



XVII Reunião Brasileira de Manejo e Conservação do Solo e da Água

Manejo e conservação do solo e da água
no contexto das mudanças ambientais

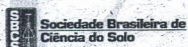
10 a 15 de agosto de 2008
Hotel Glória, Rio de Janeiro - RJ

Este evento é vinculado ao:

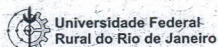


Série Documentos 101
ISSN 1517-2627

Promoção:



Realização:



Ministério da
Agricultura, Pecuária
e Abastecimento



XVII Reunião Brasileira de Manejo e Conservação do Solo e da Água

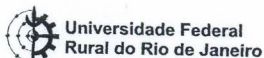
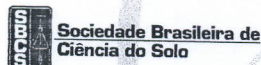
Este evento é vinculado ao:



Manejo e conservação
do solo e da água
no contexto das
mudanças ambientais

10 a 15 de agosto de 2008
Hotel Glória,
Rio de Janeiro - RJ

Série Documentos 101
ISSN 1517-2627



Ministério da
Agricultura, Pecuária
e Abastecimento





Analizador Granulométrico: Implementação de Modelo mais Preciso para Determinação de Frações de Areia

João de Mendonça Naime⁽¹⁾ & Carlos Manoel Pedro Vaz⁽²⁾

(1) Pesquisador Embrapa Instrumentação Agropecuária, Rua 15 de Novembro, 1452, São Carlos, SP, CEP 13561-206, naime@cnpdia.embrapa.br; (2) Pesquisador Embrapa Instrumentação Agropecuária, Rua 15 de Novembro, 1452, São Carlos, SP, CEP 13561-206, vaz@cnpdia.embrapa.br.

Apoio: EMBRAPA

RESUMO: A validade da lei de Stokes para determinação da distribuição do tamanho de partículas do solo, em sedimentação na água, tem como limite superior partículas com diâmetro de aproximadamente 65 μm . Como o analisador granulométrico de solos baseia sua metodologia nessa equação para obter a distribuição de tamanhos de partículas na faixa de 2 até 2.000 μm , objetivou-se neste trabalho buscar na literatura um modelo que é válido para essa faixa de diâmetros e implementá-lo no programa do equipamento automatizado que utiliza o princípio de atenuação da radiação gama. São apresentados resultados da comparação entre determinações com a lei de Stokes e o modelo de Clift et al. (1978) que foi estudado e implementado no programa do analisador granulométrico. O erro de cálculo pela equação de Stokes torna-se significativo (acima de 2%) a partir de 50 μm e atinge por volta de 500% para diâmetros maiores que 1.000 μm .

Palavras-chave: Lei de Stokes; Granulometria; Frações de areia.

INTRODUÇÃO

O analisador granulométrico de solos (Naime et al., 2001) baseia-se na atenuação da radiação gama para determinar a distribuição do tamanho de partículas do solo dispersas em água (Vaz et al., 1992). A parcela da radiação absorvida pelos sólidos permite calcular concentrações acumuladas relativas à concentração inicial, por meio de medidas de atenuação realizadas durante a sedimentação das partículas de uma amostra inicialmente homogeneizada. Assim, dados a altura e o intervalo de tempo decorrido após o término da homogeneização da amostra, pode-se medir a concentração acumulada de partículas maiores ou iguais que o diâmetro calculado a partir da velocidade mínima de sedimentação estabelecida nessa condição. Por meio do movimento da fonte e do detector, no sentido ascendente ao longo da amostra, para alturas e instantes pré-determinados estabelece-se uma seqüência de medidas que

permite estratificar a composição de tamanhos de partículas do solo. Portanto, é de fundamental importância para a precisão desse método o modelo matemático que é empregado para calcular o diâmetro da partícula em função da velocidade de sedimentação.

