

AVALIAÇÃO DO COEFICIENTE DE ADENSAMENTO DE SOLOS ARTIFICIAIS

João Vítor de Azambuja Carvalho

Acadêmico do curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande - FURG
azambuja.jvc@gmail.com

Cezar Augusto Burkert Bastos

Professor da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande - FURG
cezarbastos@furg.br

Antonio Marcos de Lima Alves

Professor da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande - FURG
antonioalves@furg.br

Resumo. *Uma das análises mais importantes no projeto de fundações e de obras de terra é o cálculo dos recalques. Nesses projetos, é crucial a determinação da intensidade desses recalques e do tempo em que eles se darão sob determinado carregamento aplicado. Um dos parâmetros geotécnicos que permite a estimação da velocidade dos recalques do solo carregado é o coeficiente de adensamento vertical (C_v). Esse, normalmente, é determinado através da aplicação de dois métodos clássicos, método da raiz do tempo, de Taylor, e método do logaritmo do tempo, de Casagrande, na curva obtida em cada estágio de carga do ensaio de adensamento. Este trabalho tem por objetivo analisar o coeficiente de adensamento de solos artificiais produzidos a partir de misturas de caulim e bentonita sob diferentes tensões de pré-adensamento e apresentar o desenvolvimento de um script na linguagem Python para execução do método da raiz do tempo de Taylor. Os resultados obtidos indicaram que o teor de bentonita do traço influencia significativamente nos valores obtidos para o coeficiente de adensamento.*

Palavras-chave: *Coeficiente de adensamento vertical, Solos artificiais. Ensaio de laboratório.*

1. INTRODUÇÃO

O cálculo de recalques permeia os mais diversos tipos de projetos de engenharia. É de crucial importância para o projeto de fundações, de aterros, de barragens, entre outras obras, o conhecimento da intensidade dos deslocamentos verticais e do tempo necessário para que eles ocorram. Um dos fatores que permite estimar o tempo necessário para que o recalque ocorra sob a ação de uma determinada carga aplicada é o Coeficiente de Adensamento Vertical (C_v) do solo.

O coeficiente C_v é obtido através da realização de ensaio de adensamento em laboratório com amostras indeformadas, ou ainda obtido através de dados de monitoramento de recalques obtidos em campo depois de executada a obra. A determinação do C_v com os dados obtidos através do ensaio de laboratório passa pela utilização, principalmente, de dois métodos clássicos: o método da raiz do tempo, de Taylor, e o método do logaritmo do tempo, de Casagrande.

O Grupo de Geotecnia FURG já tem um histórico de trabalho em estudos envolvendo solos artificiais. Alves et al. (2010) apresentam resultados de ensaios de palheta de laboratório realizados em misturas de caulim e bentonita. Pinto (2010) e Pinto et al. (2018) avaliam a aplicação do equipamento de

cone de queda livre de laboratório na caracterização da plasticidade e da resistência não drenada de misturas de caulim, bentonita, areia e água. Rosa et al. (2013) e Bastos et al. (2014), por sua vez, apresentam resultados de cone de queda frente a resultados de palheta de laboratório de amostras adensadas de diferentes traços de solo artificial, onde foi comprovado o modelo exponencial da relação penetração do cone \times S_u de Hansbo (1957). Além desses, Eichelberger et al. (2018) apresentam a avaliação da resistência não drenada em misturas de caulim, bentonita e água incluindo ensaios triaxiais.

Este trabalho tem por objetivo analisar os dados de diversos ensaios de adensamento, a fim de investigar a influência de dois fatores no coeficiente de adensamento: a tensão de pré-adensamento imposta ao solo artificial e a porcentagem de bentonita na sua composição. Foram realizadas análises de variância com os dados obtidos possuídos e pôde-se concluir que apenas a porcentagem de bentonita utilizada nos solos artificiais influencia o parâmetro analisado.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais utilizados

Na moldagem dos solos artificiais, foram utilizados o caulim rosa e a bentonita. Essa última é de origem comercial, da marca Schneider e utilizada por empresas de sondagem da região. O caulim rosa, por sua vez, é produzido pela Indústria de Calcários Caçapava (Inducal).

2.2 Caracterização dos materiais

Para cada um dos solos artificiais e com os materiais constituintes foram realizados os ensaios clássicos de caracterização geotécnica. Foram eles: análise granulométrica, limites de Atterberg e peso específico real dos grãos.

