

# Utilização da Porosimetria por Injeção de Mercúrio (MIP) na determinação de curvas características em solos deformáveis.

Márcia M<sup>a</sup> dos Anjos Mascarenha, Manoel Porfírio Cordão Neto, Pedro Murrieta dos Santos Neto  
Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, mmascarenha@unb.br, porfirio@unb.br, murrieta@unb.br.

Enrique Romero Morales  
Universidade Politécnica da Catalunya, Barcelona, Espanha, enrique.romero-morales@upc.edu.

**RESUMO:** O conhecimento da curva característica de um solo é essencial ao entendimento do seu comportamento hidro-mecânico, existindo diversas técnicas para a determinação da mesma, as quais são normalmente demoradas e pontuais. Prapaharan *et al.* (1985) e Romero (1999) utilizaram a porosimetria por injeção de mercúrio (MIP) na obtenção de curvas características de solos compactados estaticamente, permitindo que as curvas fossem obtidas rapidamente e de forma praticamente contínua. Dessa forma, esse trabalho tem como objetivo verificar a possibilidade de uso dessa metodologia em um solo natural. Para isso, uma curva característica de uma argila siltosa foi obtida utilizando-se o Dewpoint PotentiaMeter (WP4), a técnica de translação de eixos e o psicrômetro de transistor (SMI). Essa curva foi comparada à obtida utilizando o MIP, apresentando uma boa concordância entre elas.

**PALAVRAS-CHAVE:** Curva Característica, Porosimetria por Injeção de Mercúrio, Sucção.

## 1 INTRODUÇÃO

A importância da sucção no comportamento hidro-mecânico de solos não saturados têm sido bastante discutida nas últimas décadas, causando a necessidade de desenvolvimento de técnicas de medição dessa variável em ensaios de laboratório e de campo.

Dentre essas técnicas podemos citar a técnica de translação de eixos, o método de equilíbrio a vapor, as técnicas baseadas na lei psicométrica e o método do papel filtro. Enquanto as três primeiras técnicas têm o inconveniente de não possibilitar um grande intervalo de medidas de sucção, o método do papel filtro não permite a realização do ensaio em um mesmo corpo de prova. Além disso, todas as técnicas acima citadas exigem um grande tempo de ensaio.

Dessa forma, Prapaharan *et al.* (1985) e Romero (1999) propõem a utilização da porosimetria por injeção de mercúrio (MIP) na obtenção de curvas características, permitindo que as curvas sejam obtidas rapidamente e de forma praticamente contínua, utilizando uma única amostra de solo.

Para este trabalho foram realizados ensaios utilizando o Dewpoint PotentiaMeter (WP4), a técnica de translação de eixos e o psicrômetro de transistor (SMI). A curva obtida por esses métodos foi comparada à curva obtida a partir do MIP, a fim de verificar a eficiência dessa técnica.

## 2 METODOLOGIA DE ENSAIOS

### 2.1 Descrição do Solo Utilizado

O solo escolhido para a pesquisa foi uma argila siltosa de alta porosidade e de comportamento colapsível da cidade de Lleida, a 156 km de Barcelona, Espanha, no qual foi construído o canal Algerri-Balaguer.

Os resultados dos ensaios de caracterização geotécnica estão resumidos na Figura 1, onde se apresenta a curva granulométrica da amostra, e na Tabela 1, onde se indicam os limites de consistência (limite de liquidez  $w_L$ , limite de plasticidade  $w_p$  e o índice de plasticidade IP), o

peso específico seco ( $\gamma_d$ ), o peso específico dos sólidos ( $\gamma_s$ ), o índice de vazios ( $e$ ), a umidade natural do solo e a classificação do solo segundo o Sistema unificado de classificação dos solos (SUCS).

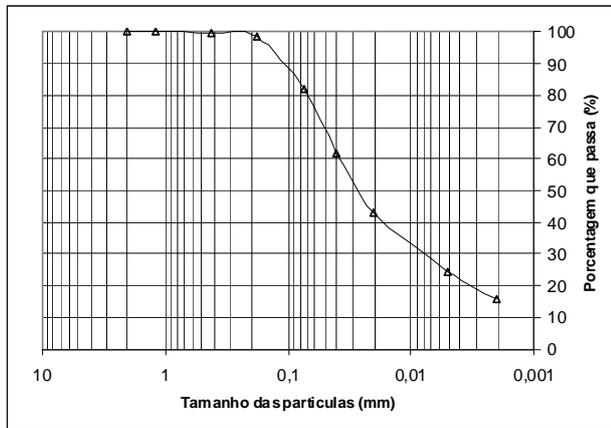


Figura 1. Curva Granulométrica do solo.

