

## ENSAIO DE CONE DE QUEDA APLICADO NA MEDIÇÃO DA RESISTÊNCIA NÃO DRENADA DE SOLOS ARTIFICIAIS REMOLDADOS

CAMILA LARROSA DE OLIVEIRA<sup>1</sup>; LUIZA VARGAS EICHELBERGER<sup>2</sup>;  
ANTÔNIO MARCOS DE LIMA ALVES<sup>3</sup>; CEZAR AUGUSTO BURKERT BASTOS<sup>4</sup>.

<sup>1</sup>Universidade Federal do Rio Grande – [camila.larrosa@yahoo.com.br](mailto:camila.larrosa@yahoo.com.br)

<sup>2</sup>Universidade Federal do Rio Grande – [luiza\\_ve@hotmail.com](mailto:luiza_ve@hotmail.com)

<sup>3</sup>Universidade Federal do Rio Grande – [antonioalves@furg.br](mailto:antonioalves@furg.br)

<sup>4</sup>Universidade Federal do Rio Grande – [cezarbastos@furg.br](mailto:cezarbastos@furg.br)

### 1. INTRODUÇÃO

Uma das propriedades geotécnicas de maior interesse na maioria dos projetos geotécnicos é a resistência não drenada das argilas ( $s_u$ ), entendida como a resistência ao cisalhamento oferecida pelo solo argiloso quando solicitado rapidamente, sem que haja condição de drenagem da água intersticial. Esta situação costuma ser crítica, pois são comuns condições onde a aplicação das cargas ocorre em tempo menor à possibilidade de drenagem do material. Logo, um grande número de projetos geotécnicos exige o conhecimento deste parâmetro nas fases de concepção de soluções, dimensionamento e avaliação de segurança.

O cone de queda de laboratório, ou “fall cone test”, foi inventado em 1915 por John Olsson, o ensaio foi concebido originalmente para avaliações da resistência ao cisalhamento não drenada e sensibilidade de argilas remoldadas (HANSBO, 1957), sendo que posteriormente também passou a ser utilizado na determinação dos limites de Atterberg dos solos.

O ensaio é realizado preparando-se uma amostra de solo, e colocando-a em um recipiente padronizado. Um cone com geometria prescrita e peso conhecido é posicionado com sua ponta apenas tocando a superfície da amostra. O cone é liberado a partir do repouso, caindo em queda livre. A distância percorrida após um determinado período é medida. Após o período prescrito, a expectativa é de que o cone esteja quase em repouso, sendo qualquer movimento subsequente (devido a efeitos de fluência) muito lento. Este tipo de ensaio é considerado não drenado porque a penetração do cone no solo é muito rápida, não havendo tempo hábil para que a poropressão se dissipe. A norma britânica BS 1377 (BSI, 1990) e a norma internacional ISO 17892-6 (ISO, 2017) orientam os procedimentos básicos do ensaio de cone de queda.

O objetivo do presente trabalho é utilizar o ensaio de cone de queda ao estudo da resistência ao cisalhamento não drenada de solos artificiais remoldados, produzidos a partir de misturas de caulim, bentonita e água destilada. Dois solos artificiais foram produzidos em laboratório, a partir de misturas fluidas de caulim e bentonita, com os seguintes traços: T0-0 (solo formado apenas com caulim) e T30-0 (solo formado por 30% de bentonita e 70% de caulim). Amostras de solo de cada traço, com variadas consistências (teor de umidade) foram submetidas ao ensaio de cone de queda livre e ao ensaio de palheta de laboratório, para comparação. A resistência não drenada a partir do ensaio de cone foi estimada através de relação teórica com a profundidade de penetração do cone, proposta por Hansbo em 1957.

## 2. METODOLOGIA

Para a produção dos solos foi utilizado caulim rosa produzido pela Indústria de Calcários Caçapava (Inducal) e bentonita sódica, da marca Schneider, de natureza comercial e empregada por empresas de sondagem da região.

