



Revista Brasileira de Ciência do Solo

ISSN: 0100-0683

revista@sbcs.org.br

Sociedade Brasileira de Ciência do Solo
Brasil

Aziz Diene, Abdoul; Mahler, Claudio Fernando
UM INSTRUMENTO PARA MEDIDA DE POTENCIAL MATRICIAL NOS SOLOS SEM OCORRÊNCIA
DE CAVITAÇÃO

Revista Brasileira de Ciência do Solo, vol. 31, núm. 6, 2007, pp. 1261-1270

Sociedade Brasileira de Ciência do Solo
Viçosa, Brasil

Disponível em: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=180214061005>

- Como citar este artigo
- Número completo
- Mais artigos
- Home da revista no Redalyc

redalyc.org

Sistema de Informação Científica
Rede de Revistas Científicas da América Latina, Caribe, Espanha e Portugal
Projeto acadêmico sem fins lucrativos desenvolvido no âmbito da iniciativa Acesso Aberto

UM INSTRUMENTO PARA MEDIDA DE POTENCIAL MATRICIAL NOS SOLOS SEM OCORRÊNCIA DE CAVITAÇÃO⁽¹⁾

Abdoul Aziz Diene⁽²⁾ & Claudio Fernando Mahler⁽³⁾

RESUMO

A tensão nos solos tem sido vista pelos cientistas do solo como um aspecto de importância crescente sendo bastante usada como informação relevante na agricultura desde o início do século passado. Seu conhecimento permite melhores intervenções antrópicas não só em aspectos relativos à vegetação e a agricultura, mas também no que concerne à estabilidade de um talude. Para medir a tensão no solo tensiômetros cada vez mais sofisticados tem sido desenvolvidos. É apresentado neste trabalho o estado da arte da evolução dos tensiômetros, além do desenvolvimento de um deles, o qual mede valores de tensão de até pelo menos 1.500 kPa. Diversos protótipos foram preparados. Observou-se que se comportam diferentemente de acordo com as características de seus componentes, sem grande influência nos resultados nos domínios de leitura possíveis em cada caso. Assim, os efeitos de tipo de transdutor, tamanho do reservatório de água, dimensões e permeabilidade ao ar da pedra porosa foram analisados, monitorando-os quando instalados em lisímetros, junto com outros equipamentos, como equitensiômetros e TDRs. Os resultados mostraram que o protótipo pode ser usado *in situ* e em laboratório, sendo facilmente adaptável para uso em oedômetro ou aparelho de ensaio triaxial. Comentários sobre o papel das forças atrativas de Van der Waals na cavitação do sistema são também apresentados, esclarecendo-se os procedimentos para deslocamento do ponto de cavitação para limites superiores com a diminuição dos possíveis núcleos de gás no sistema.

Termos de indexação: tensiometria, solos não saturados.

SUMMARY: A TOOL FOR MEASUREMENT OF SOIL MATRIX POTENTIAL WITHOUT CAVITATION

Soil suction has been regarded by soil scientists as an aspect of increasing importance and has been used as an important source of information in agriculture since early last century. Its knowledge helps improve human actions not only in aspects relating to vegetation and agriculture, but also concerning slope stability. Increasingly sophisticated

tensiometers have been designed to measure soil suction. This study describes the state of the art in the evolution of tensiometers, aside from the development of a tensiometer which measures stress values of at least 1.500 kPa. Various prototypes were developed. These devices differed in the characteristics of their components, but performed rather similarly in the results in the possible reading ranges in each case. The effects of the type of transducer, size of the water tank, dimensions and permeability to air of porous stone were analyzed and monitored, installed in lysimeters or together with other equipment such as equitensiometers and TDRs. Results showed that the prototype may be used in situ and in laboratory and is readily adaptable for use in an air oedometer or triaxial apparatus. The role of Van der Waals forces in the cavitation of the system was also discussed, explaining the procedures for shifting the point of cavitation to upper limits aiming at a reduction of possible gas nuclei in the system.

Index terms: non-saturated soils, soil matrix potential, tensiometry.

INTRODUÇÃO

Os tensiômetros de tensão elevada (estado da arte)

Tabor (1979) demonstrou teoricamente que a resistência à tração da água fica por volta de -500.000 kPa (Ridley & Burland, 1993). Partindo dessa tese, Ridley (1993) e Ridley & Burland (1993) apresentaram um equipamento (Figura 1) capaz de medir tensões da ordem de 1.000 kPa.

König et al. (1994) usaram um tensiômetro para medida de poropressão em centrífuga: o Druck PDCR-81 (Figura 2). Usando um dispositivo de domínio de medição amplo, com uma pedra de 15 bar de entrada de ar, saturada a uma pressão de 2.000 kPa, Ridley (1995) foi capaz de medir tensões próximas a 1.370 kPa.

