

INVESTIGAÇÃO GEOTÉCNICA EM UM DEPÓSITO DE ARGILA MUITO MOLE DA BAIXADA FLUMINENSE

Marcos Massao Futai¹
Márcio S. S. Almeida²
Álvaro Maia da Costa³
Cláudio S. Amaral³

Resumo

Este artigo apresenta dados de ensaios de campo (piezocone e palheta elétrico) para estimar parâmetros geotécnicos de uma argila mole orgânica. Para inferir as correlações empíricas foram coletadas amostras indeformadas e realizado ensaios de laboratório. Foi avaliada, com bom resultado, a aplicabilidade do piezocone na estimativa da resistência não-drenada. Para estimar a história de tensões do depósito argiloso foram aplicadas correlações empíricas com os dados de piezocone e palheta. Os resultados mostraram que as correlações internacionais para estimar a tensão de sobre-adensamento se aplicam ao caso estudado e que a correlação com os dados de palheta foram melhores que os do piezocone. Valores de coeficientes de adensamento estimados com o ensaio de dissipação com piezocone mostraram-se compatíveis com os resultados medidos em laboratório.

Palavras Chave: Ensaios de campo, piezocone, palheta

INTRODUÇÃO

As argilas moles são solos de baixa resistência e muito compressíveis o que dificulta muito sua utilização como solo de fundação. Por ocorrer na região litorânea e nas áreas urbanas valorizadas, estes solos têm sido muito utilizados para implantação de obras de engenharia. Este trabalho apresenta dados experimentais para contribuir no aumento do conhecimento das argilas moles.

A área em questão é uma região de mangue localizada na Baía de Guanabara em Duque de Caxias-RJ e foi estudada por ocasião do acidente do Duto PE-2 ocorrido em janeiro de 2000 (Almeida et al, 2001). Foram reunidos neste trabalho alguns dados de ensaios de campo (piezocone e palheta elétrico) e laboratório. Ensaios de piezocone e de palheta elétrico foram utilizados para caracterizar o solo e avaliar as metodologias internacionais para identificação estratigráfica e obtenção dos parâmetros de resistência e de história de tensões.

CARACTERÍSTICAS DO DEPÓSITO

Para determinação das características da argila foram coletadas amostras tipo shelby de 4” de diâmetro até 8m de profundidade. A argila está, aparentemente, sempre saturada e o nível d’água depende da maré, quando se eleva o solo fica submerso, ou seja, não há ressecamento da camada superficial.

A espessura da camada de argila varia entre 5m a 12m de profundidade, seguida de uma argila arenosa. As principais características da argila estão apresentadas na forma de perfil na Figura 1. A camada de argila mole nesse perfil tem 9,5m e a parte superior pode ter sido afetada por processos de dragagem realizados nessa área. A densidade dos grãos G_s é menor na superfície, porque há maior concentração de matéria orgânica, mas a partir de 4 m torna-se praticamente constante ($G_s = 2,7$).

Os limites de plasticidade e liquidez são praticamente constantes, com valor médio de $I_p = 108\%$. A umidade é ligeiramente maior que o limite de liquidez até 5m de profundidade, a partir do qual passam a ser praticamente iguais. Até 7m de profundidade o peso específico e o índice de vazios variam pouco, em

¹ Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, futai@usp.br, Avenida Professor Almeida Prado, travessa 2 – Departamento de Estruturas e Fundações CEP 05508-900 São Paulo – SP - fone (011) 3091-5679

² COPPE-UFRJ, Cid. Univ. - CT - B, Sala B-101, Ilha do Fundão - Caixa Postal 68506, RJ, almeida@coppe.ufjf.br

³ CENPES-PETROBRAS, Cid. Univ. Ilha do Fundão – RJ, amaralcs@cenpes.petrobras.com.br

seguida o solo passa a ser mais denso. A argila é a fração dominante, porém na superfície há concentração de areia (até 2m de profundidade) e na média a camada é uma argila siltosa com pouca areia.

Ensaio de adensamento edométrico foram realizados nas amostras indeformadas. Os parâmetros obtidos estão apresentados na Figura 2. A tensão de sobre-adensamento está muito próxima à tensão vertical efetiva de campo. Isto indica que a argila é praticamente normalmente adensada, como pode ser vista no perfil de OCR. A elevada compressibilidade da argila ficou registrada pelos elevados valores de C_c (entre 1,5 e 3,5). A variação de C_c com a profundidade é errática, mas acompanha os perfis de umidade, o índice de vazios ou o índice de plasticidade e é bastante concordante com as correlações empíricas para as argilas do Rio de Janeiro (Futai, 1999 e Futai et al, 2001). O valor do coeficiente de adensamento c_v normalmente adensado varia pouco com a profundidade e está em torno de $3,5 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$.

