AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DO TENSIÔMETRO DE BOLHA DE AR NA MEDIDA DO POTENCIAL MATRICIAL DA ÁGUA NO SOLO

MARCOS SCHIAVON VILLA NOVA
Engenheiro-Agrônomo

Orientador: ANTONIO SANCHEZ DE OLIVEIRA

Dissertação apresentada à Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" da Universidade de São Paulo, para obtenção do título de Mestre em Agronomia. Área de Concentração: Irrigação e Drenagem.

P I R A C I C A B A
Estado de São Paulo - Brasil
Agosto - 1991

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Livros da
Divisão de Biblioteca e Documentação - PCAP/USP

Villa Nova, Marcos Schiavon
V717a Avaliação do desempenho do tensiômetro de bolha de ar na medida do potencial matricial da água no solo. Piracicaba, 1991.
69p. ilus.

Diss. (Mestre) - ESALQ
Bibliografia.

1. Solo - Água - Potencial 2. Tensiômetro - Desempenho - Avaliação I. Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba

CDD 631.432

AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DO TENSIÔMETRO DE BOLHA DE AR NA MEDIDA DO POTENCIAL MATRICIAL DA ÁGUA NO SOLO

MARCOS SCHIAVON VILLA NOVA

Aprovado em 19.11.1991

Comissão Julgadora:

Prof. Dr. Antonio Sanches de Oliveira	ESALQ/USP
Prof. Dr. Klaus Reichardt	ESALQ/USP
Prof. Dr. Angelo Paes de Camargo	IAC

Prof. Dr. Antonio Sanches de Oliveira
Orientador

A ti, ó Deus, confiança e louvor
em Sião.
Os que habitam nos confins da terra
temem os teus sinais;
os que vêm do Oriente e do Ocidente
tu os fazes exultar de júbilo.
Tu visitas a terra e a regas;
tu a enriqueces copiosamente;
os ribeiros de Deus são abundantes de água;
preparas o cereal,
porque para isso a dispões;
regando-lhe os sulcos, aplanando-lhe as leivas.
Tu a amoleces com chuviscos;
e lhe abençoas a produção.
Coroas o ano da tua bondade,
as tuas pegadas destilam fartura;
destilam sobre as pastagens do deserto,
e de júbilo se revestem os outeiros.
Os campos cobrem-se de rebanho,
e os vales vestem-se de espigas;
exultam de alegria; e cantam.

SALMO 65 1a, 8-13

Aos meus queridos pais,

Nilson e Roselis,

D E D I C O

Ao Prof. Dr. Ângelo Paes de Camargo (o primeiro pesquisador a estudar o tensiômetro de bolha de ar),

O F E R E Ç O

A G R A D E C I M E N T O S

A Deus pela permissão.

À USP, CNPq e aos meus orientadores, Prof. Dr. Antonio Sanches de Oliveira e Nilson A. Villa Nova, pela oportunidade.

Aos Professores Klaus Reichardt, Sergio O. Moraes, Tarley A. Botrel e Sergio Duarte, pelas enormes contribuições e pela amizade.

Aos técnicos Ivan, Gilmar e Robinson Tuon, por suas inestimáveis ajudas.

SUMÁRIO

Página

RESUMO ..... viii.

SUMMARY ..... x.

1. INTRODUÇÃO 1

2. REVISÃO DE LITERATURA 2

2.1. Conceitos Teóricos 2

2.2. Tensiômetria 8

3. MATERIAL E MÉTODOS 14

3.1. Área Experimental 14

3.2. Solos 14

3.2.1. Solo Argiloso 14

3.2.2. Solo Arenoso 14

3.3. Montagem 16

3.3.1. Vasos 16

3.3.2. Tensiômetros 16

3.3.2.1. Cápsulas 16

3.3.2.2. Tensiômetros convencionais ... 18

3.3.2.3. Tensiômetros de bolha de ar .. 18

3.3.2.4. Montagem 20

3.4. Avaliação dos Potenciais da Água no Solo 21

3.4.1. Tensiômetro convencional 21

3.4.2. Tensiômetro de bolha de ar 22

3.5. Avaliação da Umidade do Solo 25

Página

3.6. Condução do Experimento 26
3.6.1. Ajuste iniciais 26
3.6.2. Início das leituras 27
3.6.3. Análises estatísticas 27
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO 28
4.1. Dimensionamento e Curvas de Resposta dos Tensiômetro de Bolha de Ar 28
4.2. Dados Obtidos de ψ x θ 31
4.2.1. Solo Argiloso 31
4.2.2. Solo Arenoso 31
4.3. Relações de Dependência Entre ψ x θ (Solo Argiloso) 31
4.3.1. Leituras das 9:00 36
4.3.2. Leituras das 16:00 36
4.4. Comparações ψ_{TBA} x ψ_{TC} (Solo Argiloso) 37
4.5. Erro Estimado do Tensiômetro de Bolha de Ar Devido a Diferenças de Temperatura 43
4.6. Relações de Dependência Entre ψ e θ (solo arenoso) 45
4.6.1. Leituras das 9:00 47
4.6.2. Leituras das 16:00 47
4.7. Comparações ψ_{TBA} x ψ_{TC} (Solo Arenoso) 50
4.8. Tempo de Resposta 50
4.9. Generalidades 56

Página

5. CONCLUSÕES 58

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 60

7. APÊNDICE 62

AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DO TENSIÔMETRO DE BOLHA DE AR NA MEDIDA DO POTENCIAL MATRICIAL DA ÁGUA NO SOLO

Autor: MARCOS SCHIAVON VILLA NOVA

Orientador: ANTONIO SANCHEZ DE OLIVEIRA

RESUMO

O tensiômetro de leitura direta (TBA) foi desenvolvido para substituir o tensiômetro convencional (TC) em medidas de potencial da água no solo. Para testar a performance do instrumento um experimento foi conduzido em condições de laboratório. Seis vasos foram preenchidos com cerca de 15 kg de solo arenoso e seis com cerca de 13 kg solo argiloso (solo seco ao ar). No centro dos vasos foram instalados seis tensiômetros de leitura direta e seis tensiômetros convencionais. Os vasos com tensiômetros foram saturados, cobertos com plástico e conduzidos a drenar por vários dias, após os quais, o plástico foi retirado iniciando-se um ciclo de secagem do solo. Cada vaso foi pesado diariamente para determinar-se a umidade do solo (θ). Os tensiômetros foram lidos duas vezes ao dia (as 9:00 hs e 16:00 hs). Em função disto foi possível estabelecer-se rela-

ções de dependência entre ψ e θ para os dois tensiômetros, para cada tipo de solo. Estudou-se também o efeito da pressão atmosférica e temperatura, na resposta dada pelo TBA. Verificou-se que o TBA tem um tempo de resposta mais baixo do que o TC sendo que os resultados obtidos indicaram que o TBA pode substituir o TC sem perda de precisão. As seguintes regressões lineares entre TBA e TC foram determinadas:

Solo Argiloso

Leituras das 9:00 AM

$$\psi_{(TBA)} = -24,35 + 1,20\ \psi_{TC}$$

$$r^2 = 0,996$$

Leituras das 16:00 PM

$$\psi_{(TBA)} = 20,46 + 1,11\ \psi_{TC}$$

$$r^2 = 0,999$$

Solo Arenoso

Leituras das 9:00 AM

$$\psi_{(TBA)} = -9,82 + 0,87\ \psi_{TC}$$

$$r^2 = 0,999$$

Leituras das 16:00 PM

$$\psi_{(TBA)} = 8,95 + 0,88\ \psi_{TC}$$

$$r^2 = 0,999$$

EVALUATION OF THE SIMPLIFIED DIRECT READING "AIR POCKET" TENSIOMETER FOR MATRIC WATER POTENCIAL MEASUREMENTS

Author: MARCOS SCHIAVON VILLA NOVA

Adviser: ANTONIO SANCHEZ DE OLIVEIRA

SUMMARY

The direct reading "air pocket" tensiometer (APT) was developed to substitute the conventional tensiometer (CT) in field measurements of soil water status (matric water potential ψ_m). In order to test the performance of such instrument an experiment was conducted under laboratory conditions, where 6 containers were filled with about 22 kg of a dry sandy soil and other six with abont 13 kg of a dry clayey soil. Each container received either a CT or a APT in the center of the soil volume. The containers were then saturated, covered with plastic and left to drain the excess water for several days. Plastic covers were removed to begin a drying cycle, being each container weighted daily in order to estimate its soil water content (θ). The tensiometers were read twice a day (at 9 a.m. and at 4:0 p.m.). Therefore, it was possible to

establish the relationship ψ versus θ for both, the CT and the APT for each soil type. It was possible to determine the effect of both, air pressure and temperature, upon the results given by the APT. The APT had a lower time response than the CT. Therefore, the results obtained here indicate that the DRT can replace the CT without precision loss. The following linear regressions between ψ_{APT} and ψ_{CT} were found:

Clay Soil

9:00 A.M. Readings

$$\psi_{(APT)} = -24,35 + 1,20\ \psi_{CT}$$

$$r^2 = 0,998$$

4:00 P.M. Readings

$$\psi_{(APT)} = 20,46 + 1,11\ \psi_{CT}$$

$$r^2 = 0,999$$

Sandy Soil

9:00 A.M. Readings

$$\psi_{(APT)} = -9,82 + 0,87\ \psi_{CT}$$

$$r^2 = 0,999$$

4:00 P.M. Readings

$$\psi_{(APT)} = 8,95 + 0,88\ \psi_{CT}$$

$$r^2 = 0,999$$

1. INTRODUÇÃO

Com a possibilidade da irrigação, podemos obter um aumento da produtividade não só pelas condições de um melhor manejo hídrico das culturas, como pela diminuição do processo degradativo do solo, pois a irrigação possibilitaria rotações com culturas anuais de interesse econômico, cujas limitações poderiam ser suas necessidades hídricas.

Um manejo correto da irrigação para obtenção de uma produtividade viável economicamente, seria aquele em que aplica-se água no solo no momento oportuno e em quantidade suficiente para suprir às necessidades hídricas das culturas, sem falta ou desperdício de água e energia. Para que isto ocorra, há necessidade do uso de métodos de campo que determinem direta ou indiretamente a disponibilidade de água no solo para uma determinada cultura.

Entre os instrumentos disponíveis para avaliação da umidade do solo a baixas tensões (aproximadamente 0,8 at) o tensiômetro convencional de mercúrio, situa-se praticamente em primeiro plano, sendo largamente utilizado para monitoramento de irrigação, determinações de condutividade hidráulica do solo e outras finalidades. O tensiômetro convencional é um instrumento de fácil construção desde que

se utilize material adequado, mas não prescinde da utilização de mercúrio que além de ser caro, necessita de cuidados no seu manuseio (limpeza e lavagem periódica) sob pena de sofrer o fracionamento da coluna, que ocasiona erros de leitura bastante inconvenientes.

CAMARGO *et alii* (1982) procurando uma solução mais simples idealizou o tensiômetro de leitura direta, calibrando-o com comparações de leituras simultaneas com tensiômetros aneróides, todavia sem realizar um estudo físico detalhado do seu comportamento.

VILLA NOVA *et alii* (1989) estudando as condições de equilíbrio do tensiômetro de leitura direta propõe uma equação de calibração e em função disto uma geometria de construção padrão, sem contudo testar as formulações propostas.

No presente trabalho readaptando as equações e a geometria proposta por VILLA NOVA *et alii* (1989), conduziram-se calibrações do método contra medidas simultâneas do tensiômetro convencional, sob condições de laboratório, em dois tipos de solo (argiloso e arenoso), propondo-se um modêlo de construção mais rústica. Simultaneamente uma análise de prováveis erros de determinação do potencial foi realizada, para melhor adequar a sua utilização.

Os resultados obtidos para os dois tipos de solo ensaiados demonstraram ser viável a utilização do tensiômetro de leitura direta.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Conceitos Teóricos

Tanto a água como qualquer partícula na natureza tem como característica um estado de energia. A física clássica reconhece como formas principais de energia a cinética e potencial. Como o movimento de água no sistema solo-planta-atmosfera é muito lento, a energia cinética é desprezível. A energia potencial por ser uma função da posição física em relação ao ponto de referência, e da condição interna da água em um ponto considerado, é importante para caracterizar seu estado de energia total.

A tendência espontânea de toda matéria na natureza é assumir um estado de energia mínima, procurando equilíbrio com o meio ambiente.

A água é a mesma em qualquer posição e tempo dentro do solo. Ela não difere na forma, mas sim em seu estado de energia, pois no solo, está sujeita a uma variedade de forças, cada uma relacionada com o seu potencial parcial, as quais, causam a variação do potencial total daquela da água livre e pura. As forças que resultam da atração da água pela matriz do solo causam a existência de um potencial ma-

tricial (ψm). A presença de sais dissolvidos resulta em um estado de energia chamado de potencial osmótico (ψos). A ação da pressão local na fase gasosa do solo, ou o fato do solo estar sujeito a uma carga hidráulica ou a uma tensão, resulta em um estado de energia causador do potencial de pressão (ψp). Finalmente, a ação do campo gravitacional terrestre indica que todo corpo nele presente tem um potencial gravitacional (ψg). O potencial total da água no solo (ψt) pode ser considerado como a somatória das contribuições destes componentes, mas a adição de outros componentes é em muitos casos necessário.

A componente matricial (ψm) da água no sistema solo-planta, ao contrário do potencial gravitacional e de pressão, não pode ser calculada deterministicamente, devido à complexidade e heterogeneidade dos fatores envolvidos, mas pode ser medida experimentalmente por meio de tensiômetros ou instrumentos de sucção ou pressão. Esta componente é resultado de forças capilares (advém da tensão superficial da água e do ângulo de contato com as partículas sólidas) e da adsorção (observada em formas de capa de hidratação sobre a superfície das partículas). A adsorção é mais importante em solos argilosos, porque também sofre influência da dupla camada elétrica e dos cátions trocáveis presentes e capilaridade tem maior importância em solos arenosos, devido a poros e partículas relativamente grandes. Para um solo mais úmido as forças capilares são mais importantes e a medida que a umidade decresce as forças adsortivas vão tomando seu lugar.

Numa amostra homogênea de terra, cada valor do potencial mátrico corresponde a uma certa umidade volumétrica (θ). A representação gráfica do potencial mátrico (ψm) em função da umidade volumétrica (θ) é uma característica da amostra de terra e é chamada de "curva característica da umidade" ou "curva de retenção". Esta curva passa a depender do arranjo, do tamanho e da forma das partículas do solo que por sua vez, determinam as dimensões dos poros. Em situações de altos teores de água, onde os fenômenos capilares são de maior importância, o potencial mátrico (ψm) passa a ser basicamente uma função da distribuição da porosidade do solo e da densidade global. Na Figura 2.1 podemos observar as curvas características da umidade do solo para solos tipicamente argiloso e arenoso e também um solo qualquer em estrutura natural e compactado.

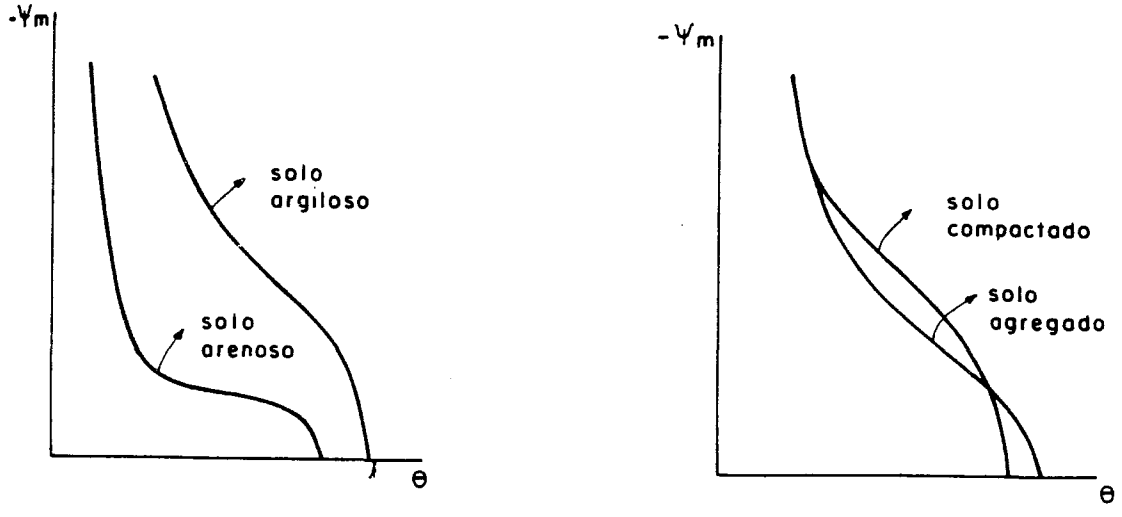


Figura 2.1 - Curvas características da umidade do solo (REICHARDT, 1985).

A umidade de saturação (θs) Figura 2.1 é igual à sua porosidade total e maior no solo argiloso em relação ao solo arenoso. Ao compactarmos um solo θs diminue, pois a compactação diminue sua porosidade. Na situação de potencial mátrico nulo (ψm = 0) o solo está saturado e em equilíbrio com a água pura à mesma elevação.

Com a obtenção do valor de umidade em volume (θ) de um solo e fazendo uso de sua curva característica podemos estimar o potencial mátrico e vice-versa. Se mantivermos a geometria da amostra do solo, durante o tempo, a curva característica é considerada única para o procedimento experimental na qual foi gerada, pois ainda não existe uma teoria satisfatória para sua obtenção que pode ser por "secamento" ou "molhamento". No secamento (método usado neste trabalho) toma-se uma amostra de terra inicialmente saturada de água e aplica-se à mesma tensões cada vez maiores, fazendo medidas sucessivas de umidade (θ) em função da tensão (ψm). No molhamento toma-se uma amostra inicialmente seca ao ar e permitimos seu gradual molhamento por redução da tensão. Os dois métodos originam curvas contínuas que são diferentes para uma mesma amostra. Esta diferença chamamos de histerese (Figura 2.2).

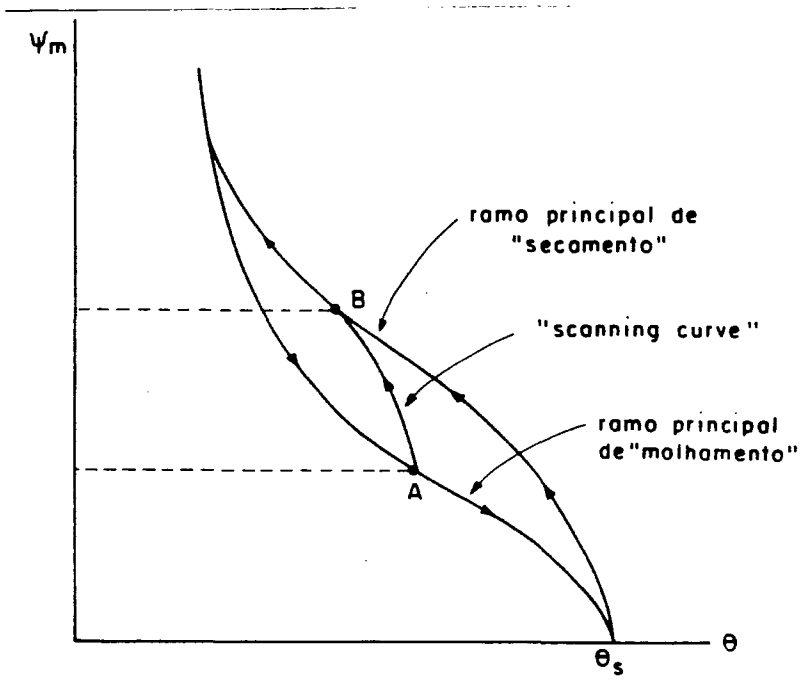


Figura 2.2 - Curvas de retenção (histerese) (REICHARDT, 1985).

Na Figura 2.2 podemos observar que a umidade de equilíbrio a uma dada tensão é maior na drenagem (secamento) do que na infiltração (molhamento) e ainda, se a determinação da curva característica for gerada de um regime dinâmico os resultados seriam diferentes de um processo desenvolvido em equilíbrio. Para aceitarmos a curva de potencial mátrico em função da umidade volumétrica ($\psi(\theta)$) como única devemos considerar separadamente a drenagem (secamento) e a infiltração (molhamento) e não ambos em conjunto, tomando para cada caso a curva correspondente.