Ridley & Burland (1995) apresentaram um outro protótipo, com base no princípio de maximização da tensão sustentável em tensiômetros para medir tensões elevadas em solo. Este tensiômetro possibilitou medidas in situ de tensão da ordem de 1.500 kPa. O equipamento consiste de um diafragma com *strain-gauge* integrado e de um elemento poroso em cerâmica

selado com valor de 1.500 kPa de pressão de ar, saturada a uma pressão de 2.000 kPa (Figura 3).

Guan & Fredlund (1997) apresentaram um tensiômetro capaz de medir valores de tensão superiores a 1.250 kPa quando saturado sob uma pressão de pressão entre 12.000 e 85 kPa. A pedra de alto valor de entrada de ar é selada pelo elemento poroso numa caixa destacável do dispositivo. Montado no reservatório de água, a outra metade da caixa atua como elemento de compressão, ajustando e selando o elemento poroso no reservatório de água (Figura 4).

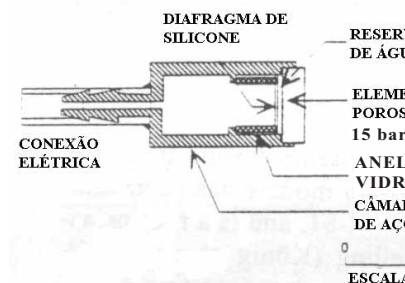
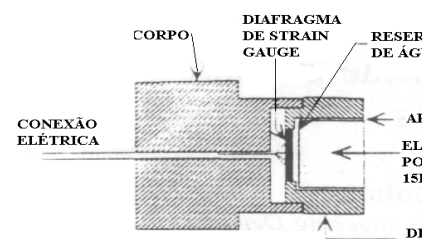
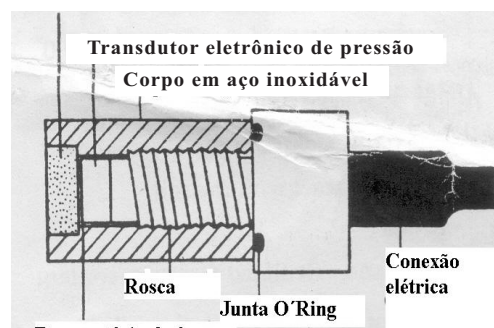


Figura 2. Tensiômetro desenvolvido por König et al. (1994).

Pedra cerâmica de 15 bar



Pacheco (2001) e Mahler et al. (2002) desenvolveram um tensiômetro de baixo custo (Figura 5), com medições maiores do que 300 kPa, sem que ocorresse a cavitação.

Take & Bolton (2002) conceberam novos instrumentos mais robustos para medição de poropressão negativa em centrífuga. Para isso, optaram por desenvolver três protótipos, apresentando algumas particularidades de formato para cada um. Em comum, os protótipos foram equipados com um transdutor Entrán EPB de 700 kPa e uma pedra porosa de 1.500 kPa (Figura 6).

Tarantino & Mongiovi (2002) apresentaram um novo tensiômetro, parecido com o de Ridley & Burland (1995), mas com várias modificações no diâmetro e espessura do diafragma, no tamanho do reservatório de água e no fechamento da abertura anular entre a pedra porosa e o corpo do tensiômetro (Figura 7). Este novo equipamento mediu tensões acima de 1.000 kPa

durante um tempo superior a 15 dias e máxima tensão de 2.000 kPa.

Todos esses protótipos conseguiram ler a tensão no solo sem ocorrência de cavitação acima de 100 kPa. Dentre os vários modelos que evitam o fenômeno de cavitação de água sujeita à tensão, dos mais aceitos é o proposto por Harvey et al. (1993), que *"assume-se que a cavitação origina-se dos gases não dissolvidos que existem nos interstícios das paredes do reservatório em vez das cavidades do líquido"*; isso pelo fato de que o núcleo de gás livre é geralmente instável e tende a escapar do interior do líquido. Ao contrário, o núcleo de gás dissolvido nas paredes do reservatório é estável e tende a permanecer nas cavidades das paredes do recipiente mesmo sob alta pressão de água. Em ensaios de tração da água foram feitos, usando-se aço ou aço inox em tubo de Berthelot.