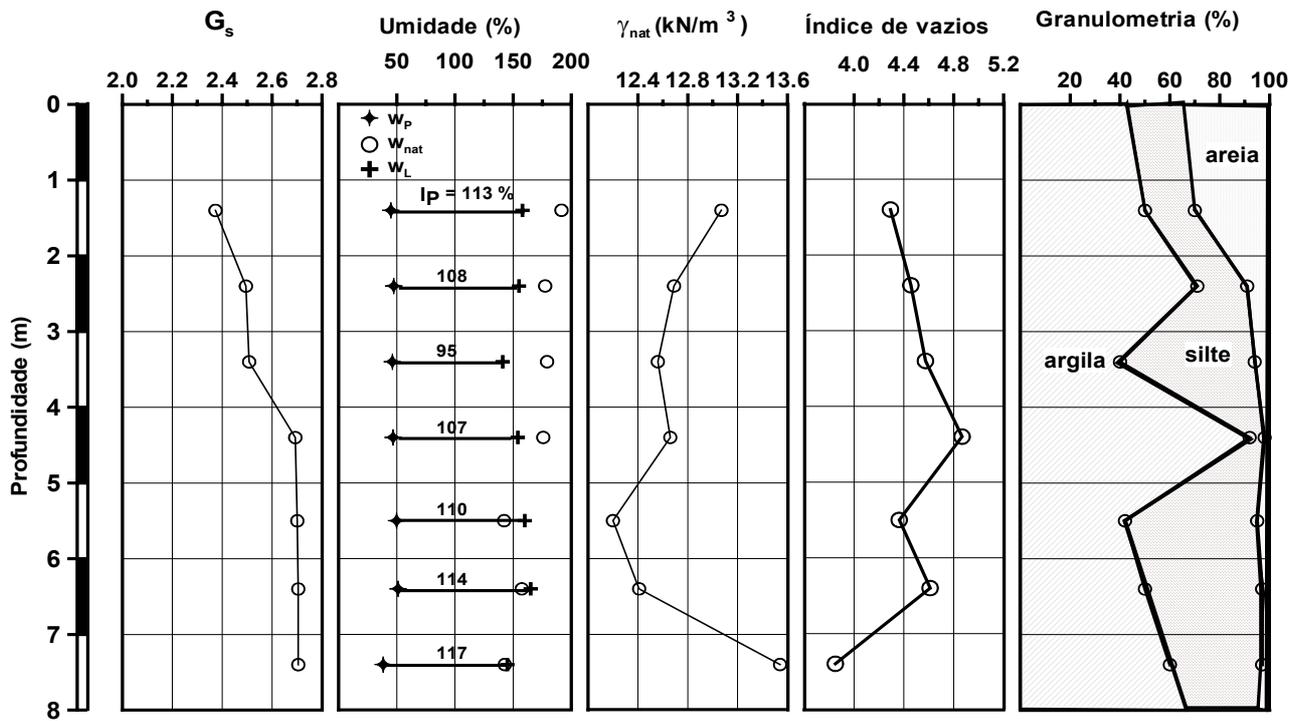


Figura 1 - Perfis de caracterização e índices físicos

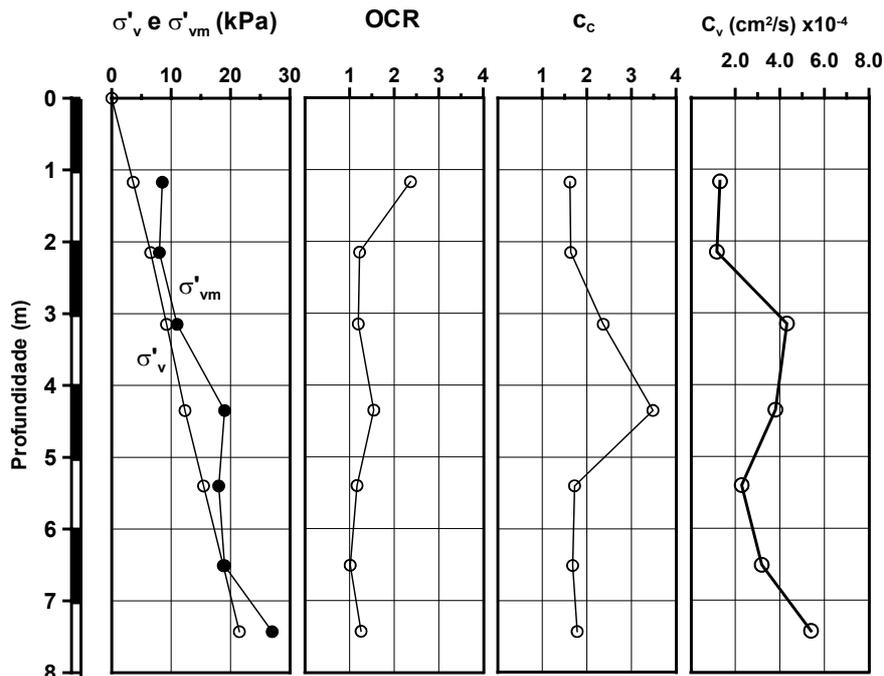


Figura 2 - Perfis dos parâmetros de compressibilidade e adensamento

ENSAIO DE PIEZOCONE

Foram realizados vários ensaios de piezocone para caracterizar a área. Neste trabalho será apresentado o ensaio realizado próximo ao ponto de coleta das amostras, cuja caracterização e parâmetros de compressibilidade foram apresentadas nas Figuras 1 e 2. Além destes ensaios também foram realizados ensaios de resistência em laboratório e em campo. O resultado do ensaio de piezocone está apresentado na Figura 3. A resistência de ponta corrigida q_t aumenta linearmente até 9,5m de profundidade, onde encontra uma camada de argila arenosa bem mais resistente como pode ser vista na Figura 3. O atrito lateral f_s tem comportamento similar a variação de q_t , bem como os excessos de poro-pressão medidos na ponta e na base. O piezocone utilizado (Danziger, 1990) permite medir a verticalidade do ensaio. Conforme descrito por De Ruyter (1981) erros podem ser cometidos quando há desvio vertical do ensaio. No caso o ensaio não excedeu $0,2^\circ$, mantendo-se, praticamente na vertical.

