

## Ensaaios de Laboratório de Minipenetrômetros

André Luis Meier

Doutorando em Geotecnia, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil,  
de.luis.meier@gmail.com

Henrique Milan

Mestrando em Geotecnia, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil,  
henriquefmilan@gmail.com

Gracieli Dienstmann

Professora, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil, g.dienstmann@ufsc.br

Jonatas Sosnoski

Doutor em Geotecnia, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil,  
jonatas.sosnoski@gmail.com

**RESUMO:** Ensaaios penetrométricos em laboratório são utilizados para obter parâmetros de materiais em condições controladas. Nesta pesquisa, foram desenvolvidos os equipamentos minicone, minibola e minibarra para avaliar o efeito do tipo de ponteira e da velocidade de cravação na resistência de um material de permeabilidade intermediária. O solo utilizado foi uma areia moída até que mais de 50% da amostra atingisse granulometria igual ou inferior ao tamanho silte. A área da ponta do minicone é de 220 mm<sup>2</sup>, a da minibola é de 1590 mm<sup>2</sup> e a da minibarra é de 1470 mm<sup>2</sup>. Um transdutor de pressão K8 foi posicionado na seção u<sub>2</sub> de todos os dispositivos. Amostras de 500×500×400 mm foram moldadas em diferentes densidades (fofa e densa), nas condições seca e saturada. As ponteiros foram cravadas no solo por meio de uma prensa triaxial, com velocidade controlada, por uma extensão de 100 mm. Os resultados indicaram que tanto a geometria da ponteira quanto a velocidade de cravação influenciam significativamente a resistência mobilizada. Ensaaios com o minicone em condição saturada permitiram a aplicação da metodologia de Teh e Houlsby (1991) para estimativa do coeficiente de adensamento horizontal. Os resultados, embora ainda não conclusivos, mostram avanços promissores em estudos com minipenetrômetros em solos com drenagem parcial.

**PALAVRAS-CHAVE:** Minicone; Minibola; Minibarra; Drenagem Parcial, Ensaio Penetrométrico

**ABSTRACT:** Laboratory penetrometer tests are employed to obtain material parameters under more controlled conditions. In this study, minicone, miniball, and minibar devices were developed to evaluate the influence of tip geometry and penetration rate on the resistance mobilized in a soil of intermediate permeability. The test material consisted of ground sand, processed so that more than 50% of the particles reached silt-size gradation. The projected areas of the minicone, miniball, and minibar tips are 220 mm<sup>2</sup>, 1590 mm<sup>2</sup>, and 1470 mm<sup>2</sup>, respectively. A K8 pressure transducer was positioned at the u<sub>2</sub> location in all three devices. Soil specimens measuring 500×500×400 mm were prepared at different densities (loose and dense), under dry and saturated conditions. The tips were driven into the soil using a triaxial press, at controlled velocities, over a penetration depth of 100 mm. The results indicated that both tip geometry and penetration rate significantly affect the mobilized resistance. Tests performed with the minicone under saturated conditions enabled the application of the Teh and Houlsby (1991) method to estimate the horizontal consolidation coefficient. The experimental approach was validated based on the consistency of the results obtained.

**KEYWORDS:** Minicone; Miniball; Minibar; Partial Drainage; Penetrometer Test

### 1 INTRODUÇÃO

Ensaaios penetrométricos são amplamente utilizados na engenharia geotécnica para estimativa de parâmetros de resistência e avaliação de condições de deformação em diferentes tipos de solo. Em materiais de permeabilidade intermediária, como areias finas com frações de silte ou argila, a interpretação dos



resultados exige cautela, dado o possível desenvolvimento de condições de drenagem parcial durante a cravação (SCHNAID, 2009; RANDOLPH; HOPE, 2004). Nesses casos, a resposta do solo pode refletir um comportamento intermediário entre os regimes drenado e não drenado, dificultando a aplicação direta das correlações tradicionais e introduzindo incertezas significativas na análise dos parâmetros de resistência.

A resistência mobilizada durante a cravação é a principal medida extraída dos ensaios de penetração, sendo diretamente relacionada à razão entre a força aplicada e a área projetada da ponteira. Neste trabalho, a notação  $q_c$  será utilizada para representar a resistência de ponta obtida com o minicone, enquanto  $q_m$  será adotada para as resistências obtidas com as ponteiros minibola e minibarra.

