

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2024/610

## Comparação de Valores de Coeficiente de Adensamento Obtidos de Ensaio Oedométrico e Ensaio de Piezocone em um Perfil de Solo

Eduardo Cassiano Michelin

Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil, eduardo1michelon@gmail.com

Lúcio Flávio de Souza Villar

Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil, lvillar@etg.ufmg.br

Giovani Costa

Chammas Engenharia, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil, giovani.costa@chammasengenharia.com.br

Ecidinéia Pinto Soares de Mendonça

Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil, ecidineia@etg.ufmg.br

Antônio Ananias de Mendonça

Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil, aananias@etg.ufmg.br

**RESUMO:** O coeficiente de adensamento pode ser calculado utilizando parâmetros encontrados em ensaios do tipo piezocone o CPTu, através da medição e acompanhamento da dissipação do excesso de poropressões causados pela cravação e, também, e mais usualmente, com o ensaio oedométrico no laboratório. No ensaio de laboratório, podem ocorrer dificuldades na preparação das amostras, devido ao amolgamento, sem mencionar a sua longa duração. O presente artigo comparou os resultados de ensaios de campo do tipo piezocone ou CPTu e ensaios convencionais de adensamento unidimensional de laboratório. Foram analisados os resultados obtidos de uma campanha de investigação geotécnica em solo argiloso, que permitiu a comparação dos valores de coeficiente de adensamento obtidos pelo ensaio de dissipação utilizando a metodologia de Houlsby e Teh (1991), do ensaio oedométrico convencional, e os obtidos com a aplicação da metodologia proposta por Pereira (2017). Os três métodos forneceram valores de coeficiente de adensamento vertical de grandeza média da ordem de  $10^{-3}$  cm<sup>2</sup>/s, mas, ao aplicar a metodologia de Pereira (2017), não se observou uma diminuição no valor do coeficiente de adensamento com a profundidade, o que foi observado quando utilizado os métodos mais usuais.

**PALAVRAS-CHAVE:** ensaio CPTu; ensaio oedométrico; coeficiente de adensamento.

**ABSTRACT:** The coefficient of consolidation of soils can be calculated from piezocone or CPTu tests. This requires the measurement of the excess pore pressures caused by driving the conic tip into the soil and monitoring its dissipation. In the laboratory, the determination of the coefficient of consolidation is usually done by the oedometer test. In the laboratory test, difficulties may occur with the samples, because of disturbance, not to mention its long duration. This article compares the results of the coefficient of consolidation interpreted from CPTu tests and conventional oedometer tests. The results were obtained from a geotechnical investigation campaign in a clayey soil. The coefficient of consolidation values from the CPTu tests were obtained from dissipation tests interpreted using the Houlsby and Teh (1991) and Pereira (2017) methodologies. The three methods provided coefficients of vertical consolidation values around  $10^{-3}$  cm<sup>2</sup>/s. However, when applying the Pereira (2017) methodology, a decrease in the coefficient of consolidation value with depth was not observed, as expected with the increase of effective stresses. This is observed when using the usual methods to determine the coefficient of consolidation of clay soils.

**KEYWORDS:** CPTu tests, dissipation of excess porepressure tests, oedometric consolidation test, coefficient of consolidation.

## 1 INTRODUÇÃO

O ensaio de piezocone do tipo CPTu pode ser usado para traçar perfis estratigráficos bem detalhados e estimar parâmetros geotécnicos. Ele possui vantagens em comparação com ensaios de laboratório, que dependem de amostragem (SOUZA, 2018), o que pode ser um problema para o caso de solos sensíveis, devido ao processo de amolgamento. A caracterização de solos sedimentares, especialmente solos intermediários (areias siltsosas, siltes não plásticos, argilas siltsosas e rejeitos de mineração de granulometria fina) se torna, muitas vezes, desafiadora devido à dificuldade de amostragem e interpretação de dados de campo (CAMPOS, 2021).

A determinação do coeficiente de adensamento de materiais com comportamento argiloso é necessária para estimar o comportamento do solo durante e após construções. O ensaio de dissipação de excessos de poropressão devido a cravação do piezocone é um método muito utilizado para esse objetivo. Essa técnica é oferece uma alternativa aos ensaios de laboratório e reduz os custos globais do programa de investigação geotécnica (SCHNAID; ODEBRECHT, 2012). Porém, neste ensaio, o tempo necessário para que ocorra a dissipação dos excessos de poropressão pode durar horas. No laboratório, as formas comuns de determinar o coeficiente de adensamento são através do ensaio oedométrico ou daquele com velocidade de deformação controlada (CRS), sendo este, menos comum na prática brasileira e mais presente em trabalhos acadêmicos (ALMEIDA e MARQUES, 2010).