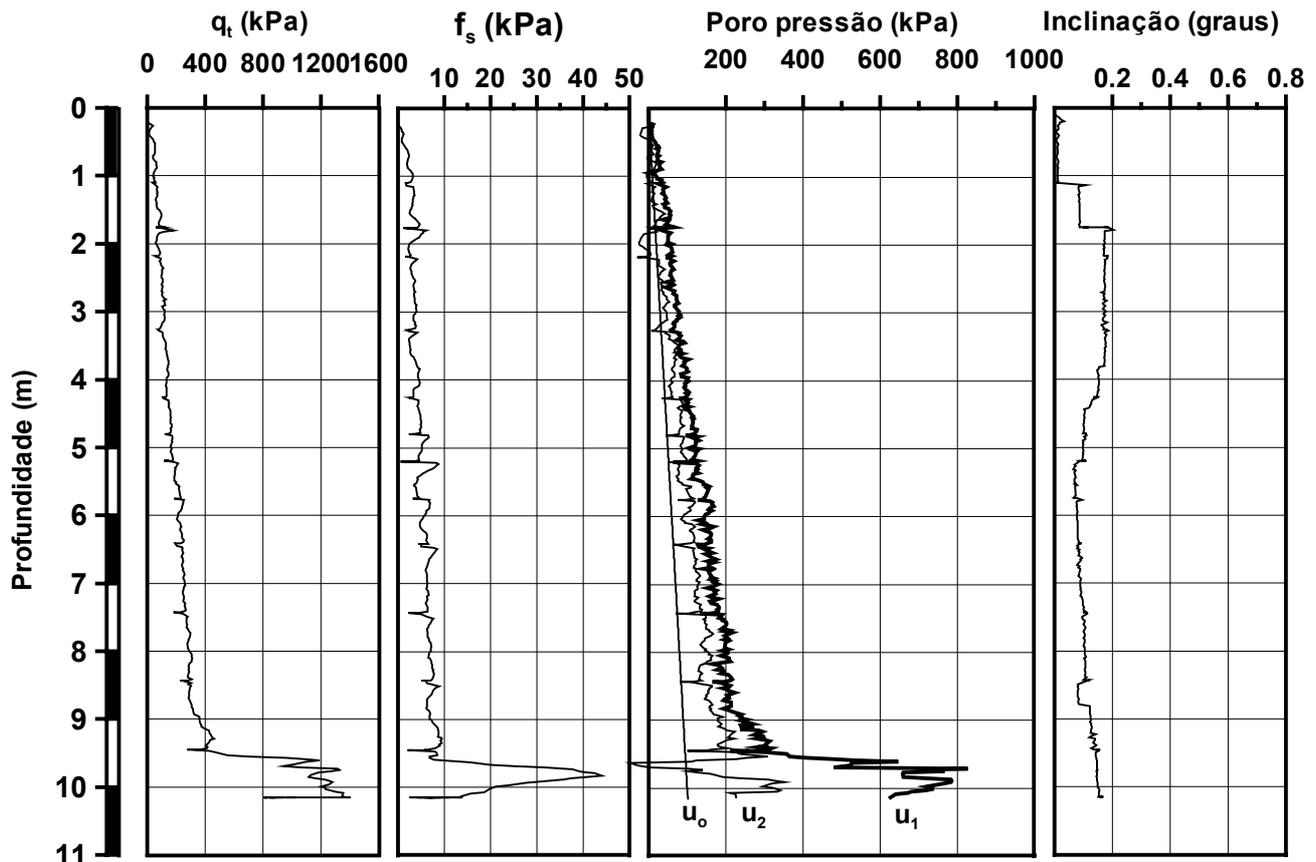


Figura 3 - Resultados do ensaio de piezocone

Foram determinados parâmetros derivados das medições diretas obtidas nos ensaios, como a razão de atrito, F_r e outros parâmetros utilizados para classificação: B_q e Q_t . As variações destes parâmetros com a profundidade podem ser vistas na Figura 4. Até 2m os parâmetros variam um pouco porque a argila é muito mole, porém, percebe-se que todos os parâmetros apresentados na Figura 4 são praticamente constantes até 9,5m, o que indica que a camada de argila orgânica é razoavelmente homogênea.

O sistema de classificação de solos mostrado na Figura 5 relaciona q_t com B_q (Senneset & Janbu 1984). Para as argilas moles brasileiras é necessário detalhar mais este gráfico (Danziger, 1990; Bezerra, 1996; Schnaid, 2000). Os dados obtidos no ensaio foram incluídos no gráfico de Schnaid (2000), conforme apresentado na Figura 6, e os resultados distribuem-se em duas regiões marcadas na Figura 6: até 9m o solo é uma argila muito mole e ficou à direita da experiência brasileira e a camada argilo arenosa ficou abaixo da classificação de areia fofa. Os dados também foram utilizados para aplicação do sistema de classificação de Robertson et al (1986) que correlaciona B_q com F_r e B_q com Q_t (Figura 7). O solo foi classificado na zona 3-argila, concentrando-se na faixa normalmente adensada.