A condição de drenagem mobilizada durante o ensaio é fortemente dependente da velocidade de cravação em relação à capacidade do solo em dissipar poropressões. Essa relação é expressa pelo parâmetro de velocidade normalizada horizontal ( $V_h$ ), definido conforme a Equação 1 (RANDOLPH; HOPE, 2004):

$$V_h = \frac{v \cdot d}{c_h} \quad (1)$$

O coeficiente  $c_h$  pode ser obtido a partir de ensaios de dissipação de poropressão realizados após a interrupção da cravação em ensaios de cone. Com base na proposta de Teh e Houlsby (1991) para ensaios em piezocone, utiliza-se um fator de tempo adimensional ( $T^*$ ), que depende da porcentagem de dissipação e da posição do leitor de poropressão. A equação que permite estimar o  $c_h$  a partir desses ensaios é apresentada na Equação 2.

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

Cabe destacar que, nesta pesquisa, os ensaios de dissipação foram realizados exclusivamente com o minicone, de modo que a aplicação da metodologia de Teh e Houlsby (1991) restringe-se a esse dispositivo. Para as ponteiros minibola e minibarra, outras abordagens de interpretação são requeridas, uma vez que o mesmo procedimento não pode ser aplicado diretamente, conforme estudo de Mahmoodzadeh *et al.* (2015).

A geometria da ponteira também exerce influência direta sobre o mecanismo de ruptura e o campo de poropressões no entorno da sonda (CHUNG; RANDOLPH, 2004; LUNNE *et al.*, 2011). Ensaios de laboratório com dispositivos em escala reduzida representam uma alternativa eficaz para isolar os efeitos da velocidade de cravação, geometria da sonda, densidade do solo e grau de saturação (COLREAVY *et al.*, 2016).

Neste contexto, esta pesquisa apresenta uma investigação experimental com os dispositivos minicone, minibola e minibarra, desenvolvidos para aplicação em ensaios penetrométricos em laboratório. Foram moldados quatro corpos de prova com solo de permeabilidade intermediária: um em condição seca e fofa, um em condição seca e densa, e dois em condição saturada e fofa. As cravações foram realizadas em prensa triaxial, com controle da velocidade de penetração. Os resultados obtidos, em termos de  $q_c$ ,  $q_m$  e  $u_2$ , fornecem subsídios para análise comparativa entre os dispositivos e avaliação preliminar dos efeitos de drenagem parcial. Esta investigação integra um estudo em andamento, no qual estão sendo exploradas diferentes abordagens de moldagem do solo e alternativas de sistema de cravação, com o objetivo de ampliar a compreensão dos fatores que influenciam os mecanismos de penetração em solos de permeabilidade intermediária.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 Materiais

O material estudado neste trabalho foi um silte arenoso obtido através da moagem da areia do campo experimental de Araquari. Sua escolha ocorreu em virtude da necessidade de um material com granulometria intermediária, para melhor efeito da velocidade de cravação do equipamento e semelhança com rejeitos de mineração. A distribuição granulométrica do material é apresentada na Figura 1, com cerca de 50% da amostra com diâmetros de partículas na escala de silte e argila. A massa específica real dos grãos é de 2,575, o índice de vazios máximo de 1,10 e o mínimo de 0,36. Os ensaios de limites de Atterberg indicaram um material não-plástico.

