

Parâmetros de deformabilidade e resistência de um solo coluvionar não saturado do município de Belo Horizonte

Saulo Rezende Vilela

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

Lúcio Flávio de Souza Villar

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

Antônio Ananias de Mendonça

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

Gustavo Ferreira Simões

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

RESUMO: Este trabalho avalia as variações nos parâmetros geotécnicos – deformabilidade e resistência – de um solo coluvionar do município do Belo Horizonte, Minas Gerais, frente as diferentes condições de saturação. A caracterização completa permitiu classificar a amostra como um solo areno-siltoso mediante a composição de 1% de pedregulho; 49% areia; 35% de silte; e 15% de argila. A determinação dos Limites de Atterberg indicou $LL=36\%$ e não plástico. Os coeficientes de recompressão (C_r), compressão (C_c) e descompressão (C_d) variaram de 0,09 para 0,04; de 0,29 para 0,14; e de 0,05 para 0,03, da condição inundada para a condição de umidade higroscópica. Estes valores indicam que o solo é menos compressível quando não saturado. Os parâmetros de resistência obtidos na condição inundada ($S=90\%$) e na condição de umidade higroscópica ($S=7\%$) demonstraram um ganho de treze vezes (13x) no intercepto coesivo para a condição de umidade higroscópica. Tal fato indica que a saturação influencia na determinação dos parâmetros de resistência deste solo. O ângulo de atrito interno do material, entretanto, não sofreu alterações. Os resultados deste estudo mostram a importância de se analisar variações nos parâmetros de deformabilidade e resistência de solos não saturados para subsidiar projetos de engenharia que envolvam solos com variações relevantes de saturação.

PALAVRAS-CHAVE: Solos não saturados, parâmetros de deformabilidade, parâmetros de resistência.

1 INTRODUÇÃO

Segundo DeMillo (1998), somos afetados por inúmeros fenômenos da natureza e, desde o primórdio da civilização, tentamos controlá-los ou, ao menos, conviver com eles.

Para Marinho (2005), o desejo de ter o controle destes fenômenos é que nos leva a estudar sua influência em nossas vidas. A condição climática, um destes fenômenos, e sua interação com o solo, é um dos aspectos que

condicionam a boa interpretação da mecânica dos solos para fins de engenharia.

2 OS SOLOS NÃO SATURADOS

Para Ng & Menzies (2007), a mecânica dos solos divide o comportamento dos solos com base na saturação. Esta divisão, entretanto, pode ser desnecessária dado que os conceitos dos solos não saturados situa a mecânica dos solos

saturados como um caso específico da mecânica dos solos não saturados, Figura 1.

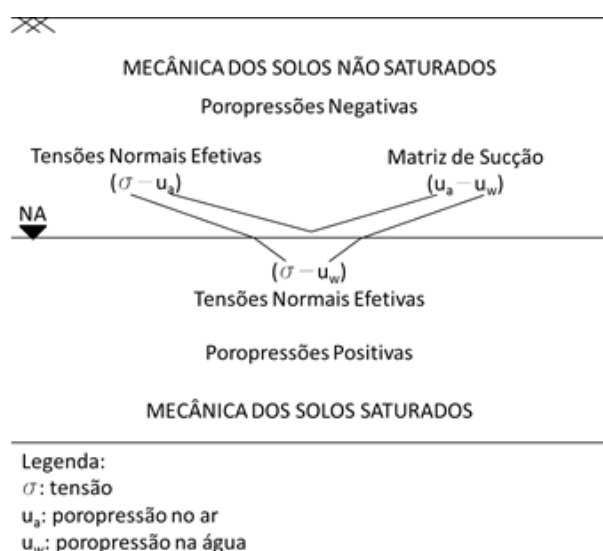


Figura 1. Mundo generalizado da Mecânica dos Solos (Adaptado NG & MENZIES, 2007).

Pela Figura 1 pode-se observar que caso não haja poropressão no ar, ou pressão de vapor, casos de solos totalmente secos ou completamente saturados, o princípio de tensões efetivas postulado por Terzaghi (1925) passa a ser válido.