A lei de Stokes foi utilizada para o desenvolvimento da metodologia de determinação de distribuição de tamanhos de partículas baseada na atenuação de raios gama (Vaz et al., 1992) que, por sua vez, também fundamenta os tradicionais métodos da pipeta e do densímetro de Bouyoucos. Sabe-se que as amostras do analisador granulométrico são peneiradas em malha de 2 mm para que a distribuição de tamanhos seja determinada na faixa de 2 μm a 2mm, ou seja, uma variação de até três ordens de grandeza. Para o cálculo do tamanho de partículas esféricas, com erro aceitável de até 2%, a equação de Stokes pode ser aplicada para decantações em que o valor máximo do número de Reynolds (Re_{max}) esteja entre 0,1 e 0,25, como é mostrado por Bernhardt (1994) na Fig. 1. Neste gráfico, o eixo vertical representa o tamanho máximo da partícula que pode ser obtido com a equação de Stokes em função da densidade do sólido, respeitando-se Re_{max} . Estabelecido Re_{max} , o limite superior (diâmetro máximo d_{max}) da equação de Stokes pode ser calculado:

$$d_{\text{max}} = \sqrt[3]{18 \frac{\eta^2}{\rho_a \Delta \rho g} Re_{\text{max}}} \quad (1)$$

onde ρ_a é a densidade da água, $\Delta \rho$ é a diferença entre a densidade da partícula e ρ_a , η é a viscosidade da água e g é a aceleração da gravidade, unidades no SI.

Admitindo-se que a densidade das partículas do solo encontra-se em torno de 2,7 Mg m^{-3} e $Re=0,25$, calcula-se que a equação de Stokes pode ser aplicada até o diâmetro máximo de aproximadamente 65 μm . Assim sendo, a equação de Stokes não é adequada para determinar quase a totalidade da



fração areia, posto que essa parcela encontra-se na faixa de 50 μm a 2 mm.

Portanto, o objetivo deste trabalho foi pesquisar, testar e implementar o modelo matemático de Clift et al. (1978) no analisador granulométrico com a finalidade de minimizar o erro de determinação de frações de areia.

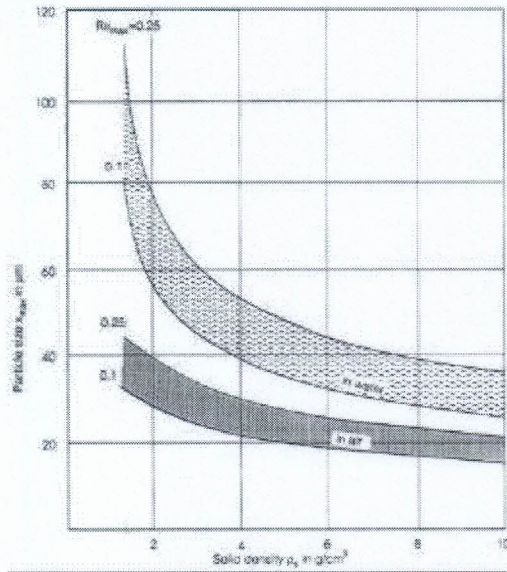


Figura 1. Tamanho máximo da partícula para a equação de Stokes (adaptado de Bernhardt, 1994).

MATERIAL E MÉTODOS

É senso comum que o cálculo preciso da velocidade de sedimentação de uma partícula depende diretamente da predição correta do coeficiente de arraste (CD). Para tanto, muitas equações têm sido propostas para correlacionar coeficiente de arraste com o número de Reynolds (Bernhardt, 1994). As correlações de CD com Re sugeridas por Clift et al. (1978) são consideradas as melhores aproximações da curva de arraste padrão. Uma vez que o coeficiente de arraste é determinado, a velocidade de sedimentação da partícula pode ser facilmente calculada substituindo-se esse valor na equação padrão. A Tabela 1 apresenta as relações do coeficiente de arraste com o número de Reynolds para de acordo com faixas de valores de Re.

Da Tabela 1 conclue-se que é necessário implementar um método iterativo para determinar o valor do coeficiente de arraste. Para tanto, define-se um parâmetro adimensional conhecido como “melhor número” (ND) (Clift et al., 1978) em mecânica dos fluidos, definido como:

$$N_D = \frac{4(\rho_s - \rho_a)g\eta}{3\rho_a^2V^3} = \frac{C_D}{Re} \quad (2)$$

onde V é a velocidade de sedimentação da partícula do solo.

