

Ensaaios Geotécnicos de Laboratório em uma Argila Caulinítica

Ana Claudia Emerenciano Guedes
PUC-PR, Curitiba, Brasil, anaclaudiaeg2@gmail.com

Alexander Scheuermann
Universidade de Queensland, Brisbane, Austrália, a.scheuermann@uq.edu.au

RESUMO: Este trabalho consiste na análise dos resultados obtidos através de ensaios geotécnicos de laboratório realizados em uma argila caulinítica. Realizou-se um estudo de como certas propriedades do solo variam quando este passa por uma mudança de consistência chamada de limite de liquidez, o qual foi determinado pelos métodos de Casagrande e penetração de cone. Os resultados mostraram que os limites de liquidez obtidos pelos dois ensaios são muito próximos. Os estudos abrangem propriedades do solo como a resistência ao cisalhamento não drenada – obtida pelos ensaios de penetração de cone, palheta e reologia – e permissividade dielétrica. Dentre os ensaios para a determinação da resistência ao cisalhamento o mais recomendado é o *vane shear test*, pois este foi o único que pôde ser executado em todas as amostras de solo e, além disso, seus resultados são precisos e não sofrem grande influência da técnica do operador. Em relação aos ensaios de espectroscopia dielétrica verificou-se que a permissividade real medida em alta frequência é muito dependente do teor de umidade, já em baixas frequências a permissividade também depende de outros parâmetros como a densidade.

PALAVRAS-CHAVE: Limite de Liquidez, Resistência ao Cisalhamento não Drenada, *Vane Shear Test*, Permissividade Dielétrica.

1 INTRODUÇÃO

Problemas geotécnicos são frequentemente passíveis quando construções civis são executadas em solos finos, como recalques excessivos, deformações e problemas de estabilidade de taludes. Como esse tipo de solo é sensível a deformações e possui baixa resistência ao cisalhamento, danos estruturais podem acontecer durante a construção ou durante a vida da edificação. Consequentemente, a caracterização dos solos finos é um tópico relevante na mecânica dos solos e na engenharia geotécnica.

Durante o seu intercâmbio pelo programa Ciência sem Fronteiras, a autora deste artigo executou seis ensaios geotécnicos no laboratório da Universidade de Queensland (Austrália), sob a supervisão do professor Dr. Alexander Scheuermann, com o objetivo de estudar diferentes propriedades de um solo fino. Os ensaios realizados compreenderam:

- Método de Casagrande para a determinação do limite de liquidez;
- Ensaio de penetração de cone para a determinação do limite de liquidez e da resistência ao cisalhamento não drenada;
- Ensaio de palheta e ensaio de reologia para a determinação da resistência ao cisalhamento não drenada;
- Espectroscopia dielétrica para a medição da permissividade dielétrica do solo;
- Ensaio no aparelho WP4-T Dewpoint Potentiometer para a medição da sucção no solo.

O artigo apresenta um estudo de como certas propriedades do solo variam quando este passa por uma transição de consistência chamada de limite de liquidez. Os resultados dos ensaios serão comparados para avaliar seus níveis de precisão e correlações entre as diferentes propriedades serão investigadas.

Os Limites de Atterberg representam os

teores de umidade nos quais o solo passa por uma mudança de consistência, a qual pode ser sólida, semissólida, plástica ou líquida. O limite de liquidez (LL) é a transição da consistência plástica para a consistência líquida e representa o teor de umidade no qual o solo se torna tão fraco que passa a escoar como um fluido (WHYTE, 1982).

Em 1932, Arthur Casagrande desenvolveu um aparelho para determinar o limite de liquidez dos solos. Esse aparelho consiste em uma concha semi esférica que é golpeada repetidamente contra uma base de borracha rígida, a uma altura de 10 mm, a partir do giro de uma manivela (BUDHU, 2011).

Uma das desvantagens desse método é que os resultados obtidos podem variar dependendo da técnica do operador e de pequenas diferenças no aparelho utilizado (BUDHU, 2011). Então, com o objetivo de evitar as variações do método de Casagrande, Sherwood e Ryley (1970) sugeriram o uso do cone como uma alternativa para determinar o limite de liquidez dos solos.

O *fall cone test* consiste em posicionar um cone, de ângulo e peso conhecidos, sobre uma amostra de solo. O cone é então liberado, penetrando na amostra por ação de seu peso próprio, e a profundidade de penetração é obtida.

