

# Instrumentação avançada em ciência do solo

Ladislau Martin Neto  
Carlos Manoel Pedro Vaz  
Silvio Crestana  
*Editores*

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária 5  
Embrapa Instrumentação Agropecuária )  
Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento 7  
)  
l  
3  
)  
)  
3  
5

Instrumentação avançada em ciência do solo 4  
5

*Editores* 5

Ladislau Martin Neto

Carlos Manoel Pedro Vaz 5

Sílvio Crestana 7

0

1

1

3

6

7

Embrapa Instrumentação Agropecuária 8

São Carlos, SP 9

2007 7

Exemplares dessa publicação podem ser adquiridos na:

**Embrapa Instrumentação Agropecuária**

Rua XV de novembro, 1452

Caixa Postal 741

CEP 13560-970 – São Carlos-SP

Fone: (16) 2107-2800

Fax: (16) 2107-2902

<http://www.cnpdia.embrapa.br>

e-mail: [sac@cnpdia.embrapa.br](mailto: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 Júnior

Supervisor editorial: Dr. Victor Bertucci Neto

Normalização Bibliográfica: Valéria de Fátima Cardoso

Capa: Alex Paixão e Valentim Monzane

Foto da capa: Lúcio André do Castro Jorge e Valentim Monzane

Editoração eletrônica: Carlos Manoel Pedro Vaz e Emerson de Stefani

1ª edição

1ª impressão (2007): tiragem: 350

**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**

---

159 Instrumentação avançada em ciência do solo. / Ladislau Martin Neto, Carlos  
Manoel Pedro Vaz, Sílvio Crestana editores. – São Carlos:  
Embrapa Instrumentação Agropecuária, 2007.  
438 p.

ISBN: 85-86463-14-0

1. Solos. 2. Métodos Avançados. 3. Equipamentos. 4. Instrumentos. 5. Modelamento  
6. Imagem. I. Martin Neto, Ladislau. II. Vaz, Carlos Manoel Pedro. III. Crestana, Sílvio.

---

CDD 21 ED 681.763

©Embrapa 2007

## Equipamentos e métodos para análise física dos solos

*Carlos Manoel Pedro Vaz*

*João de Mendonça Naime*

*Álvaro Macedo da Silva*

*Ladislau Marcelino Rabello*

*Sílvio Crestana*

*Paulo Estevão Cruvinel*

### Introdução

Este capítulo apresenta algumas contribuições de equipamentos e métodos desenvolvidos na Embrapa Instrumentação Agropecuária para análises físicas do solo. Outros desenvolvimentos podem ser encontrados no livro *"Instrumentação agropecuária: contribuições no limiar do novo século"* (CRESTANA et al., 1996). Os métodos e equipamentos aqui apresentados têm características inovadoras e se apresentam como alternativas às tecnologias convencionais de análises de parâmetros físicos do solo. Além disso, apresenta-se em CD um programa que permite a estimativa de curvas de retenção da água no solo, a partir de dados de granulometria, usando o modelo semi-empírico de Arya e Paris (1981) (item 3.2) e um índice de qualidade física do solo, de acordo com o modelo de Dexter (2004).

### Analizador granulométrico

O analisador granulométrico de solos utiliza o princípio da atenuação de raios gama, durante o processo de sedimentação das partículas dispersas na água, para determinar a distribuição do tamanho de partículas. Esse novo método, desenvolvido por Vaz et al. (1992), permitiu reduzir o tempo de análise para aproximadamente 20 minutos, uma vez que não demanda secamento em estufa (24 horas) e dispensa pesagens, diferentemente dos métodos da pipeta e do densímetro de Bouyoucos. Outros equipamentos de análise de tamanhos de partículas, como o

sedígrafo e o baseado em laser, foram poucos eficientes para solos nos raros trabalhos encontrados na literatura. Até o momento, nenhum trabalho de validação desses métodos foi apresentado para as condições de solos brasileiros.

A curva de distribuição de tamanho de partículas obtida pelo analisador inicia em 2 µm e vai até 2 mm. O método de atenuação da radiação ionizante possibilitou a automação do processo através do desenvolvimento de um equipamento (NAIME et al., 2001) capaz de analisar até dez amostras continuamente, livre de interferências do operador. Em outra opção do programa do analisador, a análise textural, mais rápida e simples, as três frações principais (areia, silte e argila) de dez amostras são obtidas em uma hora de análise.

A amostra de solo para análise granulométrica é seca em estufa, destorroada e peneirada com malha de 2 mm. A dispersão do solo é feita de forma similar àquela do método da pipeta, isto é, as partículas são dispersas em água com hidróxido de sódio e depois agitadas. No recipiente, a amostra de 40 g é diluída até a concentração de 100 g L<sup>-1</sup>, totalizando um volume de 400 cm<sup>3</sup>, em 16cm de altura no recipiente. O recipiente tem seção interna quadrada de 5 cm e altura de 20 cm.

#### Princípios do método

O método aqui descrito baseia-se em dois princípios básicos:

1) Na atenuação de radiação gama, que é usada para calcular a concentração  $C$  (Eq. 1) em diferentes alturas da amostra, obtida através de uma modificação na Lei de Lambert-Beer:

$$C = \frac{\ln\left(\frac{I_0}{I}\right)}{x\left(\mu_p^* - \frac{\mu_w^* D_w}{D_p}\right)} \dots\dots\dots [1]$$

onde  $x$  é a medida interna do recipiente (5 cm),  $I_0$  [contagens por segundo (cps)] é a contagem de fótons por segundo quando o recipiente contém água pura e  $I$  [cps] quando contém a solução das partículas de solo disperso. Os parâmetros  $\mu_p^*$  and  $\mu_w^*$  [cm<sup>2</sup> g<sup>-1</sup>] são respectivamente os coeficientes de atenuação de massa do solo e da água. Dessa forma, a razão  $C/C_0$  é obtida em porcentagem, onde  $C_0$  é a concentração da solução homogênea (massa das partículas solo por volume de solução).

2) Na Lei de Stokes (Eq. 2), que é usada para calcular o tempo de queda das partículas no meio líquido. O tempo  $t$  e a altura  $h$  determinam quando e onde as medidas de atenuação devem ser feitas para calcular o menor diâmetro  $d$ , tal que todas as partículas maiores já sedimentaram abaixo da altura  $h$ . Portanto, a concentração obtida nesse nível está correlacionada com os tamanhos de partículas maiores ou iguais a  $d$ .

$$t = \frac{18h\eta}{d^2g(D_p - D_w)} \dots\dots\dots [2]$$

onde  $\eta$  (poise) é a viscosidade da água, e  $g$  (m s<sup>-1</sup>) é aceleração da gravidade.

Antes de iniciar a medida de granulometria, é necessário determinar o coeficiente de atenuação em massa para cada tipo de solo que vai ser analisado. Solos do mesmo tipo e origem têm o mesmo coeficiente de atenuação em massa. Para essa determinação, o programa do analisador tem uma rotina especial e deve ser utilizado outro recipiente de acrílico, com formato cúbico de 4 cm de aresta interna, preenchido com solo seco, desestruturado e peneirado. Essa medida dura cinco minutos para cada tipo de solo. Adicionalmente, essa rotina determina a densidade das partículas do solo:

$$D_p = 2,026 + 2,325 \times \mu_p \dots\dots\dots [3]$$

Os coeficientes 2,026 e 2,325 foram obtidos empiricamente para diversos solos representativos.

Na análise completa, as medidas de atenuação são feitas em 18 alturas diferentes ao longo da amostra. Inicia-se a 14 cm abaixo da superfície da solução e segue subindo de acordo com os intervalos de tempo e de altura calculados correlacionados pela Eq. 2. A última medida ocorre a 0,5 cm abaixo da superfície, nível acima do qual, após aproximadamente 18 minutos, encontra-se apenas argila.

Para qualquer tipo de solo, a relação entre  $C/C_0$  e  $d$  tem formato sigmoidal. O melhor ajuste é obtido com a equação logística:

$$\frac{C_1^* - C_2^*}{1 + \left(\frac{d}{d_0}\right)^p} + C_2^* \dots\dots\dots [4]$$

onde  $d_0$  é o ponto central da escala de diâmetros,  $C_1^*$  ( $C_1/C_0$ ) é o valor

inicial,  $C_2^*$  ( $C_2/C_0$ ) é o valor final e  $p$  é um parâmetro de regressão.

No procedimento de análise textural, somente duas alturas são consideradas: 13 cm e 0,5 cm abaixo da superfície do líquido. Essas duas medidas são usadas para determinar as interfaces areia/silte (50  $\mu\text{m}$ ) e silte/argila (2  $\mu\text{m}$ ), respectivamente.

A Figura 1 mostra o equipamento aberto, onde se vêem o mecanismo que movimentam verticalmente fonte e detector de radiação, paralelos e alinhados, e o mecanismo que movimentam o carro de transporte dos recipientes no sentido horizontal. A fonte radioativa é  $^{241}\text{Am}$  (11,1 GBq). O detector de radiação é um cristal de NaI(Tl) com fotomultiplicadora, pré-amplificador e fonte de alta-tensão (0-3 kV) produzidos pela EG&G Ortec®. O restante da cadeia nuclear (amplificador, discriminador mono canal e contador) foi desenvolvido para este equipamento. Ao mecanismo de elevação também estão fixados o agitador da amostra e o sensor de temperatura. A agitação é feita no início da análise para homogeneizar a amostra, e a medida de temperatura é usada para calcular a viscosidade ( $\eta$ ) da água.

O sistema eletrônico instalado na caixa do equipamento é controlado por microprocessador que comanda o sistema mecânico, computa as medidas de atenuação e comunica-se com o computador via interface serial. No computador, o usuário tem uma interface gráfica para inserir os parâmetros das análises, monitorar as medidas e obter os resultados via arquivos no formato texto ou gráficos apresentados na tela. A Figura 2 mostra o sistema durante a análise de dez amostras.

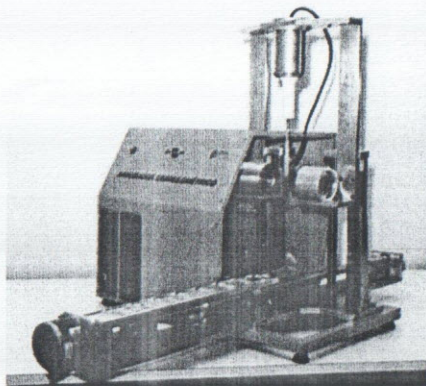


Figura 1. Analisador granulométrico de solos aberto para mostrar o sistema mecânico de elevação da fonte-detector e de transporte dos recipientes das amostras.

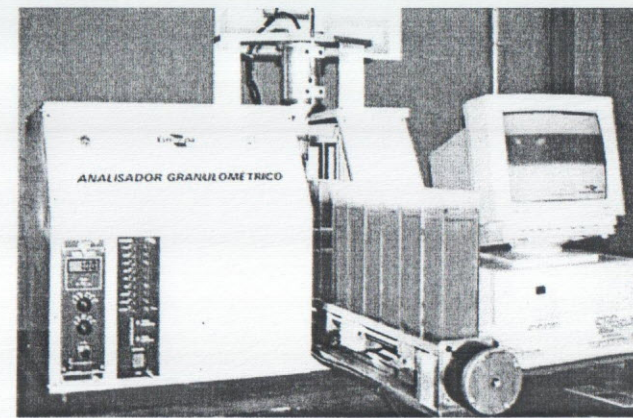


Figura 2. Equipamento durante análise granulométrica de 10 amostras.

#### *Validação do método*

O analisador granulométrico de solos foi validado comparando-se os resultados obtidos pelo método da pipeta em diversos trabalhos como em Vaz et al. (1992), Oliveira et al. (1997), Vaz et al. (1999) e Naime et al. (2001). Em Macedo et al. (2003), foi realizada uma validação com medidas realizadas em 3 laboratórios de análise de solos, onde compararam os resultados obtidos em cada um dos laboratórios pelos métodos convencionais com os resultados obtidos com o analisador granulométrico.

Os resultados das medidas do analisador granulométrico comparados com os do método do densímetro para cada um dos laboratórios são apresentados na Figura 3. Os laboratórios são denominados de laboratórios 1, 2 e 3, sem a identificação das respectivas instituições. O maior coeficiente de correlação linear entre os dois métodos, considerando-se as três frações em conjunto, foi obtido pelo laboratório 3 ( $r^2 = 0,95$ ), e o menor pelo o laboratório 2 ( $r^2 = 0,81$ ). Essa diferença pode ser associada aos procedimentos analíticos dos laboratórios e, portanto, à precisão da medida, uma vez que o equipamento automático apresenta um padrão mais constante. Os resultados obtidos mostraram que, de um modo geral, o analisador granulométrico apresentou boa correlação com o método do densímetro. As diferenças encontradas evidenciam a possibilidade da utilização do equipamento como um padrão de verificação em um programa de controle de qualidade de análise granulométrica dos laboratórios de solos (MACEDO et al., 2003).

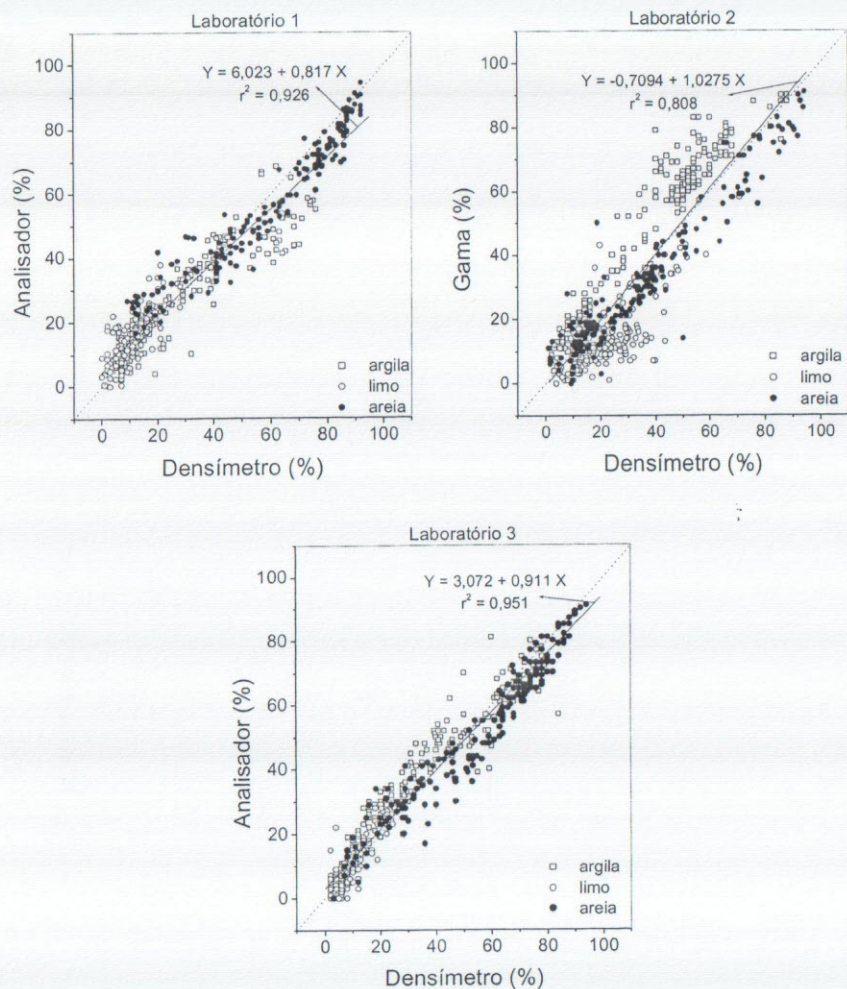


Figura 3. Teores de argila, limo e areia obtidos com o método do densímetro e com o analisador granulométrico de raios gama, em 3 laboratórios (MACEDO et al., 2003).

### Estimativa de curvas de retenção de água no solo com dados de granulometria – método de Arya e Paris

A capacidade de um solo em armazenar água para o crescimento e desenvolvimento das plantas está diretamente relacionada a vários atributos físicos dos solos, dentre eles a curva de retenção de água ou

curva característica potencial-umidade (TORMENA et al., 1998). Para a determinação da curva de retenção da água no solo, podem-se empregar vários métodos como o funil de placa porosa, mesa de tensão ou câmaras de pressão (panela de Richards), em amostras de solo indeformado ou deformado (EMBRAPA, 1997). Em campo, uma combinação de métodos é utilizada, mas na maioria das vezes o potencial da água ( $\theta$ ) é determinado por um tensiômetro conectado a um manômetro de mercúrio ou a um transdutor de pressão, enquanto técnicas como a moderação de nêutrons, reflectometria no domínio do tempo (TDR) e gravimetria são utilizadas para a determinação da umidade volumétrica ( $\theta$ ).

Devido às dificuldades experimentais e ao longo tempo envolvido nessas determinações, tem-se observado um crescente interesse por métodos indiretos de estimativa da capacidade de retenção da água nos solos (ARYA et al., 1999; PACHEPSKY e RALWS, 1999), os quais utilizam dados taxonômicos simples. Dentre eles, o mais importante é o método da Função de Pedotransferência (PTF), o qual descreve equações que expressam dependências da retenção da água e condutividade hidráulica com parâmetros básicos disponíveis em levantamentos de solos, e o modelo de Arya e Paris (1981), o qual usa a similaridade entre as curvas de distribuição do tamanho de partículas e as curvas de retenção de água no solo.

Tomasella et al. (2000) desenvolveram um modelo de PTF para as condições de solos brasileiros, utilizando dados de mais de 500 horizontes. O desenvolvimento das equações de PTF, adaptadas para as condições de solos tropicais, possibilitou a determinação dos parâmetros da curva de retenção de Genuchten (1980) com uma precisão muito maior do que com o uso de equações de PTF desenvolvidas para outros solos. Já o modelo de Arya e Paris foi validado por Vaz et al. (2005a) para um conjunto de 104 amostras de solos do Brasil, contemplando as principais classes de solos mais representativos. Neste capítulo, descreve-se o modelo de Arya e Paris, apresentam-se as equações de calibração obtidas para as condições de solos brasileiros e uma validação independente dessas calibrações para um outro conjunto de 30 amostras.

### Descrição do modelo de Arya e Paris

O modelo de Arya e Paris é baseado em dois conceitos. Primeiro a equação da capilaridade, que relaciona o potencial mátrico ( $\psi$ ) com o raio do poro.

$$\psi_i = \frac{2\sigma \cos \Theta}{\rho_w g r_i} \dots\dots\dots [5]$$

onde  $\sigma$  ( $\text{N m}^{-1}$ ) é a tensão superficial na interface ar-água,  $\Theta$  é o ângulo de contato (assumido como  $\Theta = 0$ ),  $\rho_w$  ( $\text{kg m}^{-3}$ ) a densidade da água e  $g$  ( $\text{m s}^{-2}$ ) a aceleração da gravidade. No sistema internacional de unidade (SI),  $\sigma = 0,0728 \text{ N m}^{-1}$  e  $g = 9,81 \text{ m s}^{-2}$ .

O segundo conceito é o cálculo do conteúdo de água a partir da distribuição do tamanho das partículas, como uma contribuição de cada fração para o molhamento do solo.

$$\theta_i = \phi \sum_{i=0}^{i=1} w_i \dots\dots\dots [6]$$

onde  $\phi$  ( $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$ ) é a porosidade,  $w_i$  ( $\text{kg kg}^{-1}$ ) é a fração de massa, calculada por meio de uma função sigmoideal logística ajustada aos dados de distribuição de tamanhos de partículas do solo. A porosidade do solo pode ser estimada por meio da densidade volumétrica  $\rho_s$  ( $\text{kg m}^{-3}$ ) e das partículas  $\rho_p$  ( $\text{kg m}^{-3}$ ):  $\phi = 1 - (\rho_s / \rho_p)$ .

O raio dos poros ( $r_i$ ) é determinado a partir do raio das partículas ( $R_i$ ), considerando-se o empacotamento de partículas esféricas e um fator de escalonamento  $\alpha$ , que corrige a estimativa para solos estruturados (ARYA e PARIS, 1981; ARYA et al., 1999), por meio da equação:

$$r_i = R_i \sqrt{4en_i^{1-\alpha} / 6} \dots\dots\dots [7]$$

onde  $n_i$  é o número de partículas da classe  $i$ , e “e” é a razão de vazios (volume de poros/volume de partículas), dada por Arya e Paris (1981):

$$n_i = \frac{3w_i}{4\pi R_i^3 \rho_p} \dots\dots\dots [8]$$

$$e = \frac{\rho_p - \rho_s}{\rho_s} \dots\dots\dots [9]$$

O potencial mátrico do solo é calculado pela combinação das equações 3.5, 3.7, 3.8 e 3.9:

$$\psi_i = \frac{2\sigma}{\rho_w g R_i \sqrt{\frac{2(\rho_p - \rho_s)}{3\rho_s} \left(\frac{3w_i}{4\pi R_i^3 \rho_p}\right)^{1-\alpha}}} \dots\dots\dots [10]$$

Uma vez conhecido o fator de escalonamento  $\alpha$ , a curva de retenção pode ser estimada pelo modelo de Arya e Paris, calculando-se a umidade pela Eq. 6 e o potencial mátrico pela Eq. 10, para diversas classes de diâmetros de partículas, as quais foram originalmente sugeridas por Arya e Paris (1981) como: 1, 2, 3, 5, 10, 20, 30, 40, 50, 70, 100, 150, 200, 300, 400, 600, 800, 1000, 1500 e 2000  $\mu\text{m}$ .