A curva de retenção é de fundamental importância para a física de solos porque expressa a influência da estrutura, porosidade, textura e drenagem. A sua variação em um perfil determina a direção e a influência da taxa de movimento de água no solo e a retirada de água pelas raízes.

2.2. Tensiômetria

Desde 1922 os tensiômetros foram utilizados para estimar a tensão da água em solos não saturados (GARDNER *et alii*, 1922). Segundo citado por RICHARDS & GARDNER em 1936, o tensiômetro era a combinação de uma membrana porosa e um medidor de pressão, para medida da tensão capilar ou a energia que a água está retida no solo e o termo energia era expresso como pF, definido como logarítmo da altura da coluna de água (em centímetros) equivalente a tensão da água no solo ou de um potencial (energia por unidade de massa em volume). Por facilidade de medida e cálculo, a unidade de energia por unidade de peso é a de maior emprego em cálculos de balanço hídrico, irrigação, etc, pois representa uma coluna de água (LIBARDI, 1984; ROSE; 1986; RICHARDT, 1975).

O tensiômetro convensional consiste numa cápsula porosa conectada a um manômetro através de um tubo que possui em seu interior uma coluna contínua de água unindo a cápsula de cerâmica ao dispositivo de medida que pode ser simples tubo em "u" de água e mercúrio (Figura 2.3).

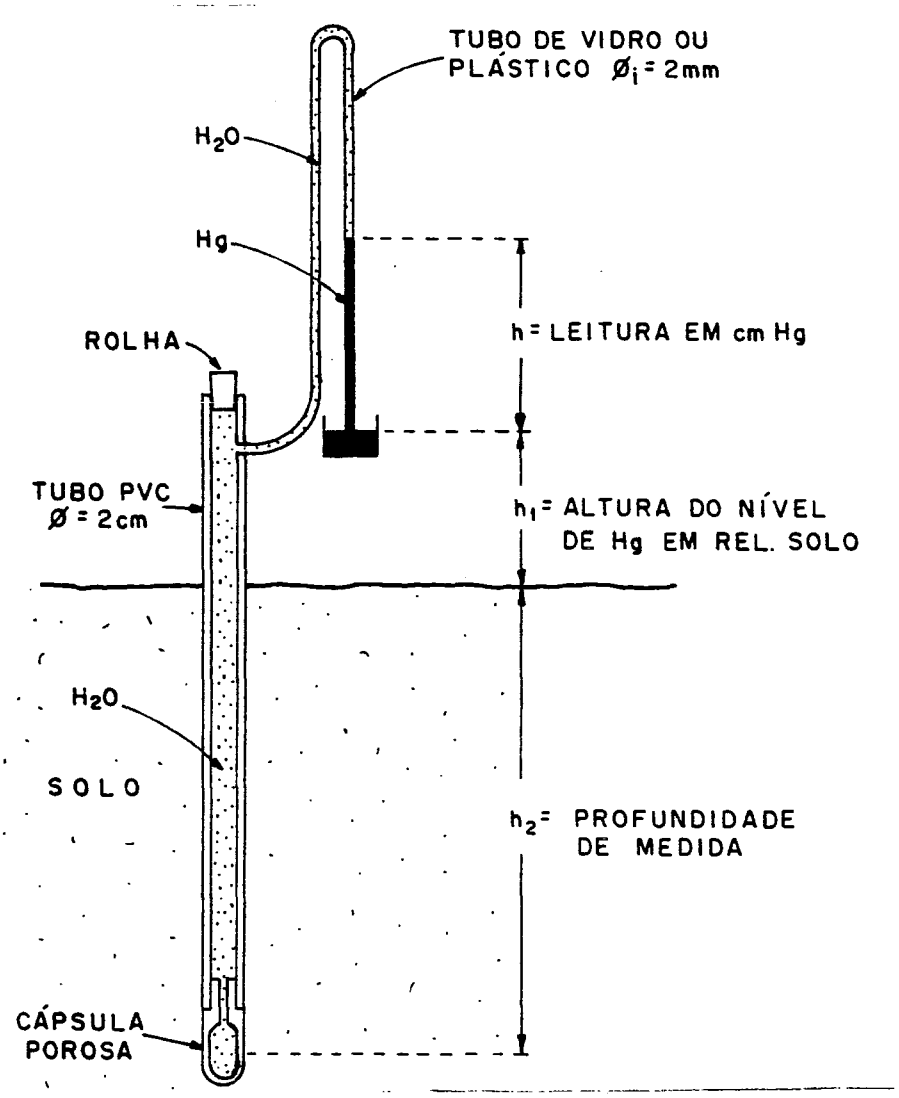


Figura 2.3 - Tensiômetro convencional com manômetro de mercúrio (REICHARDT, 1985).

Quando a cápsula entra em contato com o solo, a água do tensiômetro (que é herméticamente fechado) entra em contato com a água do solo e o equilíbrio tende a estabelecer-se. Antes de colocar-mos o instrumento em contato com o solo, sua água está a pressão atmosférica, o potencial matrico é nulo ($\psi m = 0$). A água do solo, estando sob tensão, exerce uma sucção sobre o instrumento e dele retira certa quantidade de água causando a queda de sua pressão interna. Como o instrumento é vedado, a coluna de mercúrio h do manômetro cresce, indicando a tensão interna da água. Estabelecido o equilíbrio, o potencial da água dentro do tensiômetro é igual ao potencial da água do solo e assim h é uma medida direta do potencial mátrico (ψm) (REICHARDT, 1975).

A cápsula do tensiômetro geralmente é de cerâmica, mas pode ser constituída de materiais como por exemplo filtros plásticos e fibra de vidro, desde que resista a pressão submetida e permita que água e solutos passem livremente, mas impedindo a passagem de partículas de solo e ar. Ela funcionará como uma membrana permeável, permitindo que a água dentro do tensiômetro fique com a mesma composição e concentração da água do solo e, isso implica que o tensiômetro não mede potencial osmótico, a menos que seja equipado com algum sensor especial para sais (OLITTA, 1974).

O intervalo de ação do tensiômetro para estimativa do potencial mátrico é limitado, porque a uma tensão de aproximadamente 0,8 atm, ocorrerá uma ruptura da coluna

de água ou a entrada de ar no sistema, igualando a pressão interna a atmosférica (HILLEL, 1971). Para solos arenosos o intervalo de ação do tensiômetro pode cobrir até 90% da água disponível o que não ocorre em solos argilosos e por exemplo um solo com 42% de montmorilonita, a tensão pode variar de 200 a 800 cm de água para apenas 1% de variação de umidade (ABELE *et alii*, 1979).

O tensiômetro presta-se principalmente para controle de irrigação intensiva sendo colocado em uma ou mais profundidades dentro das raízes (RICHARDS *et alii*, 1961).

Para efeito de pesquisa KLUTE & GARDNER (1961) dividiram o estudo do tempo de resposta do tensiômetro em duas considerações distintas onde, em um delas, consideraram apenas as características do instrumento controlando o tempo de resposta e a condutividade hidráulica como limitante. Para este estudo definiram três fatores que podem atuar no tempo de resposta. O primeiro deles foi a condutância hidráulica (k) da cápsula, que é definida como o volume de líquido que atravessa a membrana porosa na umidade de tempo e pela diferença de tensão entre o interior e o exterior da cápsula,

$$K = \frac{\Delta V}{\Delta t . \Delta h} = cm^2/seg$$

O segundo fator, já tinha sido definido por RICHARDS & NEAL em 1937 como sensibilidade do dispositivo de medida (S). Diz respeito a variação de pressão registrada no

dispositivo de medida pelo volume de água transferido para o solo ou vice-versa.

$$S = \frac{\Delta h}{\Delta V} \ (cm^{-2})$$

Quando o tensiômetro perde água, passa a ter queda na sua pressão hidrostática que é registrada pelo dispositivo de medida e, quanto menor for a perda de água para registrar uma mesma diferença de pressão, menor o tempo de resposta e mais sensível será o dispositivo de medida.

O terceiro fator estudado que atua no tempo de resposta, é a condutividade hidráulica do solo porque, quando o tensiômetro está instalado e funcionando, modifica o sistema água-solo uma vez que libera água para o solo. O tempo de resposta será tão curto quanto o tempo que o solo gastaria para armazenar e redistribuir a água liberada e por isso quanto maior a condutividade hidráulica de um solo menor será o tempo de resposta.

TOWER (1980) estabeleceu um critério adequado para analisar o caso geral em que tanto o tensiômetro como o solo controlam o tempo de resposta.

Os tensiômetros possuem inúmeras vantagens no seu uso para estimativa do potencial mátrico do solo (SCHMUGGE *et alii*, 1980), mas se seu uso não é tão intenso é porque são facilmente danificáveis, às vezes caros e requerem uma manutenção cuidadosa. Os tensiômetros equipados com tensiômetro de mercúrio não são caros, são sensíveis, mas requerem cuidado no manuseio do mercúrio, além de manutenção

constante a nível de campo. Com o objetivo de minimizar os custos e eliminar o uso de mercúrio. PAES DE CAMARGO *et alii* (1982) desenvolveu e testou um tensiômetro em um tubo transparente (chamando-o de tensiômetro simples de leitura direta), baseado na expansão de uma câmara de ar, deixada propositalmente dentro do tensiômetro e cuja variação foi correlacionada com a tensão matricial no solo estimada por um tensiômetro aneróide adjacente. VILLA NOVA *et alii* (1989) propuseram um modelo matemático teórico para este mesmo tensiômetro (chamando-o de tensiômetro de bolha de ar), onde estudaram as variáveis climáticas que interagem sobre o mesmo. Neste trabalho, além de verificarmos o emprego deste modelo matemático, estaremos mudando a geometria da construção a fim de obter uma melhor performance de seu desempenho.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Área Experimental

O presente trabalho foi conduzido no laboratório de solos do Departamento de Engenharia Rural da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"/USP, Piracicaba - SP, (Latitude 22°43'S 47°38' Longitude W e Altitude de 540 m).

3.2. Solos

Foram utilizados dois solos extremos em termos de capacidade de contenção de água, sendo um muito argiloso e outro arenoso, caracterizados a seguir:

3.2.1. Solo argiloso - classificado como Latossolo Vermelho Escuro (UDOX)

3.2.2. Solo arenoso - classificado como Areia Quartzosa (TROPEPT)

As amostras de solo foram conduzidas ao laboratório, e após liberadas de corpos estranhos, foram homoge-

nizadas e postas a secar ao ar livre para posterior utilização. Uma fração das amostras foi enviada para o Departamento de solos da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"/USP onde foram realizadas as análises mecânicas e químicas que são demonstradas nos Quadros 3.1 e 3.2.

Quadro 3.1 - Análise mecânica (mm) (%), Pipeta, dos solos utilizados (Departamento de Solos ESALQ/USP).

IDENTIFICAÇÃO (SOLO)	AREIA MUITO GROSSA	AREIA GROSSA	AREIA MÉDIA	AREIA FINA
	(2:1)	(1:0,5)	(0,5:0,25)	(0,25:0,10)
Argiloso	00	03	12	02
Arenoso	00	03	52	34

IDENTIFICAÇÃO (SOLO)	AREIA MUITO FINA	AREIA	SILTE	ARGILA	
	(0,10:0,005)	(2-0,005)	(0,05-0,002)	0,002	DISP. EM ÁGUA
Argiloso	01	18	18	64	21
Arenoso	01	90	02	08	04

Quadro 3.2 - Análise química dos solos utilizados (Departamento de Solos ESALQ/USP).

IDENTIF. (SOLO)	pH $CaCl_2$	MO %	P^*	$S\text{-}SO_4$	K	Ca	Mg	Al	H+Al	SB	T	V	Al
			mg/cm^3		$meq/100\ cm^3$								
Argiloso	5,7	2,2	6	-	0,12	6,17	1,46	-	2,5	7,75	10,25	76	-
Arenoso	4,1	1,0	3	-	0,14	0,10	0,08	-	2,2	0,22	2,42	9	-

3.3. Montagem

3.3.1. Vasos

Para acondicionamento dos solos foram utilizados vasos de plástico de forma tronco cônica (ϕ superior de 28 cm e ϕ inferior de 20 x 30cm de altura), volume de 13 litros. A drenagem foi feita por 5 furos (ϕ 1 cm) no fundo do vaso. Para impedir-se a perda de solo foi colado um pedaço de bidin no fundo do vaso e para facilitar a drenagem foi colocado 5 cm de pedrisco pequeno em cima do bidin. Em seguida, o solo seco ao ar com massa seca conhecida foi colocado sobre o pedrisco em arrimo natural.

3.3.2. Tensiômetros

3.3.2.1. Cápsulas

Na determinação da condutância hidráulica foram testadas por volta de 100 cápsulas de fabricação nacional. A metodologia utilizada foi a de carga decrescente que consiste na determinação do tempo que uma coluna de água, que atua em carga sobre a cápsula, leva para cair alturas previamente determinadas em um tubo transparente.

A fórmula utilizada para seu cálculo foi a seguinte:

$$K = \frac{a \ \ell n \ (H_1/H_2)}{t_2 - t_1}$$

onde:

K = condutividade hidráulica (cm^2/s);

a = secção do tubo transparente;

H_1 e H_2 = potenciais hidráulicos nos tempos t_1 e t_2 (cm);

$t_2 - t_1$ = intervalo de tempo que o nível de água leva para variar de H_1 para H_2.

No Quadro 3.3 são relatados os resultados da determinação da condutividade hidráulica do conjunto de cápsulas utilizadas no experimento. O teste foi realizado com a finalidade de verificar algum defeito de fabricação e condições de homogeneidade para a experimentação.

Quadro 3.3 - Condutividade hidráulica (cm^2/s) das cápsulas tensiométricas.

NÚMERO DE CONTROLE DA CÁPSULA	NÚMERO DO TENSIÔMETRO	CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA (cm^2/s)
150	1	$1,8119 \times 10^{-4}$
175	2	$1,9744 \times 10^{-4}$
361	3	$1,6500 \times 10^{-4}$
354	4	$1,6129 \times 10^{-4}$
333	5	$1,5475 \times 10^{-4}$
242	6	$1,8074 \times 10^{-4}$
223	7	$1,8351 \times 10^{-4}$
170	8	$1,9744 \times 10^{-4}$
383	9	$1,3193 \times 10^{-4}$
230	10	$1,7720 \times 10^{-4}$
343	11	$1,7617 \times 10^{-4}$
393	12	$1,8293 \times 10^{-4}$

✳ 3.3.3.2. Tensiômetros convencionais

Denominamos de tensiômetro convencional aquele que se utiliza de mercúrio para medir as depressões resultantes da sucção do solo. As cápsulas foram coladas com araldite em tubo de PVC [ϕ 3/4" (1,905 cm) x 60 cm]. Da maneira usual conectou-se um pedaço de baguete do tubo a um depósito de mercúrio de vidro (vide Figura 3.1).

✳ 3.3.3.3. Tensiômetro de bolha de ar

Construídos com tubo de PVC [ϕ 3/4" (1,905 cm) x 60 cm] na porção inferior. A porção superior constituiu-se de tubo de PVC transparente [ϕ 3/8" (0,952 cm) x 64 cm] colado com araldite no tubo ϕ 3/4" (1,905 cm) e fechado por tampa removível (com rosca e junta de borracha) na parte superior. A cápsula foi conectado de maneira idêntica a realizada no tensiômetro convencional. A construção aqui descrita é uma modificação daquela proposta por VILLA NOVA *et alii* (1989) com a finalidade de tornar o equipamento economicamente mais viável, e de mais fácil operacionalidade.

A - CORPO DO TENSIÔMETRO DE BOLHA DE AR
B - CORPO DO TENSIÔMETRO CONVENCIONAL
C- VASOS CONTENDO SOLO
D - DEPÓSITO DE MERCÚRIO
E - TAMPA ROSQUEADA
F - CORPO SUPERIOR DO TENSIÔMETRO DE BOLHA DE AR
G - BAGUETE
H - HASTE SUPORTE DE ALUMÍNIO
I - TAMPA ROSQUEADA

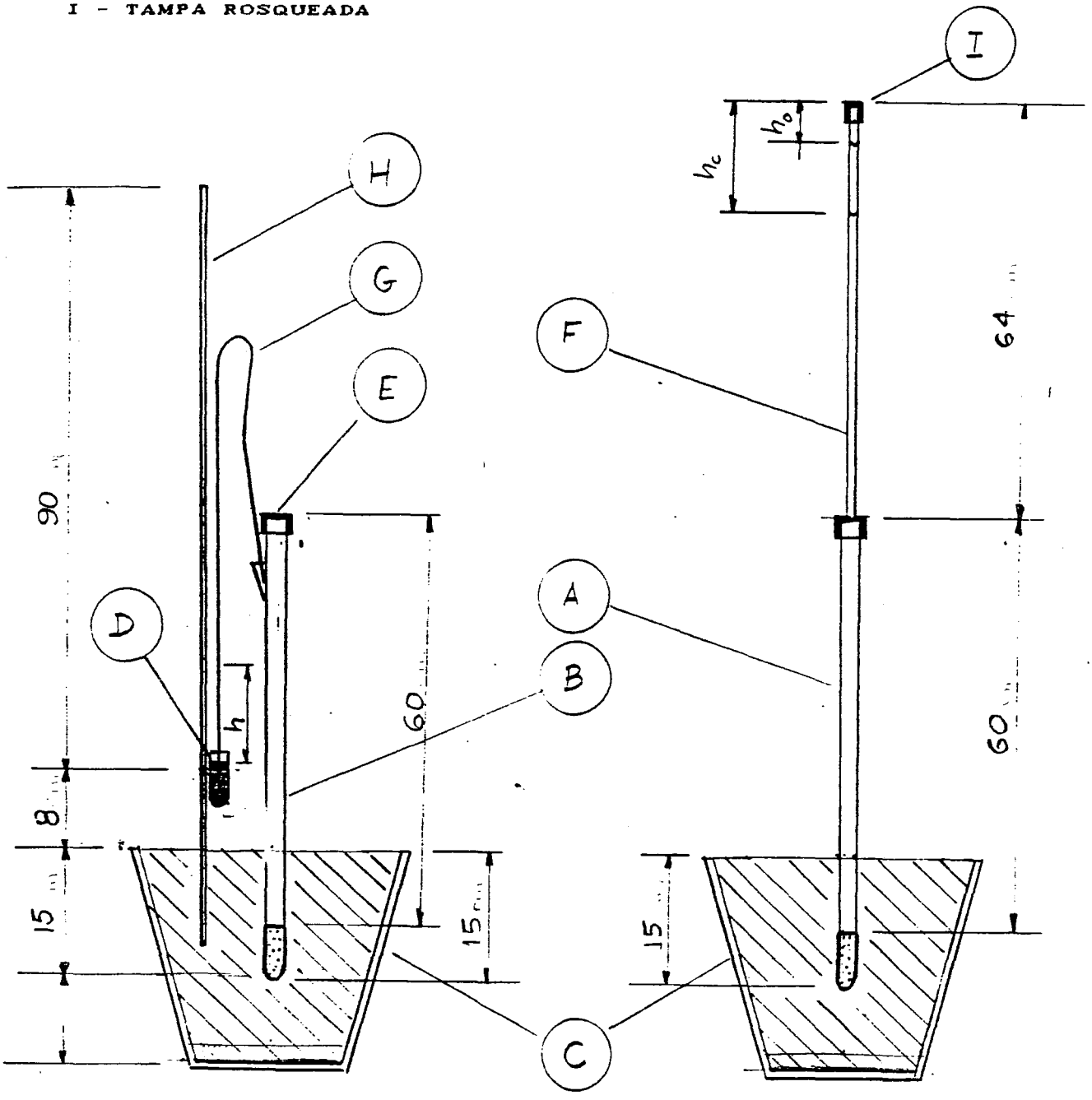


Figura 3.1 - Crôqui da montagem e detalhes dos tensiômetros convencional e de bolha de ar.