Para inibir o fenômeno de cavitação em diversos equipamentos, várias soluções foram propostas por diversos autores, que se resumem a procedimentos aplicados na montagem ou na saturação e na calibração deles. Dessas propostas, surgiram várias conclusões referentes a como evitar a cavitação. Chandler (1993) considerou que a máxima tensão suportada pelo tensiômetro é também função do valor da tensão de ar do elemento poroso. *"Se a diferença de pressão entre o reservatório e a medida no solo excede a tensão de entrada de ar, este pode ser 'puxado' do reservatório de água; mudanças de pressão de ar que atuam no dispositivo vão resultar na expansão ou contração das bolhas do ar e a pressão medida é potencialmente destacada da realidade"*. Chandler (1995) sugeriram o uso de um volume mínimo de água no sistema de medição de tensão responsável para que não aconteça cavitação. O volume mínimo possível está limitado pelo deslocamento do diafragma do transdutor. A pré-pressurização da água tem sido considerada essencial para a saturação dos tensiômetros; contudo, algumas diferenças existem entre os métodos de pré-pressurização.

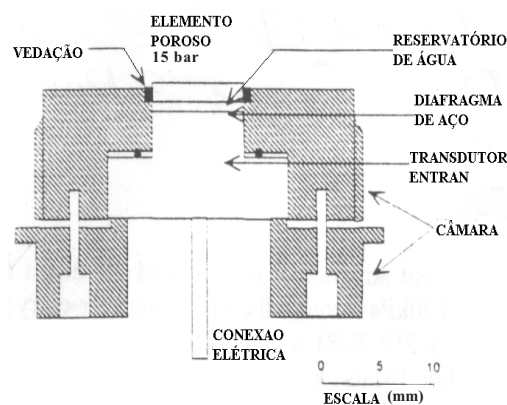
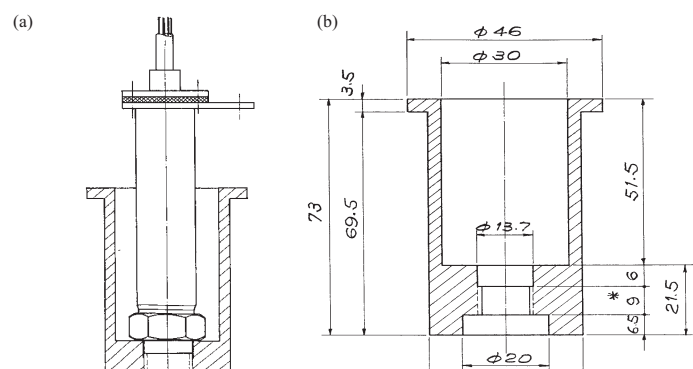


Figura 4. Tensiômetro desenvolvido na University of Saskatchewan - Canadá. (Guan & Fredlund, 1997)



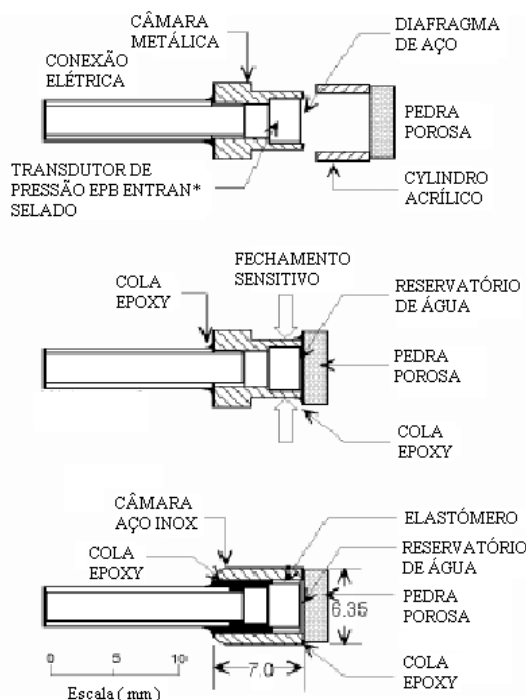


Figura 6. Tensiômetro desenvolvido na Cambridge University – Inglaterra. Take & Bolton (2002)

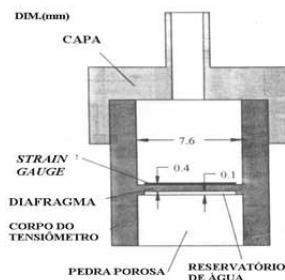


Figura 7. Tensiômetro desenvolvido na Università di Trento – Itália. (Tarantino & Mongiovi, 2002)

Guan & Fredlund (1997) aplicam várias pré-pressurizações em ciclos que começam sob um vácuo de 85 kPa, seguido por pressões maiores, que vão até 12.000 kPa. Tem sido sugerido que a tensão de rompimento é afetada preliminarmente pelo número de ciclos e pela magnitude da pressão positiva aplicada (Guan et al., 1998). Ridley & Burland (1999) afirmaram que o processo da pré-pressurização é

aplicação de uma pressão constante de 4.000 kPa é mantida por pelo menos 24 h. Tarantino et al. mediram tensões superiores ao valor de entrada do elemento poroso sem que houvesse cavitação. concluíram que a “cavitação pode ocorrer durante a equalização do sistema solo-equipamento, a interrupção do teste e a pré-saturação do ins”. o conhecimento das condições que lidam com a cavitação é, portanto, essencialmente básica para a otimização do design do instrumento”.

