

*Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
Embrapa Solos
Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento*

Manual de Métodos de Análise de Solo

3ª edição revista e ampliada

*Paulo César Teixeira
Guilherme Kangussu Donagemma
Ademir Fontana
Wenceslau Geraldes Teixeira*
Editores Técnicos

Embrapa
Brasília, DF
2017

Exemplares desta publicação podem ser adquiridos na:

Embrapa Solos

Endereço: Rua Jardim Botânico, 1024. Jardim Botânico

CEP: 22460-000 - Rio de Janeiro, RJ

Fone: + 55 (21) 2179-4500

Fax: + 55 (21) 2179-5291

<https://www.embrapa.br>

<https://www.embrapa.br/fale-conosco/sac/>

Unidade responsável pelo conteúdo e edição

Embrapa Solos

Comitê de Publicações da Embrapa Solos

Presidente: *José Carlos Polidoro*

Secretário-Executivo: *Jacqueline Silva Rezende Mattos*

Membros: *Ademar Barros da Silva, Adriana Vieira de C. de Moraes, Alba Leonor da Silva Martins, Enyomara Lourenço Silva, Evaldo de Paiva Lima, Joyce Maria Guimarães Monteiro, Luciana Sampaio de Araujo, Maria Regina Laforet, Maurício Rizzato Coelho, Moema de Almeida Batista, Wenceslau Gerales Teixeira*

Supervisão editorial: *Jacqueline Silva Rezende Mattos*

Normalização bibliográfica: *Luciana Sampaio de Araujo*

Editoração eletrônica: *Jacqueline Silva Rezende Mattos*

Capa: *Eduardo Guedes de Godoy*

Revisão de texto: *André Luiz da Silva Lopes e
Marcos Antônio Nakayama*

3ª edição

Publicação digitalizada (2017)

Todos os direitos reservados.

A reprodução não autorizada desta publicação, no todo ou em parte, constitui violação dos direitos autorais (Lei nº 9.610).

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Embrapa Solos

Manual de métodos de análise de solo / Paulo César Teixeira ... [et al.], editores técnicos. – 3. ed. rev. e ampl. – Brasília, DF : Embrapa, 2017.

573 p. : il. color.

ISBN 978-85-7035-771-7

1. Análise do solo. 2. Física do solo. 3. Química do solo. 4. Matéria orgânica. 5. Mineralogia. I. Teixeira, Paulo César. II. Donagemma, Guilherme Kangussu. III. Fontana, Ademir. IV. Teixeira, Wenceslau Gerales. V. Embrapa Solos.

CDD 631.40202

— Capítulo 6 —

RETENÇÃO DE ÁGUA DO SOLO PELO MÉTODO DA CENTRÍFUGA

Marcos Aurélio Carolino de Sá
João Herbert Moreira Viana

6.1 Introdução

O método da centrífuga para determinação da curva característica de retenção de água do solo apresenta algumas vantagens em relação aos métodos da mesa de tensão ou câmaras de pressão, tais como: i) rapidez, pois dispensa a espera pelo tempo de equilíbrio superior a 24 horas por ponto; ii) requer uma única saturação, o que minimiza os efeitos da histerese e iii) não apresenta paralisação de secamento por interrupção de contato entre amostra e placa, comum no método da placa porosa em amostras de solos expansivos, com minerais de argila 2:1.

Como desvantagem, ocorre a compactação da amostra ao longo do processo. Entretanto, espera-se que o efeito dessa compactação na acurácia dos resultados seja muito pequeno, pois ocorre de forma mais acentuada em rotações (e consequentemente tensões) mais elevadas, onde o efeito da estrutura do solo na retenção de água tende a ser menos importante que os efeitos da granulometria e da mineralogia.

No método da centrífuga, o período de centrifugação da amostra para determinação de cada ponto é de grande

importância na acurácia dos resultados, pois afeta principalmente os valores de umidade nas tensões mais elevadas, alterando, portanto, o teor de água residual. Para solos do Cerrado, é necessário um tempo superior a 80 minutos. Por segurança, tem-se adotado em análises de rotina o tempo de centrifugação de 2 horas por ponto, independentemente do tipo de solo.

6.2 Princípio

A centrifugação de uma amostra de solo previamente saturada gera um potencial crescente ao longo de seu comprimento (altura da amostra ao longo do anel volumétrico). Com base nesse princípio, é possível calcular a velocidade angular de uma centrífuga (W) em rotações por minuto para uma dada tensão que se queira aplicar à amostra (h), expressa em kPa.

