

TENSIÔMETRO SIMPLES DE LEITURA DIRETA¹

ÂNGELO PAES DE CAMARGO², FRANCISCO GROHMANN³ e
MARCELO B. PAES DE CAMARGO⁴

RESUMO - Foi desenvolvido e testado um tensiômetro simples de leitura direta no tubo transparente e estabelecidas as relações entre a altura da câmara visível e a correspondente tensão, lida em manômetros. As regressões obedecem à lei dos gases perfeitos de Boyle-Mariotte e podem ser expressas por equações hiperbólicas, cujas constantes variam com a altura inicial da câmara. A melhor regressão é obtida quando se inicia a operação com uma câmara de ar entre 0,5 e 1,0 cm de altura. Nesse caso, a curva de regressão obtida pode ser expressa pela equação $y = 800x / (x + 1,8)$, onde y = tensão em mb e x = altura da câmara em cm. O tensiômetro de leitura direta, dispensando manômetros, torna-se um instrumento simples, barato e bastante confiável.

Termos para indexação: água no solo, lei de Boyle-Mariotte.

AN INEXPENSIVE DIRECT READING TENSIO METER

ABSTRACT - A transparent tube tensiometer was developed and tested to establish the relationship between the visible chamber height and the tension read in the manometers. The regressions follow the law of perfect gas (Boyle & Mariotte) and may be expressed by hiperbolic equations. The constants of the equations varies with the initial chamber height. The best values of initial chamber height were between 0.5 to 1.0 cm, corresponding to the equation: $y = 800x / (x + 1.8)$, where y is the tension (mb) and x the chamber height (cm). The direct reading tensiometer described here makes unnecessary the manometers so making the tensiometer inexpensive and more reliable.

Index terms: soil water, Boyle & Mariotte law.

INTRODUÇÃO

O tensiômetro é um instrumento usado para indicar a tensão ou estado de umidade no solo e facilitar a prescrição das necessidades de água na irrigação. Foi desenvolvido em 1922, por W. Gardner et al. (Black 1968). Compõe-se de uma cápsula de cerâmica porosa ligada a um manômetro por um tubo num sistema, cheio de água, hermeticamente fechado.

Quando a cápsula porosa do tensiômetro é posta em contato com o solo não-saturado, este succiona água do interior, provocando queda de pressão ou tensão dentro do sistema. Essa tensão pode ser medida pelo manômetro para obter o potencial matricial da água no solo e indicação do grau de umidade.

Os manômetros utilizados nos tensiômetros po-

dem ser aneróides ou de coluna de mercúrio. Ambos têm seus inconvenientes. O manômetro aneróide é pouco confiável, caro e dificilmente encontrado no mercado. O de mercúrio, também dispendioso, apresenta dificuldade de montagem, manutenção e operação.

Admite-se que o tensiômetro funciona normalmente cheio de água, sem a presença de bolhas de ar e de câmara gasosa no alto do tubo (Slavik 1974). Recomenda-se, por isso, para encher o tensiômetro, o uso de água previamente fervida para eliminar o ar dissolvido, e assim evitar a formação de bolhas e da câmara gasosa (Reichardt 1978).

Os autores deste trabalho, utilizando tensiômetros de tubo transparente, observaram haver, invariavelmente, mesmo com o uso de água fervida, a formação de câmara gasosa no alto da coluna líquida, que cresce com o aumento das tensões acusadas pelo manômetro. Quando o tensiômetro é aberto e reenchido com água, na tentativa de eliminar a câmara gasosa, esta sistematicamente se refaz em poucos dias. A presença da câmara gasosa sugeriu a possibilidade de estimar a tensão no sistema baseando-se simplesmente na altura da mesma e, assim, dispensar o uso de manômetros.

A variação do volume e pressão gasosa obedece

¹ Aceito para publicação em 29 de julho de 1982.

² Eng.^o Agr.^o, Dr., em Agronomia (Agrometeorologia) Inst. Brasileiro do Café, Caixa Postal 82, CEP 13100 - Campinas, SP.

³ Eng.^o Agr.^o, Dr. em Agronomia (Física do Solo) Inst. Brasileiro do Café.

⁴ Eng.^o Agr.^o, Inst. Agrônomo de Campinas, Caixa Postal 28, CEP 13100 - Campinas, SP.

à lei de Boyle-Mariotte, assim enunciada: "O volume de uma massa de gás a temperatura constante varia inversamente em relação à pressão". Suas relações são representadas por curvas hiperbólicas, equiláteras e assintóticas aos eixos de pressão e de volume (Sears & Zemansky 1959).

Conhecidas as curvas e as equações representativas das regressões, poder-se-ia elaborar tabelas especiais para transformar os dados de volume ou altura da câmara, lidas nos tensiômetros transparentes, em valores de tensão, sem necessidade de manômetros.

Os primeiros resultados da regressão entre dados de tensão e altura da câmara gasosa, obtidos com tensiômetros transparentes, foram apresentados pelos autores em congressos, com publicação de resumos (Camargo et al. 1979 e 1981). Neste trabalho, são apresentados observações e resultados mais completos, obtidos em várias séries de medição de volume e tensão (pressão negativa), efetuados em laboratório e em condições naturais de campo.

MATERIAL E MÉTODOS

Os experimentos compreenderam duas fases. A primeira, preliminar em laboratório; e a segunda, em condições naturais, utilizando-se bateria de tensiômetros instalados em solo gramado.