*Procedimento para a obtenção de  $\alpha$*

O fator de escalonamento  $\alpha$  (Eq. 7) é obtido por meio da Eq. 11, que é uma combinação das Eqs. 5, 7, 8 e 9, onde o potencial mátrico  $\psi_i$ , determinado pelo modelo de Arya e Paris, é considerado igual ao valor medido experimentalmente nas curvas de retenção, para as diversas frações de diâmetro.

$$\alpha = 1 - \frac{\text{Log} \left[ \frac{3}{2e} \left( \frac{2\sigma}{\rho_w \psi_i g R_i} \right)^2 \right]}{\text{Log}(n_i)} \dots\dots\dots [11]$$

onde os dados de potencial mátrico  $\psi_i$  determinados experimentalmente são ajustados com a equação de Genuchten (1980) na sua forma invertida ( $\psi$  como função de  $\theta$ ), possibilitando a sua determinação para os diversos valores de  $\theta$ , obtidos nas diversas frações de diâmetro.

Portanto,  $\alpha$  pode ser estimado para as diversas classes de diâmetro ou raios de partículas (até 20 valores conforme sugerido por Arya e Paris), e um valor constante de  $\alpha$  pode ser obtido da média ou moda (valor mais freqüente) da distribuição dos valores estimados. Arya e Paris (1981), em sua formulação original, obtiveram  $\alpha=1,38$  e em uma modificação apresentada por Arya e Dierolf (1992), um valor de  $\alpha=0,938$  foi obtido. Na Eq.11,  $\alpha$  pode ser também assumido como função de  $\psi$ . Esta dependência foi proposta por Basile e D’Urso (1997). Entretanto, devido à interdependência de  $\alpha$  com  $\psi$  na aplicação do modelo, o uso da relação  $\alpha = f(\psi)$  é dificultada, exigindo-se o uso de um procedimento iterativo complexo para a aplicação da relação na solução do modelo. Portanto, é



mais conveniente utilizar valores constantes de  $\alpha$  ou uma relação de  $\alpha$  com  $\theta$ , ao invés de  $\psi$ , uma vez que  $\alpha$  e  $\theta$  podem ser determinados independentemente pelas equações 11 e 6, respectivamente.

#### Amostras de solo utilizadas na validação do modelo

A Tabela 1 apresenta os valores médios, mínimos e máximos e desvios padrão de algumas propriedades físicas das 104 amostras, enquanto a sua distribuição de classes texturais é apresentada na Figura 4.

Os solos amostrados incluem as seguintes classes: Neossolo Quartzarênico órtico, Latossolo Vermelho Amarelo distrófico, Argissolo Vermelho Amarelo distrófico, Latossolo Vermelho distrófico, Latossolo Vermelho distroférico, Nitossolo Vermelho eutroférico, Vertissolo Ebânico Órtico chermossólico, Alissolo Crômico Argilúvico típico, Brunizém Hidromórfico de textura argilosa, Argissolo Vermelho Distrófico arênico, Latossolo Vermelho distroférico nitossólico, Latossolo Bruno Alumínico câmbico, Luvisolo Crômico Órtico e Planossolo Háptico eutrófico vértico.

Tabela 1. Valores médios, máximos e mínimos e desvios padrão (DP) de algumas propriedades físicas de cada um dos subconjuntos do primeiro conjunto de amostras usadas no cálculo de  $\alpha$  e validação do modelo de Arya e Paris.

subconjunto amostras	Estatística	$\rho_s$ kg m <sup>-3</sup>	$\rho_p^*$ kg m <sup>-3</sup>	$\theta_{30kPa}$ m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup>	$\theta_{1500kPa}$ m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup>	argila kg kg <sup>-1</sup>	silte kg kg <sup>-1</sup>	areia kg kg <sup>-1</sup>
	média	1,41	2,84	0,244	0,156	0,402	0,102	0,496
	DP	0,17	0,16	0,088	0,071	0,126	0,092	0,205
São Carlos	máximo	1,62	3,05	0,097	0,056	0,606	0,283	0,798
	mínimo	1,11	2,63	0,430	0,280	0,192	0,010	0,132
	média	1,41	2,81	0,282	0,187	0,601	0,149	0,251
	DP	0,15	0,13	0,077	0,072	0,119	0,048	0,153
Piracicaba	máximo	1,68	2,95	0,182	0,082	0,748	0,248	0,517
	mínimo	1,07	2,66	0,393	0,295	0,389	0,059	0,074
	média	1,16	2,74	0,275	0,161	0,356	0,241	0,402
	DP	0,13	0,10	0,094	0,069	0,190	0,109	0,196
Rio Grande do Sul	máximo	1,51	2,98	0,028	0,017	0,652	0,484	0,975
	mínimo	0,88	2,61	0,486	0,330	0,011	0,014	0,100

\* estimado da medida do coeficiente de atenuação em massa dos solos (Vaz et al., 1999);  
 $\rho_s$  : densidade global;  $\rho_p$  : densidade das partículas;  $\theta_{30kPa}$ : umidade a 30 ou 33 kPa;  
 $\theta_{1500kPa}$ : umidade a 1500 kPa.

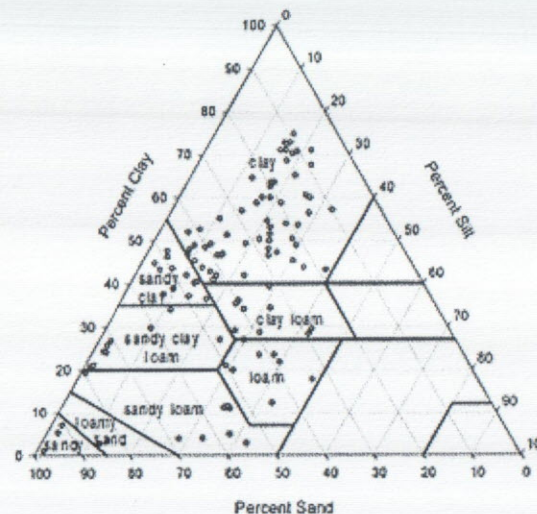


Figura 4. Triângulo textural de 104 amostras de solo utilizadas para a obtenção do parâmetro  $\alpha$  e a validação do modelo de Arya e Paris (VAZ et al., 2005a).

O segundo conjunto, composto de 30 amostras coletadas na região de São Carlos e Piracicaba é utilizado para uma validação independente do modelo, considerando-se a função  $\alpha=f(\theta)$  obtida com o primeiro conjunto de amostras.

A Tabela 2 apresenta os valores médios, mínimos e máximos e desvios padrão de algumas propriedades físicas dessas 30 amostras. Os solos amostrados incluem as seguintes classes: Neossolo Quartzarênico, Latossolo Vermelho distroférico, Latossolo Vermelho Amarelo distrófico, Latossolo Vermelho distrófico e Argissolo Vermelho Amarelo distrófico.

Tabela 2. Valores médios, máximos e mínimos e desvios padrão (DP) de algumas propriedades físicas do segundo conjunto, com 30 amostras, usadas para uma validação independente do modelo de Arya e Paris, após a obtenção de  $\alpha=f(\theta)$  com o conjunto de 104 amostras.

Estatística	$\rho_s$ kg m <sup>-3</sup>	$\rho_p^*$ kg m <sup>-3</sup>	$\theta_{30kPa}$ m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup>	$\theta_{1500kPa}$ m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup>	argila kg kg <sup>-1</sup>	silte kg kg <sup>-1</sup>	areia kg kg <sup>-1</sup>
média	1,39	2,85	0,350	0,163	0,475	0,205	0,320
DP	0,19	0,13	0,048	0,072	0,083	0,059	0,108
máximo	1,69	3,10	0,419	0,280	0,627	0,311	0,634
mínimo	1,07	2,64	0,258	0,017	0,296	0,039	0,163

### Determinação das curvas de retenção de água no solo

As amostras de solo indeformado para a determinação da curva de retenção de água do primeiro conjunto (104 amostras) foram coletadas em cilindros de aço inox (5 cm de diâmetro e 5 cm de altura). Desses, nos 2 primeiros subconjuntos de amostras (da região de São Carlos e Piracicaba, totalizando 46 amostras) as curvas de retenção foram obtidas no laboratório do Departamento de Solos e Nutrição de Plantas da ESALQ-USP, Piracicaba, SP. O terceiro subconjunto foi analisado no laboratório de solos da Universidade de Santa Maria, em Santa Maria, RS (58 amostras). A Tabela 3 mostra os potenciais aplicados e o equipamento usado nas determinações, em cada um dos laboratórios. Nos 2 laboratórios, o tempo de equilíbrio variou de acordo com a textura do solo e o potencial aplicado, mas em geral foi em torno de 1 dia para potenciais até 10 kPa, de 3 a 4 dias para potenciais entre 33 e 100 kPa, e de 10 a 20 dias para potenciais entre 500 e 1500 kPa.

No segundo conjunto (30 amostras), utilizado para a validação independente do modelo, as curvas de retenção foram obtidas no laboratório de solos da ESALQ, nos seguintes potenciais: 0,1; 2; 4; 8; 33; 100; 500 e 1500 kPa.

Os dados experimentais foram caracterizados com a equação de van Genuchten (1980), apresentada abaixo:

$$\theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \left( \frac{1}{1 + (\gamma\psi)^n} \right)^{\frac{n-1}{n}} \dots\dots\dots [12]$$

onde  $\theta_r$  e  $\theta_s$  ( $m^3 m^{-3}$ ) são os conteúdos de água residual e saturado, respectivamente,  $\psi$  (kPa) é o potencial mátrico, e  $\gamma$  e  $n$  são parâmetros de ajuste sem significado físico. Esses parâmetros ( $\theta_r$ ,  $\theta_s$ ,  $\gamma$  e  $n$ ) foram obtidos por ajuste não-linear de mínimos quadrados (WRAITH e OR, 1998), usando-se a ferramenta solver do Excel (Microsoft®).

Tabela 3. Potenciais mátricos aplicados em cada um dos conjuntos de amostras para a determinação das curvas de retenção.

conjunto amostras	local coleta	laborat.	Potencial mátrico (kPa)	
			Mesa de tensão	panela de Richards
1	São Carlos	ESALQ	0,1; 2; 4; 8; 10	30, 100, 500, 1500
2	Piracicaba	ESALQ	0,1; 0,5; 1; 3; 5; 8; 10	33, 100, 500, 1500
3	R. G. do Sul	UFMS	0,1; 5; 10	33, 100, 500, 1500

### Procedimento de análise da distribuição do tamanho das partículas

As amostras de solo deformado para a determinação do tamanho das partículas foram coletadas e analisadas em triplicata. As amostras (40 gramas de solo seco em estufa) foram pré-dispersas por uma noite com 10 mL de NaOH 1N e 200 mL de água destilada e pela manhã foram dispersas mecanicamente com agitador de alta rotação (modelo 936-2, da Hamilton Beach, USA) durante 5 minutos para solos arenosos, 10 minutos para solos de textura média e 15 minutos para solos argilosos e, posteriormente, analisados em grupos de 10 amostras no analisador granulométrico automático desenvolvido na Embrapa Instrumentação Agropecuária (NAIME et al., 2001). O tempo de medida de cada amostra foi de aproximadamente 18 minutos e, portanto, cada conjunto de 10 amostras era analisado em torno de 3 horas. Detalhes do método de análise e do equipamento são encontrados no item 3.1 deste livro.

Os dados de distribuição do tamanho das partículas de cada amostra podem ser ajustados por uma função sigmoideal logística (ARYA et al., 1999) usando-se o software Origin da Microcal® ou o software QUALISOLO (item 3.2.8). Outras funções, sugeridas por Hwang e Powers (2003) foram também testadas, mas a função logística foi a que apresentou o melhor desempenho. Assim, as curvas ajustadas pela função logística foram utilizadas para a estimativa da retenção da água no solo pelo modelo de Arya e Paris.

### Determinação de $\alpha$

A distribuição de frequências de valores estimados de  $\alpha$  para o conjunto de 104 amostras é apresentada na Figura 5. Um total de 1821 valores de  $\alpha$  é obtido, pois para cada amostra determinam-se até 20 valores de  $\alpha$ , um para cada fração de tamanhos de partículas. O valor mais frequente obtido foi de  $\alpha=0,977$ , que está entre o valor proposto originalmente por Arya e Paris, (1981) que foi de 1,38 e o de Arya e Dierolf (1992), que foi de 0,938. A Figura 6 apresenta os valores médios de  $\alpha$  para cada solo em função dos teores de areia e argila. Observa-se um aumento de  $\alpha$  com o aumento do teor de areia e uma diminuição com o aumento de argila.

A dependência de  $\alpha$  com  $\theta$  é apresentada na Figura 7, para dois grupos de textura (aqueles com mais de 40 % de areia e outros com mais de 40 % de argila). Neste caso, cada um dos solos foi incluído apenas uma vez no gráfico, ou seja, na classe de solos argilosos ou de solos arenosos e por isso alguns poucos solos não foram incluídos no gráfico, pois não se

encaixavam em nenhum dos grupos. Para o grupo de solos argilosos, os valores de  $\alpha$  não apresentaram dependência com  $\theta$ , mas, no caso dos solos arenosos, observou-se a rápida diminuição de  $\alpha$  com  $\theta$  na região de baixos valores de  $\theta$  e a estabilização de  $\alpha$  para valores maiores que aproximadamente  $0,2 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ . O melhor ajuste desses dados foi obtido com uma função de decaimento exponencial de primeira ordem ( $\alpha=0,947 + 0,427\exp(-\theta/0,129)$ ).

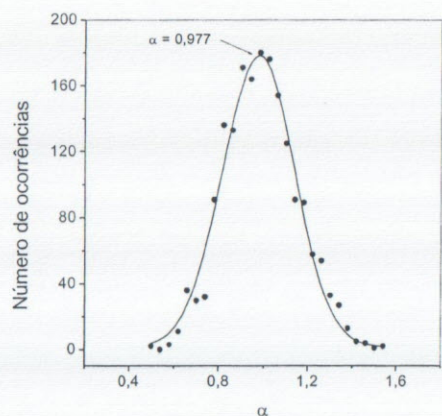


Figura 5. Distribuição de freqüências dos 1821 valores de  $\alpha$  obtidos para as 104 amostras de solo (primeiro conjunto). O valor mais freqüente (moda) foi de 0,977 (VAZ et al., 2005a).

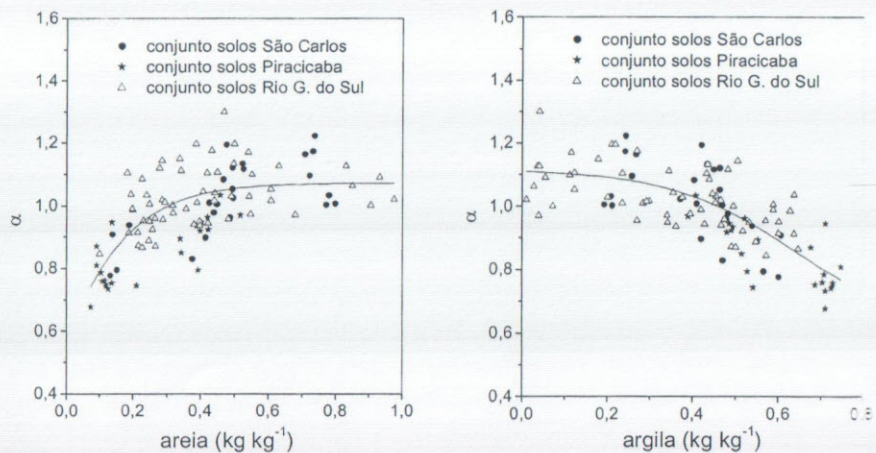


Figura 6. Dependência de  $\alpha$  com os teores de areia e argila, obtidos com o conjunto de 104 amostras (primeiro conjunto) (VAZ et al., 2005a).

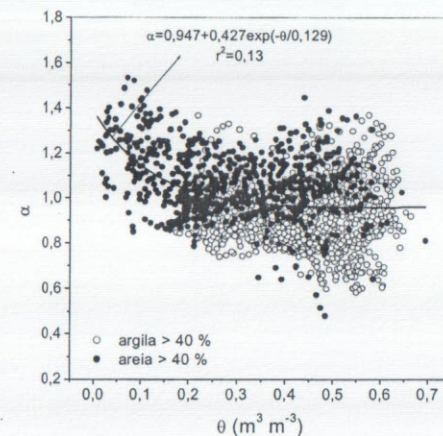


Figura 7. Variação de  $\alpha$  com  $\theta$  para 2 grupos de textura, obtidos com o conjunto de 104 amostras (VAZ et al., 2005a).

Utilizando-se essa dependência de  $\alpha=f(\theta)$ , obtêm-se os valores de  $\alpha=0,96$  para  $\theta=0,6 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  e  $\alpha=1,37$  para  $\theta=0$ . Esse comportamento é bastante consistente com os resultados obtidos em outros trabalhos da literatura, como em Basile e D'urso (1997), uma vez que valores baixos de  $\theta$ , nas curvas de retenção, são obtidos apenas para solos mais arenosos, e solos argilosos possuem valores de saturação maiores que dos solos arenosos. O espalhamento observado na Figura 7 pode ser devido a diversas fontes de erro como as das determinações experimentais das curvas de retenção e granulometria, bem como dos seus ajustes matemáticos pelas equações de van Genuchten e logística (sigmoidal), respectivamente.

A Tabela 4 mostra um exemplo da curva de retenção estimada com o modelo de Arya e Paris, usando  $\alpha=0,977$  e  $\alpha=f(\theta)$ , para um solo arenoso do Rio Grande do Sul. A maior diferença na estimativa de  $\psi$  ocorreu para os diâmetros de partículas menores (valores menores de umidade). Isso é causado pela tendência da função exponencial que correlaciona  $\alpha$  e  $\theta$  de aumentar para valores menores de  $\theta$ , melhorando a estimativa para esta faixa de diâmetros ou umidades no caso de  $\alpha=f(\theta)$ .

Tabela 4. Aplicação do modelo de Arya e Paris para a estimativa da curva de retenção, com  $\alpha=0,977$  e  $\alpha=f(\theta)$  para solo arenoso do RGS.

D $\mu\text{m}$	$\Sigma w_i^{\S}$	$W_i^{\#}$	$\theta^{\ddagger}$ $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$	$n_i^{\&}$	$\alpha$		$r_i \text{ (m)}^{\ast\ast}$		$\psi \text{ (kPa)}^{\ast}$	
					cons <sup>§§</sup>	var <sup>###</sup>	$\alpha$ -cons	$\alpha$ -var	$\alpha_{\text{cons}}$	$\alpha_{\text{var}}$
1	0,055	0,055	0,025	$4,0 \times 10^{-13}$	0,977	1,299	$5,32 \times 10^{-7}$	$3,43 \times 10^{-9}$	273,8	42,4
2	0,055	0	0,025	0	0,977	1,299	-	-	-	-
3	0,055	0	0,025	0	0,977	1,299	-	-	-	-
5	0,055	0	0,025	0	0,977	1,299	-	-	-	-
10	0,055	0	0,025	0	0,977	1,299	-	-	-	-
20	0,056	0,001	0,025	$9,08 \times 10^{-7}$	0,977	1,298	$9,16 \times 10^{-6}$	$4,84 \times 10^{-7}$	15,89	30,6
30	0,058	0,002	0,026	$5,38 \times 10^{-7}$	0,977	1,295	$1,37 \times 10^{-5}$	$8,03 \times 10^{-7}$	10,66	18,2
40	0,06	0,002	0,027	$2,27 \times 10^{-7}$	0,977	1,293	$1,80 \times 10^{-5}$	$1,24 \times 10^{-6}$	8,08	11,7
50	0,068	0,008	0,031	$4,65 \times 10^{-7}$	0,977	1,283	$2,27 \times 10^{-5}$	$1,52 \times 10^{-6}$	6,41	9,5
70	0,09	0,022	0,041	$4,66 \times 10^{-7}$	0,977	1,258	$3,18 \times 10^{-5}$	$2,65 \times 10^{-6}$	4,58	5,4
100	0,158	0,068	0,071	$4,94 \times 10^{-7}$	0,977	1,192	$4,55 \times 10^{-5}$	$6,75 \times 10^{-6}$	3,20	21,6
150	0,368	0,21	0,166	$4,52 \times 10^{-7}$	0,977	1,064	$6,81 \times 10^{-5}$	$3,15 \times 10^{-5}$	2,14	4,6
200	0,555	0,187	0,251	$1,70 \times 10^{-7}$	0,977	1,008	$8,98 \times 10^{-5}$	$6,94 \times 10^{-5}$	1,62	2,1
300	0,794	0,239	0,359	$6,43 \times 10^{-6}$	0,977	0,973	$1,33 \times 10^{-4}$	$1,37 \times 10^{-4}$	1,09	1,1
400	0,877	0,083	0,396	$9,42 \times 10^{-5}$	0,977	0,967	$1,74 \times 10^{-4}$	$1,87 \times 10^{-4}$	0,84	0,7
600	0,927	0,05	0,419	$1,68 \times 10^{-5}$	0,977	0,964	$2,56 \times 10^{-4}$	$2,77 \times 10^{-4}$	0,57	0,5
800	0,936	0,009	0,423	$1,28 \times 10^{-5}$	0,977	0,963	$3,31 \times 10^{-4}$	$3,53 \times 10^{-4}$	0,44	0,4
1000	0,955	0,019	0,432	$1,38 \times 10^{-4}$	0,977	0,962	$4,14 \times 10^{-4}$	$4,44 \times 10^{-4}$	0,36	0,3
1500	0,97	0,015	0,438	$3,23 \times 10^{-3}$	0,977	0,961	$6,11 \times 10^{-4}$	$6,51 \times 10^{-4}$	0,24	0,2
2000	1	0,03	0,452	$2,72 \times 10^{-3}$	0,977	0,960	$8,13 \times 10^{-4}$	$8,70 \times 10^{-4}$	0,18	0,17

<sup>§</sup>distribuição acumulada do tamanho de partículas; <sup>#</sup>contribuição de cada fração granulométrica; <sup>†</sup>calculado a partir da Eq. 6; <sup>&</sup>calculado usando Eq. 7; <sup>§§</sup> $\alpha=0,977$ ; <sup>###</sup> $\alpha=f(\theta)$ , obtido da Fig. 8; <sup>††</sup>raio do poro obtido das Eqs. 3.7, 3.8 e 3.9; <sup>&&</sup>obtido pela Eq. 10.