3.3.3.4. Montagem

A montagem dos tensiômetros convencionais e de leitura direta nos vasos contendo solo é mostrada no crôquis da Figura 3.1. Dentro de cada vaso as cápsulas foram colocadas a profundidade de 15 cm. De acordo com a especificação descrita foram montados e numerados, 12 conjuntos tensiômetro/vaso sendo:

3 conjuntos tensiômetro convencional em solo argiloso
(Tensiômetros nº 2, 4 e 6)

3 conjuntos tensiômetro bolha de ar em solo argiloso
(Tensiômetros nº 7, 9 e 11)

3 conjuntos tensiômetro convencional em solo arenoso
(Tensiômetros nº 8, 10 e 12)

3 conjuntos tensiômetro bolha de ar em solo arenoso
(Tensiômetros nº 1, 3 e 5)

Os vasos montados foram colocados sobre uma mesa no laboratório de física de solos do Departamento de Engenharia Rural/ESALQ. Na Figura (3.2) (fotografias) é mostrada uma vista da montagem dos conjuntos.

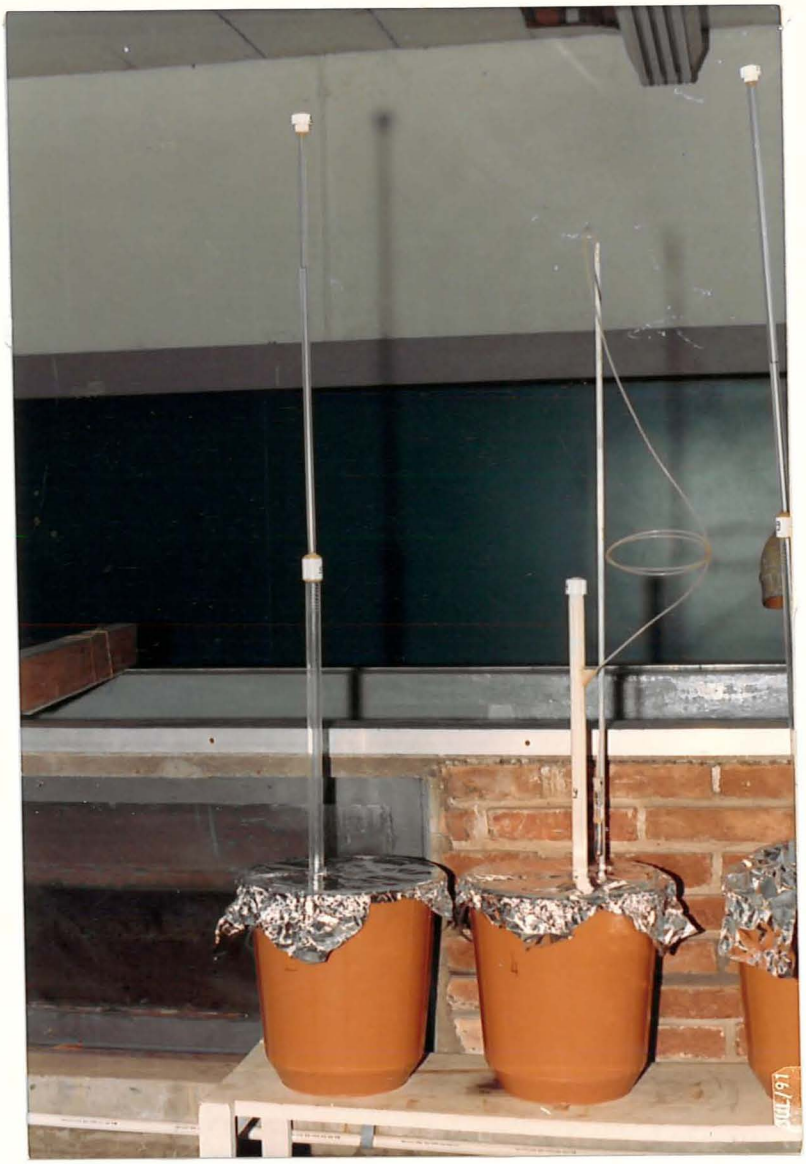


Figura 3.2 - Vista da montagem dos tensiômetros.

3.4. Avaliação dos Potenciais da Água do Solo

3.4.1. Tensiômetro convencional

A avaliação do potencial da água no solo pelo tensiômetro convencional foi realizada através da equação usual:

$$\psi_c = 12,6\ h + (h_1 + h_2) \qquad (3.1)$$

onde:

ψ_c = potencial mátrico (cm H_2O), medido pelo tensiômetro convencional;

h = altura de equilíbrio da coluna de mercúrio (cm);

h_1 = distância do nível de mercúrio na cuba ao nível do solo (8 cm na montagem descrita);

h_2 = distância do nível do solo ao meio da cápsula de cerâmica (15 cm na montagem descrita).

De acordo com a montagem (vide Figura 3.2) os valores de h_1 e h_2 foram respectivamente 8 e 15 cm. Assim sendo a equação (3.1) tornou-se

$$\psi_c = -12,6\ h + 23,0 \qquad (3.2)$$

3.4.2. Tensiômetro de leitura direta

De acordo com as modificações introduzidas na geometria de construção, a condição de equilíbrio que nos permite avaliar o potencial da água no solo através do tensiômetro de bolha de ar (ψ_{TBA}) modificado é a seguinte: O Tensiômetro (Figura 3.3) é de cheio d'água pela parte superior deixando-se uma camara vazia inicial de altura h_o, que irá estabilizar-se na altura h, com o solo saturado.

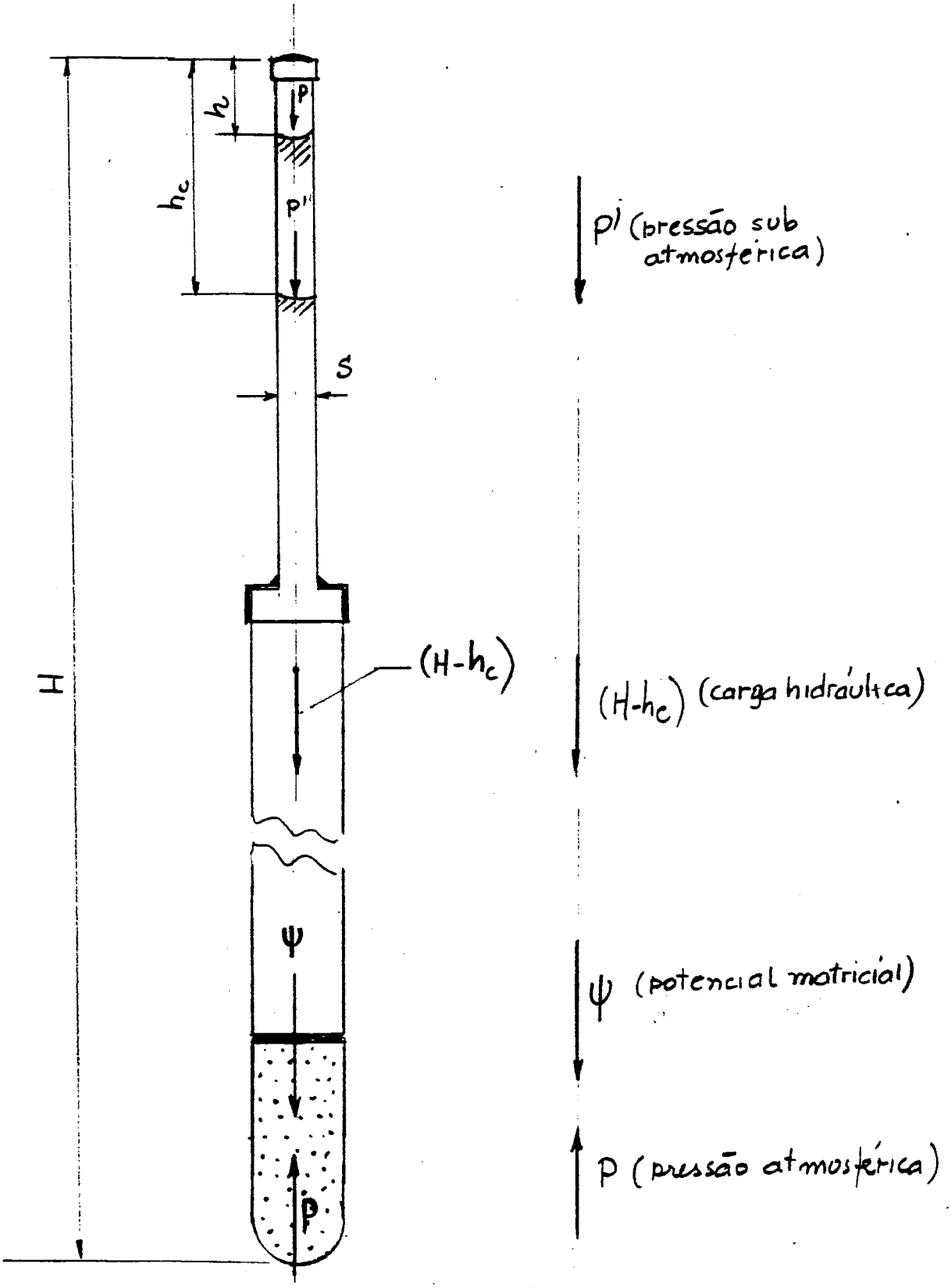


Figura 3.3 - Diagrama de pressões de equilíbrio no tensiômetro de bolha de ar.

De acordo com a sucção ψ exercida pelo solo, a medida que o mesmo seca parte da água escoa pela cápsula e num estado de equilíbrio qualquer a camara vazia atinge a altura h_c. As pressões (forças por unidade de área) que mantém este equilíbrio são:

P = pressão atmosférica

P' = pressão do interior da camara gasosa

$(H-h_c)$ = carga hidráulica

ψ = pressão de sucção (potencial) da água do solo

No equilíbrio teremos:

$$P = P' + (H-h_c) + \psi \qquad (3.3)$$

Sendo a secção de tubo S, a relação entre as pressões P (pressão atmosférica local) e a pressão P' (pressão no interior da camara estabilizada de altura h_c) de acordo com a equação geral de estado dos gases, será,

$$\frac{P'V'}{T'} = \frac{PV}{T} \qquad (3.4)$$

onde T' e T são as temperaturas ($^{\circ}K$), respectivamente na hora da leitura da camara e na hora do fechamento.

Considerando-se também que,

$$V' = Sh_c \qquad e \qquad V = Sh \qquad (3.5)$$

Substituindo-se (3.5) em (3.3) e rearranjando teremos,

$$\psi = P\left[1 - \frac{h}{h_c}\,\frac{T'}{T}\right] - \left[H - h_c\right] \qquad (3.6)$$

Para efeitos práticos considerando-se que as temperaturas T' e T não sejam muito diferentes (processo aproximadamente isotérmico) a equação (3.6) tornar-se:

$$\psi = P\left(1 - \frac{h}{h_c}\right) - \left(H - h_c\right) \qquad (3.7)$$

De acordo com a convenção (mínimo potencial da água no solo igual a zero) a equação (3.7) tornar-se:

$$\psi_{LD} = - P\left(1 - \frac{h}{h_c}\right) + \left(H - h_c\right) \qquad (3.8)$$

Ajustando as unidades, para expressar ψ agora denominado ψ_{LD} (potencial da água do solo lido pelo tensiômetro de leitura direta), sendo a pressão local em média (com pequenas variações) igual a 71 cm de Hg (965 cm de coluna d'água) teremos para a equação (3.8)

$$\psi_{LD} = - 965\left(1 - \frac{h}{h_c}\right) + \left(H - h_c\right) \qquad (3.9)$$

Sendo também nas condições específicas do experimento, H = 130 cm, e a altura da camara inicial depois do fechamento, h = 3 cm, a equação (3.9) torna-se:

$$\psi_{LD} = - 835 + \frac{2895}{h_c} - h_c \quad (cm\ h_2o) \qquad (3.10)$$

A equação (3.10) nos fornece a medida do potencial matricial estimado pelo tensiômetro de leitura direta, nas dimensões construtivas, em cm de água, em função da altura de equilíbrio h_c em cm, lida num instante qualquer.

3.5. Avaliação da Umidade do Solo

A umidade dos solos arenosos e argiloso dentro dos vasos (θ%), foi avaliada em um instante qualquer pela equação:

$$e\% = \left(\frac{M_{su} - M_{ss}}{M_{ss}} \times dg \right) \times 100 \qquad (3.11)$$

sendo:

M_{su} = massa do solo umido (g);

M_{ss} = massa do solo seco (g);

dg = densidade global do solo (g/cm^3).

A densidade global foi avaliada dividindo-se a massa de solo seco em estufa pelo volume ocupado pelo mesmo.

A medida das massas foi realizada em balança eletrônica modelo Marte com fundo de escala 0-40 kg, com aproximações permissíveis de 1,0 grama.

3.6. Condução do Experimento

3.6.1. Ajustes iniciais

Pesaram-se cada um dos doze vasos, primeiro vazios e depois cheios de solo. A seguir os vasos foram irrigados (com cerca de 10 litros de H_2O os que continham solos argilosos e 5 litros os arenosos), sendo cobertos com papel alumínio e postos a drenar durante 10 dias. Antes de irrigar, instalaram-se os tensiômetros, que haviam sido previamente colocados em água para completa saturação das cápsulas, abrindo-se um furo de 15 cm de profundidade no solo e inserindo os tensiômetros. Os tensiômetros convencionais foram escorvados de maneira usual ajustando-se o nível da

cuba de mercúrio na altura de 8,0 cm. Os tensiômetros de bolha de ar foram enchidos com água até 3 cm abaixo da borda da tampa, sendo fechados rapidamente a partir deste instante.

3.6.2. Início das leituras

Após permanecerem em equilíbrio durante dois dias deu-se início a leitura dos sistemas, duas vezes por dia (9:00 e 16:00). Liam-se as leituras h, calculando-se o potencial medido pelo tensiômetro convencional pela equação (3.2) liam-se as leituras, denominadas h_c no tensiômetro de bolha de ar estimando-se os potenciais pela equação (3.10). Após as leituras cada vaso era pesado calculando-se θ% pela equação (3.11).

3.6.3. Análises estatísticas

As análises estatísticas pertinentes foram conduzidas usando computador e basicamente se constituiram na determinação das funções de ajuste entre ψ x θ, e ψ x t, e na verificação das correlações entre os ψ ajustados.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Dimensionamento e Curvas de Resposta do Tensiômetro de Bolha de Ar

O tubo superior do tensiômetro de bolha de ar tem que obedecer as condições operacionais, sob pena de tornar-se inviável a sua utilização. Deve ter um diâmetro que permita sua recarga e condições de campo, sendo o menor possível para não afetar o tempo de resposta. Em função desta elegeu-se o tubo ϕ 3/8" (0,952 cm) de PVC como ideal.

Com relação a altura vê-se pela equação (3.9) que nas condições locais de pressão atmosférica (965 cm H_2O) e para altura do tubo inferior eleita (60 cm) e do tubo superior (64 cm), obteve-se para H; valor de 130 cm. Assumiu-se que potencial máximo como sendo ψ_{TBA} = 0,8 at (826,4 cm H_2O). Nestas condições para que o valor de h_c máximo fosse cerca de 50 cm, teve-se que assumir para o valor da altura da camara inicial h o valor de 3 cm, sujeito as condições da equação (3.9).

Na Figura 4.1 são demonstradas as curvas de resposta ψ_{TBA} x h_c para as condições relatadas (H = 130 cm,

P = 965 cm H_2O) para diferentes valores de h, de acordo com a equação (3.9). Para as condições do experimento vale a curva h = 3 cm. Nota-se pela Figura 4.1 que se perderia precisão nas leituras baixas de h_c se adotassemos o valor h = 1 cm. De outro modo por exemplo para valores de h maiores que 6 cm para que pudessemos realizar a leitura de ψ = 826,4 cm de H_2O precisariamos de ler um valor h_c, muito elevado, o que seria pouco prático (deformação e possível quebra do tubo plástico). A equação (3.9) nos mostra também que a curva de resposta (ψ x h_c) do tensiômetro de bolha de ar dependem da pressão local. Para local de pressão atmosférica 750 mmHg (1019,4 cm H_2O) a equação (3.9) torna-se:

$$\psi = - 1019,4 \left(1 - \frac{h}{h_c}\right) + (H - h_c) \qquad (3.9a)$$

De acordo com esta nova forma da equação (3.9) para H = 130 cm, h = 3 cm e ψ = - 0,8 at (824 cm H_2O) o valor de h_c no equilíbrio seria de 31,5 cm, bem menor que os 50 cm já determinados na condição de pressão atmosférica 710 mmHg (965 cm H_2O).

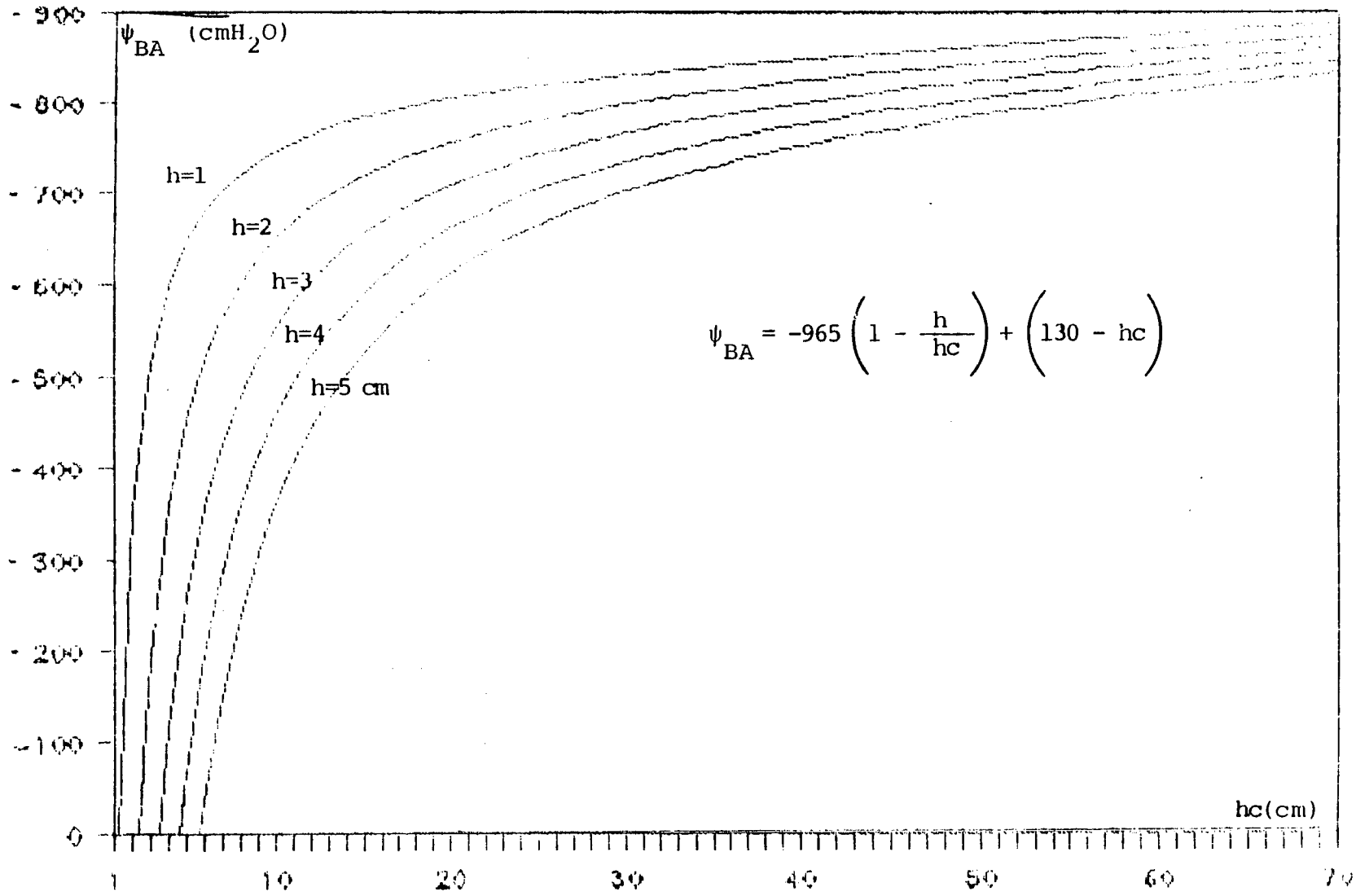


Fig. 4.1. Curvas de resposta do Tensiômetro de bolha de ar (ψ_{BA} x hc) para diferentes valores de h.