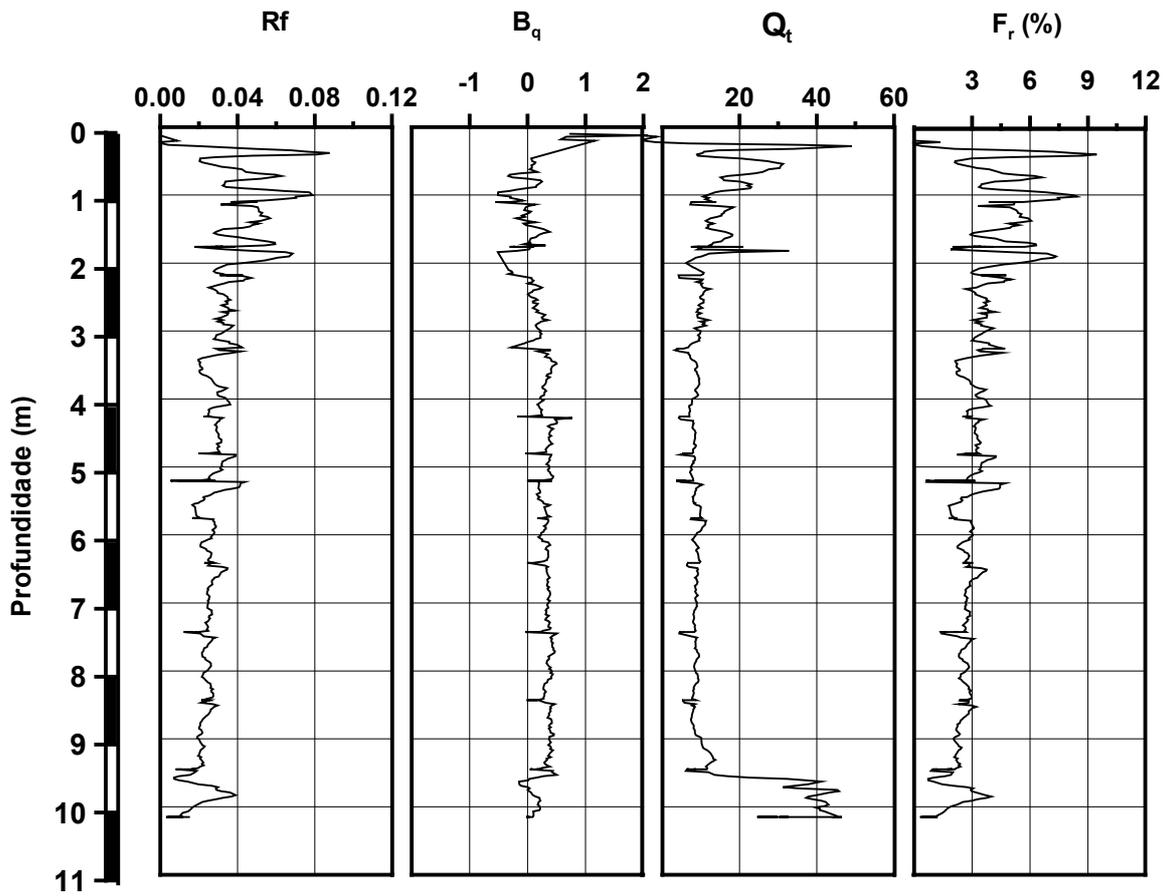


Figura 4 – Parâmetros obtidos pelo ensaio de piezocone

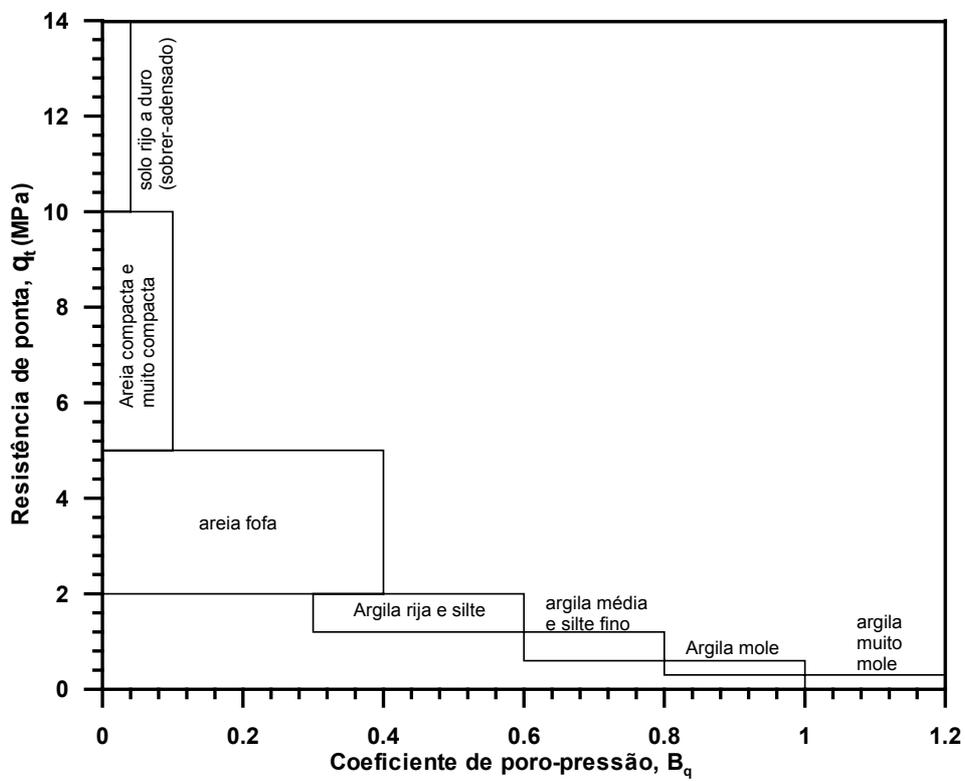


Figura 5 - Sistema de classificação de Senneset & Janbu (1984)

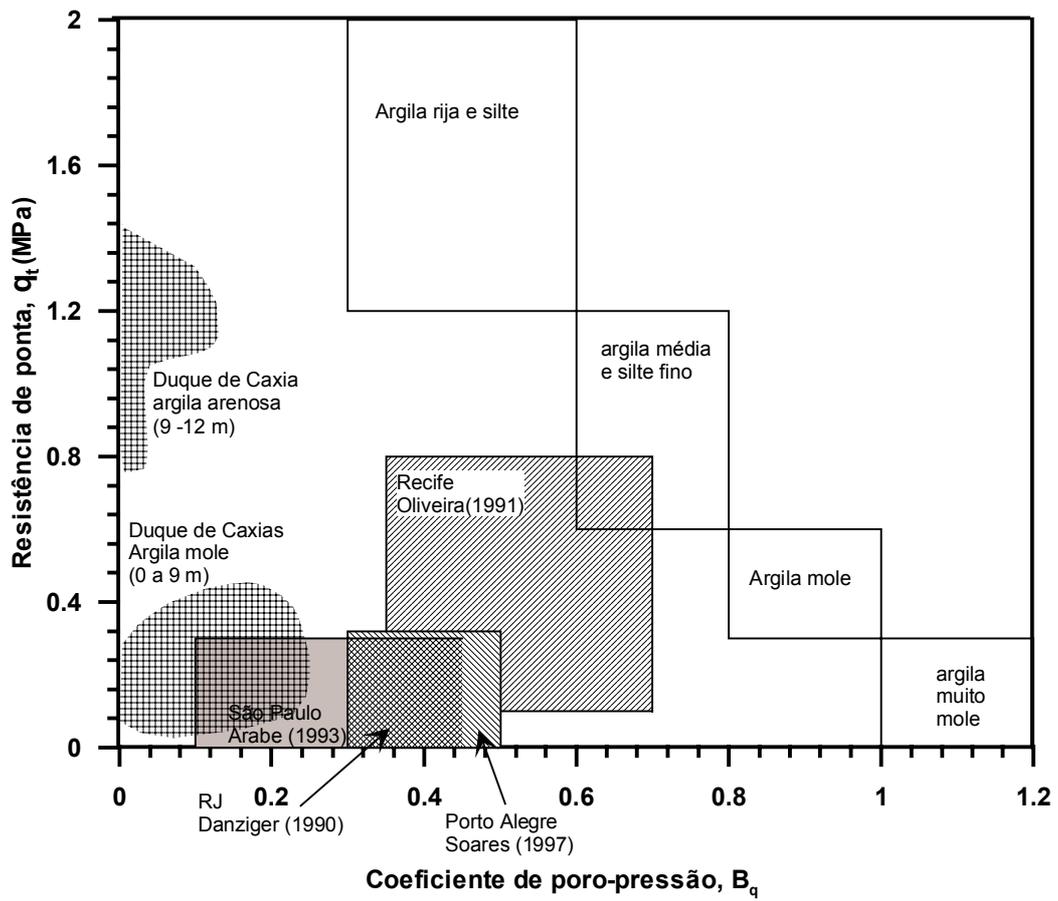


Figura 6 – Classificação dos dados (modificado de Schnaid, 2000)

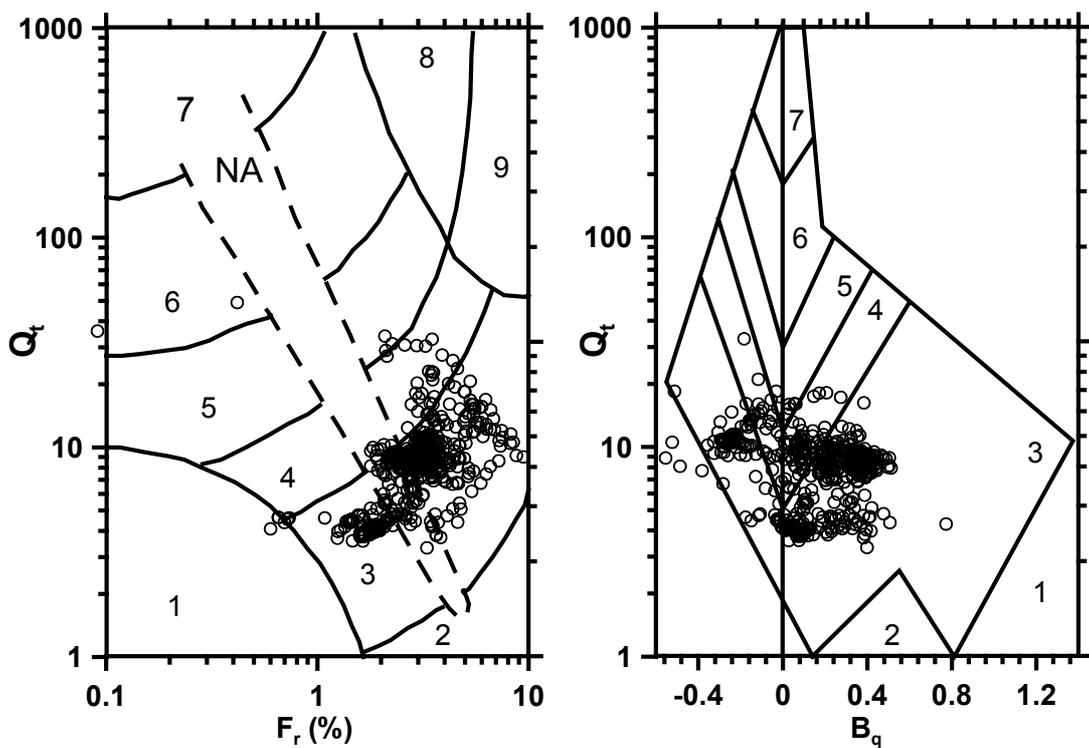


Figura 7 – Classificação da argila segundo a proposta de Robertson et al (1986)