Experimentos preliminares em vasos

Empregaram-se vasos de barro permeáveis, com 32 cm de diâmetro médio, 30 cm de altura e de 25 litros de volume. Foram mantidos em casas de vegetação, no Núcleo Técnico do IBC, em Campinas, SP, de fevereiro a setembro de 1979.

Os tensiômetros foram construídos com tubo transparente incolor, de acrílico rígido (lucite), com as dimensões: diâmetro interno: cerca de 13 mm (meia polegada); espessura da parede: 2,6 mm; comprimento: 60 cm. As cápsulas porosas foram fabricadas pela Cerâmica Santana, de Pedreira, segundo especificações de Grohmann & Pinto (1977) e Grohmann (1978). Um dos tensiômetros foi equipado com manômetro aneróide, adaptado na boca do tubo transparente, e outro recebeu manômetro de coluna de mercúrio. A instalação se fez lado a lado, no mesmo vaso. As cápsulas ficaram a cerca de 20 cm de profundidade e distanciadas 8 cm entre si.

Operação dos tensiômetros nos vasos

Antes da instalação, fez-se a aferição do ponto zero da escala do manômetro de mercúrio com a cápsula imersa em água. Depois de instalados os tensiômetros, o vaso foi molhado abundantemente até percolação prolongada. Em

seguida, iniciaram-se as leituras diárias, com exceção dos feriados, sábados e domingos. Foram lidas as tensões em milibares e as alturas das câmaras em centímetros.

Quando a altura da câmara se aproximava de 40 cm, os vasos eram irrigados até percolar. Durante a irrigação, a coluna de água, via de regra, subia rapidamente e, em poucos minutos, a câmara gasosa reduzia-se a poucos milímetros. Quando isso não acontecia após a rega, era sinal de mau funcionamento do tensiômetro, possivelmente por vazamento de ar para o interior do sistema.

Antes de começar cada série de leituras, após as regas, os tubos dos tensiômetros eram reenchidos com água previamente fervida. No período de fevereiro a outubro de 1979 foram efetuadas oito leituras no tensiômetro com manômetro aneróide e várias séries com os tensiômetros de manômetros de mercúrio. Defeitos e vazamentos ocorridos nessa fase de adaptação dos manômetros de mercúrio ocasionaram a perda da maioria das séries de leituras. Duas delas puderam ser aproveitadas depois das correções efetuadas.

Experimentos no campo

Para experimentação em condições de campo, foi instalada uma bateria de quatro tensiômetros transparentes, praticamente iguais, munidos com manômetro de mercúrio. Estes permitiam a obtenção de dados bem mais confiáveis que os fornecidos pelo único tensiômetro aneróide disponível. A bateria foi montada em terreno de solo Podzólico Vermelho-Amarelo (PV), vegetado com grama-batatais (*Paspalum notatum* Fluegge), próximo à sede do Núcleo Técnico do IBC, em Campinas, SP.

Os tensiômetros utilizados

Os tensiômetros utilizados em condições de campo foram construídos com tubo de plástico cristal, flexível e incolor, do tipo utilizado como mangueira de esguicho de jardim. As dimensões foram: comprimento: 120 cm; diâmetro interno: cerca de 13 mm (meia polegada); espessura da parede: 5 mm. Quando a espessura da parede é menor, o tubo de plástico pode se deformar e achatá-lo pela ação da forte tensão interna.

A mangueira de plástico cristal flexível é muito mais barata que as de plástico rígido de acrílico, comumente utilizadas. É facilmente encontrada no mercado e seu manuseio muito simples (Fig. 8).

A cuba de mercúrio do manômetro foi montada cerca de 17 cm acima da boca do tubo transparente (Fig. 1). Utilizaram-se cápsulas porosas idênticas às usadas nos experimentos em vasos.

Para obter a tensão real na câmara gasosa do tensiômetro através da leitura do manômetro de mercúrio, foi necessário corrigi-la em função da altura da coluna de água entre a cuba de mercúrio e a câmara. Adotou-se a equação (Reichardt 1978):

$$U = 13,6h - h_1 \text{ ou } 12,6h - h_1$$

onde U = tensão (pressão negativa) na câmara, em cm de água; h = altura da coluna de mercúrio, em cm; h₁ = altura da coluna de água, em cm, entre a cuba de mercúrio e a

base da rolha no tubo transparente do tensiômetro (mais baixo); no caso = 17 cm (Fig. 1).

O fator 13,6 é a densidade do mercúrio. Para transformar a tensão dada em centímetros de coluna de água para milibares, emprega-se o fator: 0,98.