2.1 Os solos não saturados

A região acima do nível d'água é usualmente dividida segundo o seu grau de saturação. Nesta região, ao invés das duas fases, sólida e líquida, como nas regiões saturadas ou secas, Fredlund & Morgenstern (1977) reconhecem a existência de quatro (04) fases: sólida, líquida, gasosa e interface líquida-gasosa, chamada por Paddy (1969) de membrana contrátil (NG & MENZIES, 2007).

Segundo Brandy & Buckman (1979), a água retida pelos sólidos do solo, submetida a tensões superiores a 31 MPa, é denominada higroscópica. Tensões desta ordem fazem com que a água perca a sua característica líquida e se movimente principalmente na forma de vapor. A água dos microporos, denominada capilar, possui faixa de tensão variável entre 10 kPa e 31.000 kPa. A água acima da capacidade de campo, que é a quantidade máxima de água retida pelos poros do solo após inundação, já é

capaz de se movimentar pela ação da força gravitacional, sendo designada água livre.

2.2 Sucção como Fator Interferente na Resistência ao Cisalhamento dos Solos não Saturados

Fredlund & Rahardjo (1993) indicam que a matriz de sucção (ψ_m) pode alterar o intercepto coesivo “c” da equação de resistência ao cisalhamento, fundamentada no critério de resistência combinado Mohr-Coulomb.

Conforme proposto por Fredlund & Rahardjo (1993), a envoltória de resistência de Mohr-Coulomb, originária da equação de resistência proposta por Coulomb (1776), requer, no caso dos solos não saturados, um eixo adicional para representar a sucção mátrica na condição não saturada, Figura 2.

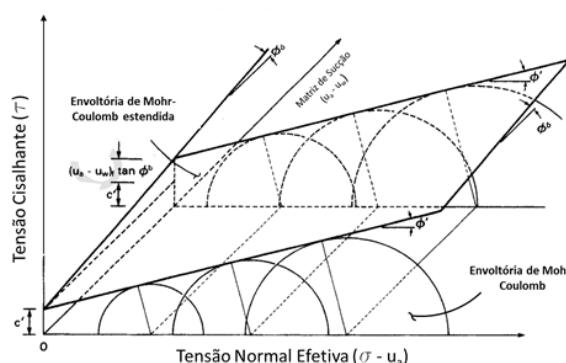


Figura 2. Envoltória de resistência de solos não saturados (Adaptado FREDLUND & RAHARDJO, 1993).

Vilar (2006) apresenta um modelo capaz de prever as variações dos parâmetros de resistência de um solo, não saturado, com base nos seus parâmetros de resistências para as condições saturadas e de umidade higroscópica, bem como na curva característica do material. O modelo é capaz de varrer uma gama de parâmetros com base apenas nas variáveis citadas. Segundo o autor, o intercepto coesivo de resistência na condição não saturada altera-se conforme relação apresentada pela Equação 1.

$$c = c' + \psi / (a + b\psi) \quad (1)$$

Em que c' é o intercepto coesivo efetivo do solo na condição saturada; ψ é a sucção mátrica para a condição de interesse; e, “a” e “b” são

parâmetros auxiliares do modelo definidos com base nas Equações 2 e 3.

$$a = 1/(tg \phi') \quad (2)$$

$$b = 1/(c_{ult} - c') \quad (3)$$

Em que ϕ' é a média dos ângulos de atrito efetivos para as condições de total saturação e umidade higroscópica; e, c' e c_{ult} são os interceptos coesivos nas condições saturadas e umidade higroscópica, respectivamente.

Segundo Fredlund & Rahardjo (1993), a sucção mátrica pode ser medida pelo uso de equipamentos específicos como os psicrômetros, tensiômetros e/ou por técnicas em laboratório como a do papel filtro, por exemplo.

2.3 Definição da Sucção Mátrica pela Técnica do Papel Filtro

Segundo Fredlund & Rahardjo (1993), é possível utilizar da técnica do papel filtro para medir a sucção de um solo. A técnica é um método indireto de medir a sucção em um solo. Segundo Villar & Campos (2001), quando dois materiais porosos e em condições de umidade distintas são colocados em um ambiente lacrado e juntos (em contato ou não), estes trocarão água ou vapor d'água buscando o equilíbrio. Segundo Ng & Menzies (2007), o equilíbrio será alcançado por trocas líquidas ou de vapor entre a amostra de solo e o papel filtro por um período de tempo.