ENSAIO DE PALHETA

Um ensaio de palheta elétrica (equipamento descrito em Nascimento, 1998) foi realizado a alguns metros de ensaio de piezocone. A realização do ensaio seguiu a MB 3122 da ABNT. O resultado está apresentado na Figura 8. A resistência não drenada (S_u) parece ser constante e igual a 4,5kPa até 3m de profundidade a partir de então cresce linearmente com a profundidade. A sensibilidade, obtida pela relação entre as resistências não drenadas do solo intacto e amolgado, é maior na superfície com tendência a se tornar constante com a profundidade. A sensibilidade maior na superfície era esperada, já que a umidade natural é maior que o limite de liquidez (Figura 1). A faixa de valores de sensibilidade obtida está de acordo com a experiência brasileira para a região.

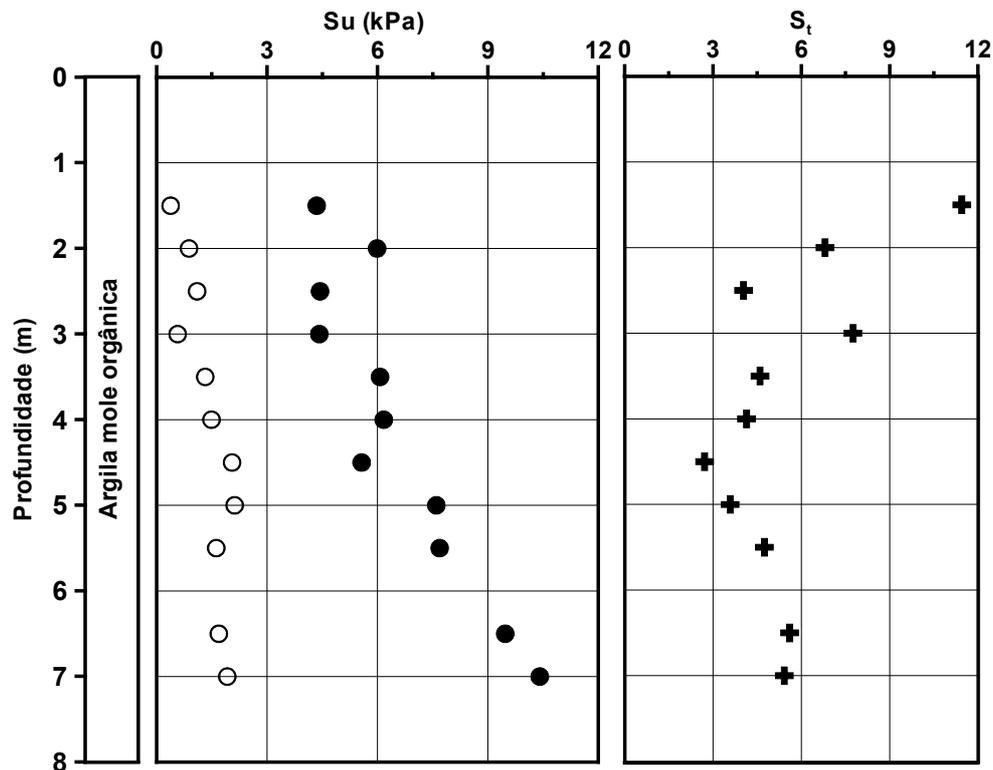


Figura 8 – Resultados do ensaio de palheta

ESTIMATIVA DA RESISTÊNCIA NÃO-DRENADA

Além do ensaio de palheta de campo foram também realizados ensaios de laboratório (UU, CIU, palheta de laboratório) para determinar a resistência do solo. O ensaio CIU foi realizado para aplicação da metodologia SHANSEP. Os solos foram pré-adensados sob condições isotrópicas e com o perfil de OCR da camada de argila foi reconstituído o valor de S_u . Os valores de S_u obtidos pelo ensaio de palheta de laboratório foram menores que os demais ensaios porque foram os primeiros ensaios executados nas amostras de shelly, ou seja, sujeitos a maior amolgamento. A variação do S_u com a profundidade está mostrada na Figura 9, ao lado foram incluídos os resultados do piezocone, no qual pode-se perceber que a tendência do aumento da resistência de ponta, do atrito lateral e do excesso de poro-pressão acompanha o mesmo comportamento da resistência não-drenada.

Com os resultados de S_u obtidos no ensaio de palheta foram inferidos os valores de $N_{kt} = (q_t - \sigma_{vo}) / S_u$, $N_{Au} = (u_2 - u_0) / S_u$ e $N_{KE} = (q_t - u_2) / S_u$ os quais são mostrados na Figura 10. Estes parâmetros variam pouco com a profundidade podendo-se considerar os valores médio de N_{kt} , N_{Au} e N_{KE} iguais a 15; 4,7 e 13, respectivamente. O valor de N_{kt} está bastante consistente com o valor de I_p desse solo (108%) e enquadra-se na faixa de valores dos solos brasileiros apresentados na literatura (Danziger & Schnaid, 2000). Observa-se na Figura 10 que os valores de S_u estimados pelo piezocone concordam bem com os demais ensaios. Os valores de S_u estimados com base em N_{Au} não foram apresentados porque não forneceram bons resultados.