Tabela 1 - Caracterização Geotécnica do Solo

$w_L$ (%)	$w_P$ (%)	IP (%)	$e$	$\gamma_d$ ( $g/cm^3$ )	$\gamma_s$ ( $g/cm^3$ )	$w_{nat}$ (%)
22	15	7	0,71	1,55	2,65	4
% que passa			Classificação SUCS			
# 4	#40	#200	2 $\mu$ m	CL-ML (argila siltosa de baixa compressibilidade)		
100	100	82	16			

## 2.2 Descrição dos Equipamentos e Procedimentos de Ensaio.

### 2.2.1 WP4 e SMI

O WP4 e o SMI são equipamentos de medição de sucção total do solo, cujo princípio de funcionamento é baseado na lei psicométrica. A lei psicométrica define que a sucção da água do solo em equilíbrio com um ambiente está relacionada termodinamicamente à umidade relativa do ar neste ambiente, a partir da Equação 1 (Fredlund & Rahardjo, 1993).

$$\psi = -RT\gamma_w \ln(h_r) \frac{\ln(h_r)}{M_w} \quad (1)$$

Onde  $\psi$  é a sucção total do solo em Pa; R a constante universal dos gases (8,3143J/mol/K); T é a temperatura em K;  $\gamma_w$  é a massa específica da água (998 kg /m<sup>3</sup>);  $h_r$  é a umidade relativa e  $M_w$  é a massa molecular da água (0,018kg/mol).

O SMI é constituído de três componentes: um recipiente isolado termicamente, um milivoltímetro e sondas psicométricas, que possuem em seu interior um termômetro seco e outro que será umedecido.

O procedimento de ensaio consiste em umedecer um dos termômetros da sonda com uma gota de água destilada. Em seguida coloca-se uma cápsula contendo solo com umidade conhecida em contato com a sonda. O conjunto sonda e cápsula são colocados dentro do recipiente isolado termicamente, para garantir que a amostra esteja com temperatura constante durante todo ensaio.

O solo permanece nesse recipiente durante uma hora, que é o tempo necessário para que haja um equilíbrio de umidade relativa entre o termômetro úmido e o espaço de ar existente entre ele e o solo.

A sonda possui um pequeno circuito onde estão montados os componentes elétricos, ajustados para medir a diferença de temperatura entre os termômetros secos e úmidos, sendo os valores fornecidos em voltagem. Um esquema gráfico deste equipamento é mostrado na Figura 2.

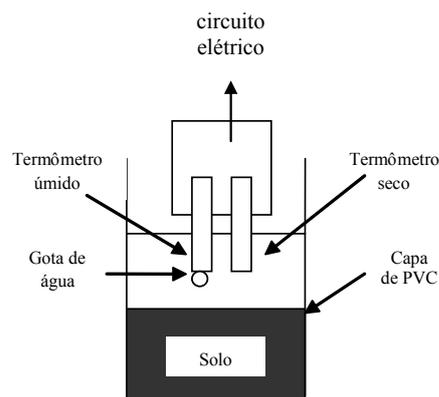


Figura 2. Esquema gráfico do SMI.

O WP4 é uma câmara selada constituída de um espelho, um sensor fotoelétrico, um par termoelétrico, um termômetro infravermelho e um ventilador (Fig. 3).

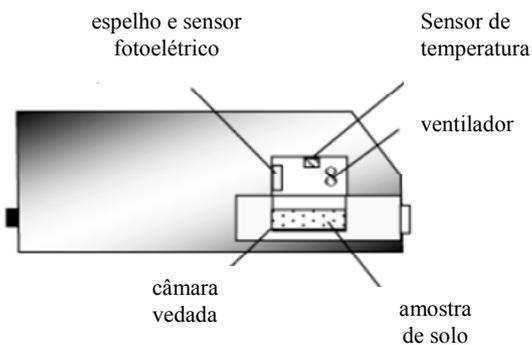


Figura 3. Esquema gráfico do WP4 (Leong *et al.* 2003).