Instalação e operação dos tensiômetros em condições de campo

Uma bateria de quatro tensiômetros transparentes com

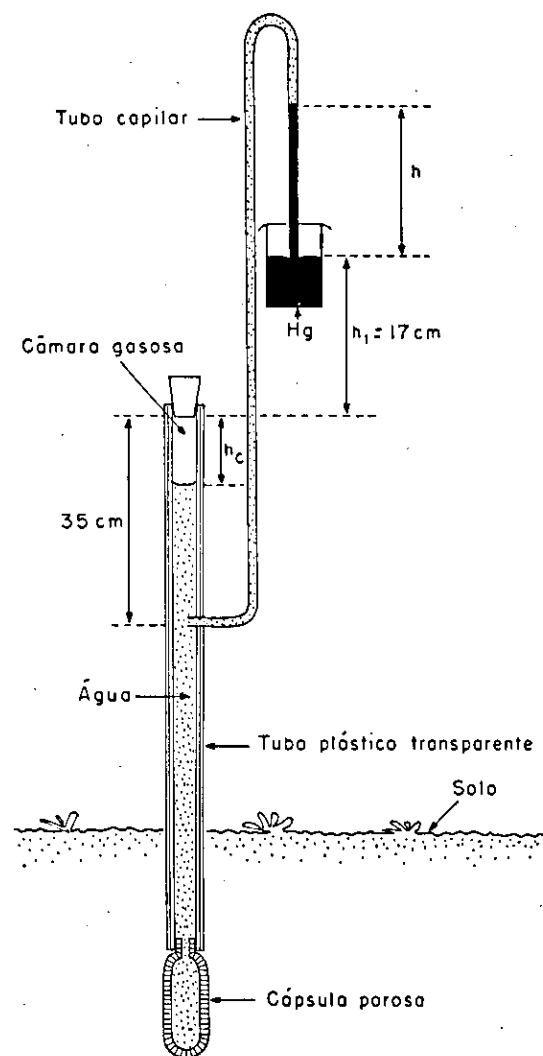


FIG. 1. Esquema de um tensiômetro transparente munido com manômetro de mercúrio usado para as determinações de altura da câmara gasosa e respectivas tensões, em condições de campo. h = altura da coluna de Hg; h_1 = diferença de nível entre a cuba de Hg e a boca do tensiômetro; h_c = altura da câmara gasosa.

manômetro de mercúrio foi instalada em terreno gramado, distanciados cerca de 40 cm entre si, com as cápsulas porosas a 30 cm de profundidade. Fez-se a instalação no início de março de 1981. Para testar o funcionamento dos tensiômetros, vedar vazamentos e corrigir eventuais defeitos, os aparelhos foram operados e observados previamente durante um mês. Após esse período de adaptação, iniciaram-se séries de leituras preliminares em condições de campo.

Para encher os tensiômetros no campo, foi usada água natural, não fervida. Para remover bolhas de ar e possível câmara formada no alto do tubo, bastou reencher, um ou dois dias após, o tubo com água e recolocar a rolha. Quando era o caso, deixou-se uma câmara inicial com a altura desejada. Em seguida, iniciou-se nova série de leituras.

Cada série de leituras foi iniciada após rega abundante do gramado, na área dos tensiômetros, para reduzir ou anular a tensão da água do solo. Nessa condição, dada a alta tensão interna, a água é succionada para o interior do tensiômetro, através da cápsula porosa, reduzindo-se consideravelmente ou mesmo anulando-se a câmara gasosa.

Séries de leituras em condições de campo

Cinco séries de leituras foram conduzidas no período de 10 de abril a 2 de outubro de 1981. A primeira correspondeu a um período muito seco, com um total de apenas 4 mm de chuva, o que possibilitou a obtenção de dados bastante úteis. A segunda coincidiu com grande pluviosidade, da ordem de 85 mm, e temperaturas muito baixas. Isto causou umidade permanentemente alta no solo e prejudicou as determinações. Esses dados não foram aproveitados.

Nas três séries seguintes, a precipitação pluvial manteve-se baixa, especialmente na parte final das séries de leituras, condição que permitiu a operação satisfatória dos tensiômetros. Foram feitas, normalmente, duas leituras por dia, uma pela manhã, entre 8 e 9 horas, quando as temperaturas são relativamente baixas, e outra, à tarde, cerca de 16 horas, com temperaturas bem mais altas.

A terceira série de leituras foi de 30 de junho a 1º de agosto de 1981. Em dois dos tensiômetros foi deixada uma câmara inicial de 1,2 cm. A quarta série se desenvolveu de 18 de agosto a 9 de setembro, iniciando-se com uma câmara de cerca de 0,2 cm de altura.

A quinta e última série foi conduzida de 15 de setembro a 2 de outubro. Em dois dos tensiômetros, a câmara inicial foi de 2,2 cm, aproximadamente. Nos outros dois, deixou-se apenas uma pequena bolha inicial.

RESULTADOS

Experimentos preliminares em vasos

Foram feitas várias séries de leituras das alturas das câmaras e respectivas tensões, em tensiômetros com manômetro aneróide e de mercúrio. A Tabela 1 apresenta os dados de oito séries de leituras com manômetro aneróide. A Fig. 2 traz as regres-

TABELA 1. Alturas da câmara gasosa e respectivas tensões lidas em diferentes séries de determinações em tensiômetro transparente com manômetro aneróide, montado em condições de laboratório. Fevereiro a setembro de 1979.

1. ^a Série		5. ^a Série	
Altura cm	Tensão mb	Altura cm	Tensão mb
0,2	0	3,3	340
0,6	130	4,1	380
1,1	210	5,1	420
1,9	300	13,8	570
3,2	380	17,7	610
5,0	460	20,9	650
7,8	530		
18,7	620		
23,4	640		
33,2	660		
2. ^a Série		6. ^a Série	
Altura cm	Tensão mb	Altura cm	Tensão mb
0,1	0	0,5	120
0,3	50	1,1	200
1,9	300	1,9	270
3,6	410	2,0	300
6,5	500	2,6	320
13,4	600	3,3	360
20,6	630	6,0	450
29,6	650	11,6	530
39,5	690	12,5	570
3. ^a Série		7. ^a Série	
Altura cm	Tensão mb	Altura cm	Tensão mb
0,0	0	0,5	140
0,4	50	1,0	220
2,0	240	1,3	250
2,6	280	2,3	340
5,1	410	6,4	470
6,9	480	11,5	550
9,4	520		
12,1	560		
15,4	600		
19,9	630		
24,5	650		
30,7	670		
4. ^a Série		8. ^a Série	
Altura cm	Tensão mb	Altura cm	Tensão mb
0,6	50	0,6	70
1,0	140	0,7	120
1,5	180	1,4	180
1,8	200	2,4	220
2,4	270	8,6	450
2,9	300	13,4	500
3,7	350	17,9	560
		22,8	590
		32,6	660
		-	-
		-	-
		-	-
5. ^a Série			
Altura cm	Tensão mb		
1,2	200		
1,6	230		
2,6	320		