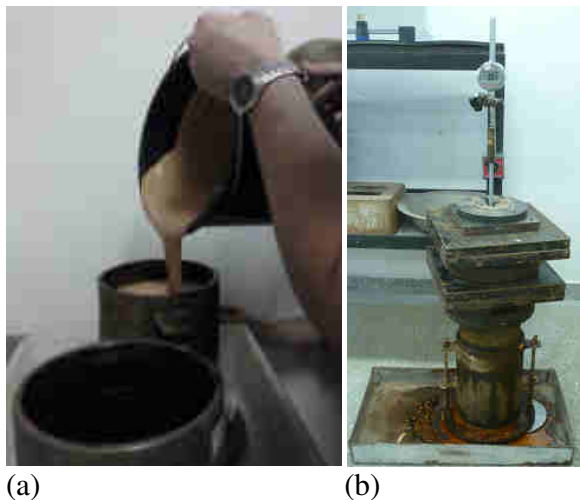
2.3 Preparação e adensamento dos solos

Os solos artificiais foram produzidos a partir de lamas de caulim e água destilada (solo T0-0) e caulim, bentonita e água destilada (solos T5-0 e T30-0), elaboradas com teores de umidade próximos aos respectivos limites de liquidez e homogêneas em misturadora elétrica (Fig. 1). No caso dos solos T5-0 e T30-0, as misturas do caulim e bentonita foram realizadas na condição seca, previamente a adição de água destilada na produção da lama.



Figura 1. Misturadora utilizada na produção dos solos artificiais.

Para cada um dos solos, depois de homogênea, a lama foi disposta em três moldes metálicos e adensada com carregamentos por pesos metálicos gradativamente sobrepostos (Fig. 2). Cada molde destina-se a uma das tensões de adensamento selecionadas: 12,5, 25 e 50 kPa. Os recalques da lama em cada molde foram monitorados no tempo, permitindo o acompanhamento do processo de adensamento.



(a) (b)
Figura 2. (a) Disposição e (b) adensamento da lama.

Os solos adensados em cada molde foram identificados com o valor nominal da tensão de adensamento aplicada. Como exemplo, para o solo T(0-0) foram identificados como T(0-0)-12,5kPa, T(0-0)-25kPa, T(0-0)-50kPa.

2.4 Ensaios de adensamento

A partir dos anéis metálicos moldados do solo adensado em cada um dos moldes, foram realizados ensaios de adensamento em célula oedométrica e prensa convencional (Fig. 3). Os carregamentos incrementais foram conduzidos de 6,25 a 400 kPa, a exceção do solo T(0-0) conduzido até 800 kPa, com estágios de no mínimo 24 horas (solo T(0-0)) e 48 horas (solos T(5-0) e T(30-0)) de duração.

2.5 Coeficientes de Adensamento

Os coeficientes de adensamento analisados no trabalho foram todos calculados a partir do método da raiz do tempo, de Taylor.

A partir dos dados de um estágio do ensaio de adensamento os passos para o método são (DAS, 2008):



Figura 4. Ensaio de adensamento oedométrico.

- Construir o gráfico da raiz quadrada do tempo de adensamento versus altura do corpo-de-prova para o estágio em questão;
- Desenhar uma tangente na porção inicial da curva;
- Desenhar uma linha 15% mais inclinada que essa tangente;
- A abscissa do ponto de interseção entre essa linha e a curva de adensamento é o tempo onde ocorreu 90% do adensamento primário (t_{90}).
- O valor de C_v é dado pela Eq. (1).

$$C_v = \frac{0.848H^2}{t_{90}} \quad (1)$$

Para calcular os coeficientes em cada um dos estágios dos três solos nas três situações de pré-adensamento já mostradas, foram desenvolvidas duas funções na linguagem *Python*. Uma para determinação do ponto onde deverá ser ajustada uma reta tangente e outra para aplicação do método.

A Figura 4 apresenta um fluxograma que ilustra o funcionamento do algoritmo desenvolvido para cálculo do C_v .