Uma amostra de solo em equilíbrio com o ar é colocada dentro da câmara. A presença de água condensada no espelho é detectada pelo sensor fotoelétrico, devido à redução de reflexão do espelho. Um par termoeletrico determina a temperatura em que ocorreu a condensação, enquanto um termômetro infravermelho determina a temperatura da amostra. A diferença entre essas duas temperaturas fornece a umidade relativa do solo e, conseqüentemente, o valor da sucção. A função do ventilador é simplesmente circular o ar dentro da câmara, para reduzir o tempo de equilíbrio (Decagon Devices 2003).

### 2.2.2 Edômetro com Sucção Controlada

Devido ao fato que o SMI e o WP4 somente fornecem bons resultados para valores de sucção superiores a 1 MPa, utilizou-se um edômetro com sucção controlada para a realização da curva característica para valores de sucção inferiores a 1 MPa. Neste equipamento a sucção matricial é controlada pela técnica de translação de eixo.

O equipamento é composto de uma base onde estão acoplados o disco cerâmico de Alto Valor de Entrada de Ar (1,5 MPa), o sistema de pressão de água ( $u_w$ ) e drenagem (Fig. 4). No corpo intermediário estão o sistema de pressão de ar ( $u_a$ ) e o espaço para colocar o anel oedométrico com a amostra de solo. Entre o corpo intermediário e o superior há uma membrana impermeável, formando uma câmara que contém pressão de ar. Nesta membrana está acoplado o pistão de bronze, por meio do qual se aplica a pressão sobre a amostra. Sob o pistão é posicionado um filtro de alta permeabilidade e

de mesmo diâmetro que a amostra, a fim de distribuir uniformemente a pressão aplicada.

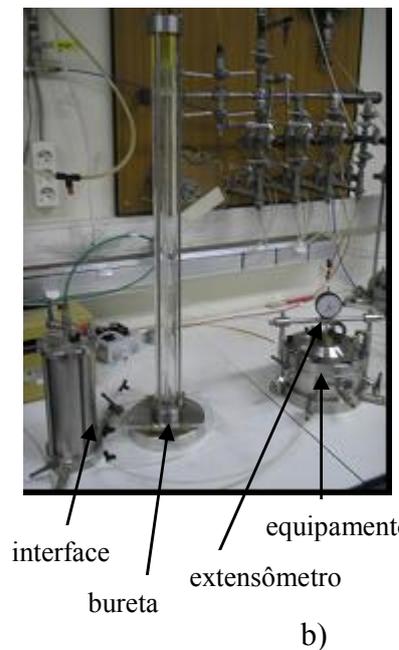
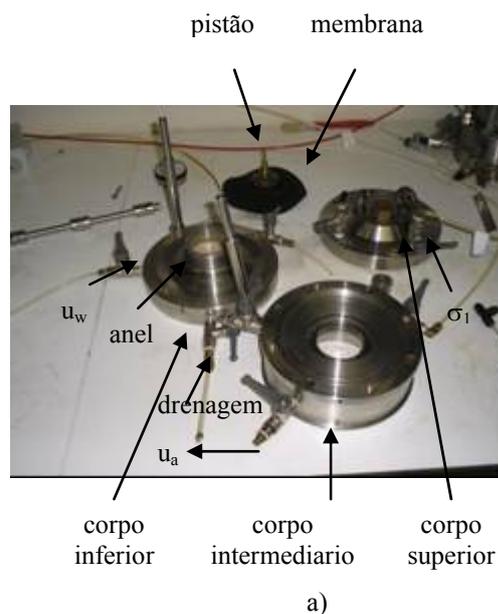


Figura 4. Oedométrico com sucção controlada. (a) componentes; (b) acessórios de medição.

As medidas de deformações do solo são feitas por um extensômetro e as variações do volume de água são medidas com uma bureta graduada. Para a imposição de água na amostra se utiliza um sistema de interface, a fim de converter a pressão de ar aplicada em pressão de água na amostra.

Para começar o ensaio, uma baixa pressão vertical ( $\sigma_1$ ) é imposta ao sistema e depois as pressões de ar e vertical são incrementadas simultaneamente, mantendo-se a diferença

constante, até alcançar a pressão de ar do ensaio. Para a trajetória de umedecimento/secagem mantinha-se  $u_a$  constante e variava-se  $u_w$ , até o valor de sucção desejada. O valor de sucção é mantido até a estabilização da variação do volume de água e da variação volumétrica do solo.

