

# EQUAÇÕES PARA MODELAGEM DA CURVA CARACTERÍSTICA APLICADAS A SOLOS BRASILEIROS

Denise M. S. Gerscovich  
Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Brasil

**RESUMO:** O conhecimento da relação entre umidade e sucção é fundamental em projetos que tratem o comportamento de solos não saturados. Várias técnicas de ensaios de campo e de laboratório foram propostas na literatura. A maioria destes métodos dificilmente é utilizada na prática em vista dos custos associados e à heterogeneidade dos materiais. Face a este problema vários pesquisadores propuseram modelos matemáticos para modelagem da curva característica. A maioria dos modelos baseia-se na interdependência entre a forma da curva característica e a distribuição de volume de vazios. Nestes casos as equações são formuladas com base em curvas de regressão de resultados experimentais. Existem também outras proposições que procuram estabelecer a curva característica a partir de propriedades básicas do solo tais como distribuição granulométrica e porosidade. Este trabalho tem por objetivo apresentar diversas proposições matemáticas para modelagem da curva característica e avaliar sua aplicabilidade a solos brasileiros.

**ABSTRACT:** The relationship between soil moisture and matric suction is a fundamental information for engineering design in unsaturated soil subsurface condition. Different field and laboratory techniques are available to estimate water retention curves. These tests are costly, difficult to perform and time consuming. Therefore they are rarely used in geotechnical engineering practice. Various researchers have suggested mathematics models to predict the soil-water characteristic curve. Some models are based on the assumption that the shape of the curve is dependent upon pore size distribution and the necessary parameters of these models are calibrated by linear regression of experimental data. Others assume that the water retention curve can be directly estimated from physical properties of soils and grain size distributions. This paper discusses the applicability of proposed models for predicting the soil-water characteristic curves of some Brazilian soils.

**PALAVRAS-CHAVES:** solo não saturado, curva característica, modelagem

## 1. INTRODUÇÃO

Vários problemas geotécnicos estão relacionados com comportamento de solos não saturados. Nestes materiais o teor de umidade e/ou grau de saturação são função da pressão negativa de água dos poros (sucção).

Para simular processos de fluxo em solos não saturados foram desenvolvidas ferramentas numéricas, baseadas em métodos dos elementos finitos e/ou diferenças finitas. Na prática, o fator mais importante que limita a aplicação destes modelos é a falta de informações no que diz respeito às relações entre teor de umidade, sucção e condutividade hidráulica, conhecidas

como parâmetros hidráulicos. A capacidade de desenvolver sofisticados sistemas numéricos excede a habilidade de prever corretamente estes parâmetros hidráulicos.

Várias técnicas de ensaios de campo e de laboratório foram propostas nas últimas décadas. A maioria destes métodos é, entretanto, pouco utilizada na prática. A heterogeneidade dos materiais e os custos associados à realização destes ensaios, visto o elevado tempo exigido para sua execução, restringem a obtenção corrente destes parâmetros. Face a este problema vários pesquisadores propuseram modelos

matemáticos para reprodução das relações entre parâmetros hidráulicos. Estes modelos são definidos de forma empírica/semi-empírica, com base em curvas de regressão de resultados experimentais.

Este trabalho tem por objetivo levantar as diversas proposições para modelagem da curva característica e avaliar sua aplicabilidade a alguns solos brasileiros.

## 2. CURVA CARACTERÍSTICA

Em um solo saturado, em equilíbrio, a pressão nos poros é sempre maior ou igual à atmosférica. Se uma sucção é aplicada, a água presente nos vazios será drenada e a pressão nos poros se tornará negativa. A aplicação de elevados níveis de sucção, não somente afeta a água livre nos vazios, mas também pode afetar a espessura das envoltórias de hidratação. Como um todo, o solo perde umidade.

Define-se como curva característica a relação entre a água presente nos poros e a sucção de um solo. Este volume de água pode ser quantificado em termos de teor de umidade volumétrico ( $\theta$ ), definido como a relação entre o volume de água e o volume de total, teor de umidade gravimétrico ( $\omega$ ), cuja magnitude é obtida em função da relação entre pesos de água e de sólidos, ou em termos do grau de saturação. Já a sucção ou sucção mátrica ( $\psi$ ) é estabelecida pela diferença entre as pressões na água e no ar contido nos vazios ( $u_a - u_w$ ), ou pode ainda incorporar a parcela de sucção osmótica, trabalhando-se, neste caso a sucção total. Para altos valores de sucção (acima de 1500kPa) a sucção mátrica e a total podem ser consideradas equivalentes (Fredlund, e Xing, 1994).

