

**Estudo e Implementação de
Modelo mais Preciso para
Determinação da Granulometria
do Solo por Atenuação de
Raios Gama**



ISSN 1678-0434

Setembro, 2007

*Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
Embrapa Instrumentação Agropecuária
Ministério da Agricultura e do Abastecimento*

Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento 19

Estudo e Implementação de Modelo mais Preciso para Determinação da Granulometria do Solo por Atenuação de Raios Gama

João de Mendonça Naime
Carlos Manoel Pedro Vaz

Embrapa Instrumentação Agropecuária
São Carlos, SP
2007

Exemplares desta publicação podem ser adquiridos na:

Embrapa Instrumentação Agropecuária

Rua XV de Novembro, 1452
Caixa Postal 741
CEP 13560-970 - São Carlos-SP
Fone: (16) 3374 2477
Fax: (16) 3372 5958
www.cnpdia.embrapa.br
E-mail: sac@cnpdia.embrapa.br

Comitê de Publicações da Unidade

Presidente: Dr. Carlos Manoel Pedro Vaz
Membros: Dra. Débora Marcondes Bastos Pereira Milori,
Dr. João de Mendonça Naime,
Dr. Washington Luiz de Barros Melo
Valéria de Fátima Cardoso
Membro Suplente: Dr. Paulo Sérgio de Paula Herrmann Junior

Supervisor editorial: Dr. Victor Bertucci Neto
Normalização bibliográfica: Valéria de Fátima Cardoso
Tratamento de ilustrações: Valentim Monzane
Capa imagem: João de Mendonça Naime
Editoração eletrônica: Valentim Monzane

1ª edição

1ª impressão (2007): tiragem 300

Todos os direitos reservados.

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

CIP-Brasil. Catalogação-na-publicação.

Embrapa Instrumentação Agropecuária

-
- N157e Naime, João de Mendonça
Estudo e implementação de modelo mais preciso para determinação da granulometria do solo por atenuação de raios gama . / João de Mendonça Naime, Carlos Manoel Pedro Vaz. - São Carlos: Embrapa Instrumentação Agropecuária, 2007.
11 p. - (Embrapa Instrumentação Agropecuária. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, ISSN 1678-0434; 19)
1. Analisador granulométrico. 2. Lei de Stokes. 3. Solo - Distribuição de tamanhos de partículas. 4. Trilhas grafite Formação. I. Vaz, Carlos Manoel Pedro. II. Título. III Série.

Sumário

Resumo	4
Abstract	5
Introdução	6
Materiais e Métodos	7
Resultados e Discussão	9
Conclusões	11
Referências	11

Estudo e Implementação de Modelo mais Preciso para Determinação da Granulometria do Solo por Atenuação de Raios Gama

João de Mendonça Naime
Carlos Manoel Pedro Vaz

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 tem sua metodologia baseada nessa equação para obter a distribuição desde 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 instrumento. São apresentados resultados da comparação entre determinações com a lei de Stokes e o modelo de Clift e colaboradores que foi estudado e implementado no programa do analisador granulométrico. O erro de cálculo pela equação de Stokes torna-se significativo (2%) a partir de 50 μm e atinge 500% para diâmetros maiores que 1.000 μm .

Termos para indexação: lei de Stokes, distribuição de tamanhos de partículas do solo, analisador granulométrico.

¹Engenheiro Eletrônico, Dr., Embrapa Instrumentação Agropecuária, Rua 15 de Novembro, 1452, São Carlos-SP, 13560-970 naime@cnpdia.embrapa.br

²Físico, Dr., Embrapa Instrumentação Agropecuária, Rua 15 de Novembro, 1452, São Carlos-SP, 13560-970 vaz@cnpdia.embrapa.br

Study and Implementation of a More Accurate Model for Determination of Soil Particle Size Distribution Based on Gamma Ray Attenuation

João de Mendonça Naime
Carlos Manoel Pedro Vaz

Abstract

The maximum soil particle sizes for Stoke's equation, in gravity determination, is about 65 μm . Concerning the automated soil particle size analyzer methodology is based on this law to obtain the distribution ranging from 2 to 2,000 μm , the present work aimed to search for a more adequate method and implement it the software of the analyzer. Comparisons between Stokes and Clift et al. methods showed that the Stokes equation starts to diverge significantly (2%) in 50 μm diameter and reaches more than 500% for sizes greater than 1,000 μm .