A cavitação não ocorrerá caso o sistema esteja livre de núcleos de cavitação, o que significa, portanto, o uso de água deaerada pura e limpas, superfícies extremamente lisas e limpas, submersão do sistema ao vácuo, aplicação cíclica de pressões positivas e negativas e pré-pressurização do sistema com pressões para dissolver o ar livre.

MATERIAL E MÉTODOS

Um tensiômetro é composto basicamente de uma pedra porosa, um corpo de contenção de aço, um transdutor ou equivalente, que transmite as variações de tensão no solo em leitura de pressão.

Os problemas referentes à cavitação – que, geralmente, ocorrem a aproximadamente uma pressão de 80 kPa – são muito comuns com tensiômetros de estrutura de montagem simples. Esses problemas foram superados nessa nova forma de construção de tensiômetros, com refinamentos construtivos relevantes, pelas seguintes ações: uso de pedras com elevado valor de pressão de entrada de água deaerada durante todo o processo de saturação da pedra porosa e sua montagem; uso do acrílico na construção do corpo do tensiômetro, com uma superfície lisa, fazendo com que não haja possibilidade de presença de microbolhas de ar durante o processo de saturação do sistema; ciclos de pressões de carga e descarga no processo de saturação do equipamento; e especificações técnicas das características do transdutor escolhido.

O equipamento aqui apresentado tem uma estrutura composta apenas destes três elementos – pedra porosa, transdutor e corpo de acrílico – e tem uma aparência semelhante com o equipamento de Ridley & Burland (1993). Esse sistema é simples em termos construtivos, sendo fabricado com materiais que se adaptam às dimensões originais da pedra porosa, o que se deseja empregar em um teste específico (Figuras 8 e 9).

As especificações das capsulas porosas são apresentadas no quadro 1; na figura 1, apresenta-se a estrutura da pedra do tipo porosa. As pedras porosas de cerâmica são naturalmente

UM INSTRUMENTO PARA MEDIDA DE POTENCIAL MATRICIAL NOS SOLOS SEM OCORRÊNCIA

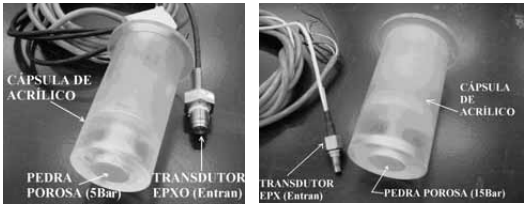


Figura 8. Tensiômetros desenvolvidos – Tense EPXO e Tense EPX. Diene (2004)

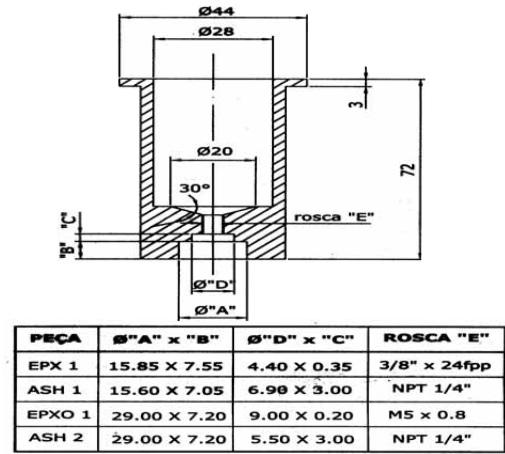


Figura 9. Croquis do protótipo da cápsula de acrílico, com suas diferentes dimensões. Diene (2004)

No desenvolvimento dos protótipos de tensiômetros foram empregados os transdutores e pedras porosas (Quadro 2).

Nos estudos foram empregados, juntamente com os tensiômetros, outros equipamentos para controle e monitoramento, como os equitômetros e TDR, para monitoramento da umidade.

O Tensiômetro de Equivalência, ou Equitômetro EQ2, é composto por uma sonda Theta e um corpo de acrílico (Figura 11), e utiliza a mais recente tecnologia de sensores de umidade. O sensor do equitômetro consiste da sonda Theta embutida em um material poroso especialmente projetado. O conteúdo deste material entra em equilíbrio com o potencial matricial do solo envolvido, onde é detectada a umidade da Theta, quando absorvida. Seu funcionamento se baseia na equivalência do potencial matricial do solo e o corpo do instrumento.