Dentre as diversas formas de se definir curva característica, a mais adotada é aquela que relaciona teor de umidade volumétrico e sucção mátrica.

O formato desta depende do tipo de solo, distribuição de tamanhos de vazios e, conseqüentemente, da distribuição das frações granulométricas. Solos arenosos tendem a apresentar perda brusca de umidade quando a sucção ultrapassa um determinado valor; em contrapartida, solos argilosos tendem a apresentar curvas mais suaves. Comportamento

semelhante é observado quando comparam-se curvas características de solos uniformes e solos bem graduados

A Figura 1 apresenta curvas características típicas para areias e argilas, além de definir os parâmetros mais importantes relativos a esta função.

Na prática, se uma pequena sucção é aplicada a um solo saturado, nenhum fluxo ocorrerá até que esta ultrapasse um determinado valor crítico, capaz de fazer com que a água presente no maior vazio comece a sair. Esta sucção crítica é denominada sucção de entrada de ar ( $\psi_b$ ). Com o aumento gradual da sucção, vazios de diâmetros menores vão se esvaziando, até que para altos valores de sucção, somente os vazios muito pequenos ainda retêm água. Apesar de ser numericamente pequena, esta sucção crítica é facilmente detectável em solos grossos e em solos bem graduados. Em geral, espera-se que  $\psi_b$  varie entre 0,2kPa a 1kPa (2 a 10cm de coluna d'água) em areias grossas, 1kPa a 3,5kPa em areias medias, 3,5kPa a 7,5kPa em areias finas, 7kPa a 25kPa em siltes e mais do que 25kPa para argilas (Aubertin et al, 1998).

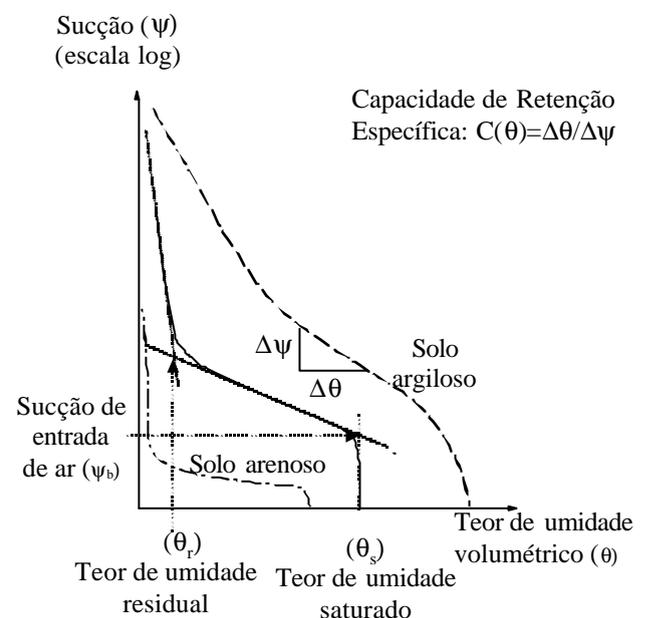


Figura 1 - Curvas Características Típicas

Métodos para definir a sucção de entrada de ar ( $\psi_b$ ) foram propostos na literatura. Brooks e Corey (1964) sugerem um procedimento gráfico, mostrado na Figura 1, a partir da

interseção entre 2 trechos lineares. Aubertin et al (1998) observaram que, em geral,  $\psi_b$  está associado a um valor de umidade correspondente a 90% da umidade saturada ( $\theta_s$ ). Esta proposição baseia-se no fato de que ao atingir  $\psi_b$  o ar presente nos vazios passa a formar canais contínuos. Na prática esta hipótese resulta em valores de  $\psi_b$  aproximadamente 25% mais altos do que os obtidos graficamente.

Define-se como teor de umidade residual ( $\theta_r$ ) o limite inferior a partir do qual qualquer aumento na sucção mátrica pouco afeta os valores de umidade. A determinação experimental do teor de umidade residual pode ser feita, como indicado na Figura 1, a partir da interseção das tangentes à curva característica. Do ponto de vista prático é razoável associar o teor de umidade residual a um valor de sucção elevado. Assim sendo, pode-se utilizar o teor de umidade de uma amostra seca para estimar  $\theta_r$ . Van Genuchten (1980) sugere associar o teor de umidade residual a um valor de sucção de  $\psi_r = -1500$  kPa. A sucção correspondente à condição de teor de umidade nulo foi determinada experimentalmente em uma variedade de solos, tendo sido observado um valor da ordem de  $10^6$  kPa (Fredlund, e Xing, 1994).

