

ANÁLISE DA RESISTÊNCIA NÃO DRENADA DE DIFERENTES SOLOS ARTIFICIAIS OBTIDA POR ENSAIOS DE LABORATÓRIO

João Vítor de Azambuja Carvalho

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

Luiza Vargas Eichelberger

Engenheira Civil
luiza_ve@hotmail.com

Camila Larrosa Oliveira

Mestranda em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul
camila.larrosa@yahoo.com.br

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. *A análise do comportamento de obras sobre solos moles implica no conhecimento da resistência não drenada (S_u) desses. Essa é uma propriedade de grande interesse no projeto de obras litorâneas e offshore e em diversas outras áreas da geotecnia. O comportamento da resistência não drenada, no entanto, varia bastante de acordo com as propriedades do solo, de modo que é de difícil previsão ou estimação. Este trabalho tem por objetivo principal avaliar a resistência não drenada de solos artificiais produzidos a partir de misturas de caulim e bentonita sob diferentes tensões de pré-adensamento e avaliar a influência de variáveis controladas e de três diferentes ensaios de laboratório realizados na medida de S_u . Os resultados obtidos confirmaram a influência da tensão de pré-adensamento dos materiais e indicaram não haver indícios de que os diferentes ensaios de laboratório aplicados para determinação da resistência não drenada apresentem resultados estatisticamente diferentes entre si.*

Palavras-chave: *Resistência não drenada. Solos artificiais. Ensaios de Laboratório.*

1. INTRODUÇÃO

O envolvimento com solos de propriedades geotécnicas desfavoráveis é comum na prática de engenharia, como nas situações de obras litorâneas e offshore e nos casos de aterros sobre solos moles.

Nesses casos, uma das propriedades geotécnicas de maior importância para o dimensionamento e segurança das obras é a resistência não drenada (S_u). Essa é definida como a resistência oferecida pelo solo quando solicitado de maneira rápida, sem que seja possível a condição de drenagem da água intersticial. Essa situação costuma ser crítica nos solos finos, onde é comum a aplicação de cargas em tempo menor do que a sua capacidade de drenagem. Portanto, é imprescindível o conhecimento desse parâmetro e da sua variação de acordo com as diferentes características dos solos empregados.

O Grupo de Geotecnia FURG já tem um histórico de trabalho em estudos envolvendo solos finos 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 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 versus Su de Hansbo (1957). Além desses, Eichelberger et al. (2018) apresentam nova avaliação da resistência não drenada em misturas de caulim, bentonita e água incluindo ensaios triaxiais do tipo UU.

Este trabalho tem por objetivo complementar os resultados obtidos por Eichelberger et al. (2018), agregando novo traço de solo artificial e apresentando uma análise estatística da influência da tensão de adensamento no valor da resistência não drenada. Além disso, procurar-se-á comparar, com suporte da estatística, os resultados obtidos para o parâmetro através dos três métodos de ensaio utilizados: compressão triaxial não adensado não drenado (UU), palheta de laboratório e o cone de queda livre de laboratório.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais utilizados

Na pesquisa foram utilizados o caulim rosa e a bentonita na moldagem dos solos artificiais. O caulim rosa utilizado foi o produzido pela Indústria de Calcários Caçapava (Inducal) e a bentonita sódica utilizada, da marca Schneider, é de natureza comercial e utilizada por empresas de sondagem da região.

2.2 Ensaios de caracterização

Para cada um dos traços e com os materiais originais 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 artificiais

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

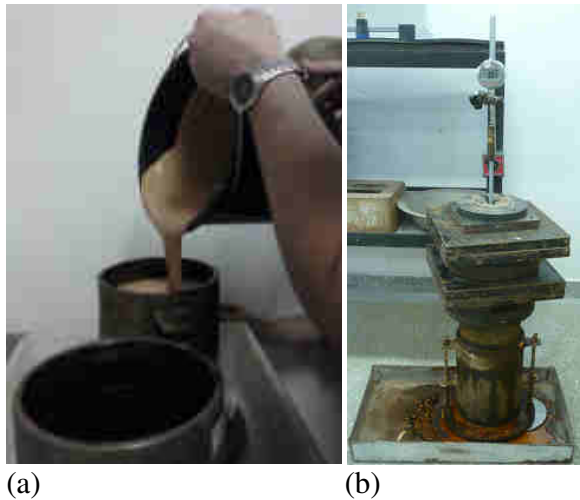


Figura 2. (a) Disposição e (b) adensamento da lama

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.