Esse método também pode ser utilizado para a rápida e simples determinação da resistência ao cisalhamento não drenada das argilas. Segundo Hansbo (1957), a resistência ao cisalhamento não drenada (τ) dos solos argilosos depende da profundidade de penetração do cone (h), do peso do cone (Q) e do fator de proporcionalidade (k):

$$\tau = k \frac{Q}{h^2} \quad (1)$$

Outras alternativas para a determinação da resistência ao cisalhamento não drenada dos solos são o ensaio de palheta e o ensaio de reologia. Ambos os métodos consistem em cravar uma palheta de seção cruciforme em uma amostra de solo e submetê-la a uma força de torque. Então, obtém-se a resistência ao cisalhamento não drenada do solo em função de sua deformação.

Nesse trabalho se encontra também abordada a importância da espectroscopia dielétrica, que apesar de não ser um método padrão na mecânica dos solos e na engenharia geotécnica, tem sido cada vez mais utilizada para a caracterização de solos. A permissividade efetiva complexa do solo – o qual é formado por três fases: sólidos, água e ar – é influenciada principalmente pela fase de água. Extensas pesquisas têm sido feitas com o objetivo de investigar a relação existente entre o teor de umidade e a permissividade dielétrica dos solos. Segundo Wagner e Scheuermann (2009), uma técnica promissora para caracterizar um material poroso como o solo é baseada na interação entre as propriedades dielétricas das fases do solo e a sua textura, estrutura e composição.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Solo Estudado

O solo fino escolhido para o estudo foi a argila caulínica, composta em cerca de 100% pelo mineral caulinita, portanto um solo de mineralogia uniforme. Para a execução dos ensaios utilizou-se uma argila caulínica em pó, a qual é comercializada em sacos na cidade de Brisbane (Austrália).

Onze amostras de solo foram preparadas misturando-se a argila caulínica com água, de modo a se obter os seguintes teores de umidade gravimétricos: 40%, 50%, 60%, 70%, 80%, 90%, 100%, 110%, 120%, 130% e 140%.

2.2 Método de Casagrande para a Determinação do Limite de Liquidez

O ensaio foi executado de acordo com as recomendações da ASTM D4318 – 2010 (*Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils*).

Cada amostra de argila caulínica foi colocada na concha de modo que a espessura fosse de aproximadamente 10 mm em relação ao ponto mais profundo. Após isso, a superfície foi alisada com uma espátula e a amostra foi separada em duas metades simétricas com o

auxílio de um cinzel (Figura 1). O próximo passo consistiu em levantar a concha e depois golpeá-la contra a base do aparelho, girando a manivela com uma velocidade constante. Para cada amostra foi obtido o número de golpes necessário para fechar a ranhura em um comprimento de aproximadamente 13 mm.

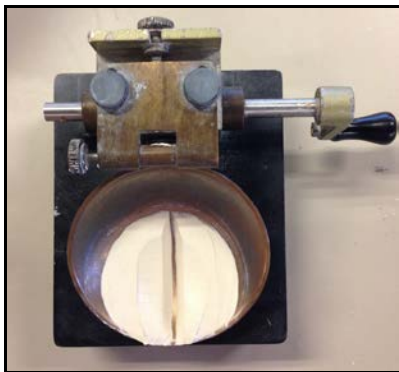


Figura 1. Método de Casagrande.

O ensaio foi executado em seis amostras com teores de umidade variando de 80% a 130%. Nos solos com umidades inferiores o ensaio se tornou difícil e os resultados menos acurados.

2.3 Penetração de Cone (*Fall Cone Test*)

O *fall cone test* foi executado de acordo com a especificação técnica ISO/TS 17892-6 – 2004 (*Geotechnical investigation and testing - Laboratory testing of soil - Part 6: Fall cone test*) e o cone utilizado possuía uma massa de 80 g e um ângulo de 30°.

O recipiente contendo a amostra deve ser posicionado de modo que a ponta do cone apenas toque a superfície do solo (Figura 2), então o cone é liberado durante 5 segundos e depois travado. As profundidades de penetração foram obtidas através do penetrômetro, o qual possuía uma precisão de 0,01 mm.

O *fall cone test* foi executado em seis amostras com teores de umidade variando de 40% a 90%. Nos solos com teores de umidade superiores o cone penetrou completamente nas amostras.