Segundo Villar & Campos (2001), a água que o papel filtro absorve pode ser tomada como indicadora da sucção. A sucção do solo, por meio do papel filtro, é determinada com o auxílio da curva de calibração do papel filtro com soluções salinas de sucção osmótica conhecidas.

O ensaio tem como produto a curva característica do solo (ou curva de retenção de umidade), Figura 3, que, segundo Vivian (2008), representa a relação entre a água presente nos poros do solo e sua sucção.

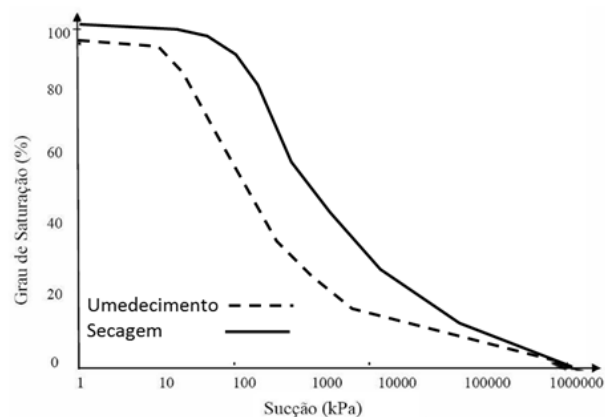


Figura 3. Curva característica de um solo na trajetória de secagem e umedecimento (adaptado VIVIAN, 2008).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Ensaios de adensamento

Os ensaios de adensamento foram realizados em amostras indeformadas de solo seguindo a norma reguladora ABNT (1990) – NBR 12.007 – Ensaio de adensamento unidimensional.

Os corpos de prova (CPs) foram criteriosamente moldados segundo as seguintes dimensões: 50 mm de diâmetro e 20 mm de altura. Foram realizados ensaios inundado e não inundado, na condição de umidade higroscópica correspondente a 2,30% ($w=2,30\%$), com sete estágios de carregamento (12,5 kPa; 25 kPa; 50 kPa; 100 kPa; 200 kPa; 400 kPa; e, 800 kPa) e três estágios de descarregamento (400 kPa; 200 kPa; e, 100 kPa).

3.2 Ensaios de Cisalhamento Direto

Parte dos ensaios de cisalhamento direto foram realizados em consonância com a norma americana ASTM (2003) – D3080 - *Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions* – e outra parte seguiu a mesma norma excluindo, no entanto, a fase de inundação. Este último ensaio foi conduzido com as amostras secas ao ar, na umidade higroscópica ($w=2,30\%$), de forma a possibilitar a definição dos parâmetros de resistência na condição não saturada conforme proposta de Vilar (2006).

Os CPs extraídos dos blocos, foram talhados para resultarem geometria prismática, com

100 mm de lado e 20 mm de altura. Nos ensaios com as amostras inundadas, a cada carregamento aplicado, observou-se um período de 24 horas para adensamento. Para estabelecer a condição de carregamento drenado a velocidade de cisalhamento adotada foi de 0,20 mm/min, na segunda etapa dos ensaios, que foram conduzidos até deformações próximas de 13%.

3.2 Ensaios do Papel Filtro

A determinação da sucção mátrica pela técnica do papel filtro seguiu o padrão da norma americana ASTM (2003) – D5298 - *Measurement of Soil Potencial (Suction) Using Filter Paper*. O papel filtro utilizado foi o *Whatman's 42*, sendo a curva de calibração estabelecida pela norma considerada como a de referência para determinação dos valores de sucção associados as umidades encontradas nos ensaios.

Para determinação da sucção mátrica foram moldados 22 CPs com diâmetro e altura de aproximadamente 50 e 20 mm respectivamente. Estes CPs foram moldados a partir das amostras indeformadas. Parte destas amostras (11 CPs) foram deixadas exposta ao ambiente a fim de atingirem a umidade higroscópica para posterior adição das quantidades pré-determinadas de água para realização dos ensaios em diferentes graus de saturação. Os graus de saturação previamente estabelecidos para realização dos ensaios foram 100%, 90%, 80%, 70%, 60%, 50%, 40%, 30%, 20%, 10% e 0 aproximadamente, para ajustar a curva com boa precisão. A outra parte das amostras (11 CPs) foi totalmente saturada e os CPs tiveram redução dos graus de saturação alcançados a partir de secagem ao ar.