Tabela 1. Correlação entre coeficiente de arraste e número de Reynolds.

| Re | Coefficiente de Arraste (C_D) |
|-------------------------|--|
| $Re < 0,01$ | $C_D = \frac{3}{16} + \frac{24}{Re}$ |
| $0,01 < Re \leq 20$ | $C_D = \frac{24}{Re} [1 + 0,1315 Re^{(0,82-0,05w)}]$ |
| $20 \leq Re \leq 260$ | $C_D = \frac{24}{Re} [1 + 0,1935 Re^{0,6305}]$ |
| $260 \leq Re \leq 1500$ | $\log(C_D) = 1,6435 - 1,1242 w + 0,1558 w^2$ |

$w = \log(Re)$

No programa do analisador granulométrico foi definida uma tabela de alturas onde ocorrem as medidas e respectivos instantes temporais de modo que, para uma densidade de partícula de $2,7 \text{ Mg m}^{-3}$, serão medidas concentrações acumuladas de diâmetros de partículas aproximadamente igualmente espaçados, em escala logarítmica. Dessa forma, conhece-se a velocidade com que desceu o conjunto completo de partículas de menor diâmetro que se encontra abaixo do nível da medida. Antes da análise granulométrica com o mesmo equipamento obtém-se a densidade das partículas, tem-se a velocidade da partícula, a densidade da água (1 Mg m^{-3}) e a viscosidade da água o programa calcula automaticamente a partir da medida da temperatura da solução. Com esses fatores estabelecidos, ND é calculado na Eq 2.

O número de Reynolds e o respectivo coeficiente de arraste são calculados por meio do fluxograma representado na Fig. 2. Atribui-se a Re um valor inicial suficientemente baixo como, por exemplo, 10^{-6} que seguramente corresponde à velocidade de sedimentação de partículas menores que $2 \mu\text{m}$. Pode-se então iniciar o cálculo iterativo testando na Tabela 1, por meio da equação correspondente à faixa de Re considerada, a convergência com o valor obtido na Eq 2. Determinado o número de Reynolds, obtém-se o diâmetro da partícula:

$$D_p = \frac{Re\eta}{\rho_a V} \quad (3)$$

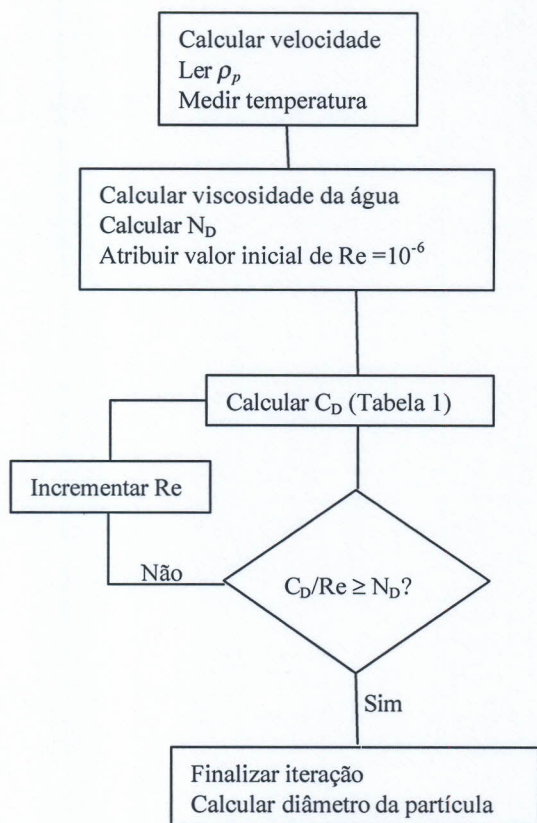


Figura 2. Fluxograma para cálculo do coeficiente de arraste o número de Re.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com a finalidade de comparar a equação de Stokes com o método de Clift et al. (1978), na faixa de interesse da análise granulométrica, foram calculadas as velocidades terminais de sedimentação das partículas com diâmetro entre 2 e 1.000 μm , em escala logarítmica. Supõe-se a solução a 20°C, então a viscosidade e a densidade da água são, respectivamente 1 mPa.s e 1 Mg m^{-3} , assumiu-se a aceleração da gravidade igual a 9,81 m s^{-2} e as partículas de solo com densidade de 2,7 Mg m^{-3} . A Tabela 2 mostra a pequena divergência da equação de Stokes até 40 μm e o crescimento exponencial do erro, além de 2%, a partir de partículas maiores do que 50 μm chegando até 476% para partículas de 1.000 μm .