4.2. Dados Obtidos de $\psi \times \theta$

4.2.1. Solo argiloso

Nos Quadros 4.1, 4.2, 4.3 e 4.4, são relatados os valores de ψ estimados pelas equações (3.1), (tensiômetro convencional) e (3.10) tensiômetro de bolha de ar e as medidas de θ correspondentes estimados pela equação (3.11), para cada conjunto tensiométrico. Nos dois horários de leitura (9:00 e 16:00). Para as diferentes datas e horários de leitura foi estabelecida a média aritmética dos três valores de ψ e θ observados, denominados de $\overline{\psi}_c$ (tensiômetro convencional) e $\overline{\psi}_{LD}$ (tensiômetro de bolha de ar).

4.2.2. Solo arenoso

Nos Quadros 4.5, 4.6, 4.7 e 4.8 idêntico procedimento do item 4.2.1 foi adotado para o solo arenoso.

4.3. Relações de Dependência Entre ψ e θ (Solo Argiloso)

Através de análise estatística (vide Quadros A-1, A-2, A-3 e A-4 do Apêndice) determinou-se a função que melhor se ajustou aos valores médios simultâneos $\overline{\psi}_{TC} \times \overline{\theta}$ e $\overline{\psi}_{TBA} \times \overline{\theta}$.

data	h_2	ψ_2	h_4	ψ_4	h_6	ψ_6	$\overline{\psi}_C$	θ_2	θ_4	θ_6	$\overline{\theta}$
30-Nov	3.9	26.14	4.1	28.66	4.0	27.40	27.40	51.76	48.73	51.65	50.71
06-Dec	4.5	33.70	4.9	38.74	5.1	41.26	37.90	47.10	45.35	46.95	46.47
11-Dec	5.0	40.00	5.3	43.78	5.7	48.82	44.20	44.23	42.65	44.01	43.63
18-Dec	5.9	51.34	5.9	51.34	6.5	58.90	53.86	41.20	39.86	40.91	40.66
24-Dec	8.0	66.46	8.1	72.76	9.2	84.10	74.44	36.95	35.82	36.54	36.44
28-Dec	10.0	103.00	9.9	101.74	11.7	124.42	109.72	34.22	33.30	33.74	33.75
30-Dec	12.4	133.24	12.1	129.46	14.3	157.18	139.96	32.68	31.83	32.16	32.22
02-Jan	17.2	193.72	15.8	176.08	19.6	223.96	197.92	30.49	29.72	30.01	30.07
05-Jan	26.4	309.64	24.2	281.92	30.5	361.30	317.62	28.94	28.27	28.52	28.58
07-Jan	34.2	407.92	31.4	372.64	41.7	502.42	427.66	27.81	27.15	27.40	27.45
08-Jan	39.6	475.96	37.5	449.50	47.8	579.28	501.58	27.19	26.55	26.91	26.88
10-Jan	51.7	628.42	52.0	632.20	57.5	701.50	654.04	26.25	25.65	26.01	25.97
13-Jan	60.9	744.34	62.5	764.50	62.9	769.54	759.46	25.22	24.64	25.00	24.95
16-Jan	63.6	778.36	63.7	779.62	63.7	779.62	779.20	24.82	24.19	23.78	24.26

Quadro 4.1. Valores de h (cmHg), ψ(cm H_2O) e θ (%) observados. Solo argiloso. Tensiômetro Convencional, horário 9:00 hs.

data	h_7	ψ_7	h_{11}	ψ_{11}	$\overline{\psi}_{BA}$	θ_7	θ_{11}	$\overline{\theta}$
01-Dec	3.60	34.43	3.60	34.43	34.43	50.06	51.44	50.75
12-Dec	3.60	34.43	3.65	45.50	39.96	42.94	44.19	43.57
20-Dec	3.65	45.50	3.70	56.27	50.89	38.82	39.97	39.40
25-Dec	3.90	96.59	3.90	96.59	96.59	35.02	36.09	35.56
28-Dec	4.10	133.00	4.00	115.25	124.12	32.87	33.92	33.51
31-Dec	4.40	181.45	4.20	149.91	165.68	30.57	31.59	31.08
02-Jan	5.30	294.07	4.60	210.25	252.16	29.22	30.14	29.68
03-Jan	6.30	381.78	4.60	210.25	296.01	28.55	29.42	28.99
04-Jan	7.60	461.68	5.50	314.14	387.91	28.12	28.97	28.55
05-Jan	9.20	529.53	6.10	366.51	448.02	27.80	27.81	27.80
07-Jan	14.70	652.76	8.20	490.15	571.46	26.72	27.48	27.10
08-Jan	18.50	697.01	10.20	561.38	629.19	26.19	26.93	26.56
09-Jan	26.30	751.22	13.30	630.63	690.92	25.82	26.43	26.13
11-Jan	45.70	817.35	25.40	746.42	781.89	25.06	25.71	25.39
13-Jan	66.50	857.97	44.20	813.70	835.83	24.47	25.09	24.78

Quadro 4.2. Valores de h (cm H_2O), ψ(cm H_2O) e θ (%) observados. Solor argiloso. Tensiômetro de bolha de ar, horário das 9:00 hs.

data	h_2	ψ_2	h_4	ψ_4	h_6	ψ_6	$\overline{\psi}_{TC}$	θ_2	θ_4	θ_6	$\overline{\theta}$
27-Nov	3.40	19.84	3.50	21.10	3.60	22.36	21.10	52,98	51.78	53.77	52,84
03-Dec	4.20	29.92	4.40	32.44	4.60	34.96	32.44	49.21	47.29	49.02	48.51
08-Dec	4.90	38.74	5.00	40.00	5.40	45.04	41.26	45.63	43.94	45.40	44.99
16-Dec	5.30	47.78	5.60	48.82	6.20	55.12	50.50	42.32	40.87	42.03	41.74
20-Dec	6.20	55.12	6.30	56.38	7.00	65.20	58.90	39.77	38.49	39.41	39.22
25-Dec	8.20	80.32	8.00	77.80	9.20	92.92	83.68	36.23	35.18	35.76	35.72
30-Dec	12.40	133.24	12.20	130.72	14.40	158.44	140.80	32.49	31.65	31.98	32.04
03-Jan	20.90	240.34	19.30	220.18	23.90	278.14	246.22	29.63	28.93	29.15	29.24
05-Jan	26.20	307.12	24.00	279.40	30.80	365.08	317.20	28.80	28.18	28.41	28.46
07-Jan	34.30	409.18	31.90	378.94	42.20	508.72	432.28	27.68	27.04	27.32	27.35
08-Jan	39.70	477.22	38.00	455.80	48.00	581.80	504.94	27.06	26.42	26.79	26.76
09-Jan	46.50	562.90	45.80	554.08	53.80	654.88	590.62	26.68	26.02	26.34	26.35
10-Jan	52.40	637.24	53.00	644.80	57.70	704.02	662.02	26.90	25.58	25.94	26.14
13-Jan	61.00	745.60	62.10	759.46	62.70	767.02	757.36	25.18	24.58	24.96	24.91
14-Jan	63.00	770.80	63.40	775.84	63.80	780.88	775.84	25.02	24.35	24.75	24.71

Quadro 4.3. Valores de h (cmHg), ψ_c (cm H_2O) e θ (%) observados. Solo argiloso. Tensiômetro Convencional, horário 16:00 hs.

data	h_7	ψ_7	h_{11}	ψ_{11}	$\overline{\psi}_{TBA}$	θ_7	θ_{11}	$\overline{\theta}$
17-Dec	3.60	34.43	3.80	76.96	55.70	40.63	41.86	41.25
26-Dec	4.00	115.25	4.00	115.25	115.25	34.05	35.15	34.60
28-Dec	4.30	166.04	4.20	149.91	157.98	32.63	33.69	33.16
30-Dec	4.40	181.45	4.20	149.91	165.68	31.11	32.10	31.61
31-Dec	4.60	210.25	4.40	181.45	195.85	30.35	31.34	30.85
02-Jan	5.40	304.29	4.80	236.68	270.49	29.10	29.98	29.54
03-Jan	6.50	396.12	5.20	283.47	339.80	28.39	29.26	28.83
05-Jan	9.50	539.76	6.20	374.26	457.01	27.66	28.49	28.08
07-Jan	15.80	667.57	8.50	502.91	585.24	26.60	27.34	26.97
08-Jan	21.20	719.64	10.80	577.74	648.69	25.97	26.83	26.40
09-Jan	28.30	761.00	14.30	646.85	703.93	25.66	26.44	26.05
10-Jan	37.50	795.30	19.70	707.75	751.53	25.29	25.96	25.63
11-Jan	48.50	823.81	27.30	756.26	790.04	24.99	25.67	25.33

Quadro 4.4. Valores de h (cm H_2O), ψ(cm H_2O) e θ (%) observados. Tensiômetro bolha de ar. Solo argiloso, horário 16:00 hs.

data	h_8	ψ_8	h_{10}	ψ_{10}	h_{12}	ψ_{12}	$\overline{\psi}_{TC}$	θ_8	θ_{10}	θ_{12}	$\overline{\theta}$
03-Dez	4.7	36.22	5.1	41.26	4.9	38.74	38.74	34.08	33.23	33.84	33.72
06-Dez	4.9	38.74	5.4	45.04	5.3	43.78	42.52	31.77	30.92	31.55	31.41
10-Dez	5.1	41.26	5.5	46.30	5.5	46.30	44.62	29.18	28.47	28.97	28.87
17-Dez	5.4	45.04	5.6	47.56	5.6	47.56	46.72	26.30	25.69	26.24	26.08
24-Dez	5.8	50.08	6.3	56.38	6.1	53.86	53.44	21.35	20.73	21.57	21.22
28-Dez	6.2	55.12	6.7	61.42	6.5	58.90	58.48	18.56	17.98	18.94	18.49
02-Jan	7.1	66.46	7.8	75.28	6.9	63.94	68.56	14.76	14.17	15.27	14.73
07-Jan	8.3	81.58	9.4	95.44	8.2	80.32	85.78	11.80	11.30	12.47	11.86
10-Jan	10.5	109.30	12.1	129.46	9.3	94.18	110.98	10.01	9.69	10.79	10.16
16-Jan	13.6	148.36	14.7	162.22	10.8	113.08	141.22	8.45	8.35	9.24	8.68
31-Jan	21.1	242.86	21.7	250.42	21.3	250.38	247.89	5.61	5.89	6.23	5.91
04-Fev	37.7	452.02	30.0	355.00	25.5	298.30	368.44	5.23	5.57	5.83	5.54
14-Fev	52.7	641.02	43.4	523.84	37.5	449.50	538.12	4.50	4.82	5.02	4.78
05-Mar	59.9	731.74	58.3	711.58	55.1	671.26	704.86	3.51	3.77	3.98	3.75
07-Mar	60.3	736.78	59.2	722.92	56.9	693.94	717.88	3.35	3.71	3.81	3.62

Quadro 4.5. Valores de h(cmHg), ψ(cmH_2O), e θ (%) observados. Solo arenoso. Tensiômetro convencional, horário 9:00 hs.

data	h_1	ψ_1	h_3	ψ_3	h_5	ψ_5	$\overline{\psi}_{TBA}$	θ_1	θ_3	θ_5	$\overline{\theta}$
04-Dez	3.5	11.36	3.6	34.43	3.5	11.36	19.05	32.82	33.28	34.78	33.63
25-Dez	3.5	11.36	3.7	56.27	3.6	34.43	34.02	20.38	20.86	22.31	21.18
03-Jan	3.7	56.27	3.8	76.96	3.7	56.27	63.17	13.71	14.21	15.37	14.43
09-Jan	3.8	76.96	3.9	96.59	3.7	56.27	76.61	10.44	10.88	11.73	11.02
10-Jan	3.9	96.59	3.9	96.59	3.8	76.96	90.05	9.91	10.48	11.24	10.54
13-Jan	4.0	115.25	4.1	133.00	3.9	96.59	114.95	8.94	9.38	10.00	9.44
23-Jan	4.1	133.00	4.2	149.00	4.0	115.25	132.42	6.89	7.05	7.38	7.11
04-Fev	4.4	181.45	5.1	272.45	4.5	196.17	216.69	5.82	5.89	6.12	5.94
08-Fev	4.9	249.08	5.1	272.45	4.8	236.68	252.74	5.67	5.73	5.95	5.78
24-Fev	5.3	294.07	6.0	358.60	5.3	294.07	315.58	4.58	4.57	4.69	4.61
27-Fev	5.8	341.66	7.3	445.72	5.9	350.22	379.20	4.31	4.31	4.41	4.34
28-Fev	6.3	381.78	8.1	486.14	6.5	396.12	421.35	4.38	4.36	4.50	4.41
04-Mar	8.8	514.82	12.4	613.93	10.0	555.50	561.42	4.27	4.21	4.36	4.28
05-Mar	9.6	543.04	13.6	635.73	11.1	585.29	588.02	4.11	4.13	4.24	4.16
07-Mar	11.7	599.26	16.8	679.48	14.1	643.78	640.84	4.12	4.07	4.19	4.13

Quadro 4.6. Valores de h (cmHg), ψ(cmH_2O) e θ (%) observados. Solo arenoso. Tensiômetro de bolha de ar, horário 9:00 hs.

data	h_8	ψ_8	h_{10}	ψ_{10}	h_{12}	ψ_{12}	$\overline{\Psi}_{TC}$	Θ_8	Θ_{10}	Θ_{12}	$\overline{\Theta}$
01-Dec	4.6	34.96	4.7	36.22	4.9	38.74	36.64	35.49	34.70	35.23	35.14
05-Dec	4.9	38.74	5.1	41.26	5.0	40.00	40.00	32.27	31.46	32.04	31.92
12-Dec	5.2	42.52	5.5	46.30	5.4	45.04	44.62	28.26	27.50	28.12	27.96
19-Dec	5.5	46.30	5.6	47.56	5.7	48.82	47.56	24.99	24.33	24.98	24.77
25-Dec	5.9	51.34	6.2	55.12	6.2	55.12	53.86	20.66	20.05	20.90	20.54
30-Dec	6.3	56.38	6.7	61.42	6.7	61.42	59.74	16.81	16.22	17.25	16.76
03-Jan	7.8	75.28	8.8	87.88	7.5	71.50	78.22	13.88	13.29	14.40	13.86
07-Jan	7.9	76.54	8.8	87.88	8.3	81.58	82.00	11.71	11.20	12.38	11.76
11-Jan	10.8	113.08	12.0	128.20	9.6	97.96	113.08	9.63	9.35	10.44	9.81
31-Jan	20.8	239.08	21.0	241.60	19.4	221.44	234.04	5.59	5.89	6.21	5.90
01-Feb	28.7	338.62	26.0	304.60	22.5	260.50	301.24	5.52	5.84	6.14	5.83
05-Feb	35.6	425.56	28.2	332.32	24.2	281.92	346.60	5.24	5.56	5.81	5.54
12-Feb	50.1	608.26	40.3	484.78	34.7	414.22	502.42	4.76	5.12	5.31	5.06
21-Feb	56.4	687.64	48.7	590.62	41.6	501.16	593.14	4.08	4.44	4.58	4.37
04-Mar	59.5	726.70	57.7	704.02	54.0	657.40	696.04	3.53	3.90	4.01	3.81
07-Mar	60.3	736.78	59.2	722.92	56.4	687.64	715.78	3.45	3.78	3.93	3.72

Quadro 4.7. Valores de h(cmHg), ψ(cm H_2O) e Θ (%) observados. Solo arenoso. Tensiômetro convencional, horário 16:00 hs.

data	h_1	ψ_1	h_3	ψ_3	h_5	ψ_5	$\overline{\psi}_{TBA}$	Θ_1	Θ_3	Θ_5	$\overline{\Theta}$
07-Dez	3.5	11.36	3.7	56.27	3.6	34.43	34.02	30.66	31.16	32.82	31.55
12-Dez	3.6	34.43	3.7	56.27	3.6	34.43	41.71	28.05	28.57	30.23	28.95
19-Dez	3.6	34.43	3.7	56.27	3.7	56.27	48.99	24.71	25.19	26.74	25.55
25-Dez	3.6	34.43	3.8	76.96	3.7	56.27	55.89	20.35	20.73	22.26	21.11
07-Jan	3.7	56.27	3.7	76.96	3.8	76.96	70.06	11.41	11.92	12.93	12.09
10-Jan	3.9	96.59	3.9	96.59	4.0	115.05	102.74	9.83	10.87	11.16	10.62
16-Jan	4.1	133.00	4.2	149.91	4.0	115.25	132.72	7.64	8.87	9.49	8.67
08-Fev	4.9	249.08	5.1	272.45	4.8	236.68	252.74	5.74	5.77	6.02	5.84
10-Fev	5.4	304.29	5.4	304.29	5.3	294.07	300.88	5.55	5.62	5.83	5.67
28-Fev	6.2	374.26	8.1	485.69	6.4	389.06	416.34	4.39	4.37	4.50	4.42
04-Mar	8.9	518.62	12.6	617.84	10.2	561.38	565.95	4.27	4.22	4.36	4.28
05-Mar	9.9	552.48	13.9	640.63	11.4	592.45	595.19	4.18	4.13	4.27	4.19

Quadro 4.8. Valores de h (cmHg), ψ(cm H_2O) e Θ (%) observados. Solo arenoso. Tensiômetro bolha de ar, horário 16:00 hs.

Os resultados obtidos forma os seguintes:

4.3.1. Leituras das 9:00

$$\psi_{TC} = 11211,27 - 654,69\theta + 9,63\theta^2 \qquad (4.1)$$

$$r^2 = 0,991$$

$$\psi_{TBA} = 8066,33 - 457,23\theta + 6,54\theta^2 \qquad (4.2)$$

$$r^2 = 0,998$$

4.3.2. Leituras das 16:00

$$\psi_{TC} = 9406,72 - 654,06\theta + 7,96\theta^2 \qquad (4.3)$$

$$r^2 = 0,985$$

$$\psi_{TBA} = 10902,80 - 635,47\theta + 9,35\theta^2 \qquad (4.4)$$

$$r^2 = 0,998$$

Nas equações acima, os termos significam:

ψ_{TC} = potencial matricial médio (cm H_2O) estimado pelo tensiômetro convencional;

θ = umidade média do solo em %;

ψ_{TBA} = potencial matricial médio (cm H_2O) estimado pelo tensiômetro de bolha de ar.

Os ajustes ψ x θ descriminados nas equações 4.1, 4.2, 4.3 e 4.4, foram necessários pelos seguintes motivos:

a) Devido a metodologia utilizada é impossível fazer estimativas de ψ para valores pré-determinados de θ;

b) A variabilidade das medidas devido aos erros decorrentes exige que se determine uma função representativa de $\psi \times \theta$.

Nas Figuras 4.2 e 4.3 são demonstradas graficamente as dependências $\psi \times \theta$ nos diferentes horários de leitura para os valores médios observados dos dois conjuntos tensiométricos mostrando que a parabola expressa razoavelmente a ligação $\psi \times \theta$. Nota-se que este confronto foi realizado para valores de ψ superiores a 100 cm de H_2O. Este fato se prende aos erros devido a diferenças de temperatura na hora do fechamento (carga) e da leitura, cuja ordem de grandeza pode ser elevada para valores baixos de ψ, como demonstraremos posteriormente.

4.4. Comparações $\psi_{TC} \times \psi_{TBA}$ (Solo Argiloso)

Através das equações 4.1, 4.2, 4.3 e 4.4, foi nos possível realizar as comparações entre ψ_{TC} (estimativas do potencial matricial através do tensiômetro convencional) e ψ_{TBA} (estimativas do potencial matricial realizadas pelo tensiômetro de bolha de ar), para valores **simultâneos** de θ. Nas Figuras 4.4 (A e B) demonstra-se que o alinhamento de ψ_{TBA} e ψ_{TC} é representado pelas equações de regressão (vide Quadro A-5 do Apêndice).

