

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

FLUXO DE ÁGUA EM SOLOS NÃO SATURADOS



PEF3304 – POLUIÇÃO DO SOLO
Maria Eugenia Gimenez Boscov



Importância para a Geotecnia Ambiental

- Determinação da recarga do lençol freático
- Controle de qualidade da água subterrânea



Importância para a Geotecnia Ambiental

- O lençol freático é alimentado a partir da superfície do terreno por água de infiltração advinda da precipitação, irrigação e outras fontes.
- A percolação até o lençol freático ocorre através da zona não saturada.
- A situação de saturação de um depósito de solo é determinada pelas condições microclimáticas na área e por processos artificiais.



Importância para a Geotecnia Ambiental

- Poluentes são aplicados à superfície do terreno sobre áreas extensas (fertilizantes e pesticidas) ou pontualmente (aterros de resíduos e fossa sépticas).
- Por dissolução na água de precipitação ou por serem veiculados em forma líquida, são carregados pela água de infiltração.
- As características do fluxo de água pelo subsolo determinam a velocidade e a concentração com que os poluentes atingem o lençol freático.



Importância para a Geotecnia Ambiental

- Utilização de solos compactados em revestimentos impermeabilizantes de locais de disposição de resíduos.
- Solos tropicais residuais são tipicamente não saturados in situ.



Tensão superficial

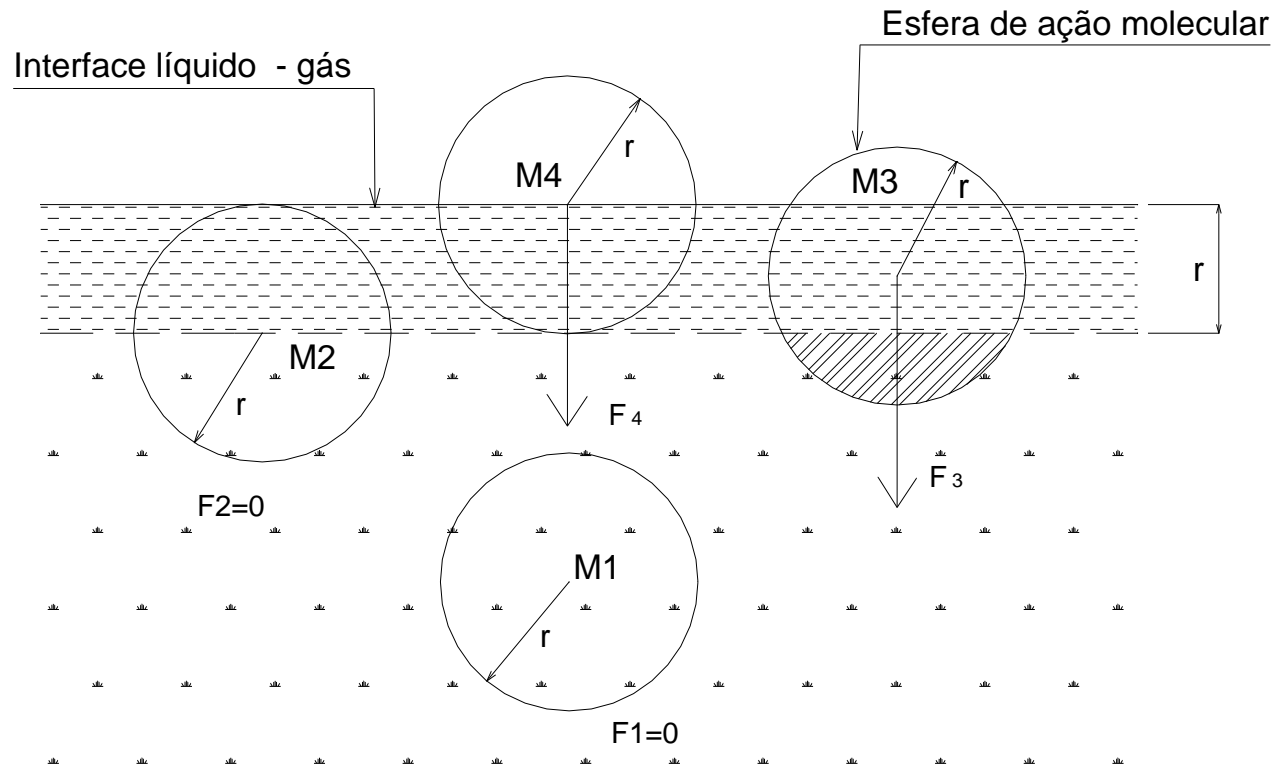
- Em uma massa de líquido em repouso, cada molécula atrai e é atraída pelas moléculas que a rodeiam por forças moleculares de coesão.
- O raio da esfera de ação molecular (r) é a distância limite até a qual a molécula consegue exercer forças de atração sobre as outras.
- Uma molécula no interior da água sofre forças de atração iguais em todas as direções, o que significa que não há forças desbalanceadas.



Camada ativa

- Nas moléculas próximas da superfície, cuja esfera de ação não esteja totalmente no interior do líquido, as forças de coesão não se equilibram, acarretando uma resultante direcionada ao interior do líquido.
- Essa camada superficial de espessura r é denominada camada ativa.

Camada ativa



(modificado de Libardi, 1984 por Oliveira Filho, 2004)



Camada ativa

- As moléculas da camada ativa têm uma forte tendência a se moverem para o interior do líquido, formando uma película contrátil.
- Para haver equilíbrio, uma força de tração é gerada ao longo da película contrátil, tangente a sua superfície.



Pressão molecular

- Devido à tendência da superfície se contrair espontaneamente, o interior do líquido fica sujeito a uma enorme pressão conhecida como pressão molecular p' .



Pressão em um ponto de uma massa de líquido

$$p = p_0 + p' + \rho g z$$

p = pressão em um ponto da massa do líquido

p_0 = pressão aplicada à superfície

p' = pressão molecular

$\rho g z$ = pressão devida ao peso da coluna de líquido



Pressão molecular

- A pressão p' se cancela nas medidas hidrostáticas, daí não ser normalmente levada em consideração; entretanto, é fundamental para a compreensão dos fenômenos capilares.



Tensão superficial

Generalizando:

- Quando um líquido está em contato com outra substância (outro líquido imiscível, um gás, um sólido), há energia livre na interface, que se manifesta como uma tensão interfacial.
- A tensão interfacial é definida como a quantidade de trabalho que deve ser realizado para separar uma área unitária entre as substâncias.



Tensão superficial

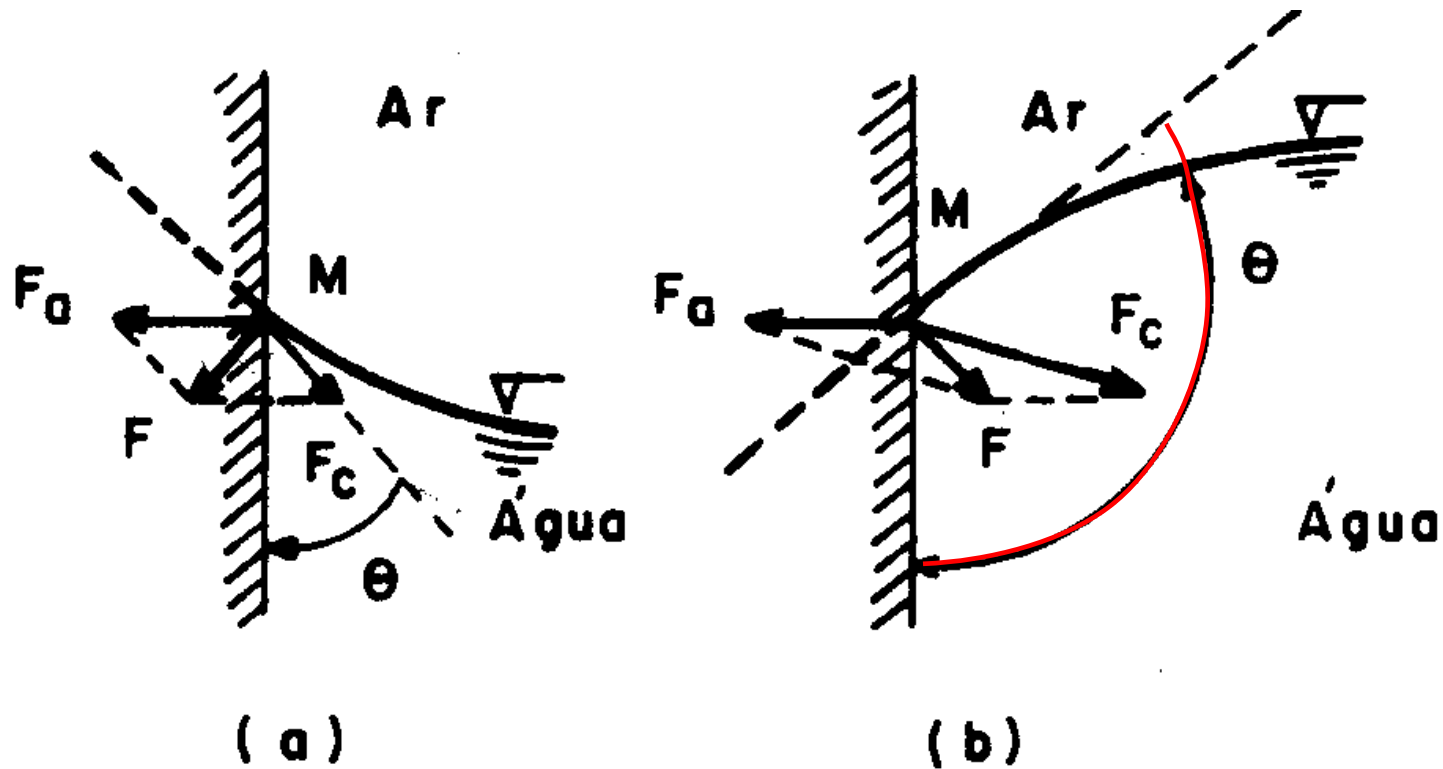
- Pode ser definida como a quantidade de trabalho que deve ser realizado contra a pressão molecular para trazer um número suficiente de moléculas para dentro da camada ativa para formar uma nova unidade de superfície.



Tensão superficial

- A interface ar-água tem comportamento semelhante ao de uma membrana esticada sob tração em contato com dois fluidos adjacentes.
- A diferença entre as pressões do ar e da água é denominada pressão capilar, e é uma medida da tendência de um meio poroso parcialmente saturado de sugar água ou repelir ar.

Contato entre uma interface água-ar e um sólido



(a) água molhando o sólido

(b) água não molhando o sólido)

(Ignatius, 1999)



Contato entre uma interface água-ar e um sólido

- Quando dois fluidos imiscíveis (ar e água) estão em contato com uma superfície sólida plana (tubo de vidro, grão de solo), define-se como ângulo de contato o ângulo formado entre a superfície sólida e a interface entre os dois fluidos, medido através do fluido mais denso.



Contato entre uma interface água-ar e um sólido

- Nos pontos de contato entre os dois fluidos e o sólido, atuam as seguintes forças sobre as moléculas de água: força da gravidade (desprezível diante das forças moleculares atuantes), força molecular de coesão entre as partículas de líquido (que atua sempre dirigida para o interior da massa líquida) e força molecular de adesão água-sólido.



Contato entre uma interface água-ar e um sólido

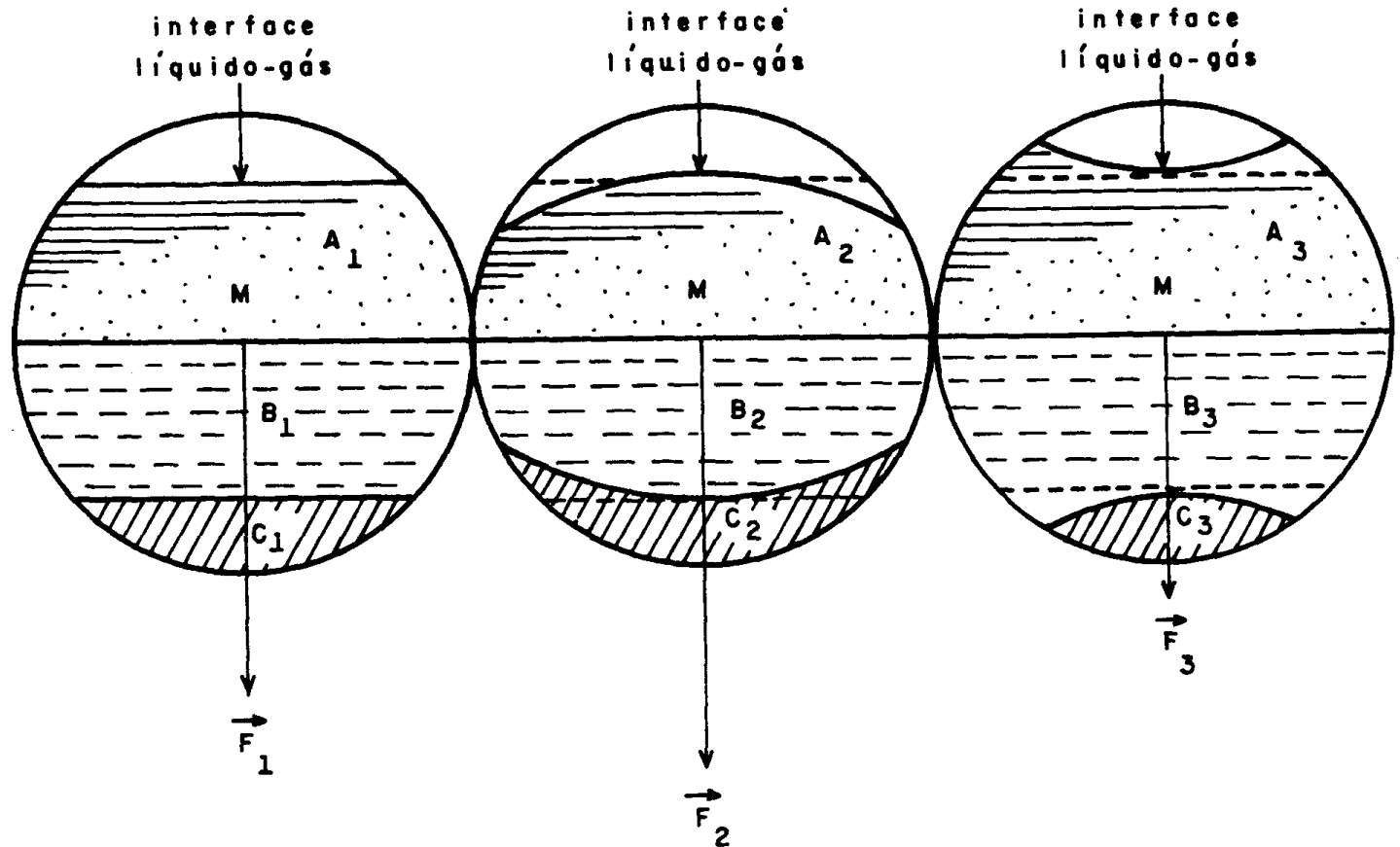
- O ângulo de contato é determinado pelo equilíbrio dessas forças.
- A superfície líquida sempre se ajusta perpendicularmente à força resultante que atua sobre ela, já que os líquidos não suportam forças de cisalhamento.



