

Curvas Características Solo-Água de Duas Areias Submetidas a Ciclos de Molhagem e Secagem

Déborah M. A. Amoroso

Universidade Federal de Goiás, Goiânia, Brasil, deboraha.amoroso@gmail.com

Gilson de F. N. Gitirana Jr.

Universidade Federal de Goiás, Goiânia, Brasil, gilsongitirana@gmail.com

Paulo A. D. Silva

Instituto Federal de Educação de Goiás, Goiânia, Brasil, pad.ifg@gmail.com

RESUMO: O objetivo deste trabalho é determinar as curvas características solo-água de duas areias de texturas distintas, quando submetidas a ciclos de molhagem e secagem a partir de diferentes métodos de determinação, diretos e indiretos. Foram realizadas determinações diretas utilizando ensaios de placa de pressão e agregados ao estudo dados previamente publicados, obtidos utilizando um Funil de Haines modificado. Em termos de determinação indireta, foram realizadas previsões utilizando os modelos de Arya-Paris (1981) e Arya-Dierolf (1989). Os resultados obtidos indicam que o aparelho utilizado para determinação da curva característica é eficaz visto que proporciona a obtenção de curvas de molhagem e não apenas curvas de secagem. Além disso, os resultados mostram que as curvas obtidas pelos modelos de previsão parecem estar associadas com as trajetórias de secagem e são mais eficientes para valores mais altos de grau de saturação.

PALAVRAS-CHAVE: Curva Característica Solo-Água, Molhagem, Secagem, Curva Granulométrica.

1 INTRODUÇÃO

No estudo de um solo não saturado é de fundamental importância o conhecimento da relação entre o teor de umidade e a sucção no solo, denominada curva característica solo-água (CCSA). A CCSA determina a capacidade de retenção de água no solo estudado e a mesma pode ser utilizada na obtenção de diversos parâmetros utilizados para descrever o comportamento de solos não saturados.

As CCSAs são influenciadas, dentre outras coisas, pela distribuição granulométrica do solo, sendo que geralmente os valores de entrada de ar e o teor de umidade de saturação crescem com o aumento da plasticidade do solo (FREDLUND; XING, 1994). Outro fator que influencia no formato da CCSA é a trajetória de sucção, sendo que para uma mesma sucção

matricial, diferentes teores de umidade podem ser obtidos em processos de molhagem e secagem. Este efeito pode ser ocasionado pela não uniformidade na distribuição dos poros do solo, entre outros fatores (FREDLUND; RAHARDJO, 1993).

Existem diversos métodos de determinação da curva característica em laboratório, entre eles o método do funil de Haines e o método da placa de pressão, ambos empregados neste trabalho. Geralmente, os métodos diretos de determinação da CCSA demandam muito tempo. Desta forma, métodos de previsão da curva característica a partir de dados obtidos corriqueiramente em laboratório, como índice de vazios e curva granulométrica, tem sido propostos por diversos pesquisadores. Esses métodos de obtenção indireta da CCSA permite a execução de análises preliminares ou até

mesmo definitivas, dependendo do tipo de problema (GITIRANA JR. et al, 2005).

Vários métodos de previsão da curva característica foram propostos, podendo-se citar Gupta & Larson (1979), Arya e Paris (1981), Arya e Dierolf (1989), Fredlund et al. (2002) e Aubertin et al. (2003). Neste trabalho serão abordados os modelos de Arya e Paris (1981) e Arya e Dierolf (1989).

O presente trabalho tem como objetivo comparar curvas características obtidas com o ensaio de placa de pressão, com os modelos de previsão de Arya e Paris (1981) e Arya e Dierolf (1989) e curvas obtidas pelo ensaio de funil de Haines modificado, publicadas por Silva (2011). As comparações serão feitas para duas areias de texturas diferentes, sendo uma grossa (IPT 16) e uma fina (IPT 100).

2 MÉTODOS DE PREVISÃO

Para determinação de forma indireta da CCSA dos materiais estudados, foram adotados os modelos de previsão de Arya e Paris (1981) e Arya e Dierolf (1989). Nos tópicos a seguir serão apresentadas breve descrições dos métodos de previsão, senão que maiores detalhes podem ser encontrados em Gitirana et al. (2005).

2.1 Modelo de Arya e Paris (1981)

O método de Arya e Paris (1981) propõe que a curva granulométrica pode ser dividida em n frações arbitrarias. Cada fração possui um determinado diâmetro médio do poro e uma curva característica idealizada. A “curva característica ideal” de cada fração é definida pelo seu valor de entrada de ar e por uma drenagem total e abrupta. Conforme cada nova fração é drenada, uma percentagem dos vazios do solo é drenada.

Diversas hipóteses simplificadoras foram adotadas por Arya e Paris (1981) sendo as principais a consideração de partículas esféricas, a validade da equação de capilaridade de Kelvin para o caso de um capilar cilíndrico equivalente e a desconsideração de mecanismos que geram a dependência da trajetória de

sucção, como a heterogeneidade de poros e ar ocluso.