Neste trabalho, o modelo de Clift foi implementado no programa Qualisolo (Naime et al. 2006), tanto nas rotinas que realizam as medidas como nas rotinas que analisam os resultados. As análises anteriores a este trabalho, realizadas de acordo com a equação de Stokes, podem então ser corrigidas. A Fig. 3 mostra a diferença entre os resultados desses dois modelos para a mesma

medida, sendo que no gráfico da Fig. 3 (a) está representada uma areia quartzosa com a seguinte textura: 68% de areia; 6,2% de silte; 25,8% de argila. Por outro lado, na Fig. 3 (b) está representado um solo muito argiloso com a seguinte textura: 11,5% de areia, 11,2% de silte; 77,4% de argila. Os pontos marcados no gráfico indicam os 26 pontos medidos pelo analisador, sendo que o tamanho da menor partícula acumulada num dado instante corresponde ao cálculo por meio do método de Stokes ou Clift et al. (1978), de acordo com a legenda. As linhas contínuas são as respectivas interpolações sigmoidais dos métodos.

Tabela 2. equação de Stokes comparada com o modelo de Clift et al. (1978).

| D_p (μm) | Clift et al. V (cm s^{-1}) | Stokes V (cm s^{-1}) | Erro% |
|----------------------------|--|------------------------------------|--------|
| 2 | 0,0004 | 0,0004 | -1,17 |
| 3 | 0,0008 | 0,0008 | 0,06 |
| 4 | 0,0015 | 0,0015 | 0,50 |
| 5 | 0,0023 | 0,0023 | -0,16 |
| 6 | 0,0033 | 0,0033 | 0,06 |
| 7 | 0,0045 | 0,0045 | -0,07 |
| 8 | 0,0059 | 0,0059 | 0,08 |
| 9 | 0,0075 | 0,0075 | 0,06 |
| 10 | 0,0093 | 0,0093 | 0,16 |
| 20 | 0,0371 | 0,0371 | 0,03 |
| 30 | 0,0830 | 0,0834 | 0,46 |
| 40 | 0,1465 | 0,1482 | 1,19 |
| 50 | 0,2270 | 0,2316 | 2,04 |
| 60 | 0,3233 | 0,3335 | 3,16 |
| 70 | 0,43290 | 0,4540 | 4,88 |
| 80 | 0,5550 | 0,5930 | 6,84 |
| 90 | 0,6922 | 0,7505 | 8,41 |
| 100 | 0,8300 | 0,9265 | 11,63 |
| 200 | 2,5200 | 3,7060 | 47,06 |
| 300 | 4,3172 | 8,3385 | 93,15 |
| 400 | 6,0637 | 14,8240 | 144,47 |
| 500 | 7,8382 | 23,1625 | 195,51 |
| 600 | 9,5658 | 33,3540 | 248,68 |
| 700 | 11,2486 | 45,3985 | 303,59 |
| 800 | 12,8750 | 59,2960 | 360,55 |
| 900 | 14,5027 | 75,0465 | 417,47 |
| 1000 | 16,0806 | 92,6500 | 476,16 |

CONCLUSÕES

Como era esperado, de acordo com a limitação da lei de Stokes em função do número de Reynolds (Fig. 1), os resultados das comparações com o modelo de Clift et al. (1978) apresentaram diferenças significativas a partir de 65 μm , ou seja, na fração areia. Evidentemente, o erro na determinação torna-se mais significativo para os solos com textura mais arenosa, como exibido pela areia quartzosa da Fig. 3a enquanto que para solo de



textura muito argilosa a diferença entre os modelos não é importante.

O modelo de Clift et al. (1978) mostrou-se adequado para ser implementado no analisador granulométrico de solos e diminuir significativamente o erro na determinação das areias. Dessa teoria foi estabelecido que o maior diâmetro que pode ser determinado pelo equipamento está em torno de 450 μm , o que corresponde à velocidade de 7 cm s^{-1} , isto é, medido a 14 cm abaixo da superfície no instante final de medida igual a 2 s.

REFERÊNCIAS

BERNHARDT, C. Classification, and Sedimentation Methods. In: Particle Size Analysis. 2.ed. Chapman & Hall, UK, 1994, p. 16–28.

CLIFT, R.; GRACE, J.R.; WEBER, M.E. Bubbles, Drops and Particles, Academic Press, London, 1978.

NAIME, J. M.; VAZ, C. M. P.; MACEDO, A. Automated soil particle size analyzer based on gamma-ray. Computers and electronics in agriculture, Amsterdam, v. 31, p. 295-304, 2001.

NAIME, J. M.; VAZ, C. M. P.; MACEDO, A. Determinações físicas do solo a partir da granulometria: programa Qualisolo. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA, 16., 2006, Aracaju. Novos desafios do carbono no manejo conservacionista. Resumos... Aracaju: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2006. 1 CD-ROM. 5p.