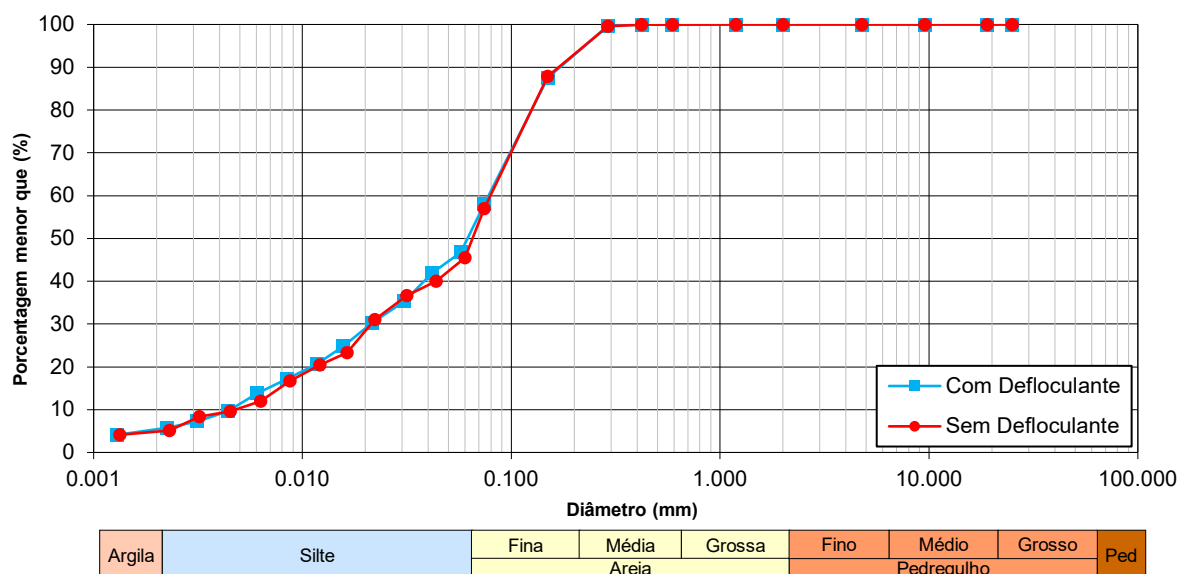


Figura 1. Distribuição granulométrica.

## 2.2 Equipamentos

O minipenetrômetro da presente pesquisa foi desenvolvido para leituras de resistência de ponta e de poropressão na posição  $u_2$ . Para estudar os diferentes tipos de penetrômetros foram desenvolvidas três opções de ponteiros: cônica, bola e barra (Figura 2a). A ponteira cônica com área de  $220 \text{ mm}^2$  e ângulo de ápice de  $60^\circ$ , a barra com área de  $1470 \text{ mm}^2$  (relação entre área da ponta e da haste,  $A_p/A_s$ , de 6,7:1) e bola com  $1590 \text{ mm}^2$  ( $A_p/A_s = 7,2:1$ ). O sistema de aquisição de dados empregado foi baseado na tecnologia Arduino, com leituras em volts, sendo utilizada a extensão PLX-DAQ para o software Excel.

O sistema de cravação utilizado foi uma prensa de equipamento triaxial Tritech 100, sobre a qual é disposta um tanque de acrílico com dimensões  $600 \times 600 \times 500 \text{ mm}$  (Figura 2b). As amostras ensaiadas nesse estudo foram moldadas com 400 mm de altura. No pórtico de reação da prensa é instalada uma placa metálica com furos correspondentes aos 9 (nove) pontos a serem executados os ensaios, numa grade quadrada  $3 \times 3$ , distantes 150 mm entre si.

As velocidades de ensaios possíveis de serem executadas nesse equipamento eram de 9,6 mm/s (velocidade do pórtico), 0,28 mm/s (velocidade máxima do pistão) e inferiores a 0,10 mm/s (velocidades reguláveis da prensa triaxial). O curso do pistão da prensa triaxial é de apenas 100 mm, dessa forma, em todos os ensaios foi realizada uma cravação inicial de 200 mm por meio do pórtico, a 9,6 mm/s, e então trocada a velocidade para a correspondente de cada ensaio pelos 100 mm da região de interesse (entre 200 e 300 mm de profundidade), representando o centro da amostra. Em alguns ensaios, após a cravação inicial de 200 mm foi realizado um ensaio de dissipação, para obtenção do coeficiente de adensamento horizontal do material ( $c_h$ ).

## 2.3 Conjunto de ensaios realizados

No presente estudo foram moldados 4 (quatro) corpos de prova (CP), cujas características podem ser visualizadas na Tabela 1. O primeiro corpo de prova foi moldado na umidade higroscópica por meio de chuva de grãos, atingindo uma densidade relativa de 16,4%, enquanto que no segundo CP foi realizada uma compactação estática, através de um soquete quadrado, atingindo uma densidade relativa de 53,2%. Nos dois últimos corpos de prova (CPs 3 e 4), o material foi depositado na umidade higroscópica por meio de chuva de grãos e então foi saturado de forma ascendente por um sistema de tubulações inserido previamente no interior da amostra. Para garantir a saturação, foi mantida uma lâmina de água na superfície do CP e aguardou-se um período de 48h para a realização dos ensaios. Através de medidas de variação de altura do corpo de prova, calculou-se o novo índice de vazios da amostra, por meio do qual foi possível estimar a saturação resultante, que ficou entre 80 e 90%.