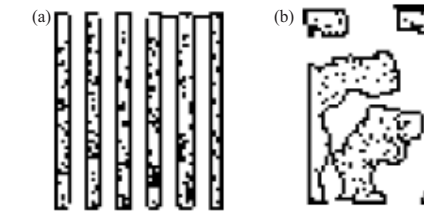


Figura 10. Estrutura de pedra porosa absorvente em corte longitudinal (a) e transversal (b). Moisture®).

Quadro 1. Especificação técnica das pedras porosas utilizadas, fornecidas pelo fabricante (Soil Moisture)

Valor de pressão de entrada de ar	Pressão de borbulhamento	Porosidade aproximada	Condutividade hidráulica saturada	Máximo tamanho de poros	Escoamento direto "1/4-inch plat
	kPa	% vol	cm s ⁻¹	µm	mL h ⁻¹ cm ⁻² /101
500 kPa Fluxo-padrão	552	31 %	1,21 x 10 ⁻⁷	0,5	0,7
1.500 kPa Fluxo-padrão	1.520	32 %	2,59 x 10 ⁻⁹	0,16	0,015

Quadro 2. Dimensões e características dos componentes dos tensiômetros usados nos ensaios (Diene)

Tensiômetro	TENSE-EPX.1 DIAM./ESP.	TENSE-EPXO.1 DIAM./ESP.
-------------	---------------------------	----------------------------

pio, a resposta do instrumento EQ2 varia numa faixa de 0 a -1.000 kPa, e sua melhor exatidão fica entre -100 kPa e -1.000 kPa, com $\pm 5\%$ de erro. A sua exatidão de leitura em tensões de 0 a 100 kPa é de 10 kPa.

A sonda *Thetaprobe* ML2 (Delta-T Devices, Cambridge, UK) é um instrumento de fabricação inglesa que mensura diretamente a umidade do solo, correspondendo ao conteúdo de umidade volumétrica, θ_v , por meio do princípio de geração de ondas que liberam um pulso eletromagnético para um conjunto de hastes sendo a reflexão medida no domínio do tempo (TDR).

O processo de saturação e calibração compreendeu as seguintes ações e equipamentos (Figura 13):

- Verificação da incorporação da pedra porosa ao corpo de acrílico, através de aplicação de três ciclos de pressão de água, para verificar a estanqueidade do contato (pedra porosa - acrílico).
- A saturação da pedra porosa é feita com a aplicação de vácuo na câmara de calibração, sem que esta contenha água no seu interior por um período superior a 15 h. Posteriormente, faz-se a entrada de água deaerada na câmara (mantendo-se o vácuo aplicado) até que ela cubra com certa folga o elemento poroso. Mantém-se o vácuo no sistema por mais duas horas.
- Transferência do conjunto para a câmara de calibração/saturação e aplicação de ciclos de pressões variando de zero até 600 kPa, seguindo o valor da pressão de borbulhamento da pedra usada, para gerar fluxo de água na pedra e remover eventuais bolhas.
- Instalação do transdutor de pressão no sistema por aparafusamento no corpo acrílico dentro de água deaerada e reaplicação de vácuo no sistema durante três a quatro horas.
- Calibração do protótipo por meio de aplicação de pressão positiva num sistema de potes de Hg com três estágios de carga e descarga, com valores de pressão de água até atingir a linearização da curva de calibração (estes valores de pressão de água variam segundo o protótipo instalado).

Observou-se que durante a calibração dos equipamentos o tempo de resposta dos tensiômetros equipados com transdutores com membrana facial (EPX e EPXO <Entran®>) é imediato (em menos de 30 s), após aplicação da carga de pressão. Com relação à sensibilidade, os transdutores variaram



Figura 12. TDR Sonda Theta ML2 (Delta-T Devices, Cambridge, UK) (2000)



Figura 13. Câmara de calibração e câmara de saturação da pedra porosa. Diene (2000)

adequadamente dentro de suas frações de compactação. Portanto, não se registrou notável diferença no comportamento quanto à histerese de compactação e membranas.

Os equipamentos foram ensaiados com minilísimetros de drenagem sem nível freático, base no modelo de lisímetros de Thornthwaite. Pela sua simplicidade, seu baixo custo e sua eficiência, determinam balanço hídrico em períodos de meses, cujas dimensões, em centímetros, são 160 x 60 x 60. Os equipamentos foram instalados em profundidades de 15 e 30 cm.

O solo utilizado nos lisímetros tem sua classificação pedológica, definindo-se como: Cambissolo distrófico argissólico textura média A proclítico hipodistrófico caulínítico hipoférrico muito ácido fase floresta tropical subperenifólia montanhoso (Quadro 3). Não foi colocada cobertura vegetal nos lisímetros, e o ensaio foi realizado em ambiente fechado.