### 2.2.3 Porosimetria por Injeção de Mercúrio

A porosimetria por injeção de mercúrio tem sido extensivamente utilizada como uma técnica experimental para determinação da distribuição e estrutura dos solos porosos. A técnica se baseia no fato de que o mercúrio não penetra espontaneamente nos poros, a menos que se aplique uma pressão sobre ele.

O procedimento de ensaio consiste em colocar a amostra num recipiente, sendo ambos preenchidos com mercúrio. Ao se aumentar a pressão sobre o líquido seu nível é reduzido à medida que este penetra nos poros da amostra. Com os valores do volume de poros do solo penetrado pelo mercúrio e com a respectiva pressão aplicada, uma curva porosimétrica é obtida (Laboratórios de Meios Porosos e Propriedades Termofísicas, 2005).

A Equação 2 (Washburn, 1921) relaciona os diâmetros dos poros com a pressão aplicada.

$$D = -\frac{1}{P} 4\gamma \cos \phi \quad (2)$$

Onde  $D$  é o diâmetro do poro,  $P$  é a pressão absoluta aplicada,  $\gamma$  é a tensão superficial do mercúrio e  $\phi$  é o ângulo de contato entre o mercúrio e a amostra.

### 2.3 Utilização do MIP na Obtenção de Curvas Características

Segundo Prapaharan *et al.* (1985), o MIP pode ser utilizado para determinar a curva característica de um solo, em trajetória de secagem, uma vez que a pressão com que o mercúrio é injetado no solo pode ser relacionada a um incremento externo de pressão de ar em uma amostra saturada.

Conforme Romero (1999), a injeção de mercúrio na amostra com um ângulo de  $140^\circ$  ( $\phi$ )

é equivalente à expulsão de água com um ângulo de  $180^\circ$  ( $\phi_w$ ) para um mesmo diâmetro de poros. Dessa forma, a Equação 2 é extrapolada para sucção, obtendo-se a Equação 3.

$$D = -\frac{1}{u_a - u_w} 4\lambda_w \cos \phi_w \quad (3)$$

Onde  $\lambda_w$  é a tensão superficial da água.

Substituindo-se os valores de  $\gamma$ ,  $\phi$ ,  $\lambda_w$  e  $\phi_w$  nas Equações 2 e 3, obtém-se uma relação entre a sucção e a pressão de injeção de mercúrio, conforme a Equação 4.

$$u_a - u_w = 0,196P \quad (4)$$

Relacionando-se os vazios do solo penetrados pelo mercúrio na porosimetria com os vazios preenchidos por ar em um processo de secagem, o valor de dessaturação do solo é fornecido pela Equação 5.

$$S_{nw} = \frac{e_{nw}}{e_{máx}} \quad (5)$$

Onde  $e_{nw}$  é o valor do índice de vazios penetrado pelo mercúrio e  $e_{máx}$  é o máximo índice de vazios da amostra.

Dessa forma, os valores de saturação e umidade do solo são obtidos pelas Equações 6 e 7.

$$S_r = 1 - \frac{e_{nw}}{e_{máx}} \quad (6)$$

$$w = w_{máx} S_r \quad (7)$$

Onde  $w_{máx}$  é a umidade de saturação da amostra.

Substituindo a Equação 6 na Equação 7, obtém-se a Equação 8.

$$w = w_{máx} (1 - S_{nw}) \quad (8)$$

No entanto, o mercúrio não penetra em todos os poros do solo, devido principalmente à umidade higroscópica. Para considerar essa

diferença, corrigi-se a Equação 8 conforme a Equação 9.

$$w = (w_{m\acute{a}x} - w_r)(1 - S_{nw}) + w_r \quad (9)$$

Onde  $w_r$  é a umidade higroscópica.

Substituindo-se a Equação 9 na Equação 7, tem-se a nova formulação (Eq. 10) para determinação do grau de saturação do solo.

$$S_r = (1 - S_{nw}) + \frac{w_r}{w_{m\acute{a}x}} S_{nw} \quad (10)$$

Prapaharan *et al.* (1985) apresentam as curvas características de um solo argiloso obtidas pelo MIP e por uma técnica convencional, a qual não é identificada pelos autores (Fig. 5).

