

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO TEOR DE UMIDADE NA ABSORÇÃO D'ÁGUA E SUÇÃO DOS SOLOS EM ESTUDOS DE ERODIBILIDADE

Marla Bruna Melo de MENEZES & Osni José PEJON

Departamento de Geotecnia, Escola de Engenharia de São Carlos, USP. Avenida Trabalhador São-Carlense, 400 – Centro. CEP 13566-590. São Carlos, SP. Endereços eletrônicos: marlabmm@sc.usp.br; pejon@sc.usp.br

- Introdução
- Considerações Iniciais
 - Erodibilidade
 - Tensão de Sucção
 - Curvas de Retenção de Água
 - Influência da Sucção no Processo Erosivo
- Materiais e Métodos
 - Regiões Amostrais
 - Etapas de Campo
 - Reconhecimento da Área
 - Coleta e Preparação das Amostras
 - Amostras Deformadas
 - Amostras Indeformadas
 - Regiões
 - Ensaio Laboratoriais
 - Caracterização
 - Curvas de Retenção de Água
 - Comportamento Hídrico
- Resultados e Análise
- Conclusão
- Agradecimentos
- Referências Bibliográficas

RESUMO – Neste trabalho observou-se que o grau de saturação inicial estabelece um potencial de sucção matricial (S_m) capaz de orientar o fluxo, absorção e armazenamento da água nos poros do solo. Deste modo, foi possível correlacionar as propriedades de absorção de água com as sucções mátricas de três solos localizados no interior do Estado de São Paulo, ensaiados a diferentes teores de umidade inicial. Após o controle da sucção e umidade, através da Câmara de pressão de Richards, os solos foram submetidos ao Ensaio de Erodibilidade proposto por Nogami & Villibor (1979). Os Índices de absorção (I_{abs}), de perda de massa por imersão (P) e de erodibilidade (E) obtidos neste ensaio, quando correlacionados com as curvas de retenção de água dos solos, mostraram a influência da sucção matricial no início do processo erosivo. Verificou-se uma tendência de aumento da perda de massa por imersão, conseqüentemente um aumento da erodibilidade, quanto menor era o teor de umidade inicial imposta (maior sucção). Além disso, as correlações obtidas mostraram-se coerentes com o comportamento dos solos em estudo, permitindo estimar a sucção (S_m) de um solo a partir de grandezas facilmente mensuráveis como o I_{abs} .

Palavras-chave: erodibilidade; teor de umidade; absorção de água; sucção.

ABSTRACT – *M.B.M. de Menezes & O.J. Pejon - Analysis of influence of moisture content on the absorption of water and soil suction in studies of erodibility.* In this study, we observed that the initial degree of saturation establishes the potencial for matrix suction (S_m) can guide the flow, absorption and storage of water in soil pores. Therefore, experimentally, it was possible to correlate the properties of water absorption with the matrix suctions of three soils located in the São Paulo State, with different initial moisture contents and erosive and non-erosive behaviors. After controlling the suction and moisture through the Richards' Pressure Chamber the soils were subjected to the Erodibility test proposed by Nogami & Villibor (1979). The absorption indexes (I_{abs}), loss of mass by immersion (P) and erodibility (E) obtained in this experiment, when correlated with the characteristic curves of soils, showed the influence of matrix suction at the beginning of the erosion process. There is a trend of increasing weight loss by immersion, thus increasing the erodibility, the lower was the initial moisture content imposed (greater suction). Furthermore, the correlations obtained were consistent with the behavior of soils under study, allowing estimating suction (S_m) of a soil from easily measurable values such as the I_{abs} .

Keywords: erodibility; moisture content; water absorption; suction.

INTRODUÇÃO

Diversos fatores promovem a erosão dos solos quando combinados. Por vezes, essa problemática é tratada de forma holística tentando ser explicada pela interação de agentes como a ação das águas, o tipo de

substrato e a intervenção humana, este último encabeçando o rol de responsáveis pelos processos erosivos.

Porém, estudos mais recentes têm se preocupado com alguns aspectos antes tratados mais genericamente.

mente. Destacam-se hoje, o conhecimento da caracterização geotécnica dos materiais inconsolidados das áreas afetadas e, o fluxo da água no solo segundo as variações do potencial total.

Desta forma, dos muitos fatores que influenciam a erosão, merecem destaque as propriedades que refletem maior ou menor resistência dos solos aos agentes erosivos, ou sua erodibilidade, assim como o conhecimento do movimento do principal agente erosivo, a água, capaz de modificar a estrutura do maciço.

Este trabalho visa relacionar as propriedades intrínsecas dos solos com suas propriedades de infiltração e capacidade de absorção, para diferentes teores de umidade possíveis. Destes fatores dependem os processos erosivos, visto que a capacidade de retenção de água dos solos determinará seu poder de infiltração e futuras condições de escoamento superficial, pois quanto mais água infiltrar menor quantidade estará disponível para escoar na superfície e corroer o maciço.

Para tanto, este trabalho se propõe a:

- conhecer os materiais através dos ensaios de caracterização;
- caracterizar o comportamento hídrico destes solos através das curvas de retenção de água, obtidas em ensaios com sucção controlada;
- levantar informações sobre a susceptibilidade à erosão de diferentes solos do interior de São Paulo;
- analisar a influência do teor de umidade inicial dos solos nos fenômenos de retenção de água;
- mensurar a erodibilidade desses solos conforme os diferentes teores de umidade inicial;
- analisar as relações entre a absorção de água, os teores de umidade e potencial de sucção matricial destes materiais;
- segundo as correlações obtidas, tornar possível prever a sucção a partir do Índice de Absorção (I_{abs}), parâmetro resultante do Ensaio de Absorção de Água, proposto por Nogami & Villibor (1979) na identificação de materiais inconsolidados erodíveis.

CONSIDERAÇÕES INICIAIS

ERODIBILIDADE

A susceptibilidade à erosão se relaciona a dois fatores principais, que são a destacabilidade e transportabilidade das partículas do solo, associadas, respectivamente, às forças de natureza superficial, e às características físicas como tamanho e forma das partículas (Pejon, 1992; Vilar, 1987).

Assim, sua intensidade depende do tipo de solo. Materiais finos costumam ser menos erodíveis que os grossos, pois a destacabilidade de suas partículas é dificultada pelas forças de coesão. No caso dos solos grossos, dificilmente existem forças de coesão, no máximo uma coesão aparente que não obsta a destacabilidade dos grãos.

A erodibilidade pode ser medida por diferentes ensaios laboratoriais e ter avaliação direta, por ensaios específicos ou ainda por meio de ensaios indiretos, modelos matemáticos e inúmeros índices para sua quantificação, como relatado nos trabalhos de Pejon (2007), Camapum de Carvalho (2006), Alcântara (1997), Cavalieri (1994), Denardin (1990), Vilar (1987), Ângulo (1984), Nogami & Villibor (1979) e Bryan (1969).

Seu estudo ganha relevo quando se tratam de solos localizados em região tropical, onde o intemperismo químico predomina formando os solos não saturados que se caracterizam pela ocorrência de água e ar em seus vazios em quantidade que varia de acordo com os teores de umidade inicial, como esquematizado na Figura 1.

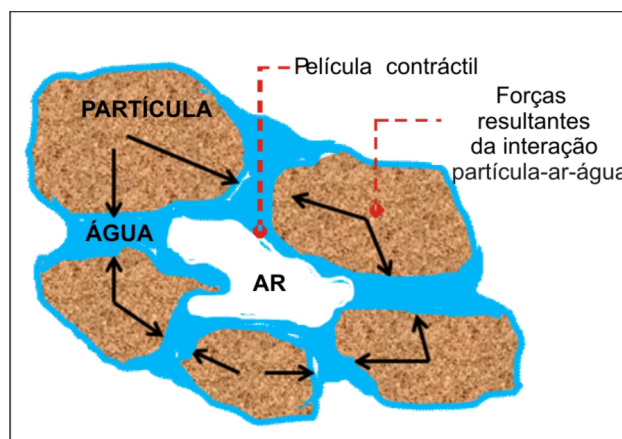


FIGURA 1. Elemento de solo não saturado (Bueno, 1979).

TENSÃO DE SUCÇÃO

Segundo Marinho (1997), pode ser definida como uma pressão isotrópica da água intersticial que faz com que o sistema água-solo absorva ou perca água, dependendo das condições ambientais, aumentando ou diminuindo o seu grau de saturação. Em outras palavras, pode ser interpretada como a avidez que um meio poroso não saturado tem pela água, resultante das forças capilares, de adsorção e da concentração de solutos.

Quando quantificada em função da umidade relativa é chamada sucção total, cujos componentes

de maior interesse são a sucção matricial e a sucção osmótica. A primeira está associada ao fenômeno da capilaridade, ao tipo de partículas e seu arranjo estrutural, ao passo que o componente osmótico relaciona-se à concentração química da água (Fredlund et al., 1993).