Em cada molde de lama adensada, agora chamada de solo artificial, foram realizados os vários ensaios, conforme esquema mostrado na Figura 3. Foram realizados ensaios triaxiais, ensaios de palheta e de penetração de cone de queda livre, assim como moldado anel metálico para ensaio de adensamento.

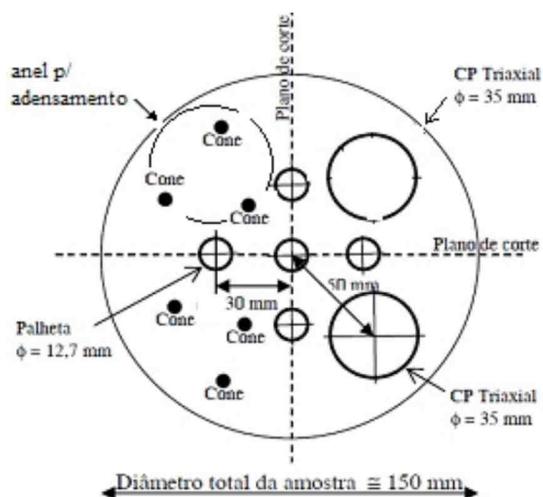


Figura 3. Vista superior com posicionamento da obtenção dos corpos de prova e locais da realização dos ensaios

O anel para ensaio de adensamento (quadrante superior esquerdo na Fig. 3) foi moldado acima do ponto onde foi realizado o ensaio de cone, visto que este último é realizado em subsuperfície, visando coincidir com o plano de corte do ensaio de palheta.

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. 4). 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. O objetivo dos ensaios foi aferir a tensão de pré-adensamento adquirida pelo solo artificial com as sobrecargas aplicadas.



Figura 4. Ensaio de adensamento oedométrico

2.5 Ensaios triaxiais

O ensaio de compressão triaxial tipo UU, condição não adensada e não drenada, é uma técnica tradicional na obtenção da resistência não drenada em laboratório.

Neste ensaio, um corpo de prova cilíndrico de pequenas dimensões é submetido a um estado de tensões isotrópico dentro de uma câmara, por meio da pressurização do fluido no seu entorno (tensão de confinamento), e posteriormente submetido à ruptura por carga axial a velocidade constante (tensão desviadora). Em nenhuma das fases é permitida a drenagem do fluido intersticial que ocupa os poros do corpo de prova.

Um esquema de uma câmara triaxial é apresentado na Fig. 5. Os estados de tensões de diferentes ensaios sem drenagem sob pressões de confinamento variadas, representados por círculos de Mohr, indicam uma envoltória de resistência horizontal, cujo intercepto no eixo das tensões cisalhantes é o valor de S_u (Fig. 6).

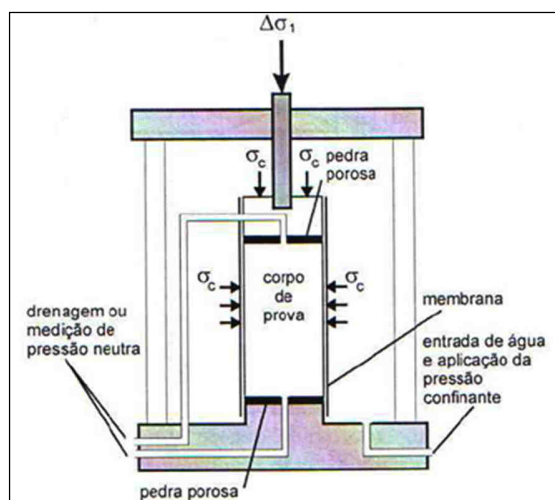


Figura 5. Esquema de câmara para ensaios de compressão triaxial (PINTO, 2000)