De um modo geral, o uso de  $\alpha=f(\theta)$  melhorou a estimativa da curva de retenção pelo modelo de Arya e Paris. Para os dois solos arenosos apresentados na Figura 8,  $\alpha=1,38$  forneceu uma melhor estimativa do que com  $\alpha=0,98$  e  $0,977$ , mas a utilização de  $\alpha=1,38$  causou superestimação de  $\psi$  para os dois solos argilosos (Figura 9), especialmente para a faixa de umidades menores.

Uma comparação completa dos dados de retenção medidos e estimados pelo modelo de Arya e Paris para todo o conjunto de 104 solos é apresentada na Figura 10, com os dados de umidade medidos e estimados nos potenciais mátricos usados na curva de retenção experimental, considerando os valores de  $\alpha$  constantes e  $\alpha=f(\theta)$ .

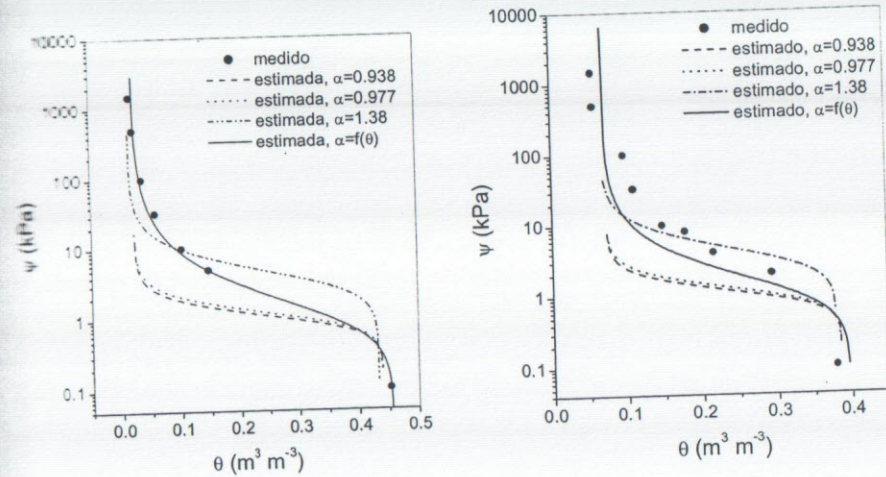


Figura 8. Comparação dos dados de retenção obtidos experimentalmente e estimados por Arya e Paris, usando o procedimento de  $\alpha$ -constante (1,38; 0,938 e 0,977) e  $\alpha=f(\theta)$ , para dois solos arenosos do subconjunto do Rio Grande do Sul (a) e de São Carlos (b) (VAZ et al., 2005a).

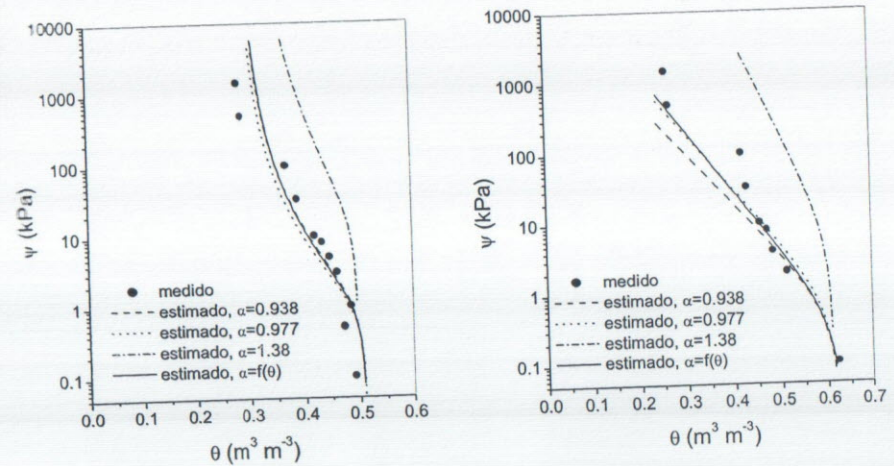


Figura 9. Comparação dos dados de retenção obtidos experimentalmente e estimados pelo modelo de Arya e Paris, usando-se o procedimento de  $\alpha$ -constante (1,38; 0,938 e 0,977) e  $\alpha=f(\theta)$ , para dois solos argilosos do subconjunto de Piracicaba (a) e de São Carlos (b) (VAZ et al., 2005a).

A Tabela 5 mostra os erros padrão das estimativas-EPE(Spiegel, 1985) de  $\theta$  e os coeficientes de determinação obtidos dessa comparação. A pior estimativa foi obtida com  $\alpha=1,38$ , que forneceu  $EPE=0,136 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ , o qual foi duas vezes maior que aquele obtido para  $\alpha=f(\theta)$ , que apresentou o menor erro ( $0,062 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ).

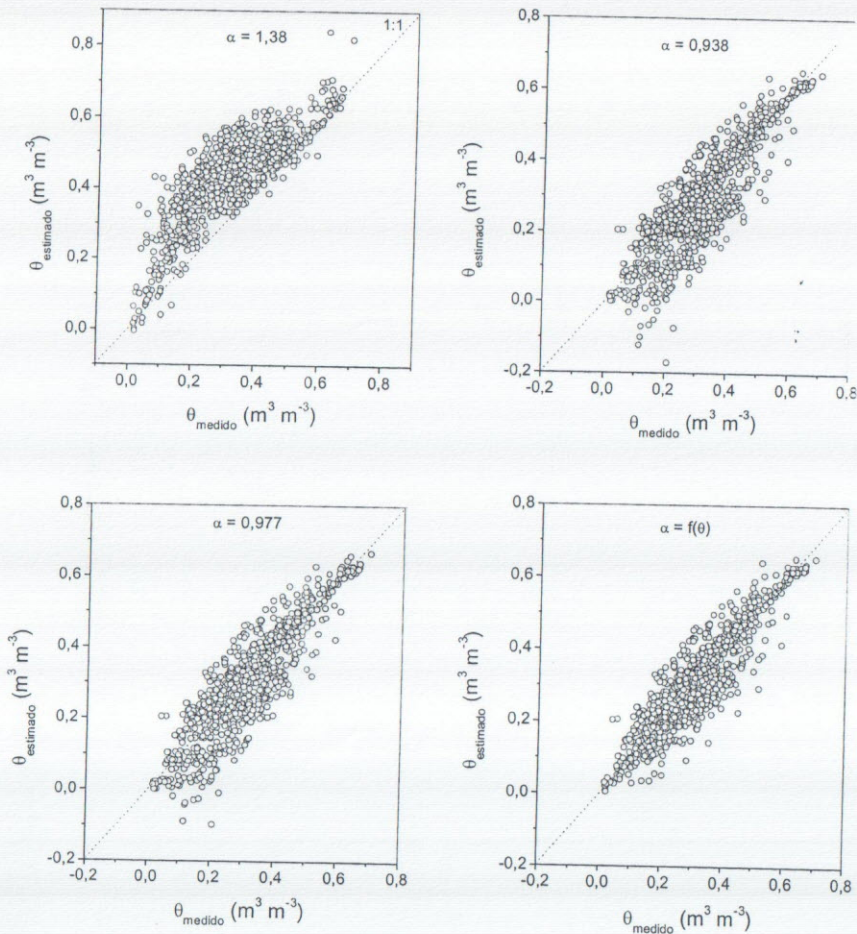


Figura 10. Comparação de valores medidos e estimados da umidade na curva de retenção para os 3 valores de  $\alpha$  constante e variável.

Tabela 5. Coeficientes de regressão linear obtidos da correlação entre  $\theta$  medido e estimado pelo modelo para diferentes valores de  $\alpha$ .

$\alpha$	a	b	$r^2$	EPE ( $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$ )
1,38	0,186	0,756	0,689	0,136
0,938	-0,012	0,973	0,755	0,080
0,977	0,001	0,977	0,781	0,073
$\alpha=0,947+0,427e^{-\theta/0,129}$	0,031	0,913	0,817	0,062

$r^2$ : coeficiente de determinação, EPE: erro padrão da estimativa.

#### Validação independente com conjunto de 30 amostras com $\alpha=f(\theta)$

A Figura 11 apresenta uma nova validação do modelo de Arya e Paris para um outro conjunto de 30 amostras de solo, utilizando-se  $\alpha=0,947+0,427\exp(-\theta/0,129)$ . Os valores estimados de  $\theta$  são comparados com os medidos na curva de retenção experimental (laboratório da ESALQ/USP). A validação é chamada de independente, pois na validação apresentada anteriormente o mesmo conjunto de solos foi utilizado (104 amostras) na determinação de  $\alpha$  em função  $\theta$  e na validação do modelo de Arya e Paris, usando-se essa função. O erro padrão da estimativa obtido com os dados da Figura 11 foi de  $0,059 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ , ou seja, próximo daquele encontrado para o primeiro conjunto de 104 amostras, que foi de  $0,062 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ .

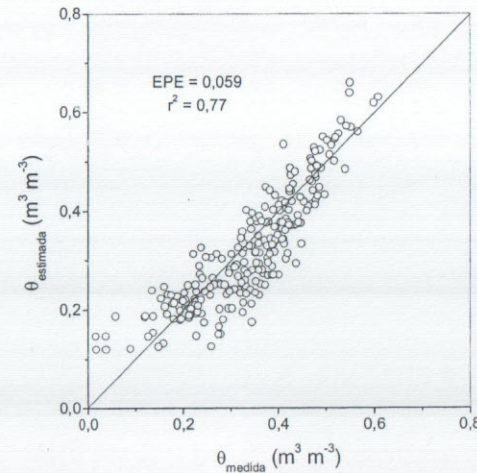


Figura 11. Comparação de valores medidos e estimados da umidade na curva de retenção para um novo conjunto de 30 amostras, com  $\alpha=f(\theta)$  (VAZ et al., 2005a).

## Programa para a aplicação automática do modelo de Arya e Paris - QUALISOLO

A Figura 12 apresenta a tela principal do software que foi implementado em C++, utilizando-se o ambiente de desenvolvimento Borland C++ Builder 4.0, para a plataforma Windows. Observam-se na figura o ajuste dos dados da granulometria, por uma função logística (gráfico superior), a curva de retenção com os pontos gerados pelo modelo e um ajuste feito pela equação de van Genuchten (gráfico inferior). Além da curva de distribuição de tamanho de partículas (granulometria detalhada), utilizam-se também os dados da densidade das partículas e da densidade global do solo como dados de entrada do modelo.

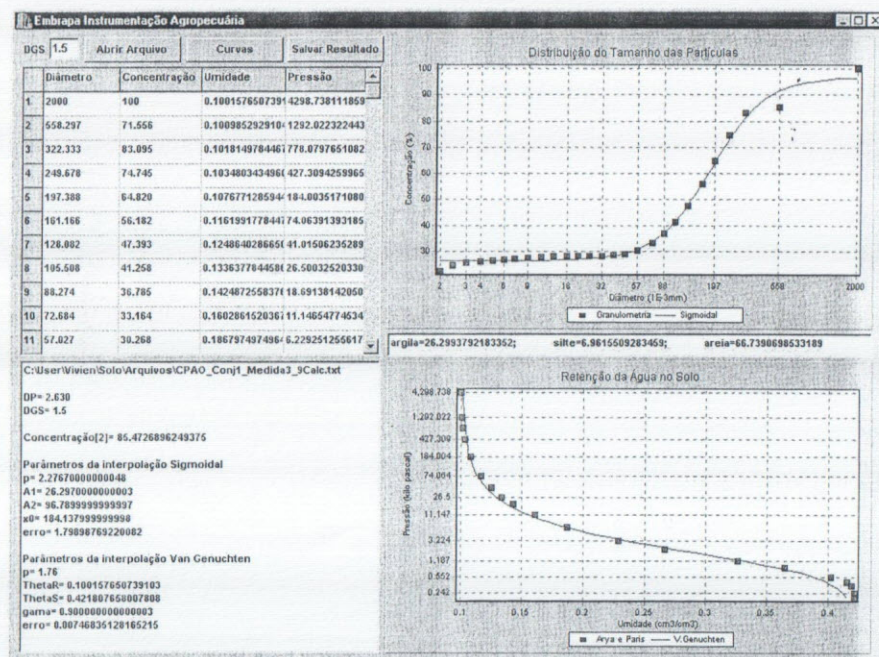


Figura 12. Tela principal do software desenvolvido para a determinação da curva de retenção com o modelo de Arya e Paris, utilizando-se a curva de distribuição do tamanho de partículas, a densidade das partículas e a densidade global do solo (NAIME et al., 2004).

### Considerações sobre o desempenho do programa QUALISOLO

O trabalho realizado possibilitou a determinação de um valor constante do parâmetro de escalonamento  $\alpha$  para solos brasileiros ( $\alpha=0,977$ ) que

melhorou o desempenho do modelo para os nossos solos, quando comparado com os outros valores encontrados na literatura, que eram de 1,38 e 0,938. Além disso, foi possível melhorar o desempenho do modelo, com a utilização de uma relação empírica obtida para  $\alpha$  em função da umidade  $\alpha=0,947+0,427\exp(-\theta/0,129)$ , que se mostrou de uso muito mais simples do que a relação sugerida por Basile e D'Urso (1997), onde  $\alpha$  era expressa em função de  $\psi$  (Eq. 12).

Esses resultados apresentam um avanço considerável no modelo originalmente proposto por Arya e Paris (1981), uma vez que mostram a sua validade não apenas para solos muito arenosos, mas também para solos com diferentes texturas.

As validações realizadas com dois conjuntos de solos, um com 104 e outro com 30 amostras, apresentaram um erro padrão da estimativa em torno de  $0,06 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  (utilizando-se a relação de  $\alpha$  em função de  $\theta$ ), o que pode ser considerado muito satisfatório e com grande potencial de aplicações em estudos que demandem grande quantidade de amostras, situação muitas vezes inviável de ser realizada com a técnica convencional da Richards e mesa de tensão, que demandam um tempo muito longo de análise.

Por fim, foi implementado um software que possibilita a determinação automática da curva de retenção com o modelo de Arya e Paris e do fator de qualidade física do solo (DEXTER, 2004).

### Penetrômetro combinado com sonda de umidade

Penetrômetros ou penetrógrafos são instrumentos que medem a resistência à penetração (RP) em unidades de pressão (força/área) de um cone padrão (ASAE, 1994) posicionado na extremidade de uma haste de metal, quando inseridos no interior do solo. Essa resistência à penetração está relacionada à resistência exercida pelo solo à penetração e ao crescimento das raízes e, portanto, pode ser utilizada como uma medida da compactação dos solos.

Esses instrumentos podem ser divididos em dois grupos, de acordo com o tipo de penetração no interior do solo: i) estáticos, quando a penetração é realizada com velocidade constante, com um sistema hidráulico ou elétrico-eletrônico ou mesmo manual (neste caso o usuário tenta imprimir uma penetração no solo com velocidade constante, o que, na maioria das vezes, é difícil de se obter) e ii) dinâmicos ou penetrômetros de impacto onde a penetração é proporcionada por impactos de um corpo metálico.

Os penetrômetros estáticos são os mais utilizados em ciência do solo e agronomia. São equipamentos caros e sofisticados quando em versões automáticas e, no caso das versões manuais, tem-se a dificuldade da inserção com velocidade constante.

O segundo grupo, o dos dinâmicos, tem sido bem menos utilizado, de um modo geral, no mundo, em estudos agronômicos, sendo mais aplicado em avaliações de solos para fins de construção de estradas e geotecnia.

Entretanto, no Brasil, na década de 80, o Planalsucar/IAA, através dos trabalhos pioneiros do Dr. Rubsmar Stolf, desenvolveu um penetrômetro de impacto (STOLF, 1991) para uso na avaliação da compactação do solo com ênfase na cultura da cana-de-açúcar. O equipamento é atualmente comercializado pela indústria Kamaq e tem sido relativamente bastante utilizado para a avaliação da compactação de solos agrícolas.

Além disso, recentemente foi publicado um trabalho na revista Soil Science Society of America Journal (HERRICK e JONES, 2002), indicando diversas vantagens na utilização de penetrômetros dinâmicos.

As principais vantagens dos penetrômetros de impacto são seu baixo custo e a possibilidade de se trabalhar em solos de alta resistência (com baixa umidade e altos teores de argilas) e solos pedregosos. Como desvantagens, têm-se a menor quantidade de trabalhos na literatura internacional e a hipótese lançada por alguns autores de que os penetrômetros estáticos simulam melhor o processo de penetração das raízes nos solos (BRADFORD, 1986).

No Brasil, diversos grupos de pesquisa têm trabalhado no desenvolvimento de penetrógrafos hidráulicos automáticos, mas é preponderante o uso de penetrômetros de impacto em estudos de manejo de solos e compactação.

Uma questão que tem dificultado bastante o uso de penetrômetros é a dependência da resistência à penetração com a umidade. Em geral, recomenda-se que se faça a medida em condição de umidade nem muito alta nem muito baixa, preferencialmente na capacidade de campo. Entretanto, essa recomendação não resolve o problema. O ideal seria medir a umidade no momento da sondagem do penetrômetro e, posteriormente, efetuar algum tipo de correção ou normalização para um valor constante de umidade. Outro aspecto é que ainda não é bem conhecida a dependência da RP com  $\theta$  para uma faixa larga de umidades e também a influência do tipo de solo nessa dependência.

Visando minimizar essas dificuldades, foram desenvolvidos equipamentos de penetrometria combinados com sensores de umidade para a determinação simultânea da resistência à penetração e de umidade ao longo do perfil dos solos (YOUNG et al., 1998; ADAMS et al., 1998; NEWMAN e HUMMEL, 1999; VAZ et al., 1999; VAZ e HOPMANS, 2001). Dessa forma, dados de RP obtidos em diferentes condições de umidade podem ser normalizados para uma umidade padrão, possibilitando assim comparações entre resultados, abrindo novas possibilidades de aplicações do penetrômetro em estudos e avaliações da compactação dos solos.

Dentre os diversos tipos de técnicas e sensores de umidade utilizados, a sonda espiral de TDR (reflectometria no domínio do tempo) introduzida por Vaz e Hopmans (2001) parece ser especialmente adequada devido às vantagens do TDR sobre as demais técnicas de medida da umidade dos solos (TOPP et al., 1980).

Aplicando o equipamento de penetrometria combinado com sensor de umidade por TDR em um solo siltoso da Califórnia, EUA (solo Yolo), Vaz et al. (2001) obtiveram correlações experimentais entre a RP,  $\rho$  e  $\theta$ , possibilitando, assim, a utilização do referido instrumento também para a estimativa da densidade dos solos, além das medidas de RP pelo penetrômetro e  $\theta$  pelo TDR.

#### *Descrição do equipamento*

O instrumento desenvolvido é composto de um penetrômetro de impacto (Figura 13) com uma sonda de TDR do tipo espiral acoplado na haste do penetrômetro, acima do cone padrão (ASAE, 1994). A configuração básica da sonda espiral de TDR (guia de onda) é constituída de dois fios de cobre com espessura de 0,8 milímetros e 30 centímetros de comprimento, enrolados paralelamente ao redor de um cilindro de PVC que reveste a haste de aço do penetrômetro. Os dois fios são conectados na extremidade a um cabo coaxial de 50  $\Omega$ , que é guiado pelo interior da haste do penetrômetro (Figura 14) e conectado a um testador de cabos Tektronix 1502C, para a determinação da constante dielétrica, a qual é proporcional à umidade do solo.

#### *Medidas em laboratório*

Foram realizados, em laboratório, testes com três solos para a avaliação do desempenho do sensor de umidade do solo e entendimento do

comportamento da constante dielétrica do sensor em função da umidade dos solos. Os solos constam de uma areia de textura grossa (SRI supreme sand-30, Silica Resources Inc. Marysville, CA) e os solos Yolo (ECHING et al., 1994) e Columbia (LIU et al., 1998), ambos da Califórnia, EUA. Foram preparadas amostras de cada um dos solos contendo teores de umidades crescentes e deixadas por um dia para homogeneização da umidade. O penetrômetro com a sonda foi, então, introduzido no interior das amostras, pressionando-o na superfície do solo e feitas 3 determinações das constantes dielétricas pelo TDR para cada amostra. Foram feitas, também, medidas da constante dielétrica de todas as amostras com uma sonda convencional de TDR na configuração de duas hastes paralelas e comprimento de 5 cm, para comparação com as medidas feitas com a sonda espiral. Os resultados foram avaliados pelo modelo conhecido como "mixing model" (DOBSON et al., 1985).

