

## Execução de Ensaios de Dissipação em Sondagens CPTu: critério de paralisação e definição da poropressão de equilíbrio

Pedro de Carvalho Thá  
Gerente de Engenharia, Fugro, Curitiba, Brasil, [pedro.tha@fugro.com](mailto:pedro.tha@fugro.com)

Jeferson Guimarães  
Gerente de Investigação, Fugro, Curitiba, Brasil, [jeferson.guimaraes@fugro.com](mailto:jeferson.guimaraes@fugro.com)

**RESUMO:** A realização de ensaios de dissipação durante a realização de ensaios CPTu é prática comum para a estimativa do coeficiente de adensamento horizontal do solo e do coeficiente de permeabilidade. O ensaio consiste na paralisação da cravação do cone na profundidade desejada e no acompanhamento da dissipação do excesso de poropressão gerado pela cravação. O ensaio normalmente é conduzido até que se obtenha dissipação de 50% do excesso de poropressão. Todavia, a definição da dissipação de 50% é feita desde que se conheça a poropressão de equilíbrio do local, ou seja, a poropressão antes da cravação do cone. Normalmente a poropressão de equilíbrio é tomada como sendo hidrostática, dada pela coluna de água no local. Todavia, há diversas situações em que a poropressão de equilíbrio não é a hidrostática, como em locais onde ocorre percolação ou o solo está em processo de adensamento. Nesses casos, o ensaio deve ser levado até que a poropressão se estabilize ou até que seja possível obter a poropressão de equilíbrio através de extrapolação da curva. No presente trabalho são abordadas algumas situações em que a poropressão de equilíbrio não é a hidrostática e alguns critérios de paralisação do ensaio e determinação da pressão de equilíbrio.

**PALAVRAS-CHAVE:** Ensaio de dissipação, CPTu, poropressão de equilíbrio.

**ABSTRACT:** It is common to perform dissipation tests on CPTu tests to estimate the coefficient of horizontal consolidation and coefficient of horizontal permeability. The dissipation test consists in stopping the piezocone driving in the desired depth and measurement of dissipation of excess porepressure. The test is normally conducted until 50% of the excess porepressure is dissipated. However, the definition of 50% dissipation implies in knowing the equilibrium porepressure, previously to piezocone driving. Normally the equilibrium porepressure is assumed to be hydrostatic. Nevertheless, there are many situations on which the porepressure is not hydrostatic, as when there is seepage or consolidation. When the porepressure is not hydrostatic, the dissipation test must be carried out until the porepressure readings reaches the equilibrium or until the equilibrium porepressure can be obtained by extrapolation of the data. On the present work, some situation on which the porepressure is not hydrostatic are discussed, as well as some criteria to stop the test and define the equilibrium porepressure.

**KEYWORDS:** Dissipation test, CPTu, equilibrium porepressure.

## 1 Introdução

O ensaio CPTu, também conhecido como ensaio de piezocone, consiste em uma das formas mais utilizadas mundialmente para a caracterização do subsolo. O ensaio consiste na cravação contínua no terreno de um elemento com ponteira cônica, à velocidade constante de 20 mm/s. O cone normalmente utilizado possui área da base de 10 cm<sup>2</sup>, vértice de 60°, área lateral de 150 cm<sup>2</sup> e medida da poropressão na posição  $u_2$ , entre a ponta cônica e a luva.

Durante a realização do ensaio, são medidos continuamente a resistência na ponteira cônica, o atrito na luva e a poropressão. A partir dessas medidas, é possível inferir a estratigrafia do subsolo e estimar alguns parâmetros de resistência e deformabilidade do solo.

Em determinadas profundidades de interesse, é possível realizar ensaios de dissipação. O ensaio de dissipação consiste na paralização da cravação do cone e acompanhamento da dissipação do excesso de poropressão gerado pela cravação do cone. O ensaio normalmente é realizado até que pelo menos 50% do excesso de poropressão tenha sido dissipado. No entanto, o excesso de poropressão,  $\Delta u$ , é definido como a diferença entre a poropressão medida ( $u_2$ ) e a poropressão de equilíbrio ( $u_0$ ). A poropressão  $u_0$  corresponde ao valor da poropressão que existia no ponto ensaiado antes da cravação do cone. Em muitos casos a poropressão de equilíbrio em uma dada profundidade corresponde à coluna de água atuante naquele ponto. Essa condição ocorre quando não há percolação, ou a percolação que ocorre é muito pequena, ou quando o solo não está em processo de adensamento.