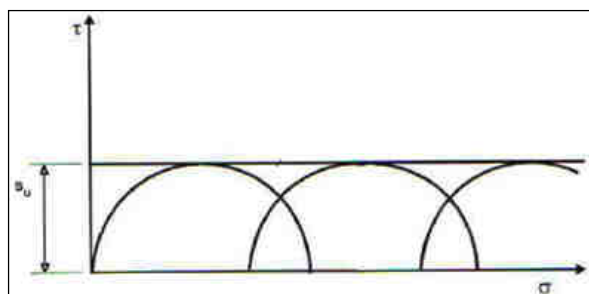


Figura 6. Obtenção de S_u a partir de ensaios de compressão triaxial UU (PINTO, 2000)

Os ensaios triaxiais foram realizados em corpos de prova cilíndricos 3,5 x 7,0 cm, em equipamento da marca Wille Geotechnik® (Fig.7). O equipamento consiste em um sistema de interface ar-água para aplicação de pressões e uma prensa elétrica automatizada para aplicação do carregamento axial. Quanto à instrumentação empregada, as deformações axiais foram medidas por transdutor de deslocamento (do tipo LVDT), as pressões de confinamento e de contrapressão aferidas por transdutor de pressão e a carga axial medida por célula de carga externa. Os instrumentos foram previamente calibrados e a aquisição de dados realizada por unidade Spider® da HBM, gerenciada pelo software Catman®. A velocidade de compressão axial empregada foi de 1 mm/min. A Figura 8 ilustra o arranjo experimental completo.



Figura 7. Corpo de prova na câmara triaxial

2.6 Ensaios de Palheta

O equipamento empregado para o ensaio de palheta é da marca Viatest®, de operação manual (Fig. 9). O ensaio consiste em cravar a palheta, com 12,7 mm de altura e 12,7 mm de largura, no solo artificial até uma profundidade de 6 cm e girar sob velocidade

constante, medindo o torque necessário para romper o solo por cisalhamento no entorno da mesma (Fig. 10). Dada a velocidade do giro, o cisalhamento é considerado se dar em condição não drenada. A resistência não drenada é relacionada com o torque medido (Eq. 1).

$$S_u = \frac{M_{total}}{\pi \cdot D^2 \cdot \left(\frac{H}{2} + \frac{D}{6}\right)} \quad (1)$$

onde: M_{total} = torque necessário para ruptura do solo por cisalhamento; D = diâmetro da palheta e H = altura da palheta.



Figura 8. Arranjo experimental para os ensaios triaxiais

2.7 Ensaios do cone de queda livre

O equipamento de ensaio de cone de queda livre empregado é da marca Solotest® (Fig. 11). A norma britânica BS 1377 (1990) indica os procedimentos básicos do ensaio, que consiste em quantificar (em mm) a penetração de um cone de 30° de vértice, caindo em queda livre com sua ponta inicialmente posicionada na superfície da amostra de solo. Os ensaios foram realizados

em meio a quadrantes do corpo cilíndrico de solo adensado, num plano situado a 6 cm de profundidade, de forma a igualar a profundidade de cisalhamento nos ensaios de palheta (Fig. 12).