Contato entre uma interface água-ar e um sólido

- Sentido da resultante para dentro da parede sólido: fluido umectante
- Sentido da resultante para dentro da massa líquida: fluido não umectante
- Um fluido pode ser umectante em um sistema e não umectante em outro. Por exemplo, o ar é não umectante em um sistema composto por ar, água e vidro, e umectante em um sistema composto por ar, mercúrio e vidro.

Variação da pressão molecular com a curvatura da interface líquido-gás



(a) Interface plana;

(a)

(b)

(c)

(b) Interface convexa (fluido não umectante)

(c) Interface côncava (fluido umectante)

(Libardi, 1984)



Menisco

- Se uma membrana flexível é sujeita a pressões diferentes de cada lado, a membrana assume uma curvatura côncava na direção de maior pressão para estar em equilíbrio.
- A película contrátil curva é denominada menisco.
- $\Delta u = 2T_s/R$
 Δu = diferença de pressão entre os dois lados da membrana
 T_s = tensão superficial (força/comprimento)
 R = raio de curvatura



Menisco

- Se uma membrana flexível é sujeita a pressões diferentes de cada lado, a membrana assume uma curvatura côncava na direção de maior pressão para estar em equilíbrio.
- A película contrátil curva é denominada menisco.



Menisco

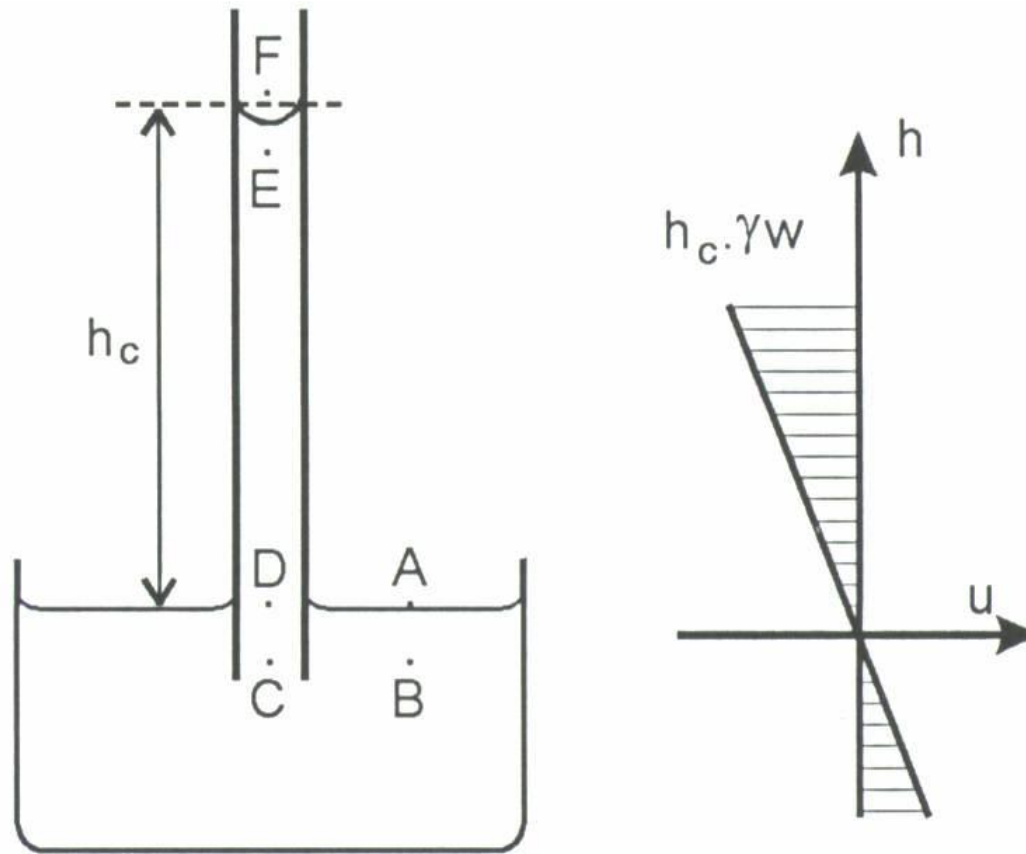
- $\Delta u = 2T_s/R$

Δu = diferença de pressão entre os dois lados da membrana

T_s = tensão superficial (força/comprimento)

R = raio de curvatura

Altura de ascensão e pressão de água em tubo capilar



(Pinto, 2000)



Capilaridade

- A coluna de água no tubo está sustentada pelo menisco. Ela não exerce pressão sobre o ponto D.
- Força devido à tensão superficial no menisco:
$$F = 2 \pi r T_s \cos\theta$$
- Força peso da coluna de água no tubo capilar: $P = \pi r^2 h_c \gamma_w$
- Portanto: $h_c = (2 T_s \cos\theta) / (r \gamma_w)$



Capilaridade

Ao se introduzir um tubo capilar na superfície livre de um líquido, se o líquido tender a umedecer o material do tubo, a interface líquido-gás se tornará côncava, a pressão no líquido dentro do tubo ficará menor do que na superfície livre externa à mesma altura, e o líquido subirá pelo tubo (ascensão capilar) até uma altura tal que o peso da coluna formada iguale o valor da diferença de pressão. No caso do líquido não molhar o tubo, ocorrerá uma depressão capilar.

(Ignatius, 1999)



Solo não saturado

- $S = V_w / V_v$
- S = grau de saturação
- V_w = volume de água
- V_v = volume de vazios
- O solo é considerado não saturado quando há presença de ar nos vazios, mesmo em pequena quantidade.
- Um solo saturado apresenta três fases independentes: sólidos, água e ar.



Solo não saturado

- Quando o grau de saturação é muito baixo, a água forma anéis ao redor dos pontos de contato entre grãos; esses anéis são isolados e não formam uma fase contínua de água; o ar forma uma fase contínua.
- À medida que a saturação aumenta, os anéis expandem até formar uma fase aquosa contínua.
- À medida que a saturação continua a aumentar, o ar deixa de ser uma fase contínua e se parte em bolhas.



Capilaridade no solo

- O espaço dos vazios do solo pode ser considerado como um conjunto de canalículos cilíndricos capilares de diâmetros diferentes.
- No espaço dos vazios de um solo não saturado ocorrem interfaces ar-água.
- A retenção de água no solo ocorre pela capilaridade, mas o solo não é um tubo capilar de dimensões constantes, e sim uma composição irregular de poros formados pela matriz do solo.



Sucção

- Pressão neutra negativa nos vazios do solo não saturado.
- Pressão na água é menor do que a do ar (menisco)
- A água sobe por um vazio até uma altura relativa ao diâmetro do mesmo (ver fórmula de altura de ascensão capilar).



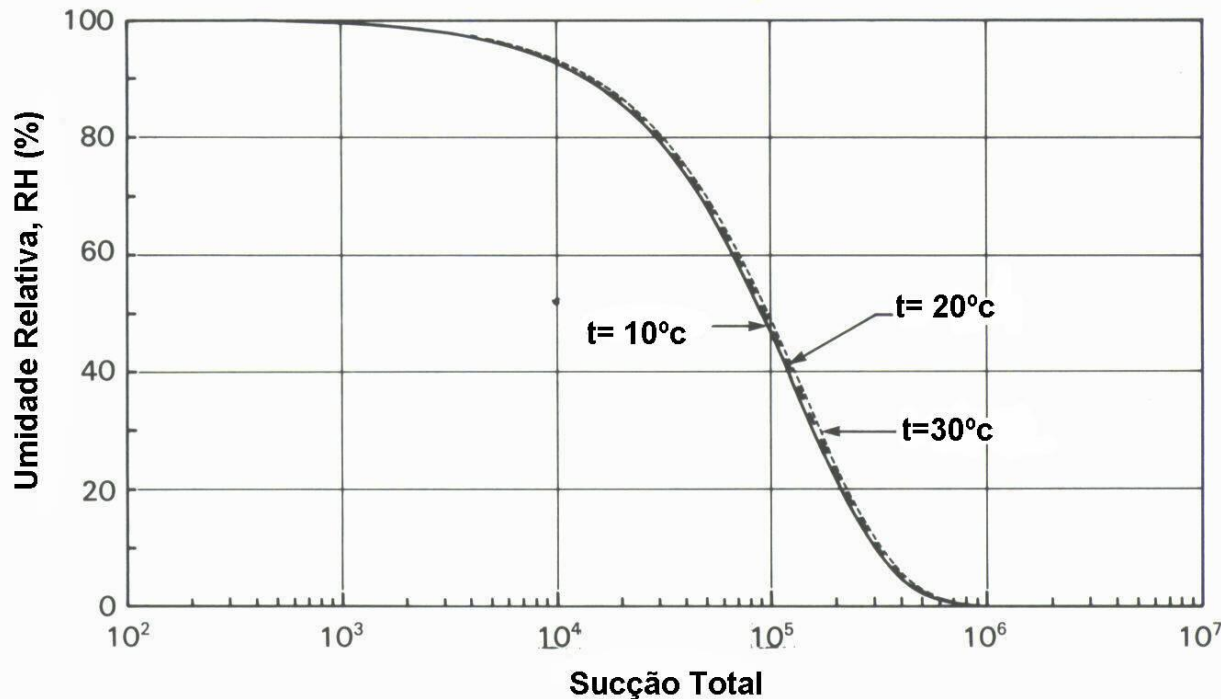
Sucção total

$$\psi = -\frac{RT}{v_{w0}\omega_v} \ln\left(\frac{u_v}{u_{v0}}\right)$$

ψ	sucção total do solo (kPa)
R	constante universal dos gases
T	temperatura absoluta
v_{w0}	volume específico da água ($1/\rho_w$)
ρ_w	densidade da água
ω_v	massa molecular do vapor d'água
u_v	pressão parcial do vapor d'água do solo
u_{v0}	pressão parcial do vapor d'água sobre uma superfície plana de água pura (= sem sais ou impurezas) à mesma temperatura

Relação entre sucção total e umidade relativa

$$t = 20^{\circ} C \Rightarrow \psi = -135022 \ln \left(\frac{u_v}{u_{v0}} \right)$$



(modificado de Fredlund & Rahardjo, 1993 por Oliveira Filho, 2004).