O presente artigo compara os resultados do coeficiente de adensamento determinado através do ensaio oedométrico com os resultados obtidos da aplicação de dois métodos diferentes aos resultados de ensaios de dissipação de excessos de poropressão medidos em ensaios CPTu. Um dos métodos foi o proposto por Houlsby e Teh (1991), e, o outro, o método proposto por Pereira (2017), que procura reduzir o tempo destes ensaios de dissipação.

## 2 REVISÃO TEÓRICA

### 2.1 Determinação do Coeficiente de Adensamento em Laboratório

Segundo Pinto (2006), os ensaios edométricos representam bem as condições do terreno, tendo a vantagem de possuir um baixo custo quando comparado a outras técnicas. O ensaio convencional é considerado um dos mais demorados, sendo essa sua grande desvantagem (ROSA E MARQUES, 2019) e (DAS, BRAJA M., 2015). Além disso, não se aplica a solos muito moles, já que estes solos experimentam grandes deformações, e não é possível vedar a passagem de sólidos nessa situação (LIMA, 1996). A norma que rege este ensaio é a NBR16853 05/2020 (ABNT, 2020). Das dificuldades relacionadas ao ensaio, destaca-se a necessidade de retirada de amostras indeformadas ao longo do perfil de solo, com um complicador adicional dependendo da sensibilidade do mesmo, e a demora para obtenção da curva completa (todos os estágios de carregamento sugeridos). Além disso, como já mencionado, se aplica somente ao caso de solos com deformações infinitesimais.

O coeficiente de adensamento no ensaio oedométrico convencional é obtido através dos valores de variação do altura (recalque) pelo tempo em cada estágio de carregamento. O método que utiliza a raiz quadrada do tempo em comparação com a variação de altura foi determinado por Taylor (1948), enquanto que o método que utiliza o logaritmo do tempo em comparação com a variação da altura foi determinado por Casagrande (1936). Carvalho (2019) e Rodrigues (2014) verificaram a impossibilidade de calcular o coeficiente de adensamento vertical pelo método de Casagrande (1936) para os estágios iniciais do ensaio, uma vez que a curva que define o fim do adensamento primário não fica bem definida, impossibilitando sua interpretação. Estes métodos são efetivamente adotados em projetos de engenharia civil e são bastante usados na determinação deste coeficiente de adensamento vertical no laboratório (RODRIGUES, 2014).

Netto (2006) expõe alguns métodos alternativos para a obtenção do coeficiente de adensamento. Entre eles, cita-se o de Smith (1967), que é uma variação ao método de Casagrande (1936), onde a determinação do coeficiente de adensamento se dá através da linearização de deformação finita na curva típica de Casagrande (1936), que utiliza o logaritmo do tempo. Wissa et al. (1971) apresentaram duas formulações na obtenção do coeficiente de adensamento, sendo uma para ensaios de adensamento com carregamento contínuo (CRS), uma alternativa ao ensaio convencional na tentativa de diminuir o tempo de ensaio. Sridharam e Pakash (1985)

propuseram o ajuste retangular hiperbólico da curva típica para o cálculo do coeficiente de adensamento. Estes autores apresentam valores médios do coeficiente de adensamento da mesma ordem de grandeza aos obtidos através dos métodos de Taylor (1948) e Casagrande (1936), sendo que Netto (2006) concluiu que Taylor (1948) é um método menos subjetivo e mais preciso.

## 2.2 Determinação do Coeficiente de Adensamento via Ensaio CPTu

Os ensaios de piezocone ou CPTu vem sendo mais frequentemente utilizados em obras de complexidade e risco geotécnico, especialmente nas áreas de mineração. Ele permite a determinação do perfil estratigráfico do solo com boa precisão, permitindo definir vários parâmetros geotécnicos, entre eles, o coeficiente de adensamento de solos argilosos. Como a norma brasileira NBR 12069/91 (ABNT, 1991) foi cancelada em 2015 sem substituição, os procedimentos dos ensaios tem seguido, no Brasil, a norma americana ASTM D 5778/20 (ASTM, 2020).

