

ANEXO 2

METODOLOGIA UTILIZADA PARA A REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS GEOTÉCNICOS DE GRANULOMETRIA E ERODIBILIDADE

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	03
2. ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO	04
2.1. INDÍCES FÍSICOS	04
2.2. ENSAIO DE GRANULOMETRIA	09
3. ENSAIO DE ERODIBILIDADE	11
3.1. Ensaio de absorção de água	11
3.2. Ensaio de perda de peso por imersão	13
REFERÊNCIAS	15

1. INTRODUÇÃO

A erodibilidade pode ser definida como a propriedade do solo que retrata a maior ou menor facilidade com que suas partículas são destacadas e transportadas pela ação de um agente erosivo. Constitui uma das propriedades de comportamento dos solos de maior complexidade de previsão, em função do grande número de fatores físicos, químicos, biológicos e mecânicos intervenientes, sendo considerado o fator mais importante para a escolha de práticas conservacionistas (**FREIRE; PESSOTTI, 1974**).

Entre as propriedades do solo que contribuem para a maior ou menor resistência à ação erosiva das águas, ou seja, sua erodibilidade, estão a textura, que influi na capacidade de infiltração e absorção da água, e a estrutura, que é fundamental na caracterização do comportamento hidráulico dos macroporos na região de fluxo.

Solos de textura arenosa são normalmente porosos, permitindo rápida infiltração das chuvas e dificultando o escoamento superficial. Entretanto, como possuem baixa proporção de partículas argilosas, apresentam maior facilidade para a erosão.

Outra característica importante do solo, relacionada à erosão é a sua espessura. Solos rasos são mais vulneráveis aos eventos chuvosos, pois permitem rápida saturação dos perfis superficiais. Os solos profundos apresentam maior capacidade de infiltração das águas pluviais, disponibilizando menor quantidade de água superficial e, portanto, são menos erodíveis (**MENEZES, 2010**).

A influência da natureza do solo sobre a erodibilidade é óbvia, sendo esta propriedade o produto da interação da profundidade, permeabilidade, textura, estrutura e pedregosidade (**FREIRE; PESSOTTI, 1974**).

Menezes (2010) afirma que a erodibilidade depende principalmente da textura, medida e formato dos grãos, estrutura, permeabilidade e infiltrabilidade e coesão, dessa forma, dentre os ensaios mais recomendados para a definição da suscetibilidade do solo aos processos erosivos estão os de granulometria e erodibilidade.

2. ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO

Para classificação e identificação dos materiais inconsolidados foram realizados ensaios de Granulometria Conjunta, conforme a NBR 7181/84, e de Massa Específica dos Sólidos, conforme a NBR 6508/84. Os Índices Físicos, como o teor de umidade e a massa específica, foram determinados experimentalmente e os demais, como os índices de vazios (e), porosidade (n), grau de saturação (S_r) e massa específica seca (ρ_d) foram determinados através de correlação entre os índices. A seguir é apresentado alguns dos procedimentos utilizados em laboratório e escritório para a realização das análises de caracterização.

2.1. Índices Físicos

No solo, apenas parte de seu volume total é ocupado por partículas sólidas, que se acomodam formando a estrutura. Dessa forma, deve-se considerar que o comportamento do solo depende da quantidade relativa de cada uma das fases (sólida, líquida e gasosa). Para tanto, o cálculo dos índices físicos (em termos de massas e volumes) pode representar as condições físicas de um solo no estado em que ele se encontra.

As três principais relações de volumes mais utilizadas são: (i) porosidade; (ii) índice de vazios; e (iii) grau de saturação.

(i) Porosidade (n): consiste na relação entre o volume de vazios (V_v) e o volume total da amostra (V), conforme a **Equação 2.1**:

$$n = \frac{V_v}{V} \quad (2.1)$$

(ii) Índice de vazios (e): consiste na relação entre o volume de vazios (V_v) e o volume de sólidos (V_s), podendo ser definido através da **Equação 2.2**:

$$e = \frac{V_v}{V_s} \quad (2.2)$$

(iii) Grau de saturação (S_r): representa a relação entre o volume de água (V_w) e o volume de vazios (V_v), conforme a **Equação 2.3**:

$$S_r = \frac{V_w}{V_v} \quad (2.3)$$

Os índices físicos determinados em laboratório foram a massa específica natural, o teor de umidade e a massa específica dos sólidos. Os demais índices, como salientado anteriormente, foram determinados através de fórmulas de correlação (PEJÓN, 1992).