sões obtidas. Verifica-se que as curvas obtidas são hiperbólicas, típicas da lei de Boyle-Mariotte (Babor & Ibarz Aznarez 1968).

Os valores de tensão pelo manômetro aneróide mostraram-se inferiores aos indicados pelo manômetro de mercúrio. Essa diferença poderá estar ligada a problemas de aferição do manômetro aneróide utilizado.

Nas determinações com manômetro aneróide os resultados foram bastante consistentes. Apenas a

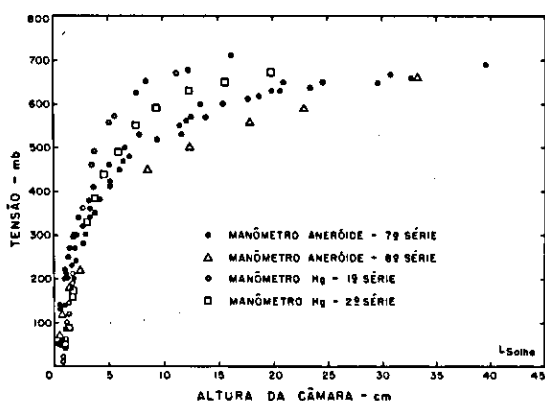


FIG. 2. Regressões entre tensão e altura da câmara gasosa em tensiômetros transparentes instalados em condições de laboratório. Dados de duas séries de leituras em tensiômetros com manômetro aneróide (Ver dados na Tabela 1) e de duas séries em tensiômetro com manômetro de mercúrio.

oitava série apresentou certa discrepância, dando valores de altura da câmara bem mais altos que os esperados. Essa discrepância parece estar relacionada a vazamentos de ar para o interior do tensiômetro.

Experimentos em condições de campo

A Tabela 2 traz dados de altura das câmaras e respectivas tensões obtidas na primeira série de leitura, na bateria de tensiômetros com manômetros de mercúrio. Os dados das demais séries de leituras são apresentados apenas em forma gráfica, nas Fig. 3 a 7. A segunda série de leituras não pôde ser aproveitada, por terem os dados sido prejudicados pelo tempo muito chuvoso, que manteve o solo com alto potencial de umidade. As leituras restringiram-se à faixa de tensões mais baixas.

a. Primeira série de determinações

A Tabela 2 traz os dados obtidos na primeira série de determinações com o propósito de testar tensiômetros com o tubo completamente cheio de água, sem a câmara gasosa inicial. Como ocorreram alguns dias chuvosos, com 35 mm de precipitação, depois de 20 dias de iniciada a série de determinações houve condição para formação de câmara inicial, de cerca de 0,8 cm de altura nos quatro tensiômetros operados. Dessa forma, iniciou-se, no dia 29 de abril, nova fase de determinações, partin-

do de pequena câmara inicial (Tabela 2). Obteve-se uma regressão hiperbólica, expressa por uma equação do tipo:

$$y = \frac{A(x + C)}{B + (x + C)} \quad (1)$$

onde: y = tensão em mb; x = altura da câmara em cm; A , B e C são constantes.

No caso, o valor da constante A foi 800; o da B 1,8; e o da C igual a zero, resultando a equação:

$$y = \frac{800x}{1,8 + x} \quad (2)$$

O elevado valor do coeficiente de determinação, $R^2 = 0,98$, possibilita obter os valores de y em função de x com grande grau de confiança.

b. Terceira série de determinações

Pesquisou-se: 1. influência da ausência e da presença de câmara inicial, de 1,2 cm, sobre a curva da regressão entre a altura da câmara e a tensão; 2. influência da hora de leitura, matutina ou vespertina, sobre a regressão.

Para o caso dos tensiômetros operados sem câmara inicial a equação foi:

$$y = \frac{800(x + 0,2)}{0,8 + (x + 0,2)} \quad (3)$$

A curva correspondente teve início no ponto correspondente ao valor - 0,2 (negativo) na escala x . A constante B com valor 0,8, bastante baixo, indica uma curva bastante fechada.

Para a série de determinações com câmara inicial de 1,2 cm, a equação de regressão obtida foi:

$$y = \frac{800(x - 0,5)}{1,5 + (x - 0,5)} \quad (4)$$

onde: 0,5 corresponde a uma constante C .

A curva representativa, correspondente à equação 4, na Fig. 4, tem o ponto inicial deslocado para o valor 0,5 da escala x . No mais se apresenta muito semelhante à curva 2 da Fig. 3, obtida com câmara inicial, pequena, de 0,8 cm, aproximadamente.