Considera-se que os poros são preenchidos de água de forma progressiva, senão a umidade volumétrica do solo acumulada até a fração n , assim computada:

$$\theta_{v_i} = \sum_{j=1}^i V_{v_j} / V = \sum_{j=1}^i V_{v_j} \rho_{dry} \quad (1)$$

onde $V_{v_i} = (m_{si} / \rho_s) e$; $i = 1, 2, \dots, n$; m_{si} é a massa das partículas de cada fração, considerando uma quantidade total de massa de solo unitária; e é o índice de vazios; e ρ_s é a densidade das partículas; V é o volume total de solo da fração ($V = \sum m_{si} / \rho_{dry} = 1 / \rho_{dry}$); e ρ_{dry} é a densidade seca do solo.

Arya e Paris (1981) assumem que cada fração de solo é formada por n_i partículas esféricas e propõem que se iguale o comprimento total do poro ao número de partículas alinhadas ao longo do poro, vezes o comprimento da partícula, obtendo-se assim o o raio do poro:

$$r_i = R_i \sqrt{4en_i^{1-\alpha} / 6} \quad (2)$$

Pra areia, os autores sugerem, a partir de observações empíricas, $\alpha = 1,285$. O valor de sucção correspondente a cada fração é dado por:

$$(u_a - u_w)_i = 2T_s / r_i \quad (3)$$

onde T_s é a tensão superficial da água, $T_s \cong 7,2 \times 10^{-5}$ kN/m.

2.2 Modelo de Arya e Dierolf (1989)

Arya e Dierolf (1989) propuseram uma formulação alternativa para os raios dos poros. Foi introduzido o parâmetro α^* , representando o comprimento de poro efetivo de cada fração:

$$h_i = n_i \alpha^* \quad (4)$$

Desta forma, tem-se a seguinte equação de r_i :

$$r_i = \sqrt{R_i^3 4e / 3\alpha^*} \quad (5)$$

O parâmetro α^* possui significado físico claro. Adicionalmente, Arya e Dierolf (1989) sugerem que a sensibilidade do modelo ao valor de α^* é reduzida quando comparada à sensibilidade a α em Arya e Paris (1981) e recomendam um valor de 10 mm.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Solos Estudados

Dois materiais foram estudados, ambos areias adquiridas do Instituto de Pesquisa Tecnológicas de São Paulo – IPT, e denominadas por Silva (2011) como IPT 16 e IPT 100, respectivamente. Os ensaios de caracterização física foram realizados por Silva (2011), com exceção dos ensaios de determinação da curva granulométrica que foi realizado no presente trabalho.

As curvas granulométricas foram obtidas por peneiramento de acordo com o procedimento especificado na norma NBR 7181 (1984). Porém, peneiras intermediárias foram adicionadas para possibilitar uma quantidade maior de pontos nas curvas. As curvas granulométricas dos materiais são apresentadas na Figura 1 e estas serão utilizadas para aplicação dos métodos de previsão das CCSA.

Para moldagem dos corpos de prova, foram utilizados os índices físicos determinados por Silva (2011), obtendo-se então, corpos de prova com índices físicos conforme apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Índices físicos dos materiais utilizados.

Material	ρ_s (g/cm ³)	ρ_d (g/cm ³)	e
IPT 16	2,621	1,567	0,672
IPT 100	2,604	1,567	0,662

3.2 Programa Experimental

Para determinação da CCSA foi utilizada uma prensa de adensamento com controle de sucção/pressão da marca GCTS, modelo Fredlund SWC-150. Este equipamento permite a utilização de trajetórias oedométricas de tensões, com controle de sucção e

monitoramento do teor de umidade e variação de volume da amostra. Para o presente trabalho todos os ensaios foram realizados sem tensões verticais líquidas. O mecanismo de funcionamento desse aparelho permite obter a CCSA tanto na trajetória de secagem quanto na trajetória de molhagem. A Figura 2 mostra o equipamento montado no laboratório de solos da UFG.

3.2.1 Descrição do Equipamento

A prensa funciona com ar comprimido gerado por um compressor de ar. A prensa de adensamento pode ser dividida nas seguintes partes: câmara de pressão; cerâmica de alto valor de entrada de ar; painel de controle de sucção/pressão e medição de volume; sistema hidráulico de aplicação de carga vertical e sistema de controle de condensação.

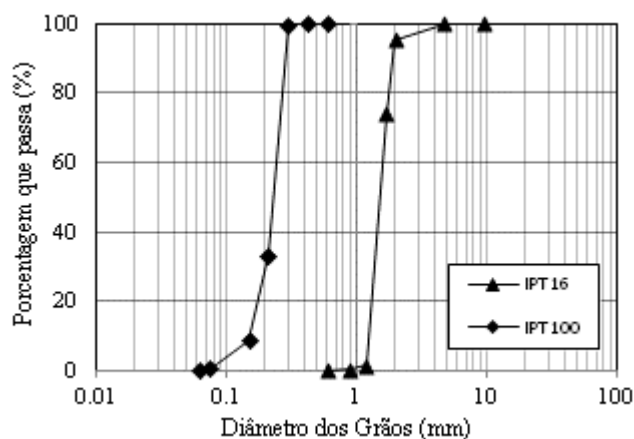


Figura 1. Curvas granulométricas.