- 1 – Pórtico de sustentação do conjunto
- 2 – Suporte para instalação da palheta
- 3 – Manivela para subida e descida da palheta
- 4 – Palheta, com quatro lâminas, 12,7 mm de altura e 12,7 mm de largura
- 5 – Manivela para rotação da palheta
- 6 – Escalas graduadas, em graus, uma fixa (externa), outra móvel (interna)
- 7 – Ponteiro rotativo
- 8 – Haste vertical conectada a um botão puxador, ajustado ao ponteiro
- 9 – Conjunto de molas de diferentes rigidezes, para solos de diferentes resistências
- 10 – Base para fixação da amostra de solo
- 11 – Espaço para fixação da mola

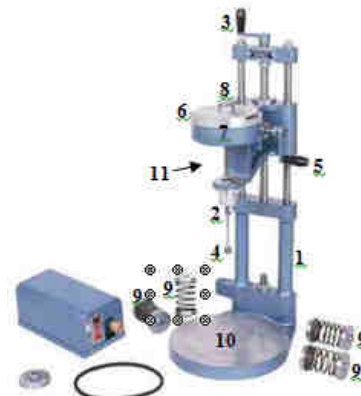


Figura 9. Equipamento de ensaio de palheta



Figura 10. Detalhe da palheta preparada para cravação no solo adensado



Figura 11. Equipamento para ensaio de cone



Figura 12. Detalhe do ensaio de cone em execução

Os valores de resistência não drenada a partir dos resultados do cone de penetração foram determinados a partir da relação de Hansbo (1957) (Eq. 2).

$$Su = K (Q/d^2) \quad (2)$$

onde: Q = peso do cone; d = penetração na massa de solo e K = constante que depende, dentre outros fatores, do ângulo do cone. Este parâmetro tem o nome de Fator de Cone de Hansbo.

Nos ensaios conduzidos com os solos T5-0 e T30-0, o cone de queda apresentou maior peso em virtude da adaptação de um acelerômetro, destinado a medir a desaceleração do cone ao penetrar na massa de solo. A apresentação e análise destes dados de desaceleração fogem do escopo deste trabalho. A determinação do teor de umidade do solo artificial na profundidade dos ensaios acompanhou os ensaios de cone e palheta, pois se trata de um importante dado para análise.

2.8 Análise de Variâncias (ANOVA)

A fim de conhecer a influência de cada um dos fatores sobre a variável resposta considerada, a resistência não drenada, foram realizadas análises de variância, também conhecidas como ANOVA. Esse tipo de análise normalmente é utilizado quando existe 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 algum dos fatores explica a maior parte da variância do modelo (MONTGOMERY e RUNGER, 2009).

Neste trabalho, foram realizadas duas análises de variância. Em uma das análises foi considerado um único tratamento, o método de ensaio utilizado, com três diferentes níveis: ensaio da palheta, ensaio do cone de queda livre e ensaio triaxial não adensado não drenado (UU). Para esta análise, objetiva-se avaliar a hipótese de igualdade das médias obtidas para cada um dos três ensaios.

Na outra análise realizada, foi utilizado um único tratamento, a tensão de adensamento, em três níveis: 13,3 kPa; 21,2 kPa e 27,3 kPa. Esta análise, por sua vez, objetiva avaliar a influência da tensão de adensamento no valor obtido para a resistência não drenada.

Todas as análises apresentadas neste trabalho foram realizadas com o auxílio do software R. Esse é um sistema para cálculos e gráficos estatísticos, que consiste em uma linguagem e um ambiente de desenvolvimento com gráficos e 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 resultados da análise granulométrica com uso de defloculante e os resultados de plasticidade do solo através dos limites de Atterberg. As frações granulométricas foram definidas segundo ABNT NBR 6502/95 (Solos e Rochas). A Figura 13 apresenta a curva granulométrica obtida para os solos T(0-0), T(5-0) e T(30-0).