O teor de umidade volumétrico correspondente à condição de saturação ( $\theta_s$ ) apresenta o mesmo valor da porosidade ( $n$ ), já que o teor de umidade volumétrico é equivalente ao produto da porosidade e do grau de saturação ( $\theta = n \times S$ ).

O parâmetro que define a variação de umidade ( $\Delta\theta$ ) em função de uma variação de sucção ( $\Delta\psi$ ) é denominado capacidade de retenção específica ( $C(\psi)$ ). Este parâmetro é obtido a partir da tangente à curva característica e varia com o nível de sucção.

Além do tipo de solo, representado pelo tamanho do grão e composição mineralógica, outros fatores afetam a forma da curva característica. A influência do arranjo estrutural, por exemplo, pode ser observada comparando-se solos com diferentes graus de compactação. Quando um solo é densificado, o volume dos vazios maiores é reduzido, fazendo com que os poros de dimensão intermediária fiquem

porcentualmente em maior quantidade (os poros maiores se transformam em intermediários) e os micro-poros permanecer inalterados. Sendo assim, a função de distribuição de volume de vazios é modificada, afetando principalmente o trecho da curva correspondente a baixos valores de sucção (Gerscovich, 1994).

Um outro aspecto a se considerar é a história de variação de umidade. Em um processo de perda de umidade a curva característica tende a apresentar, para um determinado valor de teor de umidade, sucções mais elevadas do que as observadas em um processo de umedecimento. O teor de umidade máximo alcançado em um processo de saturação dificilmente atinge o teor de umidade saturado. Esta histerese é atribuída à não uniformidade geométrica dos vazios, presença de ar ou mesmo a mudança estruturais decorrentes de processos de fluxo que podem propiciar fenômenos de inchamento, ressecamento ou envelhecimento (Hillel, 1971). A permanência do ar nos vazios pode ser explicada por dois aspectos: (i) diferentes velocidades de movimentação da frente de saturação, causando zonas com diferentes graus de saturação; (ii) altos valores de sucção inibindo, em determinadas regiões, o avanço da frente de saturação. Smith e Browning (1942) observaram que em média 9.1% dos vazios permanecem com ar após um processo de saturação. Wilson e outros (1981) verificaram que a parcela de ar retido era proporcional a parcela da fração grossa, sendo 20% o máximo valor registrado. Com isto, em um processo de umedecimento, muitas vezes não se atinge a saturação completa; isto é o teor de umidade saturado é numericamente inferior à porosidade ( $\theta_s < n$ ).

Não existe nenhuma teoria que represente corretamente a relação umidade x sucção. Existem, entretanto, várias proposições na literatura, as quais são válidas para alguns tipos de solos e para determinadas faixas de sucção. A complexidade dos efeitos da adsorção e das diversas geometrias dos vazios torna muito difícil uma modelagem da curva característica, adequada a qualquer tipo de solo.

### 3. PROPOSIÇÕES PARA MODELAGEM DA CURVA CARACTERÍSTICA

Várias proposições empíricas foram sugeridas para simular a curva característica. Algumas modelam a função que relaciona sucção com umidade (Gardner, 1858; Brooks e Corey, 1964; Farrel e Larson; 1972; Roger e Hornberger, 1978; William et al, 1983; McKee e Bumb, 1987; Haverkamp e Parlange, 1986; Van Genuchten, 1980; Fredlund e Xing, 1984). Outras propõem a obtenção da curva característica a partir de frações granulométricas (Gosh, 1980 Rawls e Brakensiek, 1989). Esta última abordagem é bastante conveniente já que tais informações são rotineiramente determinadas experimentalmente.

A Tabela 1 relaciona algumas das proposições para modelagem da curva característica.

De uma forma geral os modelos baseiam-se no conceito de similaridade entre a curva característica e a função de distribuição granulométrica, que indiretamente está relacionada à distribuição acumulativa de volume de vazios.

Os métodos assumem que sob condições em que a pressão no líquido é negativa, a curvatura

do menisco assume uma forma esférica. Esta hipótese é válida para o caso de tubos cilíndricos.

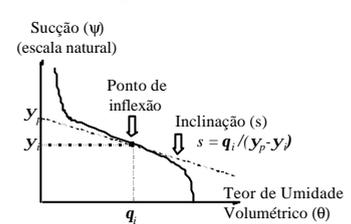
Os métodos que modelam a curva característica em função das frações granulométricas não consideram a influência do arranjo estrutural. Adicionalmente, ao relacionar diâmetro do vazio ao valor de sucção estes métodos não consideram a não uniformidade geométrica dos vazios, já que assumem que existe uma relação unívoca entre sucção e diâmetro de vazio.

