906	48.89885	não drenado
	20.3	8	1.752188	0.250313	0.166875	4.074904	parc drenado
cptu07	22.9	64	0.219024	0.031289	0.020859	32.59923	não drenado
	24.65	117	0.119808	0.017115	0.01141	59.59548	não drenado
cptu16/8	19.3	54	0.259583	0.037083	0.024722	27.5056	não drenado
	22	171	0.081974	0.011711	0.007807	87.10108	não drenado
	25	100	0.140175	0.020025	0.01335	50.9363	não drenado
	30	7	2.002501	0.286072	0.190714	3.565541	parc drenado
cptu16/9	11.2	181	0.077445	0.011064	0.007376	92.19471	não drenado
	16	57	0.245921	0.035132	0.023421	29.03369	não drenado
	26.9	64	0.219024	0.031289	0.020859	32.59923	não drenado
	30.4	73	0.192021	0.027432	0.018288	37.1835	não drenado
cptu16/10	21.2	18	0.77875	0.11125	0.074167	9.168535	parc drenado
	22.4	111	0.126284	0.018041	0.012027	56.5393	não drenado
	29.3	24	0.584063	0.083438	0.055625	12.22471	não drenado
	30	69	0.203152	0.029022	0.019348	35.14605	não drenado
	35	133	0.105395	0.015056	0.010038	67.74528	não drenado

Condições de drenagem do ensaio CPTU – Ir = 400

			Ir 400	CR/RR 7	kh/kv 1.5		
	prof (m)	t50 (sec)	ChPA (cm2/sec)	ChNA (cm2/sec)	CvNA (cm2/sec)	V	condição
cptu02	10.54	125	0.129488	0.018498	0.012332	55.14017	não drenado
cptu03	11.7	112	0.144518	0.020645	0.013764	49.40559	não drenado
	15	171	0.094655	0.013522	0.009015	75.43175	não drenado
	17.8	221	0.07324	0.010463	0.006975	97.48781	não drenado
	22.5	50	0.32372	0.046246	0.030831	22.05607	não drenado
	28.7	51	0.317373	0.045339	0.030226	22.49719	não drenado
	30	147	0.110109	0.01573	0.010487	64.84484	não drenado
	35	97	0.166866	0.023838	0.015892	42.78877	parc drenado
cptu 04	19.2	36	0.449612	0.06423	0.04282	15.88037	parc drenado
	22.8	148	0.109365	0.015624	0.010416	65.28596	parc drenado
	24.6	15	1.079068	0.154153	0.102768	6.61682	parc drenado
	27	16	1.011626	0.144518	0.096345	7.057941	parc drenado
	30	77	0.210208	0.03003	0.02002	33.96634	parc drenado
cptu05	12.6	83	0.195012	0.027859	0.018573	36.61307	parc drenado
	19.8	36	0.449612	0.06423	0.04282	15.88037	parc drenado
cptu06	11.4	17	0.952119	0.136017	0.090678	7.499063	parc drenado
	15.4	147	0.110109	0.01573	0.010487	64.84484	não drenado
	18.12	96	0.168604	0.024086	0.016058	42.34765	não drenado
	20.3	8	2.023253	0.289036	0.192691	3.528971	parc drenado
cptu07	22.9	64	0.252907	0.03613	0.024086	28.23177	não drenado
	24.65	117	0.138342	0.019763	0.013175	51.6112	não drenado
cptu16/8	19.3	54	0.299741	0.04282	0.028547	23.82055	não drenado
	22	171	0.094655	0.013522	0.009015	75.43175	não drenado
	25	100	0.16186	0.023123	0.015415	44.11213	não drenado
	30	7	2.312289	0.330327	0.220218	3.087849	parc drenado
cptu16/9	11.2	181	0.089426	0.012775	0.008517	79.84296	não drenado
	16	57	0.283965	0.040566	0.027044	25.14392	não drenado
	26.9	64	0.252907	0.03613	0.024086	28.23177	não drenado
	30.4	73	0.221726	0.031675	0.021117	32.20186	não drenado
cptu16/10	21.2	18	0.899224	0.128461	0.08564	7.940184	parc drenado
	22.4	111	0.14582	0.020831	0.013888	48.96447	não drenado
	29.3	24	0.674418	0.096345	0.06423	10.58691	não drenado
	30	69	0.23458	0.033511	0.022341	30.43737	não drenado
	35	133	0.121699	0.017386	0.01159	58.66914	não drenado

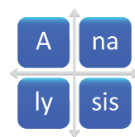
Condições de drenagem a partir do criterio de velocidade Normalizada V

	prof (m)		
cptu02	10.54		não drenado
cptu03	11.7		não drenado
	15		não drenado
	17.8		não drenado
	22.5		não drenado
	28.7		não drenado
	30		não drenado
	35		parc drenado
cptu 04	19.2		parc drenado
	22.8		não drenado
	24.6		parc drenado
	27		parc drenado
	30		não drenado
cptu05	12.6		parc drenado
	19.8		parc drenado
cptu06	11.4		parc drenado
	15.4		não drenado
	18.12		não drenado
	20.3		parc drenado
cptu07	22.9		não drenado
	24.65		não drenado
cptu16/8	19.3		não drenado
	22		não drenado
	25		não drenado
	30		parc drenado
cptu16/9	11.2		não drenado
	16		não drenado
	26.9		não drenado
	30.4		não drenado
cptu16/10	21.2		parc drenado
	22.4		não drenado
	29.3		não drenado
	30		não drenado
	35		não drenado

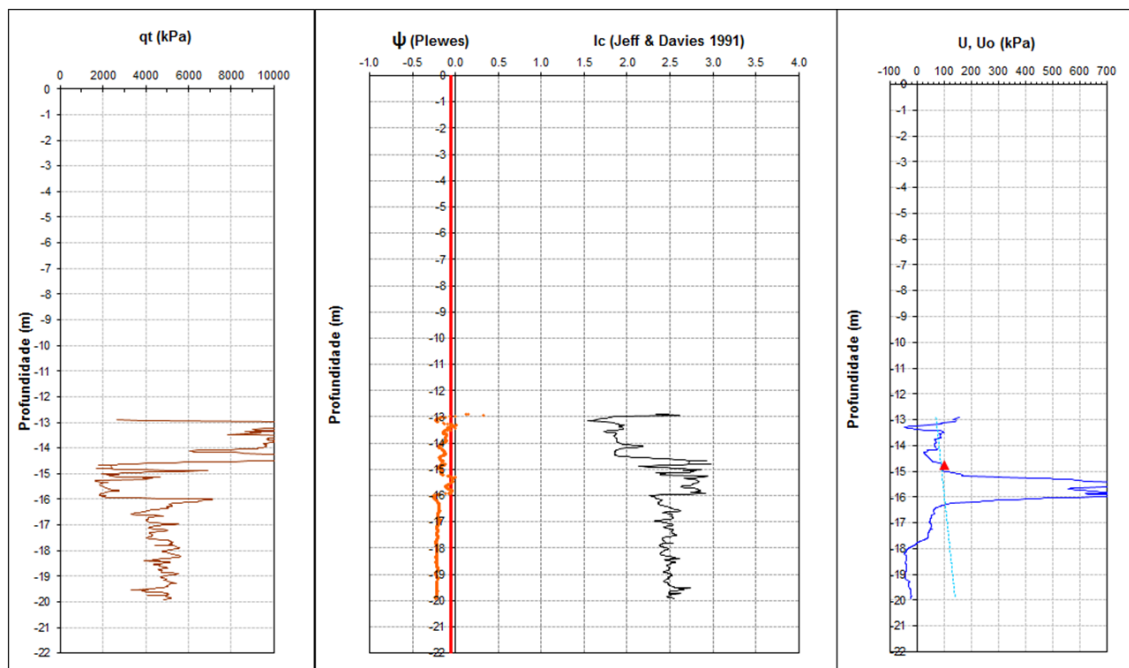
Condições de drenagem a partir do critério de velocidade normalizada V ($V > 10$: não drenado)

modelo Robertson: Uso direto de $t_{50\%}$

	prof (m)	t50 (sec)	Ch (cm ² /sec)	V	
cptu02	14.75	6	1.6700	4.28	drenado
cptu03	11.7	112	0.0895	79.81	não drenado
	15	171	0.0586	121.85	não drenado
	17.8	221	0.0453	157.48	não drenado
	22.5	50	0.2004	35.63	não drenado
	28.7	51	0.1965	36.34	não drenado
	30	147	0.0682	104.75	não drenado
	35	97	0.1033	69.12	não drenado
cptu 04	19.2	36	0.2783	25.65	não drenado
	22.8	148	0.0677	105.46	não drenado
	24.6	15	0.6680	10.69	drenado
	27	16	0.6263	11.40	drenado
	30	77	0.1301	54.87	não drenado
cptu05	12.6	83	0.1207	59.14	não drenado
	19.8	36	0.2783	25.65	não drenado
cptu06	11.4	17	0.5894	12.11	drenado
	15.4	147	0.0682	104.75	não drenado
	18.12	96	0.1044	68.41	não drenado
	20.3	8	1.2525	5.70	drenado
cptu07	22.9	64	0.1566	45.60	não drenado
	24.65	117	0.0856	83.37	não drenado
cptu16/8	19.3	54	0.1856	38.48	não drenado
	22	171	0.0586	121.85	não drenado
	25	100	0.1002	71.26	não drenado
	30	7	1.4314	4.99	drenado
cptu16/9	11.2	181	0.0554	128.98	não drenado
	16	57	0.1758	40.62	não drenado
	26.9	64	0.1566	45.60	não drenado
	30.4	73	0.1373	52.02	não drenado
cptu16/10	21.2	18	0.5567	12.83	drenado
	22.4	111	0.0903	79.10	não drenado
	29.3	24	0.4175	17.10	não drenado
	30	69	0.1452	49.17	não drenado
	35	133	0.0753	94.77	não drenado



Anexo V: Potencial de liquefação



(a) Método de Plewes (1992)

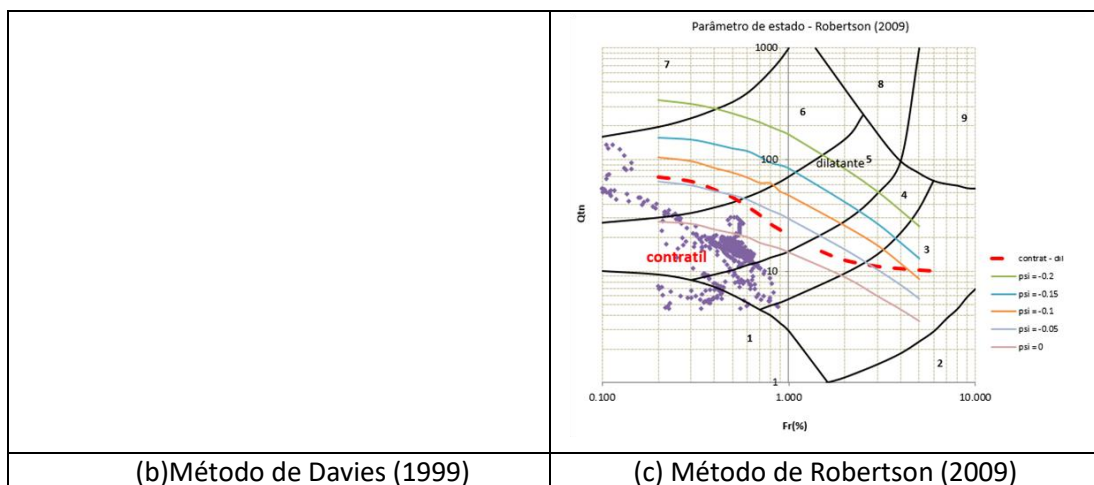
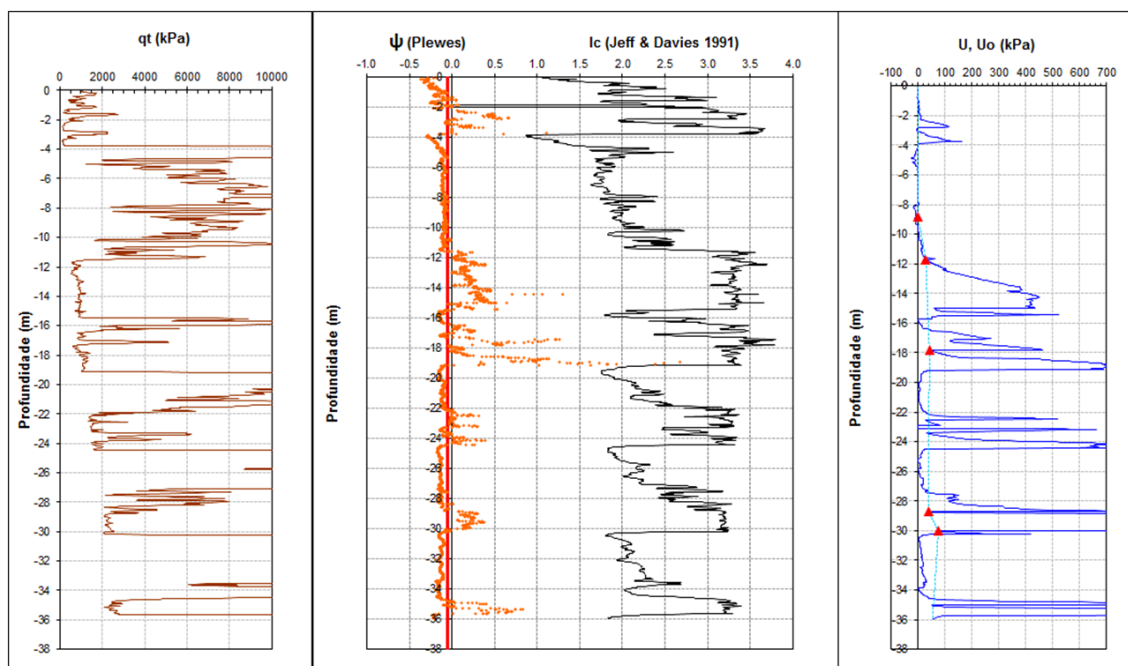


Fig. 1 Anexo V – Previsão de Potencial de colapso CPTu 02.