Tabela 1. Granulometria e plasticidade

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

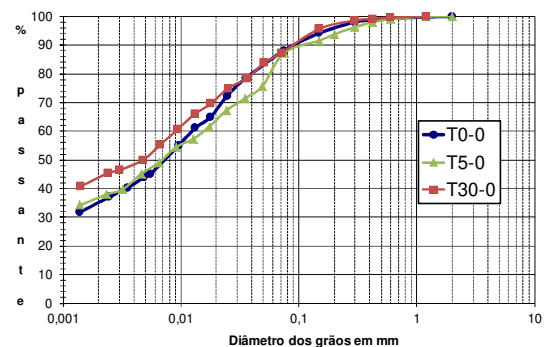


Figura 13. Curvas granulométricas dos solos

De acordo com os dados da caracterização geotécnica foi possível classificar o solo T(0-0) como um silte argiloso de mediana plasticidade, com classificação ML pelo Sistema Unificado e A4(8) pelo sistema HRB-AASHTO. O solo T(5-0) é classificado A7-5(9). Já o solo T(30-0) é classificado como MH e A7-5(20). O Índice de Atividade Coloidal (Ia) do solo T(0-0) é 0,20, caracterizando-o como de baixa atividade coloidal, condizente com a mineralogia de argila dominante (caulinita). O mesmo para o solo T(5-0) com Ia de 0,32. Já para o solo T(30-0) o índice passa a ser 0,88, passando o solo a ser considerado de atividade normal. O aumento na atividade coloidal está em acordo com o aumento no teor de bentonita.

3.2 Tensões de pré-adensamento

Os ensaios de adensamento convencionais em câmara oedométrica permitiram aferir a tensão de adensamento dos solos. A estimativa foi realizada com base na aplicação do método de Pacheco-Silva às curvas log tensão efetiva x índice de vazios. A Tabela 2 apresenta o resumo dos resultados.

Tabela 2. Tensões de adensamento dos corpos de prova estimadas a partir dos ensaios

Solo	Teor de umidade inicial (%)	Índice de vazios inicial	Tensão de adensamento estimada (kPa)
T(0-0)-12,5kPa	41,9	1,024	14,5
T(0-0)-25kPa	40,0	0,996	23,1
T(0-0)-50kPa	40,6	1,005	30,0
T(5-0)-12,5kPa	61,8	1,597	9,0
T(5-0)-25kPa	56,1	1,501	18,2
T(5-0)-50kPa	51,1	1,343	28,8
T(30-0)-12,5kPa	121,0	3,060	16,6
T(30-0)-25kPa	107,6	2,668	22,4
T(30-0)-50kPa	108,4	2,722	23,2

Os dados iniciais de teor de umidade e índice de vazios indicam que os mesmos se elevam com o teor de bentonita presente no

solo. Tem-se uma evidência que a mineralogia do solo artificial influencia fortemente a estrutura adquirida no ensaio de adensamento.

Apesar de toda incerteza inerente à determinação da tensão de pré-adensamento por método gráfico, a tendência de aumento com a tensão aplicada foi confirmada para os solos. A tendência só não é tão clara para o solo T(30-0). A redução na condição de drenagem imposta pela presença de bentonita neste último pode justificar menor eficiência no adensamento do solo no molde. Por outro lado uma redução no teor de umidade e, por consequência, no índice de vazios era esperada no mesmo sentido, entretanto, não se verifica. A pequena diferença aliada à precisão na quantificação do teor de umidade pelo método da estufa pode justificar.

3.3 Resistência não drenada

Conforme apresentado no item 2, a resistência não drenada dos solos adensados sob três diferentes tensões foi avaliada por três métodos distintos: por ensaios triaxiais do tipo UU, por ensaios de palheta e por ensaios de cone de queda livre. Os dois primeiros podem ser considerados métodos diretos de determinação. Já para o ensaio de cone de queda livre foi empregada uma relação penetração x S_u (HANSBO, 1957).

A Tabela 3 traz os resultados de resistência não drenada dos solos desde ensaios triaxiais. O solo T(0-0)-12,5kPa, muito mole, não permitiu a moldagem do corpo de prova para o ensaio triaxial.

A outra medida direta da resistência não drenada foi dada pelo ensaio de palheta. A Tabela 4 apresenta os resultados obtidos com os ensaios.

A Tabela 5 apresenta os resultados obtidos com os ensaios de cone de queda livre. Constam os valores médios de penetração (em mm) e a estimativa de S_u a partir da Eq. 2, utilizando-se o fator de cone $K = 0,80$, sugerido por Karlsson (1977).