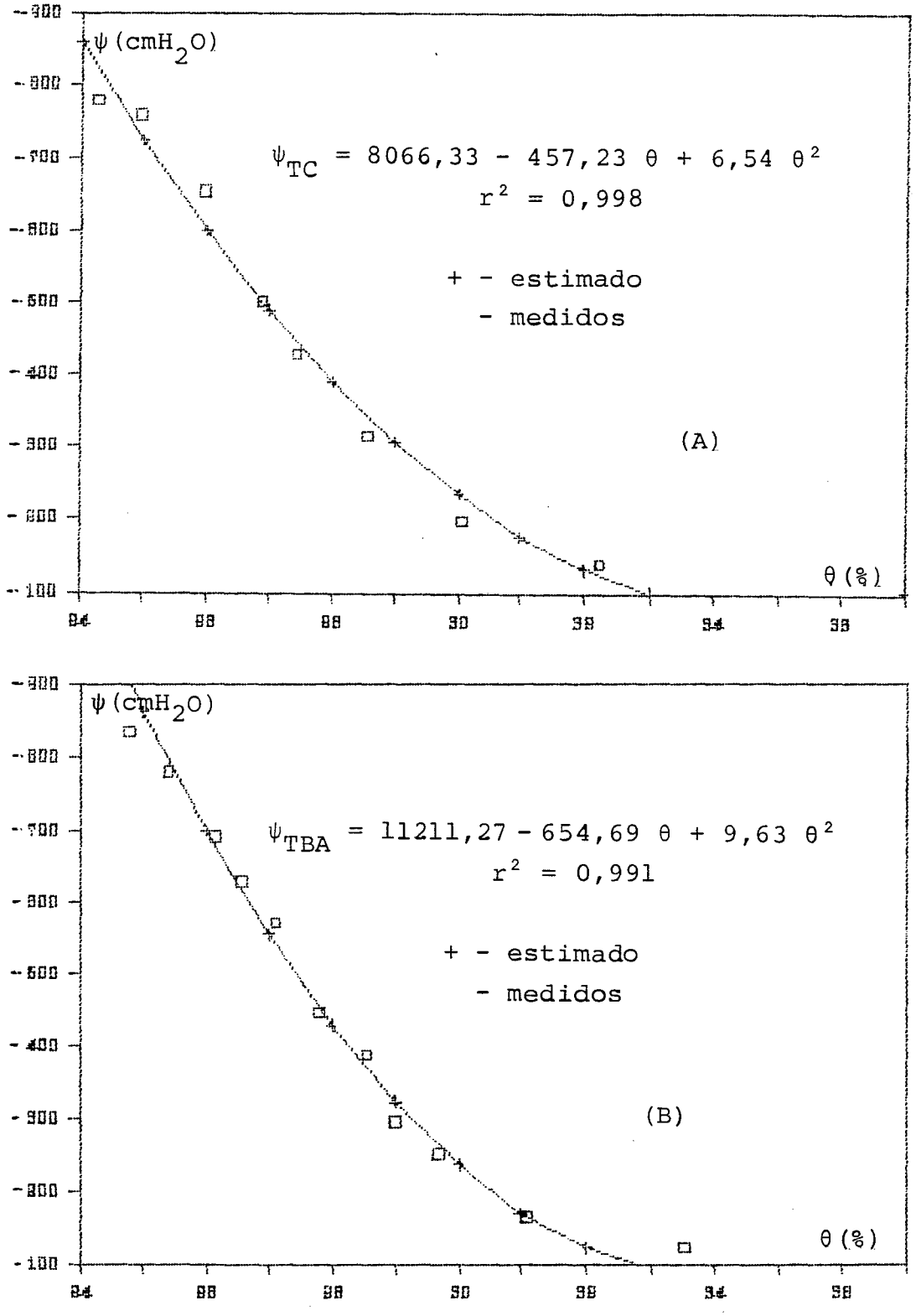
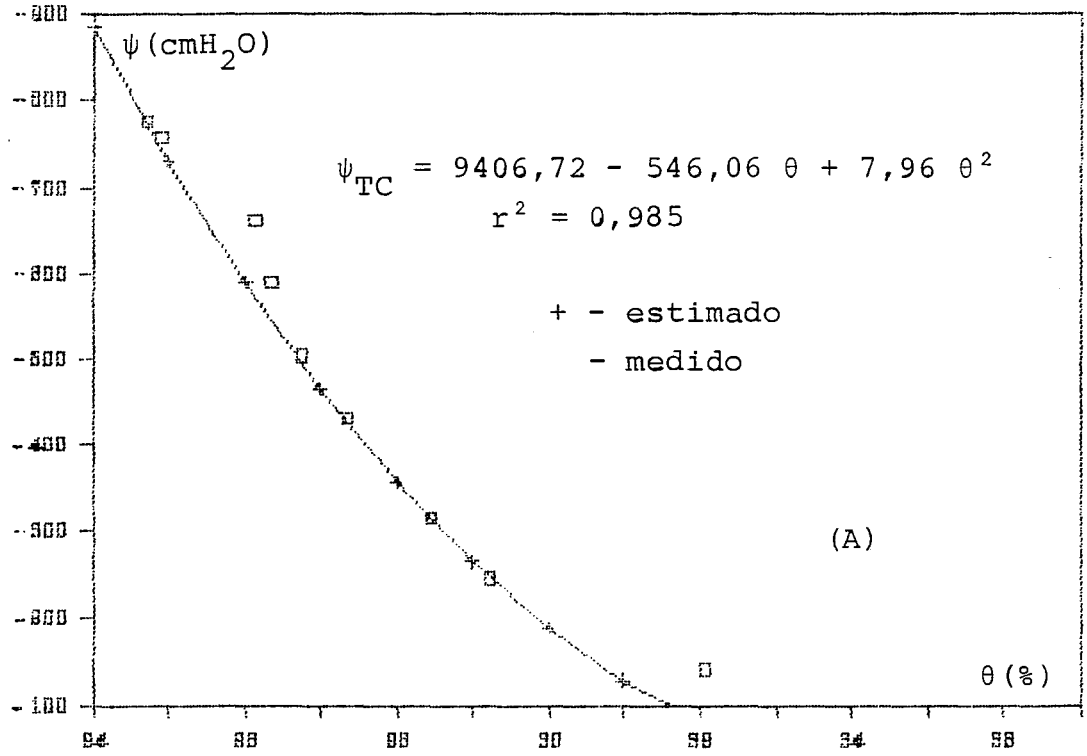


Fig. 4.2. Valores estimados e medidos de ψ x θ
Leitura das 9:00 hs (solo argiloso)
A - Tens. convencional (ψ_{TC})
B - Tens. bolha de ar (ψ_{TBA})



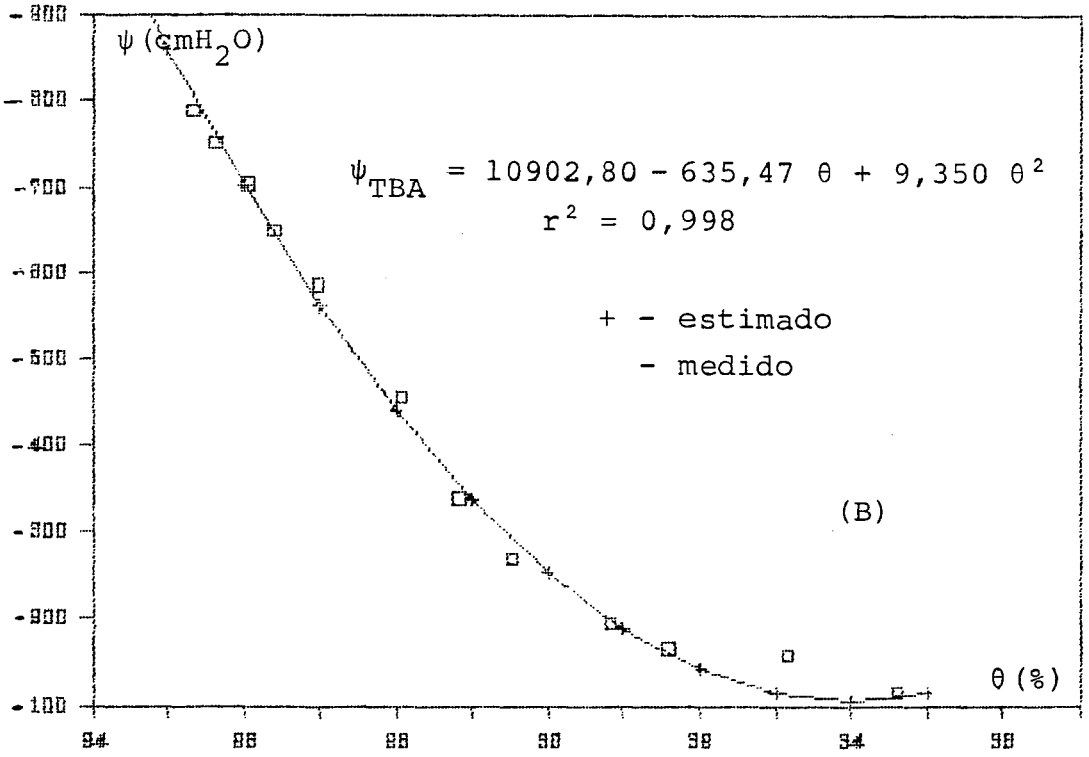
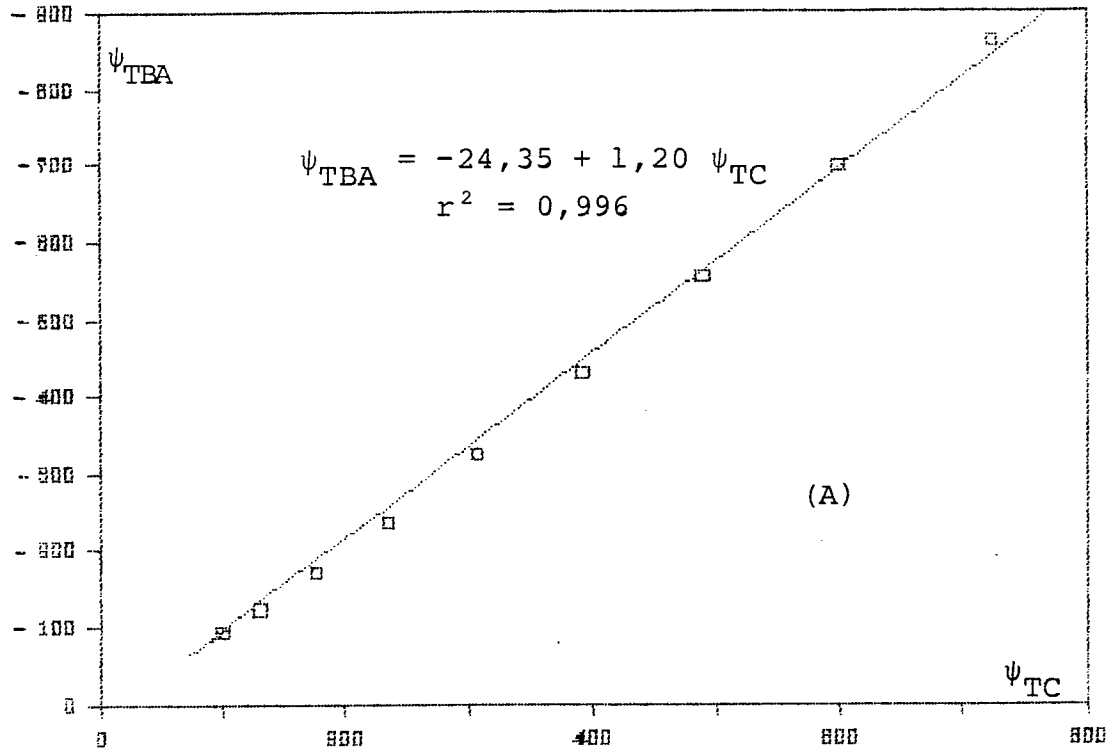


Fig. 4.3. Valores estimados e medidos de ψ x θ
Leitura das 16:00 hs (solo argiloso)
A - Tens. convencional (ψ_{TC})
B - Tens. bolha de ar (ψ_{TBA})



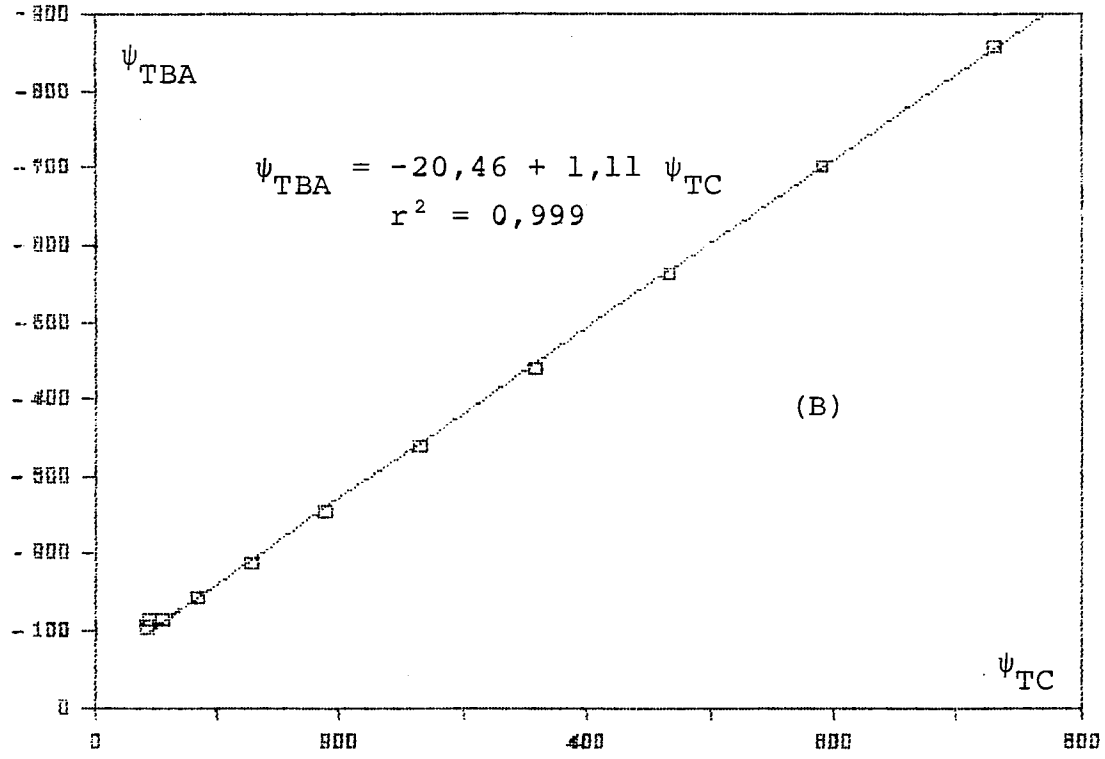


Fig. 4.4. Correção entre as estimativas (ψ_{TBA} x ψ_{TC})
A - Leituras das 9:00 hs (solo argiloso)
B - Leituras das 16:00 hs

a) horário das 9:00

$$\psi_{TBA} = -24,35 + 1,20\ \psi_{TC} \qquad (4.5)$$

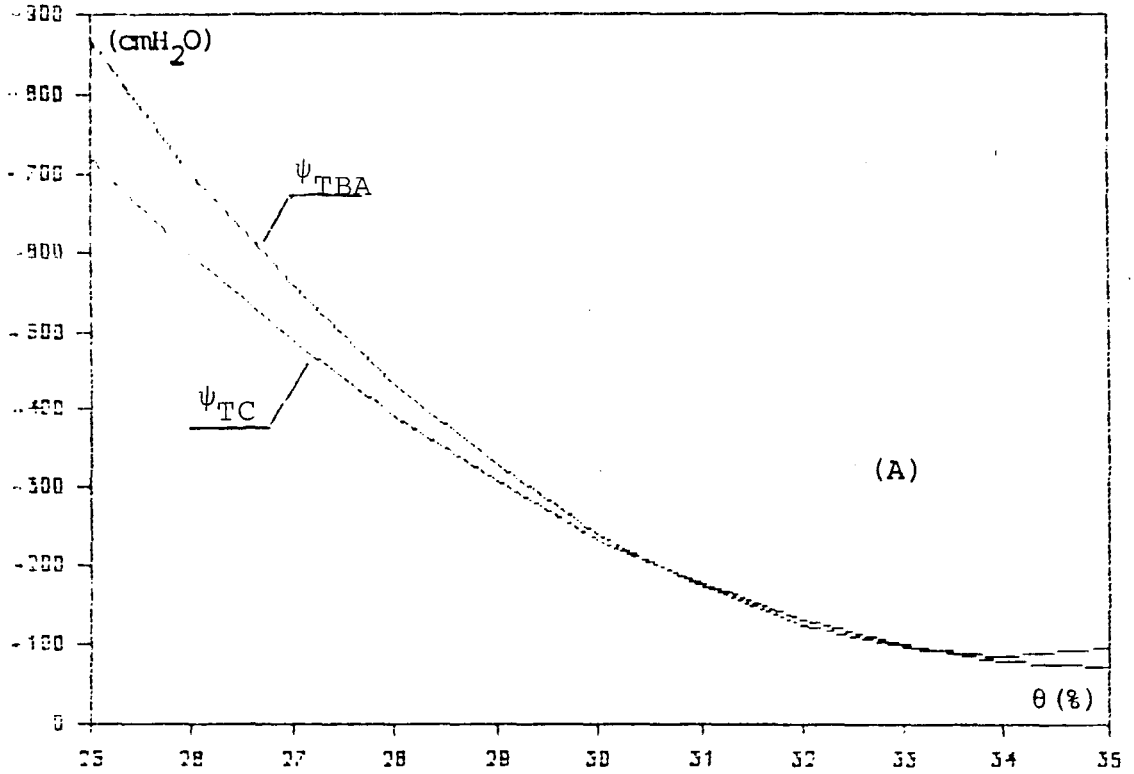
$$r^2 = 0,996$$

b) horário das 16:00

$$\psi_{TBA} = 20,46 + 1,11\ \psi_{TC} \qquad (4.6)$$

$$r^2 = 0,999$$

Os altos coeficientes de determinação encontrados demonstram que existe uma boa associação entre ψ_{TBA} e ψ_{TC}. No entanto os coeficientes a e b, diferentes da unidade indicam que para mesmos valores de θ, ψ_{TBA} difere de ψ_{TC} de uma fração significativa. Estas diferenças podem ser vistas na Figura 4.5, onde se representou as curvas de ψ_{TC} e ψ_{TBA} para valores simultâneos de θ (equações de 4.1 a 4.4). Para o mesmo valor de θ, ψ_{TBA} é sempre maior do que ψ_{TC}, sugerindo que este comportamento é devido a existência de um tempo de resposta diferenciado entre os dois tensiômetros.