Sucção total e seus componentes

- Sucção total =

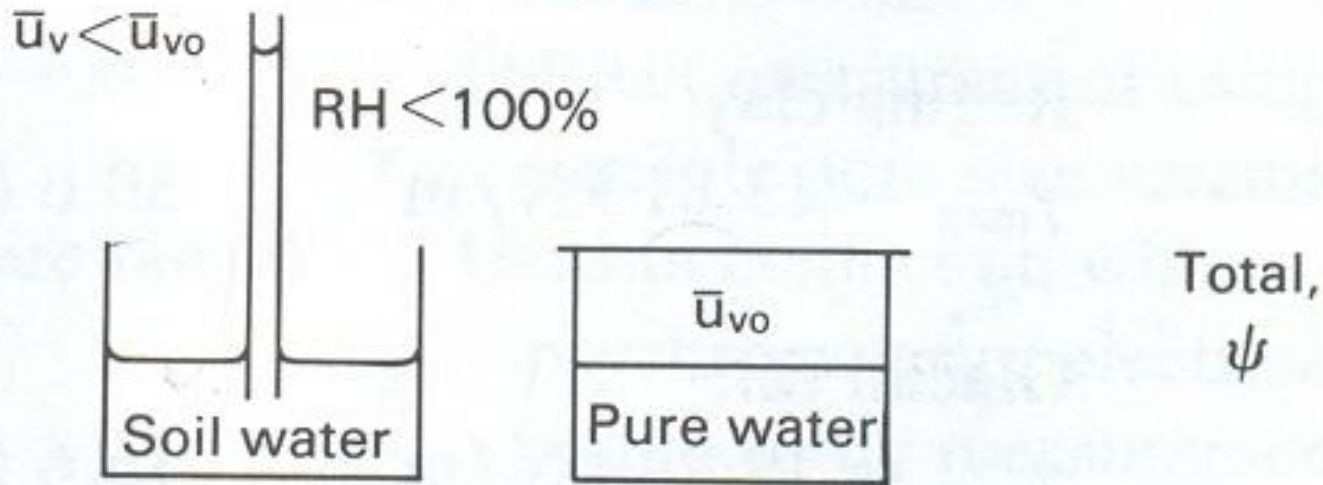
Sucção matricial ou mátrica

+

Sucção osmótica

$$\psi = (u_a - u_w) + \pi$$

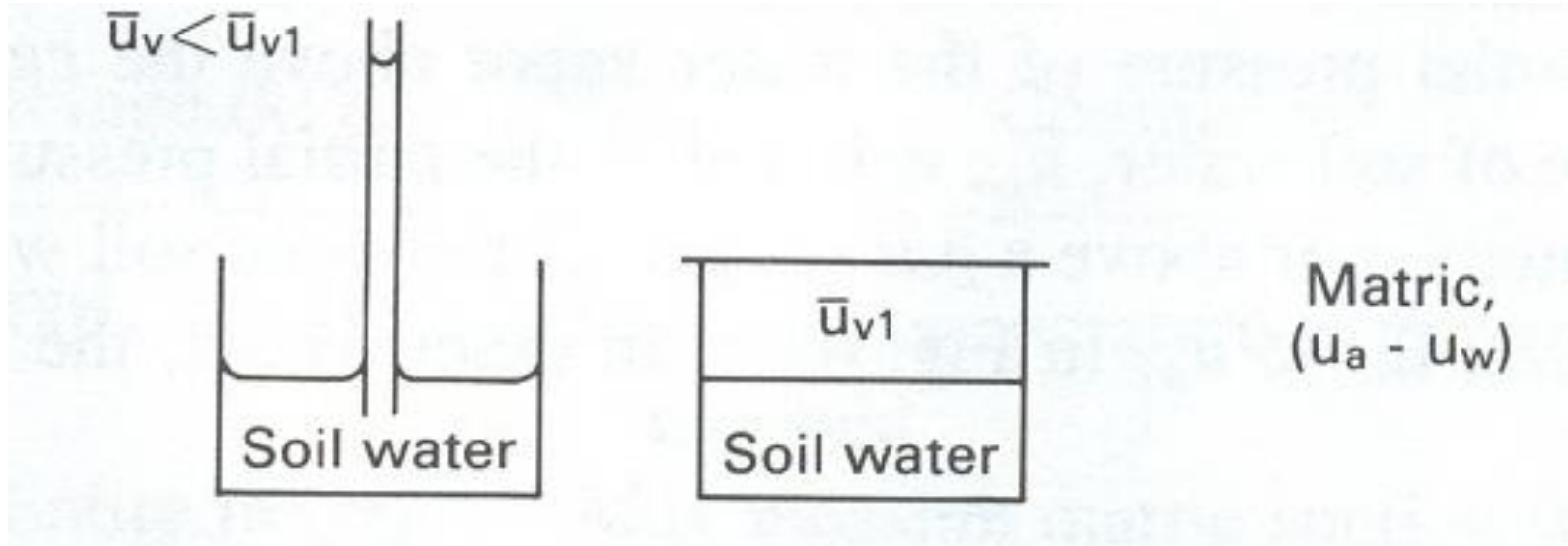
Sucção total



Sucção total ou energia livre da água do solo é a sucção equivalente derivada da medida da pressão parcial de vapor de água em equilíbrio com a água do solo, relativa à pressão parcial de vapor de água em equilíbrio com a água pura livre.

(Fredlund & Rahardjo, 1993).

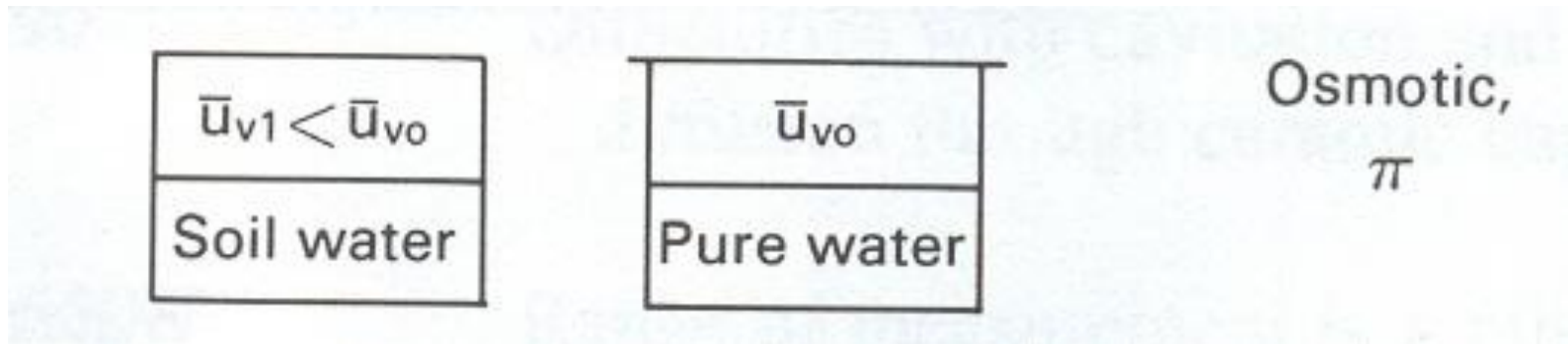
Sucção matricial ou mátrica



Sucção matricial ou componente capilar da energia livre é a sucção equivalente derivada da medida da pressão parcial de vapor de água em equilíbrio com a água do solo, relativa à pressão parcial de vapor de água em equilíbrio com uma solução idêntica em composição à água do solo.

(Fredlund & Rahardjo, 1993).

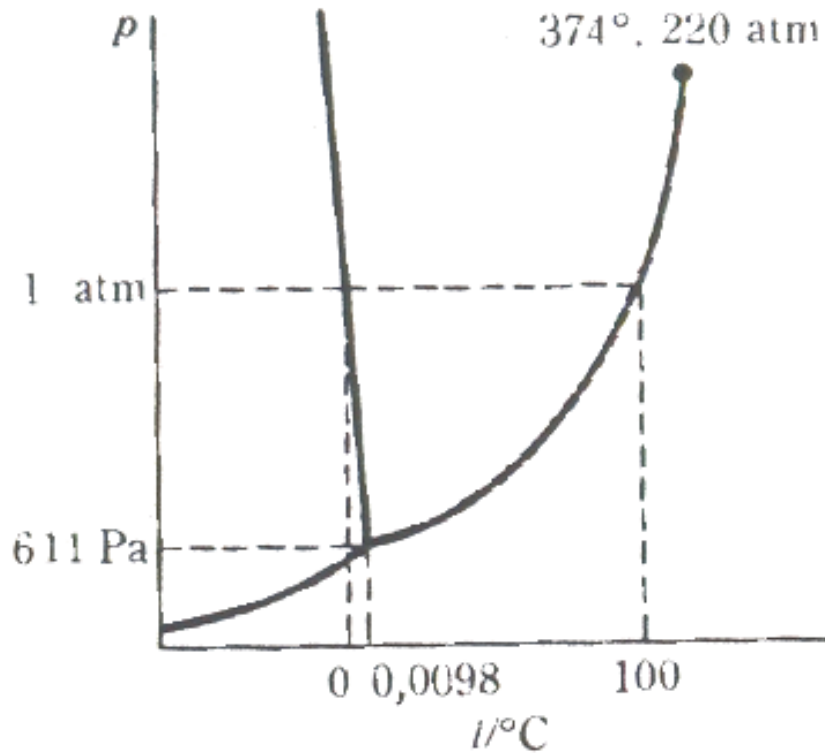
Sucção osmótica



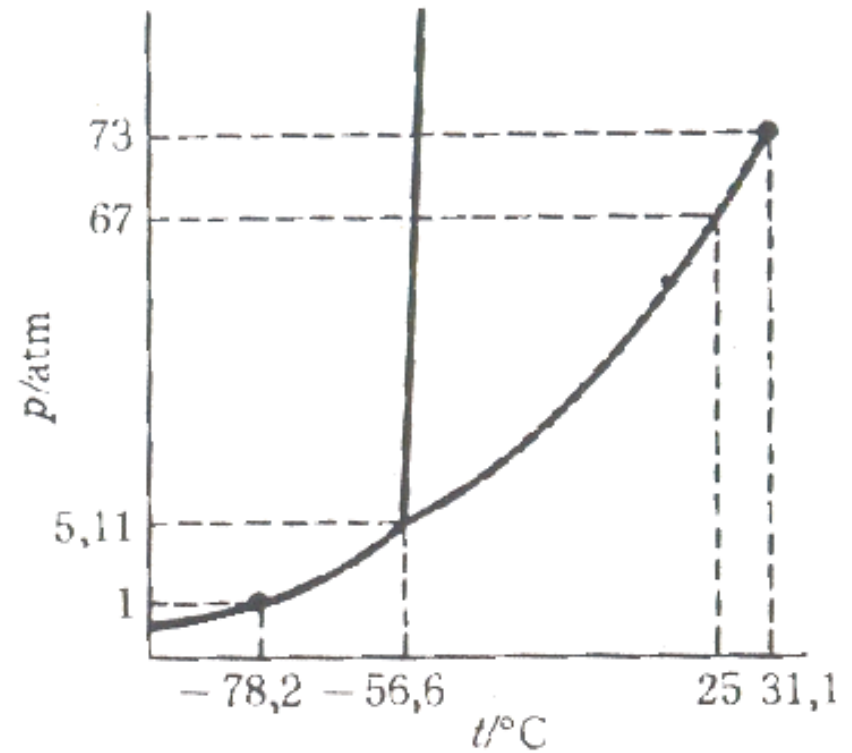
Sucção osmótica ou componente osmótica da energia livre é a sucção equivalente derivada da medida da pressão parcial de vapor de água em equilíbrio com uma solução idêntica em composição à água do solo, relativa à pressão parcial de vapor de água em equilíbrio com a água pura livre.

(Fredlund & Rahardjo, 1993).

Diagrama de fases



Água



CO_2

(Castellan, 1986)



Estados da água

- Na atmosfera, o vapor d'água está misturado a outros gases, mas isso não afeta seu comportamento (lei de Dalton das pressões parciais).
- A pressão parcial de vapor d'água em equilíbrio com a água é a pressão de saturação dada pela curva de vaporização.
- Na natureza, o vapor d'água não está sempre em equilíbrio com corpos d'água adjacentes, ou seja, a pressão parcial de vapor d'água no ar não é igual à pressão de vapor d'água de saturação naquela temperatura.



Ar

- O ar compreende uma mistura de vários gases e vapor d'água em quantidades variadas.
- Considera-se que o ar tenha comportamento de gás perfeito sob as CTP usuais na Geotecnia.
- A percentagem de vapor d'água no ar pode variar de 0,000002% a 4 ou 5%.
- $M(\text{ar}) = 28,966 \text{ kg/kmol}$
- $M(\text{vapor d'água}) = 18,016 \text{ kg/kmol}$



Umidade relativa

- A concentração de vapor d'água no ar é normalmente expressa em termos de umidade relativa.
- $RH = u_v / u_{v0}$
 - u_v = pressão parcial do vapor d'água no ar
 - u_{v0} = pressão de saturação do vapor d'água na mesma temperatura



Misturas água-ar

- Misturas miscíveis (ar dissolvido na água e vapor d'água no ar) e misturas imiscíveis (película contrátil na interface)
- O volume de ar dissolvido na água é aproximadamente igual a 2% do volume total da água.
- A massa de ar dissolvida na água segue a lei de Henry

$$m_{\text{ar}} / m_{\text{w}} = H u_{\text{ar}}$$

- A velocidade com que o ar se dissolve na água segue a lei de Fick.



Métodos de medição de sucção

Método	Sucção medida	Intervalo (kPa)
Psicrômetro	Total / Osmótica	100 – 8000
Papel filtro	Total / Matricial	0 – 29000
Tensiômetro	Total / Matricial	0 – 90
Condutividade térmica	Matricial	0 – 400
Condutividade elétrica	Matricial	20 – 1500
Translação de eixos	Matricial	0 – 1500

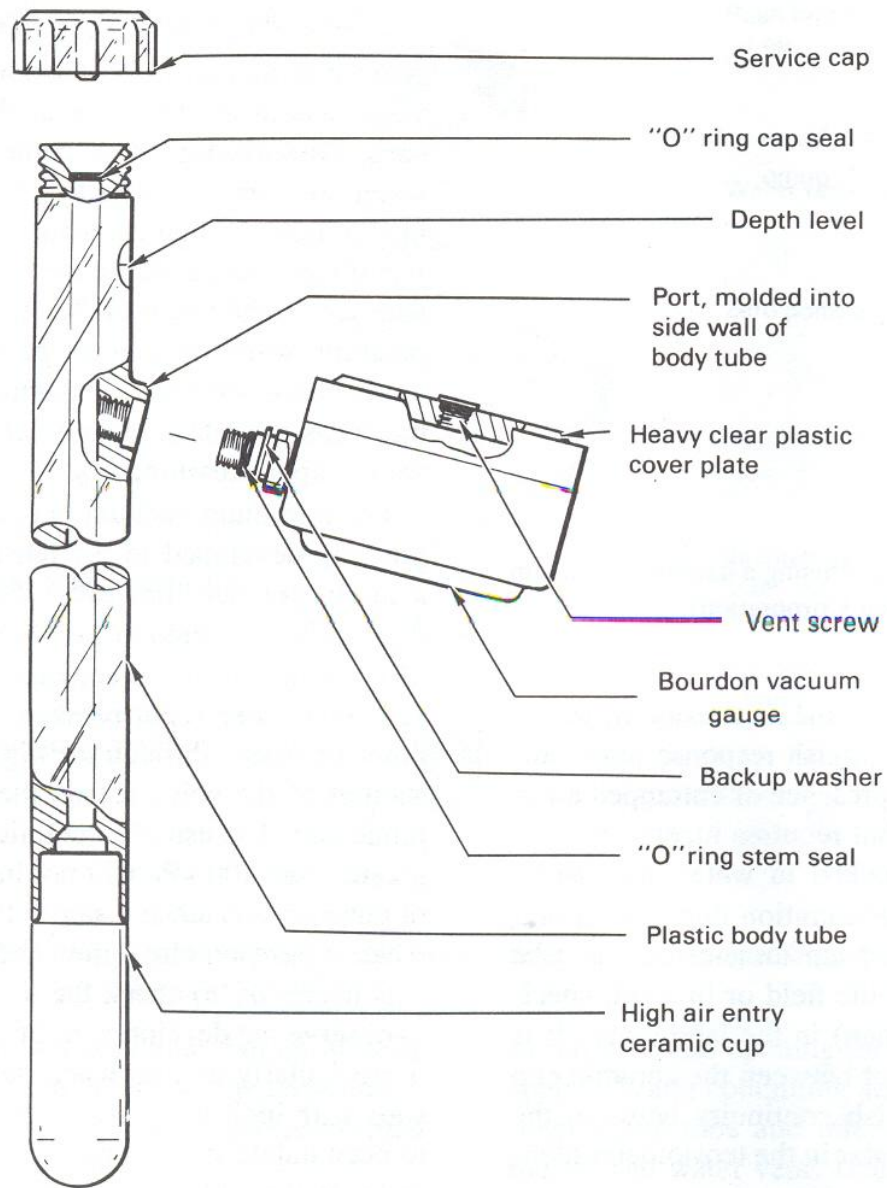
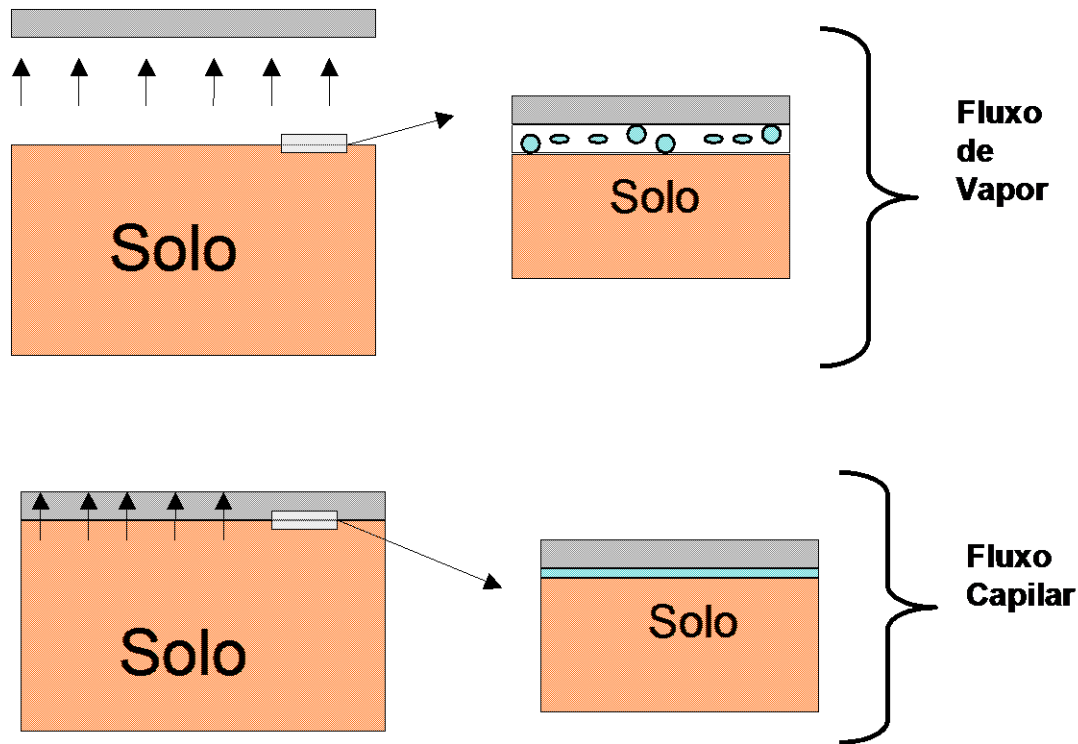