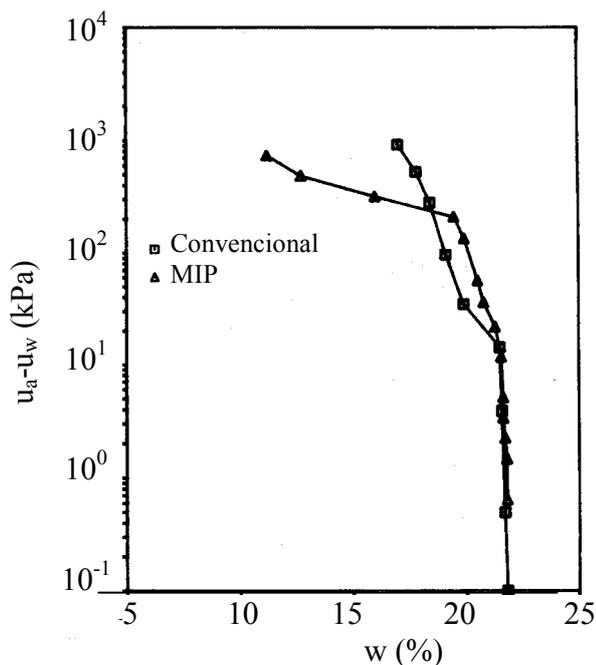


Figura 5. Curvas características obtidas pelo MIP e outra técnica convencional (Prapaharan *et al.* 1985)

Observa-se que para valores de sucção muito baixos, em torno de 10 kPa, as duas curvas são coincidentes. Entre 10 e 300 kPa, os valores de sucção fornecidos pelo MIP são ligeiramente maiores que os fornecidos pela técnica tradicional. A partir de 300 kPa as curvas obtidas pelas diferentes técnicas se distanciam, sendo os valores do MIP inferiores aos valores da outra técnica utilizada.

Romero (1999) realizou ensaios com o SMI e a técnica de equilíbrio a vapor para a determinação das curvas características de amostras de solo com diferentes densidades. Essas curvas foram comparadas às obtidas utilizando os resultados dos ensaios de porosimetria por injeção de mercúrio, conforme a Figura 6. Observa-se que as curvas obtidas por meio dos métodos tradicionais e MIP, embora não possuam os mesmos valores, apresentam uma boa concordância quanto a forma.

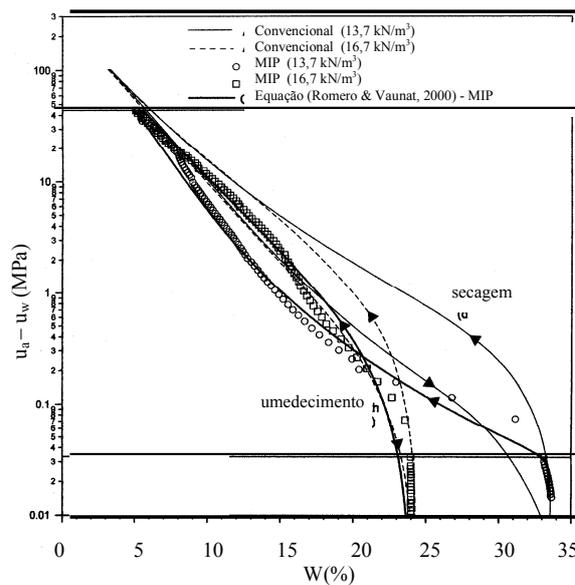


Figura 6. Curvas características obtidas pelo MIP e outras técnicas convencionais (Romero 1999).

### 3 ANÁLISE DOS RESULTADOS

A curva característica do solo estudado foi obtida utilizando três equipamentos distintos: o SMI e o WP4 para valores de sucção maiores que 1 MPa e o oedômetro com sucção controlada para valores menores que 1 MPa. Apesar dos equipamentos WP4 e SMI fornecerem valores de sucção total e o edômetro com sucção controlada valores de sucção matricial, verifica-se uma boa concordância entre os métodos, o que levou a desconsiderar os valores de sucção osmótica.