O ensaio consiste na cravação de uma ponteira cônica com ângulo de 60° a uma velocidade constante de 20mm/s (+/- 5mm/s). A seção transversal do cone é, em geral, de 10cm<sup>2</sup>, podendo atingir 15 cm<sup>2</sup> ou mais para equipamentos mais robustos, de maior capacidade de carga, e 5cm<sup>2</sup> ou menos para condições especiais. (SCHNAID e ODEBRECHT, 2012). Durante a cravação, é comumente medida a resistência de ponta, o atrito lateral e a poropressão, havendo equipamentos especiais que fazem medidas adicionais.

Segundo Mayne (2007 apud PEREIRA, 2017), quando se interrompe a cravação, o excesso de poropressão decai com o tempo, e a leitura do transdutor eventualmente atingirá a poropressão de equilíbrio do ponto ensaiado. Este procedimento pode demorar em função da permeabilidade do solo em questão. As medidas de poropressão podem ser feitas diretamente na ponta cônica, logo após da mesma ( $u_2$ ) ou no fuste, em posição mais afastada da ponta cônica. O valor medido do excesso de poropressão devido a cravação e o tempo de dissipação vão ser influenciados pela localização deste elemento de medição de poropressão. Lunne et al. (1997) afirmam que a posição preferível para a instalação do elemento poroso é na base do cone ( $u_2$ ) pois as leituras seriam menos influenciadas pela compressibilidade do elemento poroso e menos influenciada pelo procedimento de ensaio.

Para determinar o coeficiente de adensamento horizontal através do ensaio de dissipação do excesso de poropressão devido a cravação, é preciso atingir pelo menos 50% de dissipação do excesso de poropressões, o  $t_{50}$ , ou tempo para 50% de dissipação das poropressões (SCHNAID e ODEBRECHT, 2012). A obtenção deste  $t_{50}$  pode demandar demasiado tempo, em alguns casos, dificultando bastante o processo (PEREIRA, 2017). Uma curva típica de dissipação de excessos de poropressão do ensaio CPTu pode ser vista na Figura 1.

Como a poropressão inicial depende do índice de rigidez do solo (quanto maior o índice de rigidez, maior a área onde a poropressão se desenvolve), as curvas de dissipação não são únicas. Para contornar esse problema, Houlsby e Teh (1991) propuseram a utilização de um fator tempo modificado adimensional ( $T^*$ ), dividindo o fator tempo pela raiz do índice de resistência do solo ( $I_R$ ) (PEREIRA, 2017) (ver a equação 1). Os valores de  $T^*$  propostos pelos autores deste método podem ser vistos na Tabela 1. O Índice de Rigidez utilizado pelo método pode ser definido pela relação entre o módulo cisalhante e a resistência ao cisalhamento não drenado ( $S_u$ ), bem como pela equação 2, que depende da inclinação da linha de estado crítico no espaço  $p \times q$  ( $M$ ) (Agaby e Mayne, 2018).

$$C_h = \frac{T^* R^2 \sqrt{I_R}}{t} \quad (1)$$

Onde,  $R$  é o raio do piezocone;  $t$ , o tempo; de dissipação (usualmente adotado como  $t_{50\%}$ );  $I_R$ , o índice de rigidez ( $=G/S_u$ ), obtidos via os resultados do ensaio CPTu, sendo que  $G$  é o módulo cisalhante e  $S_u$ , a resistência ao cisalhamento não drenado, e  $T^*$  o fator tempo, segundo Houlsby e Teh (1991).

$$I_R = \exp \left[ \frac{1,5 + 2,925 \cdot M \cdot a_q}{M \cdot (1 - a_q)} \right] \quad (2)$$

Onde:  $a_q$  – é determinado pela inclinação do gráfico de  $(u_2 - \sigma_{vo}) / (q_t - \sigma_{vo})$ , sendo  $u_2$  a poropressão medida logo atrás da ponta cônica,  $\sigma_{vo}$  a tensão vertical total e a resistência de ponta interpretada dos ensaios CPTu.

Tabela 1. Fator Tempo T\* em função da porcentagem de dissipação da poropressão u (%) e da posição de leitura do transdutor. Fonte: adaptado de HOULSBY e TE (1991).

u (%)	Fator tempo T* em função da posição do transdutor de poropressão	
	Face do cone (u <sub>1</sub> )	Logo atrás da base do cone (u <sub>2</sub> )
20	0,014	0,038
30	0,032	0,078
40	0,063	0,142
50	0,118	0,245
60	0,226	0,439
70	0,463	0,084
80	1,040	1,600