Com o papel filtro no topo e na base, os CPs foram lacrados e colocadas em caixas de isopor que foram acondicionadas em ambiente com temperatura e umidade do ar controlada, por um período de 10 dias, para efetuar as trocas líquidas entre o solo e o papel até sua equalização. Após este período, as amostras foram deslacradas e o papel filtro teve a sua variação de umidade monitorada por um período de três minutos em uma balança de

precisão de 10^{-4} g. Cessado o tempo para acompanhamento da variação da massa, o papel filtro foi levado a uma estufa a 65°C até a constância de massa (completa secagem) para repetição do processo de pesagem para definição do peso seco do papel.

Plotando-se os gráficos da variação de massa com a raiz do tempo foi possível, por meio de extrapolação do trecho reto das curvas, obter as quantidades de água e massa do papel filtro seco no tempo zero. Os graus de saturação pré-estabelecidos foram aferidos pela determinação do volume e dos teores de umidade no topo, meio e base dos CPs no final de cada ensaio.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Parâmetros de Deformabilidade

A Tabela 1 apresenta os coeficientes de recompressão (C_r), compressão (C_c) e descompressão (C_d). A Tabela 2 apresenta as tensões de pre-adensamento (σ'_{pa}), o módulo oedométrico (C_v) e a permeabilidade (k) mediante carregamento de 100 kPa para o corpo de prova inundado e para a umidade higroscópica.

Tabela 1. Coeficientes de Recompressão, Compressão e Descompressão.

Condição	Parâmetros do Ensaio		
	C_r	C_c	C_d
Inundado	0,09	0,29	0,05
Umidade Higroscópica	0,04	0,14	0,03

Tabela 2. Tensão de Pre-adensamento, Módulo Oedométrico e Permeabilidade.

Condição	Parâmetros do Ensaio		
	σ'_{pa} (kPa)	C_v (m ² /s) 100 kPa	k (m/s) 100 kPa
Inundado	100,00	$1,07 \times 10^{-7}$	$7,07 \times 10^{-9}$
Umidade Higroscópica	150,00/ 190,00	$1,35 \times 10^{-6}$	-

Os dados apresentados demonstram que a tensão de pre-adensamento alterou frente as diferentes condições de contorno de realização do ensaio, inundado e umidade higroscópica.

Na condição inundada identificou-se um valor de tensão de pre-adensamento de 100 kPa pelos métodos de Casagrande e Pacheco Silva, enquanto que para o ensaio conduzido na umidade higroscópica estes valores foram 150 kPa e 190 kPa, respectivamente.

Dados apresentados por Komori et al. (2014), para avaliar a variação dos parâmetros de deformabilidade de um solo de Londrina (PR), indicaram que a tensão de pre-adensamento obtida pelo ensaio na condição inundada e sem inundação podem apresentar valores distintos. Os ensaios transcorridos sem a inundação apresentaram, quase sempre, valores de tensão de pré-adensamento superiores aos encontrados para o ensaio conduzido de maneira inundada.

Assim sendo, as respectivas diferenças (de 50% e 90%) no valor da tensão de pre-adensamento, da condição inundada para a condição de umidade higroscópica, pode ocorrer dado que outros materiais já apresentaram variações para alterações ainda inferiores nos graus de saturação. Segundo Vargas (1977), esta condição está associada ao ressecamento das amostras, introduzindo nelas uma pressão de pré-adensamento maior que a natural.

Os parâmetros de deformabilidade sofreram alterações para as duas condições, porém mais compressível no ensaio inundado. Os parâmetros de deformabilidade observados para a condição inundada foram, em média, duas vezes (2x) superiores aos observados no ensaio conduzido na umidade higroscópica. Os módulos odom tricos também variaram, notadamente o da umidade higroscópica se mostrou maior. Sendo assim, há indícios de que o material possa ser duas vezes (2x) mais compressível se estiver na condição inundada. Este fato pode estar relacionado ao ganho de resistência do material pela sucção.