Index terms: Stoke's law, soil particle size distribution, automated soil analyzer.

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 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 2mm para que a distribuição de tamanhos seja determinada na faixa de 2 m 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:

$$d_{max} = \sqrt[3]{18 \frac{\rho_s - \rho_a}{g} Re_{max}} \quad (1)$$

onde ρ_a é a densidade da água, ρ_s é a diferença entre a densidade da partícula e a densidade 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 $2,7 \text{ Mg m}^{-3}$ e $Re = 0,25$, calcula-se que a equação de Stokes pode ser aplicada até o diâmetro máximo de aproximadamente $65 \text{ }\mu\text{m}$. 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 $50 \text{ }\mu\text{m}$ a 2 mm . Portanto, o

objetivo deste trabalho foi pesquisar, testar e implementar um modelo matemático para o analisador granulométrico.

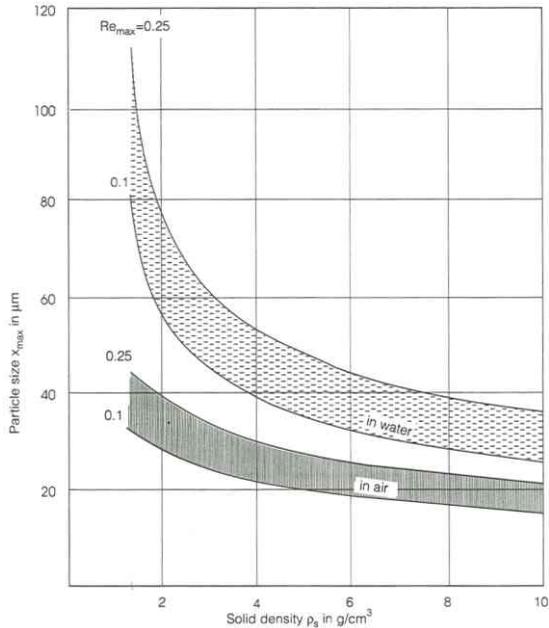


Fig. 1 - Tamanho máximo da partícula para a equação de Stokes (adaptado de Bernhardt (1994)).

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:

$$N_D = \frac{4}{3} \frac{s_a g}{V^3} \frac{C_D}{Re} \quad (2)$$

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

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

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

No programa do analisador granulométrico foi definida uma tabela de alturas de medidas e instantes temporais de modo que, para uma densidade de partícula de 2,7 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 μm. Pode-se então iniciar o cálculo iterativo testando na Tabela 1, com a 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:

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

Resultados

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 .

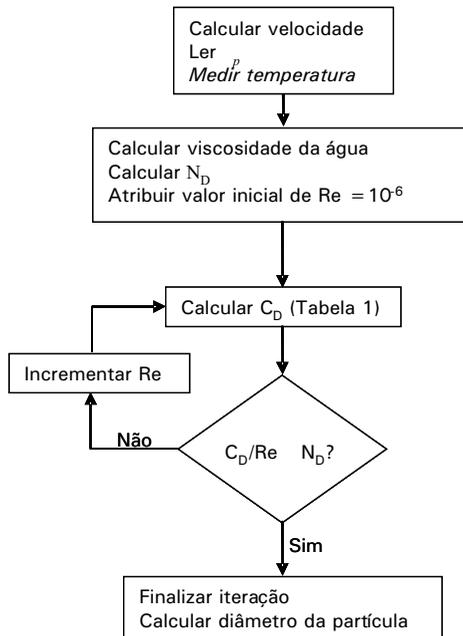


Fig. 2 - Fluxograma para cálculo do coeficiente de arraste e o número de Re.