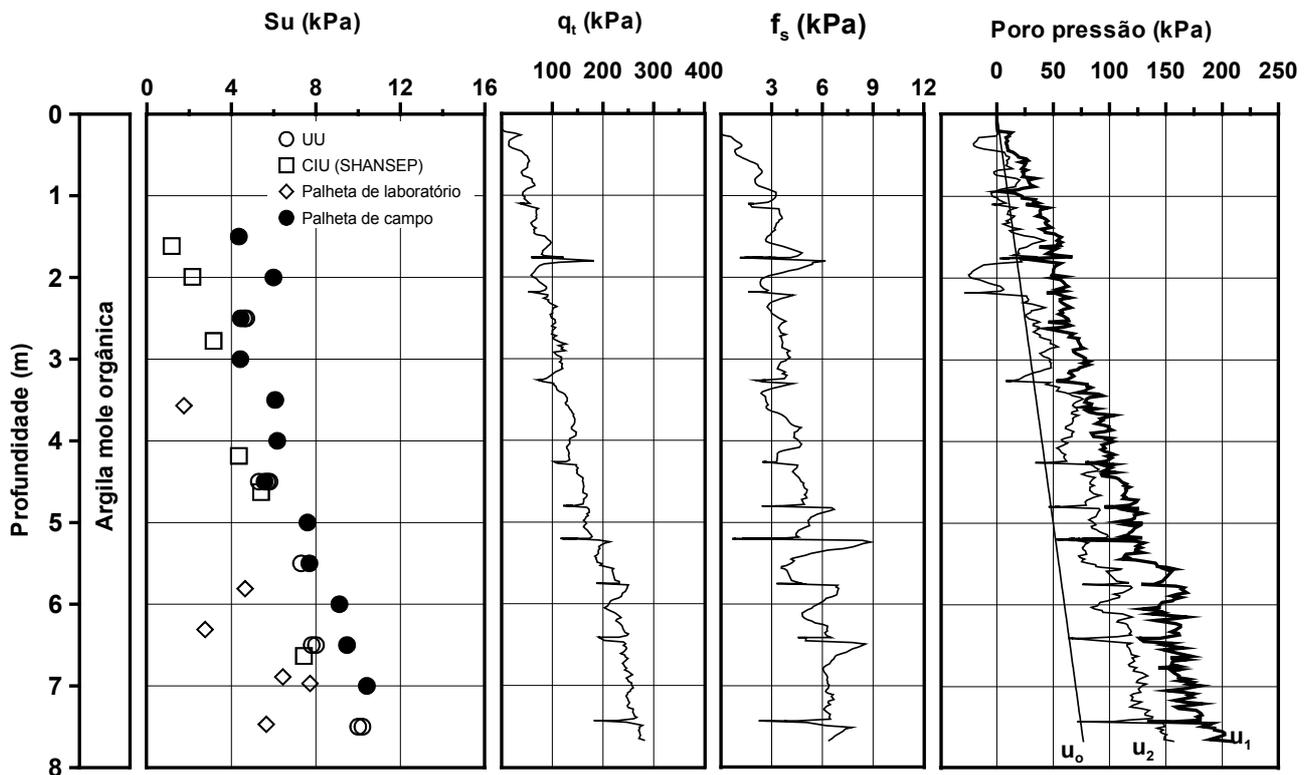


Figura 9 - Resultados de S_u por diferentes métodos comparados com a variação dos dados de piezocone

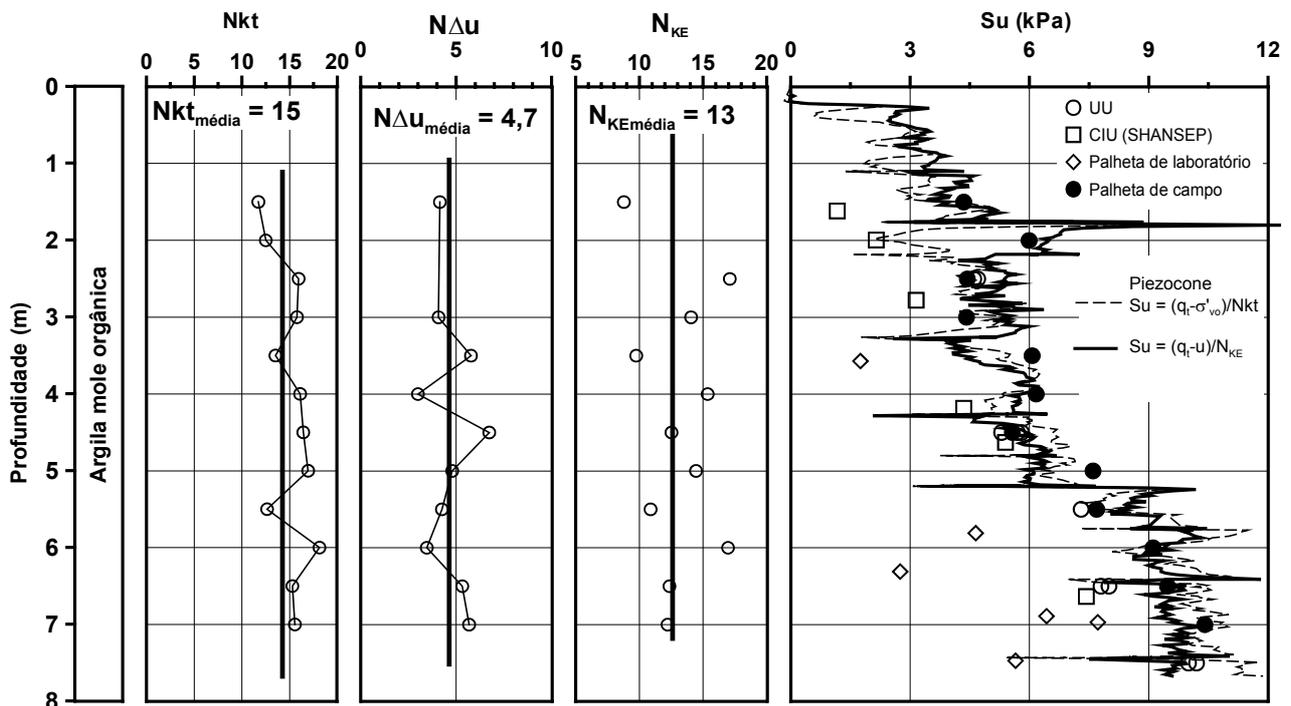


Figura 10 – Valores de N_{kt} , $N_{\Delta u}$, N_{KE} e S_u

ESTIMATIVA DA HISTÓRIA DE TENSÕES

Há moderada confiabilidade em se estimar a história de tensões pelo ensaio de piezocone. As correlações sugeridas por Chen & Mayne (1996) recomendadas na literatura (Schnaid, 2000; Danziger e Schnaid, 2000) para as argilas brasileiras são:

$$OCR = 0,305(q_t - \sigma_{vo}) / \sigma'_{vo} \quad (1)$$

ou $OCR = 0,53(q_t - u) / \sigma'_{vo} \quad (2)$

Aplicando estas sugestões ao solo ensaiado, observaram-se grandes discrepâncias entre os valores previstos e medidos através dos ensaios de compressão edométrica, como podem ser vistos na Figura 11(a). Porém, Chen & Mayne (1996) apresentaram várias outras correlações, dentre elas as correlações múltiplas. A grande vantagem destas correlações é que elas incorporam o I_p . As argilas brasileiras são bem mais plásticas e moles que de outros países e por isso usar expressões com I_p pode minimizar as diferenças entre as propriedades das argilas. Testando outras correlações propostas por Chen & Mayne (1996) verificou-se que as correlações múltiplas são melhores e que para o depósito ensaiado a melhor correlação é:

$$\frac{\sigma'_{vm}}{pa} = 0,86 \left(\frac{q_t - \sigma_{vo}}{pa} \right)^{0,93} I_p^{-0,28} \quad (3)$$

Obtiveram-se resultados bastante satisfatórios aplicando a expressão (3), como mostrado na Figura 11(b). Também é possível obter a história de tensões a partir dos resultados de palheta. A base teórica da aplicação dos resultados do ensaio de palheta está no método SHANSEP proposto por Ladd & Fott (1974), que relaciona a resistência não drenada normalizada normalmente adensada e sobre-adensada em função da razão de sobre-adensamento (OCR). A partir dessa base teórica, Mayne & Mitchell (1988) apresentaram uma correlação entre os valores da tensão de sobre-adensamento, a resistência não-drenada normalizada, a tensão efetiva de campo e o I_p :

$$\sigma'_{vm} = 22 I_p^{-0,48} (Su / \sigma'_{vo}) \quad (4)$$

Aplicando a expressão (4) aos resultados obtidos no ensaio de palheta, chega-se aos valores apresentados nas Figuras 11(b). A melhor estimativa da história de tensões do depósito foi obtida pela correlação com os dados de palheta.