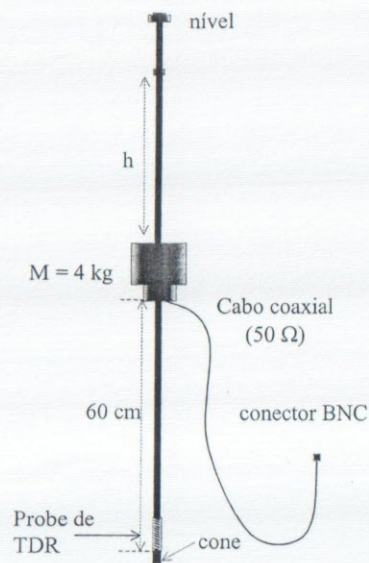


Figura 13. Esquema do penetrômetro de impacto combinado com sonda espiral de TDR para a medida simultânea da resistência à penetração e da umidade do solo (VAZ e HOPMANS, 2001).

#### Medidas em campo

Para a avaliação do efeito da umidade e densidade dos solos na resistência à penetração foram realizados experimentos em campo, constando de uma calibração e um experimento onde a resistência à

penetração foi determinada em duas condições distintas de umidade (Figura 15), uma seca, após um longo período sem chuvas e outra úmida, após irrigação de 50 milímetros.

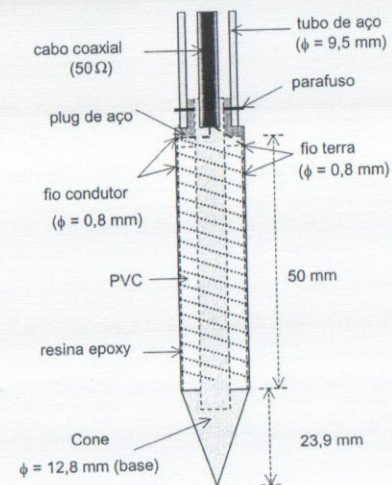


Figura 14. Esquema detalhado da sonda de TDR acoplada ao penetrômetro da Figura 13 (VAZ e HOPMANS, 2001).

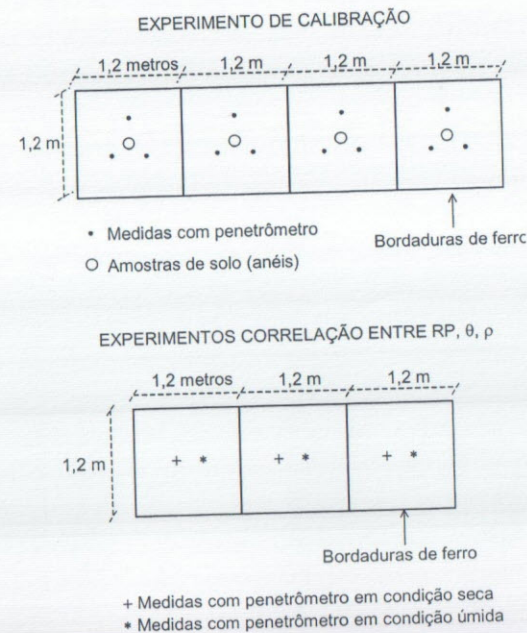


Figura 15. Esquema do experimento de campo para teste do penetrômetro com sondas de TDR (VAZ et al., 2001).



### Modelo para interpolação dos dados das curvas de calibração

Usando-se a abordagem de “mixing model” descrita por Nissen et al. (1998), a constante dielétrica medida por uma sonda espiral de TDR ( $\epsilon_{\text{espiral}}$ ) pode ser relacionada à constante dielétrica do solo determinada por uma sonda convencional ( $\epsilon_{\text{solo}}$ ), conforme a seguinte equação.

$$\epsilon_{\text{espiral}} = [w\epsilon_{\text{sonda}}^n + (1-w)\epsilon_{\text{solo}}^n]^{\frac{1}{n}} \dots\dots\dots [13]$$

Na Eq. 13,  $w$  é um fator de ponderação,  $n$  equivale a um fator de geometria da sonda e  $\epsilon_{\text{sonda}}$  pode ser considerado como sendo igual à constante dielétrica do PVC, no qual os fios em espiral são enrolados. A constante dielétrica do solo ( $\epsilon_{\text{solo}}$ ), determinada pela sonda convencional pode ser escrita em termos das características do solo (DOBSON et al., 1985):

$$\epsilon_{\text{solo}} = [(1-\phi)\epsilon_s^\alpha + (\phi-\theta)\epsilon_a^\alpha + \theta\epsilon_w^\alpha]^{\frac{1}{\alpha}} \dots\dots\dots [14]$$

onde  $\phi$  ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ) e  $\theta$  ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ) representam a porosidade e a umidade volumétrica, respectivamente, e  $\epsilon_s$ ,  $\epsilon_a$  e  $\epsilon_w$  são as constantes dielétricas das partículas do solo, do ar e água, respectivamente ( $\epsilon_s=3,9$ ;  $\epsilon_a=1,0$ ; and  $\epsilon_w = 80$ ), e o expoente  $\alpha$  depende da estrutura espacial do meio e sua orientação com respeito ao campo dielétrico aplicado e pode variar entre  $-1$  e  $+1$  (ROTH et al., 1990).

Substituindo-se a Eq. 14 na 13 pode-se expressar a constante dielétrica medida pela sonda espiral ( $\epsilon_{\text{espiral}}$ ) como (VAZ e HOPMANS, 2001):

$$\epsilon_{\text{espiral}} = \{ (w\epsilon_{\text{sonda}}^n + (1-w)[(1-\phi)\epsilon_s^\alpha + (\phi-\theta)\epsilon_a^\alpha + \theta\epsilon_w^\alpha]^{\frac{n}{\alpha}} \}^{1/n} \dots\dots\dots [15]$$

Esta equação é utilizada para interpolar os dados da curva de calibração obtidos para a sonda espiral de TDR.

### Calibração em laboratório

A correlação entre a constante dielétrica medida com a sonda espiral e a medida com a convencional é apresentada na Figura 16. Ajustando-se os dados à Eq. 13 obtêm-se  $n = 0,494$ ;  $w = 0,655$  e  $\epsilon_{\text{sonda}} = 2,703$ . O valor obtido para  $w$  indica uma grande influência do material da sonda na medida da constante dielétrica com a sonda espiral. O valor de  $\epsilon_{\text{sonda}}$  obtido é bastante próximo a valores tabelados para PVC e epoxy (WEAST, 1982). Nissen et al. (1998) encontraram para uma sonda

espiral, com geometria diferente da usada aqui, valores de  $w$  e  $n$  iguais a  $0,52$  e  $-0,13$ , respectivamente. Essas diferenças são atribuídas às distintas características geométricas e de construção de cada sonda.

As curvas de calibração da sonda espiral de TDR para os 3 solos são apresentadas na Figura 17. Os dados foram interpolados usando-se a Eq. 15, resultando valores de  $\alpha=0,57$ ;  $0,54$  e  $0,20$  para os solos Columbia, Yolo e areia, respectivamente.

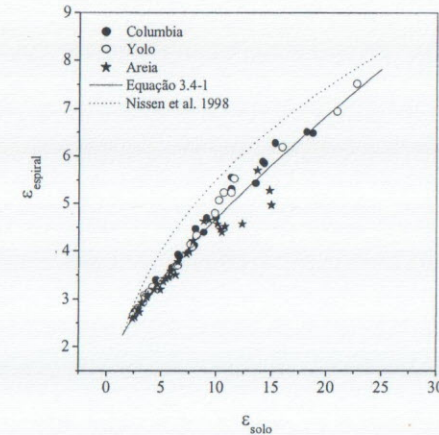


Figura 16. Correlação entre as constantes dielétricas do solo medidas com a sonda espiral e convencional (VAZ e HOPMANS, 2001).

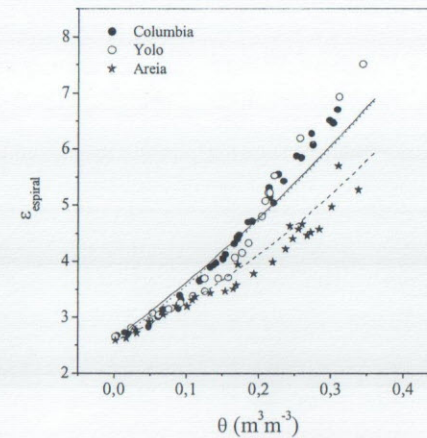


Figura 17. Constante dielétrica do solo, medida com a sonda espiral ao longo da haste do penetrômetro, em função da umidade para os 3 solos estudados (VAZ e HOPMANS, 2001).

A curva de calibração obtida em laboratório para o solo Yolo foi testada em campo. Foram realizadas medidas da resistência à penetração e da umidade ao longo do perfil, usando-se a equação de calibração obtida na Figura 17. A Figura 18 mostra um exemplo da resistência à penetração e da umidade medidas no campo, onde se observa um perfil detalhado para o solo Yolo. Para se verificar a validade da curva de calibração obtida em laboratório para uso em campo, foram coletadas amostras de solo em anéis, a cada 5 cm de profundidade, até 60 cm, e os valores da umidade medidos gravimetricamente foram comparados com os medidos pela sonda espiral de TDR. A Figura 19 mostra a boa correlação obtida entre os dois métodos, com  $r^2 = 0,987$ .

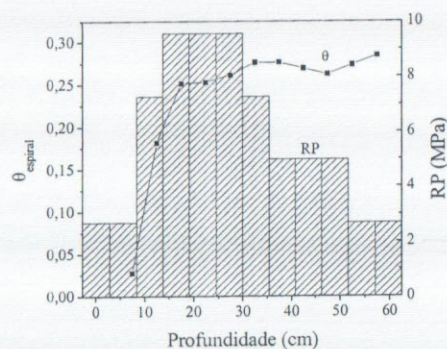


Figura 18. Perfil de resistência à penetração e de umidade medidas com o penetrômetro combinado com a sonda espiral de TDR para o solo Yolo (VAZ e HOPMANS, 2001).

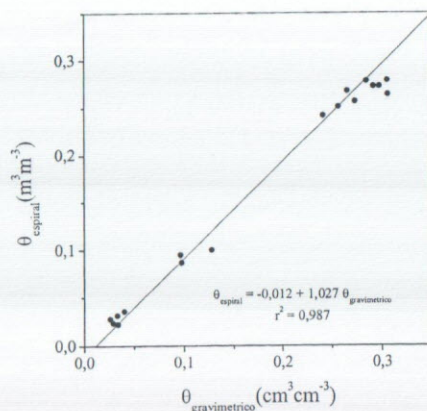


Figura 19. Valores de umidade medidos gravimetricamente e pela sonda espiral de TDR, em campo, para o solo Yolo (VAZ e HOPMANS, 2001).

### Experimentos de campo: influência da umidade na resistência à penetração

A Figura 20 apresenta a curva de calibração obtida para o solo Yolo, em campo. Diferenças nas constantes dielétricas entre as duas sondas são atribuídas às diferentes geometrias e ao deslocamento ou compactação do solo próximo às sondas durante a penetração no perfil do solo.

Os dados experimentais foram interpolados por equações polinomiais de terceiro grau (Figura 20), em vez do modelo “mixing”, para facilitar o trabalho de campo (TOPP et al., 1980), uma vez que se utilizou o software WinTDR98<sup>1</sup> para a coleta e tratamento dos dados. Esse software permite o cálculo da umidade do solo a partir da forma de onda fornecida pelo TDR através do uso de curvas de calibração do tipo polinomial de terceiro grau.

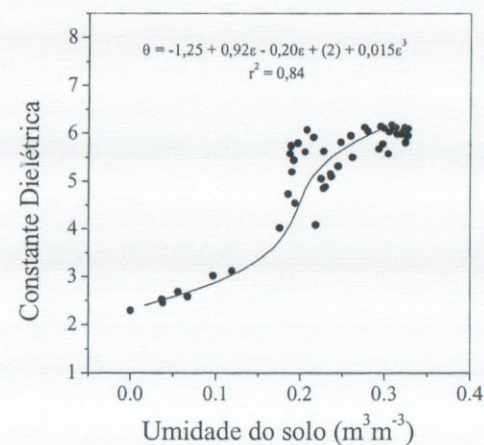


Figura 20. Curvas de calibração obtidas com as 2 sondas para o solo Yolo em campo.

Os perfis de resistência à penetração e de umidade determinados para as condições úmidas e secas para as duas sondas são apresentados na Figura 21. Os dados apresentados referem-se à média das medidas realizadas nas três parcelas (Figura 15).

Observa-se um decréscimo da resistência à penetração depois da irrigação, conseqüência do aumento da umidade no perfil.

<sup>1</sup> <http://psb.usu.edu/wintdr98/>

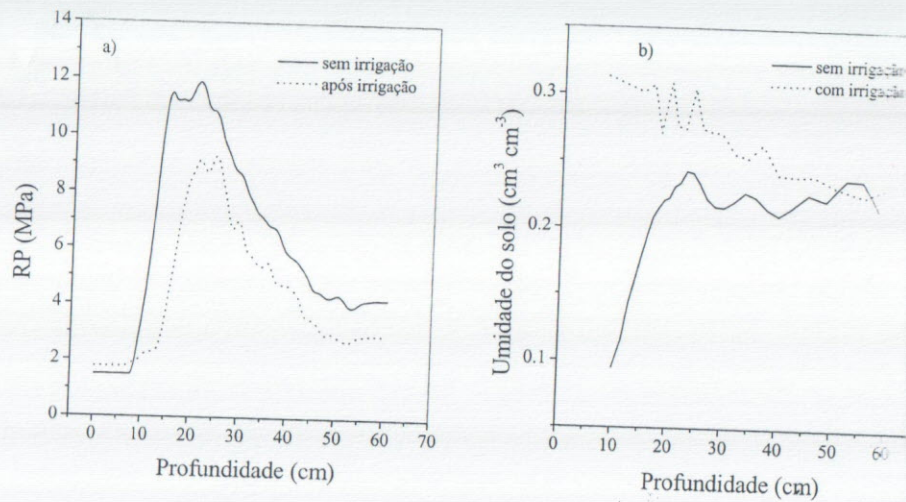


Figura 21. Perfis de resistência à penetração (a) e de umidade (b) para o solo Yolo, em campo (VAZ et al., 2001).

O perfil de densidade do solo, determinado a partir das amostras coletadas no experimento para a calibração das sondas é apresentado na Figura 22.

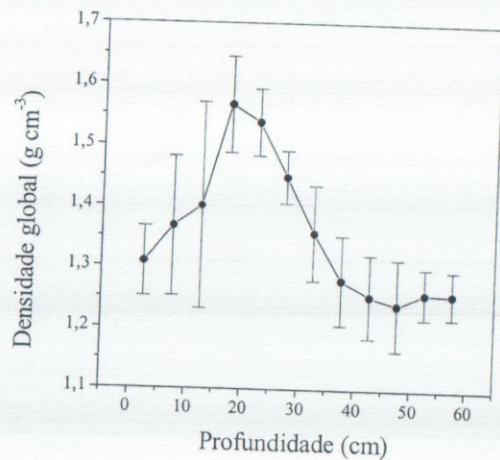


Figura 22. Perfil de densidade medido no experimento de calibração (média das 4 parcelas). Barras simbolizam o desvio padrão obtido em cada camada (VAZ et al., 2001).

Os dados de resistência à penetração (RP), de umidade ( $\theta$ ) e de densidade ( $\rho$ ) dos solos foram interpolados por uma equação única, utilizando-se o modelo combinado exponencial-potência sugerido por Upadhyaya et al. (1982), obtendo-se:

$$RP = 193,2(\rho / 2,65)^{4,1} \exp(-3\theta) \dots\dots\dots [16]$$

Os dados de resistência à penetração medidos e estimados em função da umidade e da densidade são apresentados na Figuras 23. Observa-se que a equação utilizada, sugerida por Upadhyaya et al. (1982), possibilitou a representação dos dados experimentais de forma bastante satisfatória.

Utilizando-se o penetrômetro com sonda espiral de TDR para a medida simultânea da resistência à penetração e da umidade e a equação de regressão 16, é possível estimar-se a densidade dos solos e também normalizar valores de resistência à penetração medidos em diversas condições de umidade, para um valor padrão de umidade, como, por exemplo, a capacidade de campo.

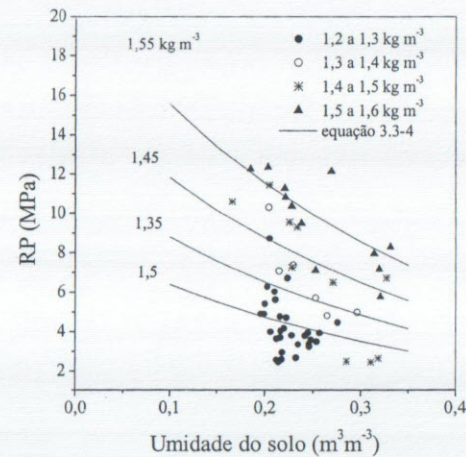


Figura 23. Resistência à penetração medida e estimada pela Eq. 16 em função da umidade e densidade do solo Yolo para a sonda na haste do penetrômetro (VAZ et al., 2001).

Uma vez que o instrumento apresentado determina RP e  $\theta$ , pode-se utilizar a Eq. 16 para a estimativa da densidade global. A Figura 24 apresenta os resultados estimados pela Eq. 16 e medidos no experimento de calibração. Observa-se uma excelente correlação entre dados medidos

e estimados, com coeficiente de determinação de 0,98.

Os resultados apresentados mostram o enorme potencial do equipamento para estudos de compactação dos solos. Como continuidade deste trabalho, pretende-se aplicar o equipamento e a metodologia desenvolvidos, em outras condições e tipos de solos, possibilitando o entendimento do efeito de outros parâmetros como a textura, matéria orgânica e outros, na resistência à penetração.

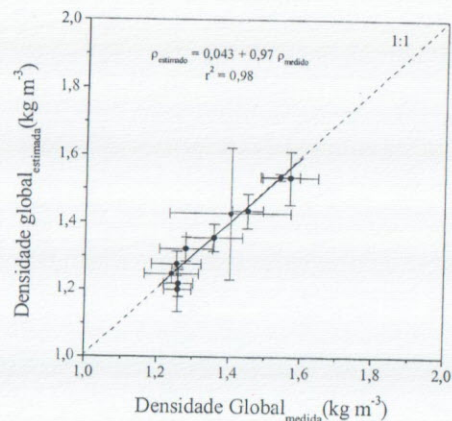


Figura 24. Comparação entre valores da densidade global medidos e estimados (Eq. 16), utilizando-se os dados de RP e  $\theta$  medidos pelo penetrômetro combinado com TDR (VAZ et al., 2001).

### Reflectometria no domínio do tempo – medidas de umidade

A técnica da reflectometria no domínio do tempo (TDR) tem sido mundialmente utilizada para a determinação da umidade e condutividade elétrica dos solos, em substituição às técnicas de moderação de nêutrons e gravimétricas. As principais vantagens da TDR são a não utilização de radiação ionizante, a possibilidade de automação das análises, a multiplexação de diversas sondas num único equipamento e a pouca influência da textura e da densidade do solo na determinação da umidade. No Brasil, a TDR tem sido ainda relativamente pouco utilizada, sendo mais comum o uso das técnicas gravimétricas e da sonda de nêutrons. As principais dificuldades são: o pequeno número de equipamentos disponíveis e a ausência de informações quanto à resposta da TDR nos nossos solos. Os solos altamente intemperizados, com presença de altos teores de óxido de ferro e minerais magnéticos e baixos teores de matéria orgânica, podem influenciar na resposta da TDR.

O princípio da medida da umidade do solo pela técnica da TDR foi pioneiramente introduzido por Davis e Chudobiak (1975) e implementado e validado por Topp et al. (1980). O funcionamento da TDR para a medida da umidade é baseado na medida da velocidade de propagação de ondas eletromagnéticas em uma guia de onda metálica (sonda) inserida no solo. O equipamento mede o tempo de trânsito ( $t$ ) das ondas eletromagnéticas na sonda, o qual é dependente da constante dielétrica do solo ( $\epsilon$ ) através da seguinte equação:

$$t = L\sqrt{\epsilon}/c \dots\dots\dots [17]$$

onde  $L$  (m) é o comprimento da sonda, e  $c$  ( $m s^{-1}$ ) é a velocidade da luz.

A constante dielétrica medida para um solo é uma média ponderada das constantes dielétricas das frações dos componentes do solo, ou seja, das fases sólida, líquida e gasosa. Como a constante dielétrica da água é de aproximadamente 80, do ar 1 e do material sólido (mineral e orgânico) de 3 a 7, uma pequena variação na umidade volumétrica do solo ( $\theta$ ) causará uma mudança considerável da constante dielétrica. Por meio de uma correlação experimental entre a constante dielétrica medida com o TDR e a umidade volumétrica do solo medida por gravimetria, pode-se, portanto, utilizar a técnica de TDR para a determinação da umidade do solo (TOPP et al., 1980).