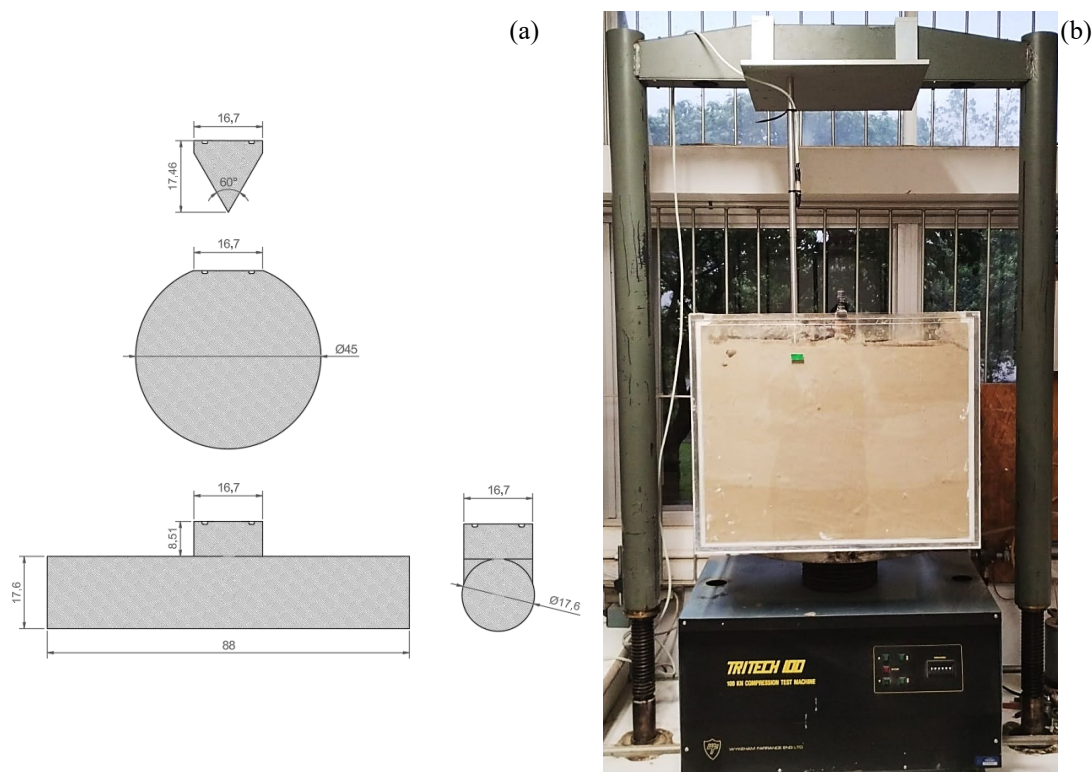


Figura 2. Ponteiras utilizadas (a), sistema de cravação e corpo de prova (b).

Tabela 1. Características dos corpos de prova.

CP	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	w (%)	$e_0$	S (%)	$D_r$ (%)
1	13,0	1,2	0,98	3,3	16,4
2	15,1	1,1	0,71	4,2	53,2
3	14,8	23,2	0,74	80,1	-
4	15,2	23,8	0,70	88,1	-

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nos corpos de prova 1 e 2 foram realizados 9 ensaios de minipenetrômetros, com diferentes ponteiras: barra (2), bola (3) e cone (4). Os resultados de resistência de ponta ( $q_c$  ou  $q_m$ ) pela profundidade são apresentados na Figura 3, enquanto que os valores médios de resistência no centro da camada de interesse (250 mm) estão indicados na Tabela 2. Para o CP 1 (Figura 3a), cuja densidade relativa de 16,4% indica um material no estado fofo, os valores médios de resistência foram superiores para a barra (51,5 kPa), seguidos pelos do cone (44,2 kPa) e da bola (37,0 kPa). Já para o CP 2 (Figura 3b), de  $D_r$  53,2%, a maior resistência média coube aos ensaios de cone (329,8 kPa), seguidos pelos de barra (287,0 kPa) e de bola (225,6 kPa). O comportamento observado se assemelha ao descrito por DeJong *et al.* (2010) para os ensaios na península de Onsoy (Noruega), na qual todas as medidas apresentam a mesma tendência de crescimento com a profundidade, mas a magnitude da resistência obtida através do ensaio de cone fosse superior. A discrepância observada para o ensaio do CP 1, no qual o ensaio de barra apresentou maior resistência, pode ter advindo de heterogeneidades do processo de moldagem, já que as repetições de ensaios apresentam variações de até 30% na sua magnitude.