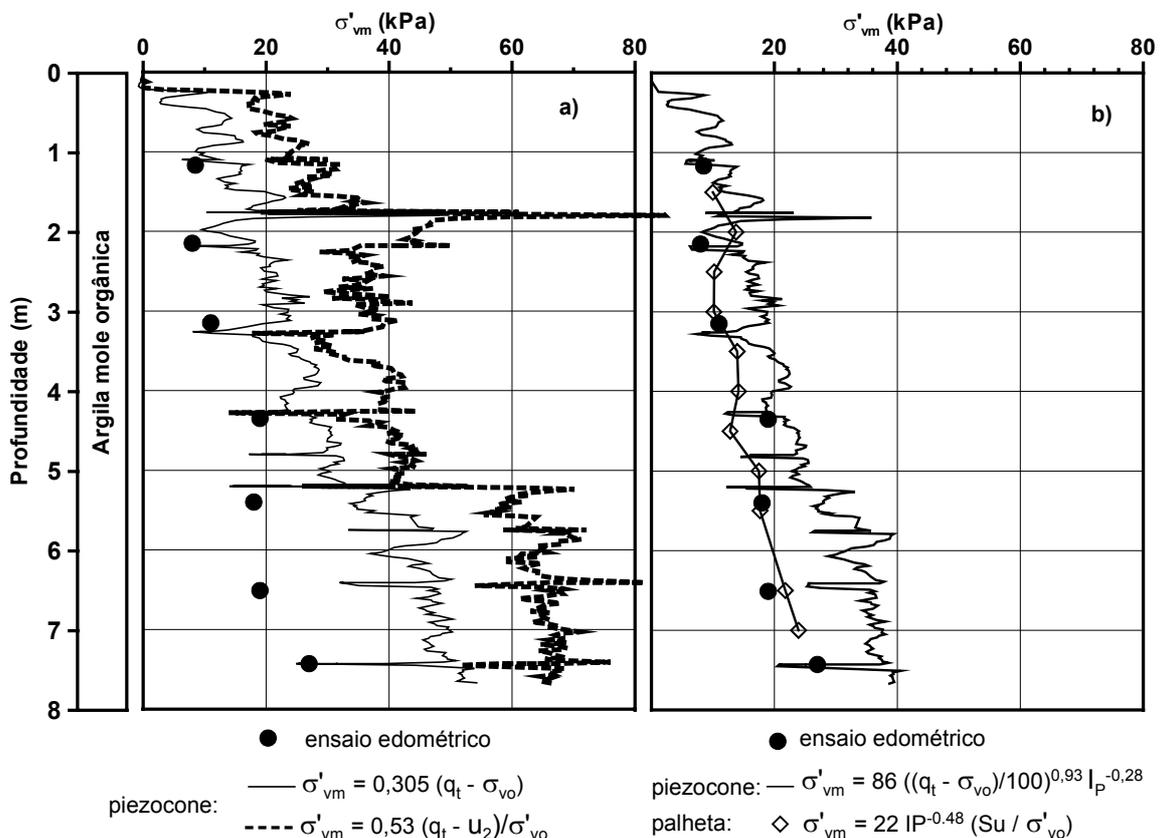


Figura 11 – Estimativa da história de tensões

ESTIMATIVA DO COEFICIENTE DE ADENSAMENTO

É possível obter o coeficiente de adensamento horizontal (c_h) através do ensaio de dissipação do excesso de poro-pressões do ensaio de piezocone. Foram realizadas 3 ensaios de dissipações de excesso de poro-pressões que ultrapassaram 60% de adensamento, conforme está mostrado na Figura 12. Os excessos de poro-pressão medidos na base do cone apresentaram comportamento de solo dilatante, o que tem sido observado em algumas argilas. O coeficiente de adensamento horizontal foi obtido pelo método de Houslyby e Teh (1988), dado pela expressão (5).

Os valores dos módulos cisalhantes para determinação de I_r (G/Su) foram obtidos por ensaios UU. Chegou-se a um valor médio de $I_r = 50$, bem menor que a experiência internacional, mas entretanto próximo à experiência brasileira na região (Danziger et al, 1997). Os valores de c_h foram obtidos para 50% de dissipação e somente para os valores de u_1 . Os resultados estão mostrados na Tabela 1. Os valores de c_h medidos diretamente pelo piezocone correspondem à condição de solo sobreadensado. Por isso, foram convertidas para c_h normalmente adensado pela correlação empírica de Jamiolkowski et al (1985), multiplicando o valor de c_h do piezocone pela relação entre os índices de compressão C_r/C_c . Para as argilas moles, muitas vezes, o coeficiente de adensamento vertical é mais usado que o horizontal. Como os valores de c_v foram medidos em laboratório relacionaram-se os valores de c_h/c_v e obteve-se valores que variam de 1,0 a 1,8. É possível obter valores de c_h através do piezocone e usa-lo em projetos com boa precisão, pois apresentou relações de c_h/c_v na mesma faixa apresentada pela experiência brasileira (Lacerda et al, 1977).