Considera-se uma tensão média na amostra centrifugada, uma vez que na prática haverá, após a centrifugação, um gradiente de umidade ao longo da amostra (mais seco na parte superior, mais úmido na parte inferior). O potencial matricial médio de uma amostra centrifugada não ocorre necessariamente no seu ponto médio, uma vez que esse gradiente de umidade não é linear. Para mais detalhes, consultar Freitas Júnior e Silva (1984), Silva e Azevedo (2002), Smagin et al. (1998) e Smagin (2012).

6.3 Material e Equipamentos

- Centrífuga com velocidade máxima superior a 10.000 rpm, ou que possibilite reproduzir a tensão de 1.500 kPa.
- Bandeja com pelo menos 5 cm de altura para saturação das amostras.
- Discos de papel de filtro de aproximadamente 90 mm de diâmetro ou “fralda” de tecido sintético cortado em círculo

presa à parte inferior do anel volumétrico com elástico.

- Discos de papel de filtro de aproximadamente 50 mm de diâmetro.
- Espátula com largura aproximada de 1,5 cm a 2,0 cm.
- Espátula com largura aproximada de 5 cm.
- Placa de Petri ou recipiente similar em alumínio.
- Balança de precisão com aproximação de 0,1 g.
- Estufa (105 °C – 110 °C).

6.4 Procedimento

- Definir para a centrífuga a ser utilizada as relações entre rotação e tensão aplicadas à amostra (vide item 6.6 e Tabela 1).
- Saturar as amostras por capilaridade por no mínimo 24 horas. Para tanto, colocá-las em bandeja com um disco de papel de filtro de 90 mm de diâmetro embaixo de cada amostra (ou “fralda”), tomando-se o cuidado de não perder solo.

Obs.: colocar as amostras na bandeja na mesma posição do perfil em que foram coletadas (parte superior para cima e parte inferior para baixo).

- Adicionar lentamente água destilada ou deionizada (desde que não cause dispersão da amostra), deixando uma lâmina de aproximadamente 4 a 4,5 cm de altura (nunca deixar a amostra submersa).

Obs.: em algumas amostras, a saturação pode ser dificultada pela presença de matéria orgânica com características hidrofóbicas, ou solos muito coesos e/ou compactados. Nesse caso, se a amostra apresentar aspecto seco em sua superfície após algumas horas na

água, gotejar cuidadosamente álcool etílico comercial (92 °GL ou similar) diretamente na superfície do solo com uma seringa ou pipeta, sem desestruturá-lo (normalmente 1 mL a 3 mL são suficientes). Pode-se recorrer ao uso de vácuo para auxiliar a eliminação de bolhas, com o cuidado de não permitir o borbulhamento forte no topo da amostra (muito vácuo ou pressões negativas extremamente baixas), que deforma a estrutura e causa perda de material.

- Retirar cuidadosamente as amostras saturadas da bandeja, com auxílio de uma espátula larga, e rapidamente determinar a massa da amostra saturada + anel volumétrico, para obtenção do teor de água na tensão 0 kPa e da porosidade total.
- Secar com pano ou toalha absorvente a água aderida às paredes externas do anel. Para facilitar a pesagem, ao retirar a amostra da água e evitar/minimizar a perda de solo, posicionar uma placa de Petri ou recipiente similar de alumínio previamente tarado por cima da amostra, virando amostra e placa de modo que sua parte inferior fique voltada para cima. Retirar o papel de filtro (ou fralda). Se uma parte do solo da amostra ficar aderida ao papel, retirar cuidadosamente com a espátula fina e devolvê-la à amostra. Colocar a placa com o anel na balança. Anotar a massa.
- Posicionar na parte inferior da amostra (parte voltada para cima) um disco de papel filtro com diâmetro de 50 mm ou com o diâmetro exato do recipiente suporte. Encaixar o recipiente suporte na amostra (de cima para baixo) e virá-lo junto com a amostra e a placa, de modo que a parte superior da amostra volte a ficar para cima. Retirar a placa de Petri. O papel filtro ficará entre a amostra e a placa perfurada (Figura 1c).