(a) Método de Plewes (1992)

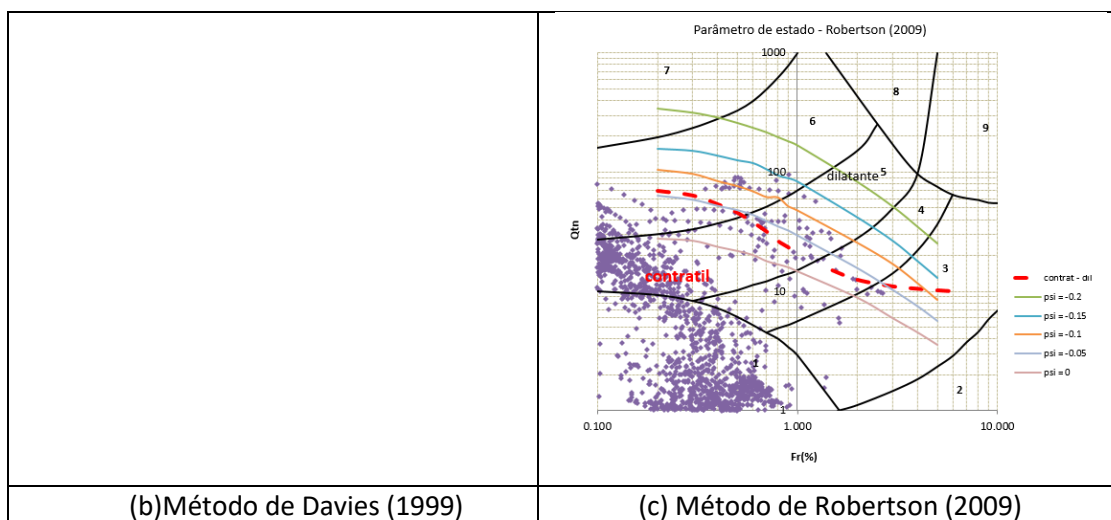
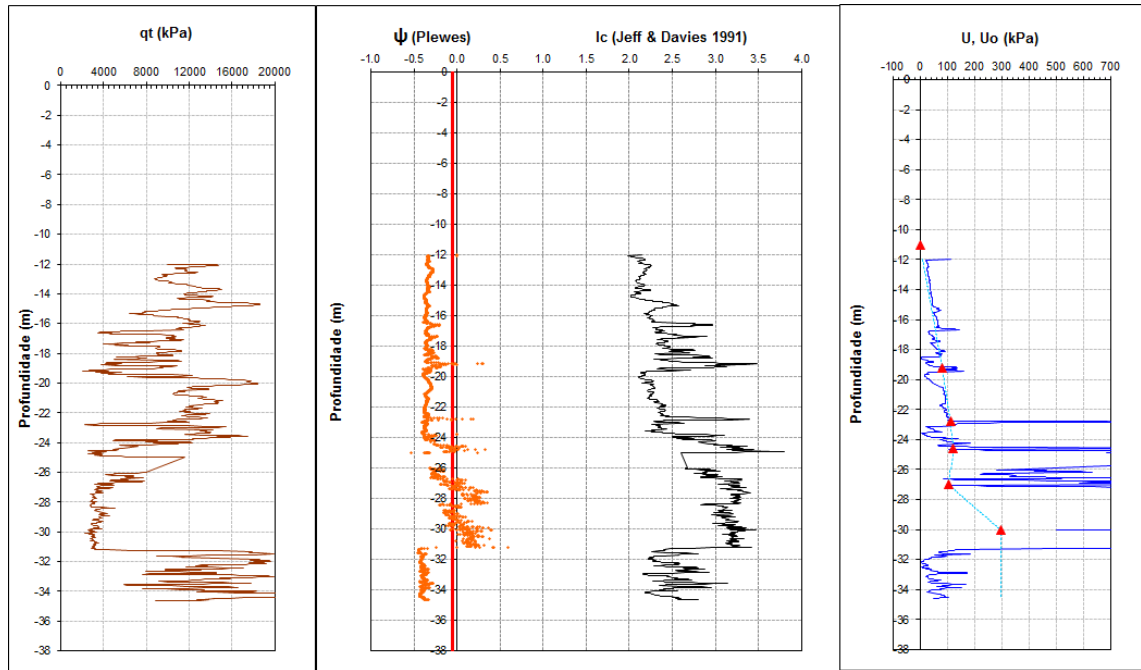


Fig. 2 Anexo V – Potencial de liquefação CPTu 03.



(b) Método de Plewes (1992)

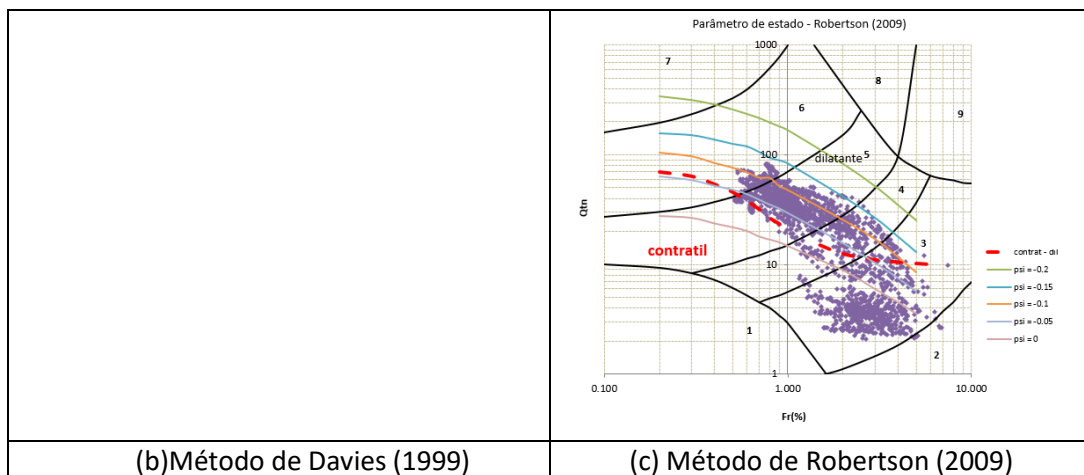
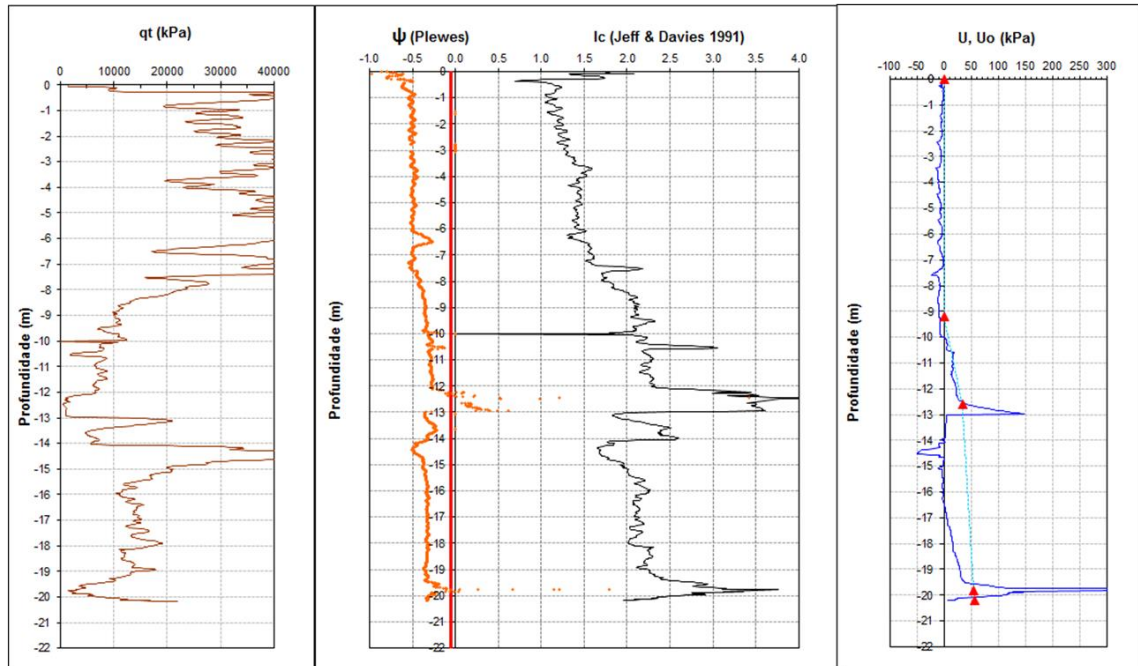


Fig. 3 Anexo V – Potencial de liquefação CPTu 04.



(c) Método de Plewes (1992)

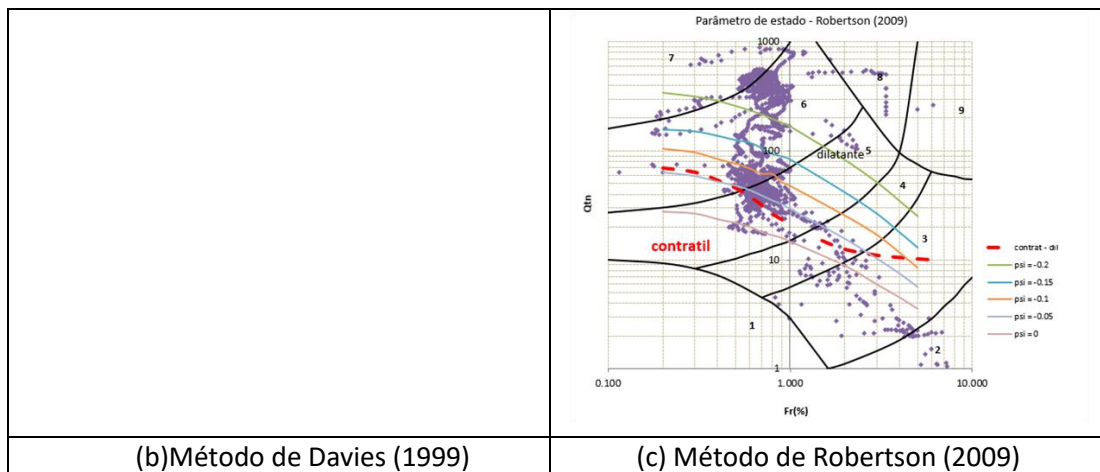
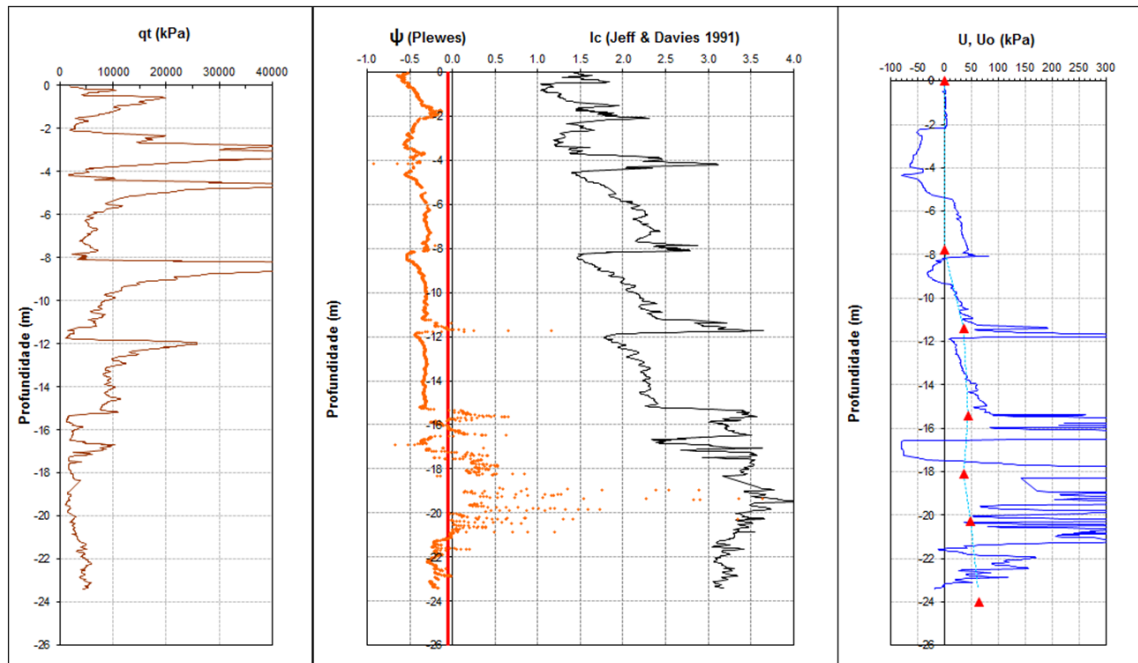


Fig. 4 Anexo V – Potencial de liquefação CPTu 05.