De uma forma geral, os métodos pressupõe a inexistência de variação de volume de solo durante processos de umedecimento ou secagem.

Face às dificuldades experimentais para obtenção da curva característica, alguns métodos estão inclusive sendo estendidos para novas aplicações. Equações empíricas relacionando os parâmetros do modelo de Van Genuchten a condições de compactação e índice de plasticidade foram propostos na literatura (Tijum et al, 1997).

Tabela 1 – Proposições para Modelagem da Curva Característica

Referência	Equação	Definição de variáveis
Gardner (1858)	$\Theta = \frac{1}{1 + q\psi^\eta}$	$\Theta$ = teor de umidade normalizado $\Theta = (\theta - \theta_r) / (\theta_s - \theta_r)$ ; $q$ , $q_r$ e $q_s$ , respectivamente os teores de umidade volumétrico, residual e saturado. $\eta$ e $q$ = parâmetros de ajuste
Brooks e Corey (1964)	$\Theta = \left( \frac{\psi_b}{\psi} \right)^\lambda$	$\Theta$ = teor de umidade normalizado: $\lambda$ = índice de distribuição de diâmetro de vazios
Visser (1966)	$\psi = a(\theta_s - \theta)^b / \theta^c$	$a$ , $b$ e $c$ = parâmetros de ajuste $\theta_s$ = teor de umidade saturado (= porosidade)
Farrel e Larson (1972)	$y = y_b e^{a(1-\Theta)}$	$\alpha$ = parâmetro de ajuste
Roger e Hornberger (1978)	$y = a(S_s - b)(S_s - 1)$	$S_s = \theta / \theta_s$ : $a$ e $b$ = parâmetros de ajuste correção do modelo de Brooks & Corey.(1964), na faixa de baixos valores de sucção
Van Genuchten (1980)	$\Theta = \left[ \frac{1}{1 + (\alpha\psi)^n} \right]^m$	$\Theta$ = teor de umidade normalizado: $\alpha$ , $m$ e $n$ = parâmetros de ajuste
Gosh (1980)	$\psi = \psi_b \left( \frac{\theta}{\theta_s} \right)^{-\beta}$ $b = 2,619 \left( \frac{I_2}{I_1} \right)^{0,2822} (I_4 + 0,7)^{0,0625} I_4^{0,1250} \left( 5,91 \frac{I_3}{I_1 + I_3} + 1,1 \right)^{0,0625}$	$\theta_s$ = teor de umidade saturado (= porosidade) $\lambda_1$ percentagem da fração areia $\lambda_2$ percentagem da fração silte $\lambda_3$ percentagem da fração argila $\lambda_4 = 6,2 \sqrt{\frac{\lambda_2}{\lambda_1}} - 5,91 \frac{\lambda_3}{\lambda_1 + \lambda_3}$