### Equipamentos testados

Os equipamentos utilizados no teste e validação da técnica de TDR foram os seguintes (Figura 25): Modelo 1502C, da Tektronix (a); Modelo TDR100, da Campbell (b); Modelo Trase, da Soil Moisture (c).

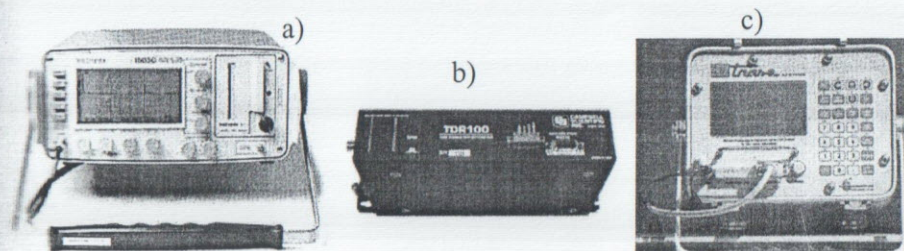


Figura 25. Equipamentos de TDR utilizados nos testes e validação da técnica.

As sondas utilizadas no TDR 1502C e TDR 100 foram confeccionadas com três varetas de aço inox (3 mm de diâmetro e 15 cm de comprimento) com espaçamento de 2 cm (Figura 26a). No caso do TDR Trase, foi utilizada a sonda padrão de duas hastes com 15 cm de comprimento, comercializada pela Campbell (Figura 26b).

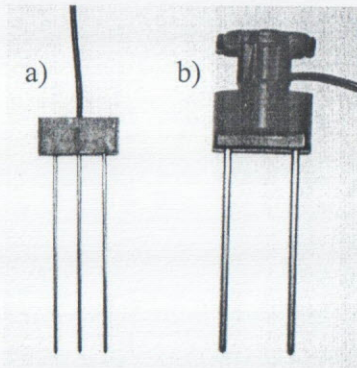


Figura 26. Hastes de TDR utilizadas com os modelos 1502C e TDR-100 (a) e Trase (b).

#### Solos testados

Para avaliação do desempenho dos equipamentos foram estudados 6 solos, descritos a seguir: Gleissolo Melânico, coletado na quadrícula de Araras; Planossolo Háplico, coletado na quadrícula de Guaíra; Luvisolo Crômico, coletado na quadrícula de Marília; Latossolo Vermelho Acriférrico, coletado na quadrícula de Ribeirão Preto; Cambissolo Crômico, coletado na SP-4 e Neossolo Quartzarênico, coletados na quadrícula de Piracicaba.

#### Procedimento de medida

Os três equipamentos utilizam o mesmo princípio da medida do tempo de trânsito,  $t$  (ns), da radiação eletromagnética na sonda metálica e calculam a constante dielétrica do meio onde a haste está inserida ( $\epsilon_{\text{solo}}$ ), por meio da Eq. 17.

Entretanto, o cálculo dos tempos de trânsito em cada equipamento pode variar, em função do software utilizado para identificar as reflexões no início e final da sonda. No caso do TDR 1502C, não existe um software do fabricante e, portanto, foi utilizado o WinTDR99, que é fornecido gratuitamente pelo grupo de Física do Solo, da Utah State University.

EUA e desenvolvido especificamente para uso com o TDR 1502C. Para tanto, foi utilizado um computador do tipo laptop com o software WinTDR99 instalado e conectado com o TDR pela interface serial RS232. O WinTDR99 fornece a constante dielétrica ( $\epsilon_{\text{solo}}$ ), a umidade ( $\theta$ ) através da equação universal de Topp (TOPP et al., 1980).

No caso do TDR 100, existe um software fornecido pelo fabricante, que permite as mesmas determinações mencionadas para o caso do TDR 1502C com o WinTDR99, também pela conexão serial. Para o Trase existe um teclado no próprio equipamento e software para a realização das medidas de  $\epsilon_{\text{solo}}$  e  $\theta$ , dispensando o uso de um computador para a aquisição dos dados.

Os valores de umidade estimados pelos três equipamentos de TDR são comparados e avaliados estatisticamente com os valores de referência de umidade gravimétrica, utilizando-se a relação universal de Topp et al. (1980):  $\theta = -5,3 \times 10^{-2} + 2,92 \times 10^{-2} \epsilon - 5,5 \times 10^{-4} \epsilon^2 + 4,3 \times 10^{-6} \epsilon^3$ , uma equação polinomial de 3º grau obtida com os dados dos seis solos estudados (*poli 3*) e o modelo de fases dado por (DOBSON et al., 1985):

$$\epsilon_{\text{solo}}^{\alpha} = \theta \epsilon_{\text{ag}}^{\alpha} + (1 - \phi) \epsilon_{\text{s}}^{\alpha} + (\phi - \theta) \epsilon_{\text{ar}}^{\alpha} \dots \dots \dots [18]$$

onde  $\epsilon_{\text{ag}}$ ,  $\epsilon_{\text{s}}$  e  $\epsilon_{\text{ar}}$  são as constantes dielétricas da água, parte sólida (partículas + matéria orgânica) e ar, respectivamente,  $\phi$  ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ) a porosidade, e  $\alpha$  um parâmetro que depende da orientação das partículas do solo com relação ao campo magnético aplicado.

A avaliação estatística do erro da medida da umidade será realizada através do erro padrão da estimativa (SPIEGEL, 1985):

$$S = \sqrt{\frac{\sum (Y - Y_{\text{est}})^2}{n}} \dots \dots \dots [19]$$

onde  $Y$  é o valor medido,  $Y_{\text{est}}$  o estimado pela equação utilizada (*Topp, Fases ou Poli 3*), e  $n$  o número de amostras utilizadas.

#### Validação em 6 solos

Os valores médios de densidade, porosidade e intervalos de umidade, obtidos pela utilização do procedimento de preparo de amostras descrito anteriormente, são apresentados na Tabela 6.

Os resultados da constante dielétrica em função da umidade para os 6 solos são apresentados nas Figuras 27a (para os três equipamentos

individualmente e todos os solos em conjunto) e 3.27b, 3.27c e 3.27d (para os solos e equipamentos individualmente).

O ajuste do modelo de fases (parâmetro  $\alpha$ ) foi realizado por mínimos quadrados, utilizando-se a ferramenta *Solver* do *Excel*, da Eq. 18 nos dados de  $\epsilon_{\text{solo}}$  vs  $\theta$  medidos para cada equipamento e  $\epsilon_s = 4$ ,  $\epsilon_{\text{ag}} = 80$  e  $\epsilon_{\text{ar}} = 1$  (Vaz et al., 2001). Os valores de  $\alpha$  obtidos dos ajustes foram: 0,698 (1502 C), 0,664 (TDR 100) e 0,570 (Trase). Para possibilitar a comparação dos erros entre os modelos, utilizou-se o valor médio de  $\alpha=0,650$ , uma vez que os modelos polinomiais de 3º grau de Topp e o obtido com os dados deste trabalho (Poli 3) são independentes do equipamento.

Tabela 6. Propriedades físicas das amostras de solo preparadas para medida com a TDR.

Solo	Local	$\rho_s^*$ (kg m <sup>-3</sup> )		$\phi^*$ m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup>	$\theta$ (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )		n*	$\rho_p^*$ kg m <sup>-3</sup>
		média	DP		mínimo	máximo		
Gleissolo	Araras	0,698	0,042	0,74	0,033	0,507	20	2,65
Planossolo	Guaíra	1,163	0,035	0,58	0,011	0,429	20	2,76
Luvissolo	Marília	1,365	0,035	0,50	0,032	0,404	21	2,72
Latossolo	Rib. Preto	0,925	0,071	0,68	0,013	0,478	21	2,88
Cambissolo	SP-4	1,099	0,054	0,59	0,010	0,456	20	2,70
Neossolo	Piracicaba	1,453	0,041	0,46	0,018	0,337	20	2,67
Média		1,117		0,59				

\*  $\rho_s$  = densidade do solo,  $\phi = (1 - \rho_s / \rho_p) =$  porosidade do solo, n = número de amostras e  $\rho_p$  = densidade das partículas

As equações de ajuste obtidas e utilizadas, com os respectivos parâmetros de ajuste foram:

$$\text{Topp: } \theta = -5,3 \times 10^{-2} + 2,92 \times 10^{-2} \epsilon - 5,5 \times 10^{-4} \epsilon^2 + 4,3 \times 10^{-6} \epsilon^3$$

$$\text{Fases: } \theta = (\epsilon^{0,650} - 1,60) / 16,22$$

$$\text{Poli 3: } \theta = -6,23 \times 10^{-2} + 3,76 \times 10^{-2} \epsilon - 1,1 \times 10^{-3} \epsilon^2 + 1,33 \times 10^{-5} \epsilon^3$$

A Figura 27a mostra que, de um modo geral, há uma boa concordância dos dados experimentais com os três modelos de ajuste. Observando-se os equipamentos e solos individualmente (Fig. 3.27b, 3.27c e 3.27d), nota-se uma pequena diferença na resposta de  $\epsilon_{\text{solo}}$  vs  $\theta$ , principalmente entre os equipamentos. Os resultados do 1502 C e TDR 100 foram muito próximos, mas o Trase apresentou medidas de  $\epsilon_{\text{solo}}$  menores do que as apresentadas pelo 1502C e TDR 100. A Figura 27d mostra como os

dados do Trase desviaram-se da equação de Topp, enquanto que para o 1502C e TDR100 a equação de Topp apresenta um bom ajuste.

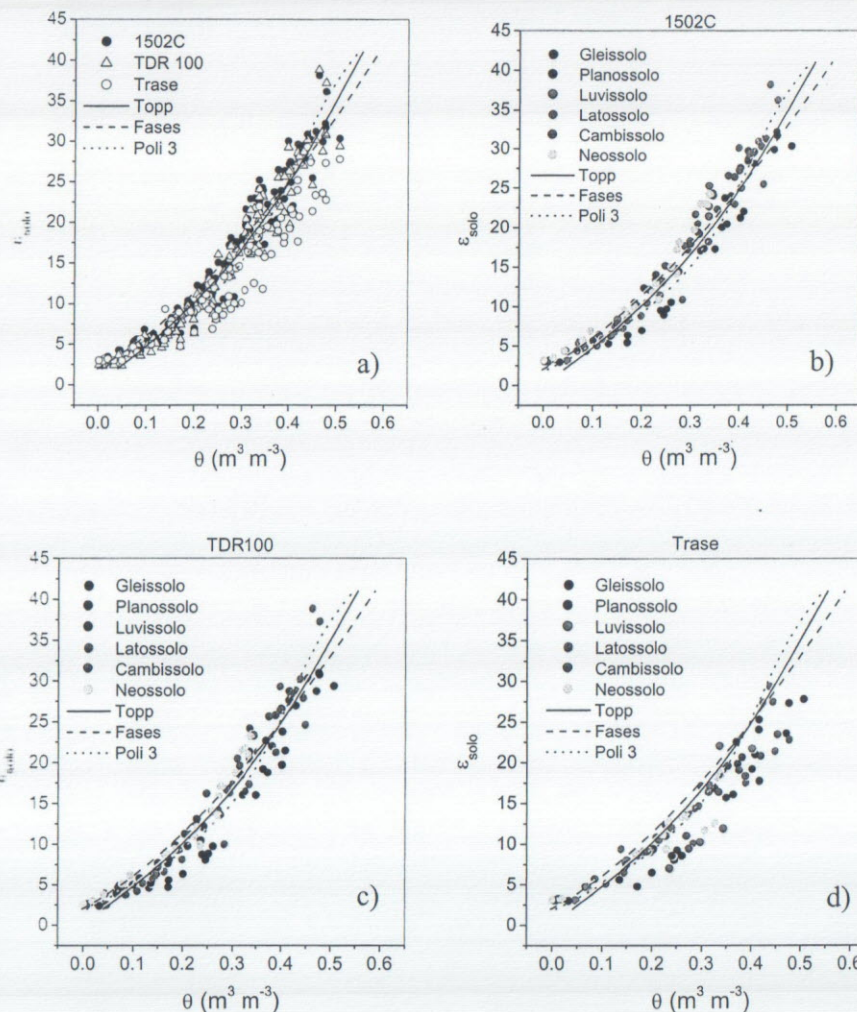


Figura 27. Variação da constante dielétrica medida com o TDR 1502 C (a, b), o TDR 100 (a, c) e o Trase (a, d) em função da umidade para os 6 solos avaliados (VAZ et al., 2003).

Um outro aspecto importante de ser observado é que o Gleissolo apresentou valores de  $\epsilon_{\text{solo}}$  abaixo da equação de Topp, indicando um

comportamento típico de solos orgânicos (teor de matéria orgânica elevada). Também o Neossolo apresentou um pequeno deslocamento para valores acima da curva de Topp. Entretanto, essas diferenças não são, aparentemente, grandes a tal ponto que justifiquem curvas de calibração específicas para cada um dos solos. Para uma avaliação mais detalhada e analítica dos erros na medida da umidade com a técnica da TDR, são apresentados na Tabela 7 os valores do erro padrão da estimativa (Eq. 19) para os três equipamentos, considerando-se os três modelos de ajuste propostos e os solos em conjunto e individualmente.

Observa-se que os valores de S estão em média na faixa de 3 % para o 1502C e TDR 100. Entretanto, para o Trase os valores de S são bem maiores, entre 4 e 6 %, dependendo do modelo da curva de calibração utilizada.

Tabela 7. Erro padrão da estimativa (Eq. 19) obtido com os três modelos de ajuste.

Solos	Erro padrão da estimativa (S, m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )								
	1502 C			TDR 100			Trase		
	Topp	Fases	Poli 3	Topp	Fases	Poli 3	Topp	Fases	Poli 3
todos	0,032	0,035	0,031	0,032	0,041	0,030	0,050	0,059	0,042
gleissolo	0,040	0,054	0,036	0,051	0,066	0,048	0,066	0,080	0,060
planossolo	0,022	0,030	0,025	0,030	0,029	0,029	0,041	0,051	0,033
luvisolo	0,031	0,032	0,029	0,026	0,030	0,021	0,049	0,057	0,041
latossolo	0,036	0,033	0,031	0,038	0,050	0,033	0,050	0,057	0,044
cambissolo	0,021	0,026	0,022	0,030	0,029	0,022	0,047	0,057	0,037
neossolo	0,038	0,028	0,041	0,028	0,025	0,029	0,041	0,049	0,031

Outra observação importante é que o Gleissolo apresentou um erro padrão da estimativa, de cerca de 5 %, ou seja, bem maior que a média dos outros solos que foi de 3 %. Assim, esse deve ser o erro considerado para o Gleissolo quando da adoção de uma equação de calibração geral. Caso o usuário necessite de precisão maior, calibrações específicas para este solo devem ser utilizadas.

#### Considerações sobre os resultados da validação

O TDR 100 e tektronix 1502C apresentaram uma precisão de aproximadamente 3% para a determinação da umidade para os solos estudados. Já no caso do Trase o erro obtido variou de 4 a 6 %, indicando que os dois primeiros equipamentos possuem precisão maior, quando se

utilizaram as calibrações para os três modelos de ajuste. Entretanto, pode-se obter uma precisão maior na determinação da umidade com o Trase, utilizando-se calibrações específicas para o equipamento em particular, uma vez que as equações de ajuste obtidas (Fases e Poli 3) consideram o resultado médio dos três equipamentos.

Comparando-se os resultados obtidos neste trabalho com solos brasileiros, com outros dos EUA, Canadá e Europa, pode-se afirmar que não existem diferenças significativas nas respostas. Assim, a técnica de TDR pode ser aplicada em solos tropicais brasileiros, com a mesma precisão daquelas já descritas para solos de regiões temperadas.

#### Reflectometria no domínio do tempo – medidas de condutividade elétrica volumétrica

A técnica da Reflectometria no Domínio do Tempo (TDR) permite a determinação da umidade ( $\theta$ ) e da condutividade elétrica volumétrica ( $CE_v$ ) dos solos. Esta última é função da quantidade de sais solúveis na amostra, mas também depende da umidade do solo. A condutividade elétrica determinada no extrato de saturação ( $CE$ ) é uma medida da salinidade dos solos e é realizada com um condutímetro e eletrodo em uma amostra extraída da pasta de saturação (EMBRAPA, 1997). Diversos autores têm correlacionado a medida de  $CE_v$  obtida com a TDR com a medida padrão de  $CE$  (RHOADES et al., 1976; MUALEN e FIEDMAN, 1991). Entretanto, os modelos consideram uma relação linear entre  $CE_v$  e  $CE$ , o que na prática só é verdadeiro para valores de  $CE$  menores que 1 dS m<sup>-1</sup>, segundo Rhoades et al. (1989). Acima desse valor observa-se um comportamento não linear tipo potência, com expoente maior que 1. Assim, de acordo com Nissen et al. (1998), existe ainda a necessidade de mais estudos para um modelamento e entendimento completo da dependência entre  $CE$ ,  $CE_v$  e  $\theta$ . Neste trabalho, é proposta a utilização de um modelo não-linear do tipo de potência ( $CE_v = a CE^b$ ) para a determinação da  $CE$  pela TDR.

Os equipamentos de TDR utilizados no estudo foram o TDR-100 da Campbell e o 1502C da Tektronix, com 13 solos de diferentes texturas. A Tabela 8 apresenta os valores da condutividade elétrica no extrato de saturação, determinado segundo o procedimento descrito em Embrapa (1997), onde os valores medidos variaram de 0,1 a aproximadamente 6 dS m<sup>-1</sup>.

Tabela 8. Valores médios e desvios padrão (DP) das medidas de CE no extrato, pelo método da Embrapa (1997), para 13 solos de diferentes texturas (n = número de determinações).

Solo / Local	CE (dSm <sup>-1</sup> )		Solo	CE (dSm <sup>-1</sup> )	
	média	DP		média	DP
Gleissolo - Araras	0,715	0,116	Neossolo - São Carlos	1,48	0,55
Planossolo - Guaíra	0,424	0,118	Nitossolo - São Carlos	5,83	1,16
Luvissolo - Marília	0,422	0,037	LVAd - São Carlos	1,87	0,03
Latossolo - Rib. Preto	0,382	0,040	LVd - São Carlos	2,21	0,25
Cambissolo - rod. SP 4	0,245	0,049	LVef - São Carlos	3,08	0,10
Neossolo - Piracicaba	0,246	0,014	PV-A - São Carlos	2,21	0,19
			Cambissolo - Peruíbe	0,118	0,003

Amostras de cada um dos solos com diferentes umidades foram preparadas em cilindros de PVC (diâmetro de 8,65 cm e altura de 18 cm) e uma sonda linear de três hastas (15 cm de comprimento) foi inserida na amostra e determinados os valores de CE<sub>v</sub> e θ. As Figuras 28 e 29 apresentam os resultados da variação de CE<sub>v</sub> com θ para todos os solos.

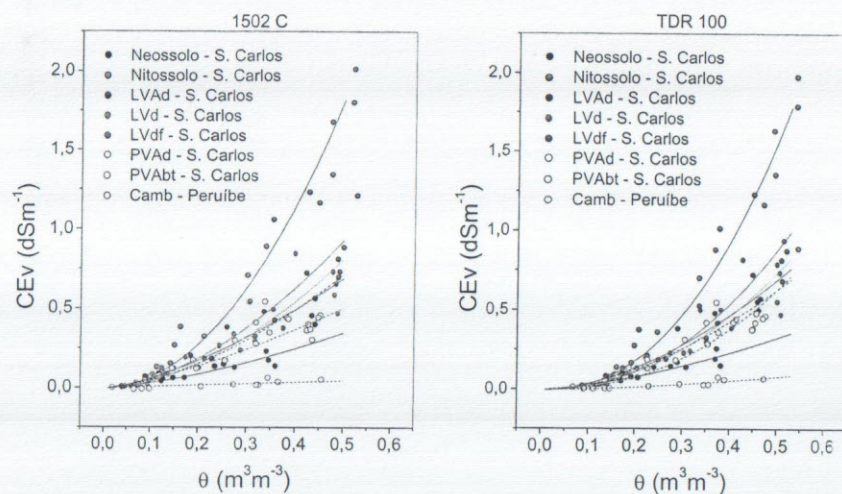


Figura 28. Variação de CE<sub>v</sub> com θ pela TDR (2 equipamentos) para um conjunto de 7 solos (VAZ et al., 2005b).

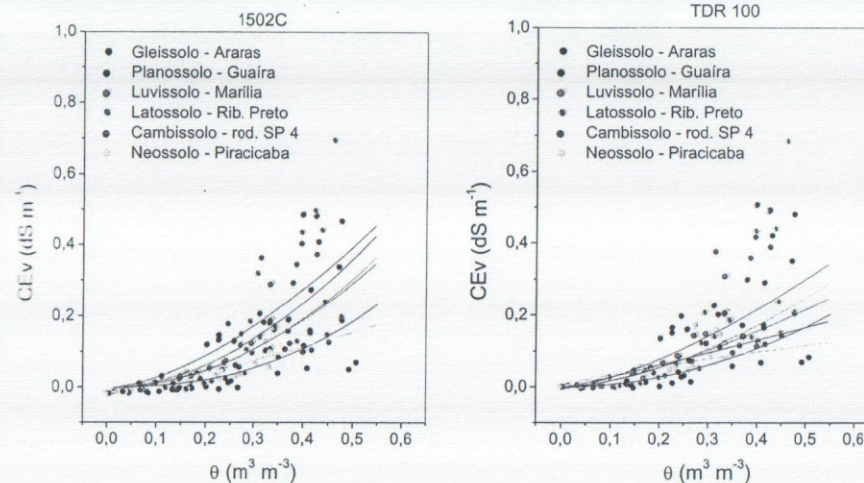


Figura 29. Variação de CE<sub>v</sub> com θ pela TDR (2 equipamentos) para um conjunto de 6 solos (VAZ et al., 2005b).