(d) Método de Plewes (1992)

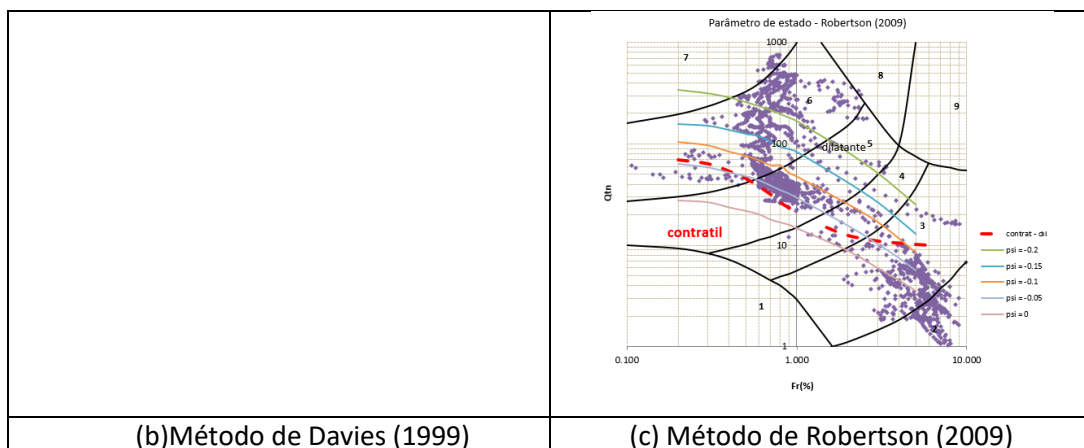
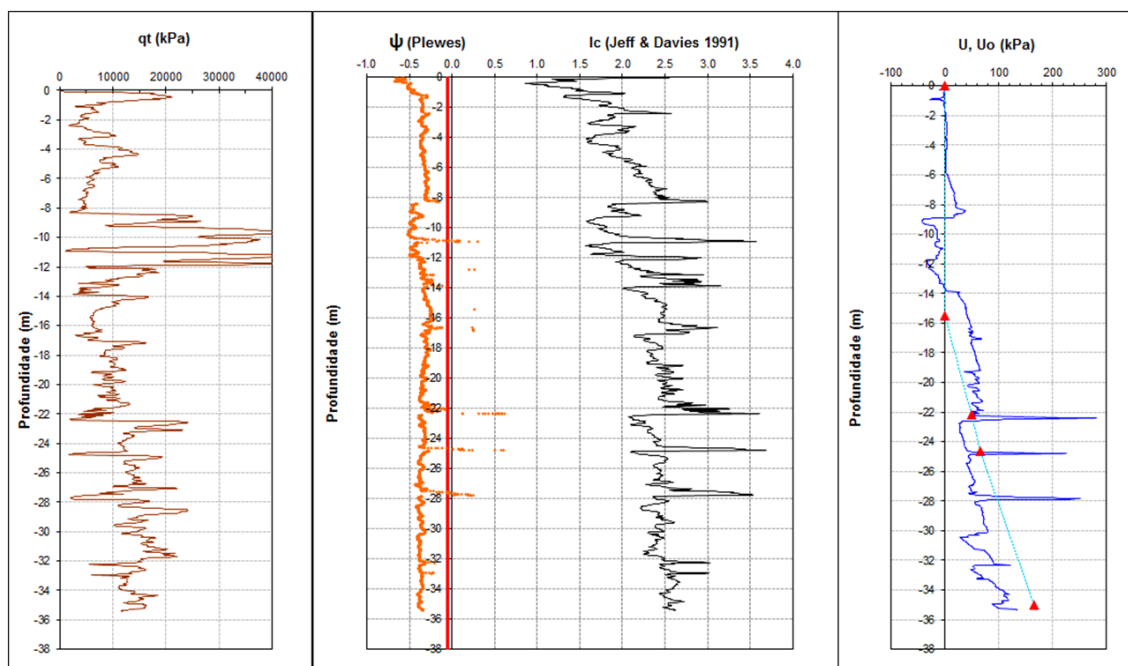


Fig. 5 Anexo V – Potencial de liquefação CPTu 06.



(e) Método de Plewes (1992)

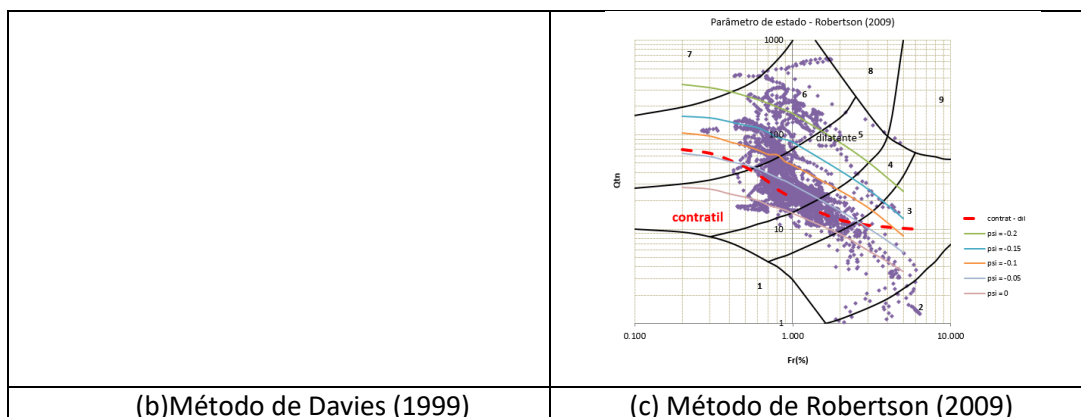
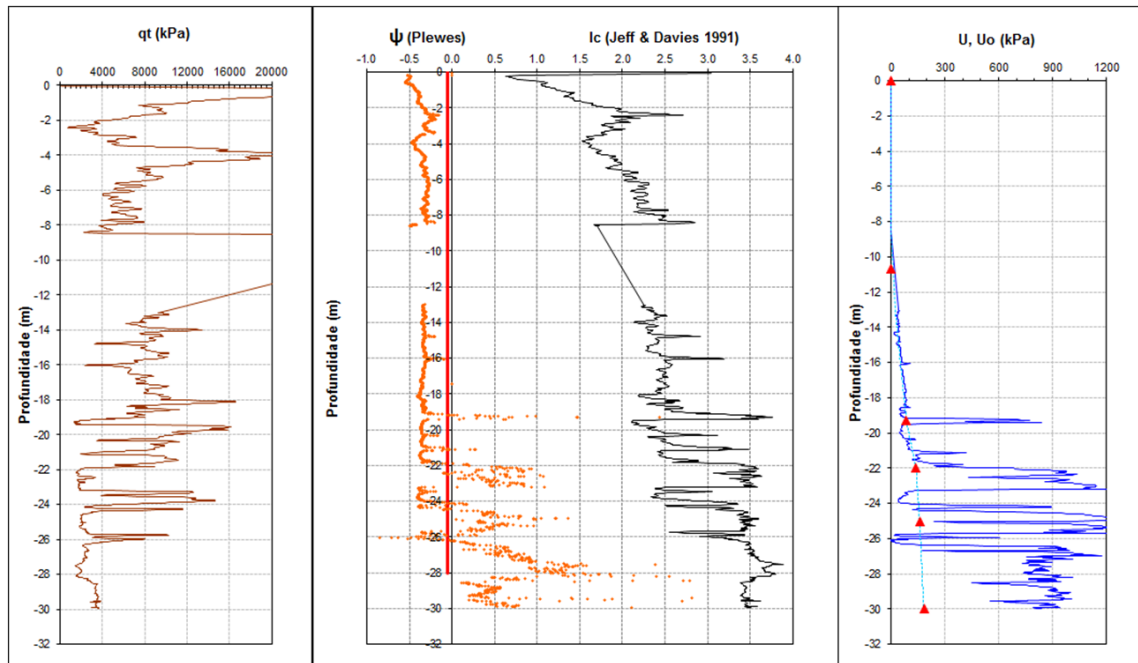


Fig. 6 Anexo V – Potencial de liquefação CPTu 07.



(f) Método de Plewes (1992)

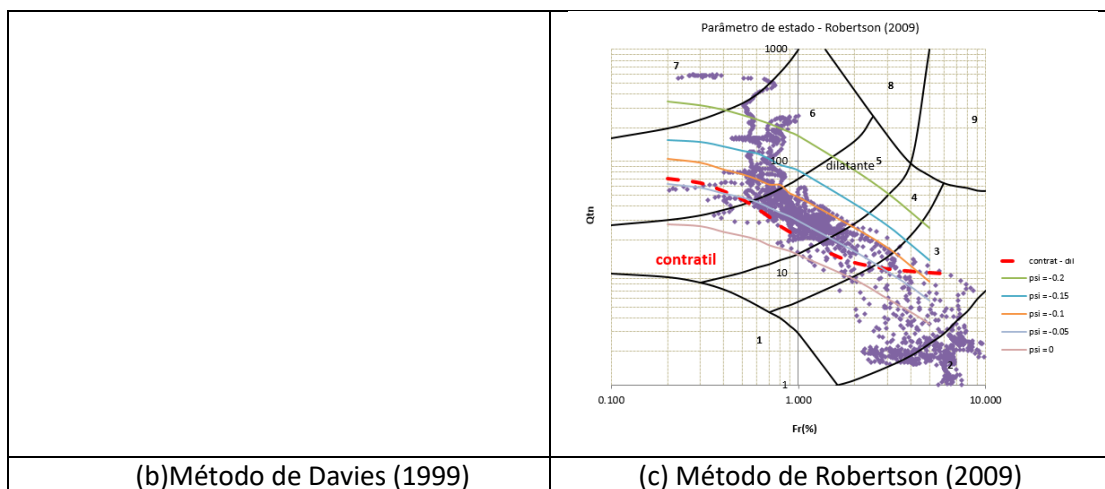
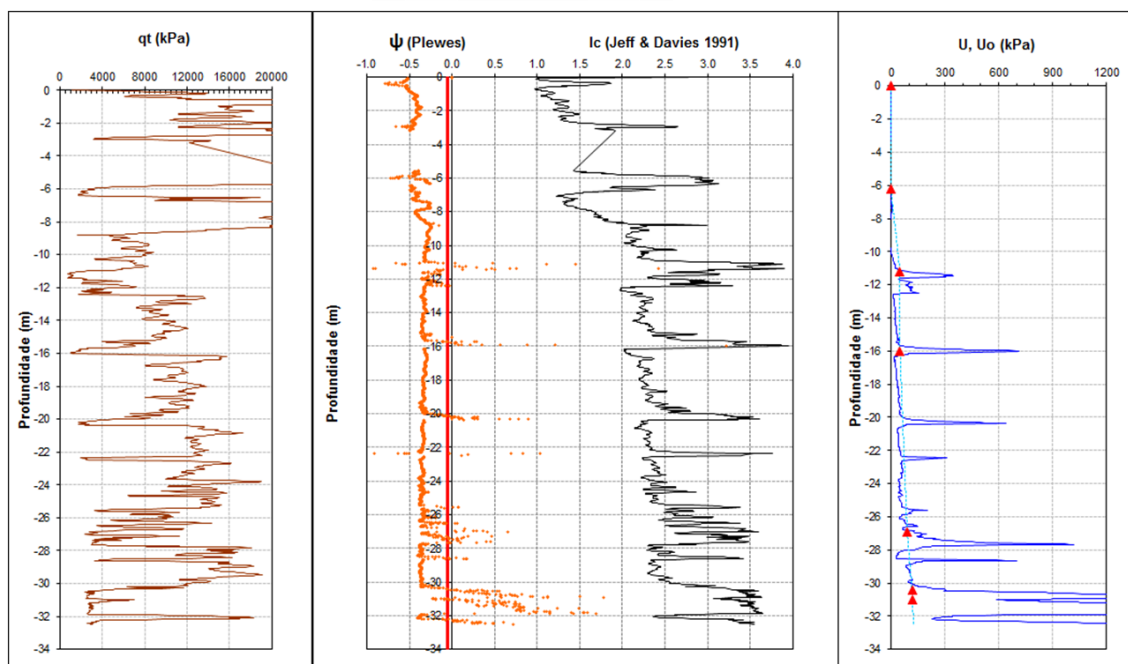


Fig. 7 Anexo V – Potencial de liquefação CPTu 08.