William et al (1983)	$\ln y = a + b \ln q$	a e b =parâmetros de ajuste
Saxton et al (1986)	$\psi = a\theta^b$	a e b =parâmetros de ajuste
Haverkamp e Parlange (1986)	<p>Umedecimento:</p> $\theta = \frac{n}{1+\lambda} \left( \frac{\psi_b}{\psi} \right)^\lambda \dots \psi > \psi_b$ $\theta = n \left[ 1 - \left( \frac{\lambda}{1+\lambda} \right) \left( \frac{\psi}{\psi_b} \right) \right] \dots \psi_b^* \leq \psi \leq \psi_b$ $\theta = \theta_s \dots \psi \leq \psi_b^*$ <p>Secagem:</p> $\theta = n \left( \frac{\psi_b}{\psi} \right)^\lambda \left[ 1 - \frac{\psi_b}{\psi} \left( 1 - \frac{\theta_s}{n} \right) \right] \dots \psi > \psi_b$ $\theta = \theta_s \dots \psi \leq \psi_b$	<p>n = porosidade  <math>\lambda</math> parâmetro de ajuste  <math>\theta_s</math> = teor de umidade para condição de saturação ao natural (&lt; porosidade)  <math>\psi_b^*</math> = sucção de entrada de ar para a condição de umedecimento (adotado igual a <math>\psi_b</math>)</p>
McKee e Bumb (1987)	$\Theta = \frac{1}{1 + e^{(\psi-a)/b}}$	$\Theta$ = teor de umidade normalizado a e b =parâmetros de ajuste
Rawls e Brakensiek (1989)	$\Theta = \left( \frac{\psi_b}{\psi} \right)^\lambda$ $y_b = e^{\left[ \begin{array}{l} 5,3396738+0,1845038(C)-2,438394546(n)-0,00213853(C^2)- \\ 0,04356349(S)(n)-0,61745089(C)(n)+0,00143598(S^2)(n^2)- \\ 0,00855375(C^2)(n^2)-0,00001282(S^2)(C)+0,00895359(C)^2(n)- \\ 0,00072472(S^2)(n)+0,0000054(C^2)(S)+0,50028060(n^2)(C) \end{array} \right]}$ $I = e^{\left[ \begin{array}{l} -0,7842831+0,0177544(S)-1,062498(n)-0,000005304(S^2)- \\ 0,00273493(C^2)+1,11134946(n^2)-0,03088295(S)(n)+ \\ 0,00026587(S^2)(n^2)-0,00610522(C^2)(n^2)- \\ 0,00000235(S^2)(C)+0,00798746(C^2)(n)-0,00674491(n^2)(C) \end{array} \right]}$	<p><math>\psi_b</math> em cm H<sub>2</sub>O  n = porosidade (<math>q_b</math>)  C = porcentagem de argila (5% &lt; C &lt; 60%)  S = porcentagem de areia (5% &lt; S &lt; 70%)  <math>q_r = -0,018242 + 0,00087269(S) + 0,00513488(C) + 0,02939286(n) + 0,00015395(C^2) - 0,0010827(S)(n) - 0,00018233(C^2)(n^2) + 0,00030703(C^2)(n) - 0,0023584(n^2)(C)</math></p>
Fredlund e Xing (1994)	$\theta = C_\psi \frac{\theta_s}{[\ln[e + (\psi/a)^n]^m}$ $C_\psi = 1 - \frac{\ln(1 + \psi/\psi_r)}{\ln(1 + \psi_o/\psi_r)}$	<p>a, m e n = parâmetros de ajuste  e = base log neperiano (e=2,718)</p>  <p><math>\psi_o = 10^6</math> kPa</p> $a = \psi_i$ $m = 3,67 \ln \left( \frac{\theta_s}{\theta_i} \right)$ $n = \frac{1,31^{m+1}}{m\theta_s} 3,72s\psi$
Aubertin et al (1998)	$S_r = S_c + S_a(1 - S_c)$ $S_c = 1 - \left[ \left( \frac{h_{co}}{y} \right)^2 + 1 \right] e^{\left[ -m \left( \frac{h_{co}}{y} \right)^2 \right]}$ $S_a = C_y \frac{a}{e^{1/3} y^{1/6}} y_{90}^{2/3} \quad C_y = 1 - \frac{\ln(1 + y/y_r)}{\ln(1 + y_o/y_r)}$	<p>a, <math>h_{co}</math> e m = parâmetros de ajuste  <math>h_{co} = 1</math> a <math>2,5\psi_b</math> (cm H<sub>2</sub>O)  <math>S_r = \theta/\theta_s</math>;  a <math>\approx 0,006</math> (curva de desaturação)  <math>\psi_o = 10^7</math> cm H<sub>2</sub>O  <math>\psi_r = 15 \times 10^3</math> cm H<sub>2</sub>O <math>\Leftrightarrow \theta_r</math>  e = índice de vazios</p>

#### 4. RESULTADOS EXPERIMENTAIS EM SOLOS BRASILEIROS

Machado e Vilar (1998) realizaram ensaios em amostras indeformadas extraídas em um poço localizado no campo experimental da EESC/USP, São Carlos. Os resultados da

caracterização de amostras de solo residual estão apresentados na Tabela 2.

Os ensaios para determinação da curva característica foram executados segundo 2 procedimentos diferentes. Para baixos valores de sucção (até 13 kPa) foi utilizada placa de sucção e para altos valores utilizou-se célula de pressão. Considerando que a aplicação dos

valores de sucção foi crescente, os ensaios foram feitos no sentido da desaturação das amostras.

Souza (1995) executou ensaios em solo residual da encosta do Morro Santos Rodrigues (Querosene), no Rio de Janeiro. Os testes foram realizados em células de pressão e seguiram a trajetória de umedecimento. A caracterização do solo residual está listada na Tabela 2.

Tabela 2 – Caracterização dos solos

Local	São Carlos	Querosene, RJ
$\omega_{\text{campo}}$ (%)	16,7	5,3
$\gamma_{\text{campo}}$ (kN/m <sup>3</sup> )	19,2	14,8
n	0,39	0,48
S (%)	71,3	15,5
$\theta_{\text{campo}}$ (%)	28	7,5
Argila (%)	28	10
Silte (%)	13,7	15
Areia (%)	68,9	75
LL (%)	28	-
LP (%)	17	-

## 5. MODELAGEM DAS CURVAS CARACTERÍSTICAS

A determinação dos parâmetros de ajuste dos modelos propostos na Tabela 1 foi feita a partir de um processo iterativo, minorando o erro entre as curvas experimental e prevista. Para tal desenvolveu-se uma planilha eletrônica, incorporando todos os métodos descritos neste trabalho.