Para o estudo dos condicionantes das feições erosivas e influência na erodibilidade dos solos, a sucção matricial (S) tem relevante consideração em detrimento da osmótica, pois equivale a diferença entre as pressões no ar (u_a) e na água (u_w) dos poros do solo, podendo influenciar no comportamento e deformação dos solos não-saturados.

$$S = u_a - u_w \quad (1)$$

CURVAS DE RETENÇÃO DE ÁGUA

A curva de retenção de água no solo descreve a relação entre a sucção e o conteúdo de água no solo. Pode ser determinada pelos procedimentos de secagem (curva de drenagem) e umedecimento (curva de absorção).

O processo de secagem se dá quando uma amostra de solo previamente saturada é submetida a crescentes sucções matriciais, com expulsão da água pelo material. O segundo método tem na amostra seca um reservatório para entrada do fluido, submetido à redução gradual da sucção. Em ambos os procedimentos devem ser medidas as umidades de equilíbrio para cada estágio de sucção.

Independentemente da técnica de imposição da sucção, as curvas de retenção de água possui alguns elementos principais onde se destacam a umidade de saturação (θ_s), a pressão de entrada de ar e a umidade residual (θ_r), como visto na Figura 2. A pressão de entrada de ar, quando atingida, implica o início do esvaziamento do maior poro. Para valores inferiores a ela, o solo se mantém saturado, embora com pres-

sões na água negativas. A umidade residual representa um valor abaixo do qual, praticamente, já não se consegue extrair água do solo com o aumento da sucção (Vilar, 2000).

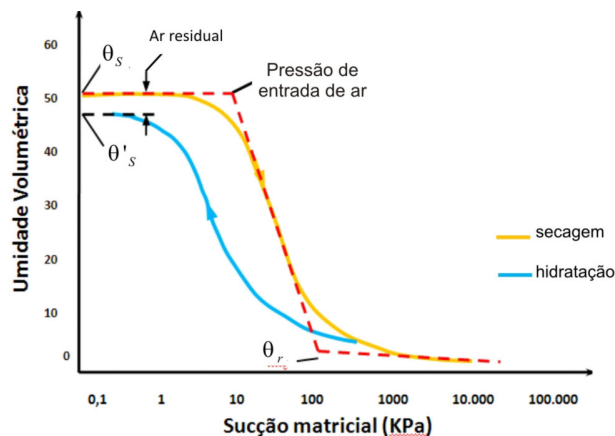


FIGURA 2. Elementos da Curva de Retenção.

INFLUÊNCIA DA SUCCÃO NO PROCESSO EROSIVO

No processo de formação dos solos não-saturados em ambientes intemperizados a infiltração das águas de chuva exerce papel preponderante na instabilização dos maciços, uma vez que pode contribuir para a redução dos parâmetros de resistência.

Em solos tropicais, por exemplo, o efeito do umedecimento do solo pode eliminar a cimentação e a sucção, propriedades estas que contribuem para a estabilidade do solo. Enquanto o aumento do teor de umidade dissolve os agentes cimentantes, reduzindo a coesão aparente, pode diminuir as tensões de sucção causando bruscas reduções de volume e colapso do solo (Rodrigues, 2007; Campos, 2002; Lobo, 1997; Abramento, 1988).

MATERIAIS E MÉTODOS

REGIÕES AMOSTRAIS

As amostras de solo estudadas aqui foram coletadas em regiões diferentes com características próprias, desenvolvidas ao longo do tempo geológico. Os pontos amostrais pertencem a regiões das cidades do interior paulista: São Carlos e São Pedro (Figura 3), a cerca de 200 km da capital SP.

Nas áreas dos municípios de São Carlos e São Pedro afloram, principalmente, as formações geológicas dos Grupos São Bento, representados pela Formações Pirambóia, Botucatu (arenitos) e Serra Geral (basaltos

e diabásios), além da Formação Itaqueri (arenitos). Em relação a geomorfologia, a região de São Carlos localiza-se nos reversos das cuestas basálticas, enquanto que a região de São Pedro encontra-se na Depressão Periférica Paulista (Fúlfaro, 1993; Zuquette, 1981).

O tipo de clima predominante é segundo a classificação de Köppen do tipo Cwa, inverno seco; e precipitação média anual entre 1400 a 1500 mm. As regiões se inserem na Província Hidrogeológica da Bacia do Paraná, sobre mananciais de água subterrânea como os Aquíferos Guarani e Serra Geral, sedimentares

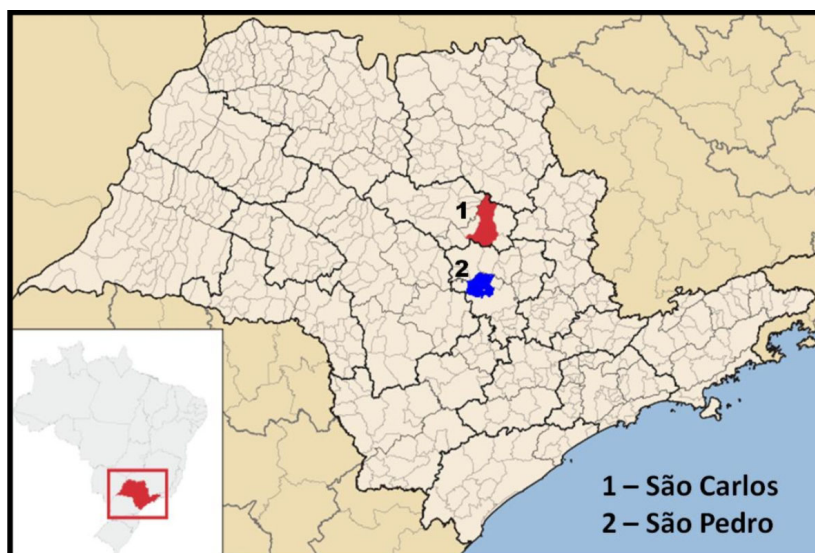


FIGURA 3. Localização das regiões amostrais (modificado de <http://pt.wikipedia.org/wiki>).

e fraturados, respectivamente, caracterizados por sua alta porosidade.

Ellert (1980) segundo Ferreira (2004) analisaram as águas subterrâneas da região de São Pedro e concluiu que a permeabilidade dos materiais que apresentavam homogeneidade granulométrica superficial,

provenientes da Formação Pirambóia, tinham uma alta permeabilidade, da ordem de 10^{-1} a 10^{-3} m/s.

ETAPAS DE CAMPO

As etapas e metodologias empregadas durante a pesquisa podem ser resumidas como segue (Figura 4).

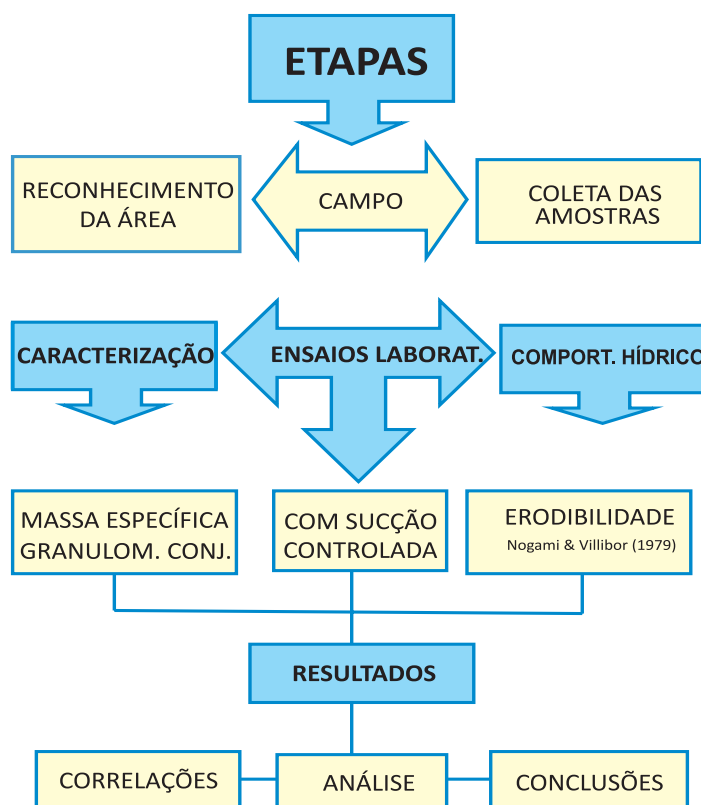


FIGURA 4. Fluxograma geral do estudo.

Reconhecimento da Área

Primeiro foi realizada uma visitação a diferentes locais para coleta dos solos de interesse. Na etapa de reconhecimento fez-se uma rápida análise tátil-visual dos materiais encontrados a fim de serem escolhidos tipos de solo com percentagem de grossos e finos diferenciada.

Além da análise visual, as regiões foram selecionadas segundo características já conhecidas baseadas em estudos das potencialidades aos processos erosivos, como mostrado nos trabalhos de Ferreira (2004) e Silva (2003). Deu-se preferência a pontos de coleta com predomínio de feições erosivas devido ao fluxo concentrado de águas superficiais.