Nos corpos de prova 3 e 4 foram realizados 8 ensaios de minicone, com diferentes velocidades de cravação: 9,6 mm/s (velocidade normalizada,  $V_h$ , de 170), 0,28 mm/s ( $V_h = 4,9$ ), 0,10 mm/s ( $V_h = 1,8$ ) e 0,03 mm/s ( $V_h = 0,6$ ). Para o CP 4, após a cravação inicial de 200 mm, foram realizados ensaios de dissipação em 6 verticais. Os resultados de resistência de ponta ( $q_c$ ) e poropressão ( $u_2$ ) pela profundidade são apresentados na Figura 4, enquanto que a média dos valores de resistência e poropressão no centro da camada estão indicados na Tabela 3.



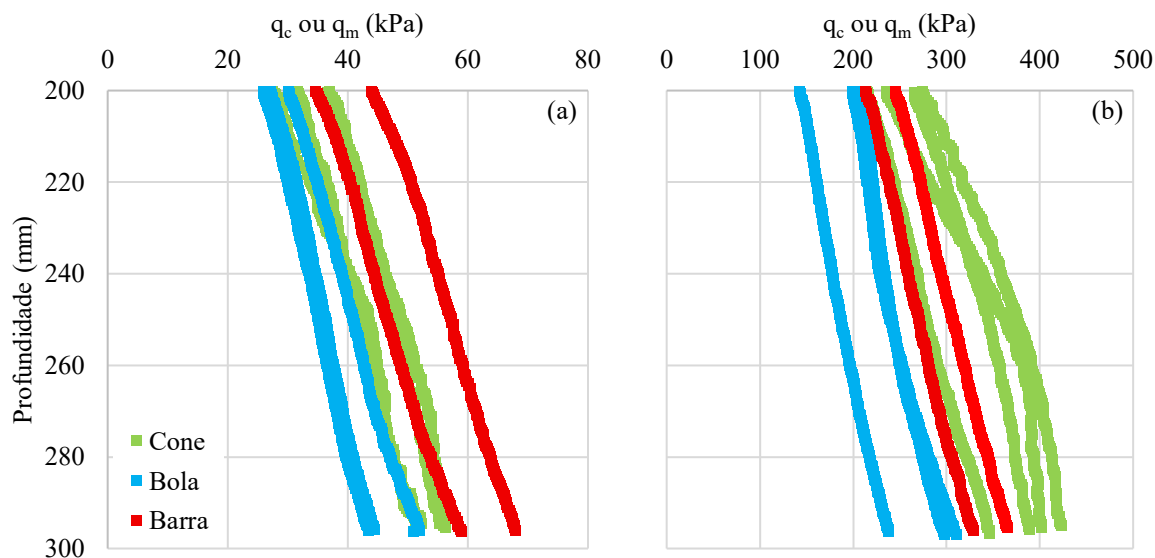


Figura 3. Perfil de resistência de ponta: (a)  $\gamma_d$  13,0 kN/m<sup>2</sup>, (b)  $\gamma_d$  15,1 kN/m<sup>2</sup>.

Tabela 2. Resistência de ponta média no centro da camada.