A Fig. 5 mostra as curvas de regressão, para as leituras das 9 e das 16 horas, nos tensiômetros com

TABELA 2. Alturas em centímetros e respectivas tensões da câmara gasosa em milibares determinadas, diariamente, na primeira série de determinações, em condições de campo, na bateria de quatro tensiômetros transparentes, providos com manômetro de mercúrio, no período de 10 de abril a 25 de maio de 1981. Leitura às 9 horas.

Data das leituras	Tensiômetros								Chuva mm
	1		2		3		4		
	Altura cm	Tensão mb	Altura cm	Tensão mb	Altura cm	Tensão mb	Altura cm	Tensão mb	
Primeira fase - sem câmara inicial									
10-4	0,0	119	0,0	117	0,0	117	0,0	117	
13-4	0,1*	218	0,1	223	0,1	213	0,1	215	
14-4	0,1	235	0,1	236	0,1	234	0,1	218	
15-4	0,4	250	0,4	249	0,1	234	0,4	245	
22-4	0,4	286	0,4	253	0,3	222	0,3	208	8
24-4	0,7	363	0,5	332	0,4	328	0,3	303	
Segunda fase - pequena câmara inicial									
29-4	0,7	210	0,7	195	0,6	190	0,5	190	35**
5-5	0,9	217	0,8	211	0,7	201	0,6	205	
7-5	1,2	291	0,7	233	0,8	261	0,6	210	
10-5	3,0	439	2,2	336	2,5	374	0,8	237	
12-5	4,2	515	2,8	416	3,3	464	0,8	237	
15-5	5,7	603	3,5	538	5,0	615	1,8	429	
18-5	10,2	681	7,4	650	11,2	708	3,2	529	
19-5	10,8	683	9,0	670	13,5	721	3,6	564	
20-5	14,7	716	11,7	696	25,5	739	4,7	597	
22-5	21,0	746	17,3	738	28,6	758	7,2	611	4
25-5	29,0	755	24,5	744	30,0	759	7,8	617	

* Os dados apresentados com o valor 0,1 cm correspondem à presença de bolha inicial.

** Chuva no período de 27 a 29 de abril.

câmara inicial de 1,2 cm. Pode-se verificar que as curvas são muito semelhantes, embora as tensões mostrem-se um pouco mais baixas, cerca de 15 mb nas leituras das 16 horas, quando a temperatura ambiente é normalmente mais elevada.

A Fig. 6 representa duas curvas obtidas na quarta série de observações, comparando tensiômetros operados sem câmara inicial e com câmara inicial mínima, de apenas 0,2 cm de altura. Em ambos os casos, a curva se apresentou muito fechada, como indicado pelos valores baixos do termo B , de 0,8 e 0,6, nas equações 6 e 7.

Na Fig. 7 são apresentadas as regressões obtidas

na quinta série de observações em tensiômetros operados com pequena bolha inicial e com câmara inicial grande, de 2,2 cm de altura. No primeiro caso (equação 9), a curva se apresentou bastante fechada e com a origem na parte negativa da escala de x , como aconteceu com os tensiômetros operados sem câmara inicial. Para o caso dos tensiômetros operados com câmara inicial grande, a equação de regressão apresentou a constante B igual a 1,7 e a C a -1,5 (negativo), resultando uma curva demasiado aberta e com a origem no ponto 1,5 cm da escala x . Essa equação subestima bastante os valores de tensão (y) em relação aos de altura da câmara (x).

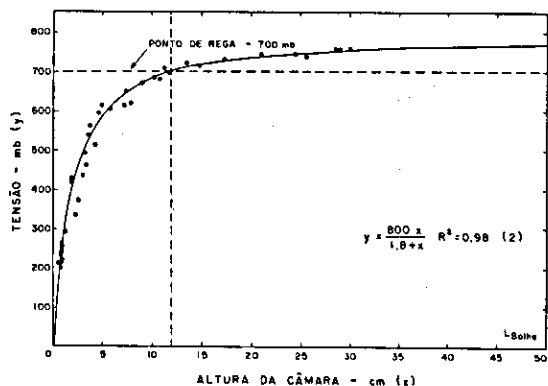


FIG. 3. Regressão entre tensão e altura da câmara gasosa na primeira série de leituras em bateria de tensiômetros transparentes, com manômetro de mercúrio, instalados em condições de campo. Dados posteriores a formação de pequena câmara gasosa inicial, de certa de 0,8 cm de altura, em decorrência de reumedecimento do solo após 20 dias sem chuva (Ver dados na Tabela 2).

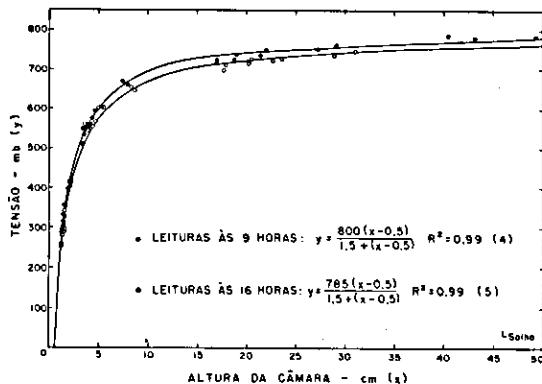


FIG. 5. Regressões entre tensão e altura da câmara gasosa na terceira série de observações feitas às 9 e 16 horas em bateria de tensiômetros com manômetro de mercúrio e câmara inicial de 1,2 cm.