A princípio, utilizou-se como critério de medição da qualidade do ajuste, o coeficiente de correlação associado à linha de tendência entre resultados experimentais e resultados previstos. Este tipo de abordagem fornece coeficiente de correlação ( $r^2$ ) unitário sempre que os pontos são ajustáveis a uma relação linear qualquer. Em algumas simulações observou-se uma defasagem constante entre as curvas experimental e prevista. Com isto, apesar de  $r^2=1$ , o ajuste não indicava uma boa qualidade de previsão.

Assim sendo, a metodologia adotada para medição da qualidade da modelagem baseou-se em um critério de erro ( $\epsilon$ ), definido como o somatório do quadrado dos resíduos, dividido pelo número de determinações consideradas:

$$\epsilon = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\theta_i - \hat{\theta}_i)^2 \quad (2)$$

onde  $\theta_i$  é o teor de umidade volumétrico previsto,  $\hat{\theta}_i$  a umidade medida e n o total de pontos experimentais.

De acordo com Leong e Rahardjo (1998), o número total de pontos experimentais utilizados na estimativa dos parâmetros de ajuste dos modelos tem pouca influência na qualidade da modelagem. Os autores, entretanto, ressaltam a necessidade dos dados serem representativos de toda amplitude da curva característica. A inexistência de dados experimentais na região correspondente a altos valores de sucção ( $\theta < \theta_r$ ) faz com que os erros nesta região sejam acentuados.

A Tabela 3 resume os erros na modelagem da curva característica para os dois materiais estudados. Os resultados indicam que, com exceção dos métodos que utilizam as frações granulométricas (Gosh, 1980 e Rawls e Brakensiek, 1989), os erros estão em uma faixa que varia entre 0,7 a 15. No caso dos solos estudados o modelo de Gardner (1958) apresentou o melhor ajuste.

Tabela 3 – Erro na Modelagem (Equação 2)

Autor	Local	
	São Carlos	Querosene, RJ
Gardner	0,69	0,81
Brooks e Corey	4,93	2,26
Farrel e Larson	8,08	15,46
Roger e Hornberger + Brooks e Corey	2,08	2,00
Van Genuchten	0,78	2,47
William et al - Saxton et al	1,66	6,16
Haverkamp e Parlange	2,33	0,72
McKee e Bumb	9,60	3,40
Fredlund e Xing	0,76	3,54
Aubertin et al	5,99	1,2
Gosh	151,99	21,30
Rawls e Brakensiek	33,10	10,30

A Figuras 2(a) e 2(b) ilustram graficamente a qualidade do ajuste para os modelos que, independente do solo estudado, apresentaram erro inferior a 4. As curvas obtidas dentro desta faixa de erro simularam razoavelmente bem os resultados experimentais. A reduzida faixa de dados experimentais para o caso do solo

residual do Querosene RJ, induziu a desvios na modelagem das extremidades da curva característica.

A Figura 3 mostra as curvas obtidas com os modelos baseados na distribuição granulométrica, para o solo residual do Querosene RJ. Os resultados indicam uma tendência de subestimar os teores de umidade volumétricos. Os erros calculados (Tabela 3) foram superiores a 10, acima do limite considerado aceitável, para o caso dos solos estudados. Ressalta-se ainda a incapacidade desses modelos reproduzirem a forma sigmoidal da curva característica. Assim sendo, a tangente à curva, que define a capacidade de retenção específica ( $C(\theta)$ ), não pode ser estimada por estes modelos.