Coleta e Preparação das Amostras

A coleta foi efetuada tanto em superfície como em sub-superfície, seguindo as técnicas padronizadas e adaptadas para o tipo de material e a finalidade a que se destinou. Recolheram-se dois tipos de amostras: deformadas e indeformadas.

Amostras Deformadas

São aquelas representativas quanto à textura e composição mineral. Foram caracterizadas através da identificação tátil-visual e por ensaios de classificação segundo prescrições normativas.

Foram coletadas em superfície, tomando-se os devidos cuidados quanto à manutenção do teor de umidade *in situ* e à presença de matéria orgânica (interferência nos resultados), e logo mais devidamente

acondicionadas em sacos plásticos, perfazendo massa aproximada de 2 kg.

A partir destas, foram adquiridas amostras reduzidas através de técnicas de quartejamento, em quantidades padronizadas para os ensaios de caracterização e de conhecimento das propriedades físico-químicas.

Amostras Indeformadas

São representativas quanto à estrutura, teor de umidade do solo, textura e composição mineral. Permitem determinar as características físicas do solo *in situ*, como os índices físicos e os parâmetros hidráulicos.

Durante a coleta das amostras teve-se o cuidado de escolher locais que não apresentassem excesso de matéria orgânica e outros materiais que pudessem alterar significativamente os resultados dos ensaios propostos.

Em sub-superfície, à profundidade de 1 m da superfície, retiraram-se amostras indeformadas através de escavação manual (Figura 5), com uso de equipamentos apropriados. Delas, moldaram-se amostras indeformadas reduzidas (corpos-de-prova) de dimensões padronizadas para realização dos ensaios de sucção controlada e erodibilidade.

Regiões

Na região de São Carlos, a primeira área de coleta ocorreu no campo experimental da USP (Campus 2), no bairro de Santa Felícia, representada por taludes de corte da região (Figura 6), com coordenadas UTM 0197512/7564732 NW, altitude de 843 m.



FIGURA 5. Coleta de amostra inderformada (escavação e selamento).



FIGURA 6. Ponto de coleta Campus 2 (Solo 1).

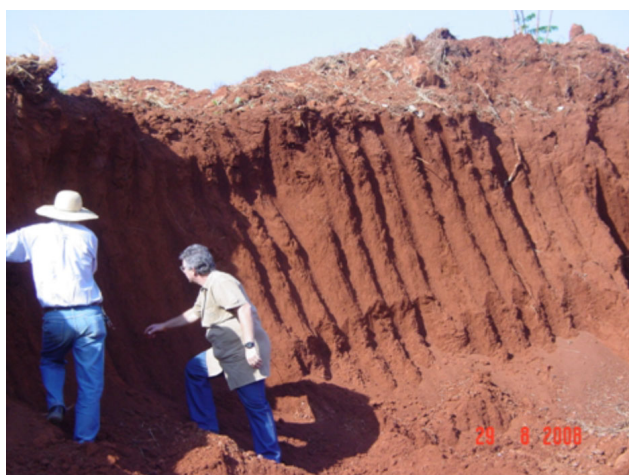


FIGURA 7. Ponto de coleta Facchina (Solo 2).



FIGURA 8. Ponto de coleta São Pedro (Solo 3).

Já a segunda área foi locada em taludes de corte às margens da avenida comendador Alfredo Maffei, próxima ao Córrego do Gregório, no centro de São Carlos (Figura 7), com coordenadas UTM 0202466/7561720 NE, altitude de 824 m.

Na região de São Pedro, as amostras deformadas e os blocos de amostra indeformada foram retirados do interior de uma voçoroca (Figura 8), às margens da rodovia SP-304, em Santa Maria da Serra (Figura 8), com coordenadas UTM 793223 E e 7500545 N, altitude de 512 m. As amostras foram revestidas com tela e parafina para evitar, respectivamente, deformações estruturais do bloco e perdas excessivas de umidade. Por fim, foram armazenados em câmara úmida, de forma a manter o teor de umidade natural.

ENSAIOS LABORATORIAIS

Ensaio de Caracterização

Para a classificação e identificação dos materiais inconsolidados, a pesquisa se ateu aos ensaios de caracterização mais corriqueiros em Mecânica dos Solos, como a *Análise Granulométrica Conjunta* (NBR 7181/84) e *Massa Específica dos Sólidos* (NBR 6508/84). Isso se deveu à intenção deste trabalho de promover a estimativa do potencial matricial dos solos a partir de medidas indiretas e por correlações entre índices físicos, permitindo desta forma a equiparação com outros solos. Os demais índices físicos foram determinados por fórmulas de correlações entre índices.

Ensaio de Laboratório para Determinar as Curvas de Retenção de Água

As curvas de retenção de água dos solos foram obtidas sob trajetórias de secagem, através dos métodos do Papel Filtro, Funil de Placa Porosa e Câmara de Pressão de Richards. A Câmara de Pressão de Richards também foi utilizada para aplicação de sucção em corpos-de-prova usados no ensaio de absorção.

Técnica do Papel Filtro

O ensaio foi realizado consoante metodologia proposta por Marinho (1995). Por se tratar de um método indireto para determinar a sucção, foram utilizadas equações como curvas de calibração do papel filtro usado. A sucção matricial foi calculada a partir dos teores de umidade finais do solo e do papel filtro.

Resumidamente, a seqüência do ensaio é mostrada na Figura 9, onde os corpos de prova (10 x 50 mm) usados foram previamente saturados por capilaridade (24h para os arenosos e 48h para os argilosos) e submetidos ao efeito da secagem ao ar até atingirem os parâmetros de secagem (massa ideal) preestabelecidos ao contato com o papel Whatman nº 42. O

papel filtro encontrou-se em pleno contato com o solo de forma que a medida da sucção obtida equivalesse somente à matricial.

Após o conjunto ser hermeticamente fechado, foi deixado ao tempo de equilíbrio de 7 a 10 dias. Após este período, procedeu-se o cálculo de umidade dos papéis-filtro (2), umidade do solo (3) e conseqüente sucção matricial através das equações (4) e (5) de Chandler (1992):

$$W_{\text{papel}} (\%) = \frac{\text{Massa}_{\text{úmida}} - \text{Massa}_{\text{seca}}}{\text{Massa}_{\text{seca}}} \cdot 100 \quad (2)$$

$$W_{\text{solo}} (\%) = \frac{\text{Massa}_{\text{água}}}{\text{Massa}_{\text{sólidos}}} \cdot 100 \quad (3)$$

$$\text{Sucção (kPa)} = 10^{(6,05 - 2,48 \cdot \log W_{\text{papel}})} > 47\% \quad (4)$$

$$\text{Sucção (kPa)} = 10^{(4,84 - 0,0622 \cdot \log W_{\text{papel}})} \leq 47\% \quad (5)$$

Funil de Placa Porosa

Também conhecido como Funil de Haines, este equipamento consiste num funil com uma placa porosa de alto valor de entrada de ar, hidraulicamente conectada a um tubo flexível acoplado a um reservatório de altura regulável para saída da água, quando o procedimento é a secagem da amostra.

Nessa técnica, a sucção foi pré-estabelecida conforme a altura do reservatório posicionado em cota inferior ao nível da amostra saturada (Figura 10). A sucção ($u_a - u_w$), em kPa, equivaleu à altura da coluna d'água acima do nível do reservatório, negativa em relação à cota do solo ensaiado, sendo representada pela fórmula (6):

$$(u_a - u_w) = \gamma_w \cdot (z_A - z_B) \quad (6)$$

O equipamento utilizado tem altura máxima de 1,40 m, permitindo imposição máxima de 14 kPa, e três compartimentos amostrais a serem utilizados por vez. Foram ensaiadas 03 (três) amostras (40 x 16 mm) de cada solo para cada sucção imposta. Usaram-se imposições de 2, 3, 5, 8, 12 e 13 kPa, definidas para detalhar melhor o trecho inicial das curvas características. O procedimento do ensaio seguiu a seguinte seqüência para cada sucção:

- sistema foi inicialmente saturado com água destilada para evitar bolhas de ar no tubo e permitir a continuidade da fase líquida;
- as amostras previamente saturadas foram dispostas sobre as placas porosas também saturadas, e o

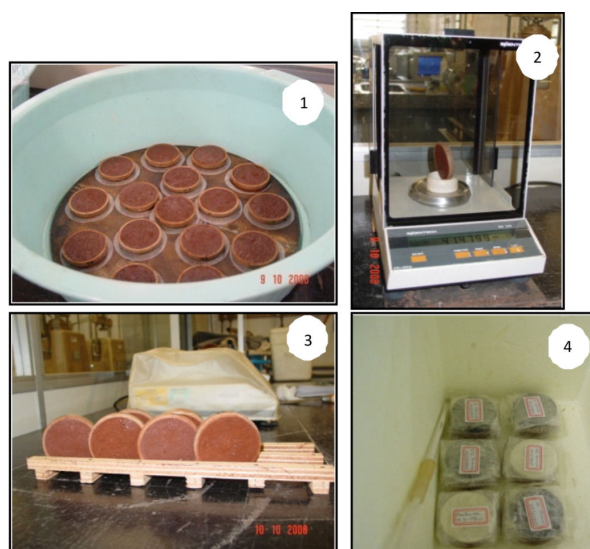


FIGURA 9. Sequência do ensaio de Papel Filtro.