De acordo com Rosa e Marques (2019), os valores do coeficiente de adensamento horizontal (c<sub>h</sub>) obtidos a partir das dissipações de excessos de poropressões correspondem às propriedades de solo na faixa de tensão pré adensada. Durante a penetração do CPTu, o material ao redor do cone é submetido a elevados níveis de deformações, e a partir deste estado comporta-se como um solo em recompressão (SILVA, 2017). A estimativa do c<sub>h</sub> na faixa normalmente adensada, é realizada através da abordagem semi-empírica proposta por Jamiolkowski et al. (1985) (ver a equação 3). Após a realização da conversão do coeficiente horizontal de adensamento na região pré adensada para a região normalmente adensada, esse pode ser transformado em um coeficiente de adensamento vertical aplicando a equação 4.

$$c_{h(NA)} = \frac{c_s}{c_c} \cdot c_{h(SA)} \quad (3)$$

Onde, c<sub>h(SA)</sub> é o coeficiente de adensamento horizontal na faixa sobreadensada, c<sub>h(NA)</sub> é o coeficiente de adensamento horizontal na faixa normalmente adensada, c<sub>s</sub> é o índice de expansão e c<sub>c</sub> o índice de compressão.

$$\frac{c_{h(NA)}}{c_{v(NA)}} = \frac{k_h}{k_v} \quad (4)$$

Onde k<sub>h</sub> é a permeabilidade horizontal, k<sub>v</sub> é a permeabilidade vertical, e a relação, dá o grau de anisotropia de permeabilidade no solo, que pode ser significativa, especialmente para camadas de solos sedimentares.

### 2.2.1 Metodologia proposta por Pereira (2017)

Pereira (2017) determina o valor de t<sub>50</sub> através de um ajuste polinomial da curva de dissipação. Assim, busca solucionar dois problemas enfrentados na interpretação dos ensaios de dissipação de excessos de poropressão durante a execução dos ensaios CPTu. O primeiro é o tempo para que ocorra a dissipação deste excesso de poropressão naturalmente, o que torna o ensaio muito lento e caro. O segundo é a dificuldade na medição da poropressão de equilíbrio, uma vez que medidas confiáveis de poropressão de equilíbrio nem sempre são facilmente obtidas.

A metodologia consiste em executar o ensaio de dissipação até ao menos 40% de dissipação do excesso de poropressão máximo, realizar uma extrapolação do trecho linear da curva poropressão versus logaritmo do tempo até um percentual de 70% e, por fim, ajustar a curva de dissipação por um polinômio de grau 8 para identificar o ponto de inflexão da curva, correspondente a 50% da dissipação (t<sub>50</sub>; u<sub>50</sub>). O seguinte procedimento é adotado para o cálculo de t<sub>50</sub>: 1 – importar os dados do ensaio de dissipação (t) e (u) para uma planilha Excel e escolher os dados utilizados como base para o ajuste; 2 – fazer os ajustes da curva experimental de dissipação de poropressão e determinar os coeficientes da regressão linear através do Excel; 3 – extrapolar a curva experimental (linear no espaço poropressão versus logaritmo do tempo) até o percentual de dissipação limite; 4 – calcular o logaritmo do tempo; 5 – realizar o ajuste polinomial da curva de dissipação no espaço poropressão versus logaritmo do tempo, utilizando a função PROJ.LIN do Excel; 6 – calcular a primeira e a segunda derivada do polinômio; 7 - determinar o ponto de inflexão, identificando o ponto onde a primeira derivada é um mínimo e a segunda derivada é zero. Esse ponto corresponde a (u<sub>50</sub>; t<sub>50</sub>). A Figura 2 exemplifica o processo.

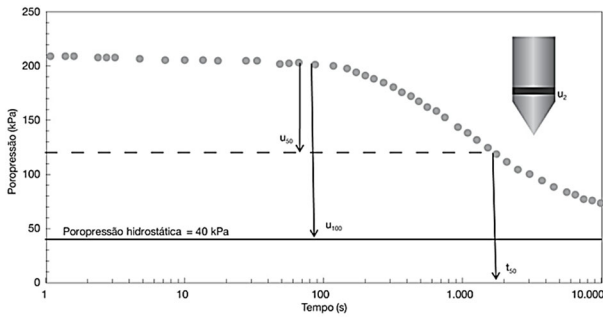


Figura 1. Exemplo de resultado de um ensaio de dissipação destacando valores de poropressão e tempos de dissipação específicos utilizados para cálculo de  $Ch$ . Fonte: SCHNAID e ODEBRECHT (2012)