UM INSTRUMENTO PARA MEDIDA DE POTENCIAL MATRICIAL NOS SOLOS SEM OCORRÊNCIA

Quadro 3. Caracterização físico-química do solo I do tanque B (Laps-Embrapa/Cnps)

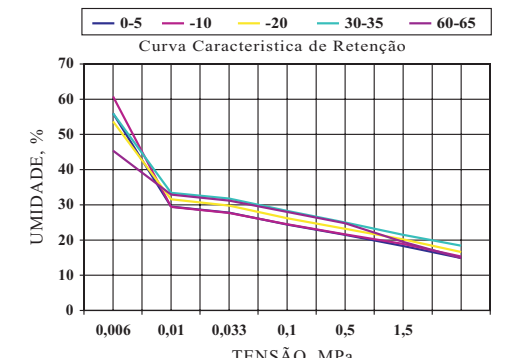
Hor.	Prof.	Fração da amostra total			Composição granulométrica					Argila dispersa em água	Índice de flocculação	Relação silte/argila	Densidade	
		Calhaus > 20 mm	Cascalho 20 a 2 mm	Terra fina	Areia grossa	Areia fina	Silte	Argila					Solo	Partículas
	cm										%		g cm ⁻³	
Ap	0-18	0	45	955	454	109	201	236	128	46	0,85	1,4	2,7	
AB	18-36	0	25	975	479	97	201	223	122	45	0,9	1,4	2,6	
A2	36-60	0	32	968	412	130	193	265	204	23	0,73	1,3	2,6	

Hor.	pH (1:2,5)		Complexo sortivo								V	M	P di
	H ₂ O	KCl	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	Valor S	Al ³⁺	H ⁺	T			
											%		m
Ap	5,5	4,5	6,3	1,1	0,43	0,03	7,9	0,1	6,2	14,2	56	1	
AB	4,6	3,8	1,9	0,7	0,14	0,02	2,8	1,1	5,6	9,5	29	28	
A2	4,6	4,0	0,8	0,4	0,09	0,01	1,3	1,3	3,7	6,3	21	50	

Foram traçadas as curvas de retenção de umidade, feitas a partir das amostras coletadas no campo em diferentes profundidades (Figura 14).

RESULTADOS

Nas figuras 15 e 16 são apresentados os resultados obtidos nos ensaios de laboratório em lisímetros (Diene, 2004), comparados com os de outros tensiômetros automatizados e sistemas de medição de tensão diferentes, como o equitensiômetro.



O tensiômetro TENSE-EPX01 medi acurados de tensão no solo de forma com valores superiores ao valor de pressão de e ar da pedra de 500 kPa nele acoplada.

Os tensiômetros TENSE-EPX1 e TENS instalados a 15 cm de profundidade medira de tensão aproximadamente similares. O te mediu valores até -1.465 kPa, e, quando corre com o TENSE-EPX01, apresentou diferença decrescente, da ordem de 15 a 25 kPa.

O EQ2-B15 mediu durante todo o ensa acima daqueles medidos pelos tensiômetro EPXO 1 e EPX 1, numa faixa de 0 a 10 entanto, numa média de 49 kPa, a tendê va manteve-se conforme o esperado, acom na mesma escala as variações dos dois outr mentos.

As curvas características do solo no tanqu representadas pelos dados mensura tensiômetro TENSE-EPX1 e equitensiômetr são similares às curvas características dete no laboratório da Embrapa.

Na figura 17 é apresentado o desempe durante os ensaios. A faixa de umidade m variou entre 50 e 12 %. Os dados mensur sonda TDR durante os ensaios após a satu

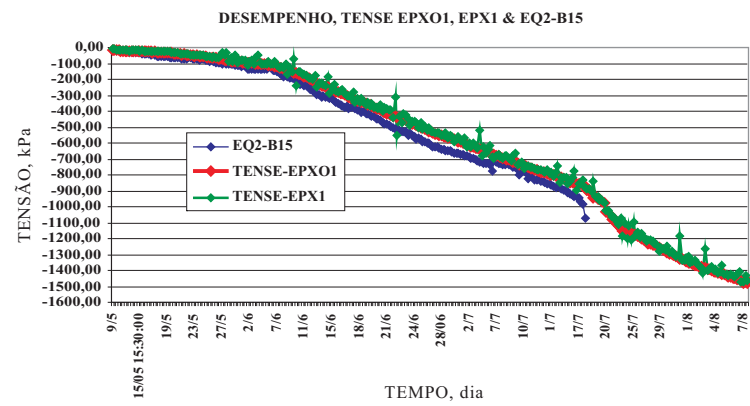


Figura 15. Resultados dos tensiômetros de tensão elevados, correlacionados com os do tensiômetro de equivalência ensaiado no lisímetro (tanque B). (Diene, 2004)