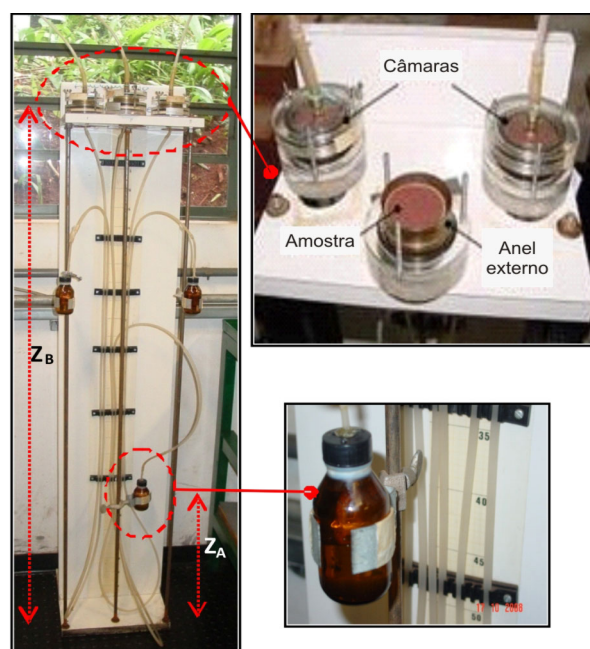


FIGURA 10. Funil de Placa Porosa (EESC-USP).

conjunto foi fixado por anel metálico e protegido pela câmara externa;

- reservatório de água foi então rebaixado até a altura de interesse, permitindo a dessaturação do solo até que cessasse o fluxo de água;
- após o equilíbrio, as amostras foram retiradas para pesagem, e posterior determinação do teor de umidade gravimétrico.

Câmara de Pressão de Richards

O equipamento consiste basicamente de uma câmara, hermeticamente fechada, construída para

suportar altas pressões, pois possui uma placa porosa de alto valor de entrada de ar em seu interior, com vazios bastante diminutos, que permitem, dentro de certos limites, o fluxo de água, mas não o de ar. A Câmara é hidraulicamente conectada a um mini-reservatório por um tubo flexível, estando em contato com a atmosfera por um orifício lateral (Figura 11).

A técnica emprega o princípio da translação de eixos, com incrementos de pressão de ar aplicados para expulsar a água dos poros do solo. A água do sistema fica submetida à pressão atmosférica e por isso a pressão da água (u_w) durante o ensaio é igual a zero; a sucção ($u_a - u_w$) induzida então é igual à pressão de ar inicial. Apenas é possível garantir que a sucção do solo

é igual à pressão de ar aplicada após o equilíbrio do sistema, quando cessa o fluxo de água das amostras.

Nesse ensaio, inicialmente, as placas porosas de alta pressão de entrada de ar foram dispostas em recipientes com água destilada e deaerada para saturarem por um período de no mínimo 24h. Após a saturação, as amostras (40 x 20 mm) previamente também saturadas, foram distribuídas sobre a placa a fim de evitar descontinuidade da fase líquida (Figura 12). Todo o sistema foi saturado, incluindo os tubos de saída da panela. A Câmara foi hidraulicamente conectada a um mini-reservatório por um tubo flexível, estando em contato com a atmosfera por um orifício lateral.

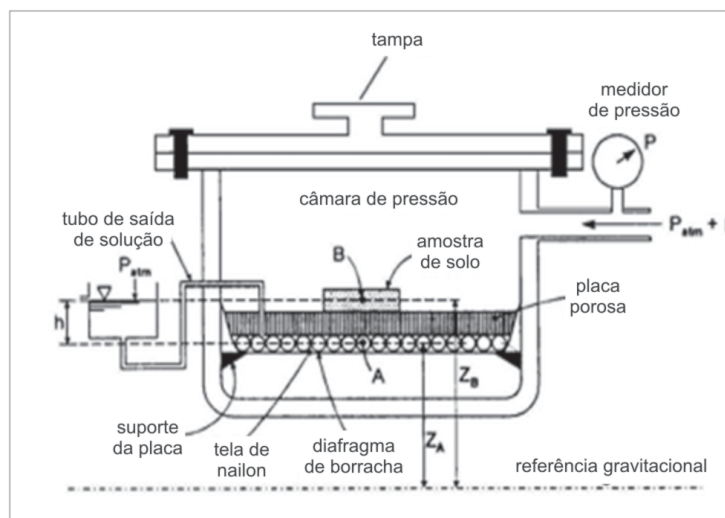


FIGURA 11. Componentes da Câmara de Pressão de Richards (Libardi, 1995).



FIGURA 12. Sequência do ensaio (saturação; montagem do equipamento; amostras sobre a placa).

Usaram-se duas placas de pressão, uma para sucções até 500 kPa e outra para sucções maiores, até no máximo 1500 kPa. O ensaio foi conduzido com incrementos de pressão de ar no interior da panela com o intuito de drenar a água contida nos corpos-de-prova. Foram impostas pressões de 10, 20, 50, 100, 200, 500 e 800 kPa. Cada valor de pressão foi aplicada a um conjunto de amostras até se observar interrupção do fluxo de água inicial. Esta interrupção não foi considerada como o equilíbrio do sistema visto que os três tipos de solo estavam dentro da câmara, e cada um teria um tempo de equilíbrio diferente.

Desta forma, o critério de interrupção do ensaio foi a constância de massa verificada por meio da pesagem dos corpos-de-prova em balança de precisão de quatro casas decimais. Cessada a variação de massa, retiraram-se as amostras para cálculo dos teores de umidade correspondentes a sucção aplicada. De acordo com os pares sucção-umidade foram obtidas as curvas de retenção de água.

Os incrementos de pressão da Câmara de Pressão de Richards foram determinados segundo a análise dos resultados para cada solo em estudo, de acordo com o traçado da curva de retenção de água obtida pelas técnicas do Papel Filtro e Funil de Placa Porosa. Foram escolhidas faixas de sucção de modo a complementar os intervalos das curvas com ausência de pares sucção-umidade.

A Câmara de Pressão de Richards também foi utilizada para preparar as amostras para o ensaio de Absorção D'Água. O equipamento foi escolhido para este fim por ser hermeticamente fechado e não permitir variações no teor de umidade das amostras. Além disso, as amostras do mesmo material apresentariam menor dispersão quando aos resultados de absorção de água devido à homogeneidade na imposição da sucção.

Ensaio para Determinação do Comportamento Hídrico

Ensaio de Erodibilidade (Nogami & Villibor, 1979)

O ensaio de erodibilidade consiste em determinar a suscetibilidade dos diferentes tipos de solo aos processos erosivos, através do potencial de absorção de água pela amostra e sua perda de massa quando submersa em água por um período de 24 h.

A metodologia proposta se divide em duas etapas classificadas como de fácil e rápida execução, bem como não dispendiosas por não necessitar de equipamentos sofisticados.

Tais etapas são: o ensaio de absorção de água e o de perda de massa por imersão; as quais utilizam amostras indeformadas com dimensões de 45 mm de diâmetro e 20 mm de altura, moldadas em um cilindro



FIGURA 13. Moldagem dos cp's.

de PVC rígido com a ponta biselada (Figuras 13 e 14).

Neste trabalho, utilizaram-se amostras indeformadas secas ao ar e na sombra por um período de sete dias, ao menos. Por este procedimento dificultar o controle do teor de umidade, corpos de prova foram ensaiados após terem sua umidade estabilizada na Câmara de Richards e Funil de Placa Porosa, segundo faixas de sucção mais apropriadas a cada método.

Pelo menos 03 (três) amostras de cada solo foram submetidas a cada técnica, sendo que, ao atingirem o equilíbrio para cada sucção imposta, 02 (duas) foram testadas no ensaio de erodibilidade, e 01 (uma) usada para cálculo do teor de umidade na estufa.

Tomaram-se os devidos cuidados no momento do manuseio das amostras retiradas dos equipamentos em direção ao ensaio de absorção, a fim de que estas não perdessem massa de sólidos, o que adulteraria os cálculos finais bem como as correlações propostas.

Absorção de Água

Para a realização deste ensaio, necessita-se de um equipamento que consiste de um recipiente cilíndrico (base), com as mesmas dimensões do cilindro de amostragem, conectado a um tubo de vidro horizontal graduado. O conjunto é preenchido com água e na porção superior do recipiente, adapta-se uma pedra porosa, que deve ser mantida saturada.

A amostra deve ser pesada antes, e logo depois colocada sobre a pedra porosa saturada, dando-se início neste momento à contagem de tempo e fazendo-se leituras de volume de água absorvida pela área do corpo de prova por intervalo de tempo, até que a água atinja o topo da amostra, como ilustrado nas Figuras 15 e 16.



FIGURA 14. Secagem ao ar.