(g) Método de Plewes (1992)

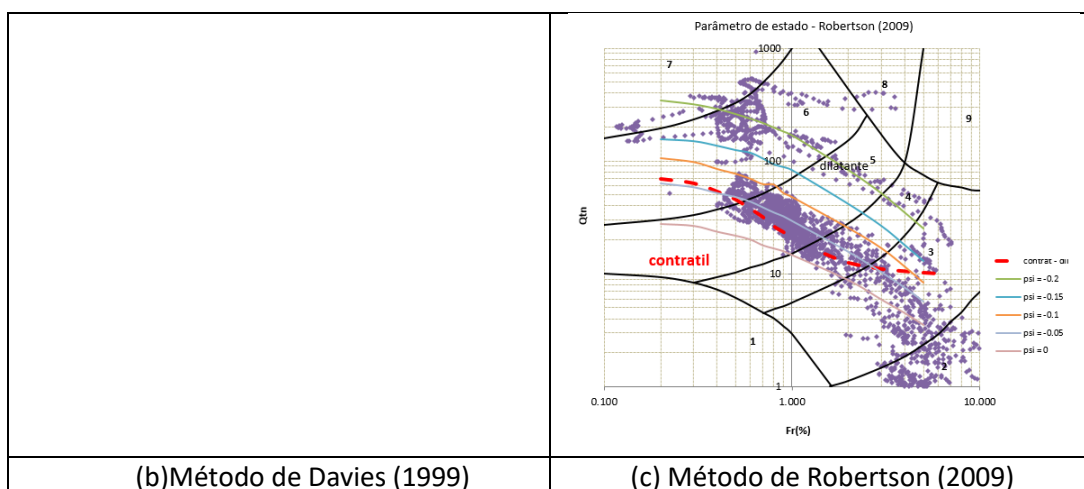
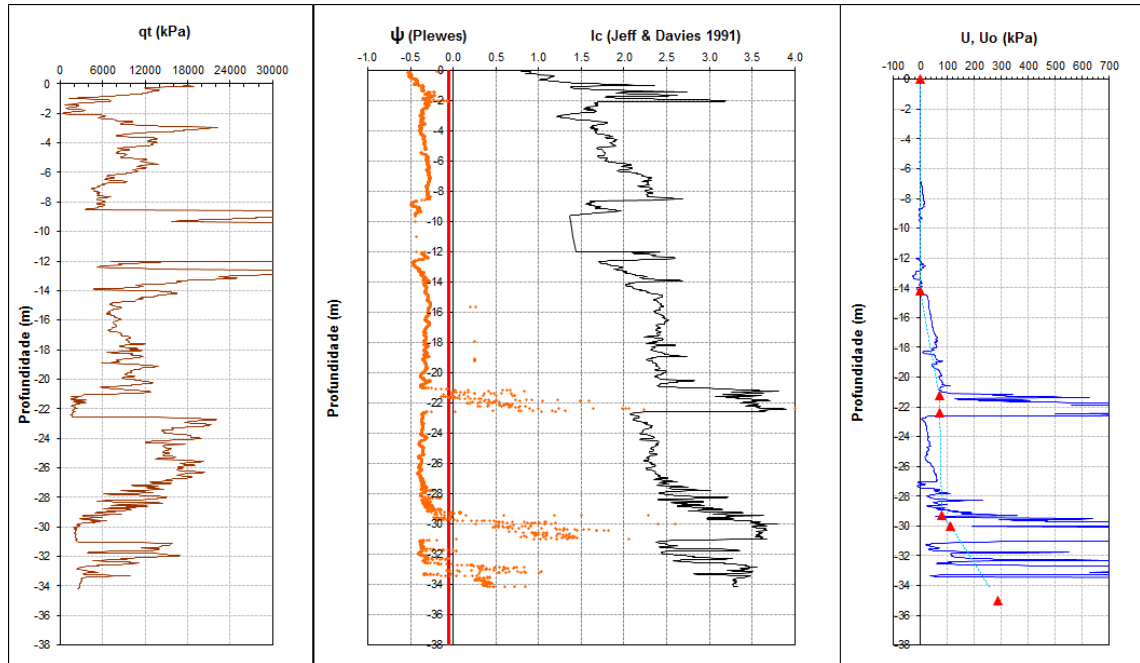


Fig. 8 Anexo V – Potencial de liquefação CPTu 09.



(h) Método de Plewes (1992)

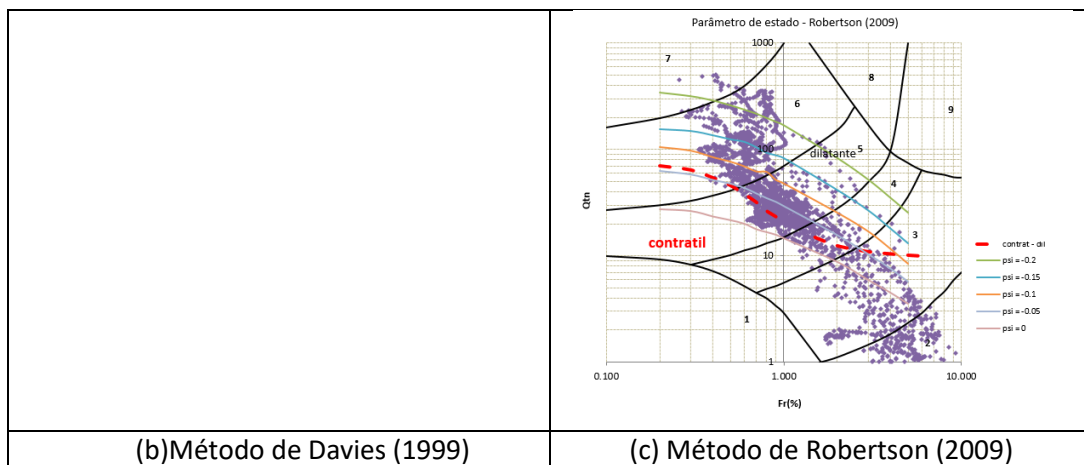


Fig. 9 Anexo V – Potencial de liquefação CPTu 10.

Contração / expansão volumétrica a partir de G_o/q_c

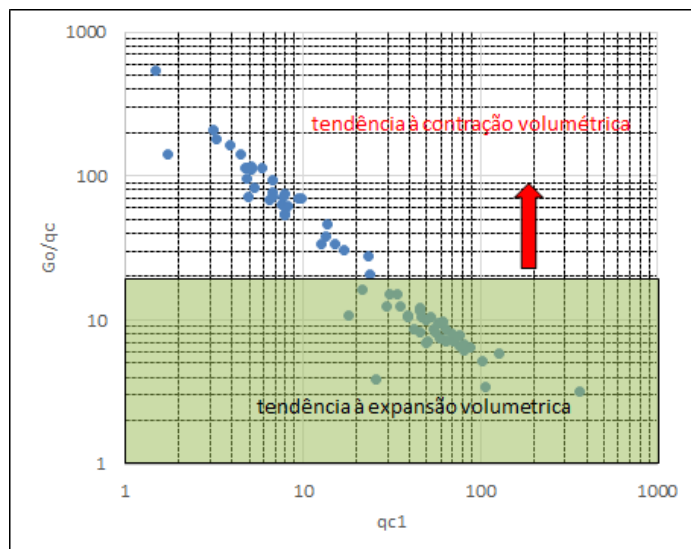


Fig. 1 cptu 03

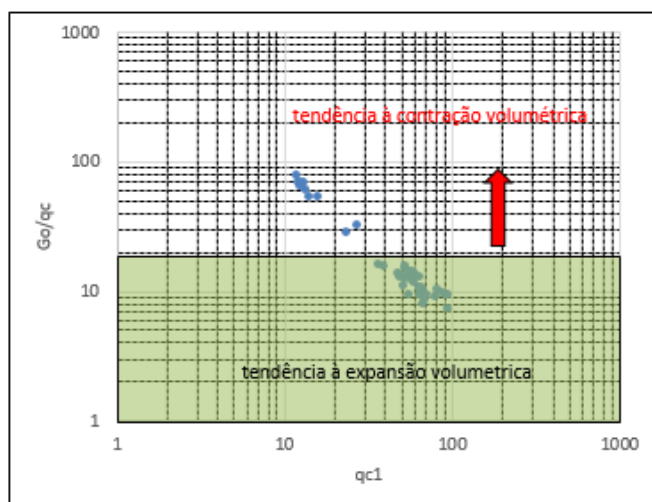


Fig. 2 cptu 04

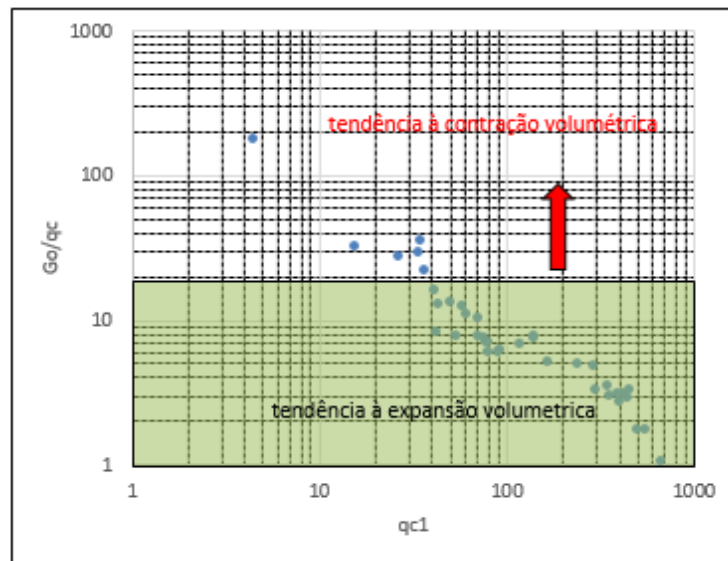


Fig. 3 cptu 05

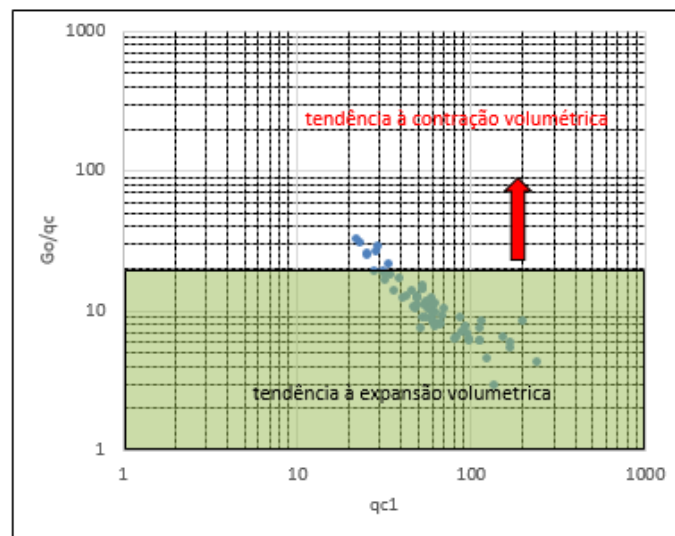


Fig. 4 cptu 07

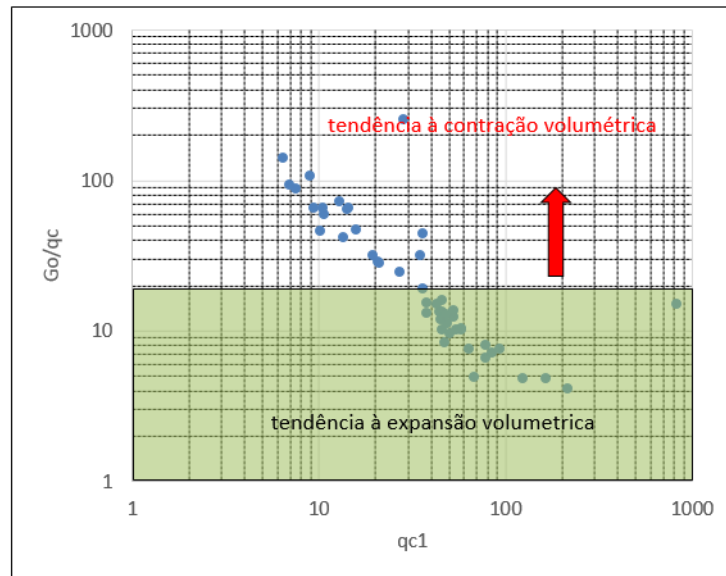
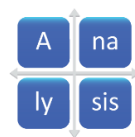