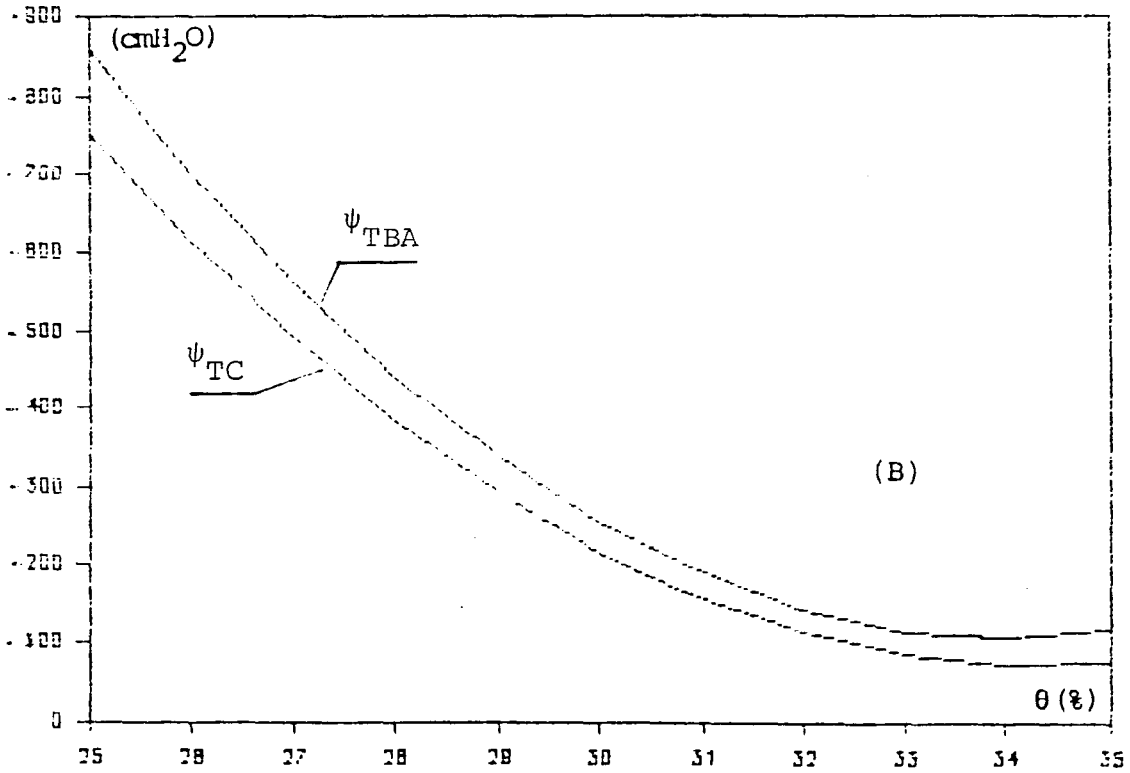


Fig. 4.5 - Confronto gráfico entre as estimativas de ψ_{TBA} e ψ_{TC} (Solo argiloso)
A - Leituras das 9:00
B - Leituras das 16:00

4.5. Erro Estimado no Tensiômetro de Bolha de Ar Devido a Diferenças de Temperatura

A equação (4.6) estimava ψ_{BA}, se levarmos em conta as possíveis diferenças de temperatura do ar dentro da camara vazia do tensiômetro, na hora do fechamento (T) e na hora da leitura (T'):

$$\psi_{BA} = - 965 \left(1 - \frac{h}{h_c} \frac{T'}{T}\right) + \left(H - h_c\right) \qquad (4.6)$$

Quando considerarmos T' = T a equação (4.6) tornar-se-á:

$$\psi_{BA} = - 965 \left(1 - \frac{h}{h_c}\right) + \left(H - h_c\right) \qquad (4.7)$$

Definindo-se um fator de correção (f_c) como,

$$f_c = \frac{\psi_{T'}}{\psi_T} = \frac{- 965 \left(1 - \frac{h}{h_c} \frac{T'}{T}\right) + \left(H - h_c\right)}{- 965 \left(1 - \frac{h}{h_c}\right) + \left(H - h_c\right)} \qquad (4.7)$$

vemos que o mesmo depende do valor de ψ (expresso por h_c) e do valor do quociente T'/T. No Quadro 4.5 são demonstrados os valores de f_c decorrentes para diferentes valores de T'/T e h_c, de acordo com a equação (4.7). Assim por exemplo se fechassemos o tensiômetro a temperatura T = 293°K (20°C) e na hora da leitura a temperatura fosse T' = 304,72°K (31,72°C) p valor verdadeiro (valor corrigido), para h_c = 4, seria:

$$\psi_{T'} = f_c \times \psi_T = 0,748 \times 115,25 = 86,3 \text{ cm } H_2O$$

ou seja, 74,8% do valor observado, assumindo-se T'/T, ou seja considerando a forma da equação (4.7).

h (cm)	T'/T	t' (^{o}C)	T' - T (^{o}C)	$\psi T'$ (cmH_2O)	$\psi T' - \psi T$ (cmH_2O)	$fc = \frac{\psi T'}{\psi T}$
3.8	1.00	20.00	0.00	-76.90	0.00	1.000
3.8	1.02	25.86	5.86	-61.70	15.20	0.802
3.8	1.04	31.72	11.72	-46.50	30.40	0.605
3.8	1.06	37.58	17.58	-31.20	45.60	0.405
3.8	1.08	43.44	23.44	-16.00	66.20	0.208
3.8	1.10	49.30	29.30	-0.77	76.10	0.010
4.0	1.00	20.00	0.00	-115.30	0.00	1.000
4.0	1.02	25.86	5.86	-100.80	14.50	0.874
4.0	1.04	31.72	11.72	-86.30	29.00	0.748
4.0	1.06	37.58	17.58	-71.80	43.50	0.622
4.0	1.08	43.44	23.44	-57.40	57.90	0.497
4.0	1.10	49.30	29.30	-42.90	72.40	0.372
5.0	1.00	20.00	0.00	-261.00	0.00	1.000
5.0	1.02	25.86	5.86	-249.40	11.60	0.955
5.0	1.04	31.72	11.72	-237.80	23.20	0.911
5.0	1.06	37.58	17.58	-226.30	34.70	0.867
5.0	1.08	43.44	23.44	-214.70	46.30	0.822
5.0	1.10	49.30	29.30	-203.10	57.90	0.778
6.0	1.00	20.00	0.00	-358.50	0.00	1.000
6.0	1.02	25.86	5.86	-348.80	9.70	0.973
6.0	1.04	31.72	11.72	-339.20	19.30	0.946
6.0	1.06	37.58	17.58	-329.50	29.00	0.919
6.0	1.08	43.44	23.44	-319.90	38.60	0.917
6.0	1.10	49.30	29.30	-310.20	48.30	0.865
7.0	1.00	20.00	0.00	-428.40	0.00	1.000
7.0	1.02	25.86	5.86	-420.60	7.80	0.982
7.0	1.04	31.72	11.72	-411.90	16.50	0.961
7.0	1.06	37.58	17.58	-403.60	24.80	0.942
7.0	1.08	43.44	23.44	-395.30	33.10	0.922
7.0	1.10	49.30	29.30	-387.10	41.30	0.903
8.0	1.00	20.00	0.00	-481.10	0.00	1.000
8.0	1.02	25.86	5.86	-473.90	7.20	0.985
8.0	1.04	31.72	11.72	-466.70	14.40	0.970
8.0	1.06	37.58	17.58	-459.40	21.70	0.954
8.0	1.08	43.44	23.44	-452.20	28.90	0.939
8.0	1.10	49.30	29.30	-444.90	36.20	0.925

Quadro 4.5 - Fatores de correção (fc) devido a diferenças de temperatura no fechamento (T) e na hora da leitura (T') , ($T'/T \neq 1$) e ($T = 293^{o}K$, $h = 3,0$ cm).

Na Figura 4.6 são demonstrados graficamente os dados do Quadro 4.5 que mostram claramente que a baixas leituras de ψ (pequenos valores de h_c) o erro cometido nas leituras do tensiômetro de bolha de ar pode ser muito grande. Em função disto neste trabalho nas comparações praticamente eliminamos as leituras de potencial menor que 100 cm H_2O. Pela Figura 4.6 nota-se ainda que para valores de potencial de 385,5 cm H_2O estes erros são já bastante minimizados (fator de correção > 0,90). Estas verificações são importantes, pois a possível inserção de termômetros no corpo dos tensiômetros causariam a perda de rusticidade desejada na sua construção. Isto mostra também que o corpo do tensiômetro não deve ficar diretamente exposto ao sol (caso em que as temperaturas da camara poderiam atingir até 40°C ou mais ocasionando erros de monta). Todavia para minimizar estes erros recomenda-se estimar as temperaturas do ar a sombra na hora da leitura para se obter a razão T'/T, que nos permitirá calcular o fator de correção f_c.

4.6. Relações de Dependência Entre ψ e θ (Solo Arenoso)

Da mesma maneira que para o solo argiloso, e pelos mesmos motivos procurou-se para o solo arenoso a função que melhor se ajustasse aos dados simultâneos de $\overline{\psi}_{TC} \times \overline{\theta}$ e $\overline{\psi}_{TBA} \times \overline{\theta}$.

Os resultados obtidos foram os seguintes: (vide Quadros A-10, A-11, A-12 e A-13 do Apêndice).

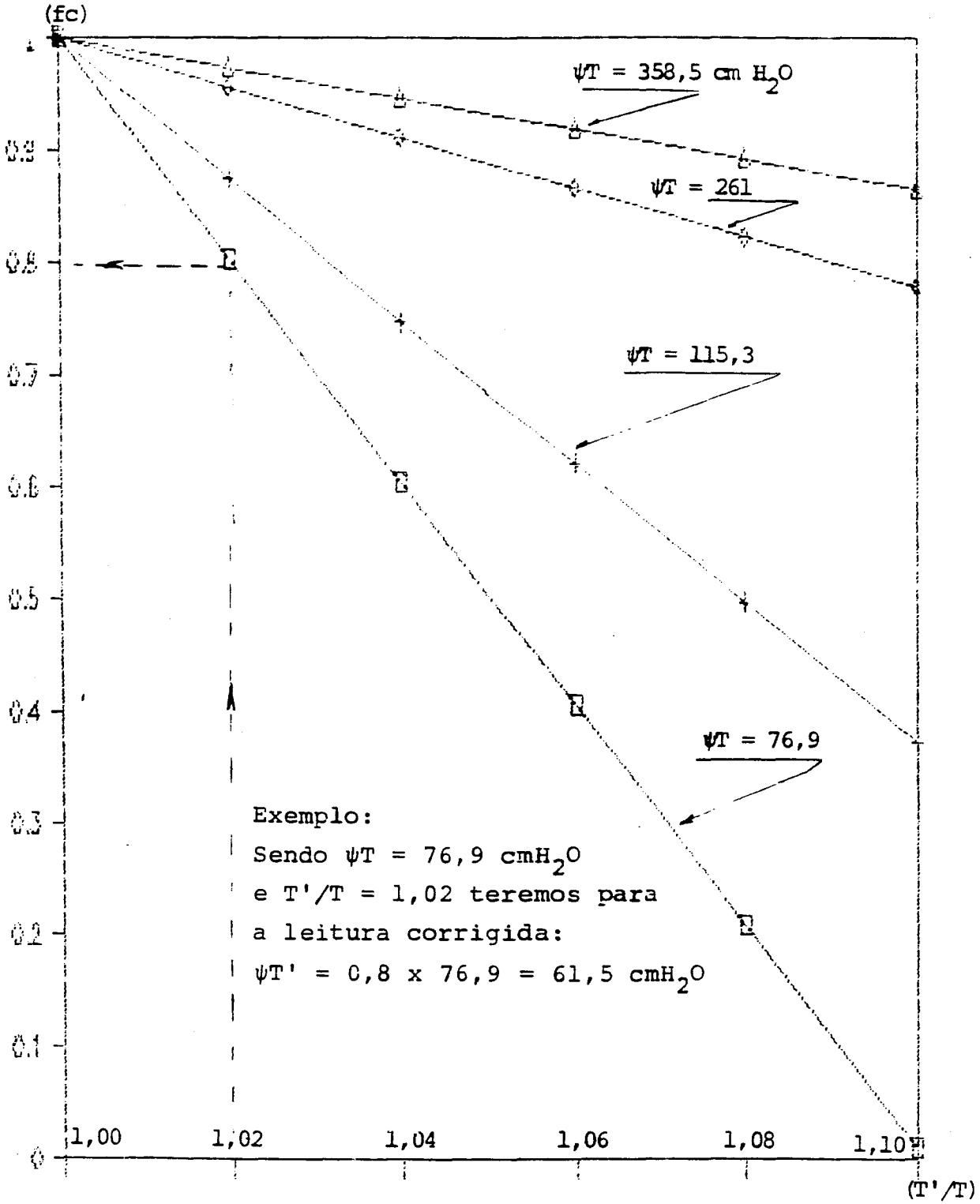


Fig. 4.6 - Fatores de correção da leitura ψT devido a diferenças de temperatura na hora do fechamento (T) e na hora da leitura (T') ($T'/T \neq 1$).

4.6.1. Leituras das 9:00

$$\psi_{TC} = -8363,64\ e^{-1,87} \qquad (4.8)$$

$$r^2 = 0,983$$

$$\psi_{TBA} = -7939,78\ e^{-1,95} \qquad (4.9)$$

$$r^2 = 0,926$$

4.6.2. Leituras das 16:00

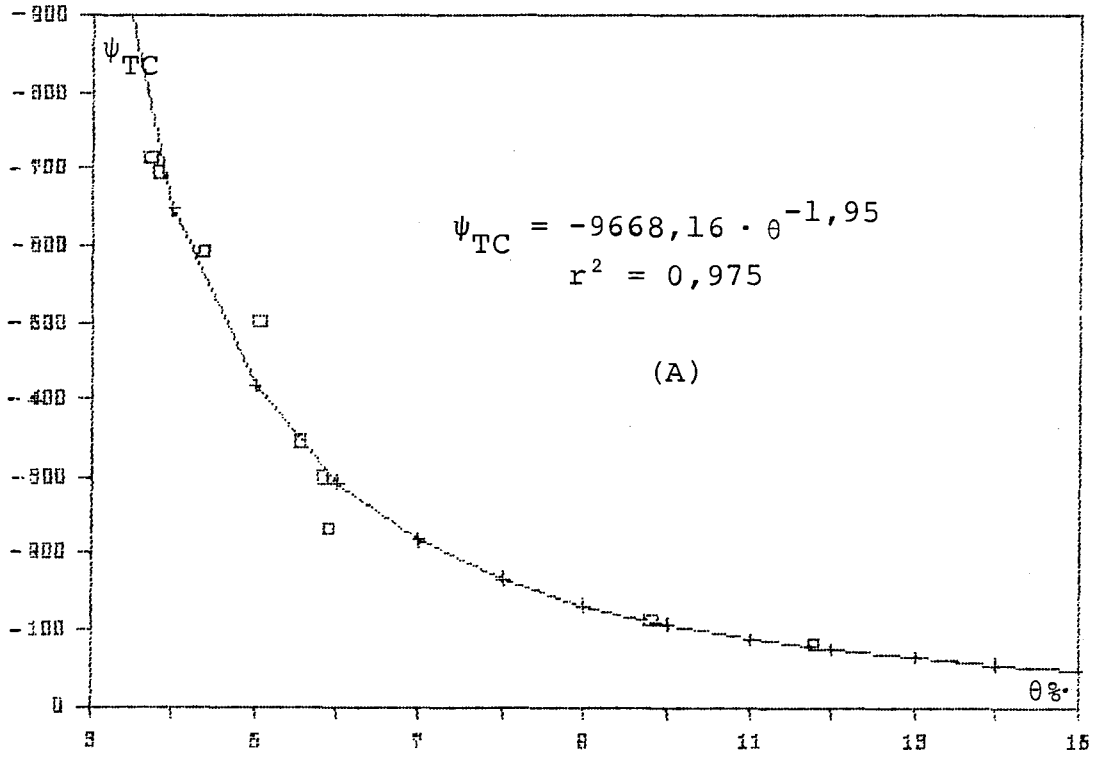
$$\psi_{TC} = -\ 9668,16\ e^{-1,95} \qquad (4.10)$$

$$r^2 = 0,975$$

$$\psi_{TBA} = -\ 7859,16\ e^{-1,88} \qquad (4.11)$$

$$r^2 = 0,984$$

Embora possamos considerar razoável o ajuste destas equações, pela dispersão dos pontos demonstradas nas Figuras 4.7 e 4.8 os resultados foram inferiores ao do solo argiloso. Atribui-se este fato ao elevado teor da fração areia, combinado com a pouca profundidade de instalação da cápsula. A exagerada macroporosidade parece, principalmente nos baixos teores de umidade, ter permitido que as variações de umidade relativa do ar interferessem no ar do solo, causando esta variabilidade.



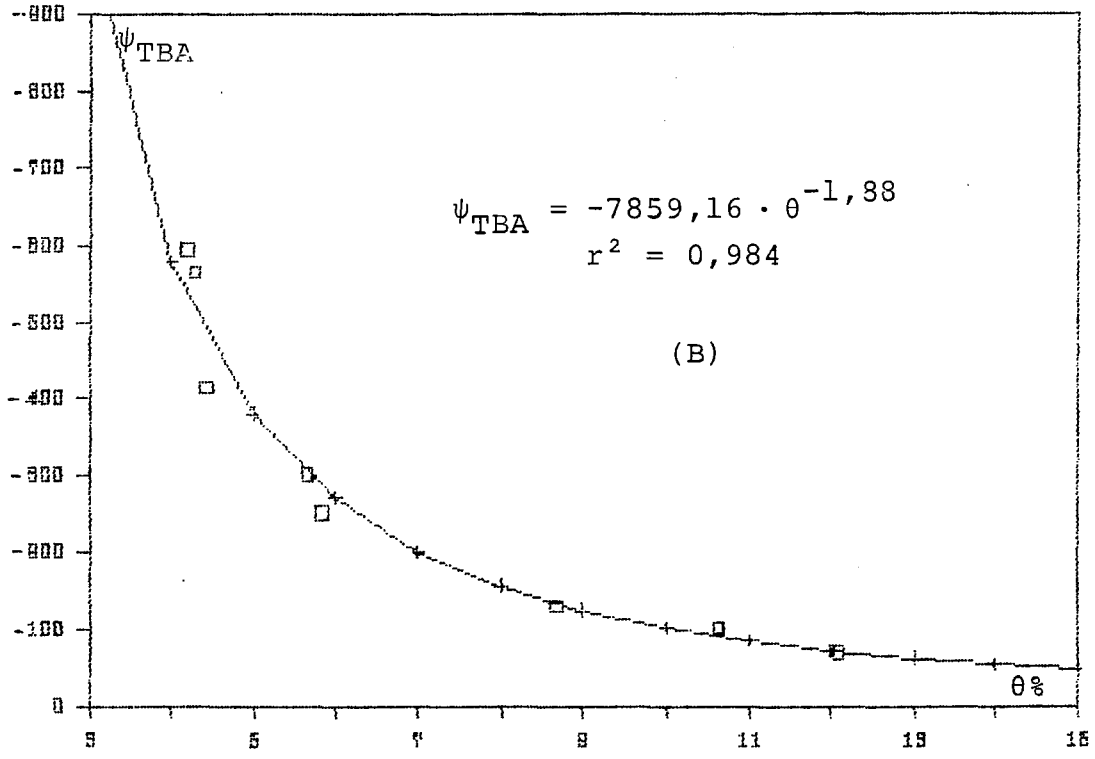
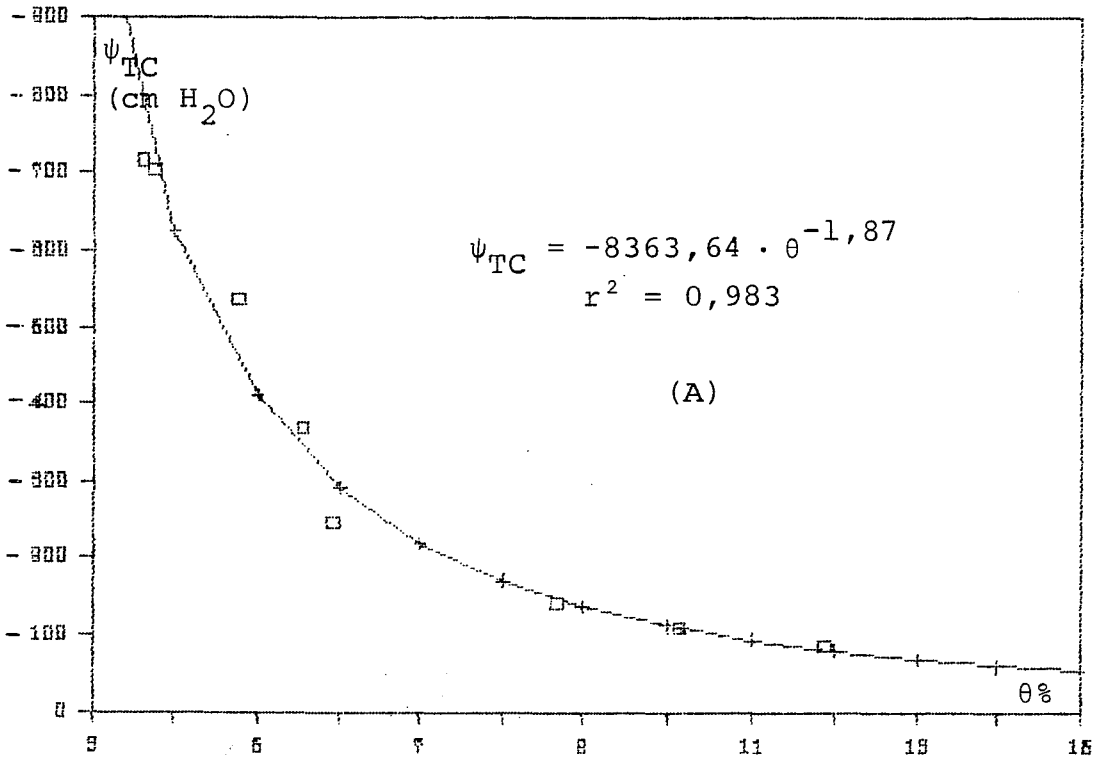


Fig. 4.7. Valores estimados e medidos de ψ x θ
Leitura das 16:00 horas (solo arenoso)
A - Tensiômetro convencional (ψ_{TC})
B - Tensiômetro de bolha de ar (ψ_{TBA})