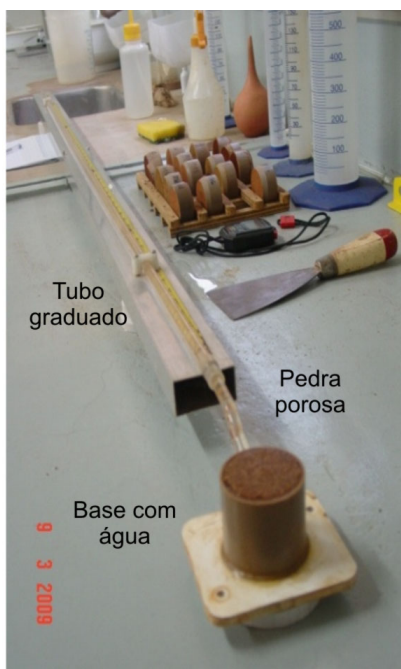


FIGURA 15. Equipamento de Absorção EESC/USP.



FIGURA 16. Detalhe da amostra sobre a pedra porosa.



FIGURA 17. Ensaio de perda de massa por imersão.

Procedeu-se da seguinte maneira: inicialmente, o equipamento de absorção foi calibrado, nivelado e saturado com água destilada, a fim de que a água dentro do reservatório aflorasse na pedra porosa saturada, mantendo-a dessa forma. Isso permitiu que um filme de água sobre a pedra porosa garantisse um perfeito contato com a amostra de umidade conhecida, e o volume de água fosse quantificado sem falseamentos.

Foi observado o menisco formado no interior do tubo, para que tangenciasse o início da régua de medida. Iniciou-se o ensaio através da contagem de tempo, marcando de 5 em 5 segundos o volume água absorvido pela área do corpo de prova, representado por q (cm^3/cm^2).

O ensaio se finda ao se perceber a mancha de água formada no topo da amostra, e o cessar do movimento do menisco no tubo. Logo depois, pesaram-se as amostras. De posse dos dados de volume e tempo de absorção, plotaram-se curvas $q \times t^{0,5}$ cujo coeficiente angular da reta representa o índice de absorção de água (I_{abs}), parâmetro objeto das correlações propostas.

$$I_{abs} = \frac{q}{\sqrt{t}} \quad (7)$$

Perda de Massa por Imersão

Objetivando classificar os solos em erodíveis e não erodíveis, foi realizado o ensaio de perda de massa por imersão logo após o ensaio de absorção.

As amostras ficaram submersas em reservatório com água, depois de serem presas a suportes apropriados para que estas ficassem na posição vertical e pudessem ter quantificadas as massas perdidas em relação ao peso inicial seco (Figura 17).

Após um período de 24 h nessa condição, o material destacado foi coletado e os recipientes cuidadosamente retirados e secados em estufa, para obtenção da massa seca perdida. Esse valor em relação a massa inicial equivale a perda de massa por imersão (P).

Com os parâmetros I_{abs} e P foi possível determinar o índice de erodibilidade (E), segundo formulações (8) e (9) propostas, respectivamente, pelos autores do ensaio e por Pejon (1992), que classificam o solo em erodível ($E < 1$) e não erodível ($E > 1$).

$$E_{52} = 52 \cdot \frac{I_{abs}}{P} \quad (8)$$

$$E_{40} = 40 \cdot \frac{I_{abs}}{P} \quad (9)$$

RESULTADOS E ANÁLISE

CARACTERIZAÇÃO

Os resultados dos ensaios de caracterização seguem resumidos da Tabela 1. Do ensaio de granulometria conjunta foram plotadas curvas granulométricas para cada solo (Figura 18) e a classificação granulométrica foi segundo a NBR 6502/95. Os valores da massa específica dos sólidos (ρ_s) foram obtidos segundo o ensaio normatizado.

TABELA 1. Classificação granulométrica NBR 6502/95.

Solo	Local	Areia (%)	Silte (%)	Argila (%)	ρ_s (g/cm ³)
1	Campus 2	60	6	34	2,73
2	Facchina	25	31	44	2,95
3	São Pedro	88	1	11	2,63

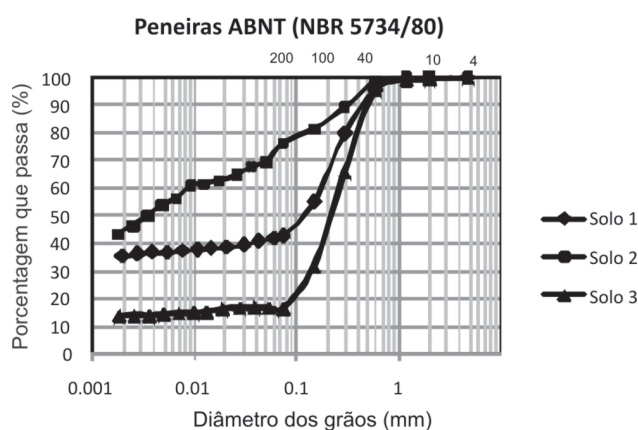


FIGURA 18. Curvas granulométricas dos solos.

O Solo 1 e o Solo 3 foram classificados como areia argilosa com distribuição granulométrica uniforme, predominando as frações de areia média e fina. Apresentam diferentes frações de finos que influenciaram nas suas características de retenção, modificando a forma e declividade das curvas de retenção de água, como será visto mais adiante.

O Solo 2 foi identificado como uma argila silto-arenosa com 75% de finos, proveniente de um solo residual de basalto. A fração fina não foi submetida a ensaios de limites de consistência, detendo-se apenas à sua distribuição granulométrica.

Os índices físicos foram calculados a partir da moldagem de mais de 200 amostras indeformadas. Observam-se altos índices de vazios e porosidades relativamente altas acima de 40%, como visto na Tabela 2.

Curvas de Retenção de Água dos Solos

As curvas características para cada solo amostrado foram obtidas por secagem segundo as metodologias para os ensaios de Papel Filtro, Funil de Placa Porosa e Câmara de pressão de Richards, como já mencionado. Os três métodos foram usados conjuntamente a fim de se abranger melhor as faixas de sucção.

O Funil foi utilizado para sucções baixas e para atingir uma ampla faixa de sucção usou-se o Papel Filtro. A Câmara foi útil também para equiparar as tendências dos solos frente às várias imposições realizadas. As Figuras 19, 20 e 21 mostram as curvas para os pontos experimentais dispostos na Tabela 3. Os teores de umidade de saturação (w_{sat}) foram calculados experimentalmente.

TABELA 2. Índices físicos dos solos.

Solo	Valores	ρ (g/cm ³)	ρ_s (g/cm ³)	ρ_d (g/cm ³)	e (-)	n (%)	S_r (%)	W_{mold} (%)	W_{sat} (%)
1	m	1.517	2.673	1.320	1.03	50.63	39.0	14.9	38.5
	σ	0.05	0.00	0.04	0.07	1.62	2.53	2.18	-
	Cv	0.03	0.00	0.03	0.06	0.03	0.06	0.15	-
2	m	1.314	2.947	1.045	1.83	64.55	41.8	24.3	58.2
	σ	0.05	0.00	0.04	0.12	1.47	2.67	1.61	-
	Cv	0.04	0.00	0.04	0.07	0.02	0.06	0.07	-
3	m	1.615	2.630	1.529	0.70	41.25	20.8	6.0	29.3
	σ	0.04	0.00	0.04	0.04	1.47	1.27	0.10	-
	Cv	0.02	0.00	0.02	0.06	0.04	0.06	0.02	-

Sendo que: ρ – massa específica natural; ρ_d – massa específica seca; ρ_s – massa específica dos sólidos; e – índice de vazios; n – porosidade; S_r – grau saturação inicial; w_{mold} – umidade de moldagem; w_{sat} – umidade de saturação – média; σ – desvio padrão; Cv – coeficiente de variação.

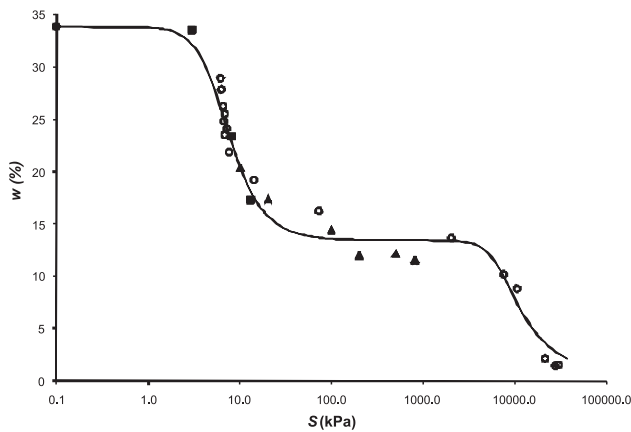


FIGURA 19. Curva de retenção de água ajustada – Solo 1.