Ponteira	$\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	$q_c$ ou $q_m$ (kPa)	$q_{avg}$ (kPa)
Barra	13,0	46,5	51,5
		56,5	
	15,1	269,2	287,0
		304,7	
Bola	13,0	35,8	37,0
		34,6	
		40,6	
	15,1	244,7	225,6
		187,1	
		245,1	
Cone	13,0	40,7	44,2
		41,3	
		46,8	
	15,1	279,2	329,8
		340,5	
		335,6	
		363,9	

Nota-se, apesar da dispersão apresentada, a evidência do efeito da velocidade de cravação sobre os resultados de resistência de ponta e poropressão: maiores resistências de ponta foram observadas nas menores velocidades ensaiadas, com menores poropressões. Esse comportamento está diretamente relacionado a condição de drenagem do ensaio: drenado na velocidade lenta e não drenado na rápida. Para melhor visualizar esse efeito foi elaborada a curva de drenagem do material, apresentada na Figura 5. Nesta observa-se a caracterização do comportamento de drenagem parcial para velocidades normalizadas  $0,5 < V_h < 10$ , valores coerentes com os intervalos da literatura ( $0,01 < V_h < 10$ ) (DIENSTMANN *et al.* 2017, SCHNAID *et al.* 2020).

Em relação ao efeito da dissipação anterior a cravação, percebe-se um aumento expressivo na resistência para a velocidade de 4,9 (Figura 5a), indicando a influência do processo de cravação inicial a 9,6 mm/s na amostra para ensaios realizados a velocidades mais rápidas. Na curva de poropressão (Figura 5b), contudo, não é observado um efeito claro da influência da dissipação do excesso de poropressão inicial. As magnitudes

de  $c_h$  obtidas através desses ensaios estão indicadas na Tabela 3, cuja média foi de  $0,94 \text{ mm}^2/\text{s}$ , advindas de  $t_{50}$  de cerca de 180s e  $I_r = 100$ .

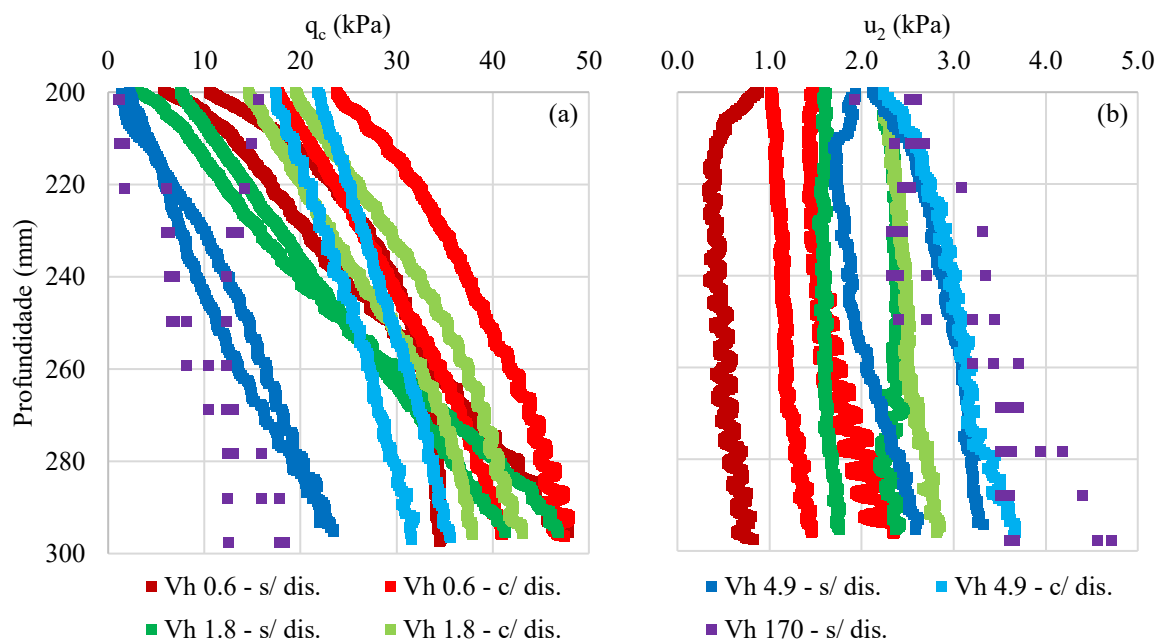


Figura 4. Perfil de: (a) resistência de ponta e (b) poropressão.

Tabela 3. Resistência de ponta e poropressão médias no centro da camada.