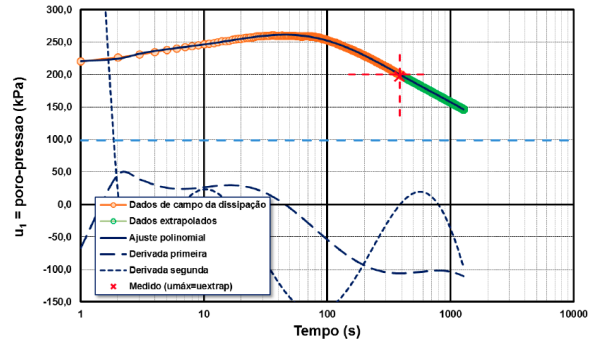


Figura 2. Exemplo de ajuste polinomial utilizando extrapolação de dados para a curva de dissipação. Fonte: PEREIRA (2017).

Segundo o autor, a metodologia proposta apresenta estimativas de  $t_{50}$  com mesmo nível de acurácia que a do método de Housby e Teh (1991), considerada por ele como consagrada na engenharia geotécnica, mas com a vantagem de ser independente da poropressão de equilíbrio e de demandar menos tempo de ensaios. Na maioria dos casos analisados por Pereira (2017), foi encontrada uma diferença relativa máxima de aproximadamente 15% entre a resposta do seu método e o considerado tradicional. As exceções ficaram para os casos onde foram identificados ruídos nos ensaios, ou quando o ajuste polinomial não conseguiu representar adequadamente a curva de ensaio.

### 2.2.2 Estimativa Da Poropressão Inicial ( $u_i$ ) Para Cálculo De $t_{50}$ .

O valor da poropressão inicial ( $u_i$ ), que é o valor medido pelo cone durante a penetração, interfere no valor do coeficiente de adensamento. Segundo Lunne et al. (1997), em solos pré adensados, seria normal haver uma variação no decaimento do excesso de poropressão, pois durante esse processo, ocorreria um elevado gradiente de poropressão indo da ponta do cone para o fuste. Por isso, antes do início da dissipação da poropressão, haveria uma redistribuição local de poropressão, acarretando um aumento inicial dela na base do cone. Isso poderia levar alguns segundos até haver uma estabilização da dissipação, para que, só assim, ocorrer a dissipação. Por isso, seria necessária a correção do valor inicial medido pelo ensaio.

Sully et al. (1999) propuseram dois métodos para a correção dos reflexos dessa redistribuição de poropressão local. No primeiro método, tem-se os dados em escala de raiz quadrada do tempo com uma extrapolação linear da curva de dissipação. O segundo método apresenta os dados com o tempo em escala logarítmica, deslocando o eixo da poropressão ao máximo valor da curva de dissipação, adotando-o como poropressão inicial. Pereira (2017) e Rosa e Marques (2019) indicaram que os resultados de  $t_{50}$  utilizando o método 01 apresentam uma porcentagem de erro menor nos valores do coeficiente de adensamento calculados se comparada com o método de valor máximo de dissipação. Este método é exemplificado pela Figura 3.

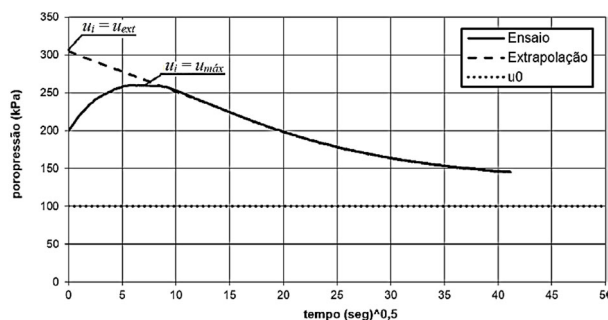


Figura 3. Exemplo de ajuste para correção do valor da poropressão inicial a ser considerado nos ensaios de dissipação. Fonte: PEREIRA (2017).

Berbert (2015) cita que fatores como amolgamento das amostras, dimensão do corpo de prova, razão do incremento de carga, nível de tensão e temperatura ambiente, podem influenciar nos valores dos coeficiente de adensamento obtido em laboratório, explicitando que, no campo, dificilmente as condições de contorno serão as mesmas das do laboratório, existindo velocidades e incrementos de cargas diferentes. Serafim (2017), calculando coeficiente de adensamento vertical através do ensaio oedométrico e do CPTu, encontrou valores, a partir do ensaio de piezocone cerca de dez vezes maior do encontrado no laboratório. No entanto, ele considerou esta diferença aceitável pois, para ele, os valores do coeficiente de adensamento obtidos em laboratório apresentariam valores inferiores aos de campo. Borges et al (2019) constaram que os valores de coeficiente de adensamento obtidos no ensaio oedométrico estavam de acordo com os fornecidos pelo ensaio CPTu. Lima (2020) fez a comparação do coeficiente de adensamento obtido pelo ensaio oedométrico e ensaio CPTu, usando o método de Houlsby e Teh (1991) e concluiu que obteve valores da mesma ordem de grandeza em 80% das amostras, e que os valores seriam mais compatíveis para amostras mais profundas.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