Figura 2. Prensa de adensamento com controle de sucção/pressão da marca GCTS, modelo Fredlund SWC-150 (BORGES, 2010).

A câmara de pressão é feita de aço e suporta pressões de ar de até 1500 kPa. Envolvendo as paredes externas da câmara está instalada uma manta para aquecimento com objetivo de evitar a condensação de água no seu interior. O sistema de aquecimento foi mantido desligado durante o ensaio. A base da câmara é rebaixada permitindo o encaixe da pedra porosa e possui ranhuras que são conectadas as buretas do painel de controle permitindo, a medição do volume de água que passa pela pedra porosa e a retirada de ar difuso. A câmara é vedada por anéis de borracha tanto no topo quanto na base.

A cerâmica de alto valor de entrada de ar (AVEA) é colada a um anel de aço. O tipo de pedra a ser utilizada depende do tipo de solo a ser ensaiando, sendo que é aconselhável a utilização de pedra porosa de 1 Bar para areias, 3 Bar para siltes arenosos e argilas arenosas, 5 Bar para argilas siltosas e argilas arenosas e 15 Bar para argilas. Como os materiais estudados neste trabalho são areias, a pedra utilizada foi de 1 Bar. A pedra porosa deve ser cuidadosamente saturada antes do início do ensaio. A Figura 3 apresenta os componentes da base da câmara de pressão.



Figura 3. Detalhes da base da câmara de pressão, pedra porosa, parafusos e sobre peso (BORGES, 2010).

O painel de controle permite a aplicação das pressões de ar e o controle da quantidade de água que entra ou sai da amostra. O controle das pressões aplicadas é feito utilizando uma coluna d'água para pressões inferiores a 10 kPa e através do manômetro instalado no painel para pressões acima deste valor, que possui resolução de 2 kPa. O painel também possui

duas buretas graduadas de água que são conectadas à base da câmara de pressão por duas mangueiras onde fica armazenada a água que sai do corpo de prova ou que irá entrar no corpo de prova.

3.2.2 Metodologia de Execução do Ensaio

Primeiramente deixou-se a pedra porosa imersa em água e verificou-se inchamento da cola que une o anel de aço à pedra porosa, dessa forma o excesso de cola foi retirado. Esse procedimento é necessário para garantir que a pedra porosa ficará encostada na base da câmara de pressão para evitar que a pedra venha a romper com a aplicação das pressões de ar. Em seguida instalou-se a pedra porosa na base da câmara de pressão e fez-se o processo de saturação da pedra por fluxo forçado, utilizando ar comprimido e água sobre a cerâmica.

Após a saturação da pedra porosa, as buretas de água foram preenchidas novamente e com auxílio de uma seringa acoplada no topo das buretas a circulação de água é forçada, permitindo a passagem de água por todas as mangueiras e pela base da câmara de pressão, facilitando a saída de bolhas de ar existente e saturando todo o sistema.

Os corpos de prova precisaram ser moldados diretamente acima da pedra porosa, por tratarem-se de areias. Para isso, foi necessário a utilização de um anel de aço com mesmo diâmetro do anel de aço que envolve a pedra porosa, conforme pode ser visto na Figura 4(a). Este foi fixado diretamente sobre a pedra porosa por meio de silicone. As medidas do anel foram aferidas para que se pudesse determinar a quantidade de solo a ser utilizado.

Os corpos de prova foram moldados com base no volume interno do anel, na massa específica seca dos materiais e nos índices de vazios. A quantidade de solo calculada foi depositada dentro do anel cuidadosamente. O corpo de prova moldado pode ser visto na Figura 4(b). Em seguida realizou-se a saturação do corpo de prova por ascensão capilar. Nesta etapa tomou-se o cuidado de elevar a câmara de pressão, com um suporte adaptado (Figura 4(c)), de forma que ainda houvesse água nas buretas após o fim da percolação.