Tabela 3. Valores de resistência não drenada (Su) a partir dos ensaios triaxiais UU

Solo	Teor de umidade (%)	Índice de vazios	Su (kPa)	Su médio (kPa)	
T(0-0)-25kPa (CP1)	26,2	0,796	4,6	5,3	
T(0-0)-25kPa (CP2)	40,3	0,791	6,0		
T(0-0)-50kPa (CP1)	40,6	0,698	9,5	9,5	
(T5-0)-12,5kPa (CP1)	63,4	1,747	2,0	3,1	
(T5-0)-12,5kPa (CP2)	62,3	1,705	3,1		
(T5-0)-12,5kPa (CP3)	64,2	1,661	4,1		
(T5-0)-25kPa (CP1)	53,9	1,465	5,7	5,6	
(T5-0)-25kPa (CP2)	63,1	1,688	4,1		
(T5-0)-25kPa (CP3)	58,9	1,338	4,1		
(T5-0)-25kPa (CP4)	61,2	1,680	4,4		
(T5-0)-50kPa (CP1)	53,5	1,240	10,6	9,3	
(T5-0)-50kPa (CP2)	56,3	1,383	10,3		
(T5-0)-50kPa (CP3)	52,9	1,346	9,1		
(T5-0)-50kPa (CP4)	53,8	1,445	8,2		
(T5-0)-50kPa (CP5)	53,7	1,408	8,8		
(T5-0)-50kPa (CP6)	53,8	1,275	9,0		
T(30-0)-12,5kPa (CP1)	125,8	3,073	6,5		7,1
T(30-0)-12,5kPa (CP2)	124,7	3,379	7,3		
T(30-0)-12,5kPa (CP3)	133,5	3,106	9,7		
T(30-0)-12,5kPa (CP4)	123,11	3,158	5,0	10,3	
T(30-0)-25kPa (CP1)	143,5	3,915	12,1		
T(30-0)-25kPa (CP2)	156,8	3,479	12,0		
T(30-0)-25kPa (CP3)	118,3	2,739	6,0		
T(30-0)-25kPa (CP4)	105,3	2,688	11,0	14,1	
T(30-0)-50kPa (CP1)	102,3	2,590	16,0		
T(30-0)-50kPa (CP2)	100,5	2,396	14,9		
T(30-0)-50kPa (CP3)	93,3	2,384	11,4		

Tabela 4. Valores de resistência não drenada (Su) a partir dos ensaios de palheta

Solo	Teor de umidade (%)	Torque médio (N.mm)	Su médio (kPa)
T(0-0)-12,5kPa	44,4	10,9	2,5
T(0-0)-25kPa	40,3	15,3	3,6
T(0-0)-50kPa	40,6	24,1	5,6
T(5-0)-12,5kPa	61,1	11,7	2,7
T(5-0)-25kPa	59,3	21,5	5,1
T(5-0)-50kPa	53,3	30,6	7,1
T(30-0)-12,5kPa	109,3	20,1	4,7
T(30-0)-25kPa	108,4	38,0	8,6
T(30-0)-50kPa	104,7	38,3	9,4

Tabela 5. Valores de resistência não drenada (Su) a partir dos ensaios de cone

Solo	Teor de umidade (%)	Penetração do cone média (mm)	Su médio (kPa)
T(0-0)-12,5kPa	44,4	21,1	1,5
T(0-0)-25kPa	40,3	14,9	2,8
T(0-0)-50kPa	40,6	13,2	3,7
T(5-0)-12,5kPa	61,1	23,2	2,3
T(5-0)-25kPa	59,3	17,5	4,0
T(5-0)-50kPa	53,3	14,4	5,9
T(30-0)-12,5kPa	109,3	15,7	5,0
T(30-0)-25kPa	108,4	10,9	10,5
T(30-0)-50kPa	104,7	10,2	12,1

A Figura 14 ilustra valores de Su obtidos por diferentes técnicas para os solos adensados