As Figuras 4 e 5 apresentam os gráficos com as variações de índices de vazios e as tensões efetivas aplicadas em “escala log”, de onde foram retirados os parâmetros apresentados anteriormente.

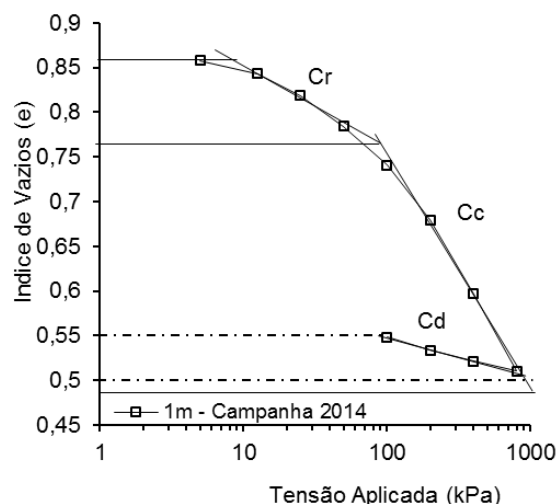


Figura 4. Parâmetros de compress bilidade (amostra inundada)

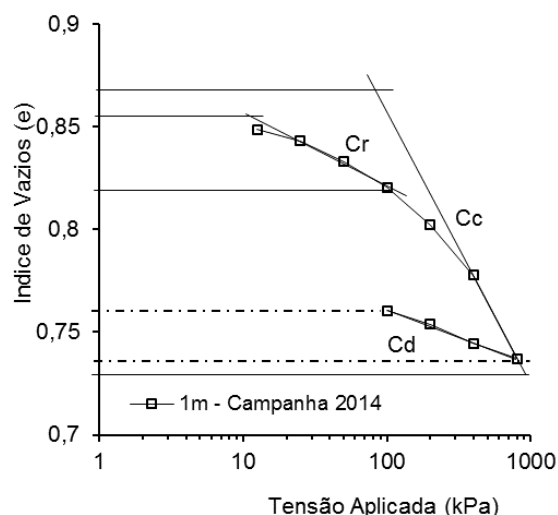


Figura 5. Parâmetros de compress bilidade (amostra umidade higroscópica).

Observa-se que o material se comporta de forma distinta dependendo do nível de tensões a que está submetido e   condição de saturação em que se encontra.

4.2 Colapsividade do Material

A avaliação da colapsividade, analisada quantitativamente segundo metodologia de Vargas (1977), indicou que o material   colaps vel para tensões superiores a 50 kPa. Na Figura 6, pela curva referente a umidade higroscópica normalizada, são apresentadas as variações dos índices de vazios com as tensões

aplicadas para os ensaios conduzidos com inundação e umidade higroscópica, a fim de possibilitar as comparações realizadas. Verificam-se índices de colapsividade (i) – variações relativas nos índices de vazios – sempre superiores a 0,02, o que indica o colapso conforme sugestão de Vargas (1977). Observa-se ainda, que quanto maior é a tensão aplicada, maior é a variação dos vazios. Na tensão de 800 kPa, por exemplo, o índice de colapsividade chega a 0,13 aproximadamente, sendo este um valor seis vezes (6x) superior ao sugerido por Vargas (1977) para indicar que o material é colapsível.

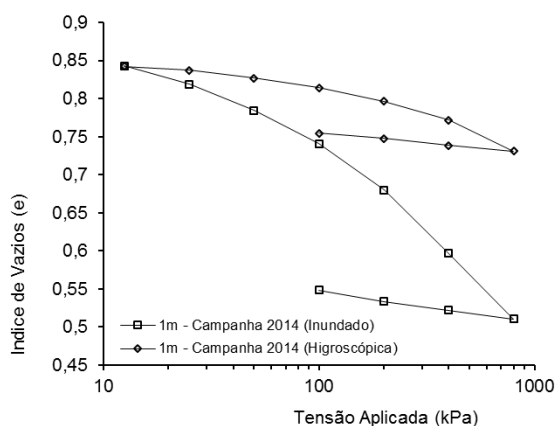


Figura 6. Avaliação da Colapsividade pelo Método de Vargas (1977).