Obs.: Normalmente as centrífugas operam com quatro amostras por vez. Elas devem estar balanceadas (com aproximação de 0,1 g ou conforme recomendações do

fabricante da centrífuga), para evitar vibração e danos ao rotor. Para tanto, pesar cada recipiente completo com sua respectiva amostra, anotar o de maior peso e, se necessário, adicionar contrapesos sobre as amostras dos recipientes de menor peso, visando equilibrá-los. Esse procedimento é importante, sobretudo se numa bateria existirem amostras com diferentes graus de compactação ou mesmo granulometria (arenosas e argilosas), cujas densidades podem ser contrastantes. Algumas centrífugas dispõem de mecanismo que impede seu funcionamento, se desbalanceadas.

Tampar e posicionar os recipientes com as amostras (e respectivos contrapesos) na centrífuga, anotando-se suas posições no rotor (normalmente identificadas com números). Ajustar o controle de temperatura da centrífuga para manter a amostra próxima de 20 °C durante todo o processo.

Aplicar a primeira rotação por 2 horas.

- Retirar as amostras da centrífuga e, com auxílio de uma espátula fina, retirar os contrapesos, se houver. Determinar a massa de cada amostra + anel volumétrico.
- Voltar cada amostra para seu respectivo recipiente com o papel de filtro e balanceá-los novamente. Colocá-los na centrífuga e aplicar nova rotação por 2 horas.
- Repetir o processo até que seja determinado o último ponto da curva, quando as amostras devem ser novamente pesadas e secadas em estufa a 105 °C por 24 horas ou até peso constante.
- Retirar as amostras da estufa e deixar esfriar (de preferência em dessecador) e determinar a massa da amostra seca + anel volumétrico.
- Retirar o solo seco de dentro do anel volumétrico (o mesmo pode ser descartado ou destorroado e peneirado para

outras análises como densidade de partículas).

- Lavar o anel volumétrico, e, após seco, determinar sua massa. Com paquímetro, medir diâmetro e altura do anel para cálculo do volume, que será utilizado no cálculo da densidade do solo.

6.5 Cálculos

6.5.1 Velocidade angular de uma centrífuga que possui rotor basculante ou móvel para uma dada tensão

$$W = \left(\frac{60}{2 \times \pi} \sqrt{\frac{6 \times 981 \times 10,1957}{L \times (3r_e - L)}} \right) \times (\sqrt{h})$$

Em que:

W – velocidade angular da centrífuga, em rpm.

π – pi (3,14159).

L – comprimento da amostra ao longo do eixo da centrífuga (altura do anel volumétrico), em cm (Figura 1a).

r_e – raio externo da amostra tendo como referência o eixo da centrífuga, em cm (Figura 1a).

h – tensão média de água na amostra, em kPa.

6.5.2 Velocidade angular de uma centrífuga que possui rotor fixo para uma dada tensão

$$h = \left(0,0055 \times W^2 \times (r_e^2 - r_i^2) \times \cos \alpha \right) + (g \times L \times \sin \alpha)$$

Em que:

h – tensão média de água na amostra, em kPa.

W – velocidade angular da centrífuga, em rpm.

r_e – raio externo da amostra, tendo como referência o eixo da centrífuga até o topo da amostra, em m (Figura 1b).

r_i – raio interno da amostra, tendo como referência o eixo da centrífuga até a altura da água livre abaixo da amostra ou até o limite inferior da amostra, em m (Figura 1b).

α – ângulo entre o plano de rotação e o eixo de simetria da amostra.

g – aceleração da gravidade ($9,80665 \text{ m s}^{-2}$).

L – comprimento da amostra (altura da amostra no anel volumétrico), em m (Figura 1b).

6.5.3 Conteúdo gravimétrico de água

$$\text{CGA} = \frac{m_{\text{ag}}}{m_{\text{s}}}$$

Em que:

CGA – conteúdo gravimétrico de água a determinado potencial (kPa), em kg kg^{-1} .

m_{ag} – massa de água (massa da amostra de solo úmido mais a massa do anel, após a saturação ou após cada tensão aplicada, subtraída do peso do anel vazio, limpo e seco), em g.

m_{s} – massa de solo seco (massa da amostra mais a massa do anel, após secagem em estufa a $105 \text{ }^\circ\text{C}$ – $110 \text{ }^\circ\text{C}$ após atingir peso constante, subtraídas da massa do anel vazio, limpo e seco), em g.