Fig. 5 cptu 16-08



Anexo VI: Gatilho de liquefação

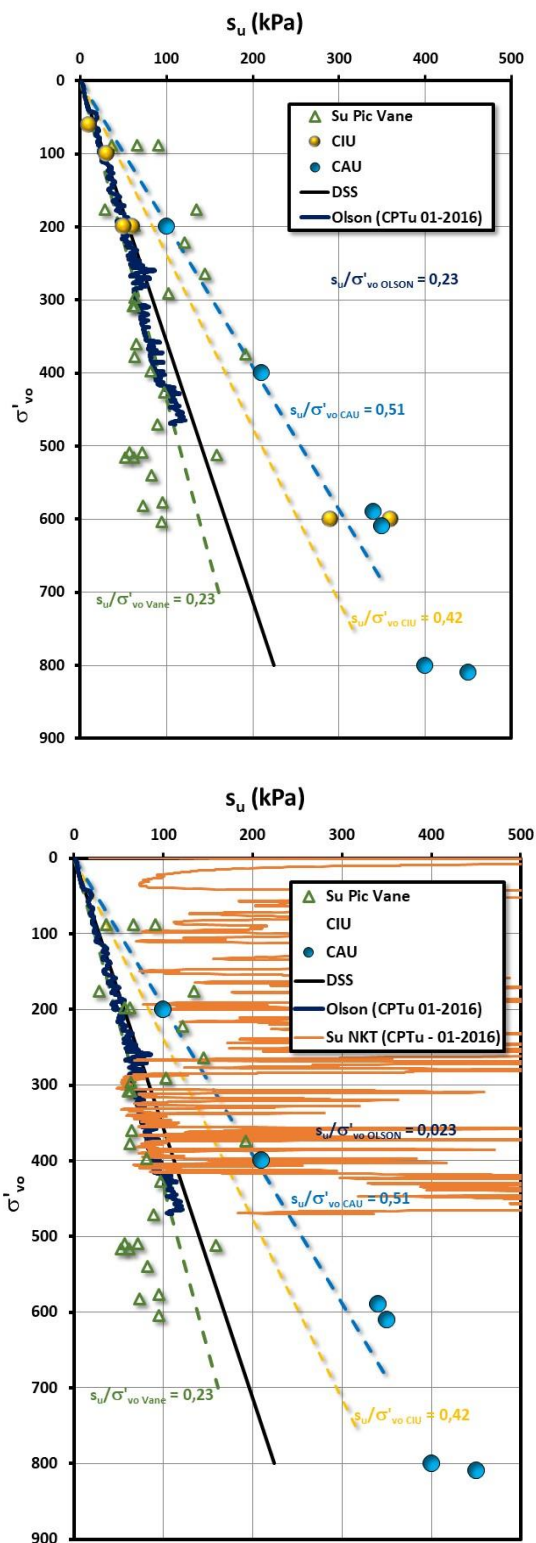


Fig. 1 Anexo VI – Gatilho de liquefação CPTu 01 – 2016.

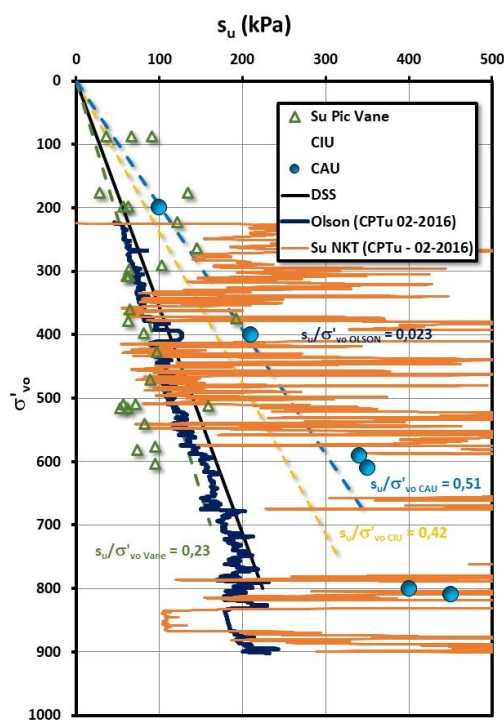
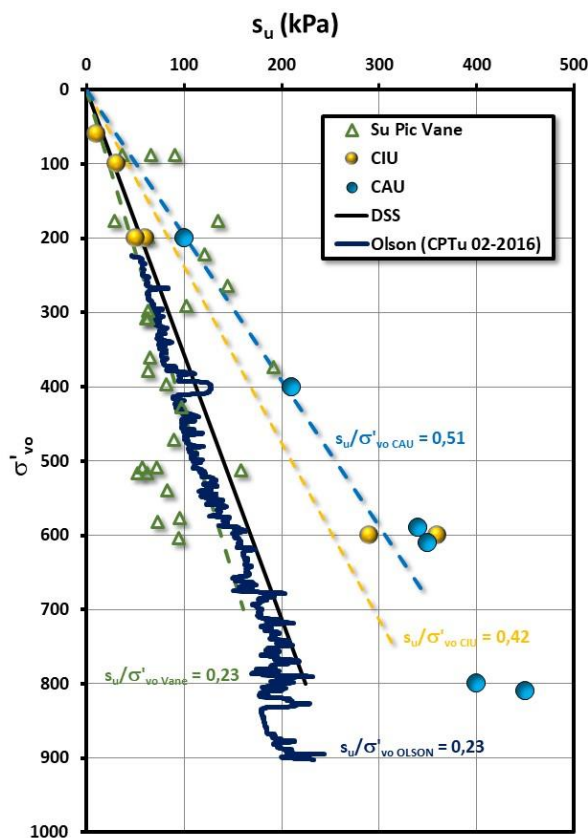


Fig. 2 Anexo VI- Gatilho de liquefação CPTu 02 – 2016.

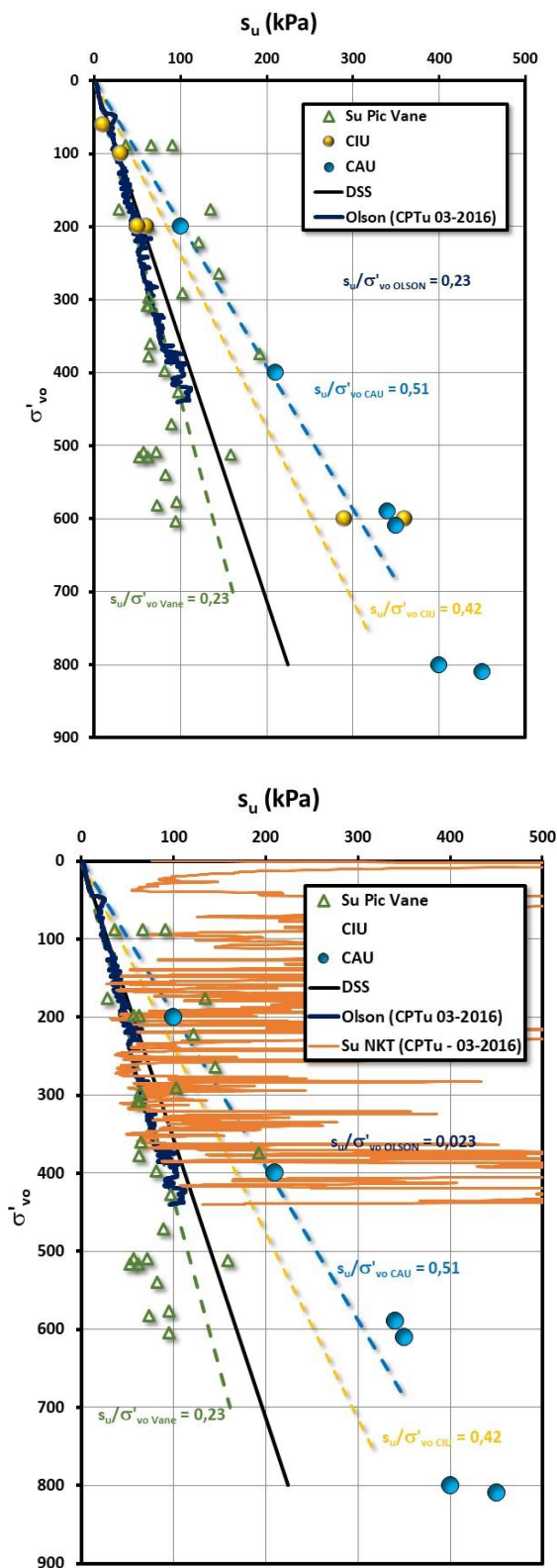


Fig. 3 Anexo VI- Gatilho de liquefação CPTu 03 – 2016.

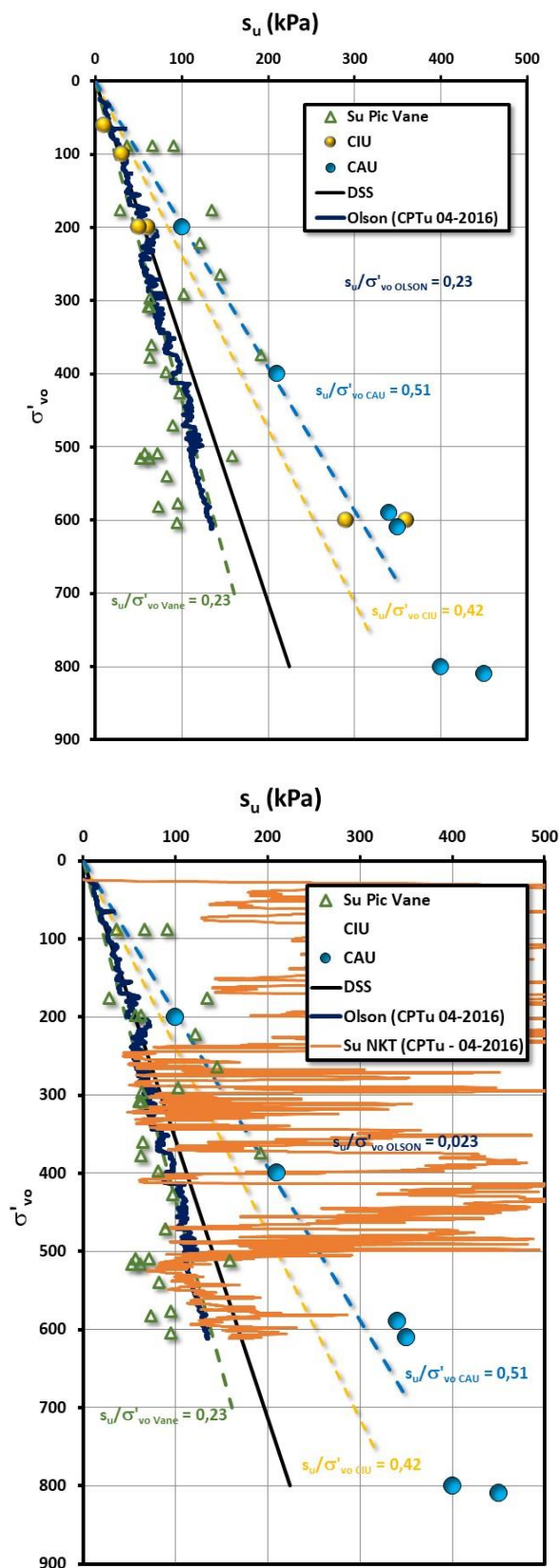


Fig. 4 Anexo VI- Gatilho de liquefação CPTu 04 – 2016.