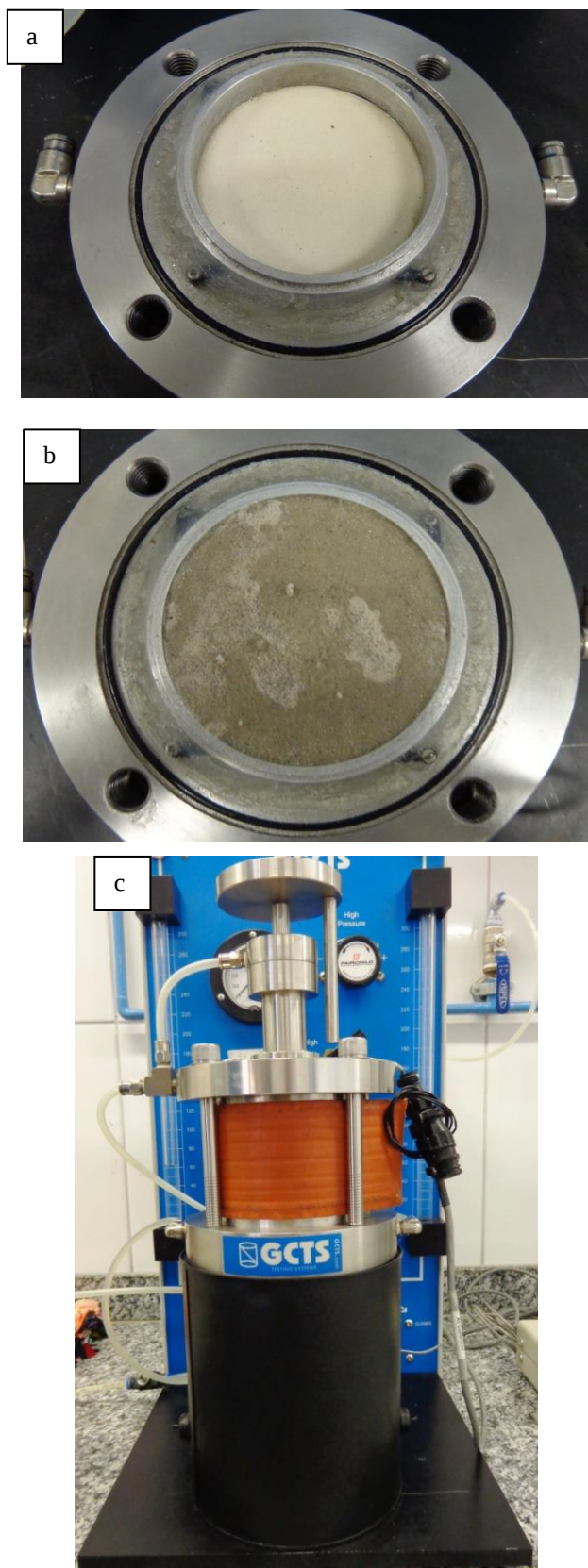


Figura 1 (a) Anel adaptado para o ensaio; (b) Corpo de prova; (c) Equipamento de ensaio com suporte adaptado para elevar o corpo de prova.

Após a saturação do corpo de prova, a câmara de pressão é devidamente fechada com a

instalação dos parafusos, tomando-se o cuidado com os anéis de borracha da base e do topo da câmara, pois os mesmos devem estar em perfeito estado para vedação do sistema. Por fim, a aplicação de pressão de ar pode ser iniciada.

Para cada pressão aplicada, o equilíbrio foi monitorado pelas leituras das buretas, sendo que para as trajetórias de secagem, esperou-se no mínimo 12 horas para fazer mudanças de pressões e para as curvas de molhagem, esperou-se no mínimo 24 horas para fazer alterações. A estabilização era verificada quando em um intervalo de 12 horas não havia mudança na leitura. É importante observar que a sucção ao fim do equilíbrio é diferente da sucção originalmente aplicada, pois a pressão de água varia conforme a altura de água nas buretas varia.

Primeiramente aplicaram-se pressões crescentes até o fim da secagem do corpo de prova e em seguida aplicou-se as mesmas pressões aplicadas na secagem, porém de forma decrescente até a saturação da amostra.

Após a finalização do ensaio as válvulas das buretas foram fechadas e apenas depois a pressão foi retirada, para que não entre mais água no corpo de prova. Após retirar a pressão de ar, a câmara foi desparafusada e parte da amostra foi retirada para obtenção da umidade final em estufa.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Avaliação dos Dados Experimentais

As Figuras 5 e 6 apresentam os resultados das CCSA das areias IPT 16 e IPT 100, respectivamente, determinadas na prensa de adensamento com controle de sucção/pressão. Com a determinação da umidade do solo no final da molhagem observou-se uma diferença entre a umidade determinada em estufa e a umidade registrada pelas buretas. Dessa forma, as Figuras 5 e 6 apresentam duas curvas, sendo uma calculada a partir a umidade inicial e outra da final.

Observa-se que as curvas calculadas a partir da umidade inicial possuem valores corretos no

início e os erros se acumulam até um erro de 1,5% de umidade para a IPT 16 e 1,0% de umidade para a IPT 100. As curvas calculadas a partir da umidade final começam com valores errados e esses erros vão gradualmente diminuindo, até que os últimos pontos possuem leitura teoricamente correta, admitindo que o método da estufa seja menos sujeito a erros.

Nota-se também a diferença entre as curvas de molhagem e secagem da areia, o que demonstra o comportamento dependente da trajetória de sucção do solo. Essa diferença entre as curvas já eram esperadas e é ocasionada principalmente pelo aprisionamento de ar durante a molhagem. Segundo PHAM et. al (2005), esse aprisionamento de ar no solo atinge valores de 5% a 15 % do volume do solo. Assim, para a areia IPT 16 esperava-se que a umidade volumétrica no final da molhagem estivesse entre 0,382 e 0,342, o que foi confirmado no ensaio. O mesmo comportamento pode ser visto na areia IPT 100, conforme apresentado na Figura 6, onde era esperado que ao final da molhagem os valores de umidade volumétrica ficassem entre 0,338 e 0,378, também confirmado pelo ensaio.