Figure 4.37 Conventional tensiometer from Soilmoisture Equipment Corporation.

Método do papel-filtro



(Modificado de Marinho, 1995 apud Oliveira Filho, 2004)

Materiais usados no método do papel-filtro



(Oliveira Filho, 2004)



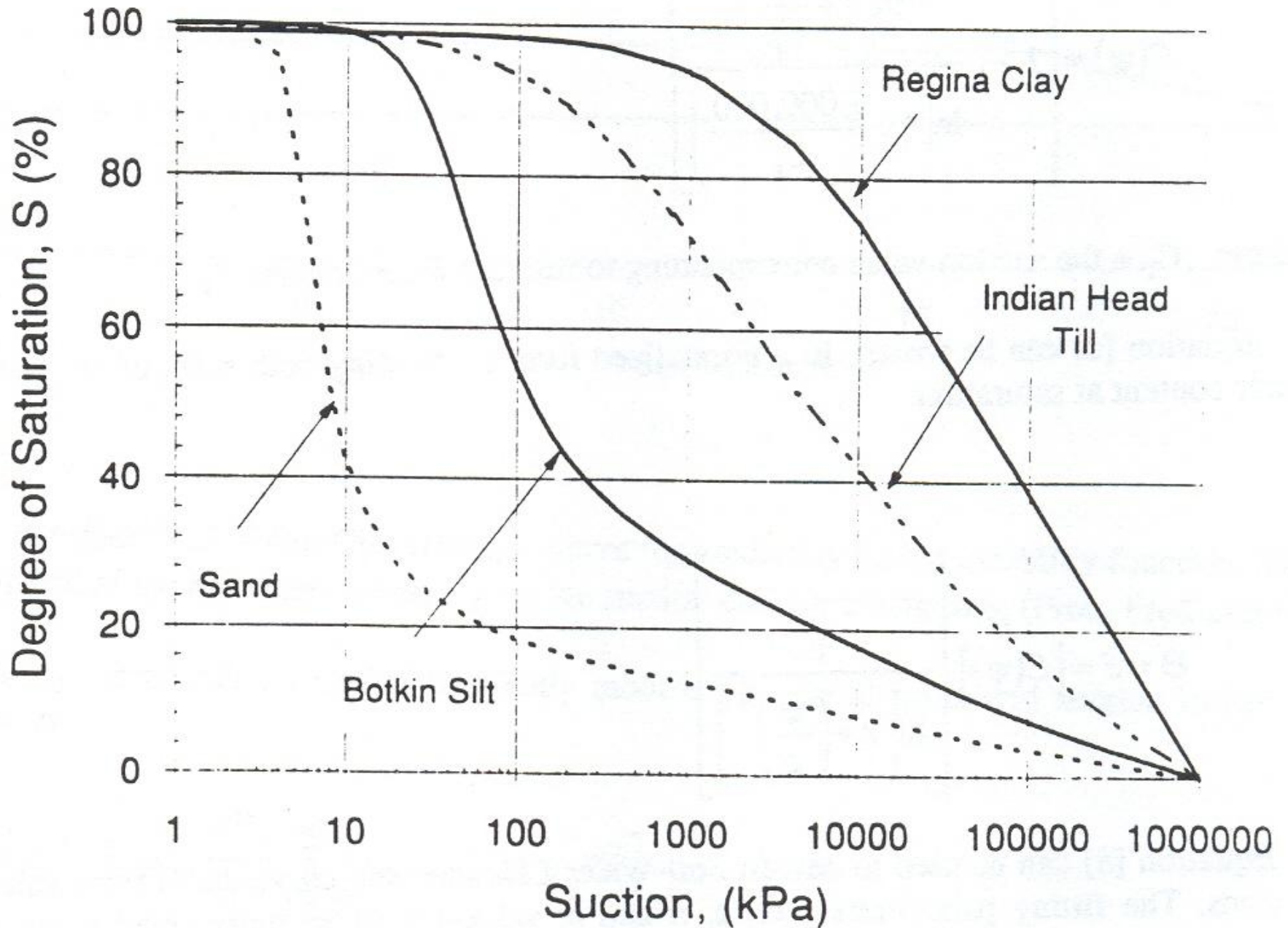
Curva de retenção de água do solo

- Curva característica
- Relação entre o teor de umidade (ou o grão de saturação) e a sucção matricial.
- Depende da distribuição porosimétrica.
- Pode ser determinada por secagem ou por molhagem.
- Apresenta histerese.



Curva de retenção de água do solo

- Por secagem: inicialmente, com o solo totalmente saturado, a sucção é nula. Iniciando-se a secagem, a entrada de ar se dá primeiro pelos vazios maiores, e depois pelos menores. À medida que aumenta a quantidade de ar no solo, a sucção aumenta.
- Por molhagem: solo inicialmente seco com alta sucção. À medida que a água vai entrando, a sucção diminui. À sucção zero ainda permanece uma certa quantidade de ar.



Solos de Saskatchewan, Canada (Fredlund & Rahardjo, 1993)

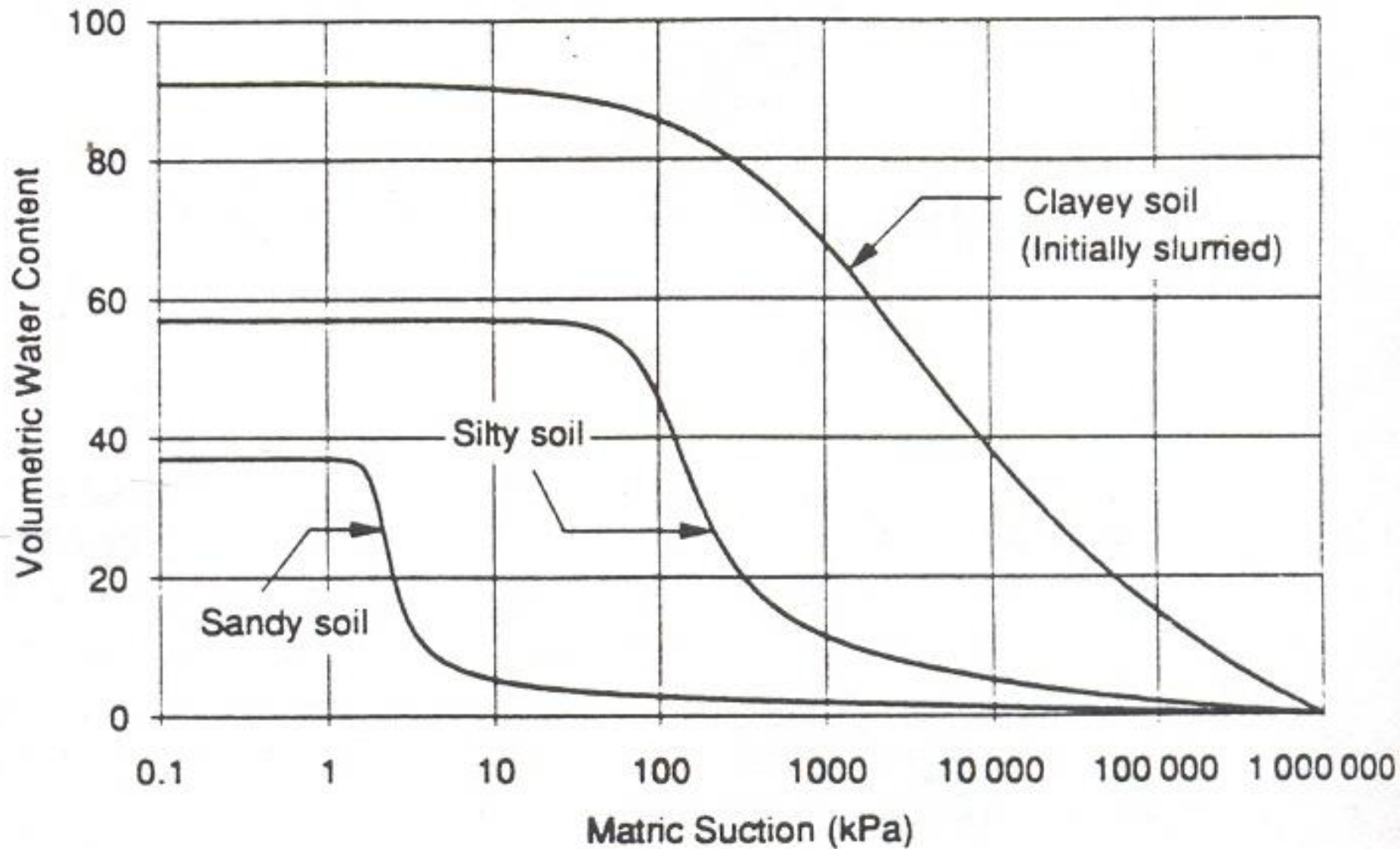
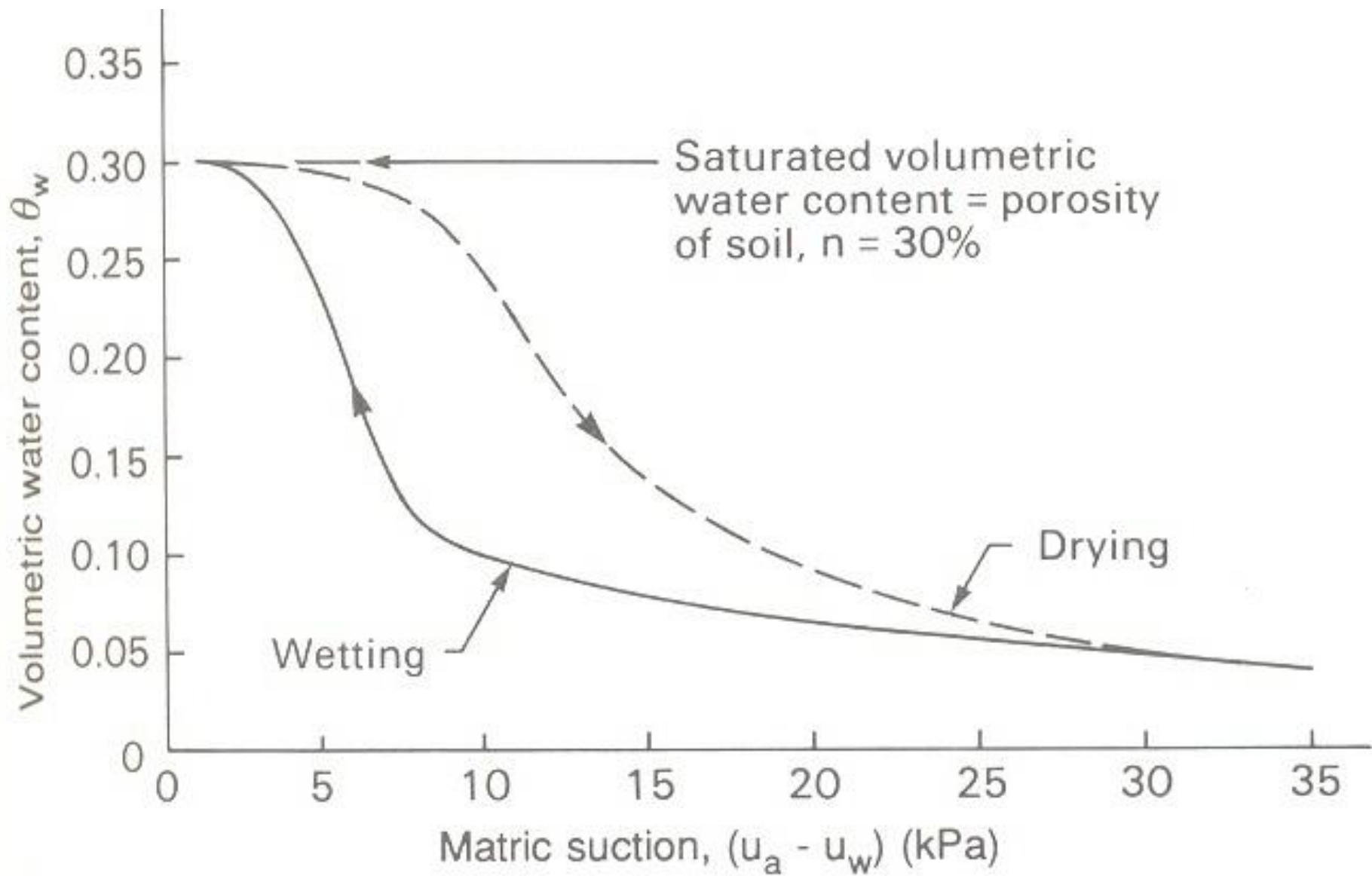


FIG. 2. Soil-water characteristic curves for a sandy soil, a silty soil, and a clayey soil.