(iv) Massa Específica Natural (ρ): relação entre a massa do elemento (M) e o seu volume (V), conforme a **Equação 2.4**:

$$\rho = \frac{M}{V} \quad (2.4)$$

Para o cálculo da massa específica natural foram realizadas as medidas do diâmetro e da altura do corpo de prova (em forma cilíndrica).

(v) Massa Específica dos Sólidos (ρ_s): determinada dividindo-se a massa de sólidos (M_s) pelo volume ocupado por esses sólidos (V_s), conforme a **Equação 2.5**:

$$\rho_s = \frac{M_s}{V_s} \quad (2.5)$$

Para a definição desse índice utilizou-se um frasco de vidro, chamado balão volumétrico. Uma quantia de amostra depois de dispersada em um dispersor mecânico e repousada por pelo menos 12 horas, foi colocada no balão volumétrico e aquecida em banho-maria, juntamente com água destilada (**Figura 2.1a**). O conteúdo foi levado à bomba vácuo para retirada do ar (**Figura 2.1b**) e logo após preencheu-se o restante do frasco com água destilada até a marca de referência (**Figura 1c**).

Após esse procedimento, realizou-se leituras da massa contida no picnômetro (água e solo) nas temperaturas de 15°C, 17,5°C, 20,0°C, 22,5°C e 25°C (**Figura 1d**). E por fim, a amostra foi seca em estufa a 100°C e pesada. A **Figura 2** mostra o cálculo da massa específica dos sólidos.