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. 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 - Erro da equação de Stokes comparada com o modelo de Clift et al. (1978).

D_p (m)	Clift et al.	Stokes	Erro%
	V (cm s ⁻¹)	V (cm s ⁻¹)	
2	0,00038	0,00037	-1,17
3	0,00083	0,00083	0,06
4	0,00148	0,00148	0,50
5	0,00232	0,00232	-0,16
6	0,00333	0,00334	0,06
7	0,00454	0,00454	-0,07
8	0,00593	0,00593	0,08
9	0,00750	0,00750	0,06
10	0,00925	0,00927	0,16
20	0,03705	0,03706	0,03
30	0,08300	0,08339	0,46
40	0,14650	0,14824	1,19
50	0,22700	0,23163	2,04
60	0,32333	0,33354	3,16
70	0,43286	0,45399	4,88
80	0,55500	0,59296	6,84
90	0,69222	0,75047	8,41
100	0,83000	0,92650	11,63
200	2,52000	3,70600	47,06
300	4,31719	8,33850	93,15
400	6,06375	14,82400	144,47
500	7,83820	23,16250	195,51
600	9,56583	33,35400	248,68
700	11,24857	45,39850	303,59
800	12,87500	59,29600	360,55
900	14,50267	75,04650	417,47
1000	16,08060	92,65000	476,16

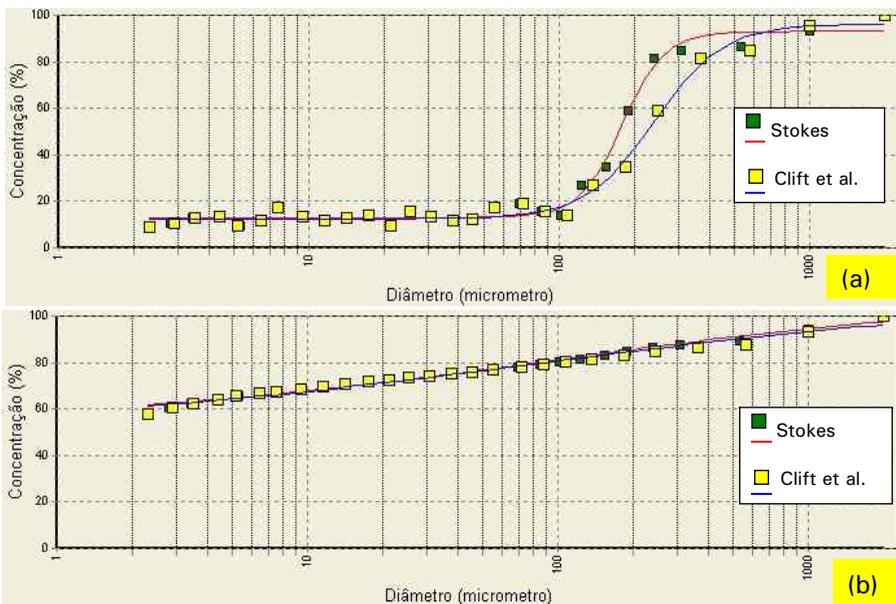


Fig. 3 - Distribuição do tamanho de partículas obtidas por meio da equação de Stokes e por Clift et al. (1978) para um solo arenoso (a) e para um solo argiloso (b).

Conclusão

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.

O modelo de Clift et al. (1978) mostrou-se muito interessante 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. **Particle Size Analysis**. [S. l.]: Chapman & Hall, 1994. p. 1628.
- CLIFT, R.; GRACE, J. R.; WEBER, M. E. **Bubbles, Drops and Particles**. London: Academic Press, 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. 5 p.
- 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.



Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

Embrapa Instrumentação Agropecuária

Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento

Rua XV de Novembro, 1452 - Caixa Postal 741 - CEP 13560-970 - São Carlos - SP

Telefone: (16) 3374 2477 - Fax: (16) 3372 5958

www.cnpdia.embrapa.br - sac@cnpdia.embrapa.br

**Ministério da
Agricultura, Pecuária
e Abastecimento**