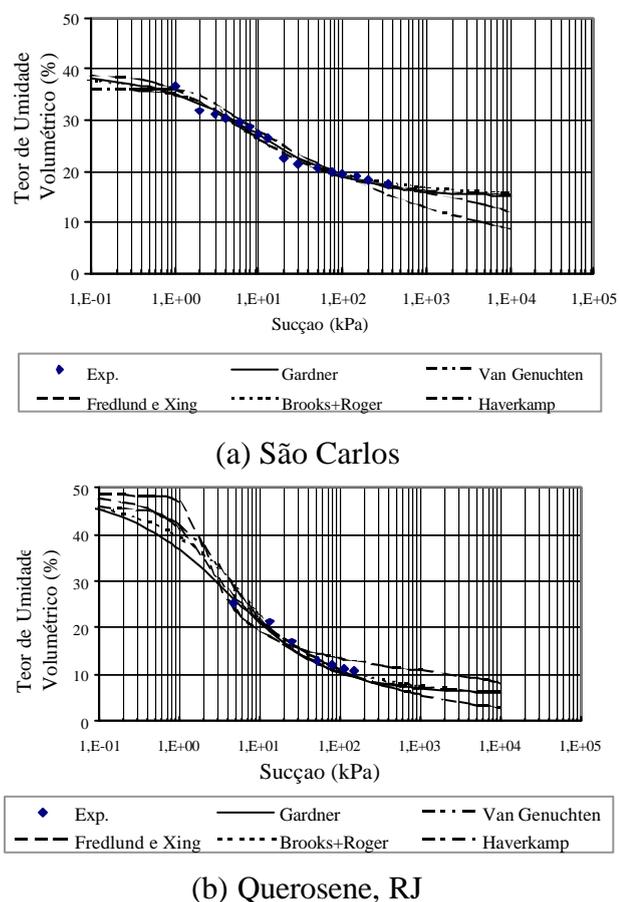


Figura 2 – Modelos com Erro inferior a 4

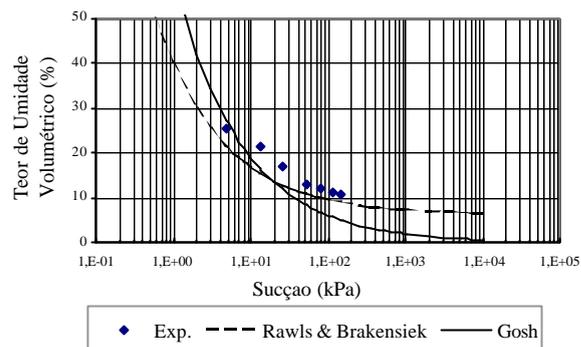


Figura 3 - Modelos Baseados na Curva Granulométrica – Querosene, RJ

O modelo de Visser (1966) não pôde ser comparado aos demais por não ser explicitado em termos de teor de umidade. Os erros calculados em termos dos desvios no valor da sucção foram 287,2 e 1161,6, respectivamente, para o solo do Querosene RJ e do campo experimental de São Carlos (USP). Apesar destes valores a qualidade da modelagem pode ser considerada aceitável, conforme mostra a Figura 4.

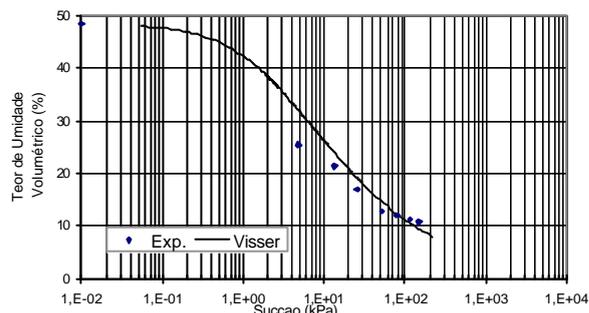


Figura 4 – Modelo de Visser (1966) – São Carlos

## 6. CONCLUSÕES

Este trabalho examinou a aplicabilidade de proposições empíricas para modelagem da curva característica para o caso de dois solos residuais brasileiros. A maioria dos modelos requer a definição de um número de parâmetros, variando entre 2 e 6. Alguns destes são determinados por simples ajuste, outros são estimados a partir dos resultados experimentais ( $\psi_b$ ,  $\psi_r$ ,  $\theta_r$ ,  $\theta_s$ ).

De uma forma geral, as equações são correlacionáveis, conforme constatado por outros autores (Rawls e Brakensiek, 1989; Leong e Rahardjo, 1998).

A definição da qualidade do ajuste foi estabelecida a partir de um critério de erro baseado na estimativa dos teores de umidade volumétrica. Para os solos estudados, adotou-se como limite aceitável o erro igual a 4.

Alguns modelos não reproduziram a forma sigmoidal da curva característica e, portanto não conseguiram um bom ajuste.

As proposições baseadas nas frações granulométricas não indicaram um bom ajuste.

Independente do tipo de solo, os melhores resultados foram observados com o modelo de Gardner (1958). Os modelos de Haverkamp e Parlange (1986), VanGenuchten (1980), Fredlund e Xing (1994), Brooks e Corey (1964), corrigido pela proposição de Roger e Hornberger (1978) e Visser (1966), também indicaram um bom ajuste.

O modelo de Haverkamp e Parlange (1986) envolve o menor número de parâmetros de ajuste e, a exceção dos demais, considera os efeitos das trajetórias de umedecimento ou secagem.