Os resultados obtidos a partir desse ensaio também foram utilizados para calcular a resistência ao cisalhamento não drenada a partir da Equação 1. O fator de proporcionalidade (k) foi determinado utilizando a equação publicada

por Wood (1986):

$$k_{\alpha} = 0,038 + 0,452 \cot \alpha \quad (2)$$

Substituindo α na Equação 2 por 30°, obtém-se um valor de 0,821 para o fator de proporcionalidade.

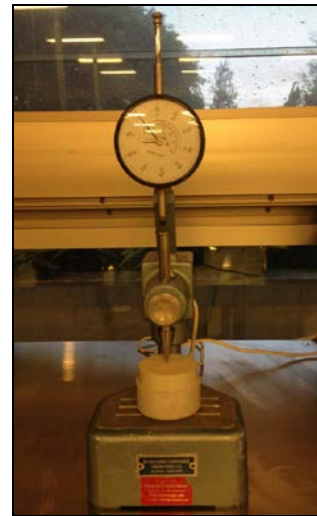


Figura 2. *Fall cone test*.

2.4 Ensaio de Palheta (*Vane Shear Test*)

Os ensaios de palheta foram conduzidos seguindo as recomendações da ASTM D4648/D4648M – 2013 (*Standard Test Method for Laboratory Miniature Vane Shear Test for Saturated Fine-Grained Clayey Soil*). Utilizou-se o aparelho Laboratory Shear Vane FL 4 – Wille Geotechnik e o programa GEOsys 8.7.8 versão 1.0 para controlar os testes. A palheta possuía quatro pás, um diâmetro de 12,7 mm e uma altura de 25,4 mm.

Primeiramente, cada amostra de solo foi colocada em um recipiente cilíndrico de 105 mm de altura e 105 mm de diâmetro, o qual foi fixado no aparelho através das alças (Figura 3). Girando-se a manivela do aparelho a palheta é abaixada e inserida na amostra. Após isso, o ensaio passa a ser completamente automatizado e controlado pelo computador, no qual é possível escolher os parâmetros para a realização do teste.

No final de cada ensaio o programa fornece o gráfico da resistência ao cisalhamento (kN/m^2) versus o ângulo de rotação da palheta (°). O ensaio pôde ser executado em todas as amostras.



Figura 3. Vane shear test.

2.5 Ensaio de Reologia

Os ensaios de reologia foram executados utilizando o AR 1500ex rheometer – TA instruments. Sete amostras com teores de umidade variando de 80% a 140% foram testadas. Os ensaios de reologia não foram executados nas amostras com teores de umidade inferiores devido à consistência mais rígida, o que poderia danificar as células de carga do aparelho.

Os ensaios de reologia foram executados de maneira similar aos ensaios de palheta (ASTM D4648/D4648M – 2013).

2.6 Medições Dielétricas

As propriedades dielétricas do solo foram medidas em diferentes frequências, variando de 100 kHz a 3 GHz, utilizando a técnica *N based open-ended coaxial line* juntamente com o aparelho E5061B ENA Series Network Analyzer (5Hz – 3 GHz) – Agilent Technologies.

2.7 Ensaios de Sucção

Após cada ensaio de medição dielétrica uma amostra de solo era retirada, colocada em outro recipiente e inserida no aparelho WP4-T Dewpoint Potentiometer, o qual possui alta precisão e mede a sucção consideravelmente rápido (em média 5 minutos).

3 RESULTADOS OBTIDOS

3.1 Limite de Liquidez

3.1.1 Método de Casagrande

O limite de liquidez é definido como o teor de umidade correspondente ao valor de 25 golpes, como mostra a Figura 4. O valor obtido para o LL foi de 80%.

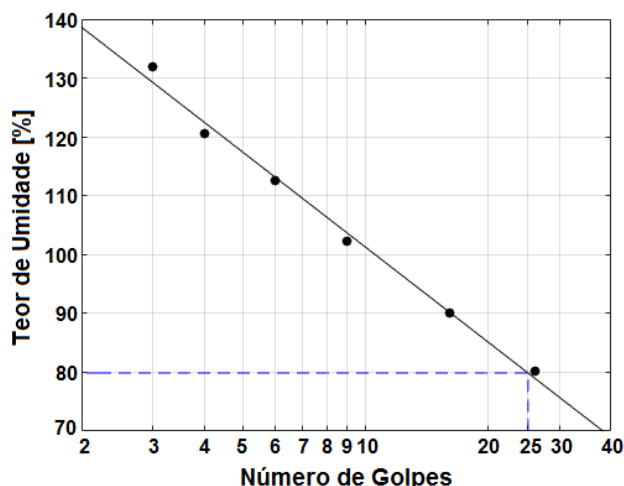


Figura 4. Limite de liquidez (método de Casagrande).