As sondagens e coletas de amostras foram realizadas em um solo da região da cidade de Belo Horizonte. Os ensaios de caracterização geotécnica em laboratório foram realizados dentro das normas da ABNT vigentes. Também foram realizados três ensaios de permeabilidade com carga variável, de acordo com a NBR 14545 (ABNT, 2021).

Os ensaios oedométricos foram feitos de acordo com a norma NBR16853 05/2020 (ABNT, 2020). A campanha de ensaios contou com apenas um ensaio oedométrico, realizado com amostras indeformadas, coletadas na profundidade 1,50 a 1,90 metros, a aproximadamente 10 metros dos furos dos ensaios do tipo CPTu com ensaios de dissipação de poropressão. Os parâmetros necessários para o cálculo do coeficiente de adensamento vertical para cada carregamento foram definidos de acordo com o Método de Taylor (1948).

A campanha de sondagem consistiu na realização de oito sondagens do tipo CPTu, onde apenas duas contaram com ensaios de dissipação, de CPTu-02 e CPTu-02-A. Eles são furos gêmeos, já que na primeira cravação a equipe de sondagem verificou alguma dificuldade e deslocou alguns centímetros para fazer outra perfuração. Foram feitos ensaios de dissipação nas cotas 2,00 e 4,00 metros (CPTu-02) e 10,00, 12,00 e 14,00 metros (CPTu-02-A). Tais furos foram realizados, integralmente, segundo a norma americana ASTM D 5778/20 (ASTM, 2020) e mediram a poropressão logo atrás da ponta cônica. O perfil foi classificado pelo método proposto por Robertson (2016), através do ábaco SBTn. Os ensaios de dissipação foram interpretados pelos métodos de Houlsby e Teh (1991) e Pereira (2017). A poropressão inicial foi corrigida de acordo com o método 1, proposto por Sully et al. (1999) e exemplificado na Figura 3.

Com relação ao valor do índice de rigidez necessário no cálculo do coeficiente de adensamento via os resultados do ensaio CPTu, Bihs et al. (2021) mostraram que estes valores variam entre 100 e 300 em um solo de silteoso. Já, de acordo com Houlsby e Teh (1991), as curvas de dissipação obtidas pelo seu método são satisfatórias entre valores de índice de rigidez ( $I_r$ ) de 25 a 500. Portanto, foi considerado um índice de rigidez igual a 300 para fins de cálculo, por se tratar de um valor satisfatório considerando as observações de Houlsby e Teh (1991) e Bihs et al. (2021). As correções necessárias para definição do coeficiente de adensamento vertical foram feitas de acordo com o descrito no item 2.2.

### 4 RESULTADOS

Os ensaios de granulometria indicaram o solo como sendo uma areia silte argilosa de cor marrom escuro com pouco pedregulho, com porcentagens de areia de 40,73% e silte + argila de 40,92%. O ensaio de permeabilidade à carga variável resultou em valor na casa de  $10^{-6}$  cm/s, o que, segundo Das (2015) e Pinto (2002), se enquadraria na classificação de solo argiloso. Porém, não foi possível a determinação dos Limites de Atterberg (nem do LL e nem do LP).

O ensaio de adensamento forneceu uma tensão de pré-adensamento de 149 kPa pelo Método de Pacheco Silva. O coeficiente de adensamento vertical calculado foi verificado de diminuir com o aumento da pressão a cada etapa de carregamento, tendo valores da ordem de grandezas entre  $10^{-2}$  e  $10^{-4}$  cm<sup>2</sup>/s. Os resultados dos coeficientes de adensamento vertical pela tensão efetiva aplicada estão demonstrados na Figura 4. A variação do coeficiente de permeabilidade vertical obtido do ensaio oedométrico é apresentada na Figura 5.