Nas condições indicadas acima, a poropressão de equilíbrio pode ser obtida por:

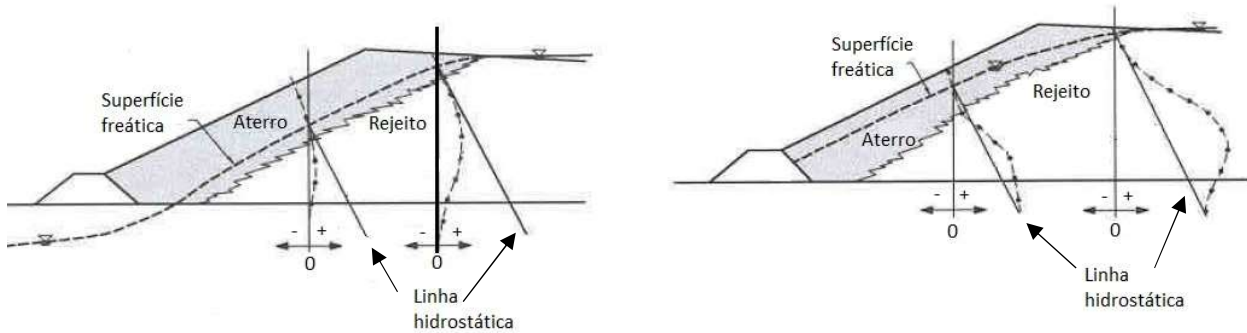
$$u_0 = (z - z_w)\gamma_w \quad (1)$$

Na equação (1),  $z$  é a profundidade do ponto avaliado,  $z_w$  é a profundidade do nível de água no terreno e  $\gamma_w$  é o peso específico da água.

No entanto, há diversas situações em que as condições acima mencionadas não são válidas e não é possível obter a poropressão de equilíbrio através da equação (1). Nos itens a seguir serão indicados alguns casos em que a condição hidrostática não se aplica.

## 2 Condições em que $u_0$ não é hidrostático

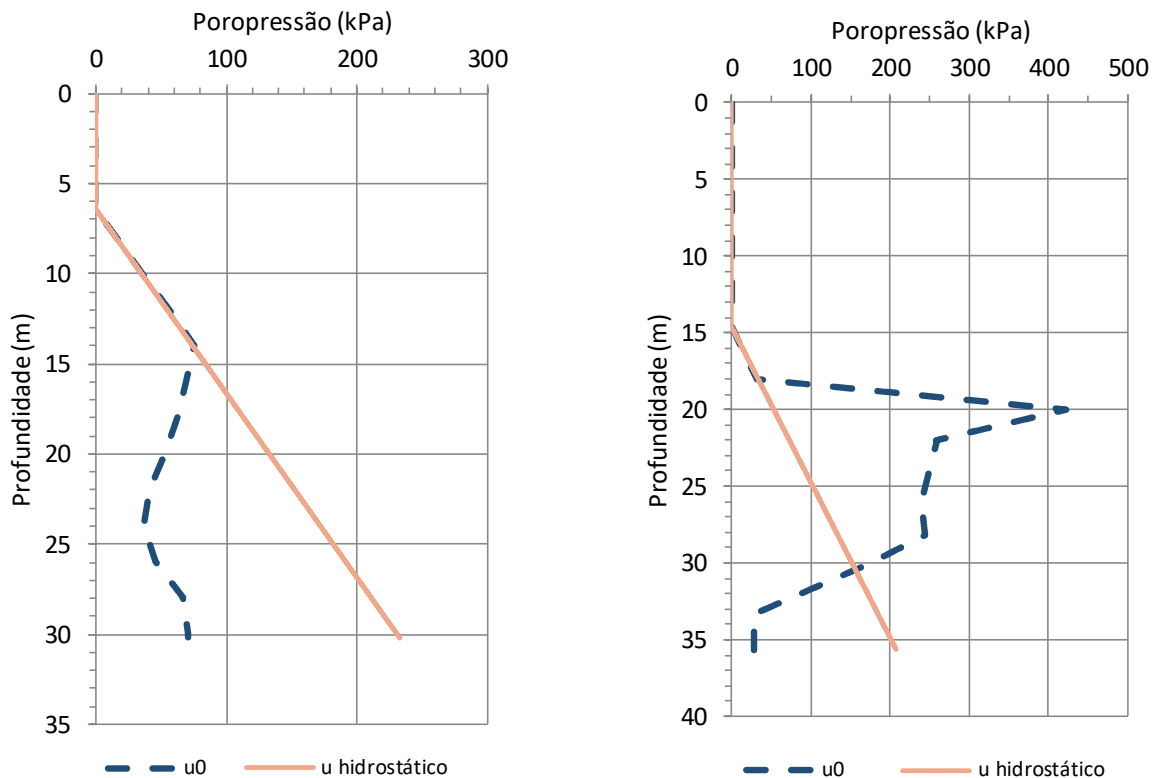
É comum a realização de ensaios CPTu em locais em que ocorre percolação considerável de água ou em que o material ensaiado está em processo de adensamento. A Figura 1 ilustra duas situações de sondagens realizadas em baragens de rejeito, a montante do aterro, em que a poropressão em duas verticais é diferente da poropressão hidrostática. Na situação (a), a poropressão nas duas verticais é menor do que a pressão hidrostática. Isso pode ocorrer quando a permeabilidade da fundação é bem maior do que a permeabilidade do rejeito, em local em que o nível de água natural é baixo. Nessas condições, ocorre acentuada percolação no sentido do rejeito para a fundação, e a poropressão medida no rejeito é menor do que a hidrostática. Na situação (b), as poropressões no rejeito não maiores do que a hidrostática. Isso pode ocorrer em situações em que o nível de água na fundação é elevado, a permeabilidade da fundação é da mesma magnitude que a do rejeito e a taxa de carregamento do rejeito é elevada (material em adensamento). Os dois exemplos ilustrados acima tem por objetivo apenas indicar que a poropressão nos locais de ensaios são função das condições hidro-geológicas do local, assim como também da topografia, e não cobrir todas as possibilidades.