A Figura 7 apresenta o tempo decorrido em cada estágio de sucção da areia IPT 16, até o equilíbrio ser atingido. Observa-se que na trajetória de secagem o equilíbrio nas maiores pressões é mais lento, chegando 29 horas, enquanto em pressões mais baixas o equilíbrio foi alcançado até em 7 horas, aproximadamente. Já na trajetória de molhagem o menor tempo de equilíbrio foi de 24 horas, chegando a 112 horas em pressões mais baixas.

Observa-se que quando comparados o tempo de execução da curva de secagem e da curva de molhagem, de uma forma geral, a curva de molhagem demora mais pra entrar em equilíbrio. Em alguns casos, o critério para consideração de equilíbrio foi ligeiramente relaxado.

Levando-se em consideração a confiabilidade da umidade determinada pelo método da estufa, a diferença observada na Figura 5 e na Figura 6, entre as duas sequências apresentadas pode ser resultante de uma possível entrada lenta e gradual de umidade pela linha de ar comprimido.

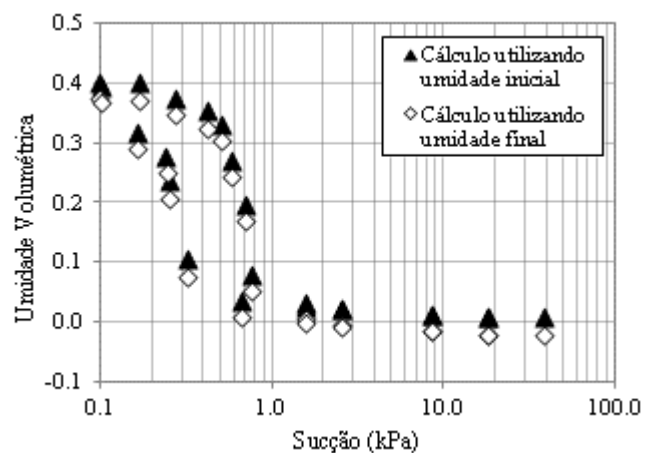


Figura 5. Curvas características da areia IPT 16 obtidas em placa de pressão.

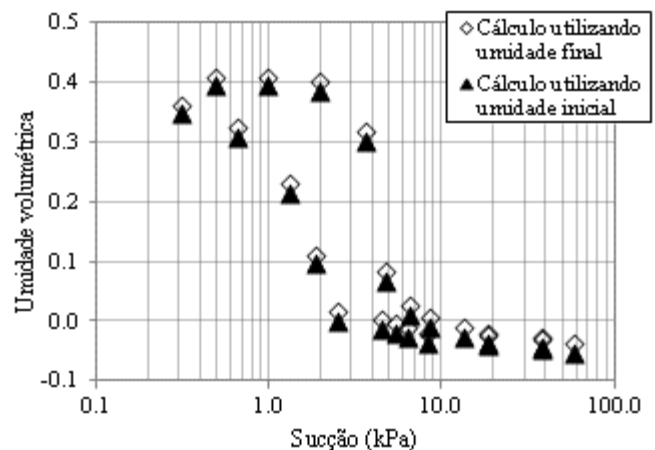


Figura 6. Curvas características da areia IPT 100 obtidas em placa de pressão.

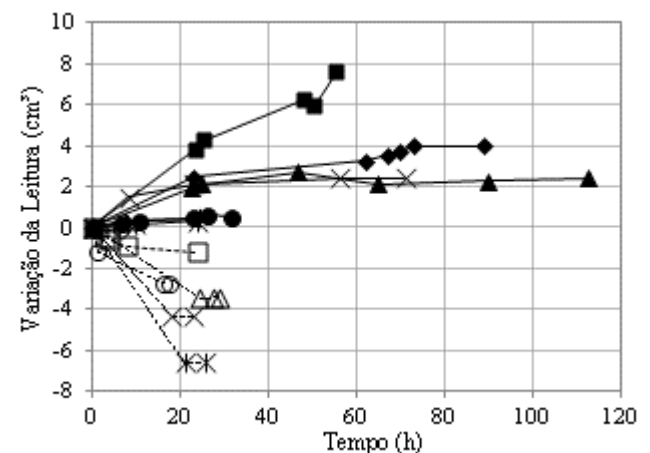


Figura 7. Variação de volume com o decorrer de cada estágio de sucção.

Dessa forma, foi proposta aqui uma metodologia de correção, cujo resultado pode ser observado na Figura 8 e na Figura 9. A correção proposta para a IPT 16 consiste em fixar a umidade inicial calculada e a umidade final determinada em estufa, sendo que os

pontos intermediários foram calculados com base no erro total ao fim dos ensaios e no tempo decorrido de cada estágio. Já para a IPT 100, a umidade final medida deveria ser maior para que a mesma correção proposta para a IPT 16 trouxesse os dados negativos para cima e isso não ocorre. Sendo assim, ponto de referência adotado foi obtido a partir de resultados do ensaio de Funil de Haines realizado por Silva (2011) para a mesma areia.