3.1.2 Fall Cone Test

Neste ensaio, o limite de liquidez representa o teor de umidade no qual um cone que possui um ângulo de 30° e peso de 80 gf penetra 20 mm. Obteve-se um valor de 81% (Figura 5).

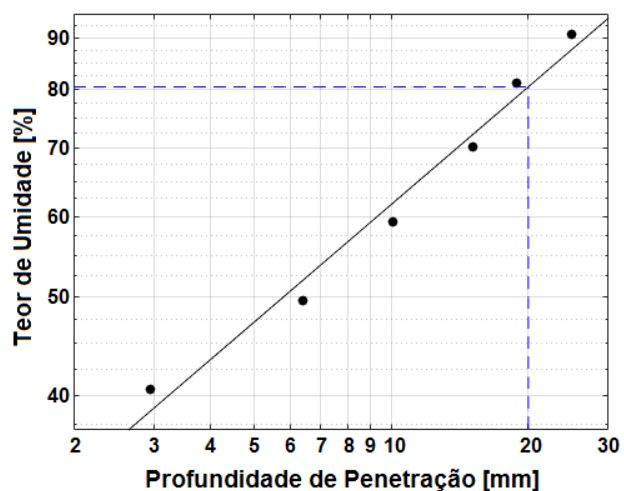


Figura 5. Limite de liquidez (*fall cone test*).

3.2 Resistência ao Cisalhamento não Drenada

3.2.1 Fall Cone Test

A resistência ao cisalhamento não drenada, calculada a partir da Equação 1, é apresentada na Figura 10 ($k = 0,821$) em função da profundidade de penetração do cone. A resistência ao cisalhamento não drenada do solo no limite de liquidez (penetração = 20 mm) é igual a 1,61 kPa.

A Figura 8 apresenta os valores do teor de umidade (%) versus a resistência ao cisalhamento não drenada (kPa).

3.2.2 Vane Shear Test

A Figura 6 apresenta os gráficos da resistência ao cisalhamento versus o ângulo de rotação da palheta.