4.3 Parâmetros de Resistência (Cisalhamento Direto)

Os ensaios de cisalhamento direto (CD) foram conduzidos em amostras saturadas por inundação ($S=90\%$) e na umidade higroscópica ($S=7\%$). As Figuras 7 e 8 apresentam os gráficos com as variações da tensão cisalhante e altura dos corpos de prova frente o deslocamento lateral imposto pela caixa de cisalhamento durante o ensaio.

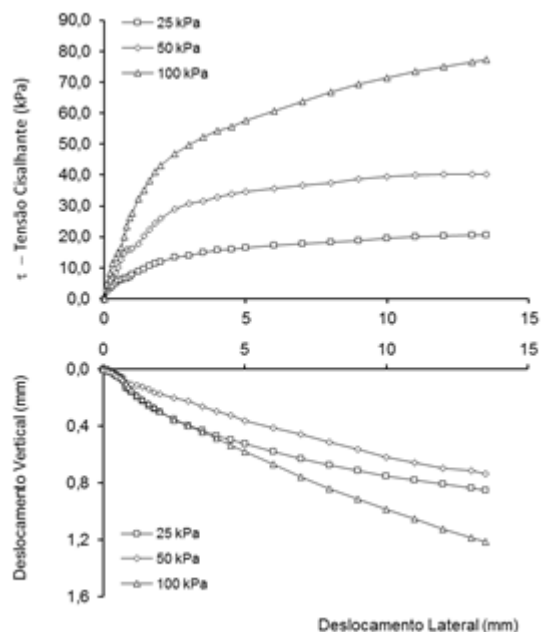


Figura 7. Ensaio Cisalhamento Direto Inundado.

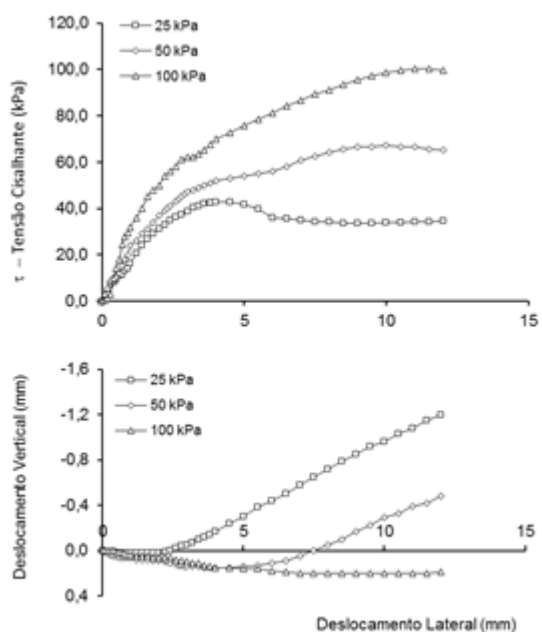


Figura 8. Ensaio Cisalhamento Direto Umidade Higroscópica

Pode-se observar, pelas curvas de tensão cisalhante *versus* deslocamento lateral e deslocamento vertical *versus* deslocamento lateral, que os ensaios transcorridos com tensões normais de 25 kPa e 50 kPa para a umidade higroscópica apresentam pico e dilatação dos CPs, comportamento típico de materiais pré-adensados. O comportamento

observado corrobora que a tensão de pré-adensamento é superior a 50 kPa, assim como encontrado no ensaio de adensamento. Para o ensaio conduzido na amostra inundada tal comportamento não foi observado. Tal fato pode estar associado a colapsividade do solo durante a saturação, uma vez que a variação do índice de vazios observada da condição de umidade higroscópica para a inundada evidenciou a ocorrência deste processo. Segundo dados apresentados por Benatti (2010), o colapso pode ser típico de materiais coluvionares, condição do solo avaliado.