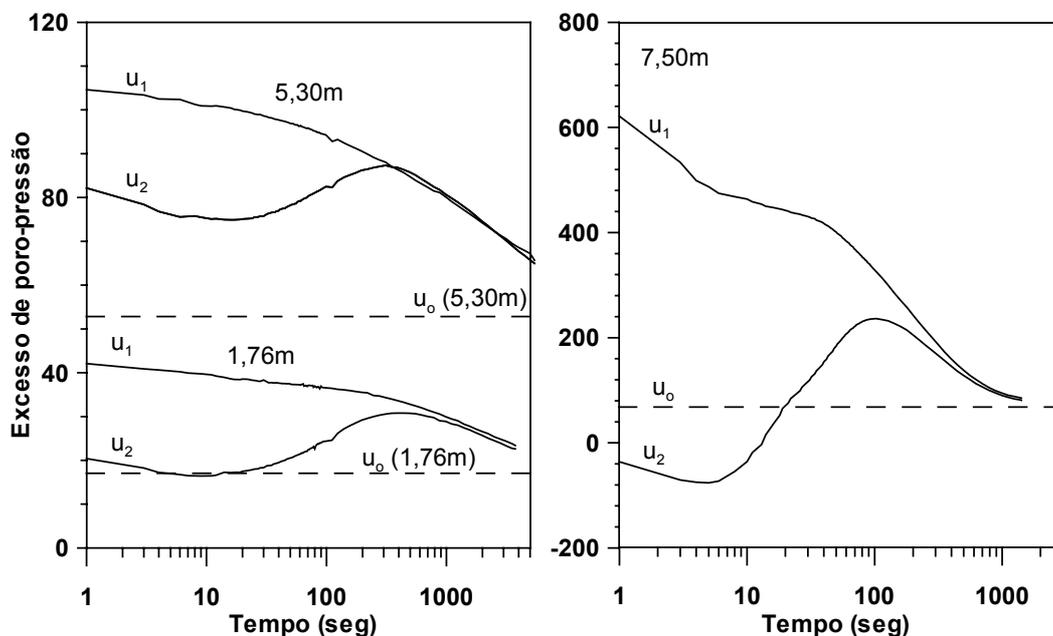


Figura 12 – Resultados dos ensaios de dissipação

Tabela 1 – Valores de C_h obtidos no piezocone

z (m)	c_h (cm^2/s) $\times 10^{-4}$		$c_h/c_v = K_h/K_v$
	$c_{h\text{piez}}$	$c_{h(\text{NA})} = (C_r/C_c) c_{h\text{piez}}$	
1,76	4,5	2,0	1,6
5,30	21,8	4,2	1,8
7,50	27,0	5,4	1,0

$$C_h = \frac{R^2 T^* \sqrt{I_r}}{t} \quad (5)$$

CONCLUSÃO

O artigo apresentou resultados experimentais de um depósito de argila mole em Duque de Caxias-RJ. Foram realizados ensaios de laboratório, piezocone e palheta elétrico. Com os resultados usados foi verificada a aplicabilidade do sistema de classificação dos solos para o depósito e concluiu-se que se enquadram nas faixas obtidas pela experiência brasileira.

Os dados de piezocone foram utilizados para estimar a resistência não drenada e verificou-se que a utilização de N_{kt} igual a 15 apresentou melhores resultados ao depósito ensaiado.

A história de tensões foi estimada com base nas recomendações da literatura para argilas brasileiras, porém, verificou-se que para o depósito ensaiado estas correlações se distanciam muito dos valores medidos por meio de ensaios edométricos. Pesquisando outras correlações internacionais conseguiu-se obter melhores resultados para estimar a história de tensões do solo estudado.

A determinação do coeficiente de adensamento com base no ensaio de dissipação do piezocone forneceu bons resultados. Aplicando correlações empíricas para determinar o coeficiente de adensamento horizontal normalmente adensado, verificou-se que este pode estar entre 1,00 a 1,8 vezes o valor do coeficiente de adensamento vertical normalmente adensado.

HOMENAGEM E AGRADECIMENTOS

Os autores apresentam uma homenagem a Márcio Miranda Soares pelo pioneirismo na introdução do ensaio de piezocone tanto no meio acadêmico quanto na prática da engenharia geotécnica brasileira. Os autores também agradecem o apoio dado pela PETROBRAS.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Almeida, M. S. S., Costa A. M., Amaral C. S., Futai M. M. & Mello J. R. (2001) "Pipeline Failure on Very Soft Clay" em co-autoria com The Third International Conference on Soft Engineering, Vol. 1, pp. 131-138, 6-8 Dezembro 2001, Hong Kong.
- Arabe, L. C.G. (1993) Algumas características geotecnológicas das argilas da baixada Santista obtidas através de ensaios "in situ" VIII COBRANSEF, vol 8, 65-77
- Bezerra R. L (1996) "Desenvolvimento do Piezocone COPPE de Terceira Geração e sua Utilização na Determinação dos Parâmetros in situ de Resistência ao Cisalhamento e Compressibilidade de Argilas Moles", Tese DSC. COPPE-UFRJ.
- Chen, B.S. & Mayne, P.W. (1996). Statistical relationship between piezocone measurements and stress history of clay. Canadian Geotechnical Journal. Vol.33, 488-498.
- Danziger, F.A.B. (1990) Desenvolvimento de equipamento para realização de ensaios de piezocone: aplicação a argilas moles. Tese DSC. COPPE-UFRJ.
- Danziger, F.A.B. Almeida, M.S. e Sills, G.C., (1997) "The significance of the strain path analysis in the interpretation of piezocone dissipation data", **Geotechnique**, 47 (5), pp. 901-914.
- Danziger, F. AB & Schnaid, F. (2000) Ensaio de piezocone: procedimentos, recomendações e interpretação. SEFE, São Paulo
- De Ruiter (1981) Corrent Penetrometer practice. Symp. On Penetration Testing and Experience, 1-41
- Housby, G.T. & Teh, C.I. (1988) Analysis of the piezocone in clay. Int. Symp. Penetration testing. Vol 2, 777-783
- Futai, M. M. (1999) Utilização de conceitos teóricos e Práticos na Avaliação do Comportamento de Algumas argilas do Rio de Janeiro. Seminário
- Futai, M.M., Almeida, M.S.S. & Lacerda, W.A (2001). Propriedades geotécnicas de algumas argilas do Rio de Janeiro. Encontro sobre solos moles. COPPE-UFRJ.
- Jamiolkowski, M. Ladd, C.C., Germaine, J.T. & Lancellotta, R. (1985) New developments in field and laboratory testing of soils. XI ICSMFE, San Francisco, vol. 1, 57-153.
- Lacerda, W. A., Costa Filho, L. M., Coutinho, R. Q. & Duarte, A. R., 1977. Consolidation characteristics of Rio de Janeiro soft clay. Proceedings of Conference on Geotechnical Aspects of Soft Clays, Bangkok, 231-244.
- Ladd, C.C. & Foott (1974). New design Procedure for stability of soft clay. ASCE. Vol100(7), 591-602
- Mayne, P.W. & Mitchell, J.K. (1988) Consolidation ratio in clay by field vane. Can. Geotech. J. 25(1), 150-157
- Nascimento, I.N.S. (1998) "Desenvolvimento e Utilização de um Equipamento de Palheta Elétrico", Tese de M.Sc., COPPE-UFRJ.
- Oliveira, J.T.R. (1991) Ensaio de piezocone de um depósito de argila mole de Recife. Tese MSc. COPPE
- Robertson, P.N., Campanella, R.G., Gillespie, D. & Greig, J. (1986). User of piezometer cone data. Proc. In situ 86, 1263-1280.
- Schnaid, F. (2000) Ensaio de campo e suas aplicações à engenharia de fundações. Oficina de textos
- Senneset, K. & Janbu, N. (1984) Shear strength parameters obtained from static cone penetration tests. Symp. Strenrth Testing Marine Sediments: laboratory and in situ Measurements, 41-54.
- Soares, J.M. (1997) Caracterização do depósito de argila mole da região metropolitana de Porto Alegre. Dissertação MSc. UFRGS.