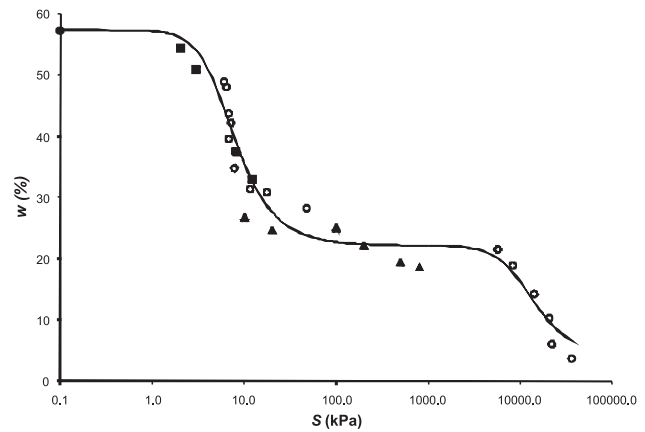


FIGURA 20. Curva de retenção de água ajustada – Solo 2.

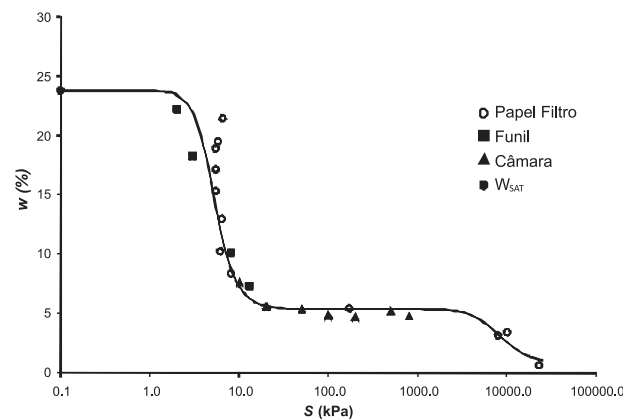


FIGURA 21. Curva de retenção de água ajustada – Solo 3.

Nas faixas de sucção onde houve sobreposição de valores, observa-se que há uma concordância de resultados entre os três métodos utilizados. Nas demais faixas os resultados se complementam, permitindo a obtenção de uma curva de retenção de água mais bem definida. Usando as relações empíricas de Van Genuchten (1980), estipulou-se o ajuste da curva característica de acordo com as formulações (10) e (11):

$$w = w_r + \frac{(w_s - w_r)}{(1 + |\alpha \cdot S|^n)^m} \quad (10)$$

$$m = 1 - \frac{1}{n} \quad (11)$$

sendo que w , w_r e w_s são, respectivamente, as umidades gravimétrica, residual e de saturação; α , n e m são parâmetros de forma da curva de retenção, e S é a sucção matricial em kilopascal (kPa).

As curvas foram ajustadas no Software SWRC, utilizando os dados do Papel Filtro e do Funil. São

apresentadas na forma de umidade gravimétrica versus a sucção em *kPa*. Os parâmetros de ajuste das curvas são apresentados na Tabela 4.

Baseado no comportamento bimodal das curvas de retenção de água dos solos não-saturados, o ajuste foi dividido em duas partes (Tabela 4). O ajuste inicial (a) representa o trecho da curva onde ocorre o esvaziamento gradual dos macroporos devido à primeira pressão de entrada de ar. O segundo ajuste (b) ocorre devido à pressão de entrada de ar necessária à expulsão da água dos microporos. A umidade residual do ajuste (a) foi adotada como a umidade de saturação do ajuste (b).

Uma análise das curvas de retenção de cada solo permitiu inferir que as relações sucção-umidade estão diretamente relacionadas à distribuição granulométrica dos solos, o índice de vazios, a percentagem de finos e a mineralogia.

Observou-se que, o solo argiloso (Solo 2), menos permeável, com partículas mais coesas e quantidade maior de microporos admitiu sucções maiores para os mesmos teores de umidade dos solos arenosos. Já os solos arenosos (Solo 1 e Solo 3) apresentaram um

TABELA 3. Pontos experimentais obtidos nos ensaios com controle de sucção.

	SOLO 1		SOLO 2		SOLO 3	
	Wsolo(%)	S (kPa)	Wsolo(%)	S (kPa)	Wsolo (%)	S (kPa)
Método do papel filtro	27.91	6.2	48.10	6.3	21.42	6.4
	25.57	6.7	49.01	6.0	18.91	5.5
	24.20	7.2	42.30	7.2	17.17	5.4
	23.57	6.7	43.82	6.7	19.47	5.8
	28.98	6.1	39.58	6.7	15.34	5.5
	24.90	6.6	34.87	7.8	12.99	6.3
	21.91	7.6	31.40	11.6	10.22	6.1
	26.29	6.5	30.94	17.5	8.35	8.1
	19.23	14.2	28.29	47.2	5.46	168.7
	16.31	72.2	21.53	5649.3	3.16	7854.0
	13.71	1987.1	18.97	8264.2	3.43	10117.9
	10.25	7514.8	14.28	14157.9	0.59	22880.7
	8.87	10387.3	10.37	20501.6	-	-
	2.16	20875.8	6.07	21896.6	-	-
	1.45	27303.6	3.75	36118.1	-	-
1.57	29563.8	-	-	-	-	
Funil p. porosa	-	-	54.50	2.0	22.20	2.0
	33.59	3.0	50.90	3.0	18.23	3.0
	23.46	8.0	37.50	8.0	10.09	8.0
	17.37	13.0	32.98	12.0	7.30	13.0
Câmara de Richards	20.37	10.0	26.79	10.0	7.65	10.0
	17.40	20.0	24.60	20.0	5.57	20.0
	-	-	-	-	5.39	50.0
	14.43	100.0	25.00	100.0	4.84	100.0
	12.05	200.0	22.23	200.0	4.75	200.0
	12.16	500.0	19.44	500.0	5.16	500.0
	11.58	800.0	18.73	800.0	4.78	800.0
	Wsolo(%)	S (kPa)	Wsolo(%)	S (kPa)	Wsolo(%)	S (kPa)
33.92	0.1	57.37	0.1	23.76	0.1	

TABELA 4. Parâmetros de ajuste das curvas de retenção de água por Van Genuchten (1980).

Solo	Ajuste	a	m	n	w r	w s	r ²
1	a	0.1750	0.591	2.892	13.50	33.90	0.974
	b	0.0002	0.351	3.757	0.86	13.50	0.916
2	a	0.1890	0.512	2.708	22.20	57.40	0.938
	b	0.0001	0.581	2.529	3.75	22.20	0.907
3	a	0.2150	0.692	4.215	5.36	23.76	0.956
	b	0.0002	0.593	3.002	0.59	5.36	0.925

formato diferente das curvas devido à rápida drenagem que sofrem pelo esvaziamento progressivo dos macroporos.

Os macroporos influenciam o trecho inicial da curva, pois é quando se registra a passagem de ar com um valor de pressão necessária para esvaziar o maior poro da estrutura (Röhm, 2004). As altas porosidades dos três solos ($n > 40\%$) possibilitaram baixas pressões de entrada de ar (< 5 kPa), o que demonstra relativa facilidade de drenagem dos macroporos dos solos mesmo para baixas sucções.

Com base nestas curvas de retenção foram definidas as sucções que seriam impostas aos solos a

fim de prepará-los para o ensaio de absorção d'água, segundo às umidades de equilíbrio correspondentes. Para tanto, novas amostras foram submetidas à Câmara de Pressão de Richards e ao Funil de Placa Porosa. Escolheram-se sucções de 2, 3, 4, 5, 8, 10, 13, 20, 50, 100, 200, 500 e 800 kPa, em função do tipo de solo e das limitações de cada equipamento.

CURVAS DE ABSORÇÃO DE ÁGUA

As curvas de absorção ($q \times t^{0.5}$) foram formadas segundo os dados de pelo menos 2 amostras indeformadas, como exemplificado na Figura 22. Foram plotadas curvas médias de absorção e usados os

parâmetros destas curvas. Obtiveram-se curvas de absorção segundo o grau de saturação para cada solo em função de cada sucção imposta.

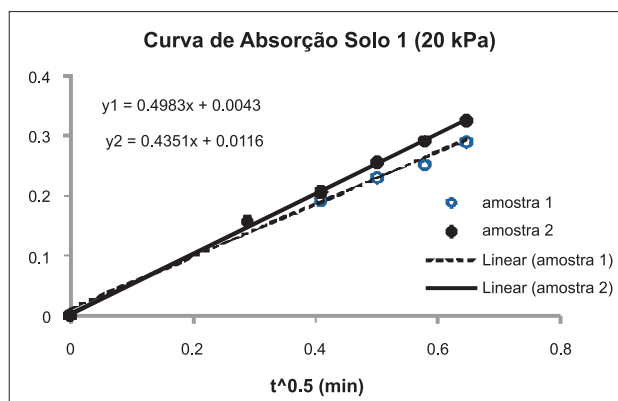


FIGURA 22. Curva de absorção de água.

Optou-se por analisar as diferentes possibilidades de relações $q \times t^{0.5}$, considerando ou não o ponto (0,0), de zero tempo para zero absorção. Segue um exemplo das curvas de absorção do Solo 1, para cada amostra ensaiada.