(a) Poropressões menores que a hidrostática      (b) Poropressões maiores que a hidrostática

Figura 1. Poropressões em barragem de rejeito. Fonte: Martin (1999).

Na Figura 2 são mostrados dois exemplos de perfis de poropressão a montante de barragens de rejeito. Os perfis de poropressão de equilíbrio ( $u_0$ ) foram definidos através da realização de ensaios de dissipação a cada 2 m de profundidade, em sondagens CPTu realizadas pela Fugro. Na situação (a), o nível de água na sondagem encontrava-se a 6,4 m de profundidade. Observa-se que até aproximadamente 14 m de profundidade, a poropressão de equilíbrio é praticamente hidrostática. A partir dessa profundidade, até o final da sondagem, a poropressão é menor do que a hidrostática. Na situação (b), o nível de água no local da sondagem encontrava-se a 14,6 m de profundidade. Até cerca de 18 m, a poropressão de equilíbrio era hidrostática. Dessa profundidade, até aproximadamente 30 m, a poropressão medida foi maior do que a hidrostática. A partir de 30 m, a poropressão foi menor do que a hidrostática.



(a) Poropressões menores que a hidrostática

(b) Poropressões maiores que a hidrostática

Figura 2. Poropressões medidas em ensaios de dissipação em sondagens CPTu em barragens de rejeito

Observa-se nos dois casos da Figura 2 que os perfis de poropressão de equilíbrio são bastante diferentes da poropressão hidrostática. A utilização de valores errados de poropressão de equilíbrio pode influenciar significativamente a interpretação das sondagens, principalmente quando se avalia o comportamento do solo a partir dos parâmetros normalizados  $Q_t$  e  $B_q$ . Esses parâmetros são dados pelas expressões (2) e (3) a seguir.

$$Q_t = \frac{q_t - \sigma_v}{\sigma_v - u_0} \quad (2)$$

$$B_q = \frac{u_2 - u_0}{q_t - \sigma_v} \quad (3)$$

Nas expressões (2) e (3),  $q_t$  é a resistência de ponta corrigida,  $\sigma_v$  é a tensão vertical total,  $u_2$  é a poropressão medida e  $u_0$  é a poropressão de equilíbrio.