$V_h$	$\gamma_d \text{ (kN/m}^3\text{)}$	$q_c \text{ (kPa)}$	$u_2 \text{ (kPa)}$	Dissipação	$c_h \text{ (mm}^2/\text{s)}$
170	14,8	8,0	3,0	N	-
		9,6	3,1		-
	15,2	-	3,4	N	-
		13,2	-		-
4,9	14,8	11,5	2,9	N	-
		13,2	2,0		-
	15,2	29,1	3,0	S	0,95
		25,0	-		-
1,8	14,8	24,3	1,6	N	-
		24,7	2,3		-
	15,2	27,9	2,5	S	-
		33,1	-		-
0,6	14,8	28,6	0,5	N	-
		28,5	-		-
	15,2	30,7	1,2	S	0,87
		38,2	1,7		1,01

#### 4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A investigação experimental conduzida com os dispositivos minicone, minibola e minibarra permitiu avaliar os efeitos da geometria da ponteira e da velocidade de cravação sobre a resistência à penetração em solo de permeabilidade intermediária. Os ensaios realizados em condição seca mostraram que a resposta do solo varia com o tipo de ponteira, sendo a resistência média maior para o minicone, seguida pela minibarra e, por fim, pela minibola, semelhante ao observado na literatura. As diferenças podem ser associadas ao mecanismo de ruptura induzido por cada geometria durante a cravação.

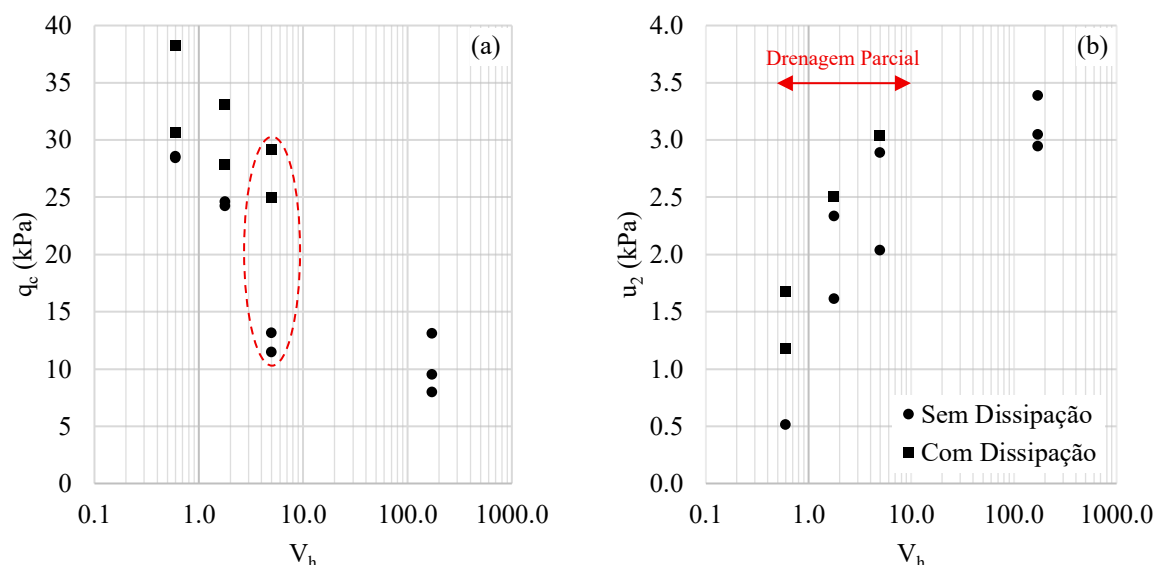


Figura 5. Curva de drenagem: (a) resistência de ponta, (b) poropressão.

Nos ensaios em condição saturada, os resultados evidenciaram que a velocidade de cravação exerce influência significativa tanto na resistência de ponta quanto na poropressão gerada. Ensaio com velocidades elevadas resultaram em comportamento não drenado, com poropressões elevadas e resistências reduzidas, enquanto ensaios mais lentos, associados a menores valores de  $V_h$ , resultaram em menores poropressões e maiores resistências, coerentes com um regime de drenagem parcial ( $0,5 < V_h < 10$ ). A curva de drenagem obtida demonstrou boa coerência com o comportamento esperado para solos de permeabilidade intermediária. O valor médio de  $c_h$  estimado com base na metodologia de Teh e Houlsby (1991) foi de  $0,94 \text{ mm}^2/\text{s}$ , compatível com a literatura para solos siltsos.