O índice de absorção d'água (I_{abs}) equivale ao coeficiente angular da reta ajustada aos pontos experimentais. Foram utilizados apenas os pontos equivalentes ao trecho da reta com maior inclinação, desconsiderando-se os pontos após a inflexão da reta, visto que os primeiros são representantes do potencial de absorção.

Analisaram-se 3 (três) possibilidades de ajuste desta reta: nas primeiras considerou-se o ponto zero, forçando ou não a passagem da reta de regressão por este ponto; na terceira, ajustou-se a reta considerando somente os pontos experimentais. Dos três casos, as relações com maiores coeficientes de determinação (R^2) foram consideradas, apesar de não se notarem significativas diferenças em seus valores.

CORRELAÇÕES

Índice de Absorção versus Sucção ($I_{abs} \times S$)

Segundo as faixas de sucção imposta e os teores de umidade gravimétrica correspondentes, os valores dos índices de absorção se apresentam na Tabela 5. Considerando o intervalo das sucções impostas, o Solo 1 apresentou coeficientes R^2 de 0,994 a 1,000; o Solo 2 obteve R^2 de 0,992 a 1,000; o Solo 3 obteve entre 0,942 e 1,000.

Observa-se uma nítida tendência de aumento da absorção de água com o aumento da sucção e conseqüente diminuição do teor de umidade. No entanto, alguns pontos discrepantes ocorreram, como para a sucção de 100 kPa, tanto no Solo 2 quanto no Solo 3. Estes valores podem ter sido causados por erros no ensaio de sucção, quanto no de absorção de água, pois são casos isolados.

O Solo 3 demonstrou valores mais elevados para os índices I_{abs} , consequência de sua condutividade hidráulica elevada. Mota (2008) mostrou através de ensaio apropriado que a condutividade hidráulica deste solo é elevada e da ordem de grandeza de 10^{-3} cm/seg.

TABELA 5. Valores de índices de absorção dos solos.

Solo 1			Solo 2			Solo 3		
S(kPa)	Wsolo(%)	I_{abs}	S(kPa)	Wsolo(%)	I_{abs}	S(kPa)	Wsolo(%)	I_{abs}
2	20.29	0.10	2	51.01	0.07	2	22.2	0.06
5	23.42	0.20	5	42.91	0.58	5	13.03	0.35
10	20.37	0.44	10	26.79	1.01	10	7.68	1
20	17.40	0.42	20	24.6	1.22	20	5.57	1.32
-	-	-	-	-	-	50	5.39	1.05
100	14.43	0.93	100	25	0.97	100	4.84	0.82
200	12.05	1.01	200	22.23	1.4	200	4.75	1.19
500	12.16	0.69	500	19.44	1.17	500	5.16	1.25
800	11.58	1.00	800	18.73	1.62	800	4.78	1.36
secas ao ar	1.35	2.18	secas ao ar	3.87	2.8	secas ao ar	0.5	2.11

No entanto, seus índices mais expressivos, em relação aos demais solos, não significam que sua capacidade de retenção seja diretamente proporcional. Estes valores apenas demonstram que o material é ávido por água para uma faixa de umidades baixas, sendo que a água é facilmente expulsa na mesma proporção em que infiltra. Sendo observada a concordância entre diminuição do teor de umidade e aumento da absorção de água, buscou-se estabelecer a relação entre o I_{abs} e a Sucção (S) (Figura 23).

O Solo 1 e o Solo 3, mais arenosos, mostraram melhor relação entre aumento da sucção com o aumento do I_{abs} (R^2 entre 0,81 e 0,82), enquanto que o Solo 2 exibiu coeficiente de determinação inferior ($R^2 = 0,71$). Este fato pode estar relacionado ao maior teor de argila deste solo, que mesmo com sucções mais altas, não apresenta absorção de água tão rápida, devido ao tamanho reduzido dos poros. Buscando-se amenizar esta influência, dividiu-se o valor do I_{abs} pela respectiva

umidade inicial do solo ensaiado e, correlacionou-se com o valor da sucção (Figura 24).

Comparando as Figuras 23 e 24, verificou-se uma melhora na correlação para os três solos. Portanto, considerou-se que esta forma de análise conduz a uma melhor compreensão da influência da sucção na absorção de água.

Sucção versus Índice de Erodibilidade ($S \times E$)

As amostras representativas provenientes da região de São Pedro confirmaram o comportamento erodível do solo quando analisadas segundo as formulações (8) e (9). Ao contrário dos solos com fração fina que encontraram na coesão estrutural estabilidade favorável contra a desagregação de suas partículas.

Valores de E_{52} e E_{40} podem ser vistos na Tabela 6 e Figura 25, caracterizando o Solo 3 como erodível ($E < 1$), e os Solos 1 e 2 como não erodíveis ($E > 1$).

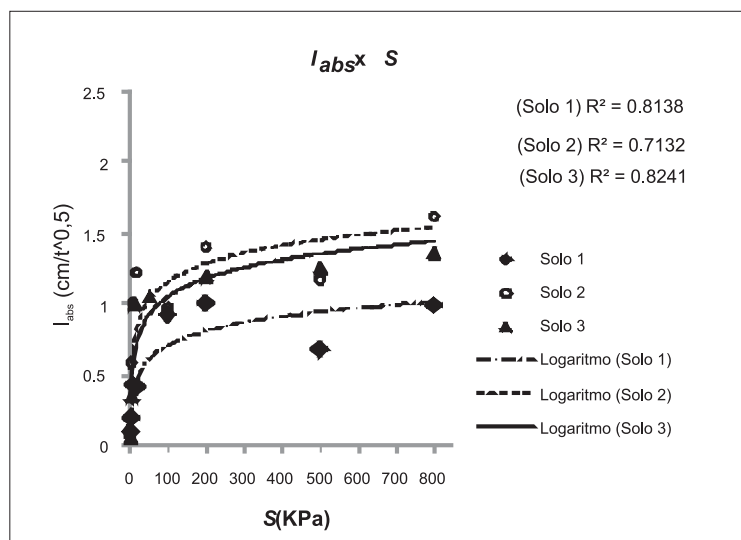


FIGURA 23. Relação entre I_{abs} e a sucção.

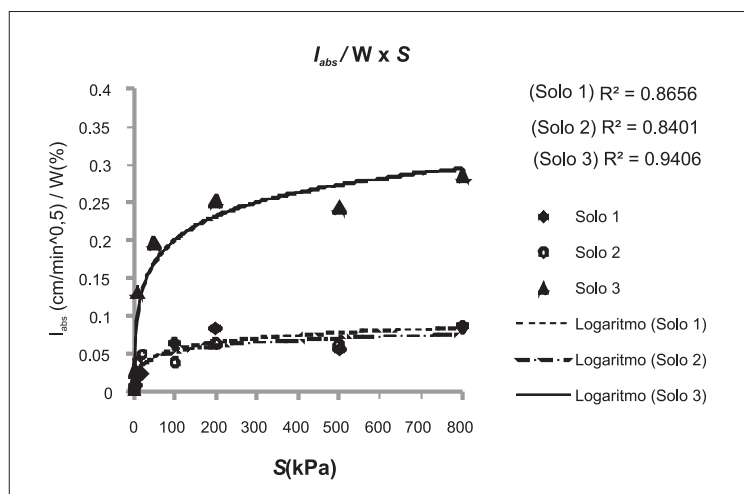


FIGURA 24. Relação entre a razão do I_{abs} pelo teor de umidade e a sucção.

Constam também na tabela os valores médios de P para cada sucção.

No geral, notou-se que o aumento da sucção (redução do teor de umidade) parece conduzir maiores perdas (P) no ensaio de perda de massa por imersão. Como solos com altas perdas são, em geral, muito

susceptíveis à erosão, isto vem demonstrar a importância que pode ter a perda de umidade natural do solo no processo erosivo. Assim sendo, quanto mais seco estiver um solo, quando do início do evento chuvoso, maior poderá ser sua desagregação e consequentemente sua erodibilidade.

TABELA 6. Valores de E para os solos.