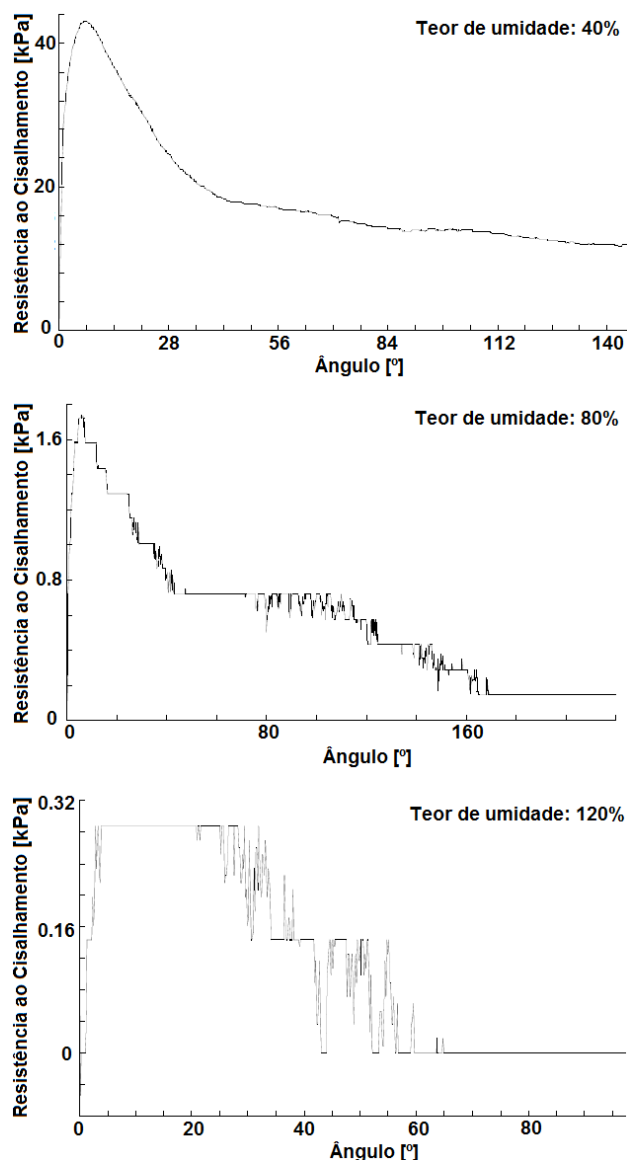


Figura 6. Gráficos da resistência ao cisalhamento versus o ângulo de rotação da palheta gerados pelo programa GEOsys 8.7.8 versão 1.0.

Observa-se que conforme o teor de umidade aumenta, os gráficos começam a apresentar muitos ruídos, os quais aparecem com maior intensidade a partir do teor de umidade de 80% (LL). Para as amostras com teores de umidade mais elevados, alguns valores de resistência ao cisalhamento foram negativos. Isso mostra que apesar do aparelho apresentar gráficos precisos para as amostras de solo com consistências mais sólidas, ele não é sensível o bastante para testar solos de consistência líquida.

Os valores da máxima resistência ao cisalhamento de cada amostra estão apresentados na Figura 9.

3.2.3 Ensaio de Reologia

A relação entre a resistência ao cisalhamento não drenada e a deformação do solo está apresentada na Figura 7. Os resultados obtidos através do reômetro são mais acurados, não apresentando ruídos até mesmo para a amostra de consistência mais líquida.

A Figura 9 apresenta a relação entre os teores de umidade das amostras e os respectivos valores de máxima resistência ao cisalhamento.

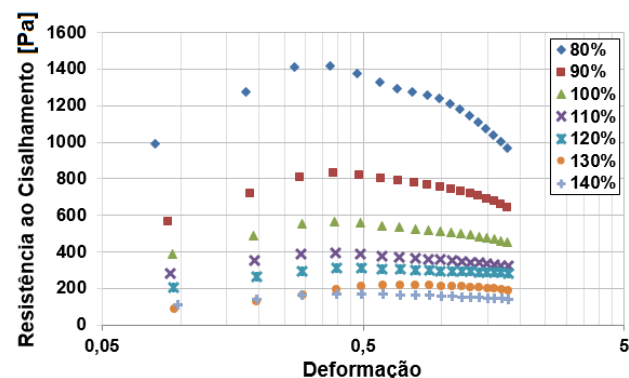


Figura 7. Resistência ao cisalhamento não drenada versus deformação.

3.2.4 Comparação entre os Métodos para Determinação da Resistência ao Cisalhamento

A Figura 8 apresenta a comparação entre as resistências ao cisalhamento não drenadas obtidas a partir do ensaio de palheta e do ensaio de penetração de cone. Os valores de resistência são muito semelhantes para os teores de umidade entre 90% e 50%, porém, para o teor de umidade de 40% as resistências obtidas pelo *vane shear test* e pelo *fall cone* são de 44,82

kPa e 74,04 kPa respectivamente. Essa considerável diferença indica que possivelmente a Equação 1 superestima os valores de resistência ao cisalhamento dos solos mais secos.

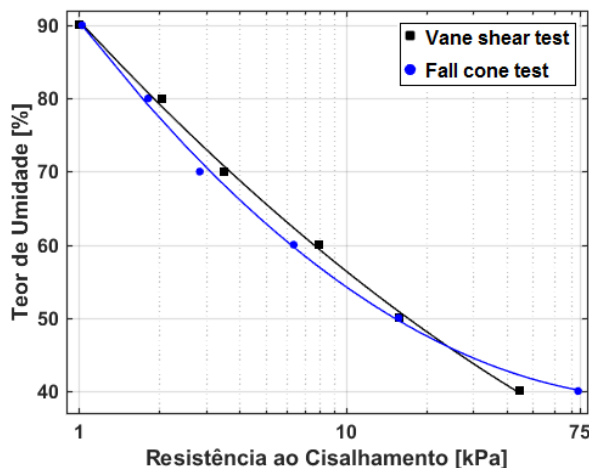


Figura 8. Comparação entre o *vane shear test* e o *fall cone test*.