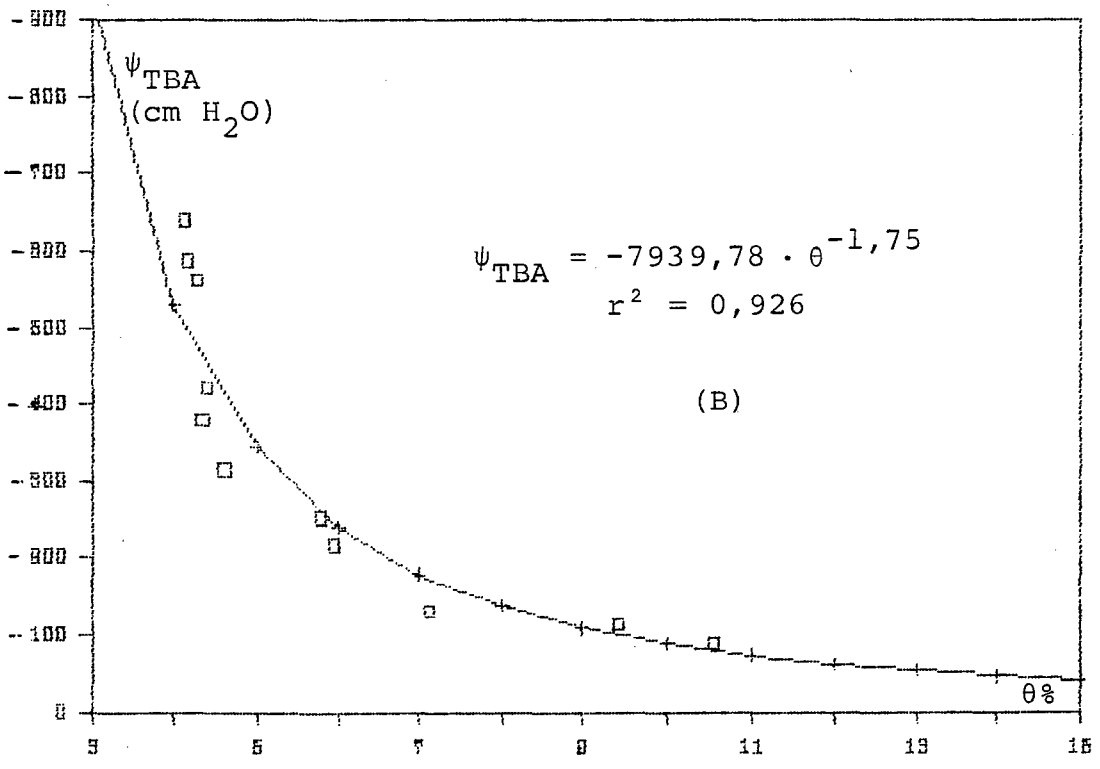


Fig. 4.8. Valores estimados (+) e medidos ( ) de ψ x θ
Leitura das 9:00 horas (solo arenoso)
A - Tensiômetro convencional (ψ_{TC})
B - Tensiômetro de bolha de ar (ψ_{TBA})

4.7. Comparações ψ_{TBA} x ψ_{TC} (Solo Arenoso)

Através das equações (4.8), (4.9), (4.10) e (4.11) foi nos possível de maneira similar ao solo argiloso realizar as comparações e ψ_{TBA} e ψ_{TC} para valores simultâneos de θ. Na Figura 4.9 demonstram-se as equações de regressão (vide Quadros A-14 e A-15 do Apêndice) e o alinhamento dos pontos ψ_{TBA} x ψ_{TC} para os dois horários de leitura (9:00 e 16:00).

Os coeficientes de determinação encontrados demonstram como no solo argiloso uma boa correlação entre as duas estimativas. As diferenças detectadas principalmente em valores mais elevados podem ser ao tempo de resposta diferenciado, cuja causa provável identificada de maneira analoga ao solo argiloso quando se comparam ψ_{TBA} e ψ_{TC} contra valores simultâneos de θ como é demonstrado na Figura 4.10.

4.8. Tempo de Resposta

De acordo com as comparações de ψ_{TBA} e ψ_{TC} para valores simultâneos de θ (vide Figura 4.5) observamos que para um mesmo valor de θ, o valor de ψ_{TBA} é sempre maior, esta diferença sendo mínima para altos valores de θ, aumentando a medida que θ diminui (potenciais mais elevados). Tais diferenças, poderiam ter a seguinte origem:

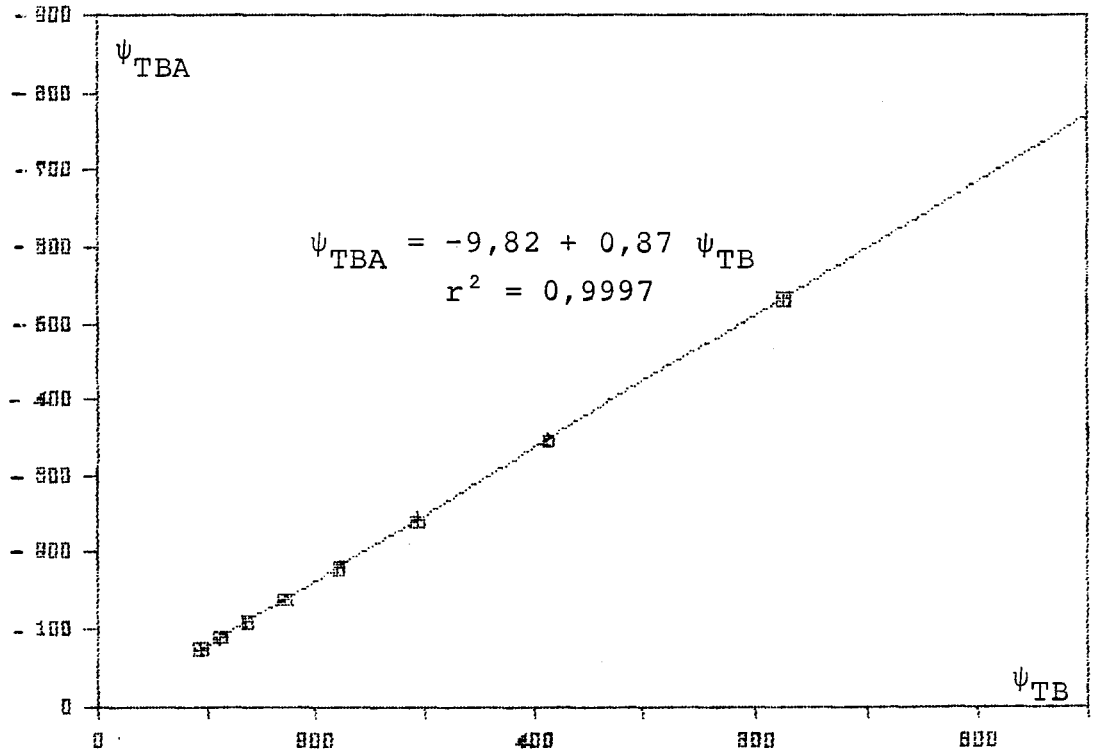
a) Erros de leitura devido a situação na qual $T'/T \neq 1$.

Tal hipótese não é viável, posto que estes erros se

minimizam a valores altos de potencial (vide Quadro 4.1), situação na qual as diferenças de tempo de resposta se maximizam.

b) Erros devido a tempo diferenciado de resposta, hipótese que nos parece viável. Nas Figuras 4.11 e 4.12 são demonstradas as curvas representativas da variação de ψ_{LD} e ψ_{C} em função do tempo de secamento. As equações que estimam $\psi = f(t)$ (vide análise estatística Quadros de A-6 a A-9 do Apêndice) nos mostram que as diferenças são diretamente proporcionais aos valores de t (ou inversamente aos de θ). Uma explicação plausível deste comportamento seria a da formação de um bulbo úmido permanente em volta da cápsula do TBA, fato que não ocorre no TC. Este bulbo devido ao maior volume de água que o TBA tem que liberar para entrar em equilíbrio, materia melhor a "ligação" cápsula água do solo, fato que não ocorreria na cápsula do TC que debita baixissimos volumes para modificar seu equilíbrio de pressões. O bulbo úmido não teria importância em situação de alta umidade do solo, mas ao longo do tempo de secagem estas diferenças tenderiam a aumentar, devido a manutenção do bulbo úmido no TBA.

Embora possa se reconhecer que mais repetições identificaram melhor o problema note-se que as Figuras 4.11 e 4.12 mostram a tendência sistemática dos valores de ψ_{BA} serem sempre maiores que os de ψ_{C}.



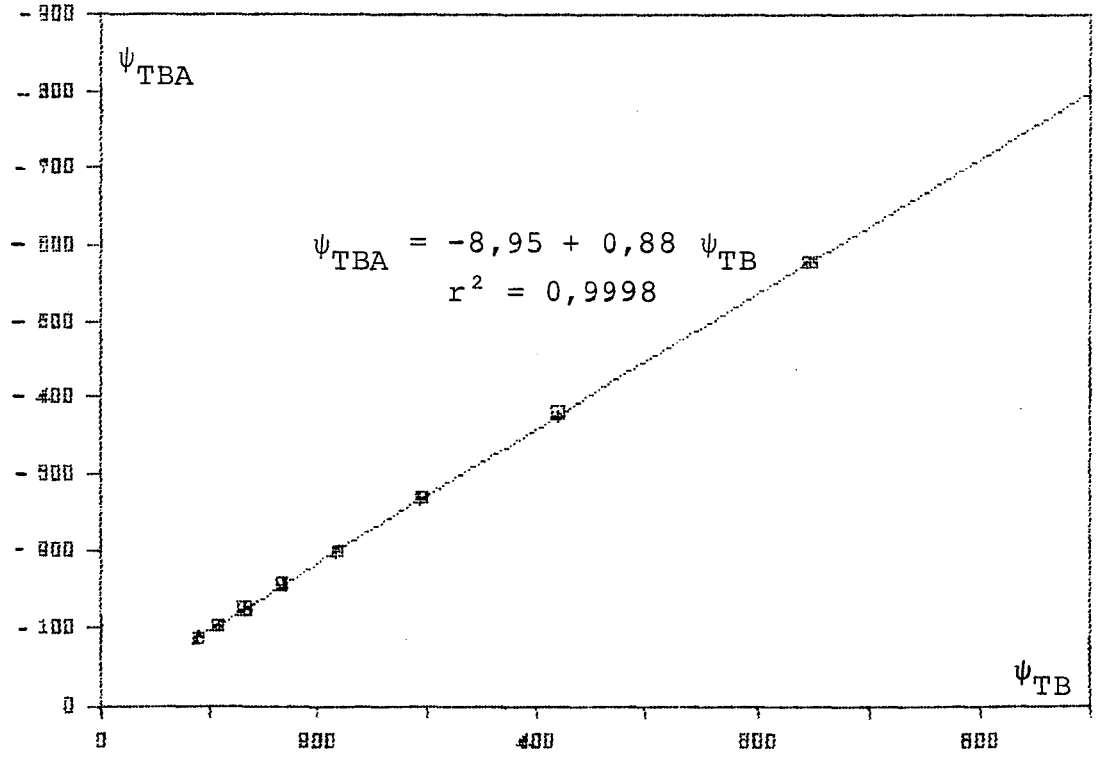


Fig. 4.9. Correlação entre as estimativas (ψ_{TBA} x ψ_{TC})
(solo arenoso)
A - Leitura das 9:00 horas
B - Leitura das 16:00 horas

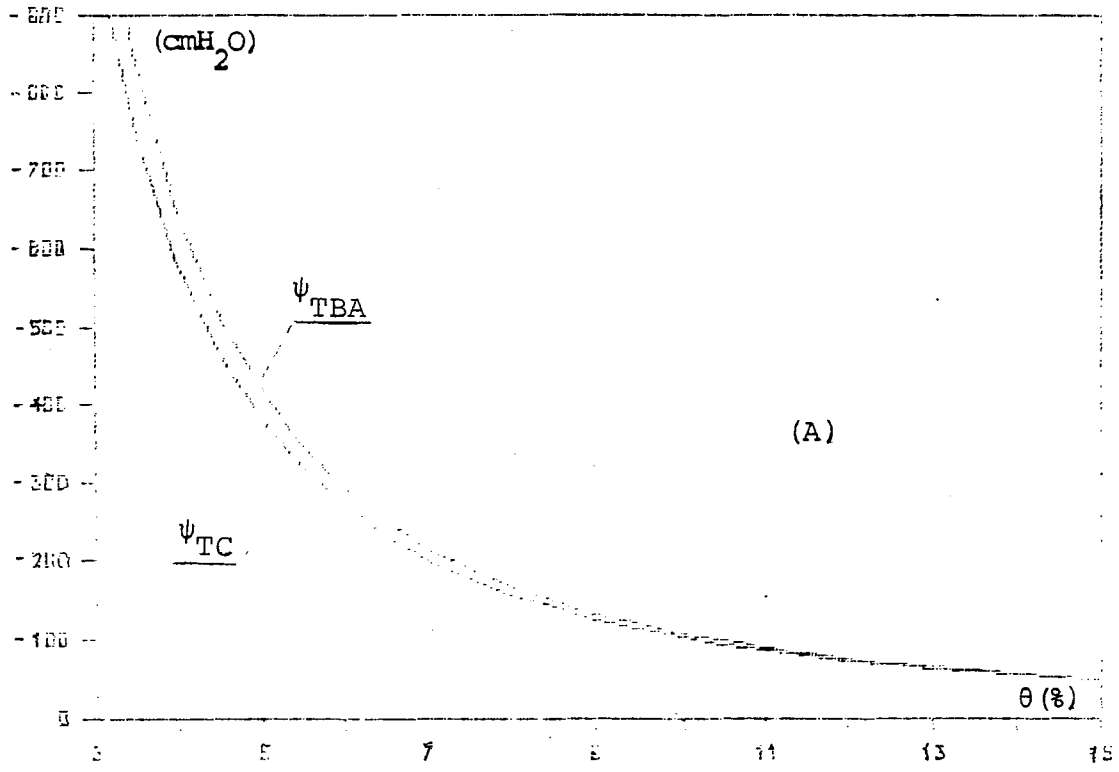
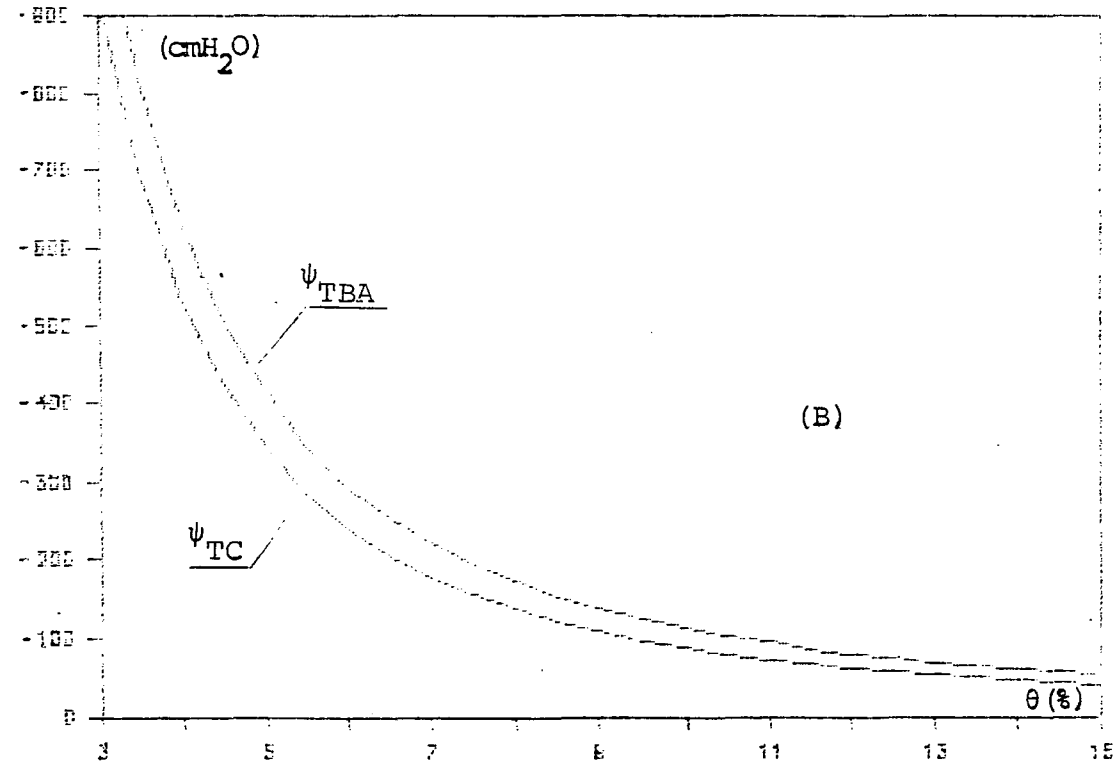


Fig. 4.10. Confronto gráfico entre as estimativas de ψ_{TBA} e ψ_{TC} (solo arenoso)
A - leitura das 9:00
B - leitura das 16:00



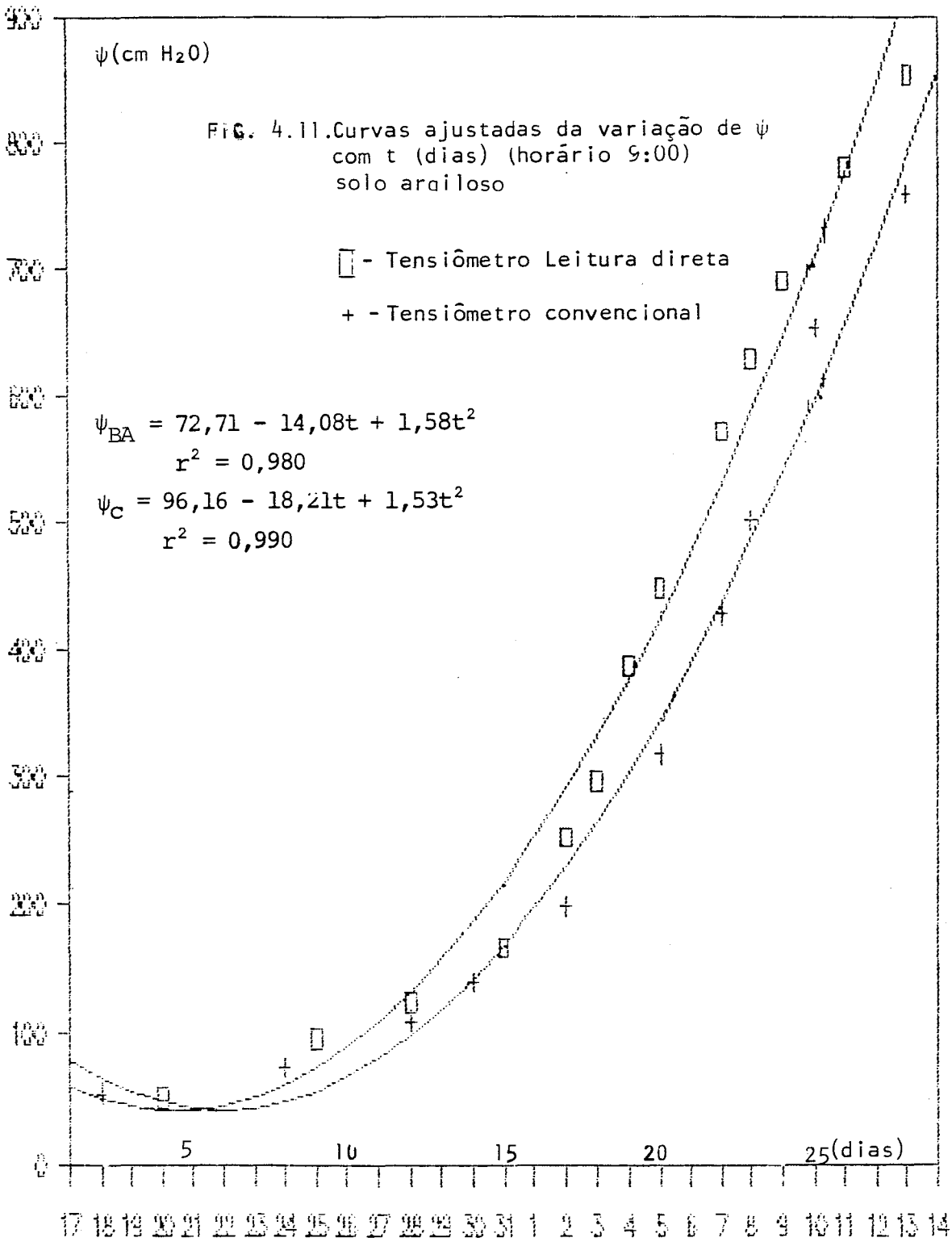


FIG. 4.11. Curvas ajustadas da variação de ψ com t (dias) (horário 9:00) solo argiloso