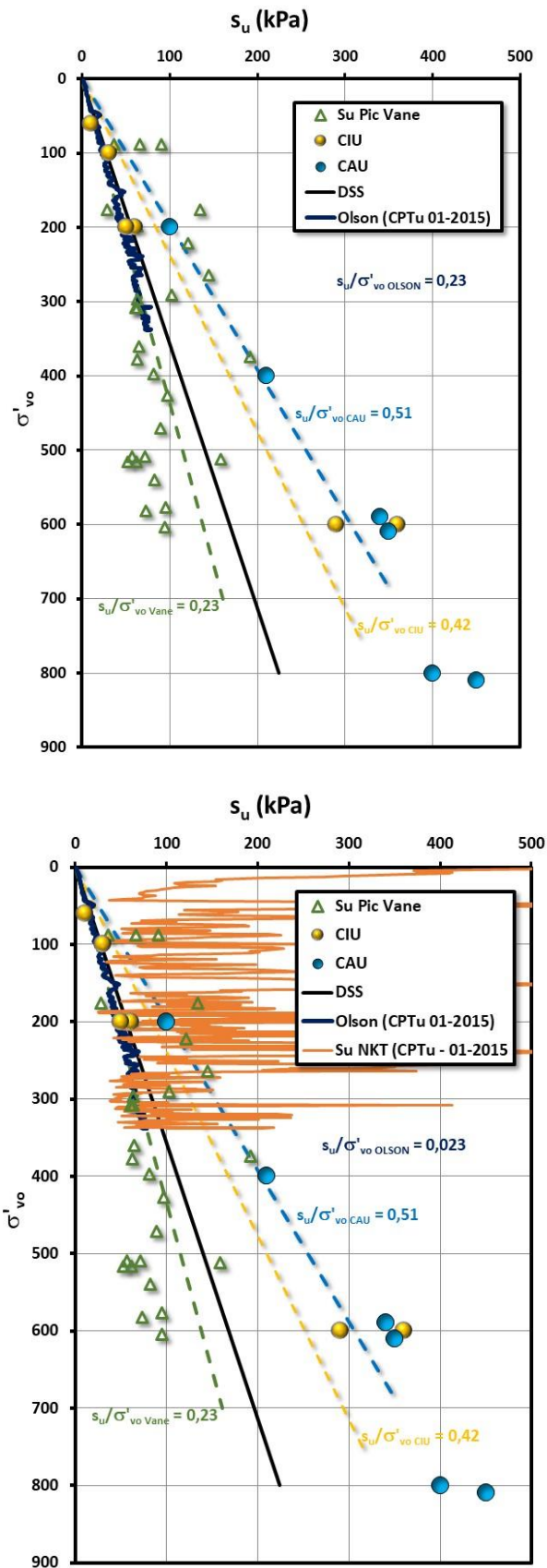


Fig. 5 Anexo VI- Gatilho de liquefação CPTu 01 – 2015.

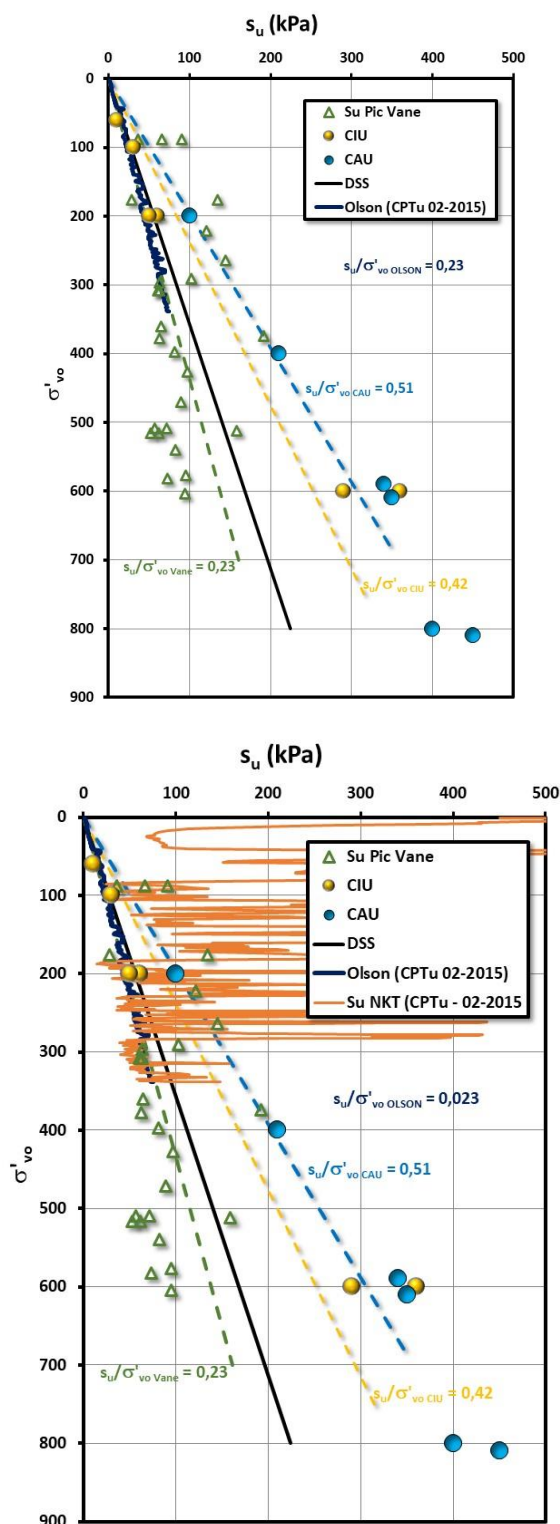


Fig. 6 Anexo VI- Gatilho de liquefação CPTu 02 – 2015.

Anexo VII: Resistência ao cisalhamento liquefeita

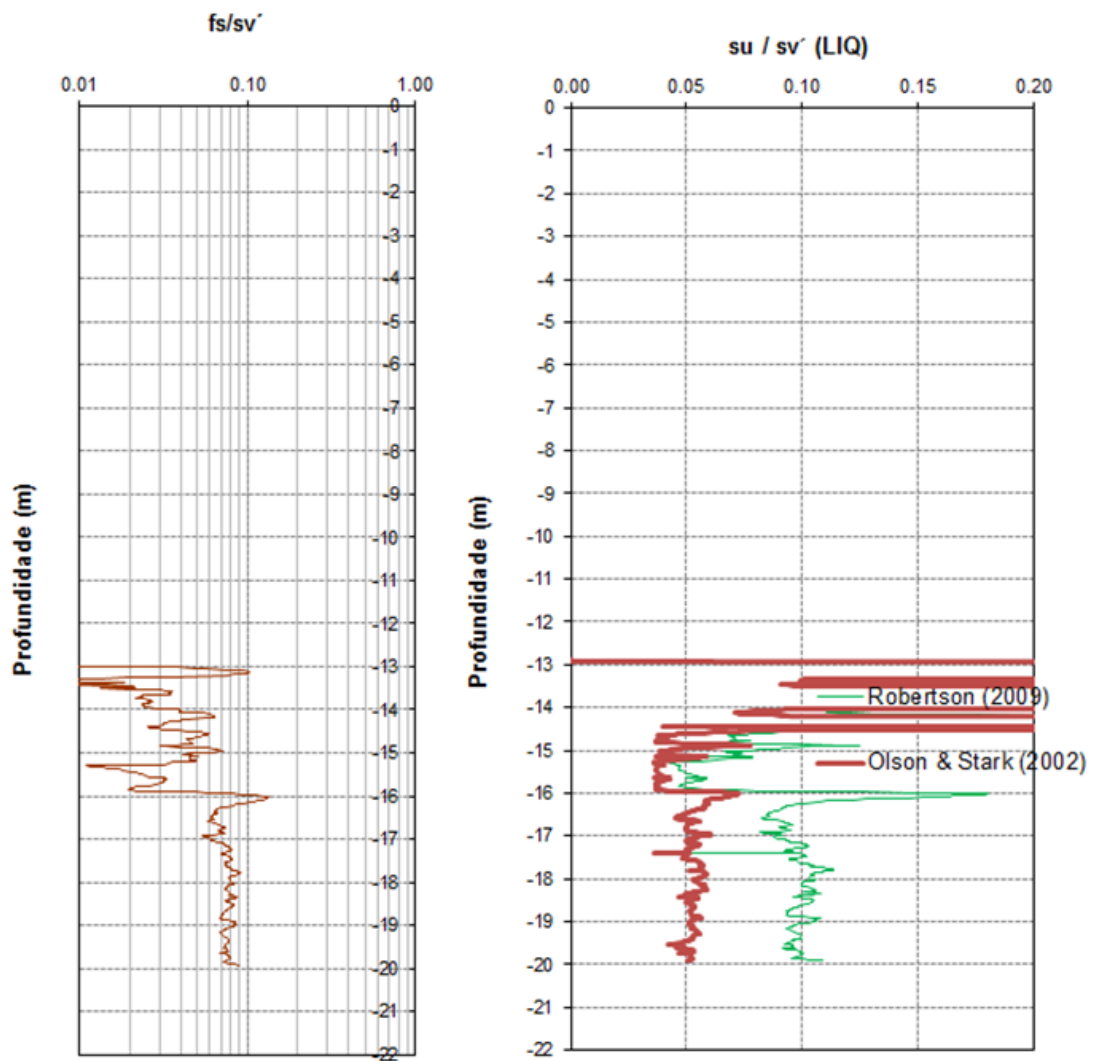


Fig. 1 Anexo VII – Resistência ao cisalhamento liquefeita CPTu 02.

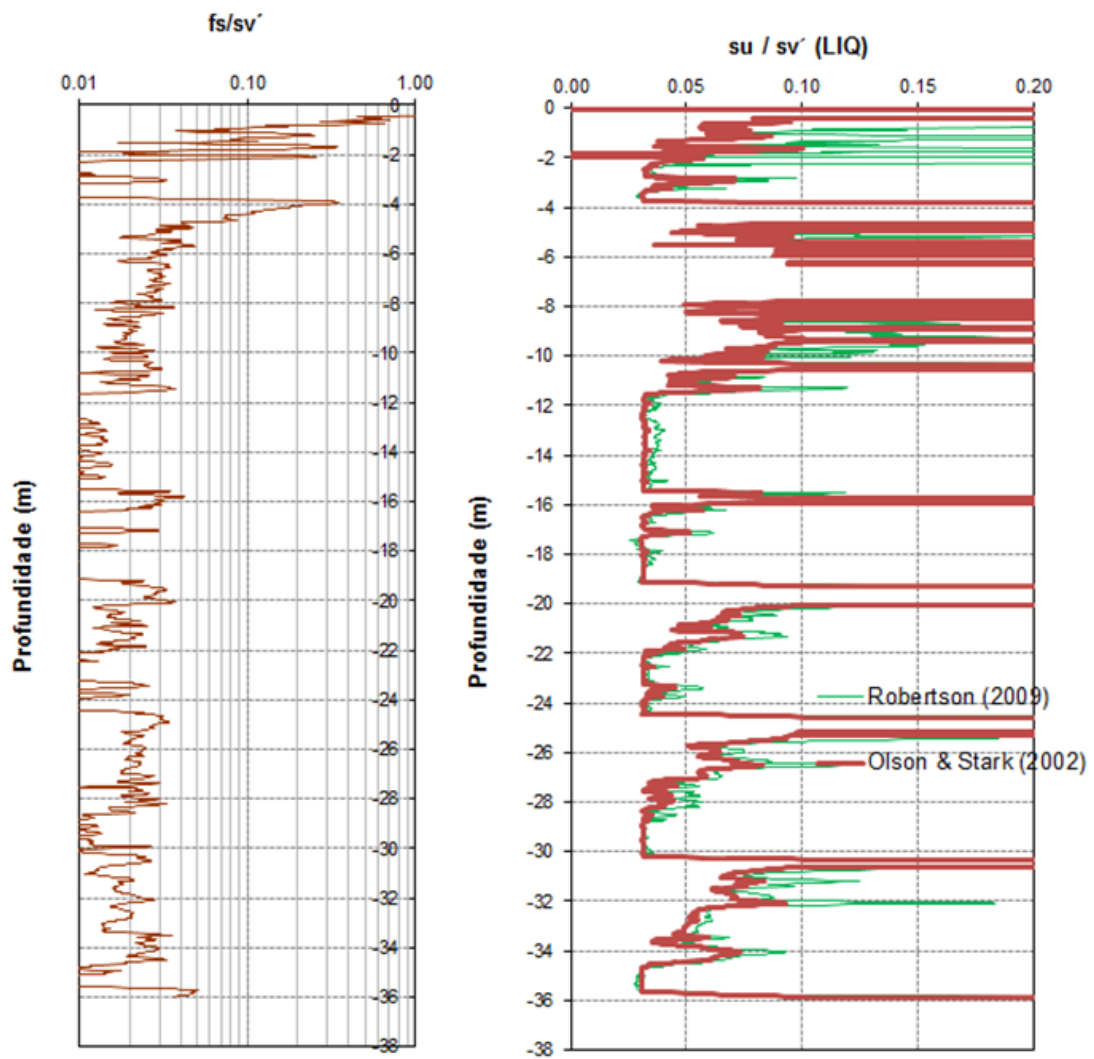


Fig. 2 Anexo VII- Resistência ao cisalhamento liquefeita CPTu 03.