A Figura 3 mostra o perfil dos parâmetros normalizados  $Q_t$  e  $B_q$  para a sondagem realizada na vertical indicada pela Figura 2 (b). Para cada um dos parâmetros ( $Q_t$  e  $B_q$ ), são apresentadas duas curvas, uma obtida com o perfil de  $u_0$  (medido nos ensaios de dissipação) e outra com o perfil de  $u$  hidrostático. Percebe-se que para o trecho entre 18 e 25 m as diferenças entre os parâmetros obtidos com uma e outra poropressão são significativas.

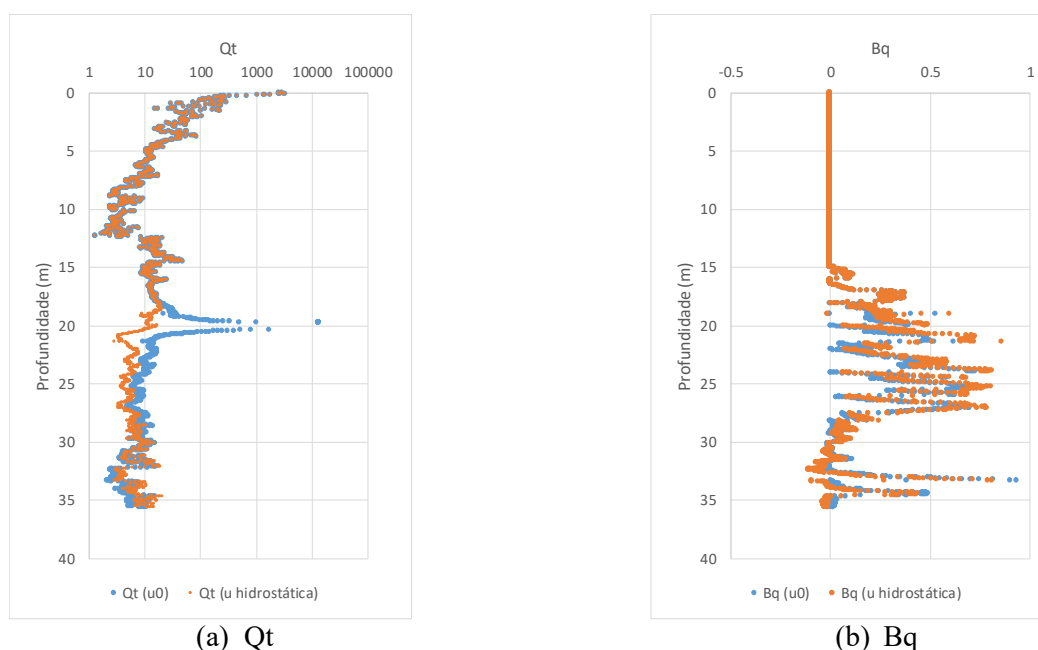


Figura 3. Parâmetros normalizados  $Q_t$  e  $B_q$  para o perfil da Figura 2 (b)

### 3 Critérios para a paralização do ensaio de dissipação

A norma ASTM D 5778 apresenta a indicação geral de que os ensaios de dissipação devem ser executados até que se obtenha a pressão de equilíbrio ou até que se obtenha dissipação de 50% do excesso de poropressão. Todavia, o controle de 50% de dissipação requer o conhecimento prévio da pressão de equilíbrio  $u_0$ .

A Figura 4 mostra a curva de dissipação do ensaio realizado a 22 m de profundidade na vertical da Figura 2 (a). A dissipação foi realizada até a estabilização da poropressão. O valor de  $u_0$  obtido foi de 53,3

kPa. O valor da pressão hidrostática nessa profundidade é de 153 kPa. O valor medido é quase 3 vezes menor do que a pressão hidrostática.

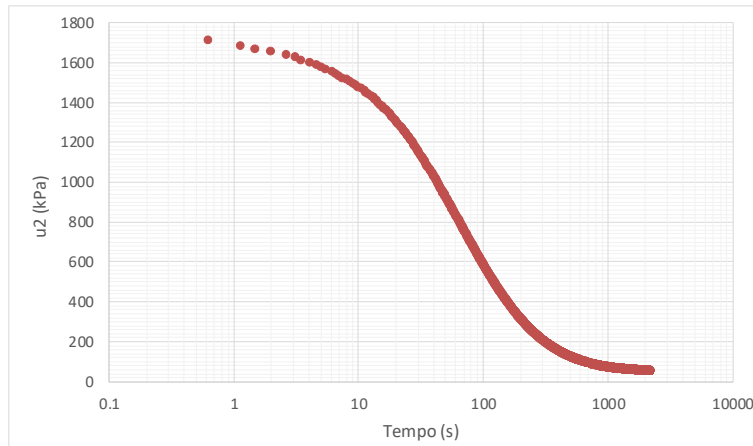


Figura 4. Ensaio de dissipação realizado a 20 m de profundidade no perfil da Figura 2 (a)