6.5.4 Conteúdo volumétrico de água

$$CVA_i = CGA_i \times D_s$$

Em que:

CVA_i – conteúdo volumétrico de água a determinado potencial (kPa), em $m^3 m^{-3}$ (normalmente assume-se que o valor da densidade da água é igual a $1,00 g cm^{-3}$).

CGA_i – conteúdo gravimétrico de água a determinado potencial (kPa), em $kg kg^{-1}$.

D_s – densidade do solo calculada usando amostra com estrutura indeformada, em $g cm^{-3}$ (item 6.5.5).

6.5.5 Densidade do solo

$$D_s = \left(\frac{m_s}{V} \right)$$

Em que:

D_s – densidade do solo calculada considerando a amostra com estrutura indeformada, em $g cm^{-3}$.

m_s – massa de solo seco mesmo deformado ou compactado após centrifugação (massa da amostra mais a massa do anel, após secagem em estufa a $105 ^\circ C$ até atingir peso constante, subtraídas da massa do anel vazio, limpo e seco), em g.

V – volume do cilindro, que corresponde ao volume original da amostra indeformada, em cm^3 .

6.6 Observações

As amostras de solo indeformadas devem ser coletadas em anéis volumétricos de 51 mm de altura por 50 mm de diâmetro (ou adequados ao modelo da centrífuga). Caso se queira determinar a condutividade hidráulica nas mesmas

amostras, fazê-lo antes de determinar a curva de retenção de água pelo método da centrífuga, dada a compactação que ocorre durante o processo.

As amostras acondicionadas no anel a partir da TFSA ou de amostras destorroadas também podem ser usadas para a obtenção dos valores de retenção em valores de tensão elevados (<100 kPa), ou de materiais já originalmente inconsolidados e sem estrutura desenvolvida, como sedimentos e substratos. Os valores mais precisos da retenção de água em baixas tensões dependem da manutenção da macroporosidade de campo, perdida ao se destorroar a amostra.

A centrífuga deve ter velocidade máxima superior a 10.000 rpm, ou que possibilite reproduzir na amostra o valor pF 4,18, correspondente à tensão de 1.500 kPa. O equipamento deve possuir também controle de temperatura (refrigeração) e deve estar adaptada para operar com rotores adequados para centrifugar anéis volumétricos padrão, de 51 mm de altura por 50 mm de diâmetro. Em tais rotores, as amostras são colocadas em recipientes (Figura 1c) que são normalmente confeccionados em alumínio ou material leve que resista à deformação durante a centrifugação. Também é interessante que a centrífuga disponha de controle automático da rotação, para minimizar efeitos de oscilações de tensão na rede elétrica que podem alterar a rotação e interferir na acurácia dos resultados.

Tabela 1. Valores de rotação (W) calculados em função da tensão média na amostra de solo em kPa com base em equação do item 6.5.1, apresentada por Silva e Azevedo (2002), para uma centrífuga com raio externo ($r_e = 9,2$ cm), comprimento da amostra ao longo do eixo da centrífuga ($L = 5,1$ cm). São apresentadas também outras unidades de tensão mátrica comumente encontradas em literatura nacional e internacional, e respectivos fatores de conversão.

W	Tensão mátrica	Outras unidades usuais de tensão mátrica				
	(h)	(h)				
rpm	kPa	pF	hPa	atm	bar	mca
120	0,3	0,48	3	0,00	0,00	0,03
218	1,0	1,00	10	0,01	0,01	0,10
378	3,0	1,48	30	0,03	0,03	0,29
535	6,0	1,78	60	0,06	0,06	0,59
691	10,0	2,00	100	0,10	0,10	0,98
977	20,0	2,30	200	0,20	0,20	1,96
1.196	30,0	2,48	300	0,30	0,30	2,94
1.544	50,0	2,70	500	0,49	0,50	4,90
1.953	80,0	2,90	800	0,79	0,80	7,85
2.184	100,0	3,00	1.000	0,99	1,00	9,81
4.368	400,0	3,60	4.000	3,95	4,00	39,23
5.349	600,0	3,78	6.000	5,92	6,00	58,84
6.906	1.000,0	4,00	10.000	9,87	10,00	98,07
8.458	1.500,0	4,18	15.000	14,80	15,00	147,10