Observa-se, nas Figuras 28 e 29, a dependência não linear mencionada. A Tabela 9 apresenta os parâmetros de ajuste da função  $CE_v = a \theta^n$  por mínimos quadrados.

Tabela 9. Parâmetros de ajuste da equação  $CE_v = a \theta^n$  para os dados das Figuras 28 e 29.

solo	a		n		r <sup>2</sup>	
	1502 C	TDR 100	1502 C	TDR 100	1502 C	TDR 100
Neossolo - São Carlos	0,990	0,953	1,516	1,554	0,964	0,953
Nitossolo - São Carlos	7,639	7,939	2,070	2,349	0,937	0,933
LVAd - São Carlos	1,967	2,340	1,502	1,752	0,938	0,953
LVd - São Carlos	2,845	3,091	1,802	2,074	0,915	0,940
LVef - São Carlos	3,161	4,032	1,757	2,194	0,964	0,945
PV-A - São Carlos	2,333	2,119	1,700	1,753	0,962	0,945
PVbt - São Carlos	1,344	3,038	1,411	2,268	0,959	0,962
Cambissolo - S. Carlos	0,099	0,668	0,983	1,651	0,786	0,936
Gleissolo - Araras	0,981	0,658	2,398	1,975	0,793	0,579
Planossolo - Guaíra	1,202	0,823	1,613	1,460	0,932	0,710
Luvissolo - Marília	1,325	0,353	1,883	1,067	0,936	0,710
Latossolo - Rib. Preto	1,244	0,779	2,039	1,646	0,782	0,640
Cambissolo - rod. SP 4	1,109	0,589	1,928	1,443	0,822	0,587
Neossolo - Piracicaba	0,406	0,199	1,382	0,755	0,952	0,804



O parâmetro “a” fornece diretamente o valor da condutividade elétrica do extrato saturado, pois quando  $\theta$  for 1,  $CE_v$  será igual a “a” e também igual a CE. O parâmetro “n” indica o grau de linearidade do sistema. Observa-se pelos dados da Tabela 9, que existe uma tendência de aumento de “a” com “n”. A Figura 30a mostra essa dependência considerando os dois equipamentos. Para valores de “a” baixos (baixas CE) “n” tende a 1, ou seja, uma função linear, e para valores de “a” altos “n” tende a 2, ou seja, uma função quadrática. A Figura 30b mostra a correlação entre os valores de CE obtidos da medida no extrato saturado e pelo TDR por meio do ajuste da função de potência, ou seja, com o valor de “a”. Observa-se uma boa coerência entre os valores da condutividade no extrato estimados pela TDR e medidos com o condutímetro (Fig. 3.30b).

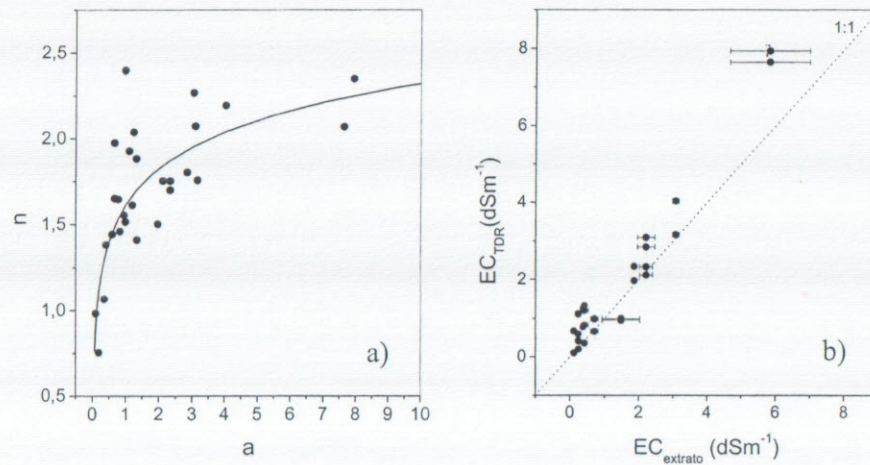


Figura 30. Correlação entre os parâmetros n e a obtidos pelo ajuste da equação  $CE_v = a\theta^n$  (a) e entre a condutividade elétrica do extrato saturado (CE) e a condutividade volumétrica medida pelo TDR (b) (VAZ et al., 2005b).

Apesar de esse procedimento possibilitar a estimativa da CE no extrato com a TDR, o método não é muito prático, uma vez que há a necessidade de se medir a  $CE_v$  em amostras com diferentes umidades para possibilitar um bom ajuste da equação exponencial. Assim, procurou-se estabelecer um procedimento mais prático que pudesse ser aplicado em laboratório e campo. Com esse procedimento, definiu-se um índice, ICE, como sendo a razão entre  $CE_v$  e a umidade ( $CE_v/\theta$ ). Observou-se uma tendência de

estabilização desse índice para valores de  $\theta$  maiores que  $0,25 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ . Por isso, fez-se uma calibração entre ICE e CE, conforme apresentado na Figura 31. Com ela pode-se estimar a CE no extrato com a TDR, realizando-se medidas em campo ou laboratório para um dado solo, considerando-se a restrição de  $\theta > 0,25 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  e determinando-se ICE ( $CE_v/\theta$ ). O erro padrão da estimativa obtido utilizando-se tal procedimento foi de  $0,22 \text{ dS m}^{-1}$ , para a estimativa de CE no extrato.

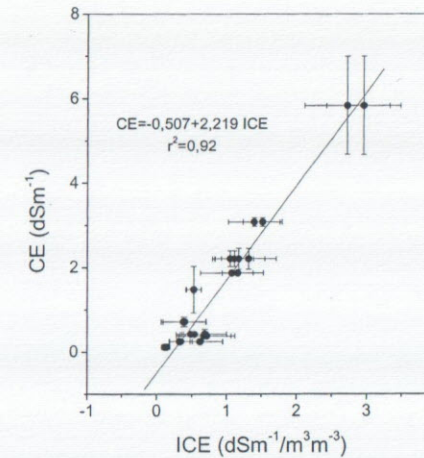


Figura 31. Correlação entre o índice ICE (TDR) e CE no extrato (VAZ et al., 2005b).

### Micropenetrômetro: instrumentação para a tomada de decisão na avaliação da resistência do solo à penetração de raízes

Um instrumento para auxílio à tomada de decisão em processos que envolvem avaliações da resistência do solo à penetração de raízes é descrito neste tópico. Seu desenvolvimento fundamenta-se na concepção de uma nova ferramenta instrumental avançada, que viabiliza, em tempo quase real, informações para análise da variabilidade espacial da resistência do solo à penetração de raízes, tanto para área como para perfil, devido aos processos de compactação natural ou artificial do solo. Ensaios para a medida da resistência do solo à penetração de raízes podem ser realizados tanto em ambiente laboratorial como diretamente em campo agrícola. Para o desenvolvimento, utilizou-se o enfoque da instrumentação inteligente, bem como uma microssonda (ângulo de cone de  $30^\circ$ , diâmetro de base de 1,6 mm e comprimento total de 30 mm) monitorada por célula de carga. Com esse sistema, as medidas de

resistência do solo à penetração de raízes podem ser realizadas até um limite de  $(49,03 \pm 0,07)$  kgf com resolução de 1,57kgf. Adicionalmente, a versatilidade do sistema é verificada para a coleta de dados e interpretação da resistência do solo à penetração de raízes, uma vez que podem ser apresentados na forma de tabelas, gráficos unidimensionais, mapas bidimensionais e mapas tridimensionais. Desta maneira, o sistema possibilita ao usuário uma rápida interpretação sobre o estado de agregação do solo em áreas de cultivo agrícolas.

### *Compactação do solo*

A compactação dos solos devida ao uso de máquinas e implementos agrícolas cada vez maiores e mais pesados tem efeito cumulativo. Portanto, após vários anos de manejo numa determinada área, poderá surgir uma compactação nos solos que afetará a dinâmica da água e de nutrientes, além de aumentar a obstrução ao desenvolvimento radicular e provocar aeração anormal (LINS e SILVA, 1999).

Como efeitos nocivos da compactação, temos a diminuição da altura das plantas, sintomas de deficiências nutricionais, susceptibilidade a períodos secos de curta duração, formação de camada impermeável, dificultando a infiltração da água e a aeração do solo, e dificuldade para o desenvolvimento vertical das raízes.

Quantificar e caracterizar a compactação é um processo difícil, porém importante para indicar ao agricultor o momento em que se deve atuar com algum tipo de medida de correção no solo. Para essa caracterização e quantificação são usadas as técnicas de penetrometria com penetrômetros dinâmicos de impacto e estáticos que apresentam velocidades de penetração constantes.

A resistência do solo à penetração de raízes depende de diversos parâmetros como a densidade do solo ( $\rho$ ), o teor de umidade ( $\theta$ ), a matéria orgânica, a textura, a estrutura e outros. Entretanto, a densidade do solo e o teor de umidade do solo são os parâmetros mais relevantes que interferem em maior escala na resistência dos solos à penetração de raízes.

A resistência à deformação do solo, à penetração das raízes é freqüentemente inferida pela resistência à deformação do solo avaliada com penetrômetros.

Mckyes define compactação como um aumento da densidade do

solo, a partir de um rearranjo da disposição das partículas sólidas do solo, implicando na redução da porosidade (MCKYES, 1985). A compactação pode ter origens em duas principais causas:

a) naturais, devido ao impacto das gotas de chuva, umidificação-secagem e tensão interna da água;

b) artificiais, devido às forças aplicadas ao solo por animais, máquinas agrícolas ou outros meios.

A resistência do solo à penetração de raízes é um indicador indireto da sua compactação, o que não é obtido por medição física direta sob qualquer condição do solo. Um solo está agronomicamente compactado quando a proporção do volume total de poros para o volume do solo é inadequada ao desenvolvimento de uma cultura ou manejo eficiente do campo. A porosidade é o termo mais significativo para se usar na discussão da compactação de solos, pois esta fornece uma descrição direta da proporção de volume do solo disponível para a água e ar, necessários às raízes das plantas (MANTOVANI, 1987).

Silva e colaboradores concluíram que, em umidades mais elevadas do solo, há uma pequena variação da sua resistência à penetração respondendo por uma faixa maior de variação da sua densidade. Para umidades menores, há uma maior variação da resistência do solo à penetração de raízes respondendo por uma faixa menor de variação da sua densidade (LINS E SILVA *et al.*, 1995) Para Rolston e colaboradores, a variação da força nas crostas superficiais pode alterar os processos de infiltração, difusão de gases, evaporação e germinação das sementes (ROLSTON *et al.*, 1991).

Visando minimizar essas dificuldades, têm sido desenvolvidos equipamentos de penetrometria combinados com sensores de umidade para a determinação simultânea da resistência do solo à penetração e umidade ao longo do seu perfil (YOUNG *et al.*, 1998; ADAMS *et al.*, 1998; NEWMAN e HUMMEL, 1999; VAZ *et al.*, 2001; VAZ e HOPMANS, 2001). Dessa forma, dados de resistência do solo à penetração obtidos em diferentes condições de umidades poderão ser normalizados para uma umidade padrão, colaborando nos processos de determinação da sua compactação.

### *Tipos de penetrômetros, penetrógrafos e micropenetrômetros*

Os primeiros penetrômetros datam de 1948 segundo trabalhos de Gill e

Vanderberg, e Perumpal, os quais consistiam em uma haste graduada de 91,4 cm de comprimento e diâmetro de 0,95 cm, tendo em uma de suas extremidades um cone circular de 30° com uma área da base de 1,61 cm<sup>2</sup>. O esforço para penetrar o cone no solo é medido por uma mola calibrada, cuja deformação aciona um ponteiro e um visor, indicando a força por unidade de área, sendo feita a leitura a cada instante, observando a profundidade do cone na graduação da haste (GILL e VANDERBERG, 1967; PERUMPAL, 1987).

Semelhante ao penetrômetro desenvolvido por Gill e Vanderberg, Carter e Hendrick adaptaram ao penetrômetro uma caneta que registrava a força de penetração em um papel, reduzindo erros de leituras e exigindo menos homem-hora de trabalho no campo (CARTER, 1967; HENDRICK, 1969).

Prather e colaboradores adaptaram ao sistema um registrador X-Y, para registro da força de penetração do penetrômetro, onde a força era medida por meio de uma célula de carga e a profundidade por meio de um potenciômetro de precisão, facilitando o sistema ser manuseado por uma única pessoa (PRATHER et al., 1970).

Williford e colaboradores construiriam um sistema adaptado em trator para medidas em campo com célula de carga para a medida de força, potenciômetro de precisão para medida de profundidade e registrador X-Y para armazenar os dados. O sistema era impulsionado para dentro do solo por meio de um cilindro hidráulico (WILLIFORD et al., 1972).

A utilização de coletores de dados eletrônicos para armazenar os dados de força e de profundidade de um penetrômetro foi empregada por Balastreire e colaboradores, sendo, depois de lidos, gravados pelo coletor por um computador que apresentava os resultados em forma de planilha eletrônica para serem processados e analisados (BALASTREIRE e AMARAL, 1994).

Medidas de força da crosta do solo foram feitas utilizando-se o penetrômetro em laboratório por Taylor e Callebaut, e respectivos colaboradores, que desenvolveram um sistema elétrico com formato de agulha que penetrava e fazia as medidas de força na superfície do solo e avaliava os fatores que afetavam a germinação das sementes (TAYLOR et al., 1966; CALLEBAUT et al., 1985).

Atualmente têm-se desenvolvido vários sistemas de penetrômetro com a finalidade de auxiliar e facilitar a medida da força de penetração

do cone no solo, utilizando-se vários tipos de tecnologias existentes para a automatização do sistema.

Assim é apresentado neste tópico o desenvolvimento de um instrumento para auxiliar a tomada de decisão em processos que envolvam avaliações da resistência do solo à penetração de raízes.

As medidas são viabilizadas tanto em área como em perfil de solo e fornecem, em tempo quase real, informações sobre a resistência do solo à penetração de raízes em escala milimétrica. Resultados podem ser apresentados sob forma de tabelas, gráficos unidimensionais, mapas bidimensionais e mapas tridimensionais.

O equipamento desenvolvido possibilita a obtenção de medidas pontuais e mapas bidimensionais da resistência à penetração numa escala submilimétrica.

#### *Descrição do instrumento de medida*

O sistema é composto por um módulo mecânico, módulo automatizado microprocessado e um computador central responsável pelo gerenciamento e interface com o usuário, conforme ilustrado na Figura 32.

A interface com o usuário é feita por um programa computacional, desenvolvido para realizar as seguintes funções: comunicação entre o sistema de controle e aquisição de dados e o computador central para a realização de determinadas tarefas; recebimento dos dados coletados das medidas de resistência do solo à penetração e organização deles em forma de um banco de dados para uso futuro.

A interpretação dos dados é fornecida ao usuário em forma de um relatório composto de tabela e gráfico das medidas em tempo quase real, para auxílio à tomada de decisão.

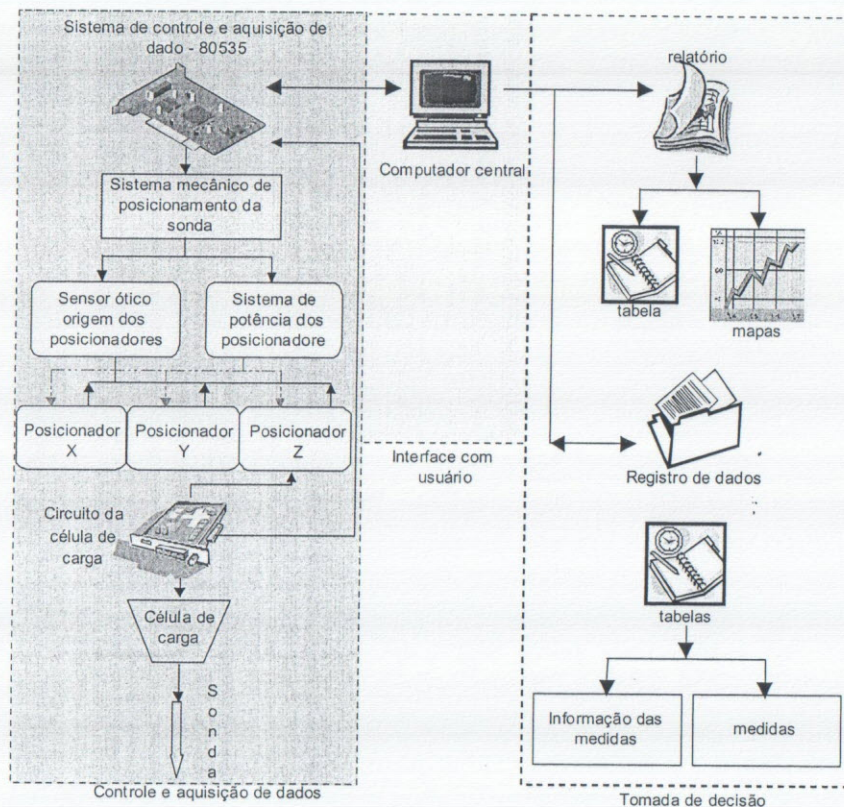


Figura 32. Diagrama de bloco geral do sistema de medida da resistência do solo à penetração (RABELLO, 2003).

#### Módulo mecânico

O diagrama de bloco do módulo mecânico, observável na Figura 33, é composto por uma mesa XYZ para localização espacial do sensor de medida de resistência mecânica à penetração no solo.

A mesa XYZ é sustentada por fusos e guias de deslocamento localizados em um suporte sobre uma estrutura de apoio. Ela possui dois ajustes de posição: um manual, para localização do sensor somente na direção do eixo X, e um automático que a localiza em qualquer coordenada dentro dos limites dos eixos.

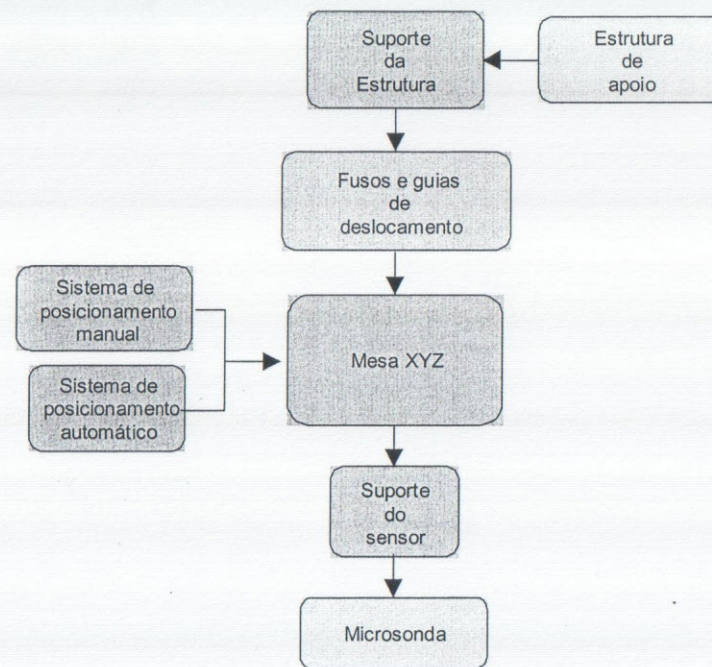


Figura 33. Diagrama de bloco da parte mecânica do sistema de medida da resistência do solo à penetração de raízes (RABELLO, 2003).

O suporte da estrutura é feito de alumínio, composto de uma armação retangular vazada, de dimensões 1,13 m por 0,52 m, composta por dois perfilados em forma de U, com as dimensões 1,016 m x 0,127 m x 0,0635 m por 0,109 m de comprimento. A união desses dois perfilados é feita por duas chapas de tamanho 0,52 m x 0,12 m x 0,02 m. Toda a suspensão é sustentada por três pés ajustáveis, dois dos quais são localizados em cada extremidade da armação e um centralizado no lado oposto aos dois, para possibilitar o nivelamento de toda a estrutura.

No interior da estrutura de suporte, foi montada de forma transversal uma base, indicada na Figura 33 como Mesa XYZ, também feita de alumínio, de dimensões 0,50 m x 0,15 m x 0,075 m. É localizada no interior da armação metálica, sustentada por dois eixos retificados de diâmetro igual a 0,02 m.

No centro das chapas de união das barras do suporte da estrutura mecânica do sistema, passando também pelo centro do sistema de

posicionamento da microsonda, é montado um fuso de esfera laminado de diâmetro igual a  $0,018\text{ m}$  e passo de  $8 \times 10^{-3}\text{ m}$ . O movimento do sistema de posicionamento da microsonda é feito por este fuso através de uma porca de esfera de  $8 \times 10^{-3}\text{ m}$ , localizada no centro do sistema.

O movimento do sistema de posicionamento da microsonda, na direção do fuso de esfera, é possível através de um motor de passo localizado em uma das extremidades desse fuso. Esse movimento é correlacionado com o eixo X, com incremento/decremento de  $40\text{ }\mu\text{m}$  por passo do motor.