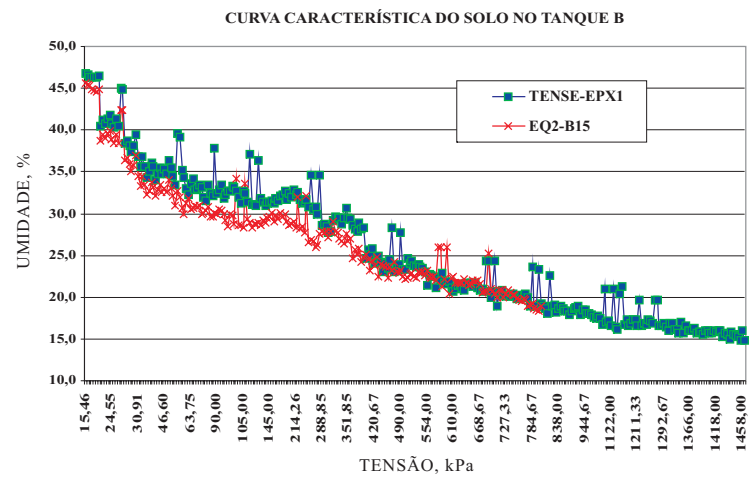
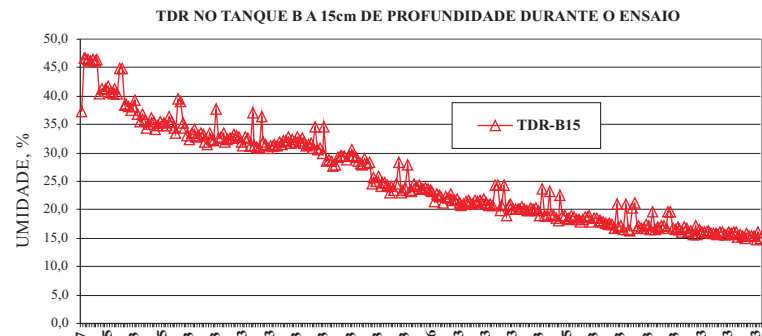


Figura 16. Aspecto da curva característica de retenção de umidade a partir dos dados dos tensiômetros de equivalência e TDR. Diene (2004)



DISCUSSÕES

A medição, feita pelo TENSE-EPX01, de valores acima do valor de pressão de entrada de ar já foi observada por outros pesquisadores, como Ridley & Burland (1993) e Tarantino et al. (2000). Segundo Marinho & Chandler (1995), esses valores poderiam ser atribuídos a uma certa eficiência osmótica da pedra porosa, e o tensiômetro estaria medindo tensão total em vez de tensão matricial. Outra justificativa possível para explicação de tal acontecimento pode ser também o fator de segurança dado pelo fabricante sobre o valor da pressão de entrada de ar da pedra porosa, que seria maior do que o indicado na pedra.

A diferença de tensão variável da ordem de 15 a 25 kPa entre os tensiômetros TENSE-EPX1 e TENSE-EPX01 pode ser atribuída às oscilações na rede elétrica mensuradas pelo TENSE-EPX1, devido à sua alta sensibilidade (10,454 mV/FS). Um filtro de linha de melhor qualidade poderia evitar essas variações, as quais podem ser o motivo desse acréscimo de tensão matricial medida.

A diferença dos valores na faixa de medidas (-100 a -800 kPa, no caso do equitensiômetro) pode ser explicada pela imprecisão do equipamento observada pelo fabricante no seu manual. Contudo, essa variação não comprometeu as medições, já que as variações se mantiveram constantes com relação às faixas de medidas de tensões (Figura 15).

A similaridade do aspecto das curvas características do solo nas condições de campo e dos solos dos lisímetros indicaria a possibilidade de reproduzir condições de campo em laboratório com acurácia, delimitados os parâmetros de contorno.

A imediata resposta do tensiômetro durante a sua calibração com aplicação de cargas e o tempo de equalização das cargas aplicadas em menos de 30 s durante todo o processo de calibração e em todos os protótipos indicariam que o tempo de resposta do equipamento é adequado às leituras para as quais foi proposto, como se confirmou após instalação dos equipamentos nos lisímetros e imediata mensuração de dados no *data-logger*.

CONCLUSÕES

1. Os processos de saturação e calibração foram eficazes, tendo em vista que não se usaram altas pressões nem tempo de aplicação de carga duradora (dias) e que bastaram os ciclos de carga e descarga para a garantia de uma boa saturação, além da aplicação de vácuo e uso de água deionada.