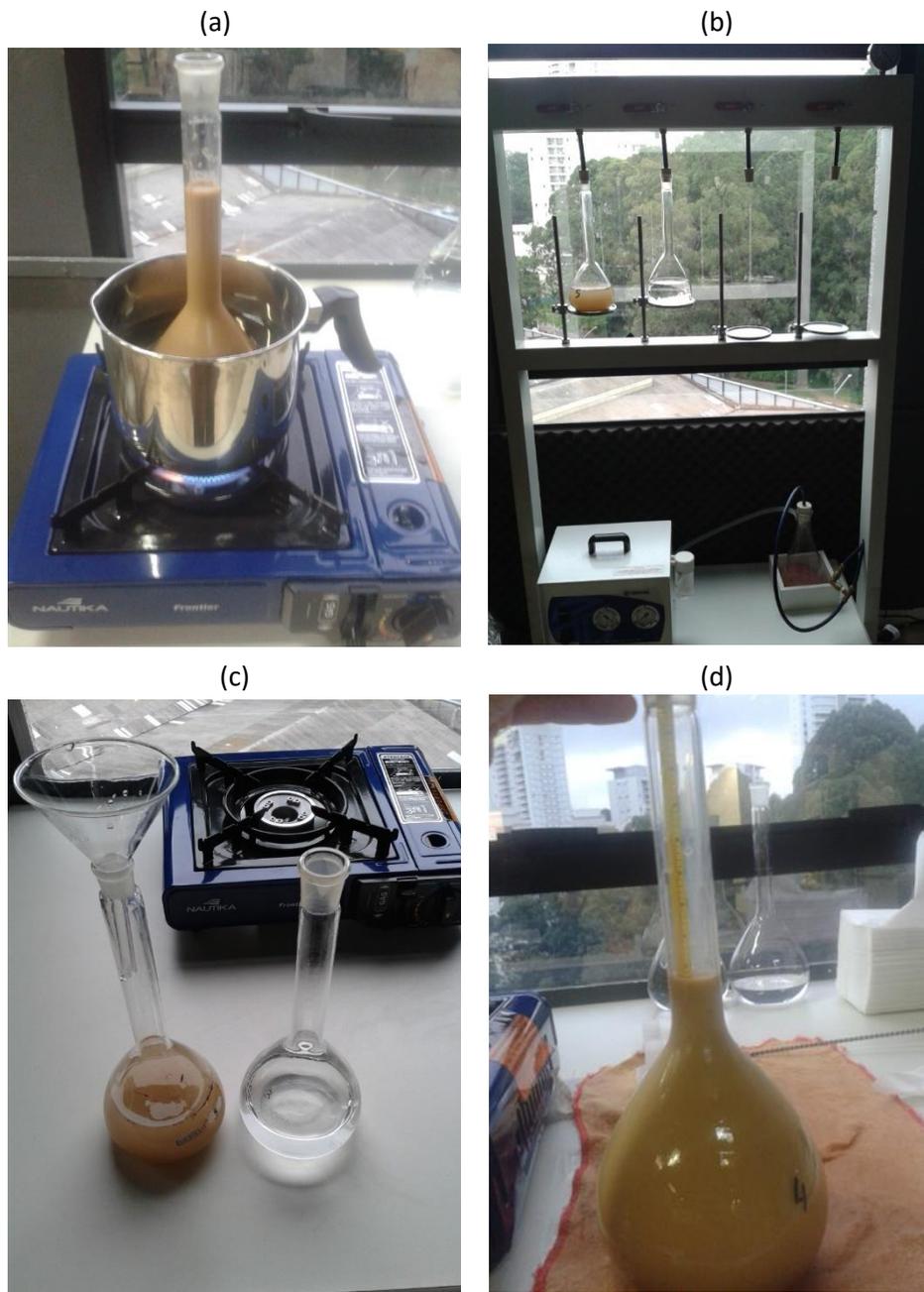


Figura 2.1. Procedimentos para o cálculo da massa específica dos sólidos. (a) Conteúdo do balão volumétrico aquecido em banho-maria; (b) Retirada do ar contido no balão volumétrico; (c) Preenchimento do balão volumétrico com água destilada até a marca de referência; (d) medição da temperatura do conteúdo para pesagem.

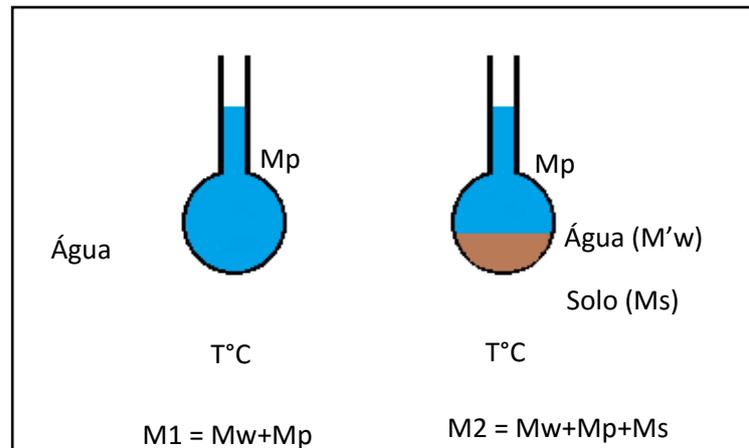


Figura 2.2. Cálculo da massa específica dos sólidos.

A massa de água correspondente ao volume deslocado pelos sólidos será:

$$M1 - M2 = Mw - M'w - Ms \quad \text{ou}$$

$$Mw - M'w + M1 - M2 + Ms = \Delta Mw$$

Portanto, o volume dos sólidos corresponde a (**Equação 2.5**):

$$V_s = \frac{\Delta Mw}{\gamma_w} \quad (2.5)$$

Desse modo, a massa específica dos sólidos pode ser assim obtida (**Equação 2.6**):

$$\gamma_s = \frac{M_s}{V_s} = \frac{M_s}{\Delta Mw} \cdot \frac{\gamma_w}{\gamma_s} = \frac{M_s}{M1 - M2 + Ms} \gamma_w \quad (2.6)$$

(vi) Teor de Umidade (w): É a relação entre a massa ou peso da água contida no solo e a massa ou peso de sua fase sólida, expressa em porcentagem.

Para o cálculo desse índice, três capsulas de alumínio previamente taradas foram preenchidas em cerca de 2/3 com amostra de solo, depois pesou-se o conjunto capsula mais amostra úmida. Em seguida o conteúdo foi levado à estufa até constância de peso (**Figura 2.3**). O conjunto solo seco mais cápsula é então pesado e, com a tara da cápsula (determinada de início) calculou-se o teor de umidade através da **Equação 2.7**:

$$w = \frac{M2 - M1}{M1 - M0} 100\% \quad (2.7)$$

Onde:

M2 – Massa do solo úmido mais cápsula

M1 – Massa do solo seco mais capsula

M0 – Tara da cápsula

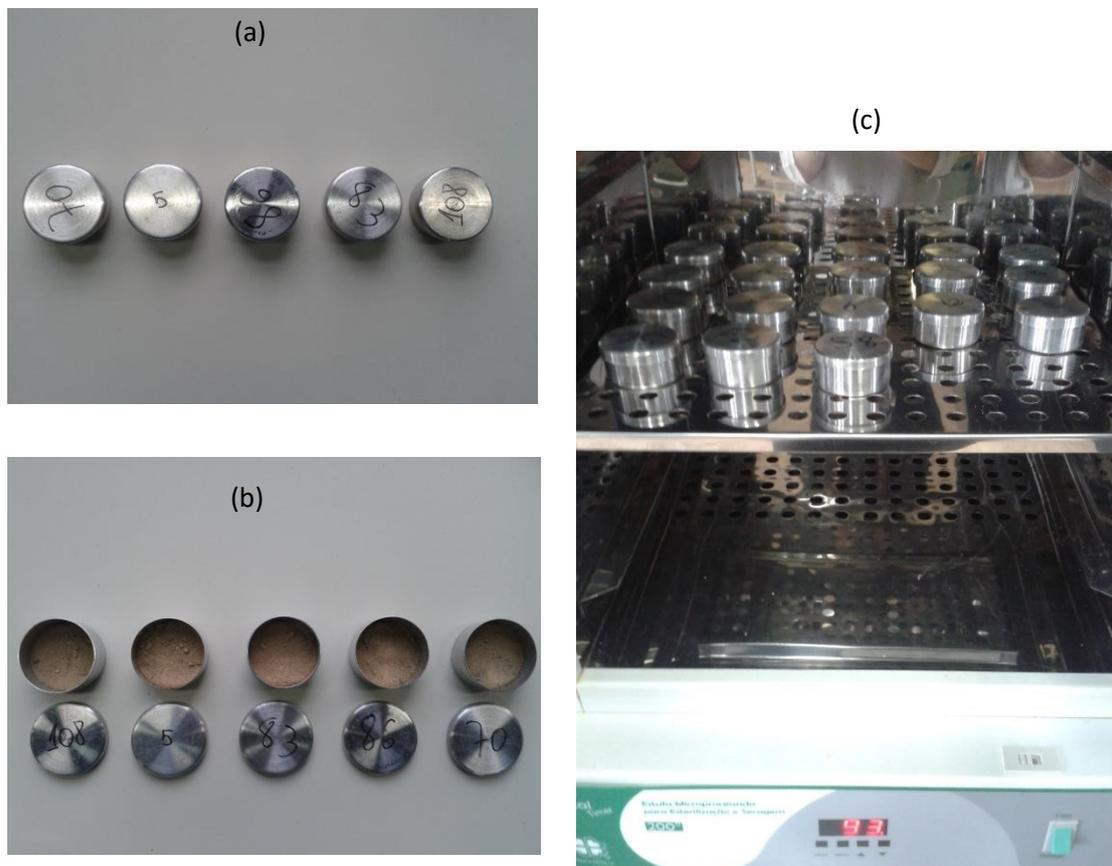


Figura 2.3. Procedimentos para o cálculo do teor de umidade. (a) e (b) Preparação das amostras; (c) Cápsulas para o cálculo do teor de umidade sendo levadas à estufa.

O Quadro 2.1 mostra os limites extremos de variação dos índices físicos adotados nesse trabalho.

Quadro 2.1. Limites extremos de variação dos índices físicos.

Limites de Variação
$1,0 < Y < 2,5 \text{ g/cm}^3$
$2,5 < Y_s < 3,0 \text{ g/cm}^3$
$0 < e < 20$
$0 < n < 100\%$
$0 < S_r < 100\%$
$0 < w < 1500\%$

2.2. Ensaio de Granulometria

As principais propriedades dos solos que conferem maior ou menor resistência à ação erosiva das águas, ou seja, a erodibilidade, é a textura, a estrutura e a permeabilidade (**NOGUEIRA, 1995**).

O ensaio geotécnico capaz de fornecer informações a respeito da textura, ou seja, o tamanho das partículas do solo, é o ensaio de granulometria. A granulometria dos solos influi na capacidade de infiltração e absorção da água da chuva, interferindo no potencial de enxurradas no solo e também na maior ou menor coesão entre as partículas (**BRAJA, 2007**).

Alcântara (1997) destaca a granulometria como sendo o ensaio mais utilizado na tentativa de se avaliar o grau de erodibilidade de um solo. Para o autor, os solos mais erodíveis são aqueles que apresentam predominância da fração silte e areia muito fina e baixo teor de argila, ou seja, solos finos com comportamento mais granular.

Menezes (2010), nessa mesma perspectiva, observou que as areias apresentam os maiores índices de erodibilidade e que o teor de silte também afeta a erodibilidade dos solos, de forma que, quanto maior o teor de silte, maior a suscetibilidade dos solos a sofrerem processos erosivos.

A análise granulométrica é expressa em porcentagem do peso total seco, sendo realizada através de dois métodos: (i) ensaio de peneiramento, para partículas de tamanhos maiores que 0,075 mm de diâmetro e (ii) ensaio de sedimentação, para tamanhos de partículas menores que 0,0075 mm de diâmetro (**BRAJA, 2007**). O ensaio é regulamentado pela NBR 7181/1984.

Para satisfazer o objetivo do conhecimento da potencialidade dos solos à ocorrência de processos erosivos o ensaio de peneiramento é fundamental. Esse ensaio consiste em agitar a amostra de solo por um conjunto de peneiras que tenham aberturas progressivamente menores.