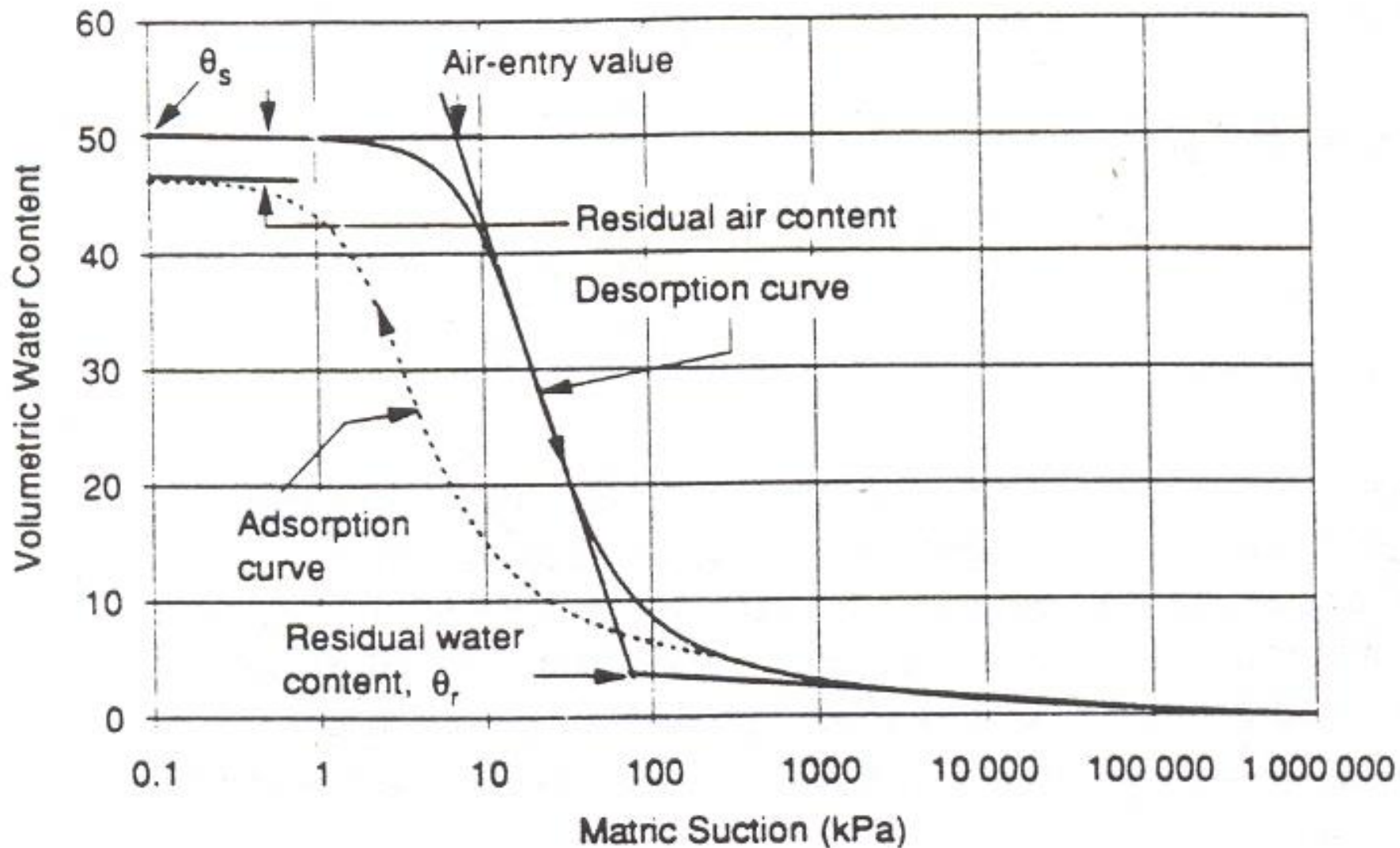


FIG. 1. Typical soil-water characteristic curve for a silty soil.

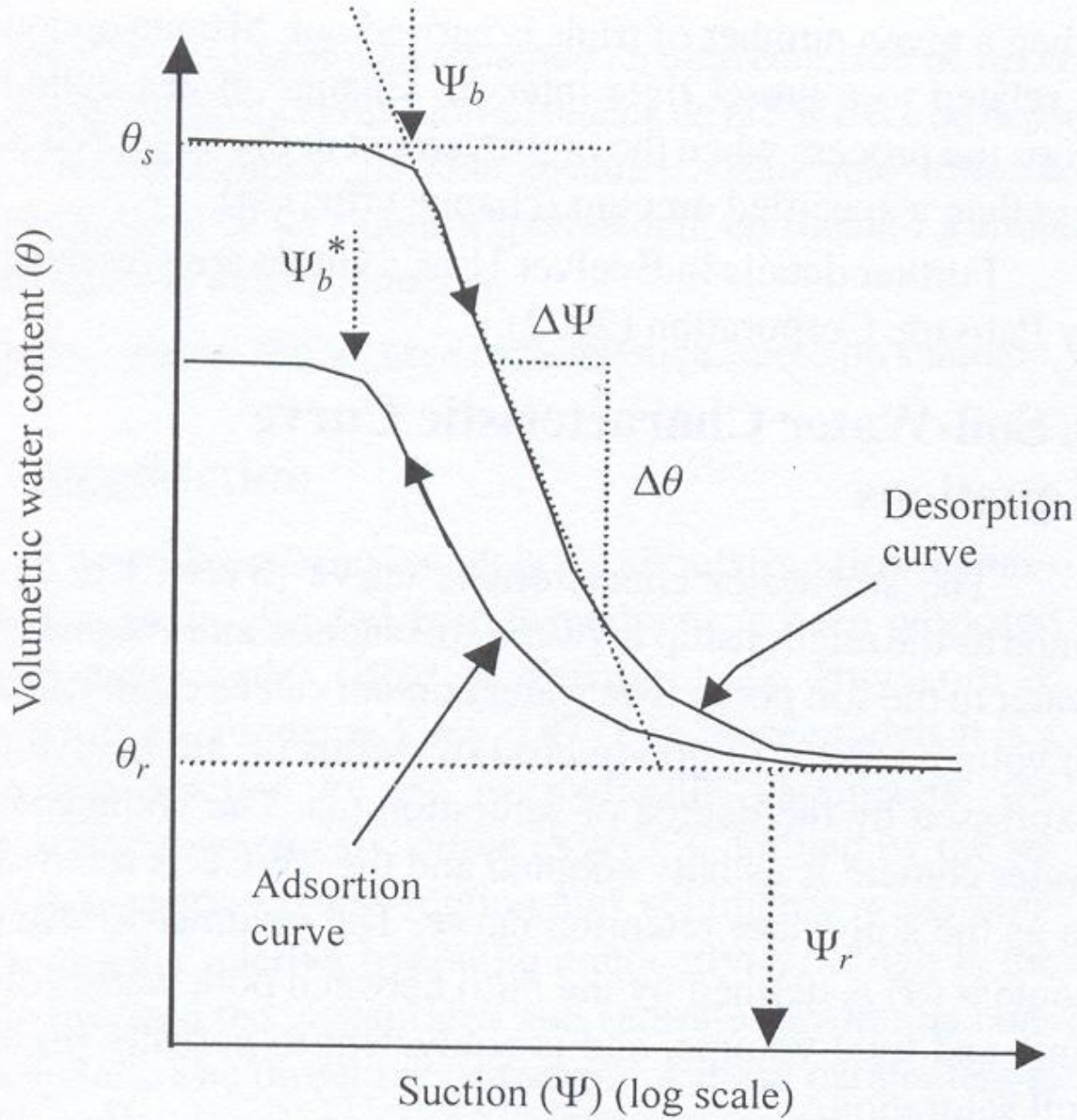


Figure 4 - SWCC shape parameters.



Modelos da curva de retenção de água

- Brooks & Corey (1964)
- Van Genuchten (1980)
- Fredlung & Xing (1994)
- entre outros



Brooks & Corey (1964)

$$S_e = \frac{S - S_r}{1 - S_r} = \left(\frac{\Psi_b}{\Psi} \right)^\lambda$$

S_e = grau de saturação efetivo

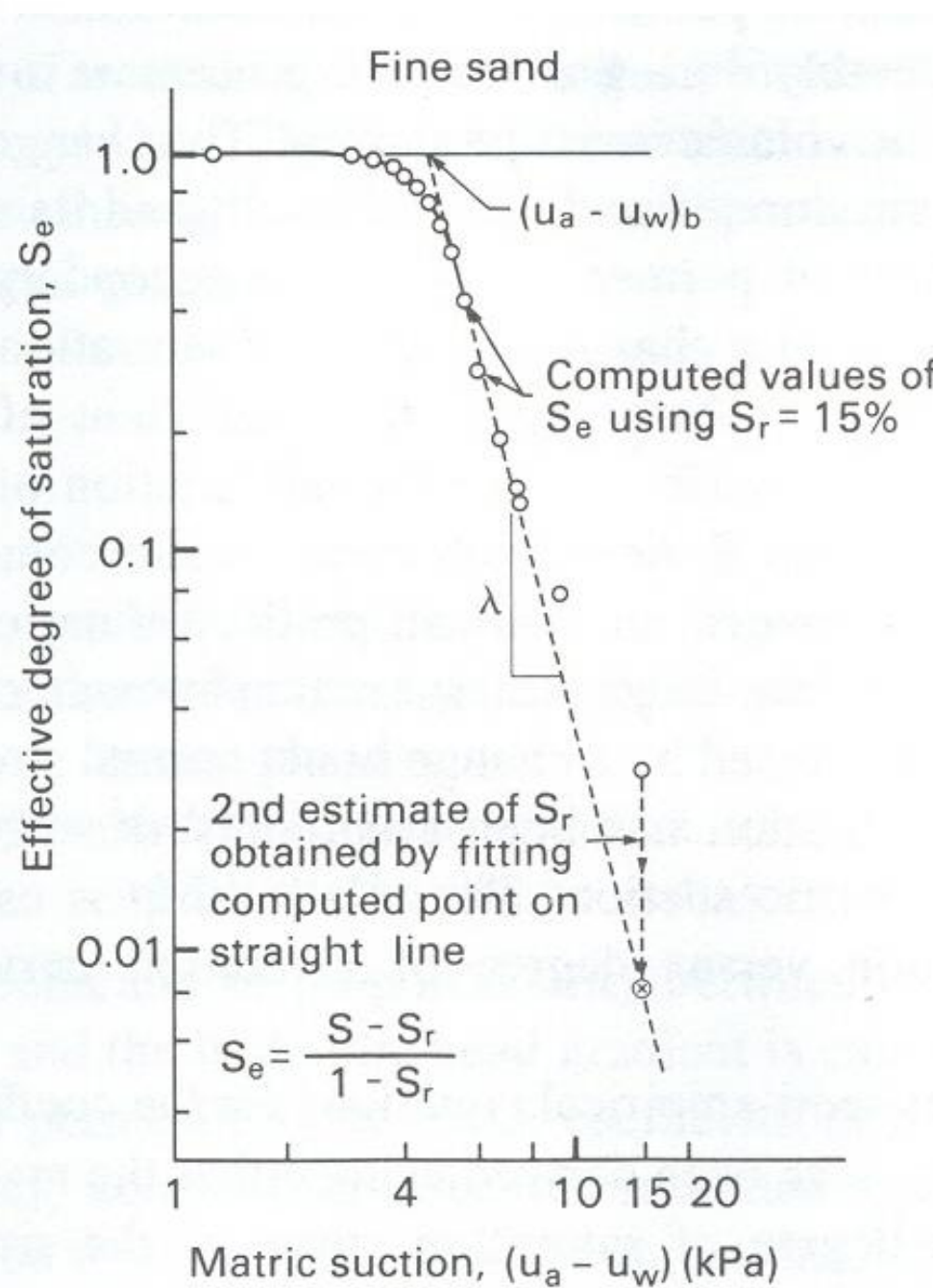
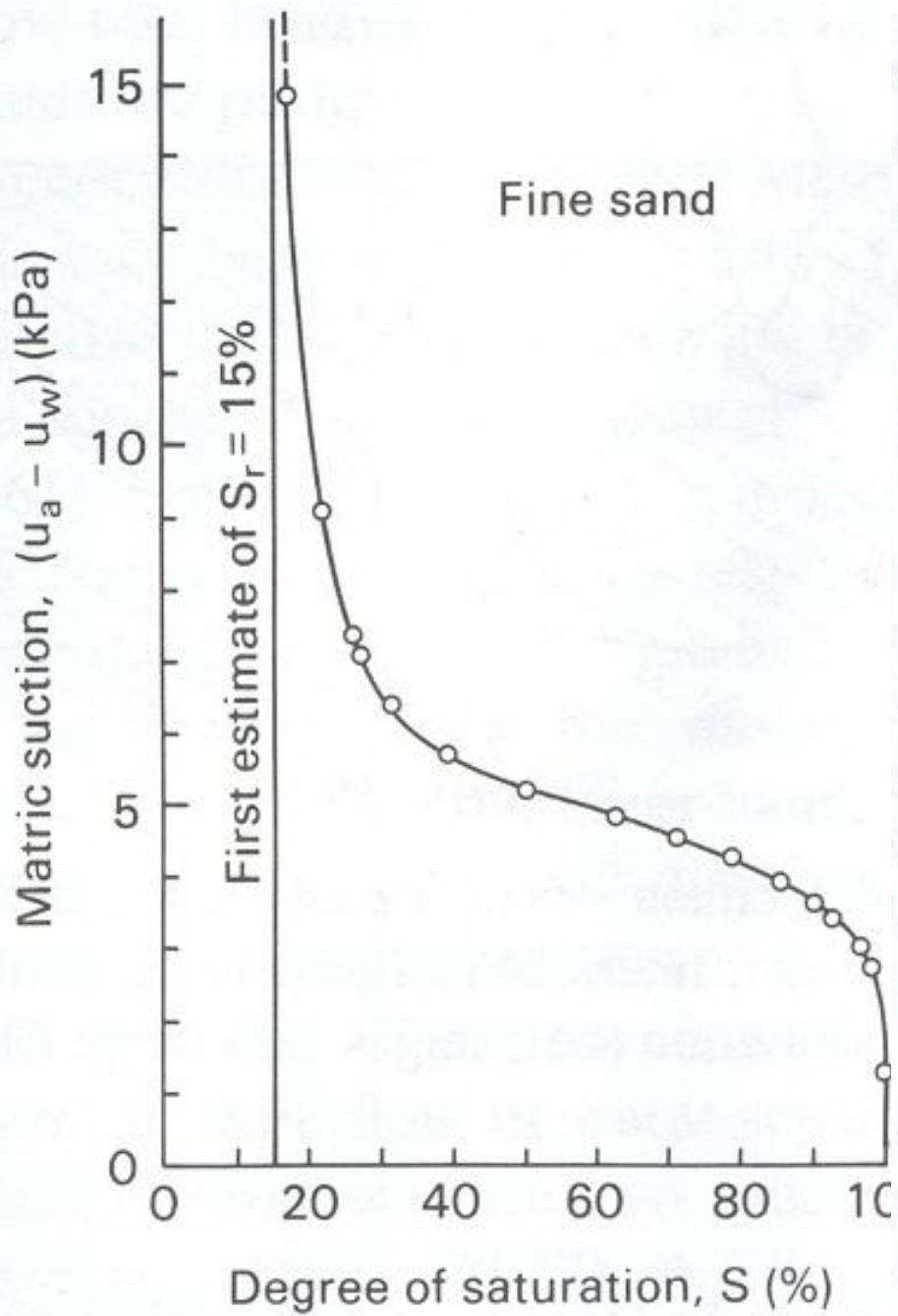
S = grau de saturação