Os materiais secos ao ar foram misturados manualmente e passados na peneira de abertura de 0,42 mm, visando eliminar eventuais partículas de maior tamanho. A quantidade de água destilada na produção das pastas dos diferentes traços foi calculada para alcançar um teor de umidade próximo de duas vezes o limite de liquidez encontrado na fase de caracterização (pelo método de Casagrande). As misturas úmidas foram então postas para bater durante uma hora em misturador elétrico.

Um recipiente cilíndrico foi utilizado para formar os corpos de prova com as pastas provenientes da mistura, variando-se o teor de umidade do solo a cada bateria de ensaios. As amostras assim confeccionadas foram então submetidas aos ensaios de palheta de laboratório e cone de queda.

No ensaio de palheta de laboratório, o  $s_u$  é obtido a partir do torque máximo medido na rotação de uma palheta padronizada, no momento da ruptura, a uma profundidade de 6,3 cm abaixo da superfície da amostra. Os ensaios de palheta de laboratório seguiram o roteiro descrito em HEAD (1982). O ensaio de palheta foi realizado no centro de cada amostra, conforme mostrado na Figura 1.

Figura 1 – Ensaio de palheta de laboratório.



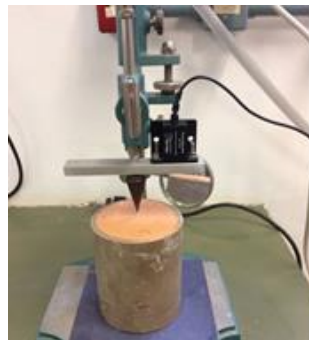
Já no ensaio de cone de queda, o  $s_u$  é estimado a partir da penetração do cone no solo, caindo em queda livre a partir da superfície da amostra. HANSBO (1957) e WOOD;WROTH (1978) demonstram uma relação teórica entre  $s_u$  e a penetração do cone, dada pela Equação 1:

$$s_u = K \cdot Q / d^2 \quad (1)$$

Onde Q é o peso do cone, d é a penetração do cone na massa de solo, e K (fator de cone) é uma constante que depende, dentre outros fatores, do ângulo do cone. KARLSSON (1977) indica o valor de K igual a 0,8 para cones com ângulo de 30° de vértice.

O ensaio de cone de queda foi realizado em três pontos ao longo da linha diametral das amostras, conforme mostrado na Figura 2. Com os valores medidos nos três pontos, foi calculada a média aritmética da penetração do cone.

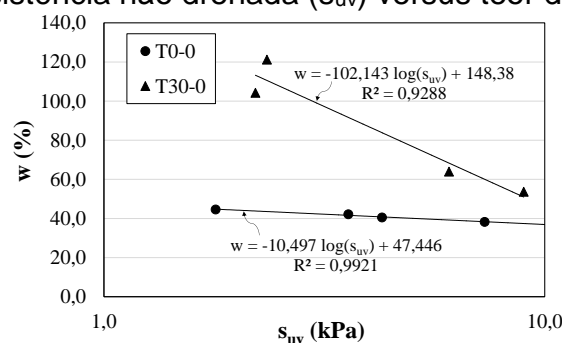
Figura 2 – Ensaio de cone de queda livre.



### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

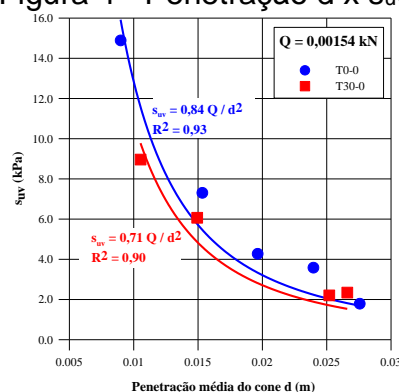
No gráfico da Figura 3 é mostrada a relação entre a resistência não drenada medida no ensaio de palheta (chamada de  $s_{uv}$ ), em escala logarítmica, e o teor de umidade ( $w$ ) das amostras ensaiadas. É mostrada também a equação da reta de melhor ajuste aos pontos experimentais. Observa-se um bom ajuste linear aos pontos experimentais, o que está de acordo com resultados teóricos baseados nas ideias da Mecânica dos Solos dos Estados Críticos (SCHOFIELD; WROTH, 1968).