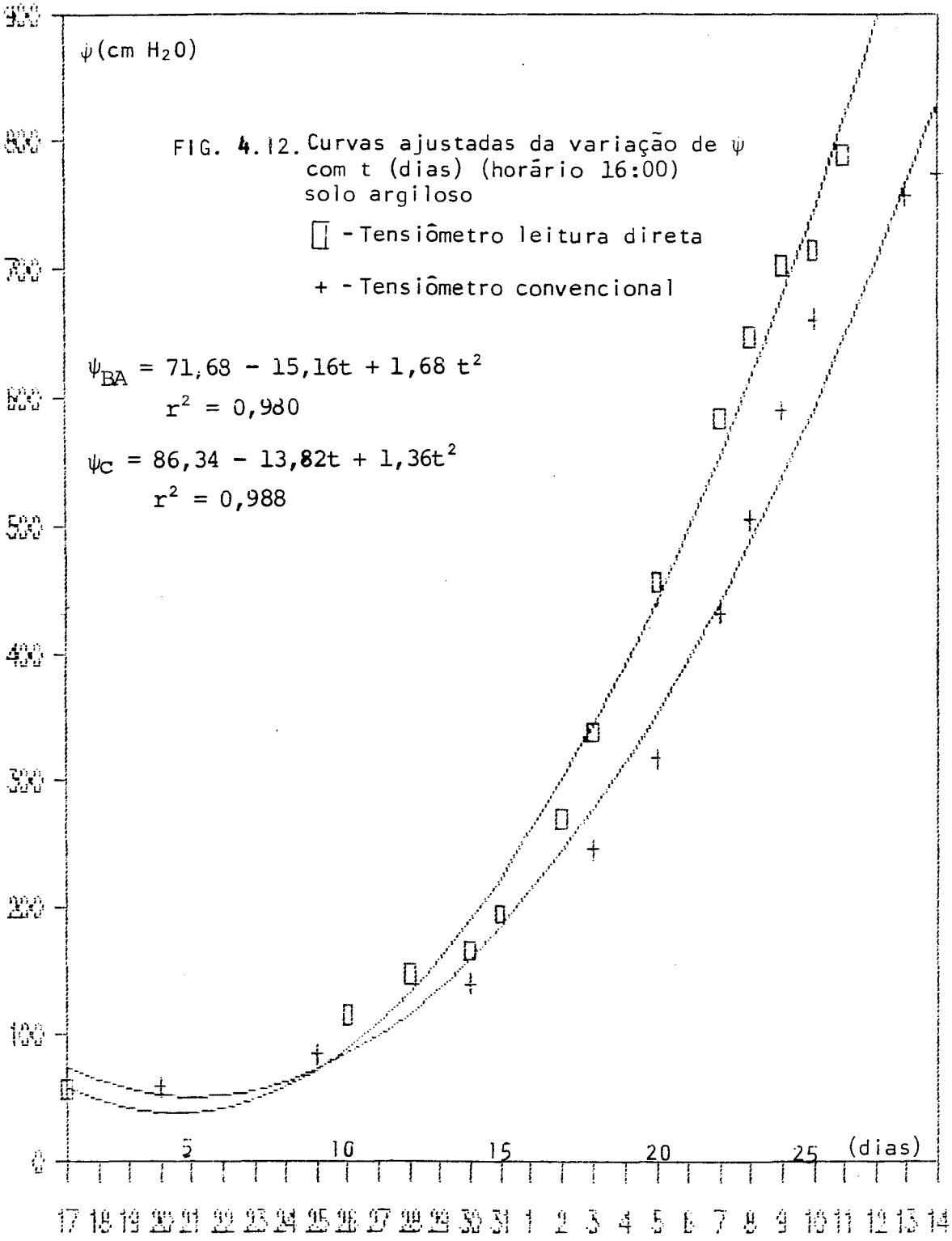


FIG. 4.12. Curvas ajustadas da variação de ψ com t (dias) (horário 16:00) solo argiloso

□ - Tensiômetro leitura direta

\+ - Tensiômetro convencional

$\psi_{BA} = 71,68 - 15,16t + 1,68\ t^2$

$r^2 = 0,980$

$\psi_C = 86,34 - 13,82t + 1,36t^2$

$r^2 = 0,988$

Dispensado-se cálculos analíticos, vê-se pelas Figuras 4.11 e 4.12, que a diferença entre os tempos de resposta variou entre zero e 1,8 dias. Se confirmada esta ordem de grandeza, com experimentação posterior, deveriamos rever o processo de monitoração de irrigação via tensiômetro convencional que se pratica na atualidade.

4.9. Generalidades

O presente trabalho de comparação entre o tensiômetro convencional e o de bolha de ar foi iniciado instalando-se o conjunto de tensiômetros em um container de 2,5 x 1,0 x 1,0 m de profundidade. O sistema não se mostrou viável devido aos seguintes problemas.

a) Redistribuição irregular da umidade ao longo do solo;

b) Excessivas amostras que deformavam o perfil de solo;

c) Impossibilidade de definir para o perfil uma umidade média consistente.

Em face a estas dificuldades optou-se pelo sistema de vasos individuais, que permitiram a avaliação da umidade com razoável precisão através de simples pesagens. Optou-se pela condição de laboratório porque a maior veloci-

dade de secamento que se teria ao ar livre, não melhoraria as comparações.

Numa segunda fase deste trabalho pretende-se fazer as comparações em condições de campo.

5. CONCLUSÕES

Em face aos resultados obtidos, para as condições do experimento pode-se afirmar que:

O tensiômetro de bolha de ar, na geometria de construção projetada, mostrou-se viável praticamente pelos seguintes aspectos.

a) É de construção bem simples e de custo mais baixo que o convencional e é não poluente.

b) Fornece medidas do potencial matricial da água do solo que apresentam correlações significativas com aquelas realizadas pelo tensiômetro convencional para o intervalo de 100 a 800 cm.c.a.

c) Não necessita de calibrações desde que se observem as condições locais de pressão atmosférica.

d) Possui um tempo de resposta mais rápido que o tensiômetro convencional para tensões compreendidas entre 300 e 900 cm.c.a. e que é a faixa de maior interesse agronômico, principalmente em solos argilosos.

e) Não deve ser utilizado para medida acima de -200 cm.c.a. a não ser que se façam correções de temperatura. Para potenciais abaixo de -400 cm.c.a. o fator de correção é negligível e pode ser minimizado por estimativas das diferenças de temperatura da câmara, entre a condição inicial e a da hora de leitura.

f) Comportou-se comparativamente melhor em condições de solo argiloso do que arenoso, talvez devido a variações mais bruscas de umidade no solo arenoso que no argiloso devido às condições de instalação das cápsulas a pouca profundidade.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABELE, G.; McKIM, H.L.; BROCKETTE, B. Mass Water balance during spray irrigation with waste at Deer Greek Lake and treatment site. Rep. 79-29, U.S. Army Corps of Eng., Hannover, N.H., 1979.

GARDNER, W.; ISRAELSEN, O.W.; EDLEFSEN, N.E.; CONRAD, H. The Cappilary potential function and its relation to irrigation practice. **Phys. Rev.**, Ser. 2, 20, 196, 1922.

HILLEL, D. **Soil and water: physical principles and processes.** Academic Press, New York, p. 73-77, 1971.

KLUTE, A. & GARDNER, W.R. Tensiometer response time. **Soil Sci., 93:** 204-207, 1962.

LIBARDI, P.L. **Dinâmica da água no sistema solo-planta-atmosfera.** Piracicaba, CENA/USP, 1984. 232 p.

OLITTA, A.F.L. Construção de tensiômetros para controle de irrigação. IV Congresso de Engenharia Agrícola, SBEA, Viçosa, MG, 1974.

PAES DE CAMARGO, A.; GROHMANN, F.; PAES DE CAMARGO, M.B. Tensiômetro simples de leitura direta. **Pesq. agropec. bras., 17**(12): 1763-1772, 1982.

REICHARDT, K. **Processos de transferência no sistema solo-planta-atmosfera.** Campinas, Fundação Cargill, 1975. 286p.

RICHARDS, L.A. Methods of measuring soil moisture tension. **Soil Sci., 68:** 95-112, 1949.

RICHARDS, L.A. & GARDNER, W. Tensiometers for measuring the capillary tension of soil water. **J. Amer. Soc. Agron., 28:** 352-358, 1936.

RICHARDS, L.A. & O'NEAL, R. Some field observations with tensiometeres. **Proc. Soil Sci. Am., 1:** 71-91, 1937.

ROSE, C.W. **Agricultural physics.** Oxford, Pergamon Press, 1966. 230p.

SCHMUGGE, T.J.; JACKSON, T.J.; McKIM, H.L. Survey of methods for soil moisture determination. **Water Resour. Res., 16:** 1961-979, 1980.

TAYLOR, S.A. & ASHCROFT, G.L. **Physical edaphology: the physics of irrigated and non-irrigated soils.** W.H. Freeman & Co., U.S.A., p. 256-262, 1972.

TOWER, G.D. Theory of time response of tensiometers. **J. Soil Sci., 31:** 607-621, 1980.

VILLA NOVA, N.A.; REICHARDT, K.; LIBARDI, P.L. & MORAES, S.O. Direct reading "airpocket tensiometer". **Soil Techonology,** Cremlingen, **2:** 403-407, 1989.

7. APENDICE

COEFICIENTES DA EQUACAO

COEFICIENTE DE 0 GRAU	: A(0) =	10902.8
COEFICIENTE DE 1 GRAU	: A(1) =	-635.4755
COEFICIENTE DE 2 GRAU	: A(2) =	9.350941
COEFICIENTE DE DETERMINACAO (R^2) =		.9978637
COEFICIENTE DE CORRELACAO =		.9989313
ERROR STANDARD ESTIMADO =		13.04693

Quadro A-1. Ajuste da função ψ_{TDA} x θ.

Leituras das 16:00 (solo argiloso).

COEFICIENTES DA EQUACAO

COEFICIENTE DE 0 GRAU	: A(0) =	9406.762
COEFICIENTE DE 1 GRAU	: A(1) =	-545.0579
COEFICIENTE DE 2 GRAU	: A(2) =	7.956856
COEFICIENTE DE DETERMINACAO (R^2) =		.9852268
COEFICIENTE DE CORRELACAO =		.9925859
ERROR STANDARD ESTIMADO =		34.30587

Quadro A-2. Ajuste da função ψ_{TC} x θ.

Leituras das 16:00 (solo argiloso).

COEFICIENTES DA EQUACAO

COEFICIENTE DE 0 GRAU	: A(0)	=	8066.329
COEFICIENTE DE 1 GRAU	: A(1)	=	-457.2322
COEFICIENTE DE 2 GRAU	: A(2)	=	6.539218
COEFICIENTE DE DETERMINACAO (R^2)		=	.9878068
COEFICIENTE DE CORRELACAO		=	.9938847
ERROR STANDARD ESTIMADO		=	33.75119

Quadro A-3. Ajuste da função ψ_{TC} x θ.

Leituras das 9:00 (solo argiloso).

COEFICIENTES DA EQUACAO

COEFICIENTE DE 0 GRAU	: A(0)	=	11211.27
COEFICIENTE DE 1 GRAU	: A(1)	=	-654.6963
COEFICIENTE DE 2 GRAU	: A(2)	=	9.633385
COEFICIENTE DE DETERMINACAO (R^2)		=	.9907757
COEFICIENTE DE CORRELACAO		=	.9953772
ERROR STANDARD ESTIMADO		=	25.64603

Quadro A-4. Ajuste da função ψ_{TBA} x θ.

Leituras das 9:00 (solo argiloso).

Regression Output:	
Constant	-24.3574
Std Err of Y Est	17.88480
R Squared	0.996039
No. of Observations	11
Degrees of Freedom	9
X Coefficient(s)	1.203512 (A)
Std Err of Coef.	0.025296

Regression Output:	
Constant	20.46190
Std Err of Y Est	5.543326
R Squared	0.999595
No. of Observations	11
Degrees of Freedom	9
X Coefficient(s)	1.107405 (B)
Std Err of Coef.	0.007423

Quadro A-5. Correlação entre ψ_{TC} e ψ_{TBA} (Solo argiloso)
A - Leituras das 9:00
B - Leituras das 16:00

COEFICIENTES DA EQUACAO

COEFICIENTE DE 0 GRAU	:	A(0) =	71.68161
COEFICIENTE DE 1 GRAU	:	A(1) =	-15.157
COEFICIENTE DE 2 GRAU	:	A(2) =	1.685044

COEFICIENTE DE DETERMINACAO (R^2)	=	.9903676
COEFICIENTE DE CORRELACAO	=	.9951721
ERROR STANDARD ESTIMADO	=	28.16958

Quadro A-6. Ajuste da função ψ_{TBA} x t.

Leituras das 16:00 (solo argiloso).

COEFICIENTES DA EQUACAO

COEFICIENTE DE 0 GRAU	:	A(0) =	86.34058
COEFICIENTE DE 1 GRAU	:	A(1) =	-13.82186
COEFICIENTE DE 2 GRAU	:	A(2) =	1.360304

COEFICIENTE DE DETERMINACAO (R^2)	=	.9799129
COEFICIENTE DE CORRELACAO	=	.9899055
ERROR STANDARD ESTIMADO	=	41.8485

Quadro A-7. Ajuste da função ψ_{TC} x t.

Leituras das 16:00 (solo argiloso).

COEFICIENTES DA EQUACAO

COEFICIENTE DE 0 GRAU	: A(0) =	96.16382
COEFICIENTE DE 1 GRAU	: A(1) =	-18.21046
COEFICIENTE DE 2 GRAU	: A(2) =	1.531305
COEFICIENTE DE DETERMINACAO (R^2)	=	.9880698
COEFICIENTE DE CORRELACAO	=	.994017
ERROR STANDARD ESTIMADO	=	31.21727

Quadro A-8. Ajuste da função ψ_{TC} x t.

Leituras das 9:00 (solo argiloso).

COEFICIENTES DA EQUACAO

COEFICIENTE DE 0 GRAU	: A(0) =	72.71588
COEFICIENTE DE 1 GRAU	: A(1) =	-14.07646
COEFICIENTE DE 2 GRAU	: A(2) =	1.58304
COEFICIENTE DE DETERMINACAO (R^2)	=	.9812855
COEFICIENTE DE CORRELACAO	=	.9905986
ERROR STANDARD ESTIMADO	=	40.96576

Quadro A-9. Ajuste da função ψ_{TBA} x t.

Leituras das 9:00 (solo argiloso).

arenoso-convencional-9horas

teta	fi	estimado	ln(teta)	ln(fi)
33.72	38.74			
31.41	42.52			
28.87	44.62			
26.08	46.72			
21.22	53.44			
18.49	58.48			
14.73	68.56			
11.86	85.78	82.44133	2.473171	4.451785
10.16	110.98	110.0649	2.318458	4.709350
8.68	141.22	147.6939	2.161021	4.950318
5.91	247.89	302.8101	1.776645	5.512985
5.54	368.44	341.6772	1.711994	5.909277
4.78	538.12	450.1037	1.564440	6.288081
3.75	704.86	708.2389	1.321755	6.557999
3.62	717.88	756.4855	1.286474	6.576302

Regression Output:

Constant	9.031649	8363.645
Std Err of Y Est	0.118360	
R Squared	0.983115	
No. of Observations	8	
Degrees of Freedom	6	
X Coefficient(s)	-1.86787	
Std Err of Coef.	0.099933	

Quadro A-10·Ajuste da função ψ_{TC} x θ.

Leituras das 9:00 (solo arenoso).

arenoso-leitura direta-9horas

teta	fi	estimado	ln(teta)	ln(fi)
33.63	19.05			
21.18	34.02			
14.43	63.17			
11.02	76.61			
10.54	90.05	80.19070	2.355177	4.500365
9.44	114.95	99.43691	2.244955	4.744497
7.11	132.42	172.8657	1.961502	4.885978
5.94	216.69	245.5049	1.781709	5.378467
5.78	252.74	258.9382	1.754403	5.532361
4.61	315.58	402.5767	1.528227	5.754412
4.34	379.2	452.8869	1.467874	5.938063
4.41	421.35	438.9669	1.483874	6.043463
4.28	561.42	465.3569	1.453953	6.330469
4.16	588.02	491.9074	1.425515	6.376760
4.13	640.84	496.9032	1.418277	6.462779

Regression Output:

Constant	8.979641	7939.786
Std Err of Y Est	0.195488	
R Squared	0.926971	
No. of Observations	11	
Degrees of Freedom	9	
X Coefficient(s)	-1.95112	
Std Err of Coef.	0.182547	

Quadro A-11.Ajuste da função ψ_{TBA} x θ.

Leituras das 9:00 (solo arenoso).

arenoso-convencional-16 horas

teta	fi	estimado	ln(teta)	ln(fi)
35.14	36.64			
31.92	40			
27.96	44.62			
24.77	47.56			
20.54	53.86			
16.76	59.74			
13.86	78.22			
11.76	82	78.88612	2.464703	4.406719
9.81	113.08	112.3614	2.283402	4.728095
5.9	234.04	302.9891	1.774952	5.455492
5.83	301.24	310.1271	1.763017	5.707907
5.54	346.6	342.5872	1.711994	5.848171
5.06	502.42	408.8465	1.621366	6.219436
4.37	593.14	544.2236	1.474763	6.385430
3.81	696.04	711.1658	1.337629	6.545407
3.72	715.78	745.1196	1.313723	6.573372

Regression Output:

Constant	9.176593	9668.161
Std Err of Y Est	0.131556	
R Squared	0.975174	
No. of Observations	9	
Degrees of Freedom	7	
X Coefficient(s)	-1.95098	
Std Err of Coef.	0.117656	

Quadro A-12. Ajuste da função ψ_{TC} e θ.

Leituras das 16:00 (solo arenoso).

arenoso-leitura direta-16 horas

teta	fi	estimado	ln(teta)	ln(fi)
31.55	34.02			
28.95	41.71			
25.55	48.99			
21.11	55.89			
12.09	70.06	72.52726	2.492378	4.249352
10.62	102.74	92.54311	2.362739	4.632201
8.67	132.72	135.5112	2.159868	4.888241
5.84	252.74	284.8270	1.764730	5.532361
5.67	300.88	301.0927	1.735189	5.706711
4.42	416.34	480.8768	1.486139	6.031502
4.28	565.95	510.8723	1.453953	6.338505
4.19	595.19	531.6961	1.432700	6.388880

Regression Output:

Constant	8.969435	7859.160
Std Err of Y Est	0.108642	
R Squared	0.984277	
No. of Observations	8	
Degrees of Freedom	6	
X Coefficient(s)	-1.87992	
Std Err of Coef.	0.097000	

Quadro A-13. Ajuste da função ψ_{TBA} e θ.

Leitura das 16:00 (solo arenoso).

9horas -areco9 x areld9		85.78	64.52442
Saida da Regressão:		110.98	86.36390
Constante	-9.81647	141.22	112.5712
Erro Padrão Est Y	3.702792	247.89	205.0164
R ao Quadrado	0.999739	366.44	309.4905
No. de Observações	25	538.12	456.5430
Graus de Liberdade	23	704.86	601.0476
		717.88	612.3313
Coeficiente(s) X	0.866646		
Erro Padrão Coefic	0.002918		

Quadro A-14. Correlação entre ψ_{TBA} e ψ_{TC}

Leituras das 9:00 (solo arenoso).

16 horas -areco16 x areld16		82	80.98595
Saida da Regressão:		113.08	108.2897
Constante	8.948955	234.04	214.5530
Erro Padrão Est Y	3.378211	301.24	273.5882
R ao Quadrado	0.999810	346.6	313.4370
No. de Observações	25	502.42	450.3249
Graus de Liberdade	23	593.14	530.0224
		696.04	620.4200
Coeficiente(s) X	0.878500	715.78	637.7616
Erro Padrão Coefic	0.002522		

Quadro A-15. Correlação entre ψ_{TBA} e ψ_{TC}

Leituras das 16:00 (solo arenoso).