Na Figura 9 se observa a comparação entre as resistências ao cisalhamento não drenadas obtidas a partir do ensaio de palheta e do ensaio de reologia. Observa-se que para os teores de umidade entre 100% e 140% os resultados são muito semelhantes, com diferenças menores que 0,1 kPa. A maior diferença entre os valores de resistência ao cisalhamento é de apenas 0,63 kPa e ocorre no teor de umidade 80%. Então, apesar do aparelho Laboratory Shear Vane FL 4 apresentar gráficos com ruídos quando solos de consistência líquida são testados, seus valores de máxima resistência ao cisalhamento são satisfatórios.

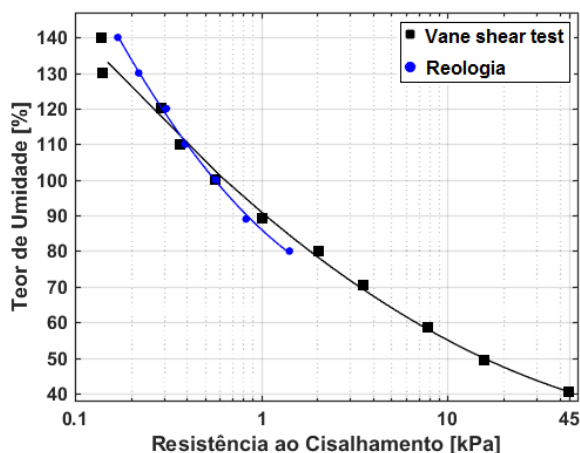


Figura 9. Comparação entre o *vane shear test* e o ensaio de reologia.

A Figura 10 apresenta a relação entre a profundidade de penetração do cone e a resistência ao cisalhamento não drenada. Os pontos em preto representam a penetração do cone e a respectiva resistência ao cisalhamento obtida a partir do ensaio de palheta. A curva em vermelho é resultante da Equação 1, utilizando $k = 0,821$. Então, com o objetivo de determinar o valor de k que melhor se ajusta aos dados do ensaio de palheta, a Equação 1 foi utilizada novamente a partir do método dos mínimos quadrados, resultando na curva em verde ($k = 0,516$).

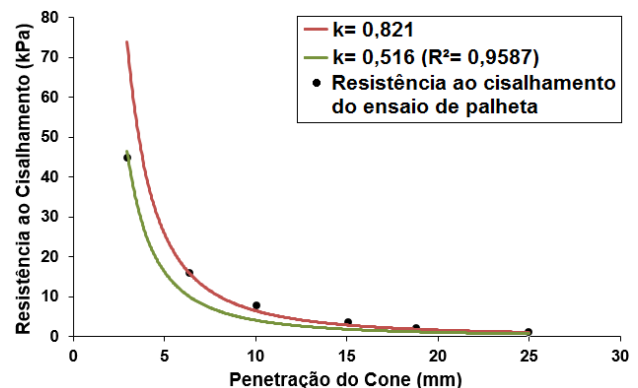


Figura 10. Profundidade de penetração do cone versus a resistência ao cisalhamento não drenada.

3.3 Correlações entre o Limite de Liquidez e a Resistência ao Cisalhamento não Drenada

A Figura 11 apresenta os resultados da resistência ao cisalhamento não drenada obtidos a partir do ensaio de palheta versus o número de golpes. Nessa relação, a resistência ao cisalhamento do solo no limite de liquidez, que corresponde ao valor de 25 golpes, é de aproximadamente 1,9 kPa.

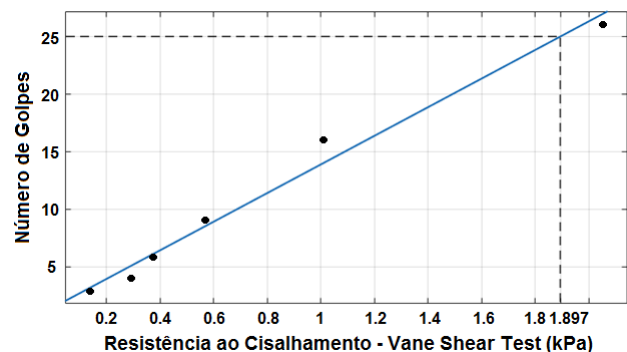


Figura 11. Relação entre a resistência ao cisalhamento não drenada medida no *vane shear test* e o número de golpes do aparelho de Casagrande.