As Figura 8 e 9 também apresentam o resultado do ensaio de Funil de Haines realizado por Silva (2011) para as mesmas areias estudadas. É notável a semelhança entre as curvas corrigidas com os dados obtidos por Silva (2011), o que demonstra a confiabilidade do método utilizado para a obtenção das CCSA. Porém, observa-se que para a IPT 100 ocorre uma grande diferença na parte residual entre as curvas feitas no Funil de Haines e a determinada neste trabalho. Uma das vantagens observada pelo método de ensaio realizado é a obtenção não apenas da curva de secagem, mas também da curva de molhagem, podendo-se observar o comportamento histerético. Outra vantagem é a utilização de um CP único.

Já era esperado um comportamento diferente entre as duas areias. Isso pode ser observado na Figura 10, onde primeiramente destacam-se as diferenças entre os valores de entrada de ar das duas areias, assim como o valor de sucção residual, sendo o da areia fina (IPT 100) superior ao da areia grossa (IPT 16). A diferença entre as umidades de saturação é bem pequena, visto que o índice de vazios de moldagem dos corpos de prova eram próximos.

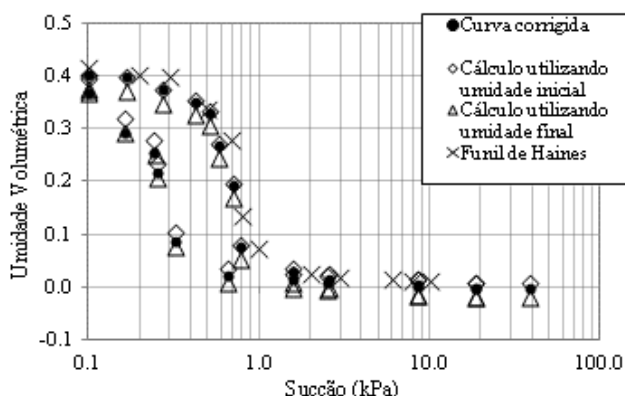


Figura 8. Correção da curva característica da areia IPT 16.

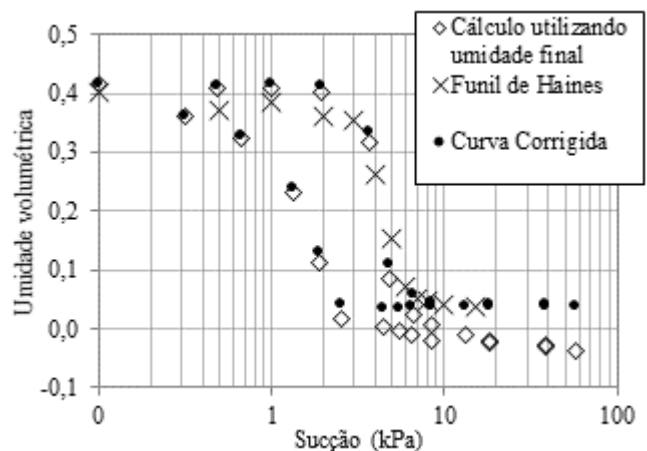


Figura 9. Correção da curva característica da areia IPT 100.

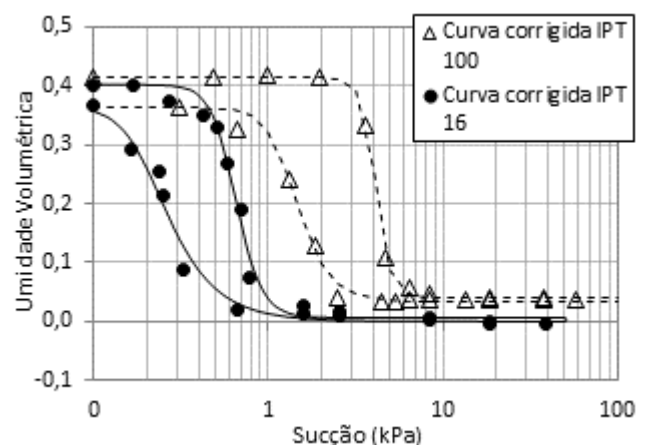


Figura 10. Ajuste das curvas características obtidas.

5 APLICAÇÃO DE MODELOS DE PREVISÃO

Os métodos de Arya-Paris (1981) e Arya-Dierolf (1989) foram utilizados para a previsão das CCSA das duas areias utilizando dados de granulometria e índices físicos.

A Figura 11 apresenta curvas de previsão pelo método de Arya-Paris (1981) para a areia IPT 16, considerando diferentes valores de α . Os valores de alfa testados partiram da sugestão feita pelos autores para areias, variando para cima e para baixo em 10%.

Observa-se que a previsão que mais se assemelha aos dados experimentais é a curva com α igual a 1,414 que é um valor muito próximo ao sugerido pelos autores para areias argilosas (1,459) (Arya et al., 1999). O modelo de previsão apresenta uma redução na sucção

para baixa saturação, o que configura uma anomalia no modelo. Além disso, observa-se que as previsões são razoáveis para altos valores de grau de saturação, mas o modelo não é capaz de prever o trecho residual da curva.