No exemplo mostrado na Figura 4, a pressão de equilíbrio foi obtida rapidamente, em cerca de 40 minutos de ensaio. Todavia, quando a permeabilidade do material é baixa, o ensaio de dissipação pode demorar muitas horas e a obtenção da pressão de equilíbrio se tornar difícil do ponto de vista prático.

De acordo com Teh e Houlsby (1991), a curva de dissipação da poropressão normalizada, em função do fator tempo modificado ( $T^*$ ), possui a forma indicada na Figura 5.

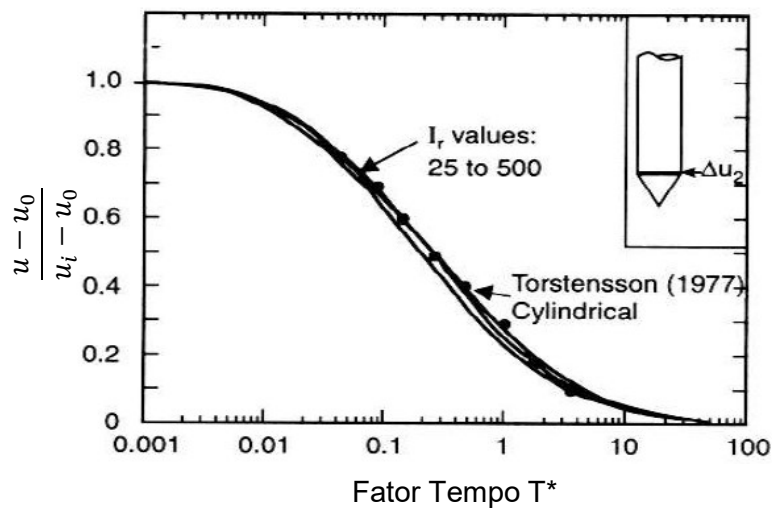


Figura 5. Poropressão normalizada x  $T^*$  (Teh e Houlsby, 1991)

A curva da dissipação da poropressão normalizada em função do fator tempo modificado pode ser aproximada pela Equação (4).

$$U = (0,85 + 10T^*)^{-0,45} - 0,08 \quad (4)$$

$$U = \frac{u_t - u_0}{u_i - u_0} \quad (5)$$

$$T^* = \frac{c_h \cdot t}{r^2 \cdot \sqrt{I_r}} \quad (6)$$

Nas Equações (5) e (6),  $u_t$  é a poropressão medida no tempo  $t$ ,  $u_0$  é a poropressão de equilíbrio,  $u_i$  é a poropressão inicial,  $c_h$  é o coeficiente de adensamento horizontal,  $r$  é o raio do cone e  $I_r$  é o índice de rigidez do material (G/Su).

Uma vez que  $c_h$ ,  $r$  e  $I_r$  são constantes do material e  $u_i$  e  $u_0$  são constantes para o processo de dissipação, é possível expressar as poropressões medidas ao longo do tempo, em um ensaio de dissipação, por uma curva assintótica da forma:

$$u_t = (A + B \cdot t)^C + D \quad (7)$$

Na Equação (7), A, B, C e D são parâmetros de ajuste de curva. O parâmetro D corresponde a assíntota da curva, que representa a poropressão de equilíbrio  $u_0$ . Portanto, conhecendo-se uma porção da curva, a partir de dados de ensaio, é possível obter os parâmetros A, B, C e D, e, dessa forma, estimar a poropressão de equilíbrio. Todavia, o valor do parâmetro D da equação (7) é bastante influenciado no processo de ajuste da curva pelo último valor medido no ensaio. Observa-se na Figura 5 que a mudança de concavidade da curva de dissipação ocorre quando U é menor do que 0,1. Isso significa que a mudança da concavidade da curva ocorre quando se obtém dissipação superior a 90%.