Os ensaios de cisalhamento direto demonstraram que os parâmetros de resistência de Mohr-Coulomb são diretamente influenciados pela condição de saturação em que o material se encontra. Avaliando as envoltórias de resistência para os dois casos, Figura 9, nota-se que o material estudado ganhou resistência quando o ensaio foi realizado na umidade higroscópica.

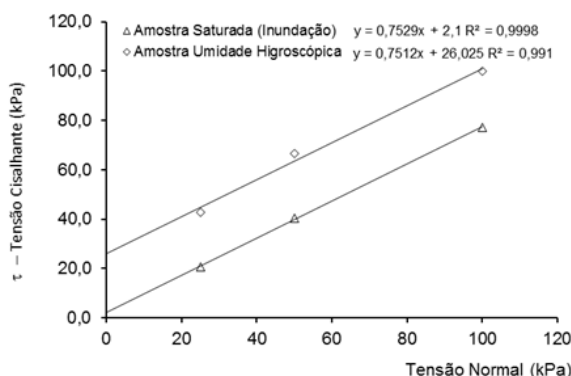


Figura 9. Envoltória de Resistência de Mohr-Coulomb saturada e umidade higroscópica.

Os parâmetros de resistência alcançados para as duas condições, inundado e umidade higroscópica, Tabela 3, foram obtidos considerando os picos para as curvas em que estes existiram ou a tensão cisalhante máxima, caso das curvas em que a tensão cisalhante não apresentou pico ao longo do ensaio.

Tabela 3. Parâmetros de Resistência Inundado e Umidade Higroscópica.

Tipo de Ensaio	Parâmetros de Resistência de Mohr Coulomb	
	c' (kPa)	ϕ' (°)
CD (Inundado)	2,10	36,97
CD (Higroscópica)	26,02	36,91

Analizando os parâmetros de resistência que descrevem a envoltória de resistência deste solo, foi possível observar que o intercepto coesivo sofreu alteração para as diferentes condições de saturação e o ângulo de atrito praticamente não. O intercepto coesivo apresentou ganho de treze vezes (13x), da condição inundada para a condição de umidade higroscópica, mas o ângulo de atrito interno do material, entretanto, não sofreu alteração. Segundo Fredlund et al. (1978), ensaios realizados em solos com diferentes graus de saturação já demonstravam que este comportamento poderia ser esperado.

4.4 Sucção Mátrica pelo Papel Filtro

Os ensaios de sucção pela técnica do papel filtro permitiram definir a curva característica de sucção do material avaliado, Figura 10.

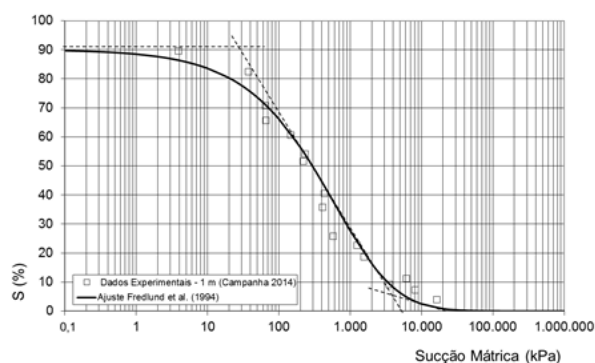


Figura 10. Curva característica do material.

Considerando a proposta de Vilar (2006), para avaliar as alterações nos parâmetros de resistência mediante a sucção, traça-se o gráfico apresentado na Figura 11. Neste gráfico é possível observar como se dá a variação do intercepto coesivo com a sucção mátrica, esta apresentada em escala logarítmica.

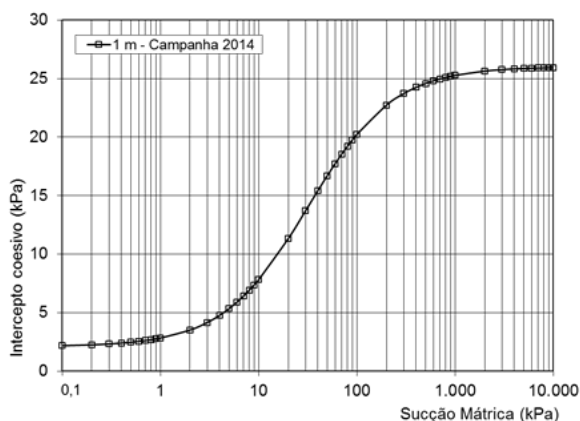


Figura 11. Variação intercepto coesivo com a sucção mátrica.