VAZ, C.M.P.; OLIVEIRA, J.C.M.; REICHARDT, K.; CRESTANA, S.; CRUVINEL, P.E.; BACCHI, O.O.S. Soil mechanical analysis through gamma ray attenuation. Soil Technology, Cremlingen, v.5, p.319-325, 1992.

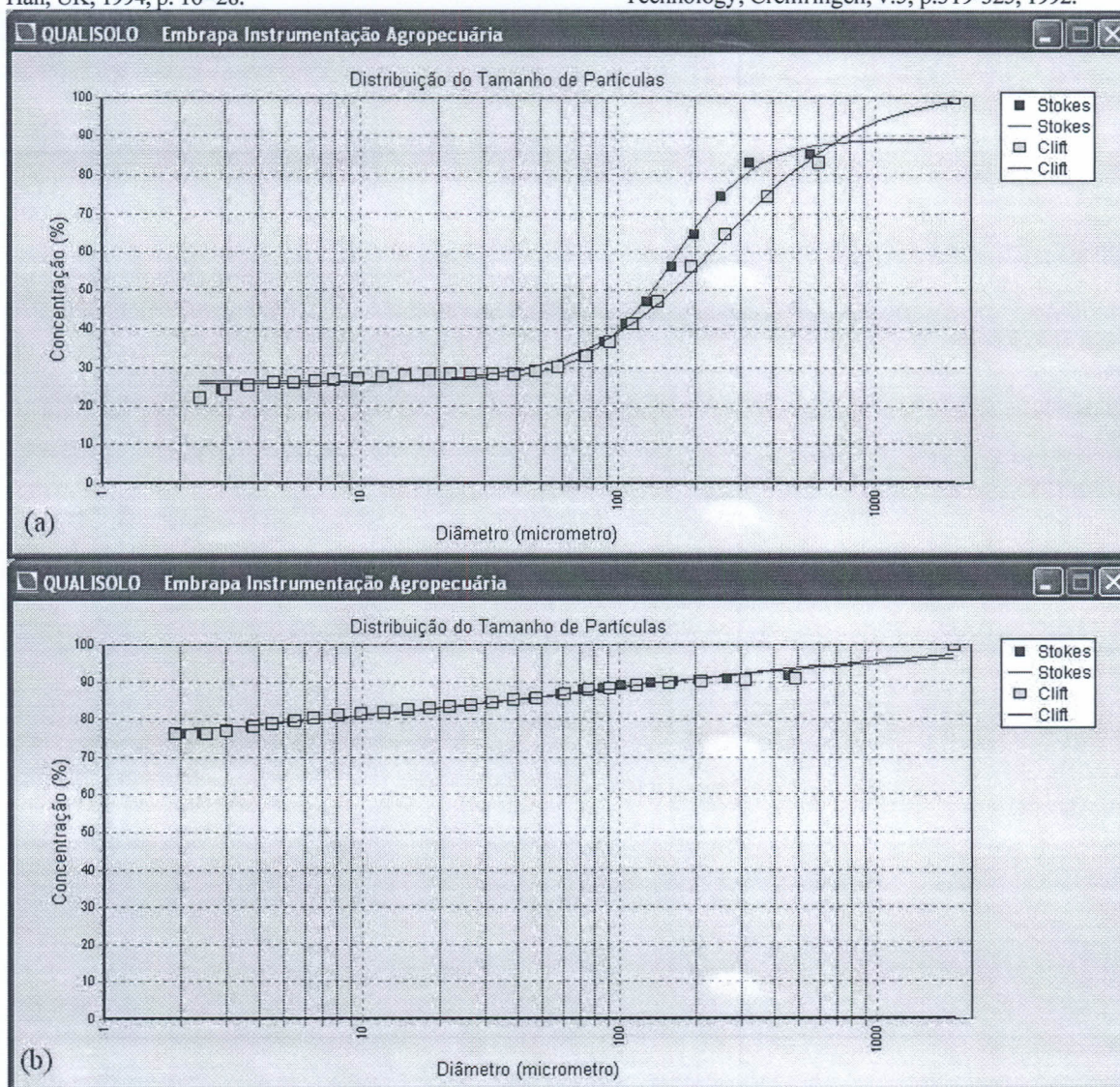


Figura 3. Distribuição do tamanho de partículas obtidas por meio da equação de Stokes e por Clift et al. (1978) para um solo arenoso (a) e para um solo muito argiloso (b).