S_r = grau de saturação residual

ψ_b = sucção no ponto de entrada de ar [$= (u_a - u_w)_b$]

λ = índice de distribuição de poros

ψ = sucção





Van Genuchten (1980)

$$\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left[\frac{1}{1 + (\alpha \cdot \Psi)^n} \right]^m$$

θ = teor de umidade volumétrico

θ_r = teor de umidade volumétrico residual

θ_s = teor de umidade volumétrico saturado

α = sucção no ponto de entrada de ar [$= (u_a - u_w)_b = \psi_b$]

n = inclinação da curva de retenção de água depois do ponto de entrada de ar



Fredlund & Xing (1994)

$$\theta = \theta_s \cdot \left\{ \frac{1}{\ln \left[e + \left(\frac{\mu_a - \mu_w}{a} \right)^n \right]} \right\}^m$$

a = sucção no ponto de entrada de ar [$= (u_a - u_w)_b = \psi_b = \alpha$]

$m = 3,67 \ln(\theta_s / \theta_i)$

$n = 1,31^{m+1} \times 3,728 \times S \times \psi_i / (m \times \theta_s)$

$S = \theta_i / (\psi_p - \psi_i)$

ψ_p = intercepto entre a linha tangente e o eixo de sucção matricial

ψ_i = abscissa do ponto de inflexão da curva de retenção de água

θ_i = ordenada do ponto de inflexão da curva de retenção de água

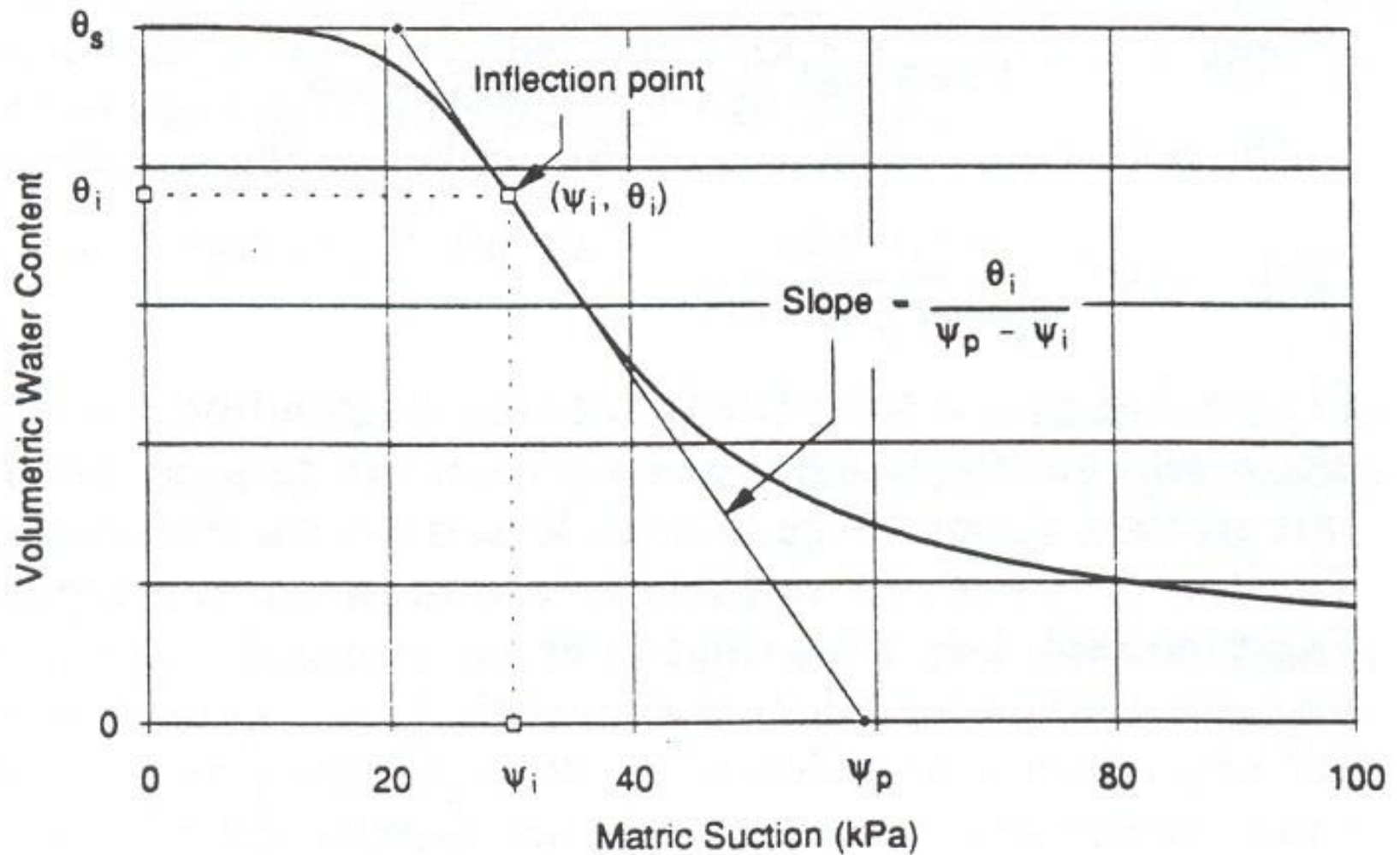


FIG. 8. A sample plot for the graphical solution of the three parameters (a , n , and m) in [31].

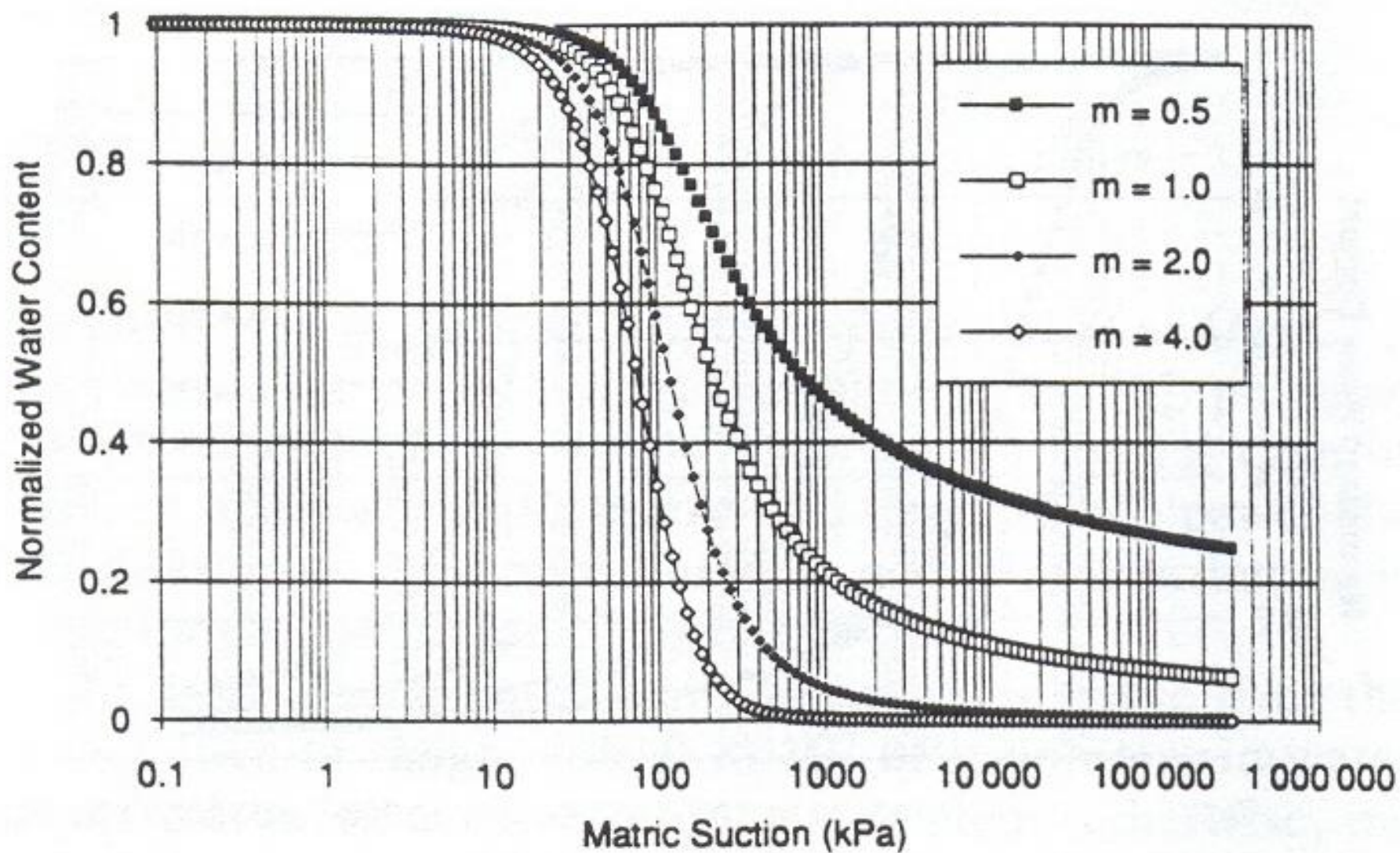


FIG. 7. Sample plots of [31] with $a = 100$ and $n = 2$ (m varies).

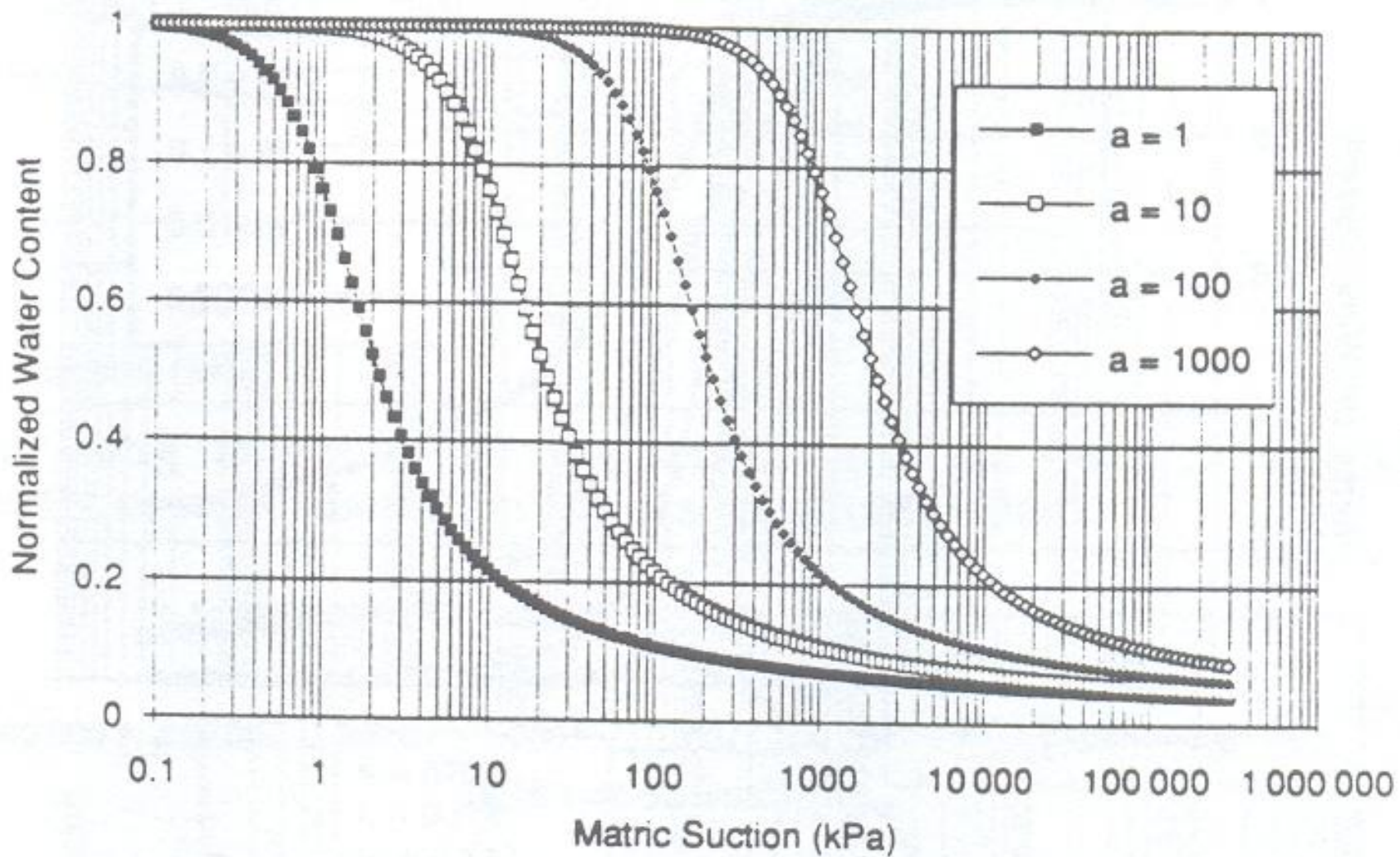


FIG. 5. Sample plots of [31] with $n = 2$ and $m = 1$ (a varies).