É possível averiguar, por meio do gráfico apresentado, que há grande alteração do intercepto coesivo, para sucções variando entre 1 kPa e 1.000 kPa. Nota-se ainda maior taxa de variação para sucções entre 10 kPa e 100 kPa. Para esta faixa de valores observa-se intercepto coesivo variando de 8 kPa a 20 kPa, algo que pode ser bastante relevante em diversas análises geotécnicas.

5 CONCLUSÃO

Os estudos demonstraram que os parâmetros de deformabilidade e resistência de um solo podem ser alterados mediante as variações na saturação. Para o material estudado, observou-se variação duas vezes (2x) superior nos parâmetros de compressibilidade, da condição inundada para a condição de umidade higroscópica. Para o intercepto coesivo, observou-se variação de treze vezes (13x) nos extremos da análise. Assim sendo, há que convir, que a saturação, no material estudado, interferiu na ordem de grandeza dos seus parâmetros de compressibilidade e resistência. Desta forma, pode ser fundamental, por parte de corpo técnico responsável pela avaliação de um problema geotécnico, a realização de ensaios considerando a não saturação, caso o problema envolva uma condição de trabalho com variações na saturação.

REFERÊNCIAS

ABNT (1990). NBR 12.007, *Ensaio de adensamento*

- unidimensional – Método de ensaio, solo*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, São Paulo, SP, 15p.
- ASTM (2003). D3080 *Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions*, USA, 7p.
- ASTM (2003). D5298 *Measurement of Soil Potencial (Suction) Using Filter Paper*, USA, 6p.
- Benatti, J. C. B. (2010). *Colapsibilidade com sucção controlada de um solo coluvionar e laterítico de Campinas/SP* /--Campinas, SP: [s.n.].
- Brandy, N. C.; Buckman, H. O. (1979). *Natureza e propriedade dos solos*. Tradução Antônio B. Neiva Figueiredo Filho. 5ª edição. Rio de Janeiro, Freitas Bastos, 647 p.
- Demillo, R. (1998). *Como funciona o clima*. São Paulo: Quark Books, 226p.
- Fredlund, D. G.; Morgenstern, N. R.; Widger, R. A. (1978). *The shear strength of unsaturated soils*. Canadian Geotechnical Journal, 15: p.313-321.
- Fredlund, D. G.; Rahardjo, H. (1993). *Soil mechanics for unsaturated soils*. John Wiley and Sons Inc., New York.
- Komori, E. T.; Teixeira, R. S.; Branco, C. J. M. da C.; Rodriguez, T. T. (2014). *Variabilidade dos Parâmetros de Deformabilidade do Solo da Cidade de Londrina/PR*. Em XVII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Brasil. [Anais eletrônico] COMBRANSEG.
- Marinho, F. A. M. (2005). *Os solos não saturados: Aspectos Teóricos, Experimentais e Aplicados*. Texto apresentado a Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para o concurso de Livre-docência na especialidade “Geomecânica” do Departamento de Engenharia de Estruturas e Fundações, 201 p.
- Ng, C. W.W.; Menzies, B. (2007). *Advanced Unsaturated Soil Mechanics and Engineering*. Taylor & Francis. 270 Madison Ave, New York, NY 10016, USA., 710 p.
- Vargas, M. (1977). *Introdução a mecânica dos solos*. São Paulo, 509p.
- Vilar, O. M. (2006). *A simplified procedure to estimate the shear strength envelope of unsaturated soils*. Canada, 8 p. 1088-1095.
- Villar, L. F. de S.; de CAMPOS, T. M. (2001). *Obtenção de uma curva característica de sucção pelo uso combinado de técnicas diversas*. In 4º Simpósio Brasileiro de Solos Não Saturados, Porto Alegre, RS – Brasil, p. 337-353.
- Vivian, B. J. (2008). *Utilização do Método do Papel Filtro para a Determinação das Curvas Características de um Solo Coluvionar Não Saturado Contaminado com Óleo Diesel*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 102 p.