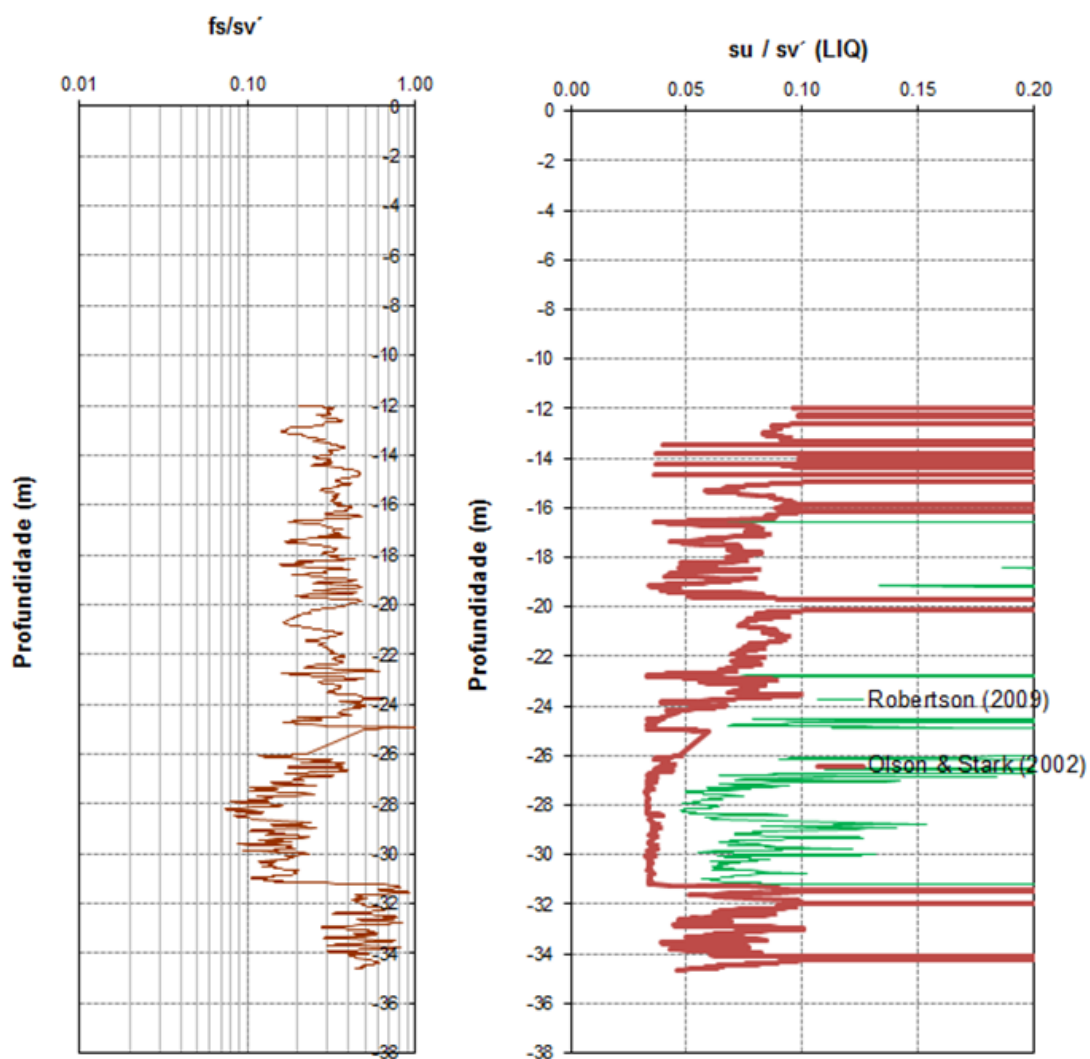


Fig. 3 Anexo VII- Resistência ao cisalhamento liquefeita CPTu 04.

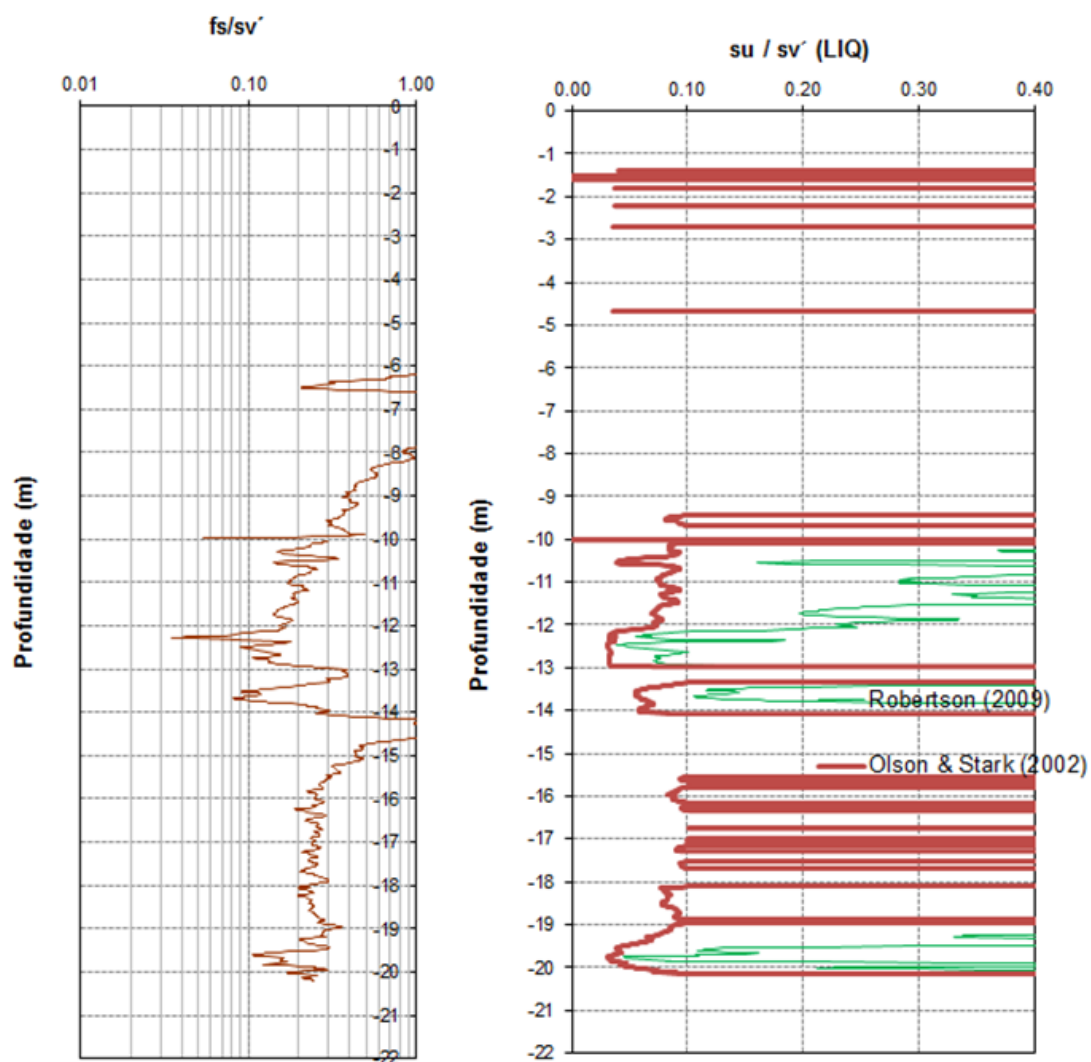


Fig. 4 Anexo VII- Resistência ao cisalhamento liquefeita CPTu 05.

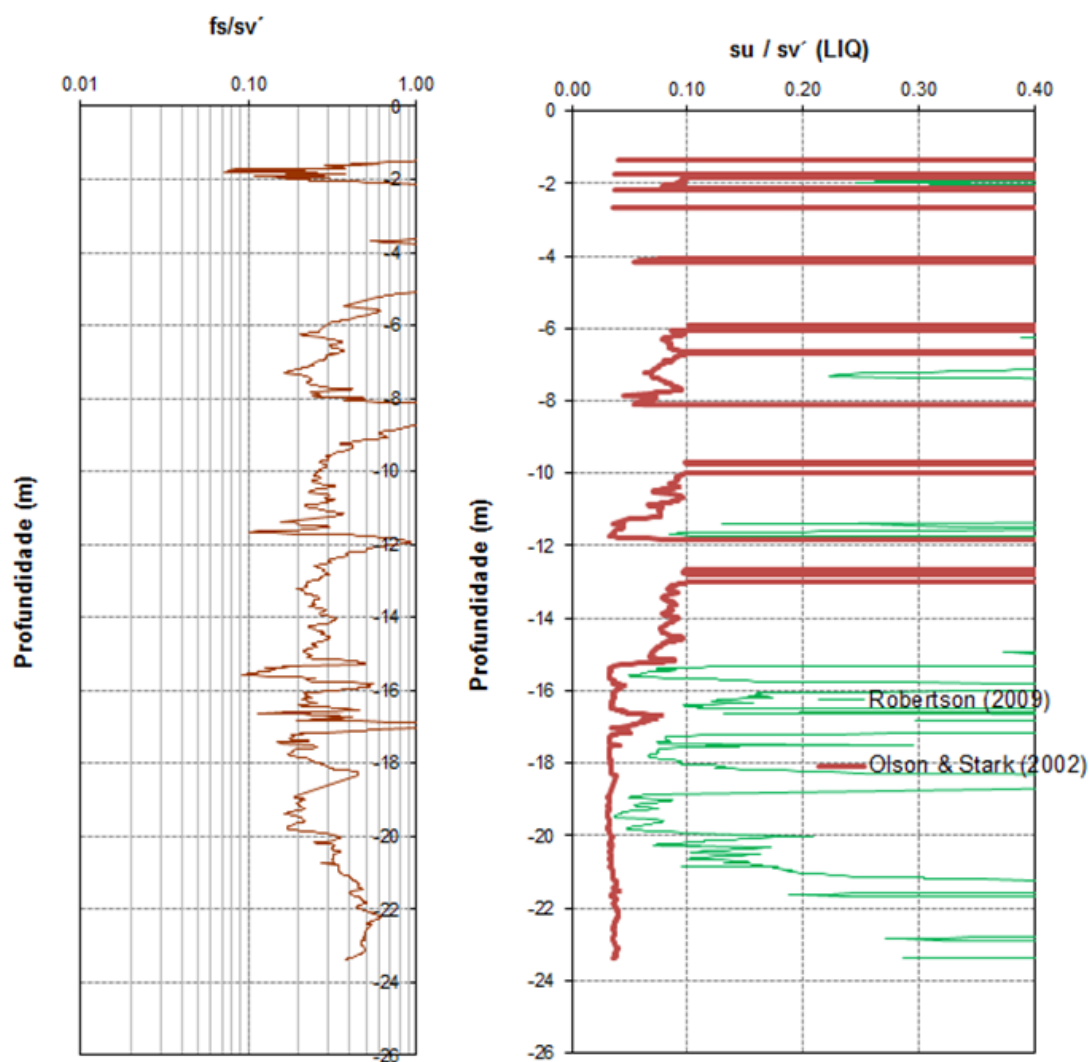


Fig. 5 Anexo VII- Resistência ao cisalhamento liquefeita CPTu 06.

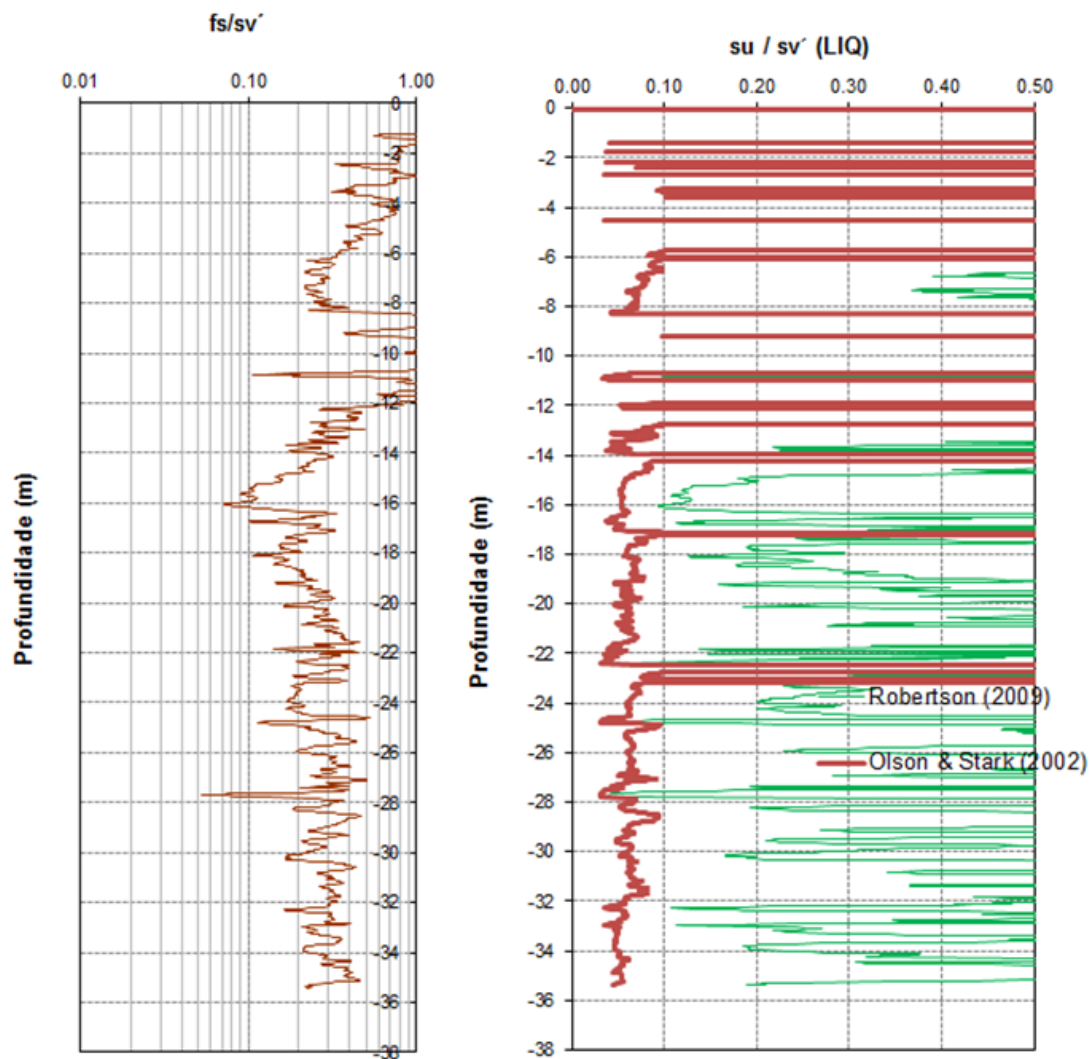


Fig. 6 Anexo VII- Resistência ao cisalhamento liquefeita CPTu 07.