Figura 3 - Resistência não drenada ( $s_{uv}$ ) versus teor de umidade ( $w$ ).



Na Figura 4, mostra-se a comparação entre os resultados do ensaio de palheta de laboratório (em termos da resistência ao cisalhamento não drenada  $s_{uv}$ ) e do ensaio de cone (em termos da penetração média  $d$ ), para as amostras ensaiadas.

Figura 4 - Penetração  $d$  x  $s_{uv}$ .



Uma análise de regressão, baseada no método dos mínimos quadrados, foi realizada para determinação dos valores da constante K que conduziam ao melhor ajuste entre os pontos medidos e a função matemática expressa pela

Equação 1. Para o solo T0-0, obteve-se um valor de K igual a 0,84, com um coeficiente de determinação ( $R^2$ ) igual a 0,93. Já para o solo T30-0, foi obtido um coeficiente K igual a 0,71, com  $R^2$  igual a 0,90 (Figura 4).

Os valores ajustados para o fator K são muito próximos de 0,8, valor proposto por KARLSSON (1977). Porém, verifica-se uma possível dependência do valor de K com a mineralogia do solo.

#### 4. CONCLUSÕES

Apesar dos poucos pontos experimentais disponíveis na presente fase da pesquisa, os resultados indicam que a relação de HANSBO (1957) apresenta bom ajuste aos dados experimentais, fato corroborado pelos altos coeficientes de determinação encontrados no procedimento de ajuste de curvas. Além disso, os valores ajustados para o fator de cone (K) estão muito próximos daqueles propostos na literatura técnica, em especial do valor proposto por KARLSSON (1977), igual a 0,8.

Ressalta-se o fato de que os ensaios não foram realizados à mesma profundidade nas amostras, uma vez que o ensaio de cone foi realizado na superfície das amostras, e o ensaio de palheta foi realizado a uma profundidade de 6,3 cm abaixo da superfície. Porém, como as amostras constituíram-se de pastas não adensadas, o efeito da profundidade provavelmente não foi significativo.

Os resultados da presente pesquisa apoiam o ensaio de cone de queda como valorosa ferramenta expedita na estimativa da resistência ao cisalhamento não drenada de solos argilosos.

#### 5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

HANSBO, S. **A new approach to the determination of the shear strength of clay by the fall-cone test**. Sweden: Royal Swedish Geotechnical Institute, 1957.

KARLSSON, R. Suggested improvements in the liquid limit test, with reference to flow properties of remolded clays. In: **International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering**. Paris, 1961, Proceedings 5th Int Conf on Soil Mech Found Eng (ICSMFE), 1961. V.1. p. 171-184.

KARLSSON, R. (in cooperation with the laboratory committee of the Swedish Geotechnical Society). **Consistency limits**. Document D6. 1977.

HOULSBY, G. T. **Theoretical analysis of the fall cone test**. London: Geotechnique, 1982. V. 32. p. 111-118.

KOUMOTO, T. HOULSBY, G. T. **Theory and practice of the fall cone test**. London: Geotechnique, 2001. V. 51.p. 701-712.

HEAD, K.H. **Manual of soil laboratory testing**. London: Pentech Press, 1982. V.2.

SCHOFIELD, A.N.; WROTH, C.P. **Critical State Soil Mechanics**. New York: McGraw-Hill, 1968.

WOOD, D.M. **Some fall cone tests**. London: Geotechnique, 1985. V.35. p.64-68.