A Figura 12 apresenta os resultados da resistência ao cisalhamento obtidos no *vane shear test* versus a profundidade de penetração do cone. Nesse caso, a resistência ao cisalhamento no LL, correspondente ao valor de 20 mm de profundidade, é de aproximadamente 1,7 kPa.

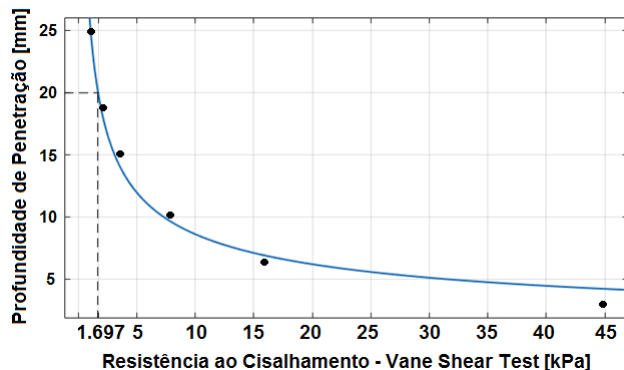


Figura 12. Relação entre a resistência ao cisalhamento não drenada medida no *vane shear test* e a profundidade de penetração do cone.

3.4 Medições Dielétricas

A Figura 13 mostra a relação entre a permissividade dielétrica real e a frequência. Como pode ser observado, a permissividade do solo diminui com o aumento da frequência. Entre as frequências de 100 kHz e 100 MHz a permissividade real diminui consideravelmente, e a partir desse ponto a redução passa a ser mais sutil.

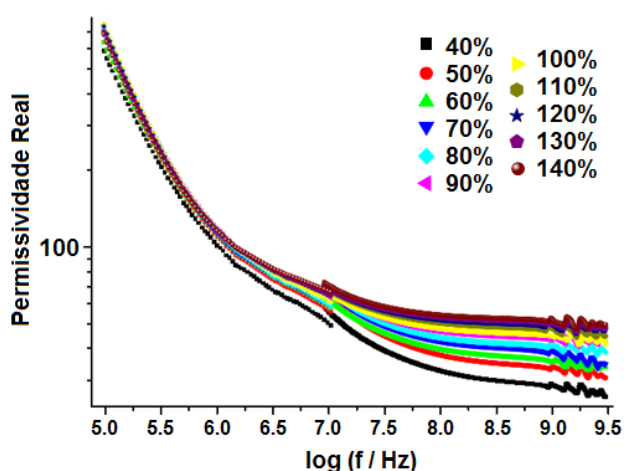


Figura 13. Permissividade Real x Frequência.

A Figura 14 apresenta a permissividade real das amostras de solo, em diferentes frequências, versus o teor de umidade. A partir desse gráfico é possível concluir que a permissividade real

medida em alta frequência, por exemplo em 1 GHz, é dependente do teor de umidade, pois conforme o teor de umidade aumenta a permissividade também aumenta. A permissividade medida na frequência de 100 kHz varia com os diferentes teores de umidade, porém não de forma linear como em alta frequência. Segundo Schwing et al. (2014), as propriedades dielétricas obtidas em baixas frequências não dependem apenas do teor de umidade, mas também dependem de outros parâmetros como a densidade.

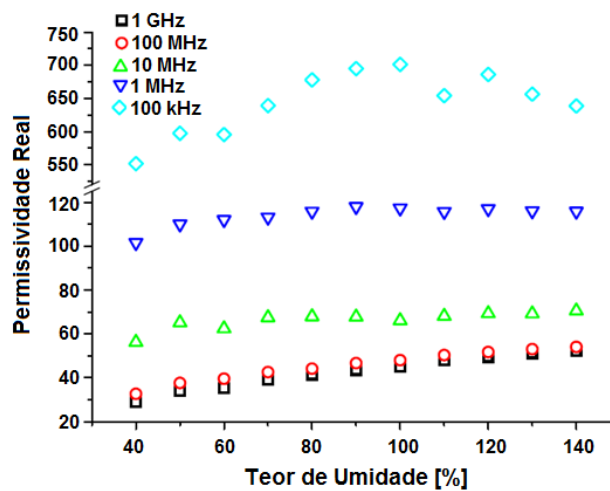


Figura 14. Permissividade x Teor de Umidade.