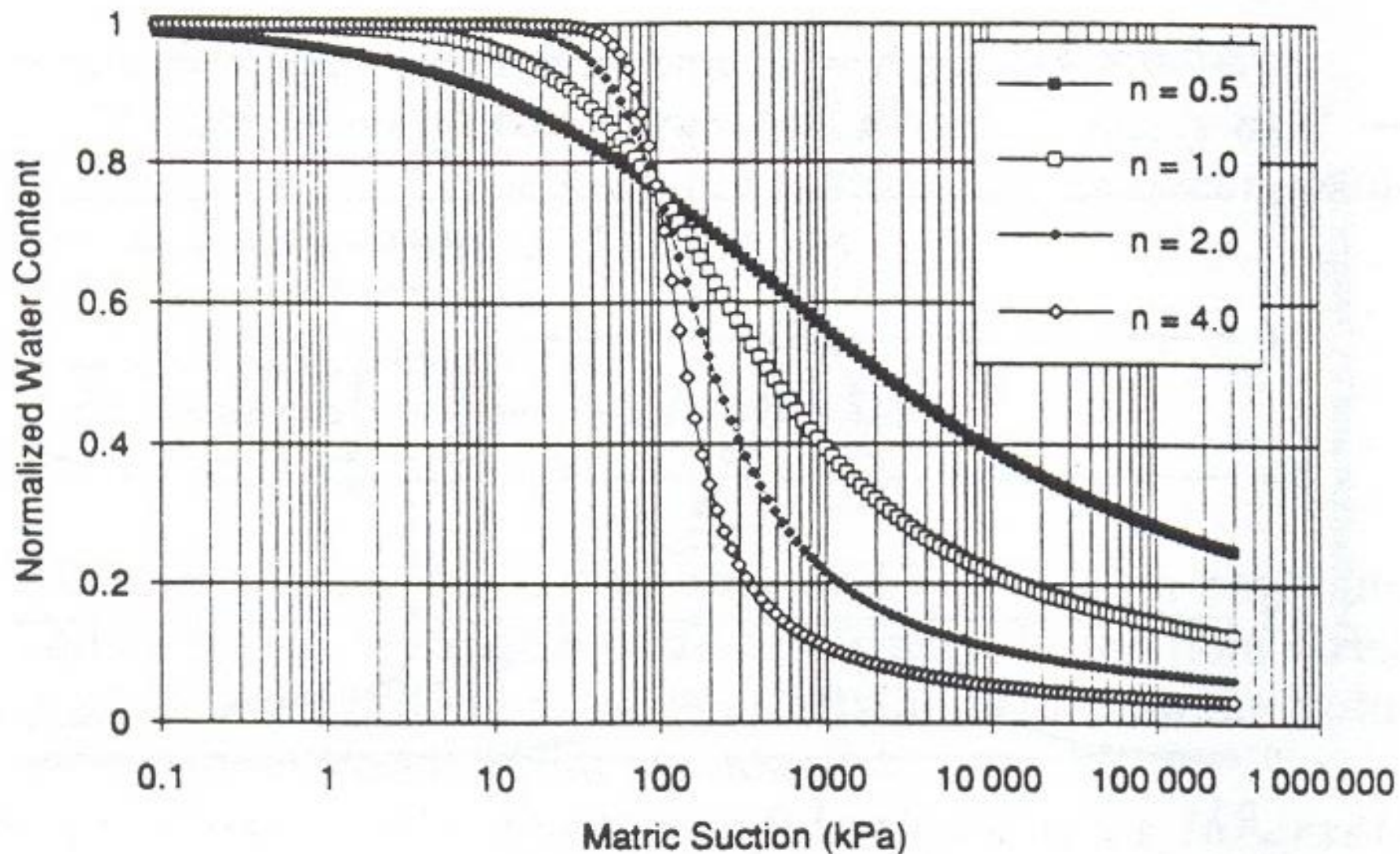


FIG. 6. Sample plots of [31] with $a = 100$ and $m = 1$ (n varies).

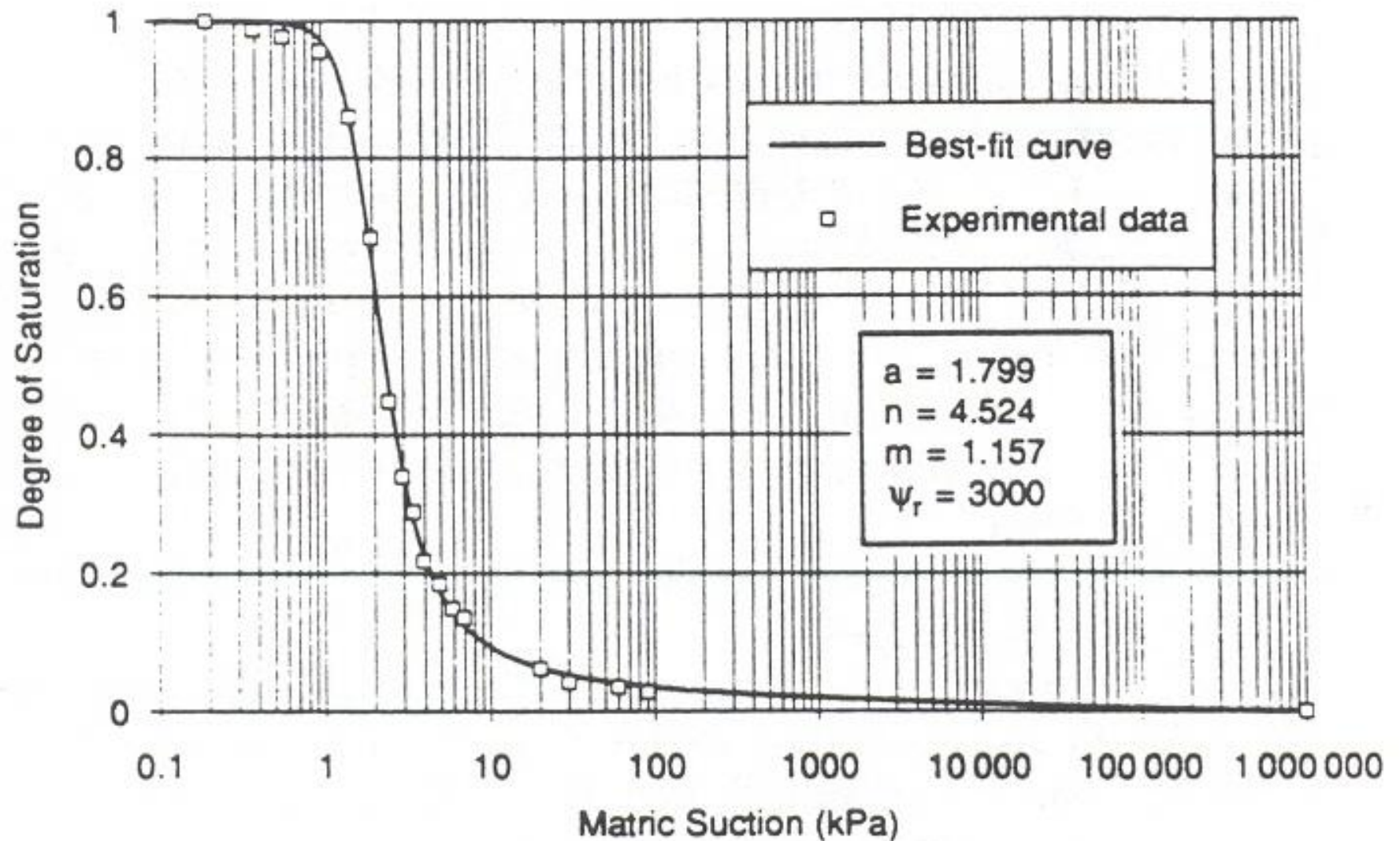


FIG. 19. A best-fit curve to the experimental data of a sand (Soil Laboratory data, University of Saskatchewan).

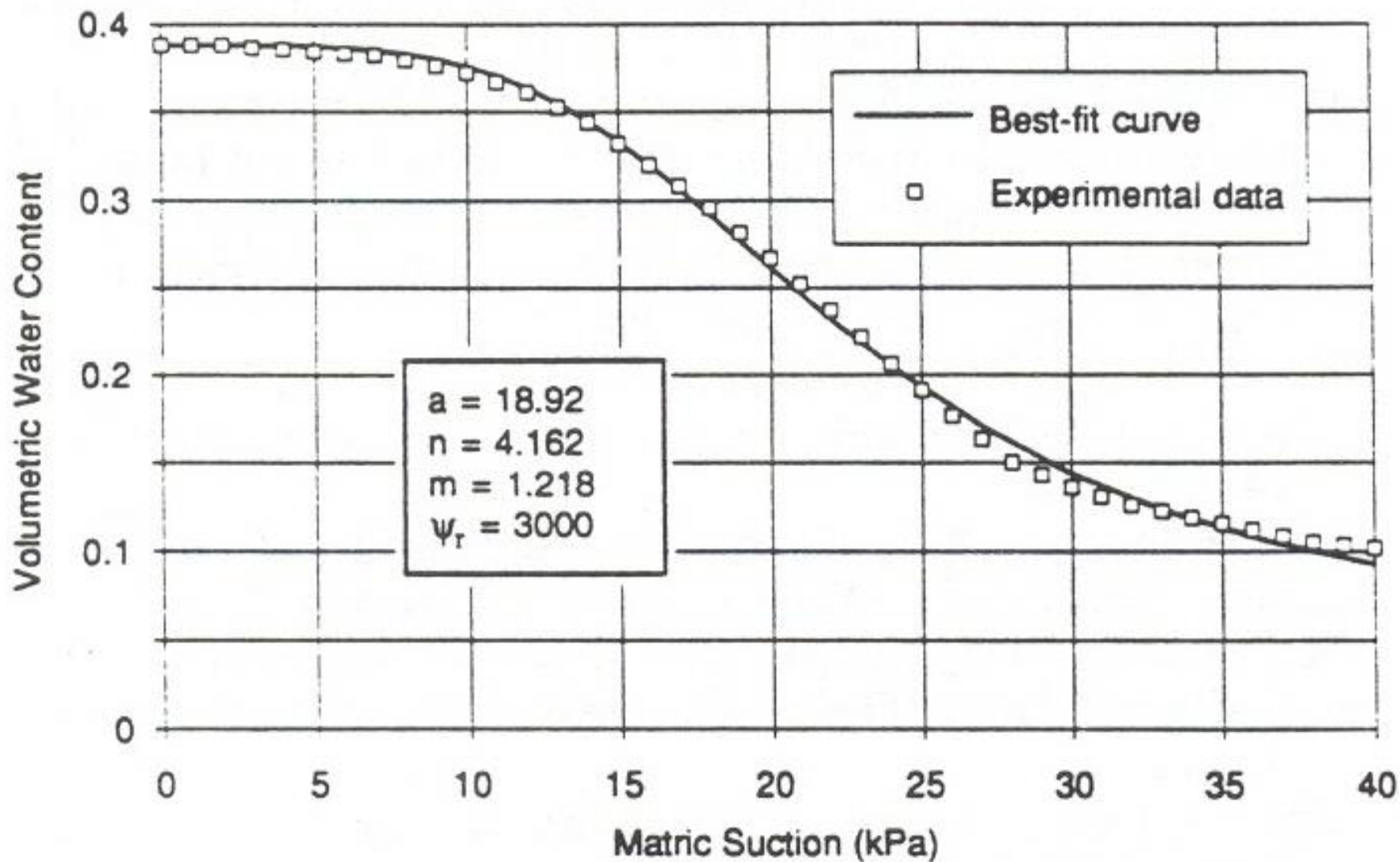


FIG. 20. A best-fit curve to the experimental data of a sand (University of Toronto data; University of Saskatchewan 1984).