A Figura 6 mostra resultado de dois ensaios de dissipação realizados até a obtenção da poropressão de equilíbrio  $u_0$ . A partir dos dados dos ensaios, procedeu-se ao ajuste de uma equação da forma da equação (7) para dados de dissipação de 70%, 80%, 90% e 95%, utilizando-se o método dos mínimos quadrados. Os resultados dos parâmetros D obtidos para cada uma das equações também são mostrados na Tabela 1, juntamente com o valor da poropressão  $u_0$  medida no ensaio.

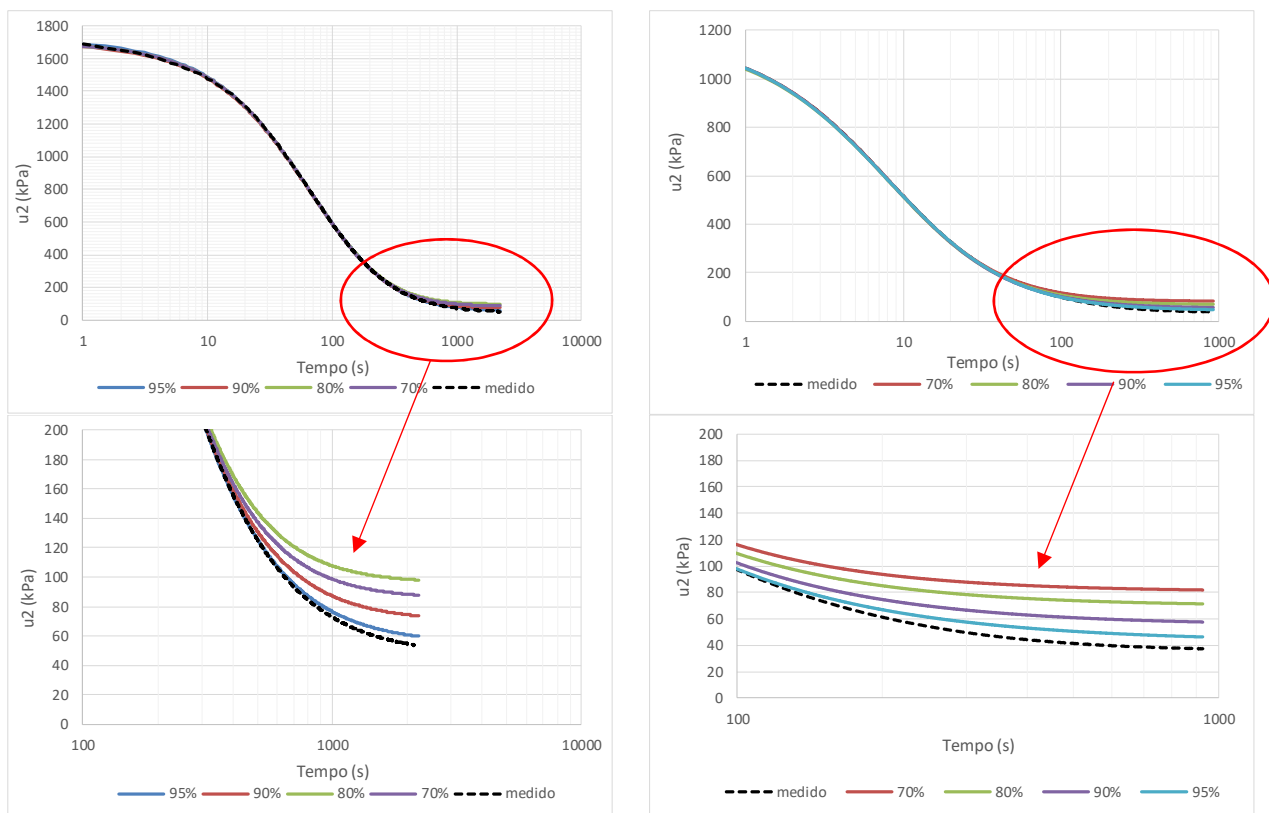


Figura 6. Curvas de dissipação ajustadas a partir de dados de ensaios



Tabela 1. Parâmetro D ajustado em função da dissipação

Ensaio	u <sub>0</sub> (kPa)	D			
		70%	80%	90%	95%
1	53,3	85,6	96,2	70,3	54,8
2	37,1	80,9	70,0	55,4	42,9