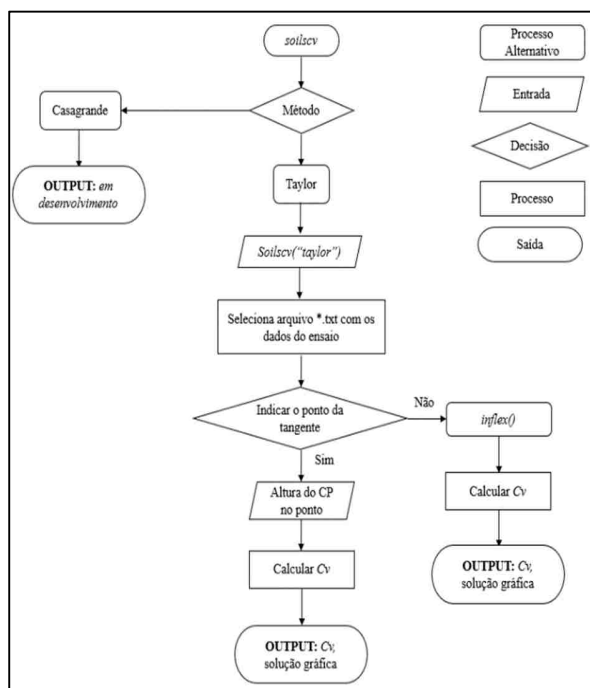


Figura 4. Fluxograma do algoritmo desenvolvido para cálculo do C_v

A função que determina o ponto final do trecho inicial ao qual é ajustada uma reta é baseada no cálculo de derivadas numéricas nos pontos da curva do ensaio. Ao perceber uma mudança de comportamento da curva através do valor da derivada, a função retorna o ponto onde essa mudança ocorre.

O cálculo do C_v pelo método da raiz do tempo por sua vez se dá pelo ajuste de uma reta de regressão ao conjunto de pontos correspondente ao ponto inicial até o ponto calculado ou indicado pelo usuário (reta AB). Após, através dos coeficientes de regressão obtidos, é traçada uma curva com abcissas 1.15 vezes maiores que a original (reta AC). A partir de um processo iterativo, onde o ponto de partida são os pontos a seguir do indicado para parada, são determinados os dois pontos pelos quais a nova reta cruza a curva de adensamento (reta DE). É realizado novo ajuste de regressão entre esses dois pontos e, por fim, são igualados os coeficientes de regressão da reta AC e da reta DE, o que indica a altura h_{90} , a partir da qual são

extraídos os outros parâmetros necessários para o cálculo do C_v . A Figura 5 apresenta uma demonstração do desenvolvimento do método pelo *script*.

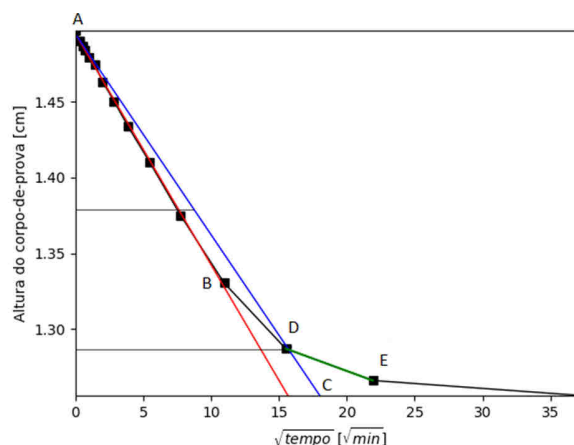


Figura 5. Demonstração do desenvolvimento do método

2.6 Análise de Variâncias (ANOVA)

A fim de conhecer a influência de cada um dos fatores sobre a variável resposta considerada, o coeficiente de adensamento vertical, foram realizadas análises de variância, também conhecidas como ANOVA. Esse tipo de análise normalmente é utilizado quando existem um certo número de níveis para um ou mais fatores. Quando apenas um fator é utilizado o teste é conhecido como ANOVA fator único e quando são considerados dois ou mais fatores que influenciam em uma variável resposta o teste é chamado ANOVA fator duplo. A resposta para cada um dos fatores, ou tratamento, é uma variável aleatória e o objetivo do teste é a verificação se alguma das médias da resposta para cada tratamento difere das demais, ou seja, se alguns dos fatores explica maior parte da variância do modelo (MONTGOMERY e RUNGER, 2009).

Neste trabalho, foi realizada uma análise de variância de duplo fator e duas de fator único. Foram considerados, na análise de duplo fator, dois tratamentos, a tensão de pré-

adensamento e a porcentagem de bentonita, cada um com três diferentes níveis nominais: 12,5 kPa, 25 kPa e 50 kPa, para a tensão de pré-adensamento; e 0%, 5 % e 30%, para a porcentagem de bentonita do solo. Nesta análise, o objetivo foi avaliar a influência da interação entre os dois fatores analisados.