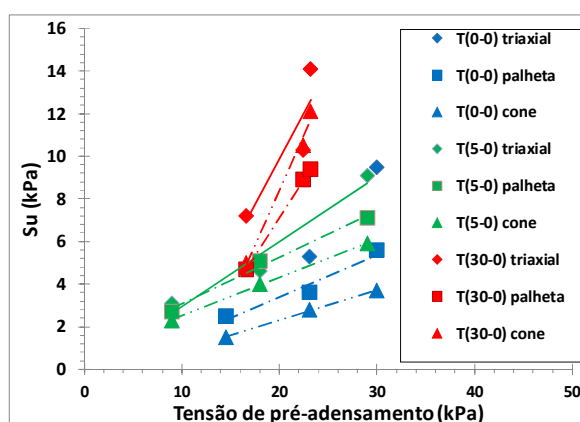


Figura 14. Valores de Su obtidos por diferentes técnicas para os solos adensados

A tendência esperada de acréscimo da resistência não drenada com a tensão de pré-adensamento é confirmada. Comparando os resultados entre os solos, percebem-se maiores valores de S_u para o solo T(30-0). Entende-se que a adição de bentonita contribuiu para o aumento da parcela coesiva da resistência ao cisalhamento do solo.

Os valores de resistência não drenada diferem em função da técnica experimental empregada na sua medida. Diferentes mecanismos de ruptura em cada ensaio, afetados pela velocidade de cisalhamento podem explicar tais diferenças. Para os três solos artificiais os ensaios triaxiais forneceram maiores valores de S_u .

Mesmo entre valores de resistência obtidos diretamente de ensaios de palheta e estimados a partir dos ensaios de cone de queda livre existe uma diferença significativa. Cabe destacar que o fator de cone adotado seguiu indicação clássica publicitada na literatura. Existem estudos apontando que este fator varia com o tipo de solo.

Outra importante observação a partir da Fig. 14 é de que a taxa de elevação da resistência não drenada com a tensão de pré-adensamento (a relação S_u/σ'_{v0} ou Razão de Resistência) apresentou extrema variação com os solos investigados. Para o solo T(0-0) tem-se a relação S_u/σ'_{v0} variando de 0,14 a 0,20 (excluindo da análise os ensaios triaxiais por somente se ter dois pontos experimentais), para o solo T5-0 entre 0,18 a 0,30, e para o solo T(30-0) variando de 0,72 a 1,03 conforme a técnica. Cabe destacar que estes últimos valores são bem superiores àqueles sugeridos na literatura para solos naturais normalmente adensados. A Razão de Resistência tende a aumentar com o teor de bentonita.

3.4 Análises de Variância

Foram realizadas duas análises de variâncias com os dados obtidos. A primeira com o objetivo de avaliar os resultados oferecidos pelos três métodos realizados de

medição da resistência não drenada. A Tabela 6 apresenta um resumo dos dados utilizados para essa análise e a Fig. 15 a saída do programa R de análise estatística.

Tabela 6. Resumo dos dados utilizados na análise estatística S_u x Método

Método	Su médios (kPa)							
	Triaxial	5,3	9,5	3,1	5,6	9,3	7,1	10,3
Palheta	3,6	5,6	2,7	5,1	7,1	4,7	8,6	9,4
Cone	2,8	3,7	2,3	4,0	5,9	5,0	10,5	12,1

```
> su <- read.csv2("anova_su.txt")
> r<-aov(obs~method,su)
> summary(r)
              Df Sum Sq Mean Sq F value Pr(>F)
method         2  24.79   12.39   1.157  0.334
Residuals     21 224.88   10.71
```

Figura 15. Saída do programa R da análise S_u x Método

Uma das maneiras de interpretar-se uma análise de variância é através do p-valor do teste. Se o p-valor for grande ($>0,05$), isso indica a não rejeição da hipótese de igualdade, ou seja, não há indícios que sugiram uma diferença entre as médias. Outro meio de interpretação é através da estatística F do teste. Para isso é necessário encontrar um valor F na distribuição F de Snedecor de acordo com os graus de liberdade dos dados analisados e do nível de significância escolhido.