Os resultados obtidos mostram-se promissores, reforçando a influência da geometria da ponteira e da velocidade de cravação na resistência mobilizada em solos de permeabilidade intermediária, com potencial aplicação prática. Observou-se que a resposta do solo variou em função da densidade e do regime de drenagem. Contudo, os resultados ainda não são suficientemente conclusivos e requerem investigação adicional para consolidação das evidências. Para isso, foi desenvolvido um sistema de cravação externo capaz de operar em uma faixa mais ampla de velocidades com maior controle operacional. Além disso, a metodologia de moldagem foi aprimorada por meio do preparo por *slurry*, favorecendo maior homogeneidade e repetibilidade dos corpos de prova em condição saturada.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem pelo apoio financeiro concedido pela agência de fomento Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) e a Fundação de Apoio à Pesquisa Científica e Tecnológica do Estado de Santa Catarina (FAPESC). Os autores também agradecem ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) pelo suporte na elaboração deste estudo.

## LISTA DE SÍMBOLOS

$q_c$  = resistência de ponta obtida pelo minicone (kPa)  
 $q_m$  = resistência de ponta obtida com o minibarra ou minibola (kPa)  
 $q_{avg}$  = resistência de ponta média (kPa)  
 $v$  = velocidade de cravação (mm/s)  
 $d$  = diâmetro equivalente da ponta (mm)  
 $V_h$  = velocidade normalizada horizontal  
 $c_h$  = coeficiente de adensamento horizontal ( $\text{mm}^2/\text{s}$ )



$T^*$  = fator de tempo adimensional

$R$  = raio da ponteira (mm)

$I_r$  = índice de rigidez do solo

$t$  = tempo correspondente à porcentagem de dissipação (s)

$\gamma_d$  = peso específico seco do solo ( $\text{kN/m}^3$ )

$w$  = teor de umidade (%)

$e_0$  = índice de vazios inicial

$S$  = grau de saturação (%)

$D_r$  = densidade relativa (%)

$A_p/A_s$  = relação entre a área projetada da ponteira e a área lateral da luva

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Chung, S. F.; Randolph, M. F. (2004) Penetration resistance in soft clay for different shaped penetrometers. In: 2nd international conference on geotechnical and geophysical site characterization, Rotterdam, the Netherlands. *Proceedings...* Millpress. .v. 1, p. 671–677.
- Colreavy, C.; O'Loughlin, C. D.; Randolph, M. F. (2016) Estimating consolidation parameters from field piezoball tests. *Géotechnique*, 66 (4), p. 333–343.
- Dejong, J.; Yafrate, N.; Degroot, D.; Low, H. E.; Randolph, M. (2010) Recommended Practice for Full-Flow Penetrometer Testing and Analysis. *Geotech. Testing Journal*, 33 (2), p. 137–149.
- Dienstmann, G.; Maghous, S.; Schnaid, F. (2017) Theoretical analysis and finite element simulation for non-linear poroelastic behavior of cylinder expansion in infinite media under transient pore-fluid flow conditions. *Int. J. Geomech.*, 17 (7), p. 1–19.
- Lunne, T.; Andersen, K. H.; Low, H. E.; Randolph, M. F.; Sjørsen, M. (2011) Guidelines for offshore in situ testing and interpretation in deepwater soft clays. *Canadian Geotechnical Journal*, 48 (4), p. 543–556.
- Mahmoodzadeh, H.; Wang, D.; Randolph, M. F. (2015) Interpretation of piezoball dissipation testing in clay. *Géotechnique*, 65 (10), p. 831–842.
- Randolph, M. F.; Hope, S (2004) Effect of cone velocity on cone resistance and excess pore pressures. In: International Symposium on Engineering Practice and Performance of Soft Deposits, Osaka. *Proceedings...*
- Schnaid, F. (2009) *In situ testing in geomechanics*, 1. ed., Taylor & Francis, Oxon.
- Schnaid, F.; Dienstmann, G.; Odebrecht, E.; Maghous, S. (2020) A simplified approach to normalisation of piezocone penetration rate effects. *Géotechnique*, 70 (7), p. 630–635.
- Teh, C. I.; Houlsby, G. T. (1991) An Analytical Study of the Cone Penetration Test in Clay. *Géotechnique*, 41 (1), p. 17–34.