O sistema internacional de unidades adota como unidade de pressão/tensão o Pascal ($\text{Pa} = \text{N m}^{-2}$) e seus múltiplos, sendo: hPa = hectopascal ($1\text{hPa} = 100 \text{ Pa}$) e kPa = kilopascal ($1\text{kPa} = 1.000 \text{ Pa}$). Outras unidades: pF = logaritmo base 10 da pressão em hPa; atm = atmosfera padrão ($1 \text{ atm} = 101.325 \text{ Pa}$); bar ($1 \text{ bar} = 100.000 \text{ Pa}$); mca = metros de coluna de água ($1 \text{ mca} = 9.806,65 \text{ Pa}$). Caso se queira expressar as unidades hPa, kPa, atm, bar e mca na forma de potencial mátrico, adicionar um sinal negativo.

Algumas centrífugas não permitem a regulagem de valores exatos de rotação conforme apresentados na Tabela 1 (ex.: 535 rpm = 6,0 kPa; 2.184 rpm = 100 kPa), mas apenas regulagens em intervalos a cada 10 rpm até uma dada rotação (ex.: 530 rpm; 540 rpm; 550 rpm) e em rotações mais elevadas, regulagens a cada 100 rpm (ex.: 2.000 rpm; 2.100 rpm; 2.200 rpm). Nesse caso, sugere-se regular a centrífuga para o valor mais próximo (ex.: 540 rpm e 2.200 rpm), e as tensões realmente aplicadas serão, respectivamente, 6,12 kPa e 101,49 kPa, tendo por base Freitas Júnior e Silva (1984) e Silva e Azevedo (2002). As diferenças entre a tensão prevista e a realmente aplicada serão neste caso de 2,00% e 1,49%. Se necessário, para minimizar esse erro, utilizar os valores de tensão reais aplicados pela centrífuga no ajuste da curva por regressão.

6.7 Referências

FREITAS JÚNIOR, E. de; SILVA, E. M. da. Uso da centrífuga para determinação da curva de retenção de água do solo, em uma única operação. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 19, n. 11, p. 1423-1428, nov. 1984.

SILVA, E. M. da; AZEVEDO, J. A. de. Influência do período de centrifugação na curva de retenção de água em solos de Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 37, n. 10, p. 1487-1494, out. 2002.

SMAGIN, A. V. Column-centrifugation method for determining water retention curves of soils and disperse sediments. **Eurasian Soil science**, v. 45, n. 4, p. 416-422, 2012.

SMAGIN, A. V.; SADOVNIKOVA, N. B.; BEN ALI, M. M. The determination of the primary hydrophysical function of soil by the centrifuge method. **Eurasian Soil science**, v. 31, n. 11, p. 1237-1244, 1998.

6.8 Anexo

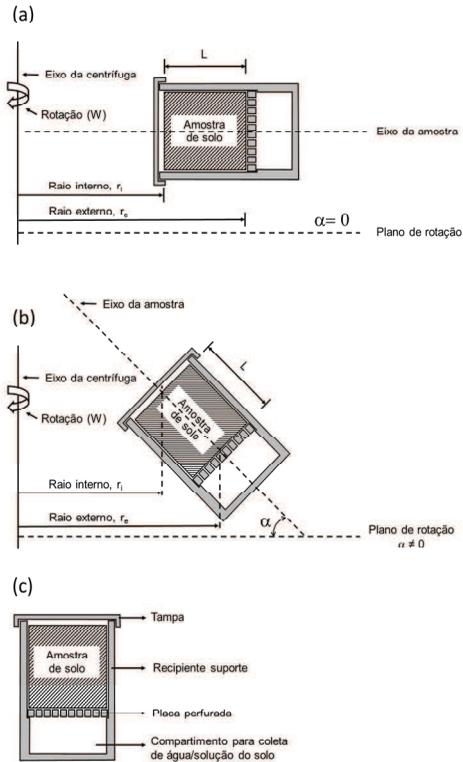


Figura 1. Representação esquemática de uma amostra de solo em uma centrífuga onde as amostras giram paralelas ao plano de rotação, na qual se aplica a equação de Silva e Azevedo (2002) (a); em uma centrífuga de rotor fixo onde o eixo das amostras forma um ângulo com o plano de rotação, sendo necessária a correção pela equação 6.5.2, proposta nos trabalhos de Smagin et al. (1998) e Smagin (2012) (b); e do recipiente suporte (c), no qual a amostra (anel volumétrico) é colocada para centrifugação.