## AGRADECIMENTOS

A autora agradece à UERJ pelo apoio financeiro a título de bolsa de Iniciação Científica da aluna Michelle Nogueira Guedes.

## REFERÊNCIAS

Aubertin, M; Ricard, J-F e Chapuis, R.P. (1998) A Predictive model for the water retention curve: application to tailings from hard-rock mines. *Can. Geot. J.*, n.35, pp.55-69.

Brooks, R.H. e Corey, A.T. (1964), *Hydraulics Properties of Porous Media*, Colorado State Univ. *Hydrol. Paper* No.3.

Farrel, D. A e Larson, W. E, (1972) – Modelling the Pore Structure of Porous Media, *Water Res. Res.*, no. 3, pp.699-706.

Fredlund, D.G. e Xing, A (1994) – Equations for the soil water characteristic curve - *Can. Geot. J.* 31(4) pp 521-532.

Gardner, W.R. (1958) - Some Steady-State of the Unsaturated Moisture Flow Equation with application to Evaporation from Water Table - *Soil Sci.*, No. 85, Vol.3, pp228-232.

Ghosh, R.K. (1980) - Estimation of Soil Moisture Characteristics from Mechanical

Properties of Soils - *Soil Sci.*, v.130, No 1.2, pp.60-63.

Gerscovich, D.M.S. (1994) - *Fluxo em Meios Porosos Saturados-Não Saturados: Model. Num. com Aplicações ao Estudo da Estabilidade de Encostas na Cidade do RJ* - Tese de Doutorado - DEC - PUC-Rio.

Haverkamp, R. D.G. e Parlange, J.Y. (1986) – Predicting the Water-Retention Curve from Particle Size Distribution: 1. Sandy Soils without organic matter. *Soil Sci.*, vol.142, no.6, pp.325-339.

Hillel, D. (1971) - *Soil and Water: Physical Principles and Processes* – Acad.Press, NY.

Leong, E.C. e Rahardjo, H. (1998) – Review of Soil-Water Charact. Curve Eq., *J. Geot. and Geoenv. Eng.*, dez., pp.1106-1117.

Machado S. L. e Vilar, O M. (1998) – Resistência ao Cisalhamento de Solos Não Saturados: Ensaio de Laboratório e Determinação expedita. *Solos e Rochas*, vol.21, no.2, pp.65-78.

McKee, C.R. e Bumb, A C. (1987) – *Flow-testing coal bed methane production wells in the presence of water and gas*, SPE Formation Evaluation, dec., pp.599-608.

Rawls, W.J. e Brakensiek (1989) – *Estimation of Soil Water Retention and Hydraulic Properties, Unsaturated Flow in Hydrologic Modeling: Theory and Practice*, ed H.J. Morel-Seytoux, Kuwer Academic Publishers, pp.275-300.

Roger, B.C. e Hornberger, G.M. (1978) – Empirical equations for some soil hydraulic properties. *Water Res. Res.*, 14, pp.601-604

Smith, R.M. e Browning, D.R. (1942) - Persistent Water-Unsat. of Natural Soil in Relation to Various Soil and Plant Factors - *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, v.7, pp.114-119.

Saxton, K.E., Rawls, J.S., Hornberger, e Papendick (1986) - Estimating Generalized Soil-Water Characteristics from Texture - *Soil Sci. Soc. Am. J.*, no.50, pp.1031-1036.

Souza, V. A. D. (1995) – *Estudo de Mecanismos de Ruptura na Encosta do Morro Santos Rodrigues (Querosene) – RJ*, Dissertação de Mestrado, DEC- PUC-Rio

Tinjum, J.M.; Benson, C.H. e Blots, L.R. (1997) - Soil-Water Characteristic Curves for Compacted Clays, *J. Geo. and Geoenv. Eng.*, nov. , pp.1060-1069.

- Van Genuchten, M.Th (1980) - A Closed Form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils - *Proc. Soil Sci. Soc. Am.*, vol.44, no.5, pp892-898.
- Visser, W.C. (1966) - *Progress in the Knowledge about the Effect of Soil Moisture Content on Plant Production*, Inst. Land Water Manegement, Tech. Bull.
- Williams, J., Prebble, R.E., Williams, W.T. e Hidnett, C.T. (1983) – The Influence of texture, structure and clay mineralogy on the soil moisture characteristic curve. *Australian J. Soil Res.*, 21, pp.15-32.
- Wilson, B.N., Slack, D.C. e Larson, C.L. (1981) - An Infiltration Model: Development and Evaluation of its Parameters - *Trans. ASAE*, no. 24, pp.670-677.