Nas outras análises realizadas, foi utilizado um único tratamento por vez, a tensão de adensamento, em três níveis (12,5 kPa; 25 kPa e 50 kPa) e a porcentagem de bentonita, também em três níveis (0%, 5% e 30%). Estas análises, por sua vez, têm o objetivo de avaliar a influência da tensão de adensamento e da porcentagem de bentonita, separadamente, nos valores encontrados para o coeficiente de adensamento.

Todas as análises apresentadas no trabalho foram realizadas com o auxílio do software R. Trata-se de um programa computacional para cálculos e gráficos estatísticos, que consiste em uma linguagem e um ambiente de desenvolvimento com gráficos e com a possibilidade de utilização de *scripts* (R CORE TEAM, 2018). As diversas funções estatísticas utilizadas são disponibilizadas no repositório oficial da linguagem, disponível em: <<https://cran.r-project.org/mirrors.html>>.

3. RESULTADOS

3.1 Caracterização Geotécnica

A Tabela 1 apresenta os dados obtidos na caracterização geotécnica dos solos estudados. A Figura 6 ilustra as curvas granulométricas dos mesmos.

Tabela 1. Granulometria e plasticidade dos solos

T0-0 - Granulometria					
Pedregu- -lho	Areia Grossa	Areia Média	Areia Fina	Silte	Argila
(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
0	1	2	12	50	35
T0-0 - Plasticidade					
Limite de liquidez (wl)		Limite de plasticidade (wp)		Índice de plasticidade (IP)	
(%)		(%)		(%)	
39		32		7	
T5-0 Granulometria					
Pedregu- -lho	Areia Grossa	Areia Média	Areia Fina	Silte	Argila
(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
0	1	5	12	45	37
T5-0 Plasticidade					
Limite de liquidez (wl)		Limite de plasticidade (wp)		Índice de plasticidade (IP)	
(%)		(%)		(%)	
43		31		12	
T30-0 Granulometria					
Pedregu- -lho	Areia Grossa	Areia Média	Areia Fina	Silte	Argila
(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
0	0	3	12	41	44
T30-0 Plasticidade					
Limite de liquidez (wl)		Limite de plasticidade (wp)		Índice de plasticidade (IP)	
(%)		(%)		(%)	
80		41		39	

Pedregulho: > 2 mm; areia grossa: 0,6-2 mm; areia média: 0,2-0,6 mm; silte: 0,002-0,06 mm; argila: < 0,002 mm. IP = wl – wp

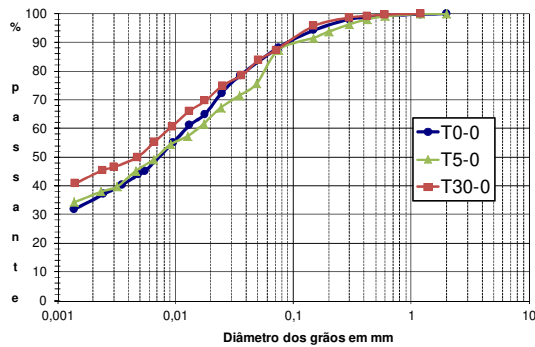


Figura 6. Curvas granulométricas dos solos.

3.2 Coeficientes de Adensamento

Para cada um dos estágios de carga dos ensaios de adensamento realizados foi utilizada a função *soilscv*, já apresentada, para determinação do coeficiente C_v .

A Figura 7 apresenta a saída gráfica da função, a fim de demonstrar o desenvolvimento do método.

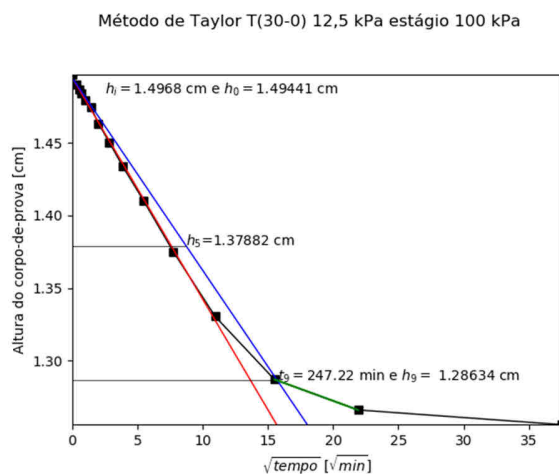


Figura 7. Método de Taylor aplicado ao solo T30-0 12,5 kPa no estágio 100 kPa

A Tabela 2, por sua vez, apresenta um resumo dos resultados para os coeficientes de adensamento, os mesmos que serão utilizados para a análise de variâncias. Cabe ressaltar, que nessa tabela são apresentados valores onde já foram retirados possíveis *outliers* que pudessem afetar as análises realizadas, reduzindo a cinco valores de C_v por ensaio.