O ensaio de sedimentação, por sua vez, também é considerado essencial nas pesquisas referentes aos processos erosivos, já que seu objetivo é separar as frações de silte e argila, sendo baseado no princípio dos grãos do solo em água. “Quando uma partícula do solo é dispersada em água, as partículas decantam com velocidades diferentes, dependendo da sua forma, tamanho, peso e da viscosidade da água” (**BRAJA, 2007, p.23**). Em todas amostras realizadas na VERACRUZ foram realizados ensaios de sedimentação, conforme as fotos da **Figura 2.4**.

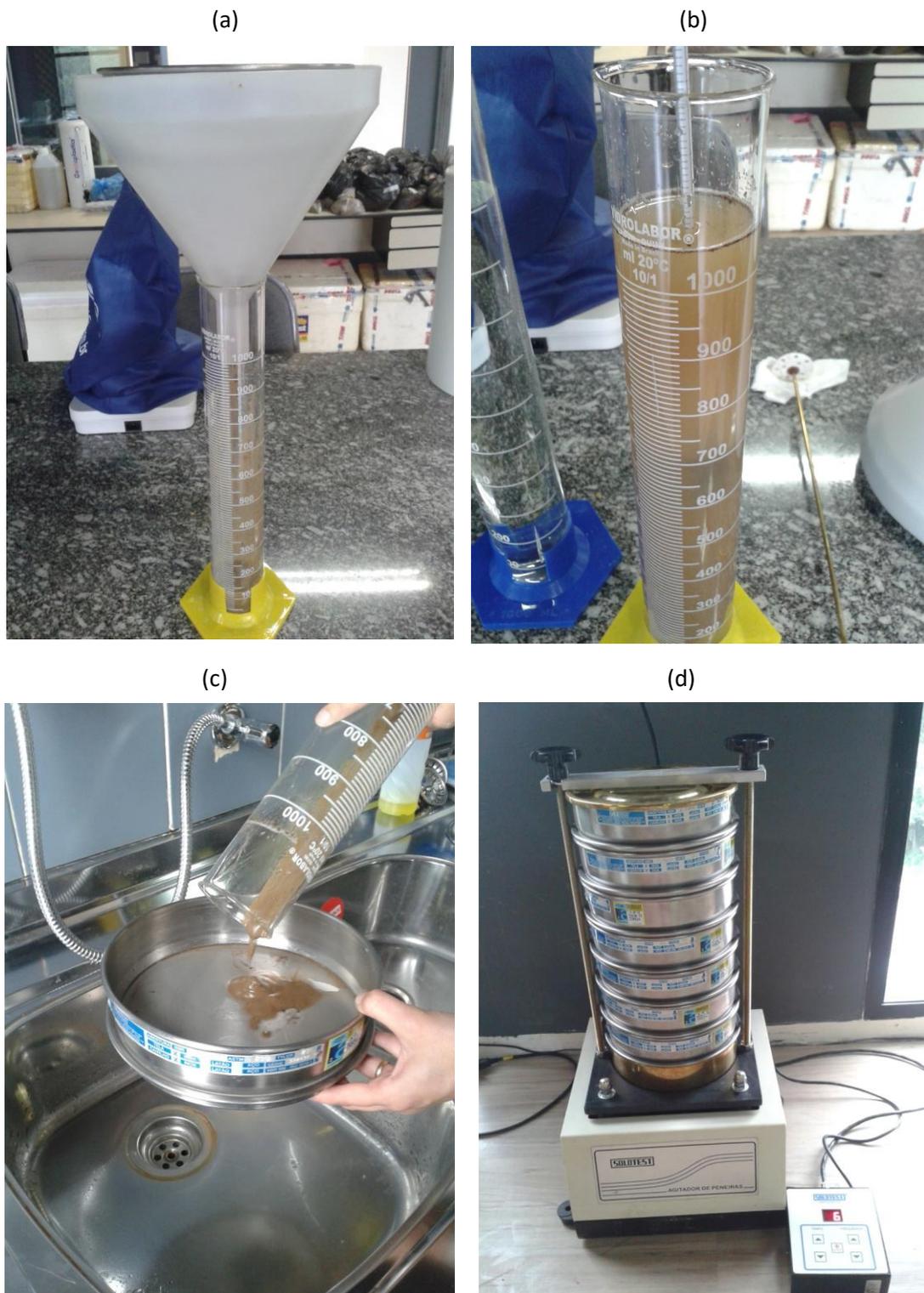


Figura 2.4. Ensaio de sedimentação. (a) Transferência da amostra recém passada pelo dispersor elétrico para proveta; (b) Leituras com densímetro em tempos pré-determinados até que se segue à leitura do diâmetro de 0,002 mm; (c) Lavagem do conteúdo de solo contido na proveta na peneira de 0,075 mm; (d) Peneiramento da amostra retida no jogo de peneiras com o auxílio de agitador mecânico.