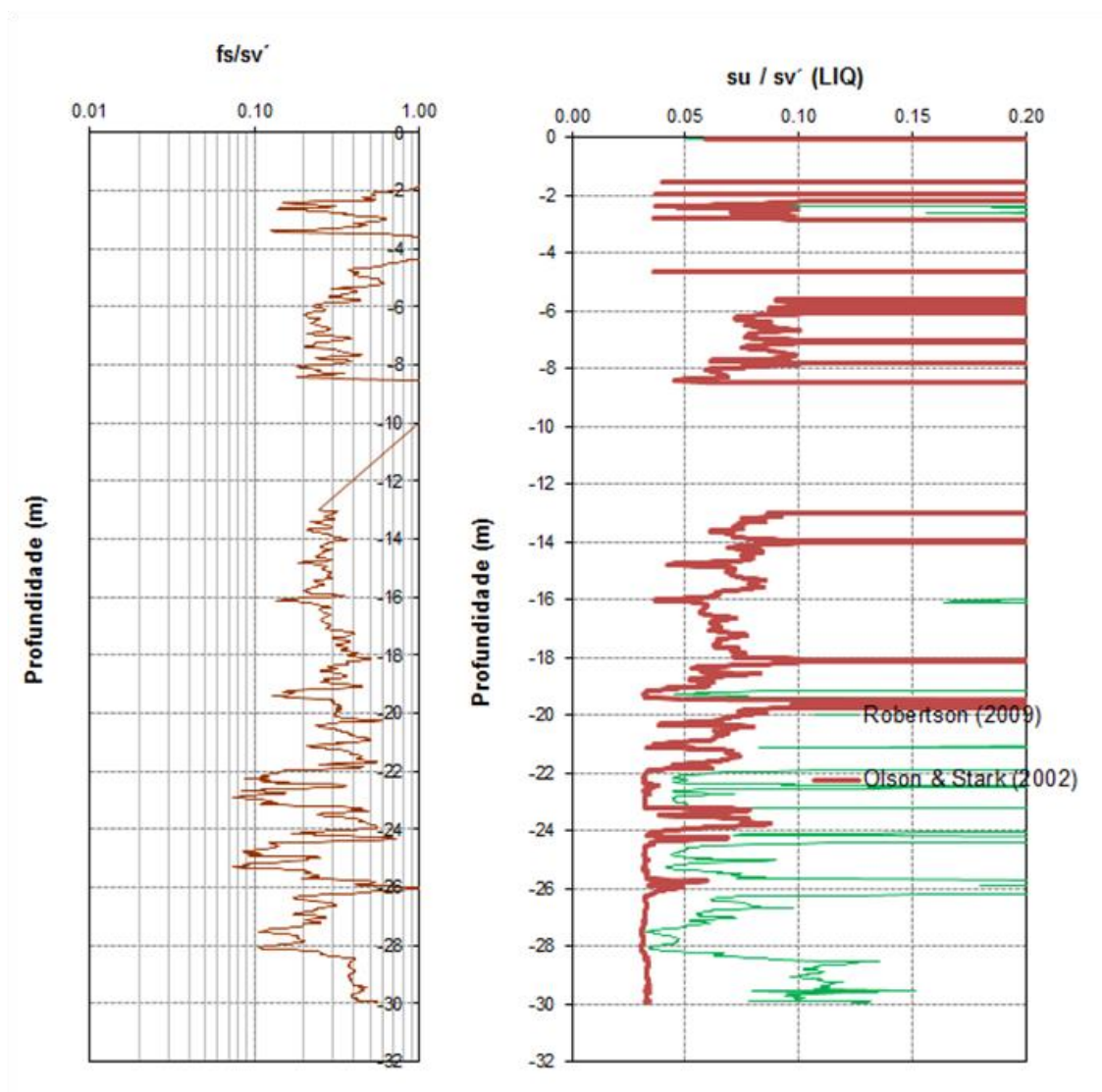


Fig. 7 Anexo VII- Resistência ao cisalhamento liquefeita CPTu 08.

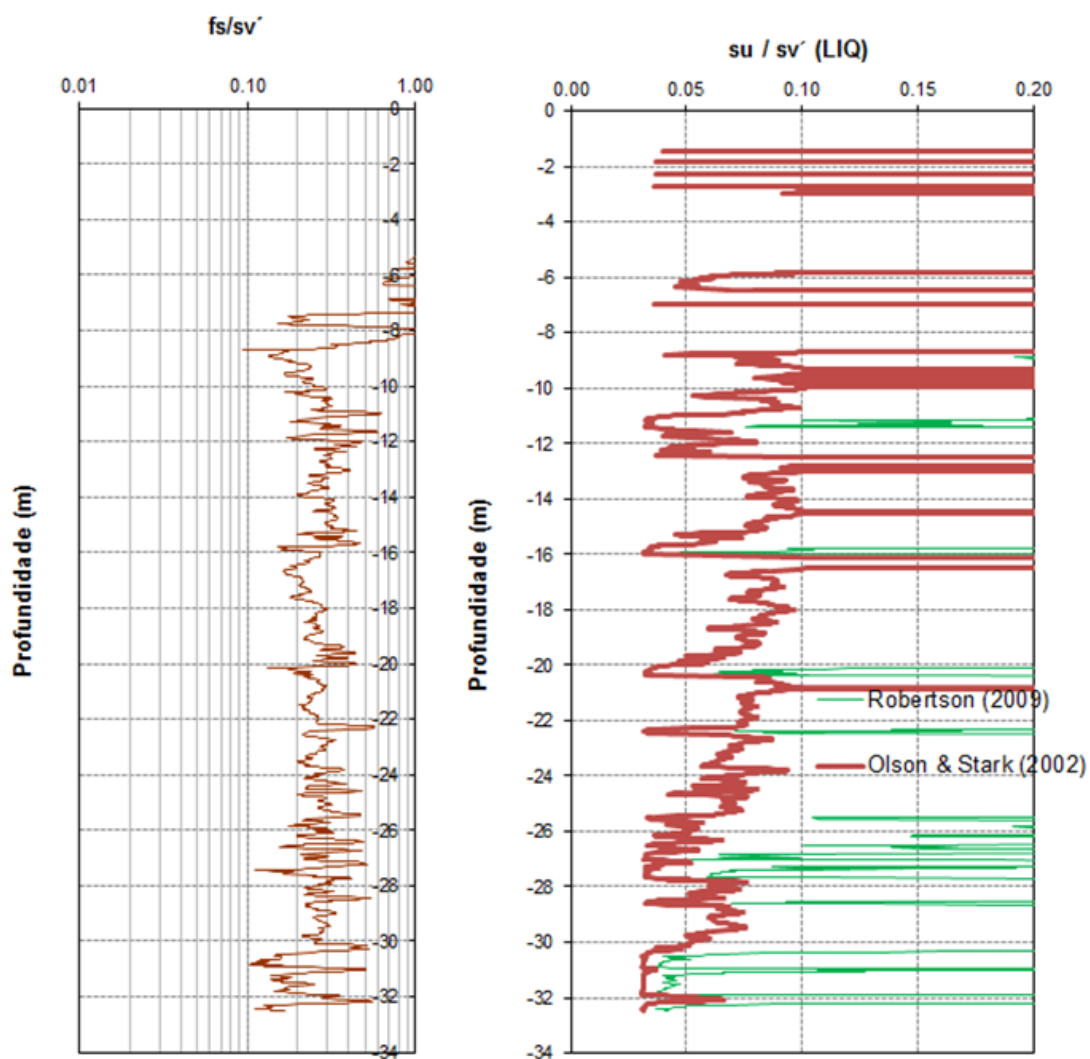


Fig. 8 Anexo VII- Resistência ao cisalhamento liquefeita CPTu 09.

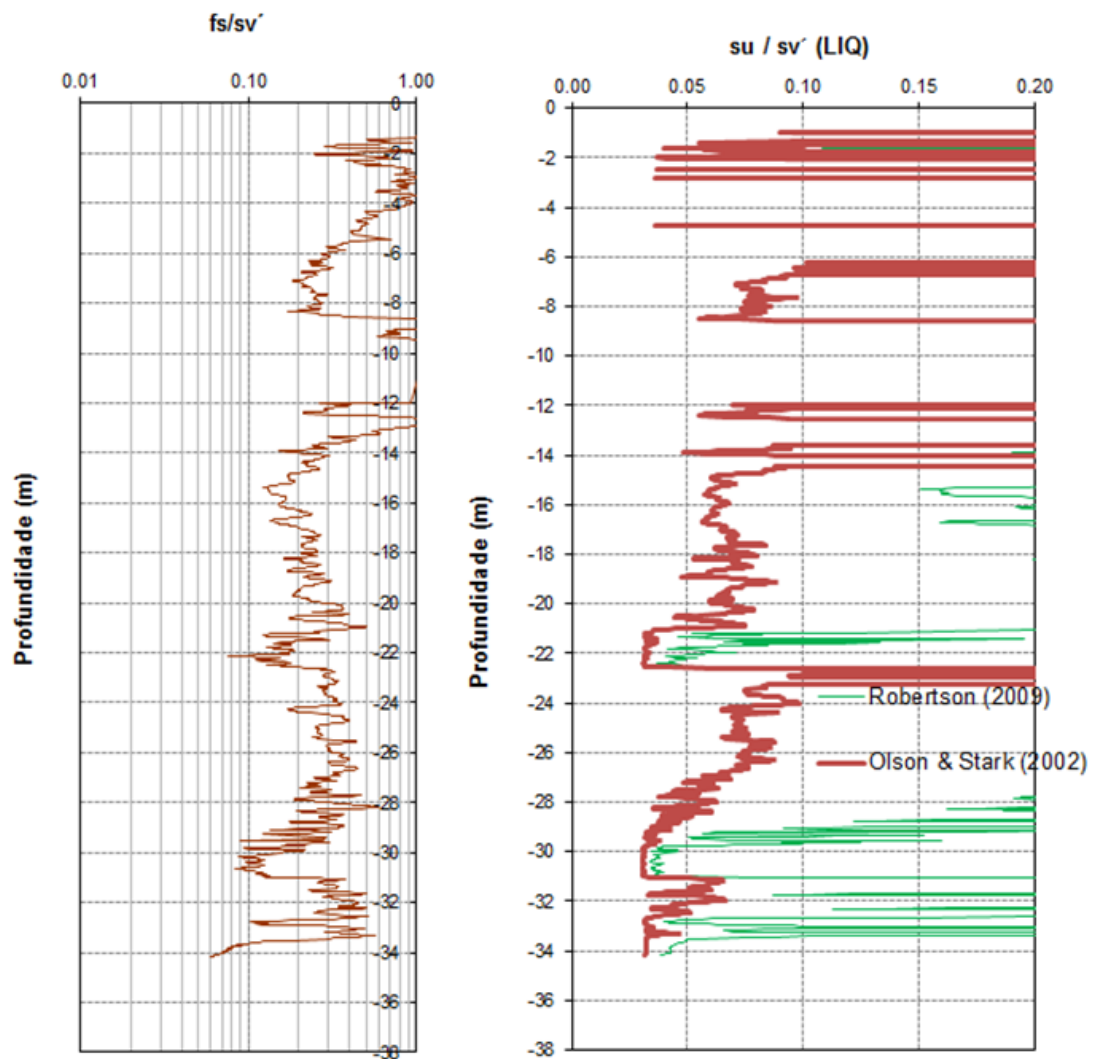


Fig. 9 Anexo VII- Resistência ao cisalhamento liquefeita CPTu 10.