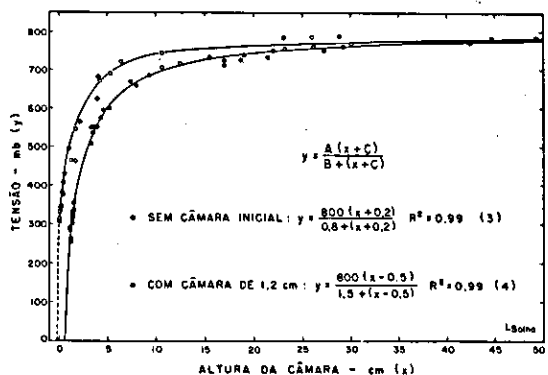


FIG. 4. Regressões entre tensão e altura da câmara gasosa na terceira série de observações em bateria de tensiômetros com manômetro de mercúrio. Dois tensiômetros foram operados com câmara gasosa inicial de 1,2 cm de altura e dois sem câmara inicial. Leituras às 9 horas.

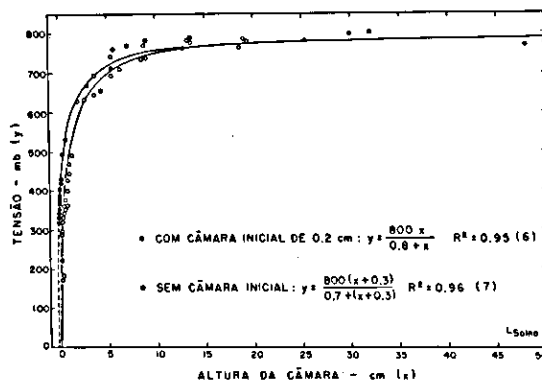


FIG. 6. Regressões entre tensão e altura da câmara gasosa na quarta série de observações feitas às 9 e 16 horas em bateria de tensiômetros com manômetro de mercúrio. Dois tensiômetros foram operados com câmara inicial de 0,2 cm e dois sem câmara inicial.

DISCUSSÃO E CONCLUSÕES

As determinações de altura da câmara e respectivas tensões, em tensiômetros transparentes, confirmam que suas relações obedecem à lei de Boyle-Mariotte para gases perfeitos. Podem ser representada por equações hiperbólicas do tipo:

$$y = \frac{A(x + C)}{B + (x + C)} \tag{1}$$

Nessa equação, a constante A corresponde ao valor máximo atingido pela tensão na câmara do tensiômetro, antes da ocorrência do colapso, e indica a altura da curva de regressão hiperbólica, normalmente, em torno de 800 mb. A constante B indica a maior ou menor curvatura, e a constante C,

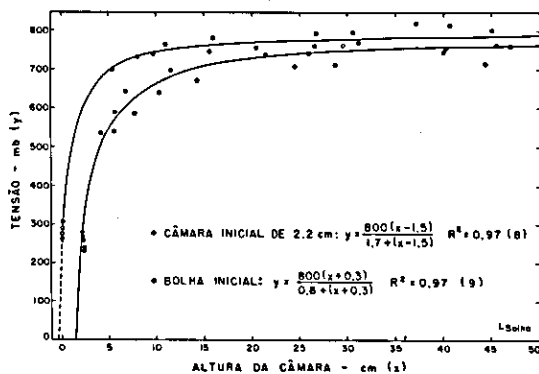


FIG. 7. Regressões entre tensões e alturas da câmara gasosa na quinta série de observações feitas às 9 horas em bateria de tensiômetros com manômetro de mercúrio. Dois tensiômetros foram operados com câmara inicial de 2,2 cm e dois partindo de pequena bolha inicial.

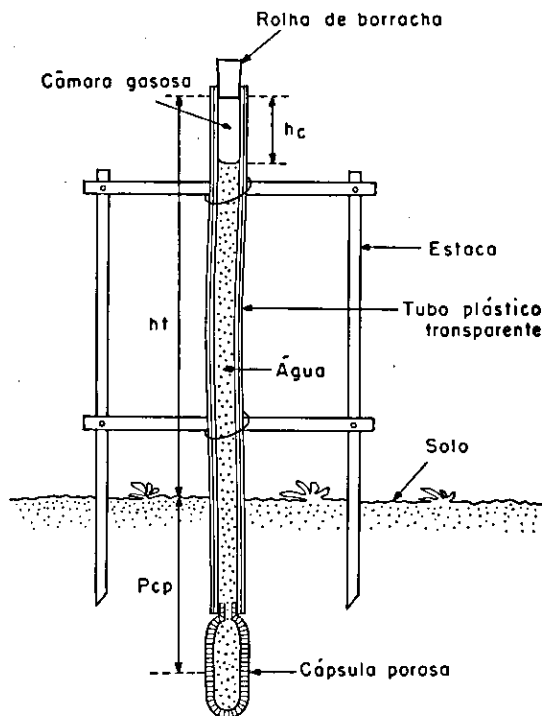


FIG. 8. Esquema do tensiômetro transparente, com tubo de plástico cristal flexível, de 1/2" de diâmetro interno e 5 mm de espessura de parede.

o ponto de origem da curva no eixo x, de altura da câmara.

As equações de regressão obtidas nas determinações em condições de campo apresentaram a constante A com o valor de 800 mb, como se pode ver nas Fig. 3 e 4. São curvas assintóticas com o ramo correspondente às tensões mais elevadas praticamente paralelas ao eixo de x, altura da câmara.