O **Quadro 2.2** demonstra a denominação das frações de solo conforme o tamanho dos grãos, definidos pela ABNT.

Quadro 2.2. Limites das frações de solo pelo tamanho dos grãos conforme a ABNT.

Fração de solo	Tamanho dos grãos definidos pela ABNT
Matacão	25 cm a 1 m
Pedra	7,6 cm a 25 cm
Pedregulho	4,8 cm a 7,6 cm
Areia grossa	2,0 cm a 4,8 cm
Areia média	0,042mm a 2,0 cm
Areia fina	0,05 mm a 0,042 mm
Silte	0,005 mm a 0,05 mm
Argila inferior	até 0,005 mm

Os resultados obtidos com a granulometria podem ser interpretados através da correlação entre a erodibilidade e a curva granulométrica, em que solos mal distribuídos (cujo coeficiente de uniformidade é menor que 5) são erodíveis e solos com coeficiente de uniformidade maior que 5 são pouco erodíveis (**FÁCIO, 1991**).

3. ENSAIO DE ERODIBILIDADE

A erodibilidade, particularizada como a suscetibilidade a erosão hídrica por fluxo superficial concentrado, é uma das propriedades do comportamento dos solos de maior complexidade pelo grande número de variáveis intervenientes, sendo as principais: a textura do solo, a estabilidade dos agregados, a capacidade de infiltração, entre outros.

A erodibilidade pode ser avaliada de forma direta, por meio de ensaios específicos ou por meio de ensaios indiretos, envolvendo as propriedades que determinam os processos de agregação e estabilidade dos agregados (**PEJÓN, 1992**).

Dentre os ensaios diretos, destacam-se o ensaio de desagregação, o ensaio *Crumb Test* e o ensaio Furo de Agulha (*Pinhole Test*), e dentre os ensaios indiretos destacam-se o ensaio de absorção de água e o de perda de peso por imersão, que foram utilizados nesse trabalho, conforme a metodologia de **Nogami e Villibor (1979)** e **Pejón (1992)**, descritas a seguir.

3.1. Ensaio de absorção de água

Para a realização deste ensaio, utilizaram-se amostras indeformadas secas ao ar e na sombra por um período de sete dias, ao menos.

Foi necessária a utilização de um equipamento que consiste de um recipiente cilíndrico, com as mesmas dimensões do cilindro de amostragem, conectado a um tubo de vidro horizontal graduado. O conjunto foi preenchido com água e na porção superior do recipiente adaptou-se uma pedra porosa, que deve ser mantida saturada.

A amostra, ainda no cilindro de amostragem, foi pesada, e logo depois colocada sobre a pedra porosa saturada, dando início neste momento, à contagem de tempo e realizando-se as leituras de volume de água absorvida por intervalo de tempo, até que a água atingisse o topo e saturasse a amostra (**Figura 3.1**).