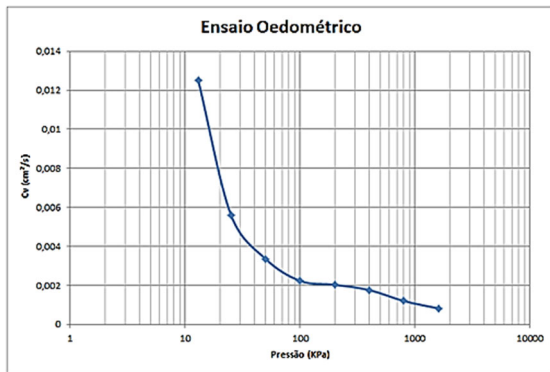


Figura 4. Valores de coeficientes de adensamento vertical obtidos do ensaio oedométrico.

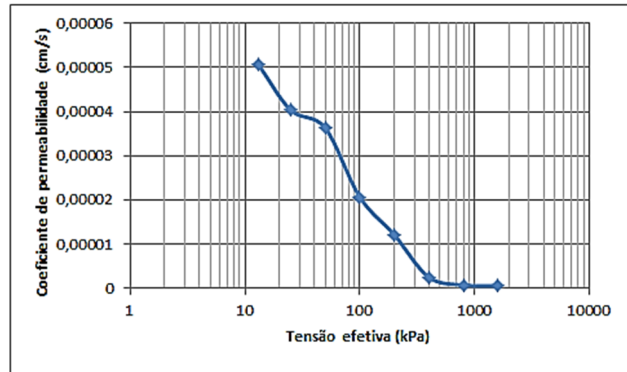


Figura 5. Valores de coeficientes de permeabilidade vertical obtidos do ensaio oedométrico.

Os ensaios CPTu nos quais foram feitos os ensaios de dissipação tiveram seus resultados interpretados pelo método de Robertson (2016) (ábaco SBT) para fazer a classificação do solo. Percebe-se que ambos os furos mostraram, em seu perfil, a predominância de solo classificado como argiloso. O primeiro furo, que atingiu menores profundidades, apresentou a predominância do solo classificado como dilatante. Já o segundo furo, que atingiu profundidades maiores, apresentou predominância de solo classificado como contrátil. O conhecimento desse comportamento do solo é importante, uma vez que o solo contrátil e o dilatante tendem a gerar excessos de poropressão diferentes. Foi verificada uma dispersão dos resultados no ábaco, indicando uma transição de comportamento entre solos argilosos para solos arenosos, principalmente nas cotas próximas da superfície. Mas houve a predominância do solo *clay-like*, ou seja, argiloso, o que é coerente com os resultados dos ensaios realizados em laboratório.

Os resultados dos ensaios CPTu indicaram uma estratigrafia variada, com lentes de solo arenoso ao longo da profundidade do perfil, especialmente entre 1 a 2,5 metros de profundidade. Foram realizados ensaios de dissipação os 2, 4, 10 12 e 14 metros, mas apenas três foram utilizados, uma vez que na profundidade 4,00m e 14,00m, o gráfico de dissipação de poropressão não apresentou um padrão com uma curva bem definida e possível de ser interpretada adequadamente pelos métodos utilizados. Os outros ensaios de dissipação apresentaram a curva de dissipação de acordo com o gráfico de dissipação de poropressão pela raiz do tempo, segundo a Figura 3.

Os valores dos coeficientes de adensamento horizontal e vertical, bem como o  $t_{50}$  obtidos pelo método de Housby e Teh (1991) e Pereira (2017) estão apresentados na Tabela 2. Para o primeiro método, percebe-se que o valor do coeficiente de adensamento diminuiu aproximadamente 60% com o aumento da profundidade (de 2 a 12 metros), assim como o ensaio oedométrico. No caso do método proposto por Pereira (2017), os resultados do ensaio feito a 10 metros de profundidade não atenderam as exigências para a aplicação do método. Porém, por este método, pode ser percebido que os valores não reduziram com a profundidade, como no caso do ensaio oedométrico e do método de Housby e Teh (1991).

### 3 CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou a comparação dos resultados dos cálculos de coeficientes de adensamento entre os ensaios oedométrico (laboratório) e CPTu interpretado pelos métodos de Housby e Teh (1991) e Pereira (2017), no perfil de um solo classificado como areia silto-argilosa pela curva granulométrica mas como solo com comportamento argilos pela classificação SBT, proposta por Robertson (2016) a partir dos ensaios do tipo CPTu. O perfil estratigráfico fornecido pelos ensaios CPTu também indicaram presenças de lentes de solo arenoso, mostrando heterogeneidade do perfil. Esta mistura pode ter influenciado nos ensaios de dissipação de poropressão, já que a sua geração é influenciada pela presença de solo arenoso. Em termos de valores, os resultados fornecidos pelo ensaio oedométrico foram mais próximos ao do método proposto por Housby e Teh (1991). No caso do método proposto por Pereira (2017), além de ter apresentado valores mais diferentes dos fornecidos pelo ensaio oedométrico, ele não apresentou uma diminuição no valor dos coeficientes de

adensamento com a profundidade, característica apresentada tanto pelo ensaio oedométrico e o método de Houlsby e Teh (1991). Porém, devido ao número escasso de resultados, nenhuma foi possível ter nenhuma conclusão definitiva sobre este tipo de comportamento.