S (kPa)	SOLO 1				SOLO 2				SOLO 3			
	labs	P (%)	E40	E52	labs	P (%)	E40	E52	labs	P (%)	E40	E52
2	0.10	0.92	4.35	5.65	0.07	0.43	6.51	8.47	0.06	66.29	0.04	0.05
5	0.20	4.39	1.82	2.37	0.58	0.83	27.95	36.34	0.35	69.15	0.20	0.26
10	0.44	20.55	0.86	1.11	1.01	25.4	1.59	2.07	1.00	74.39	0.54	0.70
20	0.42	7.66	2.19	2.85	1.22	76.27	0.64	0.83	1.32	64.47	0.82	1.06
50	-	-	-	-	-	-	-	-	1.05	68.01	0.62	0.80
100	0.93	39.18	0.95	1.23	0.97	51.98	0.75	0.97	0.82	74.58	0.44	0.57
200	1.01	42.81	0.94	1.23	1.40	14.39	3.89	5.06	1.19	76.12	0.63	0.81
800	1.00	22.12	1.81	2.35	1.62	56.25	1.15	1.50	1.36	75.58	0.72	0.94
secas ao ar	2.18	39.81	2.19	2.85	2.80	21.73	5.15	6.70	2.11	70.56	1.20	1.55

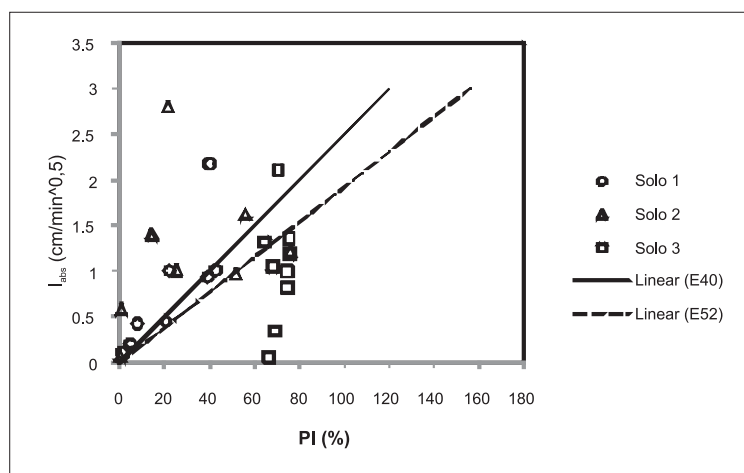


FIGURA 25. Gráfico de I_{abs} x P .

CONCLUSÃO

Os resultados obtidos neste trabalho permitiram verificar a relação entre o aumento da sucção com o aumento da velocidade de absorção de água em três solos com origem e granulometria diferentes. Observaram-se melhores correlações para os solos mais arenosos (Solos 1 e 3), devido provavelmente ao predomínio das sucções matriciais nestes solos. Já solo mais argiloso (Solo 2) apresentou correlações inferiores, mas ainda assim significativas.

O estudo mostrou ainda a relevante influência que o fenômeno da secagem, com conseqüente aumento da sucção, pode ter no despreendimento das partículas do solo provocando perda de massa por imersão. Este

efeito ficou mais evidente nos Solos 1 e 2, com maior percentagem de finos, quando se comportaram de duas formas: a) para sucções menores que 5kPa apresentaram perdas insignificantes de material; b) para valores de sucção elevados, atingiram mais de 40% de perdas. Já para o Solo 3, essencialmente arenoso, as perdas foram altas mesmo para as sucções baixas.

Como a perda de massa por imersão é um importante indicativo de desagregabilidade do solo, fator de relevância na medida de sua erodibilidade, infere-se que o efeito da secagem dos solos pode contribuir para o aumento da suscetibilidade à erosão de solos inicialmente pouco erodíveis. Portanto, a recomendação de

secagem prévia da amostra, para a realização do Ensaio de Erodibilidade, proposto por Nogami e Villibor (1979) se justifica plenamente.

Constatou-se também a boa relação do índice de absorção (I_{abs}) com a sucção (S), apresentando coeficientes de determinação (R^2) em torno de 0,9. Desta maneira, a realização do ensaio de absorção d'água, para um determinado solo, poderia permitir estimar, com boa aproximação, a faixa de sucção em que se encontra.

Como este ensaio é facilmente executável, sendo realizado em no máximo 2 minutos, permitiria rápida estimativa da sucção sem os dispêndios dos equipamentos onerosos.

Por fim, o estudo mostrou novamente a boa concordância da erodibilidade do solo, determinada pelo método proposto por Nogami e Villibor (1979). Porém, apenas a região da amostra 3 (São Pedro) se classificou como erodível, apresentando problemas de erosão acelerada observados em campo.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq pelo financiamento da pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ABRAMENTO, M. **Resistência ao cisalhamento de solos não saturados: considerações teóricas e estudo experimental sobre solo coluvionar das encostas da Serra do Mar**. São Paulo, 1988. 175 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
2. ALCÂNTARA, M.A.T. **Estudo da Erodibilidade de alguns solos do Estado de São Paulo**. São Carlos, 1997. 129 p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
3. ÂNGULO, R.J. Relações entre a erodibilidade e agregação, granulometria e características químicas de solos brasileiros. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, v. 8, p. 133-138, 1984.
4. ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Solo - Análise granulométrica - Método de ensaio - Procedimento: NBR7181**. Rio de Janeiro, 1984.
5. ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Solo - Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm - Determinação da massa específica - Método de ensaio - Procedimento: NBR6508**. Rio de Janeiro, 1984.
6. ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Rochas e Solos – Terminologia: NBR6502**. Rio de Janeiro, 1995.
7. BRYAN, R.B. The development, use and efficiency of índices of soil erodibility. Amsterdam: **Geoderma**, Elsevier Publishing Company, n. 2, p. 5-26, 1969.
8. BUENO, B.S. **Mecânica dos solos**. São Carlos: Departamento de Geotecnia, EESC/USP, v. 1, 132 p., 1979.
9. CARVALHO, C. DE ; SALES, M.M.; SOUZA, N.M.; MELO, M.T.S. **Processos erosivos no Centro-Oeste brasileiro**. Brasília: UNB, FINATEC, 464 p., 2006.
10. CAMPOS, L.E.P. Utilização de parâmetros de solos não saturados em encostas. In: CONGRESSO ARGENTINO DE MECÂNICA DE SUELOS E INGENIERIA GEOTECNICA – CAMSIG, 16, 2002, Patagônia. **Anais...** Patagônia, 2002.
11. CAVALIERI, A. **Erodibilidade do solo: avaliação por meio de propriedades físicas e químicas**. Campinas, 1994. 80 p. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas.
12. CHANDLER, R.J.; CRILLY, M. S. & MONTGOMERY-SMITH, G. **A low-cost method of assessing Clay desiccation for low-rise buildings**. Proceedings of the Institute of Civil Engineering, v. 92, n. 2, p. 82-89, 1992.
13. DENARDIN, J.E. **Erodibilidade do solo estimada por meio de parâmetros físicos e químicos**. Piracicaba, 1990. 113 p. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo.
14. FERREIRA, M.D. **Análise da evolução dos processos erosivos acelerados em áreas urbanas e das técnicas de controle e recuperação – Córrego do Tucum (São Pedro/SP)**. São Carlos, 2004. 171 p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
15. FREDLUND, D.G. & RAHARDJO, H. **Soil mechanics for unsaturated soils**. New York: John Wiley, 517 p., 1993.
16. FÚLFARO, J.V. & BJOMBERG, A.J.S. Geologia. In: CINTRA, J.C.A. & ALBIERO, J.H. (Eds.), **Solos do interior de São Paulo**. São Carlos, Cap. 1, p. 1-42, 1993.
17. LOBO, A.S. Problemas de fundações em solo colapsável – Estudo de casos. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SOLOS NÃO SATURADOS, 3, 1997, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro, 1997, v. 1, p. 77-89.
18. MARINHO, F.A.M. A Técnica do Papel Filtro para Medida de Sucção. In: ENCONTRO SOBRE SOLOS NÃO SATURADOS, 1995, Rio Grande do Sul. **Anais...** Porto Alegre: CPGE/UFRGS, 1995, p. 112-125.
19. MARINHO, F.A.M. “Medição de sucção em solos”. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SOLOS NÃO SATURADOS, 3, 1997, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro, 1997, v. 2, p. 373-397.
20. MOTA, F.S. Análise das relações entre absorção de água e condutividade hidráulica dos solos em estudos de erosão. São Carlos, **Relatório de Iniciação Científica – CNPQ**, 2008.
21. NOGAMI, J.S. & VILLIBOR, D.F. Soil characterization of mapping units for highway purposes in a tropical area. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, v. 19, p. 196-199, 1979.
22. PEJON, O.J. **Mapeamento Geotécnico da folha de Piracicaba-SP (escala 1:100.000): estudo de aspectos metodológicos, de caracterização e de apresentação dos atributos**. São Carlos, 1992. 224 p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
23. PEJON, O.J. & SILVEIRA, L.L.L. Index properties to predict erodibility of tropical soil. In **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, v. 66, p. 224-236, 2007.
24. RODRIGUES, R.A. **Modelação das deformações por colapso devidas à ascensão de lençol freático**. São Carlos, 2007. 262 p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

25. RÖHM, S.A. **Solos Não Saturados**. Departamento de Geotecnia, EESC, USP, São Carlos, Monografia Geotécnica, n. 4, 135 p., 2004.
26. SILVA, A.F. **Mapeamento geotécnico e análise dos processos erosivos na Bacia do Córrego Tuncum, São Pedro-SP, Escala 1:10.000**. São Carlos, 2003. 117 p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
27. Van GENUCHTEN, M.T. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 44, p. 892-898, 1980.
28. VILAR, O.M. **Formulação de um modelo matemático para a erosão dos solos pela chuva**. São Carlos, 1987. 196 p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
29. ZUQUETTE, L.V. **Mapeamento geotécnico preliminar na região de São Carlos**. São Carlos, 1981. 86 p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

*Manuscrito Recebido em: 1 de janeiro de 2010
Revisado e Aceito em: 9 de abril de 2010*