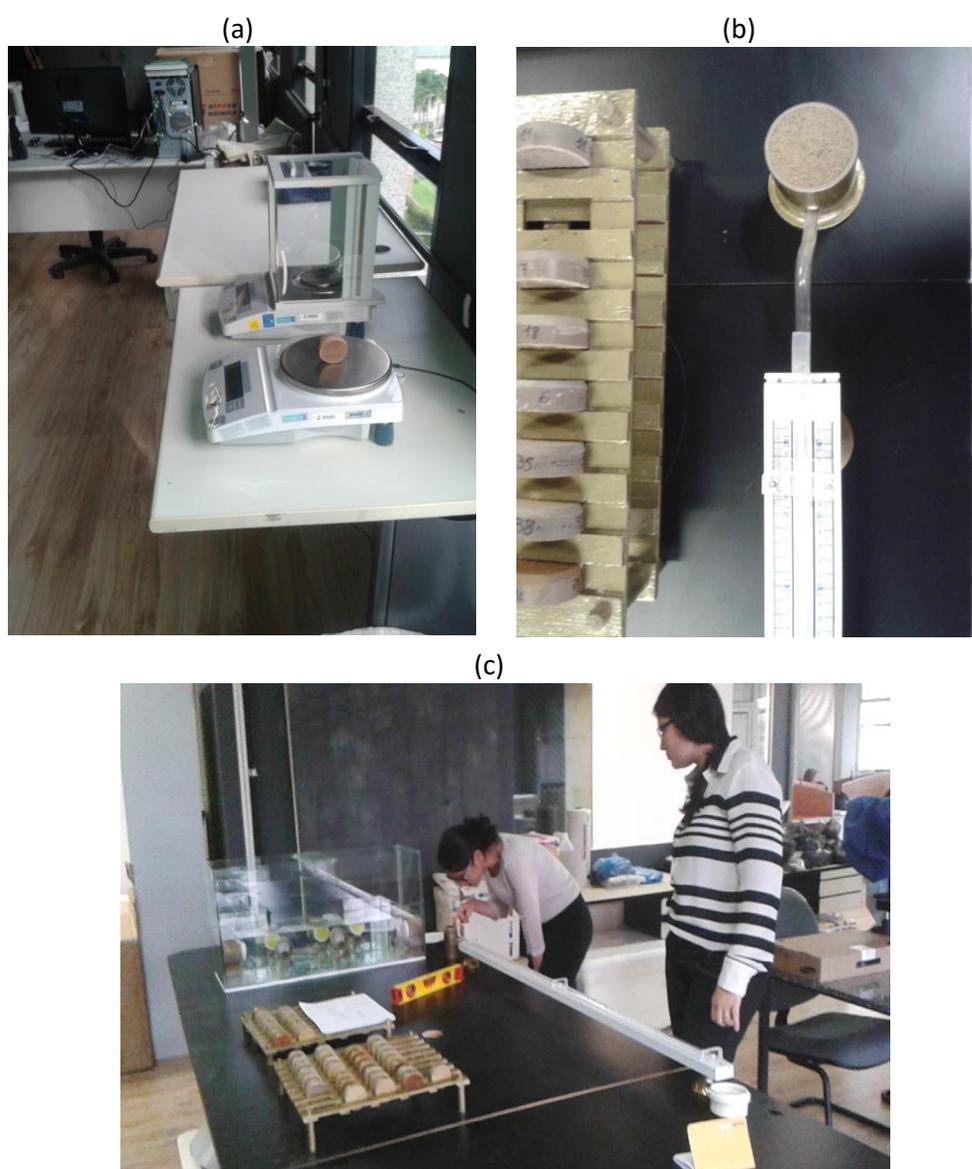


Figura 3.1. Ensaio de absorção de água. (a) Amostra sendo pesada; (b) Inserção da amostra na pedra porosa; (c) Realização de leitura em tempos determinados do nível de absorção da água pela amostra.

O índice de absorção (S) foi obtido através de um gráfico do volume de água absorvido por unidade de área da base do corpo de prova (q) versus a raiz quadrada do tempo, conforme a **Equação 3.1**:

$$S = \frac{q}{\sqrt{t}} \quad (3.1)$$

3.2. Ensaio de perda de peso por imersão

Imediatamente após a realização do ensaio de absorção de água, deve-se prender o conjunto anel mais corpo de prova saturado no cilindro e colocar, com cuidado para não vazão amostra, no suporte dentro do aquário com água, ficando o topo da amostra na horizontal e abaixo do nível desta por aproximadamente 2 mm. As fotos com a realização deste ensaio na VERACRUZ estão apresentadas na **Figura 3.2**.