Tabela 2. Valores de coeficientes de adensamento vertical e horizontal obtidos nesta pesquisa.

	Houlsby e Teh (1991)			Pereira (2017)		
	CPTu-02	CPTu-02-A		CPTu-02	CPTu-02-A	
	2m	10m	12m	2m	10m	12m
$t_{50}$	407	956	1057	751	-	573
$c_h$ (cm <sup>2</sup> /seg)	0,0350	0,0149	0,0135	0,0184	-	0,0236
$c_v$ (cm <sup>2</sup> /seg)	0,0052	0,022	0,002	0,00273	-	0,0035
$c_v$ (cm <sup>2</sup> /seg) (oedométrico)	0,004	0,0020	0,0020	0,004	0,0020	0,0020

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à empresa Chammas Engenharia Ltda, de Belo Horizonte, por ter disponibilizado os dados apresentados neste trabalho.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEIDA, M. S. S. e MARQUES, M. E. S. Aterros sobre solos moles: projeto e desempenho. São Paulo, Oficina de Textos, 254p. 2010.
- ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. D5778-20: Standard Test Method for Electronic Friction Cone and Piezocone Penetration Testing of Soils. West Conshohocken, PA: 2020.
- CHAI, J.; Sheng, D.; Carter, J. P.; Zhu, H. (2012) Coefficient of consolidation from nonstandard piezocone dissipation curves. *Computers and Geotechnics*. v.41, p. 13-22. 2012.
- JAMIOLKOWSKI, M.; LADD, C.C.; GERMAINE, J. T.; LANCELLOTTA, R. New developments in field and laboratory testing of soils. In: ICSMFE, 11th, 1985, San Francisco. Proceedings. San Francisco, 1985.
- LUNNE, T.; Robertson, P. K.; Powell, J. J. M. Cone Penetration Testing in Geotechnical Practice. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol. 46, No. 6, 2009
- MAYNE, P. W. National Cooperative Highway Research Program synthesis 368: Cone Penetration Testing. Washington D.C.: Transportation Research Board, 2007.
- NETTO, Ygor Almeida. Estudo Experimental das Características de Compressibilidade e Adensamento de uma Argila Mole. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.
- PEREIRA, Francisco Silva. Nova Metodologia para Interpretação de Ensaio de Dissipação do Piezocone. 2017. Dissertação – Engenharia Civil, UFRGs, Porto Alegre, p.158. 2017.
- ROBERTSON, P.K. (2016). Cone penetration test (CPT) - based soil behaviour type (SBT) classification system — an update, *Canadian Geotechnical Journal*, v. 53, n.12. p. 1910-1927
- ROSA, Artur Cortês e Marques, E. Estimativa de coeficiente de adensamento a partir de ensaios de dissipação de piezocone. XII Simpósio de Práticas de Engenharia Geotécnica da Região Sul, ABMS. Joinville, v. 1, p.1 a 9, Outubro de 2019.
- SCHNAID, F.; ODEBRECHT, E. Ensaio de Campo e suas Aplicações à Engenharia de Fundações. 2a ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2012.
- SMITH, R. E. A Study of Consolidation of Cohesive Soils Under Constant Rates of Strain. PHD Dissertion, Department of Engineering, North California State University, Raleigh, 1967.
- SULLY, J. P.; ROBERTSON, P. K.; CAMPANELLA, R. G.; WOELLER, D. J. An approach to evaluation of field CPTU dissipation data in overconsolidated fine-grained soils. *Canadian Geotechnical Journal*, v. 36, n. 2, p. 269-381, 1999.
- TAYLOR, Donald W. Fundamentals of soil mechanics. LWW, (Vol. 66, No. 2, p. 161) 1948.
- TEH, C. I.; HOULSBY, G. T. An analytical study of the cone penetration test in clay. *Geotechnique*, v. 41, n. 1, p. 17-34, 1991.