A Figura 12 apresenta curvas de previsão feitas pelo método de Arya-Dierolf (1989) para a areia IPT 16 para diversos valores de α^* que foram variados a partir do valor proposto pelos autores, ou seja, $\alpha^*=10$ mm. Observa-se que para o valor sugerido o desempenho do modelo é excepcional. Foram adotados valores extremos de α^* que, de acordo com os autores, são considerados possíveis e notou-se que apenas para esses valores extremos têm-se alterações significativa das previsões, conforme pode ser visto na Figura 12.

Pode-se observar que a umidade residual não é reproduzida perfeitamente, mas este comportamento já era esperado visto que, o conteúdo residual de umidade envolve forças de adsorção e cargas de superfície, porém esses fatores não são considerados pelo modelo. Vale ressaltar que a anomalia observada no modelo de Arya-Paris não foi observada neste modelo.

A Figura 13 apresenta curvas de previsão para a areia IPT 100 pelo método de Arya-Paris (1981) para os mesmos valores de α analisados para a areia IPT 16. Observa-se que a previsão que mais se assemelha aos dados experimentais é a curva com α igual a 1,157. Arya et al. (1999), estima que valores próximo a 1,160 são para materiais com textura mais argilosa.

O método de Arya-Dierolf (1989) também foi aplicado para a areia IPT 100 e as curvas de previsão são apresentadas na Figura 14. Diferente da areia IPT 16, a aplicação do valor de $\alpha^*=10$ mm sugerido pelo autor, não forneceu bons resultados, visto que o α^* que melhor se ajustou aos dados experimentais foi igual a 1mm.

A anomalia apresentada para a areia IPT 16 na aplicação deste método não foi observada para a areia IPT 100. A imperfeição da curva na zona residual também foi verificada, mas vale ressaltar a ocorrência de um problema nos dados experimentais, onde existem valores de umidade volumétrica negativos que pode ter sido ocasionado por entrada de água no sistema.

É possível notar nos dois métodos de

previsão e para as duas areias, que os modelos parecem estar associados às curvas de secagem e não às de molhagem. Observa-se, em todos os casos, uma imperfeição das curvas de previsão próximas da zona residual. Isso pode estar relacionado com a baixa densidade de dados de granulometria no domínio dos poros associados com essas sucções e essa falta de dados se deve ao fato da granulometria das areias estudadas serem muito uniformes.

De uma forma geral, percebe-se que o desempenho das curvas características previstas pelo método de Arya-Dierolf (1989) são menos sensíveis a α^* do que o desempenho das curvas características pelo método de Arya-Paris (1981) são ao parâmetro empírico α .

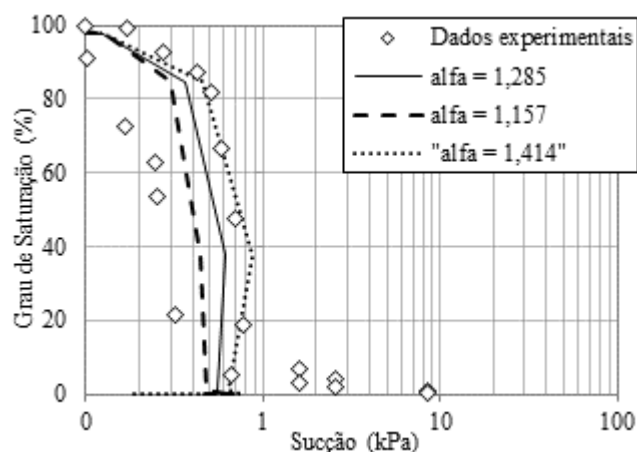


Figura 11. Previsão pelo método Arya-Paris (1981) para areia IPT 16.

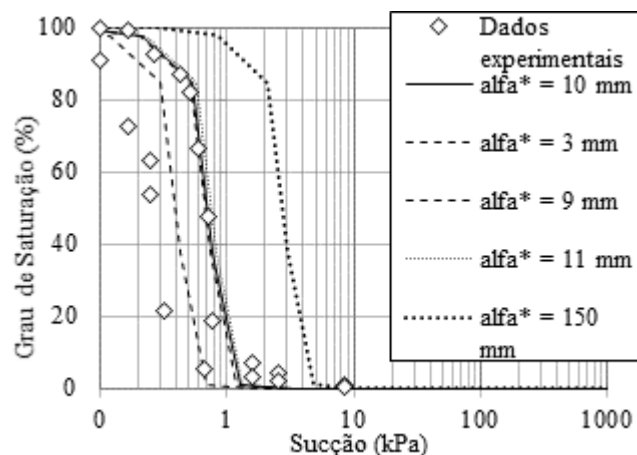


Figura 12. Previsão pelo método Arya-Dierolf (1989) para areia IPT 16.