Na parte inferior do sistema de posicionamento da microsonda, é montado todo o sistema para o deslocamento Y e Z da microsonda. O movimento na direção Y é feito sobre um fuso de esfera laminado de passo  $5 \times 10^{-3}\text{ m}$  e diâmetro igual a  $14 \times 10^{-3}\text{ m}$ , cobrindo toda a extensão inferior do sistema de posicionamento. O deslocamento através do fuso é realizado por meio de um porca de esfera de passo  $5 \times 10^{-3}\text{ m}$ , fixada em outra base, que sustenta o sistema de deslocamento do eixo Z.

Fixada ao carrinho de movimento do eixo Y, está uma terceira base, que serve para a sustentação de todo o sistema de movimento da microsonda, montada na vertical.

O sistema de movimento da microsonda é composto de dois tubos de alumínio de diâmetros diferentes, um interno de  $50 \times 10^{-3}\text{ m}$  de diâmetro e outro externo de  $60 \times 10^{-3}\text{ m}$  de diâmetro, de forma que o interno possa se movimentar dentro do externo tipo telescópio. O movimento também é feito por meio de fuso de esfera.

Na extremidade oposta, está montado o conjunto de medida de força composto por uma célula de carga, pela microsonda e circuitos de alimentação e pelo condicionamento do sinal da célula de carga.

#### *Microsonda*

O desenvolvimento da microsonda foi fundamentado na norma ASAE R313.1. A microsonda não atua de forma contínua, realizando um total de 66 medidas. As 40 primeiras são com incremento de  $0,1\text{ mm}$  e as 20 restantes com incremento de  $1\text{ mm}$ , ou seja, a cada medida o sistema pára e faz-se a sua leitura.

A microsonda foi desenvolvida a partir de um bastonete de tungstênio de diâmetro  $1,6 \times 10^{-3}\text{ m}$  por  $0,2\text{ m}$  de comprimento, com corpo rebaixado logo acima da ponta e o cone possui ângulo interno de  $30^\circ$ , altura de  $2,98 \times 10^{-3}\text{ m}$  e diâmetro de base igual a  $1,6 \times 10^{-3}\text{ m}$ .

Nas Figuras 34 e 35 são ilustrados o sistema montado e o conjunto de medida com a célula de carga e microsonda.

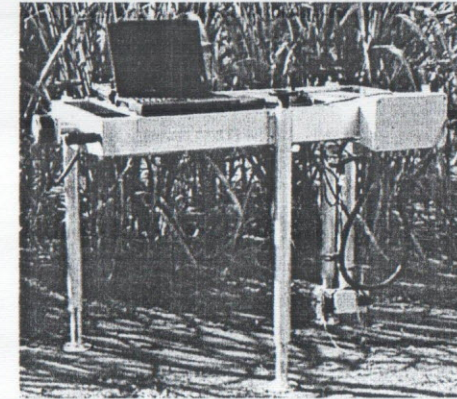


Figura 34. Foto do instrumento para o mapeamento da resistência do solo à penetração de raízes (RABELLO, 2003).

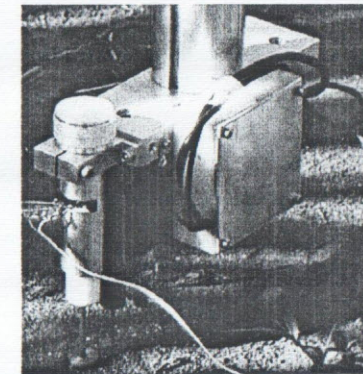


Figura 35. Foto do conjunto de medida de força do instrumento para o mapeamento da resistência do solo à penetração de raízes (RABELLO, 2003).

#### *Módulo eletrônico*

Na Figura 36, é ilustrado o diagrama em blocos do sistema eletrônico, o qual é composto basicamente de uma unidade central microprocessada com o microcontrolador 80535; uma unidade de circuitos de potência para alimentação e conversão de sinais para os motores de passo e alimentação de tensão em geral; sistemas de posicionamento, compostos pelos motores de passo; célula de carga; circuito condicionador de sinal

elétrico da célula de carga e um computador central, responsável pela interface usuário e sistema.

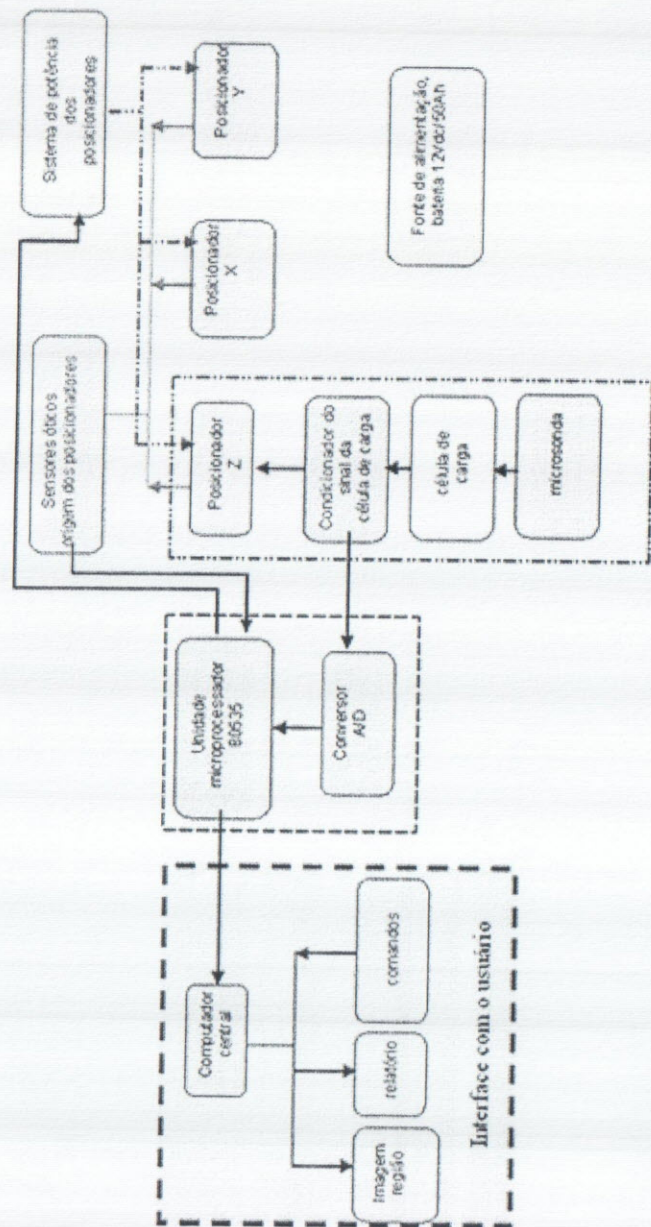


Figura 36. Diagrama de blocos do sistema eletrônico do instrumento de medida da resistência do solo à penetração de raízes (RABELLO, 2003)

### Medida de resistência do solo à penetração de raízes em campo

As medidas foram realizadas em uma área selecionada no campo experimental da Embrapa Pecuária Sudeste, São Carlos, SP, próxima a uma plantação de cana-de-açúcar, tendo as seguintes coordenadas geofísicas (obtidas com GPS): latitude sul 21°57'2,581336" e longitude oeste 47°50'50,7862". O solo da região é do tipo *Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico*, apresentando textura média, fase cerradão tropical subcadicofólico. A coleta de dados foi realizada dentro de uma área de 0,27 m x 0,27 m, com variação de 0,15 m entre elas. As coordenadas de partida fornecidas ao sistema são as indicadas na Tabela 10.

Tabela 10. Coordenadas para a medida de resistência do solo.

Posição inicial		Posição final		Incremento	
X (mm)	Y (mm)	X (mm)	Y (mm)	X (mm)	Y (mm)
0	0	270	270	15	15

O número de dados gerados com essa base de coordenadas corresponde a uma matriz de 19 x 19 pontos por 66 níveis de profundidade, o que levou a um total de 23826 registros. Na Figura 37, é mostrado o resultado de uma medida para a coordenada (120, 240), pelo programa computacional de comunicação homem/máquina.

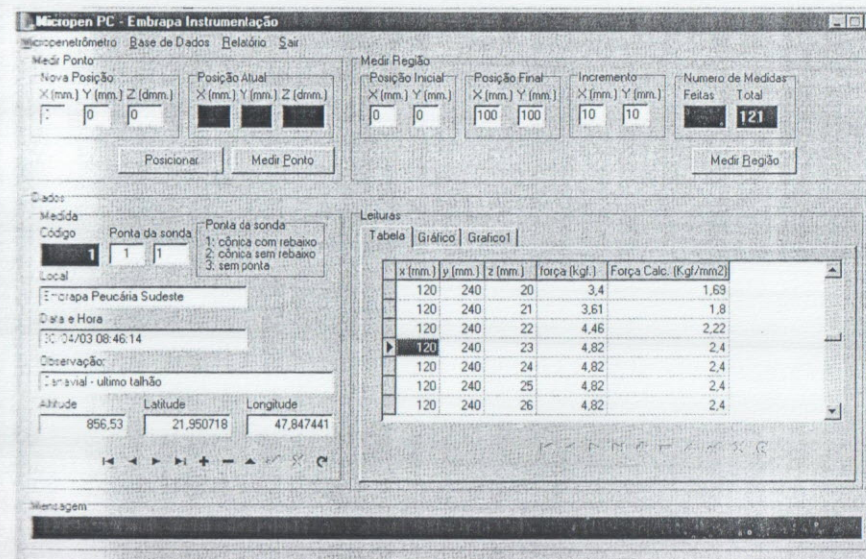


Figura 37. Ilustração de parte dos resultados de coleta de campo, com medidas de resistência do solo à penetração de raízes (RABELLO, 2003).

Com o objetivo de caracterizar as medidas de campo, bem como devido ao grande número de dados, ilustra-se na Figura 38 a variação de resistência do solo à penetração de raízes para a coordenada X=255 e Y=105, em função da profundidade Z, entre de 0 a 30 mm.

Observa-se na Figura 38, para alguns pontos de profundidade, o valor igual a 0,0 kgf. Isto é devido ao fato da microsonda encontrar regiões de vazios no interior da região de medida, o que ocorre dada a presença de rachaduras internas, ou buracos deixados por materiais como raízes decompostas ou formigueiros, ou, ainda, outras espécies de insetos ou fauna, ou mesmo poros naturais.

A seqüência de mapas bidimensionais gerados no ensaio é observada na Tabela 11. No experimento, a partir da profundidade z=5,0 mm, observa-se o início da formação de uma área de resistência ao avanço de microsonda, o que vale também o seria para as raízes de plantas.

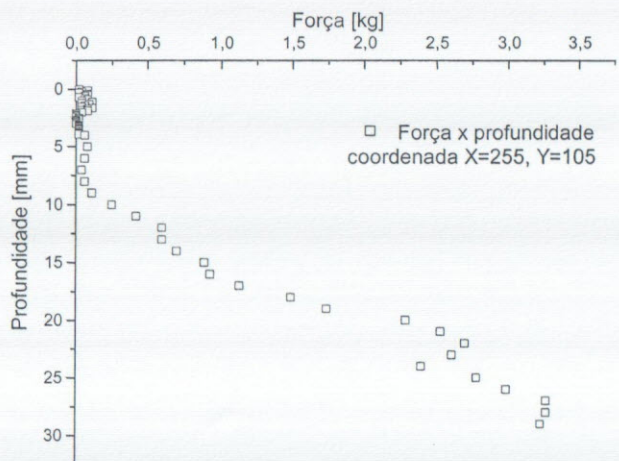
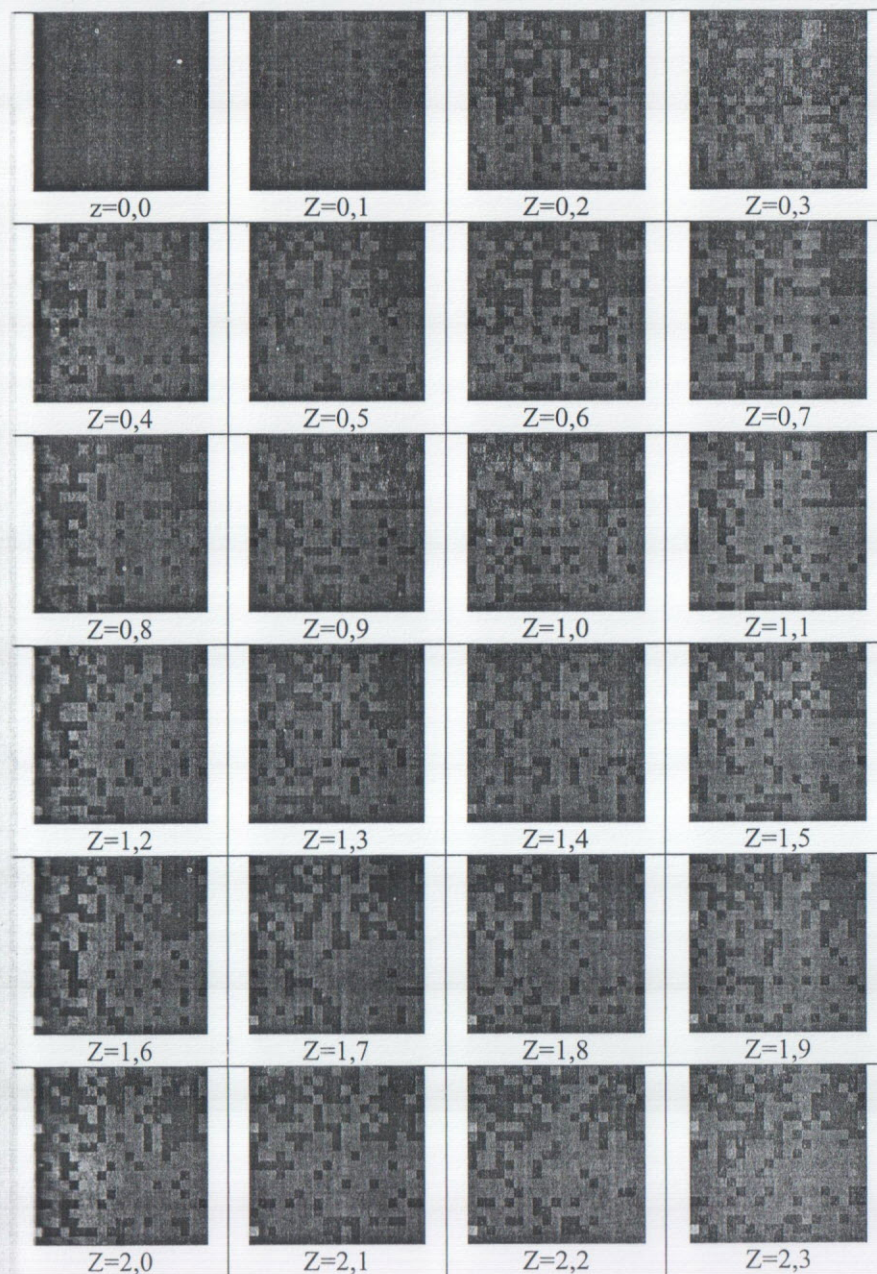
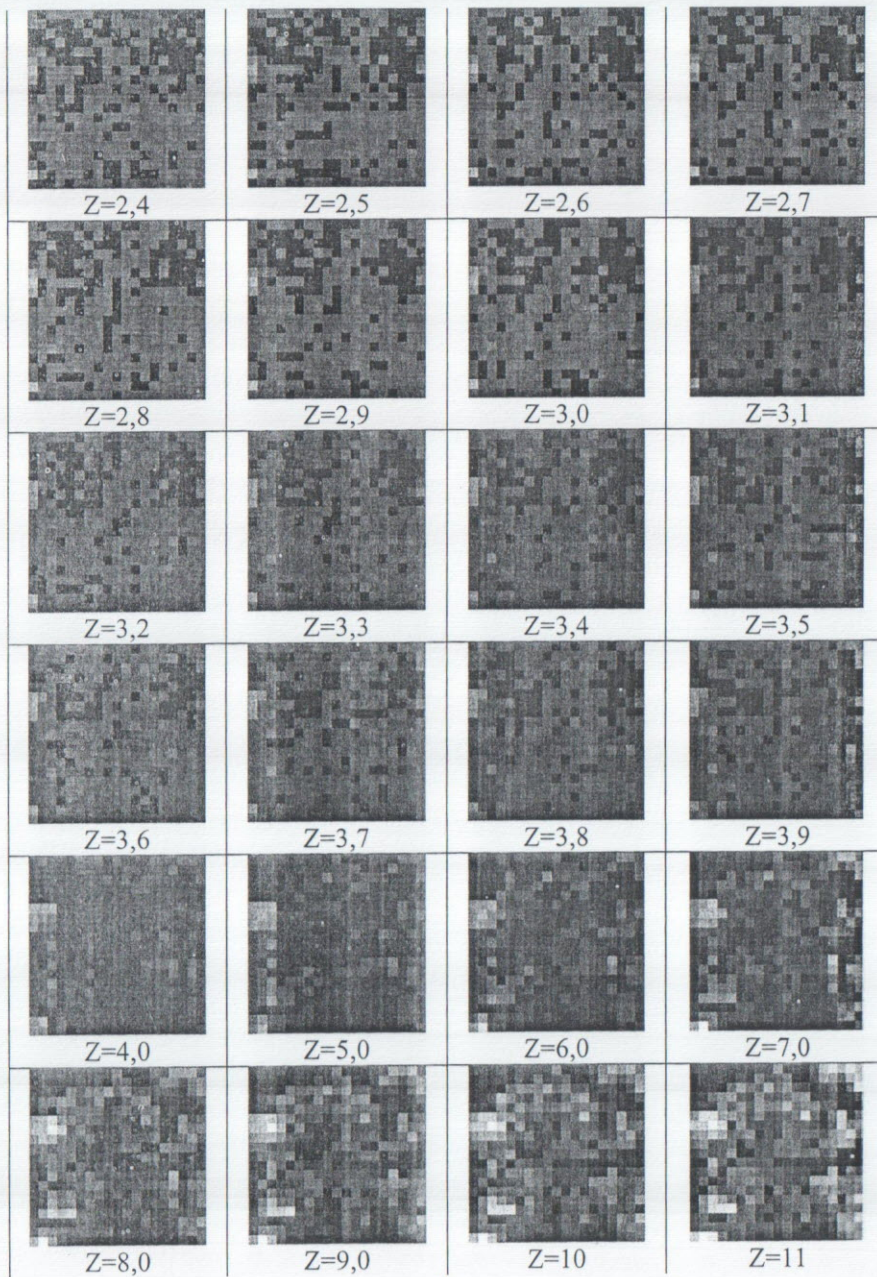


Figura 38. Variação da resistência do solo à penetração de raízes em função da profundidade Z, para as coordenadas X=255 e Y=105 (RABELLO, 2003).

O solo onde foram feitas as medidas do experimento de campo possui características de densidade de acordo com sua profundidade, conforme as apresentadas na Tabela 12. A densidade da amostra de solo foi medida utilizando-se um sistema de atenuação de raios gama (VAZ et al., 1992).

Tabela 11. Seqüência de mapas bidimensionais das medidas de resistência do solo à penetração para os dados coletados em campo, no intervalo de profundidade Z= 0 a 29 mm.





A informação volumétrica da resistência do solo à penetração de raízes obtida no ensaio de campo a partir dos mapas bidimensionais, com seus cortes transversal, coronal, sagital é vista na Figura 39. As Figuras 39, 41 e 42 ilustram situações distintas, da resistência do solo à penetração de raízes, de acordo com a profundidade em que se localizam as regiões.

Na Figura 40, é apresentada a região do experimento de campo onde há alta resistência do solo à penetração de raízes, ou seja, faixa de 45,11 kgf a 49,01 kgf.



Na Figura 41, é visualizada a região onde houve a ocorrência de médios valores de resistência do solo à penetração de raízes, ou seja, na faixa de 22,55 kgf a 25,49 kgf.

Na Figura 42, visualiza-se a região do experimento onde ocorreu baixa resistência do solo à penetração de raízes, ou seja, na faixa de 0,58 kgf a 3,04 kgf. As regiões analisadas foram selecionadas com o uso de um filtro *threshold*, cujo ajuste de limiar pode ser selecionado pelo usuário.

Tabela 12. Densidade em função da profundidade do solo de medida.

Posição(cm)	Densidade(g cm <sup>-3</sup> )
0,0	0,979
0,5	1,194
1,0	1,287
1,5	1,256
2,0	1,258
2,5	1,212
3,0	1,176
3,5	1,273
4,0	1,223
4,5	1,224

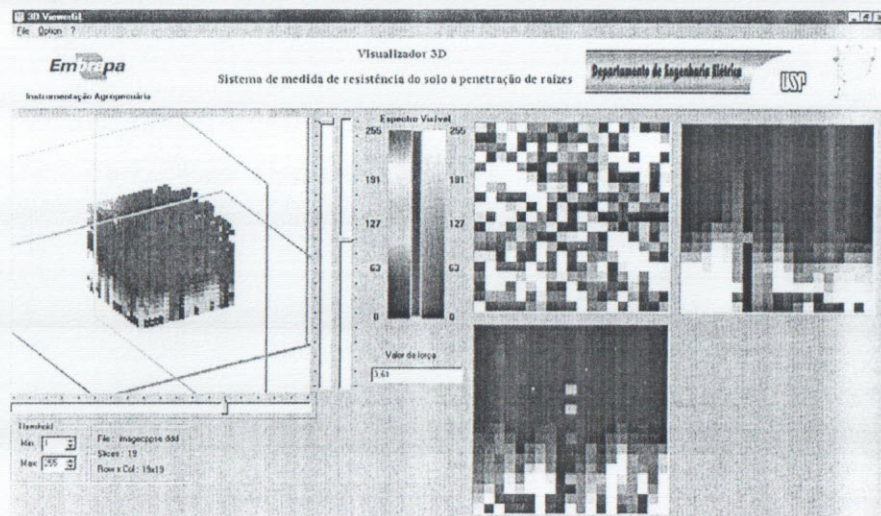


Figura 39. Mapa tridimensional dos dados de resistência do solo à penetração de raízes coletado no experimento de campo (RABELLO, 2003).