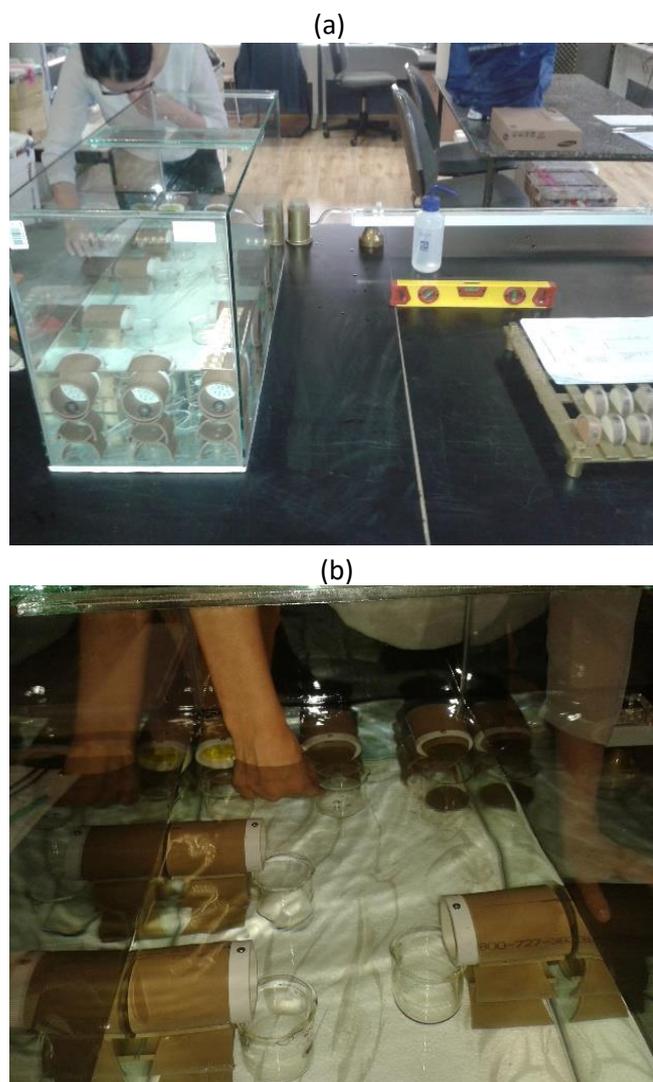


Figura 3.2. Ensaio de perda de peso por imersão. (a) e (b) Inserção das amostras no recipiente para imersão.

Através dos parâmetros S e P foi possível determinar o índice de erodibilidade (E), segundo as formulações propostas por **Nogami e Villibor (1979)** e **Pejón (1992)** – Equações 3.2 e 3.3, respectivamente.

$$E_{40} = 40 \cdot \frac{S}{P} \quad (3.2)$$

$$E_{52} = 52 \cdot \frac{S}{P} \quad (3.3)$$

REFERÊNCIAS

- ALCÂNTARA, M. A. T. **Estudo da Erodibilidade de alguns solos do Estado de São Paulo**. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo, São Carlos, 1997.
- BASTOS; MILITITSKY; GEHLING. Proposta metodológica para avaliação geotécnica da erodibilidade de solos residuais não saturados. In: **VII Simpósio Nacional de Controle de Erosão, Goiânia**, 2001.
- BERTAGNA, S. M. A. **Proposta metodológica de elaboração de carta de suscetibilidade ao escorregamento em sistema de informação geográfica: média-baixa bacia do rio Perequê (Serra do Mar-SP)**. Dissertação (Mestrado em Geociências e Meio Ambiente. Universidade Estadual Paulista), 1999.
- BRAJA, M. das. **Fundamentos de Engenharia Geotécnica**. São Paulo: Thomson Learning, 2007.
- BRIGHETTI, G.; MARTINS J. R. S. **Estabilização de Proteção de Margens**. PHD Obras Hidráulicas. Escola Politécnica, USP, São Paulo, 2001
- BUENO, B. de S.; VILAR, O. M. **Mecânica dos solos**. São Carlos: EESC-USP, 1997.
- FÁCIO, J. A. **Proposição de metodologia de estudo de erodibilidade dos solos do Distrito Federal**. Dissertação de Mestrado. Universidade de Brasília, Distrito Federal, Brasília, 1991.
- FREIRA, O; PESSOTI, J. E. S. **Erodibilidade dos solos do Estado de São Paulo**. USP, Piracicaba, 1974.
- INFANTI JUNIOR; FORNASARI FILHO, N. Processos da Dinâmica Superficial. In: OLIVEIRA, A. M. S.; BRITO. S. N. A. (Eds.) **Geologia de engenharia**. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia (ABGE), 1998, cap. 9, p. 132-152.
- MARQUES FILHO, P. L. E GERALDO, A. **Barragens e Reservatórios**. In: OLIVEIRA; BRITO. Geologia de Engenharia. São Paulo: ABGE, CNPq/FAPESP, 1998.
- MENEZES, M. B. M. de. **Análise da influência do teor de umidade na absorção d'água e sucção dos solos em estudos de erodibilidade**. Dissertação (mestrado em Geotecnia), 2010. Universidade de São Paulo: São Carlos, 2010.
- MONTGOMERY. C. W. **Environmental geology**. 3ª ed. Dubuque: Wm. C. Brown Publishers, 1992.
- NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F. Soil characterization of mapping units for highway purposes in a tropical área. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, vol. 19, 196-199.
- NOGUEIRA, J. B. **Mecânica dos Solos: ensaios de laboratório**. São Carlos: EESC-USP, 1995.

PEJÓN, O. J. **Mapeamento Geotécnico da folha de Piracicaba – SP (escala 1:100.000)**: estudo de aspectos metodológicos, de caracterização e de apresentação dos atributos. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, São Carlos, 1992.

SIMONS L. I. et al. **Engineering Analysis of Fluvial Systems**. Fort Collins, 1982.