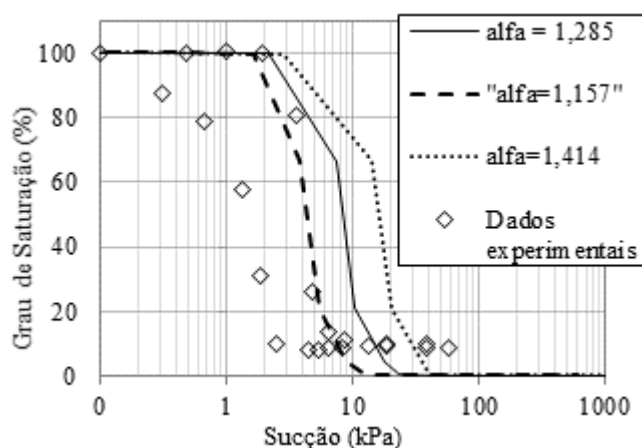


Figura 13. Previsão pelo método Arya-Paris (1981) para areia IPT 100.

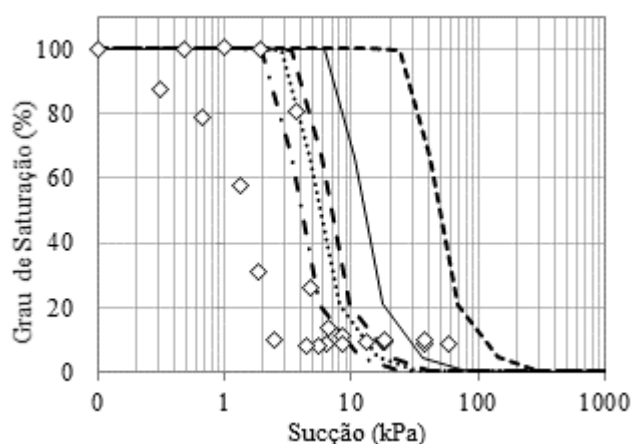


Figura 14. Previsão pelo método Arya-Dierolf (1989) para areia IPT 100.

6 CONCLUSÕES

A utilização da prensa de adensamento com controle de sucção/pressão mostrou-se eficaz na obtenção da curva característica solo-água em trajetórias de secagem e molhagem. A possibilidade de se obter a CCSA tanto na trajetória de secagem quanto na de trajetória de molhagem demonstra a grande vantagem da utilização deste equipamento. Observa-se, no entanto, que o equilíbrio é prejudicado pela umidade advinda do sistema de ar comprimido.

A análise dos resultados indica que é possível prever o formato aproximado das CCSA, na trajetória de secagem, tanto pelo método de Arya-Paris (1981), quanto pelo método de Arya-Dierolf (1989) e que a utilização desses modelos promovem resultados excelentes para altos valores de saturação, devendo ser utilizados com cautela para valores

próximos à zona residual. Desta forma, sugere-se a inclusão de parâmetros que relacionem as forças de adsorção e cargas de superfície nos modelos, na tentativa de se obter melhores resultados na zona residual. Outro ponto seria aplicação de parâmetros que permitam a determinação da CCSA na trajetória de molhagem.

REFERÊNCIAS

- ABNT (1984). Solo – *Análise granulométrica*, NBR 7181. ABNT, São Paulo, São Paulo, 13 p.
- ARYA, L.M. e DIEROLF, T.S. (1989). *Predicting soil moisture characteristics by particle-size distributions: an improved method to calculate pore radii from particle radii*. In: Proc. of the Int. Workshop on Indirect Methods for Estimating the Hydraulic Properties of Unsaturated Soils, p. 115-124.
- ARYA, L.M., LEIJ, F.J., VAN GENUCHTEN, M.th., Shouse, P.J., 1999. *Scaling parameter to predict the soil water characteristic from particle-size distribution data*. Soil Soc. Am. J. 63, 510-519.
- ARYA, L.M. e PARIS, J.F. (1981). *A physicoempirical model to predict the soil moisture characteristic from particle-size distribution and bulk density data*. Soil Science Soc. Am. J., 45, p. 1023-1030.
- BORGES, C.R. *Comportamento hidráulico de um perfil de solo não saturado de Aparecida de Goiânia-GO*. 2010. 2 v, 257 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiás, 2010.
- FREDLUND, D.; XING, A.; HUANG, S. *Predicting the permeability function for unsaturated soils using the soil – water characteristic curve*. Canadian Geotechnical Journal. Vol. 31, p. 533-546. 1994.
- FREDLUND D. G.; RAHARDJO H. *Soil mechanics for unsaturated soils*. John Wiley & Sons, USA, 1993, 517 p.
- GITIRANA JR., G. F. N. *Weather-Related Geo-Hazard Assessment Model for Railway Embankment Stability*. Ph.D. Thesis, 2005, 316p. University of Saskatchewan, Saskatoon, Canadá, 2005.
- PHAM, H., FREDLUND, D. and BARBOUR, S., 2005. *A study of hysteresis models for soil-water characteristic curves*. Canadian Geotechnical Journal 42, 1548-1568.
- SILVA, P. A. D. *Estudo do fenômeno de barreira capilar: Modelagem numérica e experimentação física*. 2011. 187 p. Tese (doutorado), Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais, 2011.