2. Os resultados obtidos mostram que o protótipo desenvolvido pode ser empregado seja em medidas in

3. Pode-se afirmar que a possibilidade de medição é dependente das condições térmicas e do tipo de tensões no conjunto solo, pedra porosa e tensiômetro como um todo. Os fenômenos observados, como as forças de atração de Van der Waals e a água, como forças de atração de Van der Waals, são perspectivas importantes no aprofundamento deste estudo teórico dos diversos agentes no processo de cavitação, na medida de tensão em solos.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq, à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, Fundação Volkswagen e ao Instituto de Pesquisas em Sistemas Ambientais da Universidade de Osnabrück, Alemanha, pelo constante apoio a este projeto.

NOTA

O protótipo do tensiômetro utilizado neste trabalho tem referência para o equipamento usado neste trabalho. O mesmo teve registro de patente solicitado no INPI sob o nº 0403670-0 01/09/2004 pelos senhores Claudio de Souza e Engº. Helcio Gonçalves de Souza.

LITERATURA CITADA

- DELTA-T DEVICES, UK, Instruments for environmental and industrial measurement, 2000. Disponível em: www.delta-t.co.uk/products.html?product200.
- DIENE, A.A. Desenvolvimento de tensiômetros de alta capacidade de elevação, ensaiados em lisímetros de laboratório. Rio de Janeiro, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, 2004. 173p. (Tese de Mestrado)
- GUAN, Y. & FREDLUND, D.G. Direct measurement of soil suction. In: SIMPÓSIO SOLOS NÃO SATURADOS, 3., Rio de Janeiro, 1997. v.2. p. 1-10.
- GUAN, Y.; FREDLUND, D.G. & GAN, J.K.M. Soil water subjected to high tensile stress. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON UNSATURATED SOILS, 2., Beijing, 1998. Proceedings of the International Academic Publishing, 1998. p. 3-10.
- HARVEY, E.N.; BARNES, D.K.; McELROY, W.D.; VANDERKAM, A.H.; PEASE, D.C. & COOPER, K.W. Bubble formation in animals. I Physical factors. J. Cell. Comparat. Physiol. 24:1-22, 1944.
- KÖNIG, D.; JESSBERGER, H.L.; BOLTON, M.D.; BARNES, D.K.; BAGGE, G.; RENZI, R. & GARNIER, J. Pore water measurement during centrifuge model test: a comparison of different methods. J. Geotechnical Engineering, 1998. p. 1-10.

- MARINHO, F.A.M. & CHANDLER, R.J. Cavitation and the direct measurement of soil suction. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON UNSATURATED SOILS, 1., Paris, 1995. Proceedings. Paris, 1995.v.2. p.623-630.
- PACHECO, A.C. Desenvolvimento de um novo tensiômetro para medidas de tensão acima de 1 Atm. Rio de Janeiro, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, 2001. 93p.(Tese de Mestrado)
- POROUS STONE – disponível em < <http://www.soilmoisture.com>>
- RIDLEY, A.M & BURLAND, J.B. Discussion: Use of tensile strength of water for the direct measurement of high soil suction. Can. Geotechn. J., 36:178-180, 1999.
- RIDLEY, A.M. Strength-suction-moisture content relationship for kaolin under normal atmospheric conditions. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON UNSATURATED SOILS, 1., Paris, 1995. Proceedings. Paris, 1995. v.2. p.645-651.
- RIDLEY, A.M. The measurement of soil moisture suction. London, University of London, 1993. (Tese de Doutorado)
- RIDLEY, A.M. & BURLAND, J.B. A new instrument for measuring soil moisture suction. Geotechnique, 43:324, 1993.
- RIDLEY, A.M. & BURLAND, J.B. Measurement of soil moisture suction in materials which swell. Appl. Mechanics Rev., 48:1995.
- TABOR, D. Gases, liquids and solids. 2.ed. Cambridge University Press, 1979. 448p.
- TAKE, W.A. & BOLTON, M.D. A new device for the direct measurements of negative pore water pressure in centrifuge models. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PHYSICAL MODELLING GEOTECHNICS, 1., Rotterdam, A. Balkema, 1993. p.89-94.
- TARANTINO, A. & MONGIOVÌ, L. Design and construction of a tensiometer for direct measurement of matric suction. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON UNSATURATED SOILS, 3., Recife, 2002. Proceedings. Recife, 2002. p.319-324.
- TARANTINO, A.; BOSCO G. & MONGIOVÌ L. Design and construction of the IC tensiometer with respect to cavitation. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON UNSATURATED SOILS, 3., Singapore. Proceedings. Rotterdam, A. Balkema, 2002. p.309-314.