As frequências entre 400 kHz e 1 MHz apresentam a mesma tendência, onde os valores da permissividade real aumentam até atingir um pico, o qual está próximo do limite de liquidez, e depois diminuem. Assim, para a argila caulínica em estudo, conclui-se que existe uma relação entre os picos da permissividade real, obtidos entre as frequências de 400 kHz e 1 MHz, e o limite de liquidez do solo.

3.5 Ensaios de Sucção

Todos os ensaios de sucção realizados no aparelho WP4-T Dewpoint Potentiometer resultaram em 0 MPa, ou seja, todas as amostras estavam saturadas.

4 CONCLUSÕES

A partir da análise dos resultados do limite de liquidez conclui-se que, apesar das críticas, o método de Casagrande apresenta resultados

satisfatórios. A diferença entre os limites de liquidez foi de apenas 1 ponto percentual.

Através da Equação 1, determinou-se que a resistência ao cisalhamento não drenada da argila caulínica no limite de liquidez é igual a 1,61 kPa. O valor da resistência ao cisalhamento no LL também foi obtida através das correlações entre o ensaio de palheta e os ensaios de determinação do LL – método de Casagrande e *fall cone test* –, resultando em 1,9 kPa e 1,7 kPa respectivamente.

Dentre os ensaios para a determinação da resistência ao cisalhamento o mais recomendado é o *vane shear test*. Este foi o único que pôde ser executado em todas as amostras de solo e, além disso, seus resultados não sofrem grande influência da técnica do operador. Apesar dos gráficos plotados pelo aparelho apresentarem muitos ruídos para solos de consistência líquida, os resultados de máxima resistência ao cisalhamento se mostraram satisfatórios quando comparados com outros ensaios.

Por fim, a partir dos ensaios de medição das propriedades dielétricas verificou-se que a permissividade do solo diminui com o aumento da frequência. Além disso, a permissividade real medida em alta frequência é muito dependente do teor de umidade, já em baixas frequências a permissividade também depende de outros parâmetros como a densidade.

AGRADECIMENTOS

A autora agradece ao CNPq pelo apoio à pesquisa em forma da bolsa de estudos Ciência sem Fronteiras.

REFERÊNCIAS

- ASTM (2010) Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils. D 4318. American Society for Testing and Materials. West Conshohocken, PA. 16 p.
- ASTM (2013) Standard Test Method for Laboratory Miniature Vane Shear Test for Saturated Fine-Grained Clayey Soil. D 4648 / D 4648 M. American Society for Testing and Materials. West Conshohocken, PA. 7 p.
- Budhu, M. (2011) *Soil Mechanics and Foundations*, 3rd ed., Wiley, Hoboken, NJ, USA, 780 p.
- Hansbo, S. (1957) A new approach to the determination of the shear strength of clay by the fall-cone test, *Royal Swedish Geotechnical Institute Proceedings*, Royal Swedish Geotechnical Institute, Stockholm, SE, No. 14, p. 7-47.
- ISO (2004) Geotechnical investigation and testing – Laboratory testing of soil - Part 6: Fall cone test. TS 17892-6. International Organization for Standardization. Geneva, CH. 8 p.
- Schwing, M., Chen, Z., Scheuermann, A., Williams, D.J. e Wagner, N. (2014) Experimental study on the relationship of mechanic and hydraulic state variables, and the dielectric properties of clays, *Unsaturated Soils: Research and Applications - Proceedings of the 6th International Conference on Unsaturated Soils, UNSAT 2014*, CRC Press/Balkema, Leiden, NL, p. 247-253.
- Sherwood, P. T. e Ryley, M. D. (1970) An investigation of a cone-penetrometer method for the determination of the liquid limit, *Géotechnique*, Vol. 20, No. 2, p. 203-208.
- Wagner, N. e Scheuermann, A. (2009) On the relationship between matric potential and dielectric properties of organic free soils: a sensitivity study, *Canadian Geotechnical Journal*, NRC Research Press, Vol. 46, No. 10, p. 1202-1215.
- Whyte, I. L., BScTech, DipASE e CEng (1982) Soil plasticity and strength - a new approach using extrusion, *Ground Engineering*, Vol. 15, No. 1, p. 16-20.
- Wood, D.M. (1986) Discussion: Some fall-cone tests, *Géotechnique*, Vol. 36, No. 4, p. 609-610.