Para o caso escolhido, tem-se que o p-valor é de 0,334, ou seja, é indicada a não rejeição da hipótese de igualdade. No caso de interpretação através do valor F, tem-se que $F_{\alpha/2,2,21} = 3,47$, para uma confiança de 95%, e que a estatística F do teste é 1,157, ou seja, indica-se a não rejeição da hipótese de igualdade das médias.

Em resumo, estatisticamente não se pode definir que os diferentes métodos diferem na determinação de S_u .

A outra análise realizada teve por objetivo corroborar o comportamento da resistência

não drenada frente à tensão de adensamento observado e comentado no item 3.3. A Tabela 7 apresenta um resumo dos dados utilizados nesta análise. Já a Figura 16 apresenta a saída do programa R para essa análise.

Tabela 7. Resumo dos dados utilizados na análise Su x Tensão de adensamento média estimada

Tensão de adensamento média estimada (kPa)	Su médios (kPa)								
13,3	-	3,1	7,1	2,5	2,7	4,7	1,5	2,3	5,0
21,2	5,3	5,6	10,3	3,6	5,1	8,6	2,8	4,0	10,5
27,3	9,5	9,3	14,1	5,6	7,1	9,4	3,7	5,9	12,1

```
> su_sv <- read.csv2("GEORS/su_sv.txt")
> g<-lm(su~sv,su_sv)
> anova(g)
Analysis of Variance Table

Response: su
          Df Sum Sq Mean Sq F value    Pr(>F)
sv          2  101.63   50.816   6.5973 0.005438 **
Residuals 23  177.16    7.703
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

Figura 16. Saída do programa R para a análise Su x Tensão

Para essa análise pode-se concluir que há indícios da não rejeição da hipótese de diferença das médias para um nível de significância de 0.001. Isso ocorre pelo fato de o p-valor do teste ser bastante baixo e condiz com os resultados gráficos apresentados.

Comprova-se estatisticamente que a tensão de adensamento influencia nos valores de Su determinados.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O trabalho proposto atingiu seu objetivo ao obter resultados de resistência não drenada de solos artificiais produzidos com caulim e bentonita. Os solos foram pré-adensados sob

diferentes tensões (valores nominais de 12,5, 25 e 50 kPa) e tiveram Su avaliado diretamente por ensaios triaxiais não adensados não drenados e ensaios de palheta de laboratório, e, indiretamente, por ensaios de cone de queda livre de laboratório.

Os resultados confirmam a elevação da resistência não drenada com a tensão de adensamento dos solos, assim como apontam que os valores diferem conforme a técnica empregada na obtenção de Su e com o tipo de solo ensaiado.

A análise de variância confirma a influência da tensão de adensamento nos valores de Su, explicando as médias encontradas, indiferente da técnica empregada. Por outro lado, a análise aponta que, considerando as médias dos valores obtidos, estas não diferem estatisticamente conforme a técnica empregada, para os solos ensaiados.

A pesquisa tem continuidade com a realização do mesmo rito experimental para solo artificial de composição diversificada a partir da incorporação de bentonita no teor de 50%.

Agradecimentos

Ao CNPq pelo apoio à pesquisa na forma de bolsas 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

SEMINÁRIO DE ENGENHARIA GEOTÉCNICA DO RIO GRANDE DO SUL
GEORS 2019

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

BRITISH STANDARD. **Methods of test for soils for Civil Engineering purposes.** British Standard Institution. n.1377. 1990.

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, pp.7-47.

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.

KARLSSON, R. (in cooperation with the laboratory committee of the Swedish Geotechnical Society). **Consistency Limits.** Swedish Council for Building Research, 1977.

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. **Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros.** Rio de Janeiro, RJ – Brasil: LTC, 2019. 4ª Ed.

PINTO, C. S. **Curso básico de Mecânica dos Solos.** São Paulo, Oficina de Textos, 2000.

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.