Tabela 2. Resumo dos coeficientes de adensamento (em cm^2/s)

Solo	Tensão de pré-adensamento (kPa)		
	12,5	25	50
T(0-0)	5,37E-04	8,40E-04	5,76E-04
	3,51E-04	7,55E-04	4,52E-04
	7,03E-04	1,40E-03	7,50E-04
	1,11E-03	1,77E-03	1,29E-03
	1,41E-03	2,72E-03	1,81E-03
T(5-0)	1,77E-04	3,76E-04	1,59E-03
	1,64E-04	2,84E-04	1,29E-03
	2,22E-04	2,75E-04	3,77E-04
	2,49E-04	4,65E-04	5,79E-04
	3,94E-04	7,62E-04	7,04E-04
T(30-0)	1,01E-04	1,05E-03	4,47E-04
	2,96E-05	3,12E-05	6,92E-04
	2,72E-05	1,86E-05	9,41E-05
	3,74E-05	1,74E-05	1,03E-05
	4,28E-05	2,31E-05	1,18E-05

3.3 Análises de Variância

Inicialmente, foi realizada uma análise de variâncias fator duplo a fim de investigar a influência da interação entre os fatores analisados, o teor de bentonita e a tensão de pré-adensamento nominal. A Figura 8 apresenta a saída do programa utilizado.

```
> k<-lm(cv~bentonita+tensao, btnt)
> anova(k)
Analysis of Variance Table

Response: cv
          Df    Sum Sq   Mean Sq F value    Pr(>F)
bentonita  2 6.4988e-06  3.2494e-06  16.6403 7.628e-06 ***
tensao     2 1.1857e-06  5.9280e-07   3.0360 0.06048 .
bentonita:tensao  4 1.3621e-06  3.4050e-07   1.7438 0.16180
Residuals  36 7.0298e-06  1.9530e-07
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

Figura 8. Saída do programa R para análise de variâncias fator duplo

Como pode ser visto na Figura, o teste indica que não há razões para suspeitar que o termo de interação dos fatores seja significativo na variável resposta analisada. Isso se dá devido ao p-valor do teste (0,1618) ser alto ($>0,05$), o que indica a não rejeição da hipótese onde o termo de interação não aumenta a explicação da variância do modelo.

Sendo assim, partiu-se para análise de cada um dos fatores individualmente. Para isso foram realizadas outras duas análises de variância. Em uma, foi considerado como fator a tensão de pré-adensamento nominal com três níveis: 12,5 kPa; 25 kPa e 50 kPa. Em outra, foi considerado apenas o teor de bentonita do solo, também com três níveis: 5%, 30% e 50%.

A Figura 9 apresenta a saída do programa para a análise incluindo a tensão e a Fig. 10 apresenta a saída para a análise incluindo o teor de bentonita.

```
> cv.tns <- read.csv(GEO_SOLOS_ARTIFICIAS/R/cv_tns.txt", sep=";")
> r<-lm(cv^tensao,cv.tns)
> anova(r)
Analysis of Variance Table

Response: cv
      Df    Sum Sq   Mean Sq F value Pr(>F)
tensao  2 1.1857e-06 5.9284e-07 1.6721 0.2001
Residuals 42 1.4891e-05 3.5454e-07
```

Figura 9. Saída do programa R para análise de variância C_v versus tensão de pré-adensamento nominal

```
> cv.btnt <- read.csv(GEO_SOLOS_ARTIFICIAS/R/cv_btnt.txt", sep=";")
> g<-lm(cv^bentonita,cv.btnt)
> anova(g)
Analysis of Variance Table

Response: cv
      Df    Sum Sq   Mean Sq F value   Pr(>F)
bentonita  2 6.4988e-06 3.2494e-06 14.249 1.89e-05 ***
Residuals 42 9.5776e-06 2.2800e-07
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

Figura 10. Saída do programa R para análise de variância C_v versus teor de bentonita