Romero & Vaunat (2000) modificaram a expressão para curva característica de Van Genuchten (1980), acrescentando um fator de

correção dependente da sucção, o qual faz a curva tender a uma relação linear a altos valores de sucção. A nova equação proposta (Eq. 11) e o fator de correção (Eq. 12) são apresentados a seguir.

$$w = w_{sat} C_{u_a - u_w} \left\{ \frac{1}{1 + [\alpha(u_a - u_w)]^n} \right\}^m \quad (11)$$

$$C_{u_a - u_w} = \left\{ 1 - \frac{\ln \left[ 1 + \frac{(u_a - u_w)}{a} \right]}{\ln 2} \right\}^m \quad (12)$$

Onde  $w_{sat}$  é a umidade do solo quando saturado;  $a$  é o valor da sucção para umidade higroscópica e  $n$ ,  $m$  e  $\alpha$  são os mesmos parâmetros de van Genuchten (1980), sendo o último relacionado ao valor de entrada de ar da curva.

Na Figura 7 constam os dados da curva característica do solo obtidos em laboratório e a curva ajustada pela proposta de Romero & Vaunat (2000). Os parâmetros obtidos são mostrados na Tabela 2.

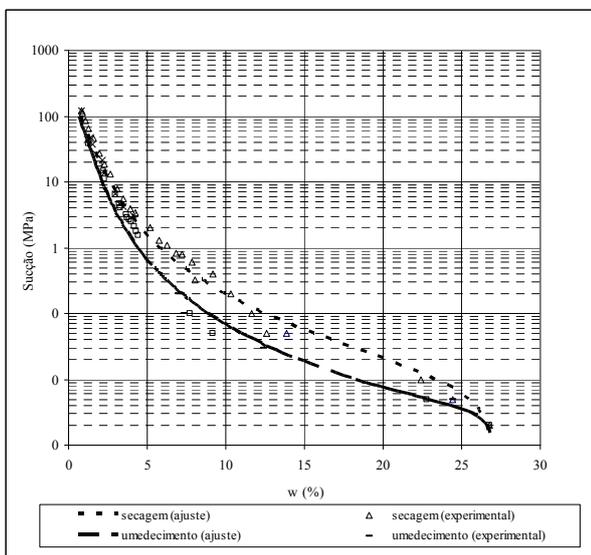


Figura 7. Curva característica do solo

Tabela 2.. Parâmetros de ajuste das curvas características.

Trajectoria	$w_{sat}$ (%)	$a$ (MPa)	$\alpha$ (MPa <sup>-1</sup> )	$n$	$m$
Secagem	26,79	300	100	1,5	0,22
Umedec.	26,79	300	500	3,0	0,10

A Figura 8 apresenta a curva característica obtida pelo MIP (Eq. 4 e 9) e as curvas determinadas pela equação de Romero & Vaunat, 2000 (Eq. 11 e 12), em trajetórias de secagem e de umedecimento. As curvas apresentam uma razoável concordância em relação à forma, conforme o verificado por Prapaharan *et al.* (1985) e Romero (1999).

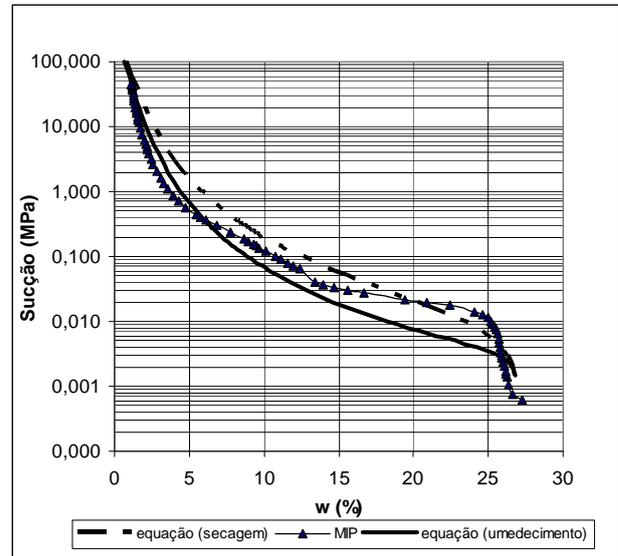


Figura 8. Curvas características do solo (equação e MIP).

Em termos de valores de sucção, observa-se que a curva obtida por meio do MIP apresenta uma melhor concordância com a trajetória de umedecimento a altos valores de sucção e com a trajetória de secagem a baixos valores de sucção.