É possível observar na Figura 6 e na Tabela 1, que, de maneira geral, para todas as porcentagens de dissipação selecionadas para o ajuste, as curvas se ajustam bem até a inflexão, que é quando o valor do parâmetro D passa a influenciar bastante o comportamento da curva. Para dissipações de 95%, a diferença entre a poropressão de equilíbrio estimada (parâmetro D) e a medida ( $u_0$ ), não é significativa. Para as demais dissipações, a diferença é significativa. Esse comportamento era esperado, em função da forma da curva da Figura 5. Os exemplos mostrados ilustram que, só é possível estimar através de extrapolação de curva o valor de  $u_0$  de maneira confiável se o ensaio for conduzido até dissipação de 95%. Isso significa que, se o objetivo do ensaio de dissipação for determinar a poropressão de equilíbrio, ele não pode ser interrompido antes de 95% de dissipação, mesmo que a duração do ensaio seja muito longa.

Se o objetivo do ensaio de dissipação for calcular o coeficiente de adensamento horizontal ( $c_h$ ), e a poropressão de equilíbrio for conhecida, é possível finalizar o ensaio após dissipação de 50% do excesso de poropressão. Todavia, só é possível conhecer a poropressão de equilíbrio antes do ensaio se ela for hidrostática (o que é pouco provável em muitas situações práticas) ou se houver informações de instrumentação geotécnica ou ensaios prévios.

Dessa forma, o critério de finalização do ensaio de dissipação deve ser:

- a) Obtenção de poropressão estabilizada ou definição clara da inflexão da curva de dissipação versus logaritmo do tempo, o que significa dissipação de cerca de 95% ou mais do excesso de poropressão, (para obtenção de  $u_0$  através de ajuste de curva aos dados do ensaio) caso o objetivo do ensaio seja a definição da poropressão de equilíbrio;
- b) Dissipação mínima de 50% do excesso de poropressão, caso o objetivo do ensaio seja a determinação de  $c_h$  e o valor de  $u_0$  seja conhecido. Se o valor de  $u_0$  não for conhecido a priori, o ensaio tem que ser realizado até as condições do item anterior.

#### 4 Conclusões

O presente trabalho tem por objetivo discutir o critério de paralização do ensaio de dissipação durante a realização de sondagens do tipo CPTu. É muito comum que o ensaio seja encerrado após dissipação de 50% do excesso de poropressão, sendo essa dissipação definida considerando que a poropressão de equilíbrio no local é hidrostática.

Todavia, a poropressão de equilíbrio no local do ensaio depende das condições hidro-geológicas, topográficas e geotécnicas no local, no momento do ensaio e anteriores ao ensaio. A poropressão de equilíbrio no local do ensaio é dependente do regime de percolação e das condições de carregamento e adensamento no local. Só é possível estimar a poropressão de equilíbrio como sendo hidrostática se não houver percolação no local do ensaio, ou a percolação for desprezível. A consideração da poropressão de equilíbrio como sendo hidrostática pode incorrer em erros consideráveis na avaliação do comportamento do solo e na definição do coeficiente de adensamento, dependendo das condições.

Devido ao formato da curva de dissipação da poropressão na sondagem CPTu, que sofre uma inflexão após dissipação superior a 90%, só é possível obter a poropressão de equilíbrio através de ajuste de curva e extrapolação de valores caso haja dados experimentais de dissipações da ordem de 95% ou mais. Caso

contrário, a porção final da curva não fica bem definida e o valor estimado não é representativo das condições locais.

Dessa forma, em condições ideais, o ensaio de dissipação deveria ser sempre realizado até a obtenção da poropressão equilibrada. No entanto, para solos muito compressíveis e de permeabilidade muito baixa, muitas vezes é inviável conduzir o ensaio até o equilíbrio da poropressão. Nessas condições, o resultado do ensaio deve ser analisado de forma bastante criteriosa, levando em consideração outras informações para definição da poropressão de equilíbrio.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASTM International (2012). ASTM D5778 Standard Test Method for Electronic Friction Cone and Piezocone Penetration Testing of Soils. West Conshohocken, USA.
- Martin, T. E. (1999) *Characterization of porepressure conditions in upstream tailing dams*. 6<sup>th</sup> International Conference Tailings and Mine Waste, Colorado State University, Fort Collins, USA.
- Teh, C. I., Houslyby, G. T. (1991) An analytical study of the cone penetration test in clay. *Geotechnique*, V. 41, n. 1, p. 17-34.