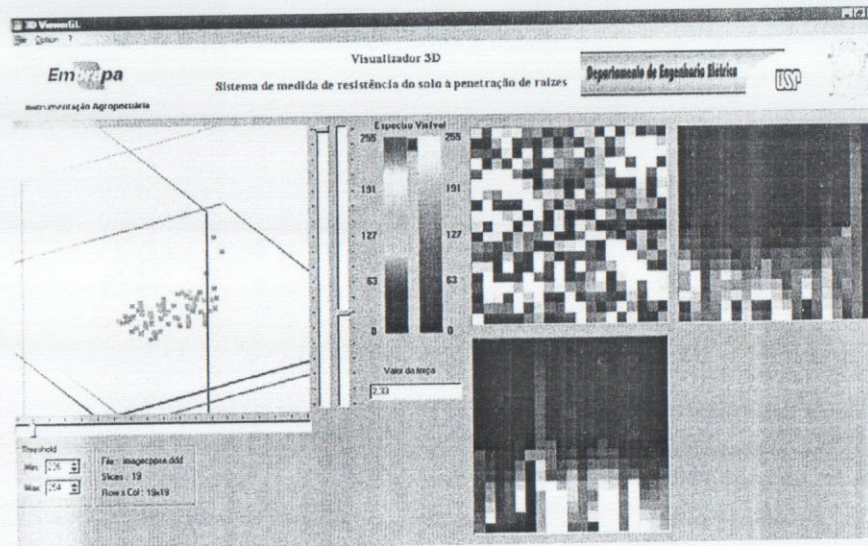


Figura 40. Ensaio de campo: região de alta resistência do solo à penetração de raízes (de 45,11 kgf a 49,03 kgf) (RABELLO, 2003).

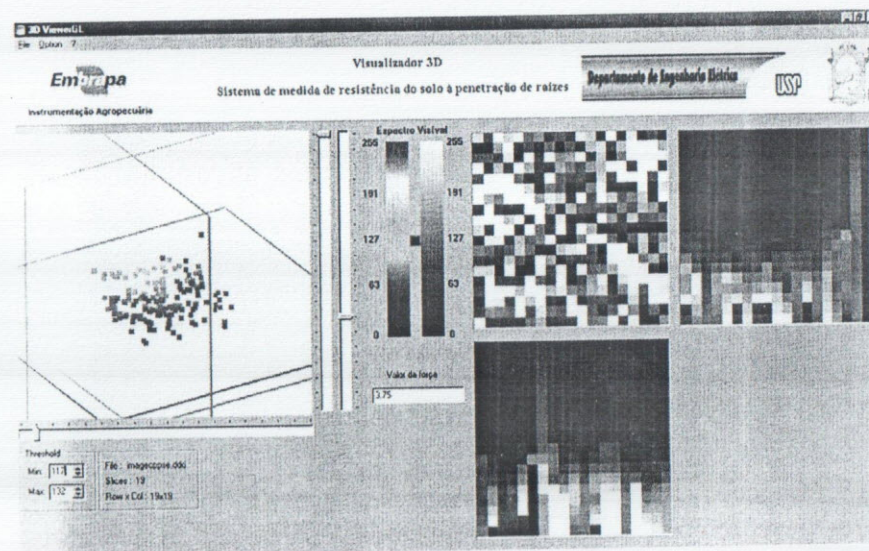


Figura 41. Ensaio de campo: região de valores médios resistência penetração de raízes (de 0,58 kgf a 3,04 kgf) (RABELLO, 2003).

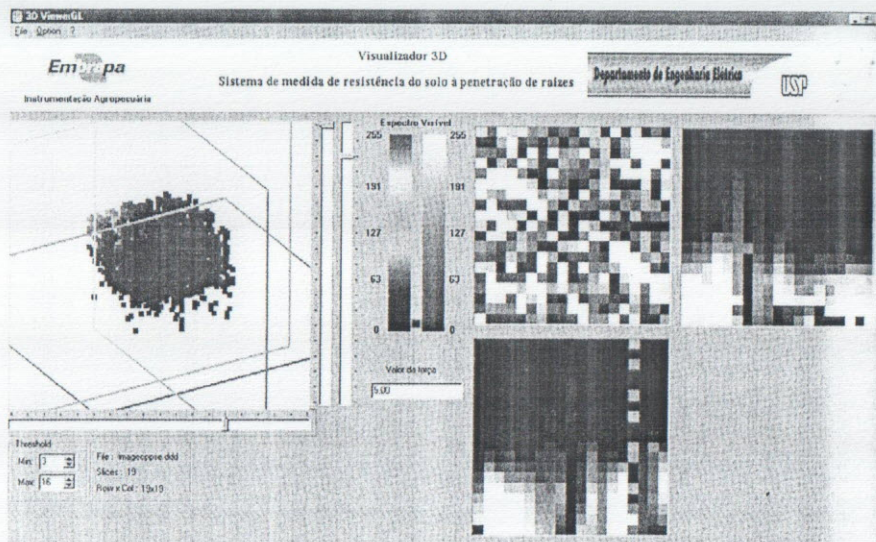


Figura 42. Ensaio de campo: região de baixa resistência do solo à penetração de raízes (de 0,58 kgf a 3,04 kgf) (RABELLO, 2003).

O presente desenvolvimento de um instrumento para auxiliar a tomada de decisão em processos que envolvem a avaliação da resistência do solo à penetração de raízes constitui-se em uma nova e avançada ferramenta, que viabiliza mediante análise em tempo quase real, incluindo programações, a obtenção de informações que levam em conta a variabilidade espacial na área e no perfil, da compactação natural ou artificial, de amostras de solos de laboratórios ou diretamente no campo agrícola.

Por meio de ferramentas de visualização dos cortes sagitais e coronais, torna-se possível, não só a avaliação da resistência do solo à penetração de raízes com o avanço da microsonda no sentido vertical, como seu desenvolvimento no sentido horizontal. Através desses cortes, as possíveis regiões que oferecem maior ou menor resistência à penetração de raízes podem ser observadas.

Os resultados com o uso dessa instrumentação viabilizam a diminuição das várias fontes de incertezas nos métodos de medidas de resistência do solo à penetração de raízes, o que é de fundamental importância na otimização dos riscos dos processos agrícolas.

## Referências

- ADAMS, B. A.; YOUNG, B. D.; TOPP, G. C. Simultaneous measurement of soil resistance and water content. In: ANNUAL Meeting Abstracts. Baltimore, Maryland: ASA-CSSA-SSSA, 1998. p. 181.
- ARYA, L. M.; DIEROLF, T. S. Predicting soil moisture characteristics from particle-size distribution: an improved method to calculate pore radii from particle radii. In: VAN GENUCHTEN, M.; LIJ, F. J.; LUND, L. J. (Ed.). INTERNACIONAL WORKSHOP ON INDIRECT METHODS FOR ESTIMATING THE HIDRAULIC PROPERTIES OF UNSATURATED SOILS, 1992, Riverside, CA. **Proceedings...** [S. l.: s. n.]. 1992. p. 115-125.
- ARYA, L. M.; LEIJ, F. J.; GENUCHTEN, M. T. van; SHOUSE, P. J. Scaling parameter to predict the soil water characteristic from particle-size distribution data. **Soil Science Society Of América Journal**, Madison, v. 63, p. 510-519, 1999.
- ARYA, L. M.; PARIS, J. F. A physicoempirical model to predict soil moisture characteristics from particle-size distribution and bulk density data. **Soil Science Society of América Journal**, Madison, v. 45, p. 1023-1030, 1981.
- ASAE. **Standards 1993**: Standards engineering practices data. St. Joseph: ASAE, 1994. (Soil cone penetrometer, S313.2).
- BALASTREIRE, L. A.; AMARAL, J. R. **Desenvolvimento e construção de um penetrógrafo eletrônico**. Campinas, SP : SBEA, 1994. 12 p. paper nr. 94-4-281.
- BASILE, A.; D'URSO, G. Experimental corrections of simplified methods for predicting water retention curves in clay-loamy soils from particle-size determination. **Soil Technology**, Amsterdam, v. 10, p. 261-272, 1997.
- BRADFORD, J. M. Penetrability. In: KLUTE, A. (Ed.). **Methods of Soil Analysis**. Part 1. Physical and mineralogical methods. 2nd ed. Madison, Wisconsin USA: American Society of Agronomy, 1986. p. 463-478. (Monograph Number 9).
- CALLEBAUT, F.; GABRIELS, D.; MINJAUW, W.; BOOT, M. de. Determination of soil surface strength with a needle-type penetrometer. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 5, p. 227-245, 1985.
- CARTER, L. M. Portable recording penetrometer measures soil strength

profiles. **Agricultural Engineering**, St. Joseph, MI, v. 33, n. 6, p. 348-349, 1967.

CRESTANA, S.; CRUVINEL, P. E.; MASCARENHAS, S.; BISCEGLI, C. I.; MARTIN-NETO, L.; COLNAGO, L. A. **Instrumentação agropecuária: contribuições no limiar do novo século**. Brasília: EMBRAPA-SPI, 1996.

DAVIS, J. L.; CHUDOBIAK, W. J. In situ meter for measuring relative permittivity of soils. **Geol. Surv. Can. Part A [S. 1.]**, v. 75, p. 75-79, 1975.

DEXTER, A. R. Soil physical quality: Part I. Theory, effects of soil texture, density and organic matter, and effects on root growth. **Geoderma**, Amsterdam, v. 120, n. 3-4, p. 201-214, 2004.

DOBSON, M. C.; ULABY, F. T.; HALLIKAINEN, M. T.; EL-RAYES, M. A. Microwave dielectric behavior of wet soil: II Dielectric mixing models. **IEEE Transactions on Geoscience and remote sensing**, New York, v. 23, p. 35-46, 1985.

ECHING, S. O.; HOPMANS, J. W.; WENDROTH, O. Unsaturated hydraulic conductivity from transient multistep outflow and soil water pressure data. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 58, p. 687-695, 1994.

EMBRAPA. **Manual de Métodos de Análise de Solos**. 2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa-CNPS, 1997. p. 27-36.

GENUCHTEN, M. T. van. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 44, p. 892-898, 1980.

GILL, W. R.; VANDERBERG, G. E. **Soil dynamics in tillage and traction**. Washington: U.S. Department of Agriculture, 1967. 511 p.

HENDRICK, J. G. Recording soil penetrometer. **Journal of Agricultural Engineering Research**, London, v. 14, n. 2, p. 183-186, 1969.

HERRICK, J. E.; JONES, T. L. A dynamic cone penetrometer for measuring soil penetration resistance. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 66, p. 1320-1324, 2002.

HWANG, S. I.; POWERS, S. E. Using particle-size distribution models to estimate soil hydraulic properties. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 67, p. 1103-1112, 2003.

LINS e SILVA, M. L. **Modelagem matemática na estimativa da densidade de um Latossolo Vermelho Escuro textur argilosa, pelo índice de cone**. 1999. 161 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

LINS e SILVA, M. L.; SVERZUT, C. B.; MANTOVANI, E. C. **Desenvolvimento e utilização de um penetrógrafo hidráulico com aquisição eletrônica de dados**. Viçosa, MG: SBEA, 1995. 27 p. Paper n. 95-4-305.

LIU, Y. P.; HOPMANS, J. W.; GRISMER, M. E.; CHEN, J. Y. Direct estimation of air-oil and oil-water capillary pressure and permeability relations from multi-step outflow experiments. **Contaminant Hydrology**, Amsterdam, v. 32, p. 223-245, 1998.

MACEDO, A.; NAIME, J. M.; HERNANI, L. C.; SILVA, W. M.; GRANATO, A.; IOSSI, M. F.; SILVA, A. P. Validação de um analisador granulométrico automático em 3 laboratórios de análise de solos do Brasil In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 29., 2003, Ribeirão Preto. **Anais...** Ribeirão Preto: UNESP, 2003. 1 CD-ROM.

MANTOVANI, E. C. Compactação do solo. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 13, p. 52-55, março 1987.

MCKYES, E. **Soil cutting and tillage: Developments in Agricultural Engineering**. Amsterdam: Elsevier Science Publishers B.V., 1985. 292 p. v. 10.

MUALEM, Y.; FRIEDMAN, S. P. Theoretical prediction of electrical conductivity in saturated and unsaturated soil. **Water Resources Research Center**, Hawaii, v. 27, p. 2771-2777, 1991.

NAIME, J. M.; SHINYA, V. T.; VAZ, C. M. P. **Programa para estimativa indireta da curva de retenção da água no solo**. São Carlos, SP: Embrapa Instrumentação Agropecuária, 2004. 3 p. (Embrapa Instrumentação Agropecuária. Comunicado Técnico, 60).

NAIME, J. M.; VAZ, C. M. P.; MACEDO, A. Automated soil particle size analyzer based on gamma-ray attenuation. **Computers and Electronics in Agriculture**, New York, v. 31, n. 3, p. 295-304, 2001.

NEWMAN, S. C.; HUMMEL, J. M. Soil penetration resistance with moisture correction. In: AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS MEETINGS PAPERS, 1999, Toronto. **Proceedings....** [S.

I.]: ASAE/CSAE, 1999. Paper n. 993028.

NISSEN, H. H.; MOLDRUP, P.; HENRIKSEN, K. High-resolution time domain reflectometry coil probe for measuring soil water content. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 62, p. 1203-1211, 1998.

OLIVEIRA, J. C. M.; VAZ, C. M. P.; REICHARDT, K.; SWARTZENDRUBER, D. Improved soil particle-size analysis through gamma-ray attenuation. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 60, p. 23-26, 1997.

PACHEPSKY, Y. A.; RAWLS, W. J. Accuracy and reliability of pedotransfer functions as affected by grouping soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 63, p. 1748-1757, 1999.

PERUMPAL, J. V. Cone penetrometer applications: A review. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, MI, v. 30, n. 4, p. 939-944, 1987.

PRATHER, O. C.; HENDRICK, J. G.; SCHAFER, R. L. An electronic hand-operated recording penetrometer. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, MI, v. 13, n. 1, p. 385-386, 1970.

RABELLO, L. M. **Instrumentação avançada para tomada de decisão na avaliação da resistência do solo à penetração de raízes**. 2003. 200 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

RHOADES, J. D.; MANTEGHI, N. A.; SHOUSE, P. J.; ALVES, W. J. Soil electrical conductivity and salinity: new formulations and calibrations. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 53, p. 433-439, 1989.

RHOADES, J. D.; RAATS, P. A.; PRATHER, R. J. Effects of liquid phase electrical conductivity, water content and surface conductivity on bulk soil electrical conductivity. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 40, p. 651-655, 1976.

ROLSTON, D. E.; BEDAIWY, N. A.; LOUIE, D.T. Micropenetrometer for in Situ Measurement of Soil Surface Strength. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 55, p. 481-485, 1991.

ROTH, K.; SCHULIN, R.; FLUEHLER, H.; ATTINGER, W. Calibration of TDR for water content measurement using a composite dielectric approach. **Water Resources Research Center**, Hawaii, v. 26,

p. 2267-2273, 1990.

SPIEGEL, M. R. **Estatística**. 2. ed. São Paulo: Mc Graw-Hill, 1985. 454 p.

STOLF, R. Teoria e teste experimental de fórmulas de transformação dos dados de penetrometro de impacto em resistência do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 15, p. 229-235, 1991.

TAYLOR, H. M.; PARKER, J. J.; ROBINSON, C. M. Soil strength and seedling emergence relations. II. A generalized relation for Gramineae. **Agronomy Journal**, Madison, v. 58, p. 393-395, 1966.

TOMASELLA, J.; HODNETT, M. G.; ROSSATO, L. Pedotransfer functions for the estimation of soil water retention in Brazilian soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 64, p. 327-338, 2000.

TOPP, G. C.; DAVIS, J. L.; ANNAN, A. P. Eletromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission lines. **Water Resources Research**, Hawaii, v. 16, p. 574-582, 1980.

TORMENA, C. A.; SILVA, A. P.; LIBARDI, P. L. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um latossolo roxo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 22, p. 573-581, 1998.

UPADHYAYA, S. K.; KEMBLE, L. J.; COLLINS, N. E. Cone index prediction equations for Delaware soils. **ASAE Paper**, [S. l.], v. 82, p. 1452-1456, 1982.

VAZ, C. M. P.; BASSOI, L. H.; HOPMANS, J. W. Contribution of water content and bulk density to field soil penetration resistance as measured by a combined cone penetrometer-TDR probe. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 60, n. 1-2, p. 35-42, 2001.

VAZ, C. M. P.; HOPMANS, J. W. Simultaneous measurement of soil strength and water content with a combined penetrometer-moisture probe. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 65, n. 1, p. 4-12, 2001.

VAZ, C. M. P.; HOPMANS, J. W. TDR probes for combined use with a cone penetrometer to determine water content influence on soil strength. In: ANNUAL MEETING ASA-SSSA-CSSA, 1998, Salt Lake city, Utah-USA. **Abstracts...** [S. l.: s. n.], 1998. p. 262.

VAZ, C. M. P.; IOSSI, M. F.; NAIME, J. M.; MACEDO, A.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; COOPER, M. Validation of the

Arya and Paris water retention model for Brazilian soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 69, p. 577-583, 2005a.

VAZ, C. M. P.; MATSURA, E. E.; VIDAL-TORRADO, P.; BACCH, O. O. S. Método para a estimativa da condutividade elétrica dos solos pela técnica de TDR. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 3.; 2005, Recife. **Anais...** Recife: SBCS/UFPE/Embrapa Solos, 2005b. 1 CD-ROM.

VAZ, C. M. P.; NAIME, J. M.; MACEDO, A. Soil particle size fractions determined by gamma-ray attenuation. **Soil Science**, Baltimore, v. 164, n. 6, p. 403-410, 1999.

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**, Amsterdam, v. 5, p. 319-325, 1992.

VAZ, C. M. P.; PATRIZZI, V. C.; MATSURA, E. E.; VIDAL-TORRADO, P.; BACCHI, O. O. S. Desempenho de 3 equipamentos da TDR para a medida da umidade e condutividade elétrica dos solos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 29.; 2003, Ribeirão Preto. **Anais...** Ribeirão Preto: UNESP, 2003. 1 CD-ROM.

WEAST, R. C. **Handbook of physics and chemistry**. 63<sup>th</sup> ed. Stanford: CRC Press, 1982.

WILLIFORD, J. R.; WOOTEN, O. B.; FULGHAM, F. E. Tractor mounted field penetrometer. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, MI, v. 15, n. 2, p. 226-227, 1972.

WRAITH, J. M.; OR, D. Nonlinear parameter estimation using spreadsheet software. **Journal of Natural Resources and Life Sciences Education**, Madison, v. 27, p. 13-19, 1998.

YOUNG, G. D.; ADAMS, B. A.; TOPP, G. C. A portable cone index and water content meter. In: ANNUAL Meeting Abstracts. Baltimore, Maryland: ASA-CSSA-SSSA, pp. 180, 1998.

## Tomografia computadorizada de raios X e gama para investigação não-invasiva do solo

*Álvaro Macedo da Silva*

*João de Mendonça Naime*

*Carlos Manoel Pedro Vaz*

*Silvio Crestana*

*Paulo Estevão Cruvinel*

### Breve histórico

Quando Wilhelm Conrad Röntgen, em 1895, descobriu o raio X, numa primeira instância não sabia da natureza do fenômeno e, no momento seguinte ao da descoberta, não tinha idéia da importância que ela teria para o futuro da ciência, em inúmeras áreas do saber. Mais de sessenta anos depois, em 1956, o sul-africano Allan McLeod Cormack, convidado a ser o físico responsável pelo Hospital Groote Schur, da Cidade do Cabo, entendeu que seria importante desenvolver um método que permitisse medir os coeficientes de atenuação dos meios heterogêneos, entre os quais o corpo humano. Os conhecimentos e a aplicação relativos à radiologia e radioterapia já estavam desenvolvidos havia muito tempo e Cormack concluiu que essas medidas seriam importantes, não somente no primeiro caso, para obter informações detalhes do corpo, mas também no segundo, quando é necessário aplicar certa dosagem de radiação em determinadas partes de órgãos, sem atingir as demais.

Cormack supunha que o tratamento matemático desse problema já devia ter sido desenvolvido por alguém e, de fato, J. H. Radon (RADON, 1917) já havia proposto uma solução para o problema de se obter a função que descreve uma imagem no espaço n-dimensional a partir de suas integrais de linha. Por não encontrar esse material, Cormack julgou que ele não existisse e formulou a solução para, a partir das integrais de linha de um corpo heterogêneo atravessado por um feixe monoenergético, obter-se a