Romero (1999) observou em seus resultados (Figura 6) que a curva obtida por meio do MIP está mais próxima à curva em trajetória de umedecimento dos ensaios convencionais, e não à curva em trajetória de secagem, como era o esperado.

Nenhuma explicação conclusiva em relação a essas diferenças foram encontradas. Vale ressaltar que são utilizadas distintas técnicas de ensaios e distintos fluidos de dessaturação da amostra (ar e mercúrio), o que pode justificar essas diferenças.

A utilização desse método na determinação de curvas características apresenta grandes vantagens em relação aos métodos tradicionais, as quais são citadas a seguir:

- Tempo de realização de ensaio inferior a 24 horas. Nos métodos de translação de eixo, de

equilíbrio a vapor e do papel filtro, é necessário esperar o equilíbrio de sucção, que pode demorar semanas dependendo do tipo de solo. No caso dos psicrômetros SMI e WP4, apesar do curto tempo de medida de sucção, são necessárias 24 horas para homogeneização da umidade do corpo de prova;

- Obtenção da curva característica praticamente de maneira contínua, ao contrário dos outros métodos que fornecem valores de forma pontual;

- Grande intervalo de medidas de sucção, sendo esses valores definido pela máxima e mínima pressão fornecida pelo equipamento;

- Não ocorre nenhuma alteração considerável nos valores de índice de vazios do solo;

Devido às vantagens mencionadas anteriormente, a porosimetria por injeção de mercúrio apresenta-se como uma boa alternativa prática para a obtenção de curvas características de solo, sendo necessários mais ensaios de laboratório para garantir sua eficiência.

No entanto, essa técnica só permite obtenção de curvas características em trajetória de secagem, sendo essa a grande desvantagem em relação aos métodos tradicionais de medidas de sucção do solo.

#### 4 CONCLUSÕES

As curvas características obtidas utilizando a porosimetria por injeção de mercúrio apresentam uma razoável concordância quanto à forma com as obtidas utilizando os métodos convencionais.

Considerando-se a rapidez e a praticidade desse ensaio, essa técnica surge como uma boa alternativa às técnicas tradicionais. No entanto, recomenda-se a execução de mais ensaios de laboratório para verificar a eficiência do método, tanto em amostras compactadas quanto em amostras natural.

Vale ressaltar que esse método não permite visualizar a histerese das curvas características, uma vez que só representa a trajetória de secagem da curva, sendo essa sua grande

desvantagem em relação aos métodos tradicionais de determinação da sucção.

#### REFERÊNCIAS

- Decagon Devices, Inc. (2003). WP4 Water Dewpoint Potentiometer. Operator's Manual Version 2.2. Decagon Devices, Inc., Pullman, USA ([www.decagon.com](http://www.decagon.com)).
- Fredlund, D.G. & Rahardjo, H. (1993). *Soil mechanics for unsaturated soils*. JohnWiley & Sons, New York, United States of America, 517p.
- Laboratórios de Meios Porosos e Propriedades Termofísicas. (2005). Pesquisa, porosimetria por injeção de mercúrio. Consultada em [www.lmpt.ufsc.br](http://www.lmpt.ufsc.br) no dia 15/05/2005.
- Leong, E.-C., Tripathy, S. and Rahardjo, H. (2003) Total suction measurement of unsaturated soils with a device using the chilled-mirror dew-point technique. *Géotechnique* 53(2), pp 173–182.
- Prapaharan, S., Altschaeffl, A.G. & Dempsey, B.J. (1985). Moisture curve of a compacted clay: mercury intrusion method. *J. Geotech. Engrg.*, ASCE, 111(9): 1139-1143.
- Romero, E. E. M. (1999). *Characterisation and thermo hydro-mechanical behaviour of unsaturated boom clay: An experimental study*. Tese de Doutorado. Departamento de Engenharia de Terreno e Cartografia, Universidade Politécnica da Catalunia, Barcelona. 405 p.
- Romero, E. & Vaunat, J. (2000). Retention curves of deformable clays. *Experimental evidence and theoretical approaches in unsaturated soils*, Tarantino & Mancuso (eds.). Balkema, Rotterdam, 91-106.
- Van Genuchten, M. T. (1980). A closed-form equation of predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of American Journal*. Vol. 44, 892-898.
- Washburn, E. W. (1921). Note on a method of determining the distribution of pore sizes in a porous Material. *Proceedings National Academy of Sciences*, Vol 7, 115-116.