Pode-se ver na Fig. 9 que o teste indicou não haverem indícios que indiquem a rejeição da hipótese de igualdade das médias para a tensão. Enquanto que, para o teor de bentonita, Fig. 10, devido ao baixo p-valor, o teste indicou haver indícios de que houve uma explicação maior para o modelo, isto é, o valor de C_v é explicado pelo teor de bentonita.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Conforme indicado pelos testes estatísticos realizados, pode-se dizer que o teor de bentonita apresentou uma maior explicação para a variável resposta coeficiente de adensamento (C_v). Ou seja, há indícios de que as diferenças no teor de bentonita utilizado nos solos causaram alterações nos coeficientes de adensamento verticais medidos nos ensaios oedométricos. Os testes estatísticos corroboram o comportamento esperado para a análise, pois o aumento do teor de bentonita traduz-se em um aumento do teor de argila (Tabela 1) do solo e numa presumida redução da permeabilidade do mesmo.

Por outro lado, a tensão de pré-adensamento condicionada aos solos não explicou mudanças significativas nos valores encontrados para o C_v .

Pôde-se concluir também que os critérios utilizados pelo *script* desenvolvido para determinação dos pontos necessários para a realização do método de Taylor foram bastante eficientes, pois na maioria dos casos utilizados não foi preciso indicá-los. Os gráficos gerados também são coerentes com os esperados para os dados possuídos, bem como os valores de coeficiente de adensamento encontrado, todos entre 10^{-3} e 10^{-5} cm²/s, representativo de solos finos como os estudados.

Por fim aponta-se para a relevância do uso de ferramentas estatísticas na interpretação de ensaios geotécnicos.

Agradecimentos

Ao CNPq pelo apoio à pesquisa na forma de bolsa de iniciação científica.

5 REFERÊNCIAS

ALVES, A. M. L.; COSTA, S. C. K.; BASTOS, C. A. B. Resistência ao cisalhamento de misturas caulim-bentonita através de ensaio de palheta miniatura. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 2010, Gramado/RS. **Anais...** Gramado/RS: ABMS, 2010. CD-ROM

BASTOS, C. A. B.; ALVES, A. M. L.; PEREIRA, M. C.; ROSA, K. L.; VIEGAS, M. R.; JESUS, S. H. G. Estudo sobre a resistência não drenada de solos finos pelo ensaio de cone de queda livre empregando amostras de solos artificiais. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 2014, Goiânia/GO. **Anais...** Goiânia/GO: ABMS, 2014. CD-ROM

DAS, B. M. **Advanced soil mechanics**. Crc Press, 2014. 4th Edition. 614p.

EICHELBERGER, L. V.; OLIVEIRA, C. L.; BASTOS, C. A. B.; ALVES, A. M. L.; FAGUNDES, D. F. Avaliação da Resistência não drenada de dois solos artificiais por diferentes ensaios de laboratório. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA, 2018, Salvador/BA. **Anais...** Salvador/BA: ABMS, 2018.

HANSBO, S. A new approach to the determination of the shear strength of clay by the fall-cone test. **Proceedings Royal Swedish Geotechnical Institute**, nº 14, 1957, p.7-47.

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. **Estatística aplicada e probabilidade para**

engenheiros. Rio de Janeiro, RJ – Brasil: LTC, 2019. 4ª Ed.

PINTO, P. B. **Aplicação do penetrômetro de cone de laboratório na caracterização da plasticidade e resistência não drenada de solos argilosos**. Trabalho de Conclusão em Engenharia Civil Empresarial, Escola de Engenharia – FURG, Rio Grande/RS, 2010, 66p.

PINTO, P. B.; ALVES, A. M. L.; BASTOS, C. A. B. Ensaio de cone de queda aplicado em estudos de plasticidade e resistência ao cisalhamento de solos artificiais. **Geotecnia**, vol. 143, pp. 85-110. 2018.

R CORE TEAM (2018). **R: A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. Disponível em: <<https://www.R-project.org/>>. Acessado em: 19 Mar. 2019.

ROSA, K. L.; BASTOS, C. A. B.; ALVES, A. M. L. Avaliação da consistência de solos com a utilização do Ensaio de Cone de Queda Livre (“Fall Cone Test”). In: VII SEMINÁRIO DE ENGENHARIA GEOTÉCNICA DO RIO GRANDE DO SUL, 2013, Santa Maria/RS. **Anais...** Santa Maria/RS: ABMS-NRRS, 2013. Disponível em: <http://coral.ufsm.br/geors2013/>. Acesso em 07/3/2017.