As formas e o ponto de origem das curvas no eixo de x dependeram, especialmente, do volume da câmara gasosa ao ser iniciada a operação dos tensiômetros. Quando as operações se iniciaram com o tubo cheio de água, isto é, sem câmara ou com câmara mínima, não superior a 0,2 cm, houve dificuldade para o desenvolvimento da mesma (equações 3, 7 e 9 e Fig. 4, 6 e 7). A constante C se apresentou positiva e a B com o valor muito baixo, de 0,8 ou menor. As curvas correspondentes tiveram o ponto de origem teoricamente na parte negativa da escala de x e suas curvaturas se mostraram muito agudas, resultando grande superestimativa dos valores de tensão em relação aos de altura da câmara.

Por sua vez, os tensiômetros operados a partir de câmara com altura inicial superior a 1,2 cm (equações 4 e 8 e Fig. 4 e 7), apresentaram equações de regressão com a constante C negativa e com a B bastante elevada, resultando curvas com o ponto de origem na parte positiva da escala de x e com curvaturas demasiado abertas. Elas trouxeram acentuada subestimativa dos valores de tensão em relação aos de altura da câmara.

A condições mais satisfatória, resultando curvas de regressão com origem no ponto zero da escala x, foi obtida com tensiômetros operados com câmara inicial entre 0,5 e 1,0 cm de altura (Fig. 3). A equação de regressão obtida, com a constante C, nula foi:

$$y = \frac{800 x}{1,8 + x} \quad (2)$$

Esta equação de regressão, bem como as demais correspondentes às diversas séries de determinações nas baterias de tensiômetros operados em condições de campo, podem ser consideradas de alto grau de confiança, pelos elevados coeficientes de determinação (R^2) encontrados, da ordem de 0,97 ou superiores.

Em determinações preliminares em condições de laboratório, usando tensiômetro com manômetro aneróide (Camargo et al. 1979), e em condições de campo, com tensiômetros dotados de manômetro de mercúrio (Camargo et al. 1981), obtiveram-se equações de regressão semelhantes, também com alto coeficiente de determinação, $R^2 = 0,97$. Diferenças nas constantes A e B se devem provavelmente a problemas de aferição dos manômetros de mercúrio e à presença de câmara de ar invisível no manômetro aneróide.

A recomendação habitual de empregar água previamente fervida, para expelir o ar dissolvido e evitar a formação de indesejável câmara de ar no alto do tubo, pode ser considerada desnecessária. A água comum de torneira foi usada sem problemas, desde que se reencha o tubo após a formação da pequena câmara inicial de cerca de 2 cm de altura. Verificou-se que esta se forma pela reunião de pequenas bolhas de ar, formadas na coluna de água pela volatilização do ar dissolvido, sob efeito de tensão no sistema, quando a tensão se aproxima de 400 mb (Tabela 3). Essa tensão de borbulhamento mostrou-se bem inferior àquela geralmente admitida na literatura como sendo de 0,8 atmosfera, cerca de 800 mb (Olitta 1976).

Com respeito à influência da hora de leitura dos tensiômetros, a Fig. 9, com base nos dados obtidos às 9 e às 16 horas, indica que os dados de tensão foram ligeiramente afetados. Observa-se que às

16 horas as tensões se apresentaram, em geral, inferiores às verificadas pela manhã às 9 horas. Apenas no início das determinações, enquanto as tensões se achavam bastante baixas, não se observaram redução das tensões nas leituras da tarde. Na manhã de 21 de julho, quando ocorreu geada severa e grande queda da temperatura, observaram-se tensões bem baixas nas leituras das 9 horas. Para o caso da altura da câmara, porém, a hora de leitura não trouxe qualquer efeito nos resultados obtidos.

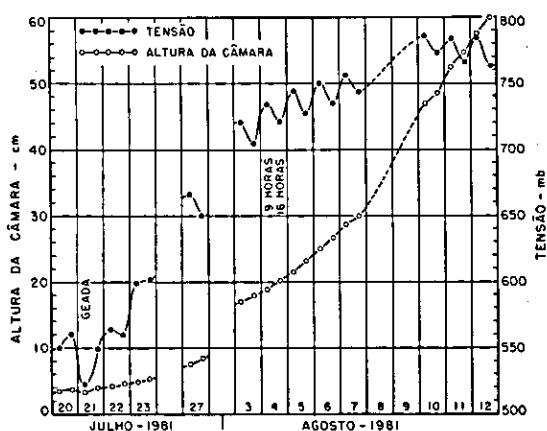


FIG. 9. Variação da altura da câmara e da tensão, obtidas às 9 e às 16 horas, na terceira série de leituras em tensiômetros instalados em condições de campo. Valores médios de dois tensiômetros operados com câmara inicial de 1,2 cm de altura.

TABELA 3. Tabela para conversão de altura de câmara gasosa (x) em tensão (y) para tensiômetros transparentes operados com câmara inicial entre 0,5 e 1,0 cm de altura, com base na equação $2: y = 800x / (1,8 + x)$.

Altura cm	Tensão mb	Altura cm	Tensão mb	Altura cm	Tensão mb	Altura cm	Tensão mb
1	286	11	688	22	740	45	769
2	421	12	696	24	744	50	772
3	500	13	703	26	748	55	775
4	552	14	709	28	752	60	777
5	588	15	714	30	755	65	778
6	615	16	719	32	757	70	780
7	636	17	723	34	760	80	782
8	653	18	727	36	762	90	784
9	667	19	731	38	764	100	786
10	680	20	734	40	766	110	787

As curvas de regressão, apresentadas na Fig. 5, também mostram pequena, mas consistente subestimativa das tensões, em cerca de 25 milibares, nas leituras das 16 horas em relação às das 9 horas.

Efeitos consideráveis da hora de leitura dos tensiômetros foram encontrados por Mather (1954) utilizando aparelhos com tubo metálico, bom condutor de calor. Haise (1955) considera que o calor conduzido, durante o dia ensolarado, para a cápsula, pelo tubo metálico do tensiômetro, pode aquecer e provocar alteração nos dados de tensão. Para reduzir a variação da temperatura na cápsula e a influência da hora de leitura, é recomendável o uso de tubo de baixa condutibilidade térmica, como é o caso do tubo de plástico empregado no tensiômetro transparente. Embora a influência na hora de leitura sobre os dados de tensão possa ser considerada pequena, quase desprezível, é recomendável fazer as leituras aproximadamente nas mesmas horas.

O colapso que se verifica quando a tensão sobe e se aproxima dos 800 mb, deve ser atribuída ao esgotamento da água na cápsula porosa do tensiômetro. Pode-se observar na Fig. 3 que o ramo da curva correspondente às tensões mais elevadas tende a tornar-se paralela (assintótica) ao eixo x, da altura da câmara. Assim, a câmara gasosa pode crescer rapidamente e atingir a cápsula esgotando a água da mesma. Com a cápsula seca e os poros vazios, o ar do solo é succionado rapidamente para o interior do tensiômetro, causando a anulação da tensão e o colapso.

O tensiômetro indica a tensão reinante na câmara, no topo da coluna de água do tubo. Para obter a tensão na cápsula e o potencial matricial da água do solo em contato, é necessário fazer correções (Reichardt 1978) em função da altura da coluna de água entre elas. Pode-se usar, para a correção, a equação:

$$T_{cp} = T_c - P_{cp} - ht + hc \quad (10)$$

onde: T_{cp} = tensão de cápsula em mb; T_c = tensão na câmara em mb; P_{cp} = profundidade da cápsula no solo em cm; ht = altura do tubo acima do solo em cm; hc = altura da câmara gasosa em cm. Nessa equação, considera-se o valor da tensão em milibares e da altura da coluna de água em centímetros, como equivalentes.

O tensiômetro transparente, operado com câ-

mara inicial entre 0,5 e 1,0 cm de altura, permite obter valores de tensão altamente consistentes e confiáveis, baseados em dados de altura da câmara gasosa. As relações entre a altura da câmara e as tensões lidas no tensiômetro transparente podem ser expressas pela equação 2, cuja utilização pode ser facilitada com o uso da Tabela 3.

Dada a simplicidade, o baixo custo e a facilidade de operação dos tensiômetros transparentes, torna-se possível utilizá-los em grande número de pontos no terreno e em várias profundidades no solo, permitindo determinar melhor as disponibilidades de umidade na zona das raízes e as necessidades de água nos trabalhos de irrigação.

REFERÊNCIAS

- BABOR, J.A. & IBARZ AZNAREZ, J. El estado gaseoso. In: _____ Química general moderna. Barcelona, Marin, s.ed., 1968. Cap. 4, p.45-9.
- BLACK, C.A. Soil - plant relationships. 2. ed. New York, John Wiley & Sons, 1968. 792p.
- CAMARGO, A.P. de; GROHMANN, F. & CAMARGO, M.B.P. de. Desenvolvimento de tensiômetro transparente para determinação de umidade do solo. In: CONGRESSO DE PESQUISAS CAFEEIRAS, 9, São Lourenço, MG, 1981. Resumos . . . Rio de Janeiro, IBC/GERCA, 1981. p.79-81.
- CAMARGO, A.P. de; GROHMANN, F. & CAMARGO, M.B.P. de. Tensiômetro simples de leitura direta. In: CONGRESSO DE PESQUISAS CAFEEIRAS, 7, Araxá, MG, 1979. Resumos . . . Rio de Janeiro, IBC/GERCA, 1979. p.44-6.
- GROHMANN, F. Equipamentos para pesquisas. B. Inf. Soc. Bras. Ci. Solo. Campinas, 3(1):7, 1978.
- GROHMANN, F. & PINTO, S.R. Fabricação e características de cápsulas porosas para tensiômetros. B. Inf. Soc. Bras. Ci. Solo. Campinas, 2(3):60, 1977.
- HAISE, H.R. How to measure the moisture in the soil. The Yearb. Agric.: Water. Washington, 32:362-71, 1955.
- MATHER, J.R. A summary of evapotranspiration at Seabrook, New Jersey 1947-1953. In: _____ The measurement of potential evapotranspiration. Seabrook, N.J., The Johns Hopkins University Laboratory of Climatology, 1954. v. 7, p.7-51. (Publications in Climatology, 1).
- OLITTA, A.F. Construção de tensiômetros para controle da irrigação. O Solo, Piracicaba, 68(2):16-20, 1976.
- REICHARDT, K. A água na produção agrícola. São Paulo, Mac Grow-Hill do Brasil Ltda., 1978. 119p.
- SEARS, F.W. & ZEMANSKY, M.W. Propriedades térmicas dos sólidos, líquidos e gases. In: _____ Física. Rio de Janeiro, Livro Técnico, 1959. p.377-413.
- SLAVIK, B. Determination of matric potential of soil. In: _____ Methods of studying plant water relation. Berlin, Springer Verlag, 1974. v. 9, p.170-5. (Ecological Studies).