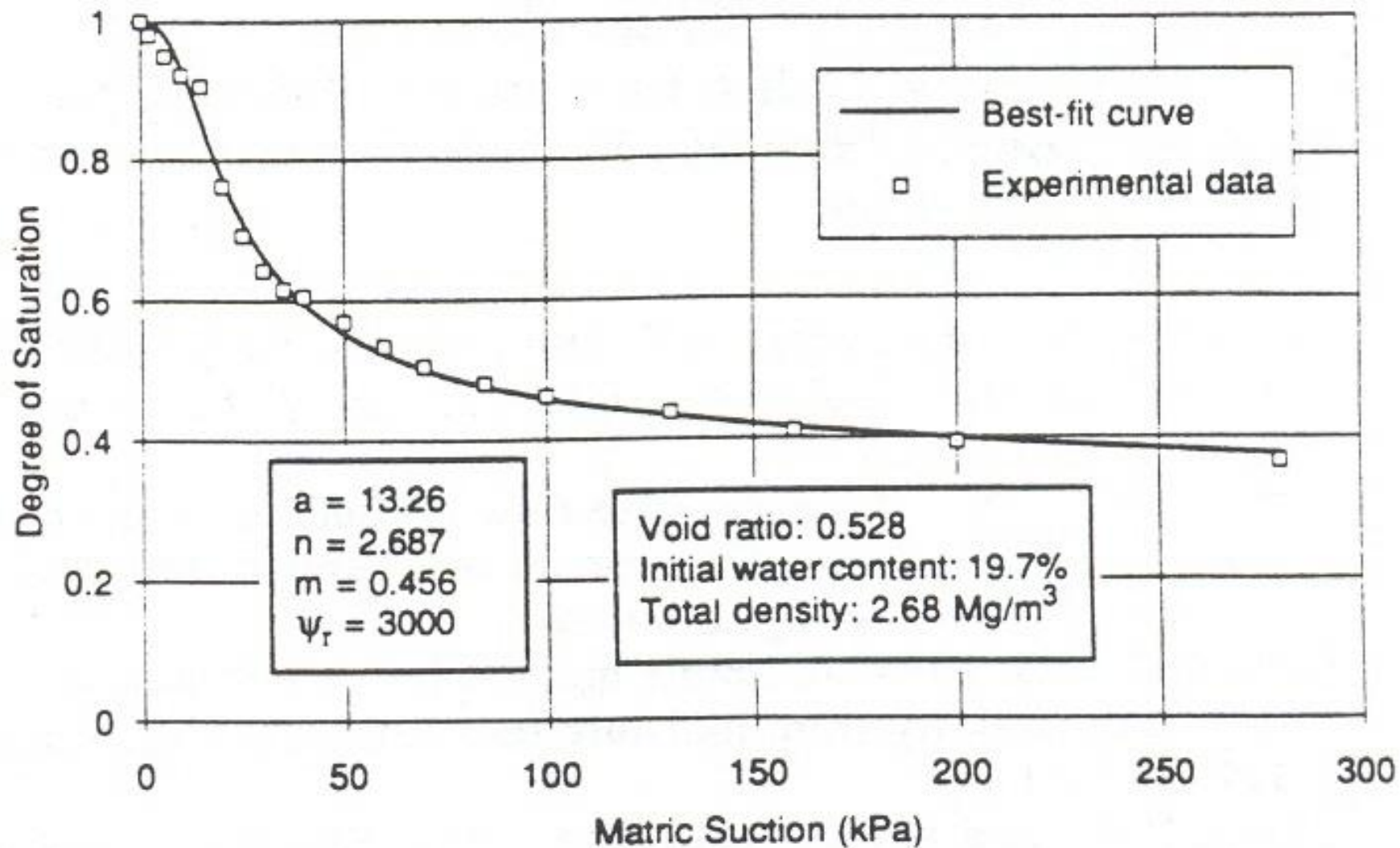


FIG. 21. A best-fit curve to the experimental data of a silt (S. Huang, personal communication, 1993).

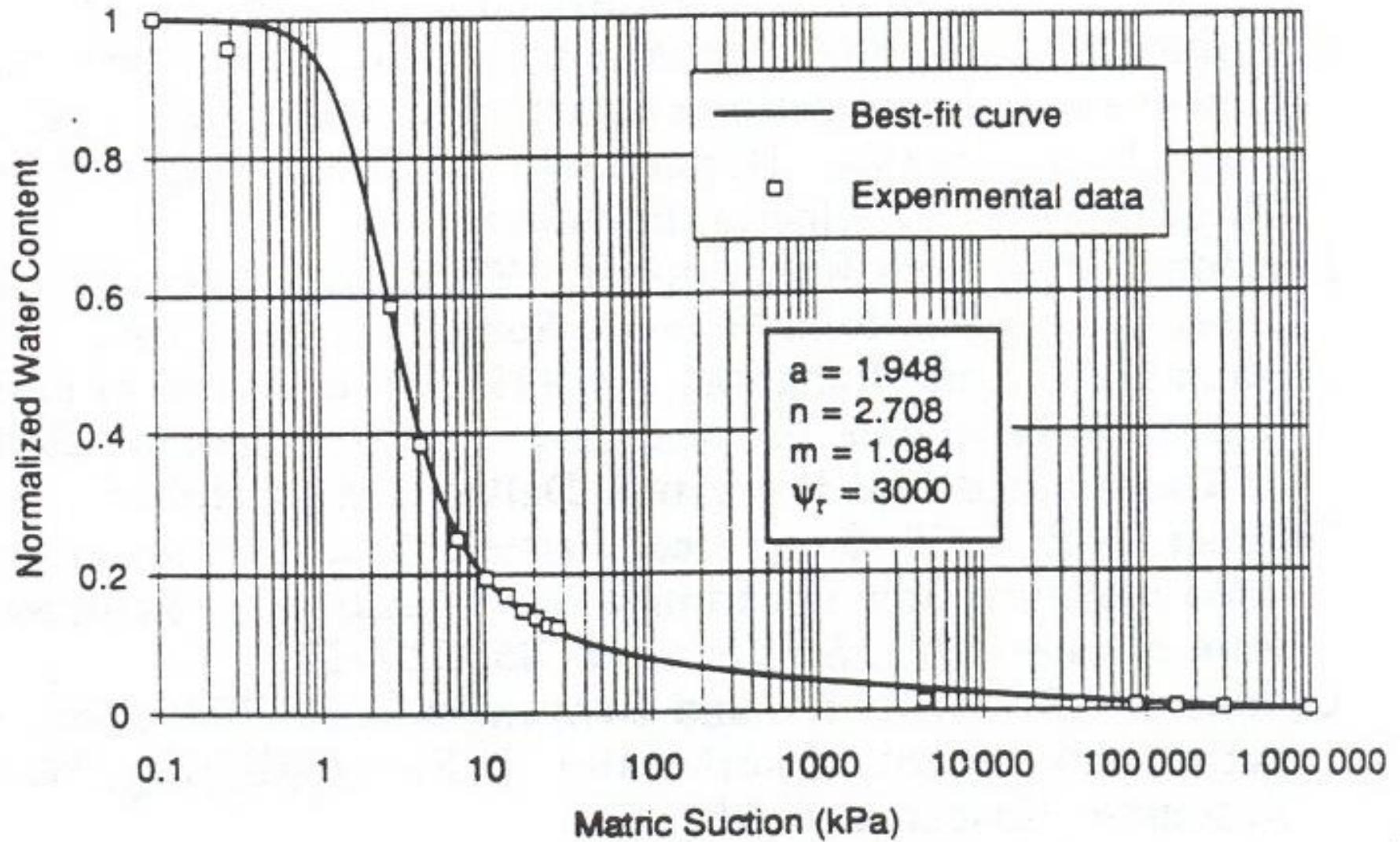


FIG. 22. A best-fit curve to the experimental data of a silt (Soil Laboratory data, University of Saskatchewan).

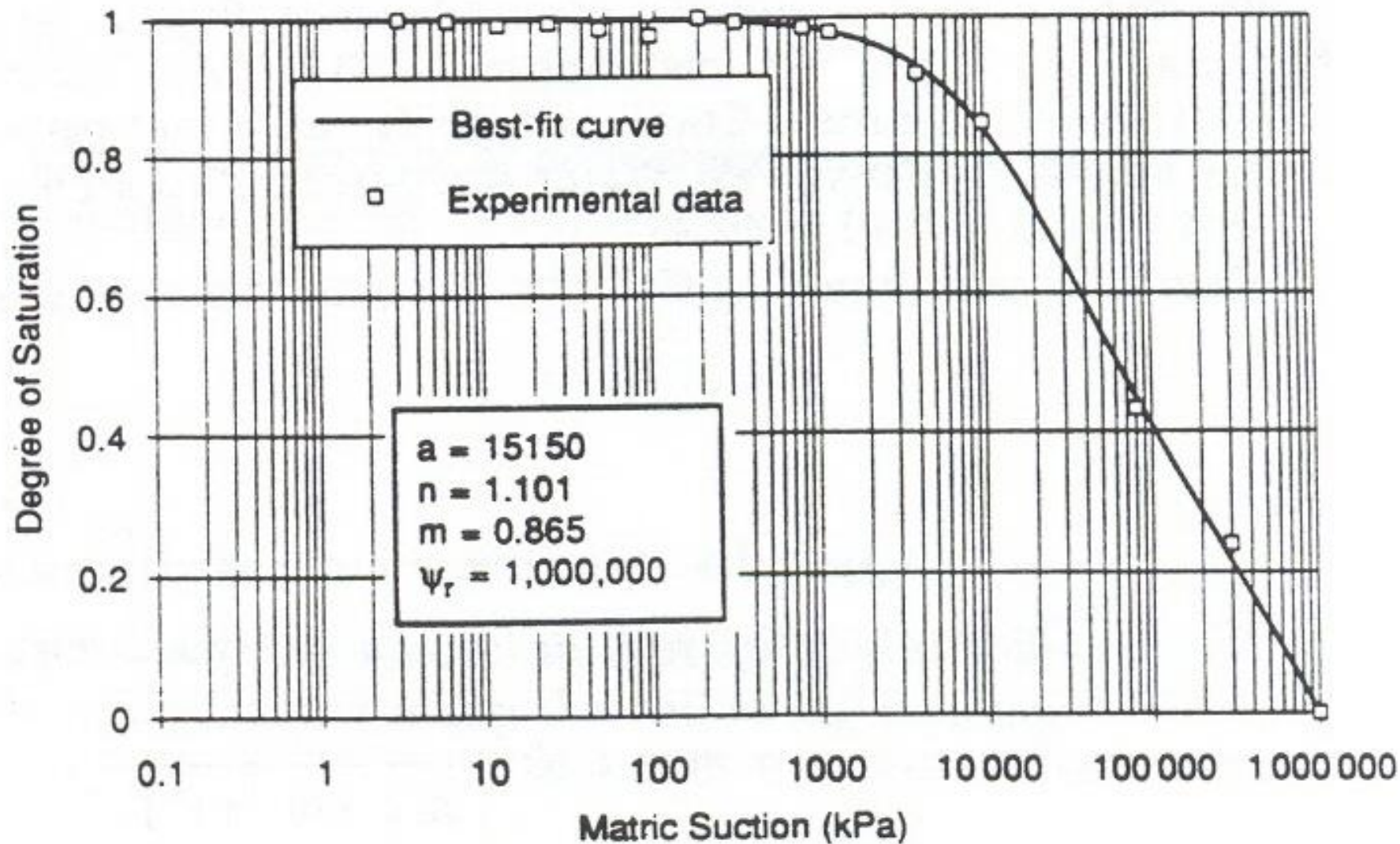


FIG. 23. A best-fit curve to the experimental data of an initially slurried Regina clay (data from Fredlund 1964).

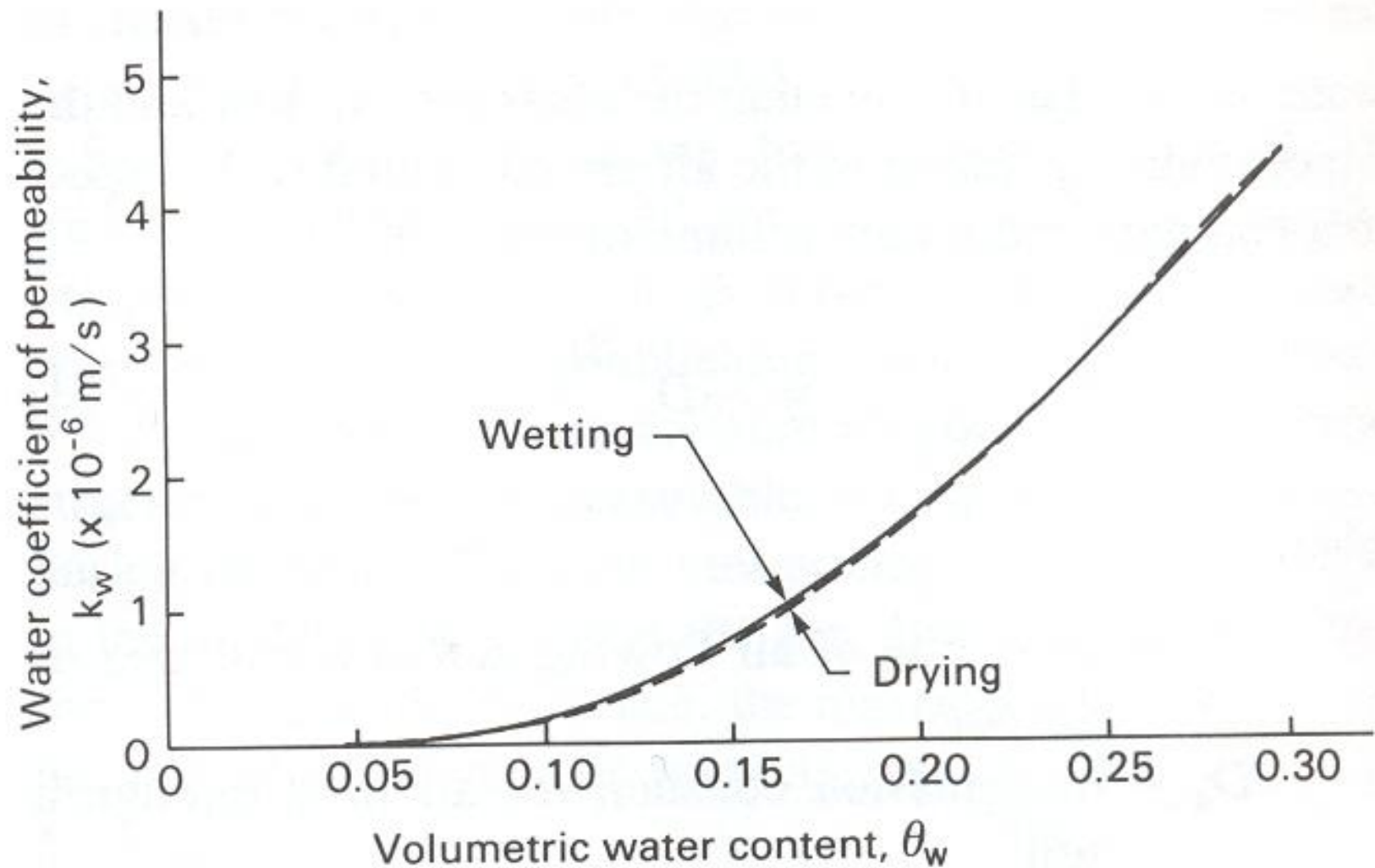


Figure 5.14 Essentially no hysteresis is shown in the relationship between water coefficient of permeability versus volumetric water content.

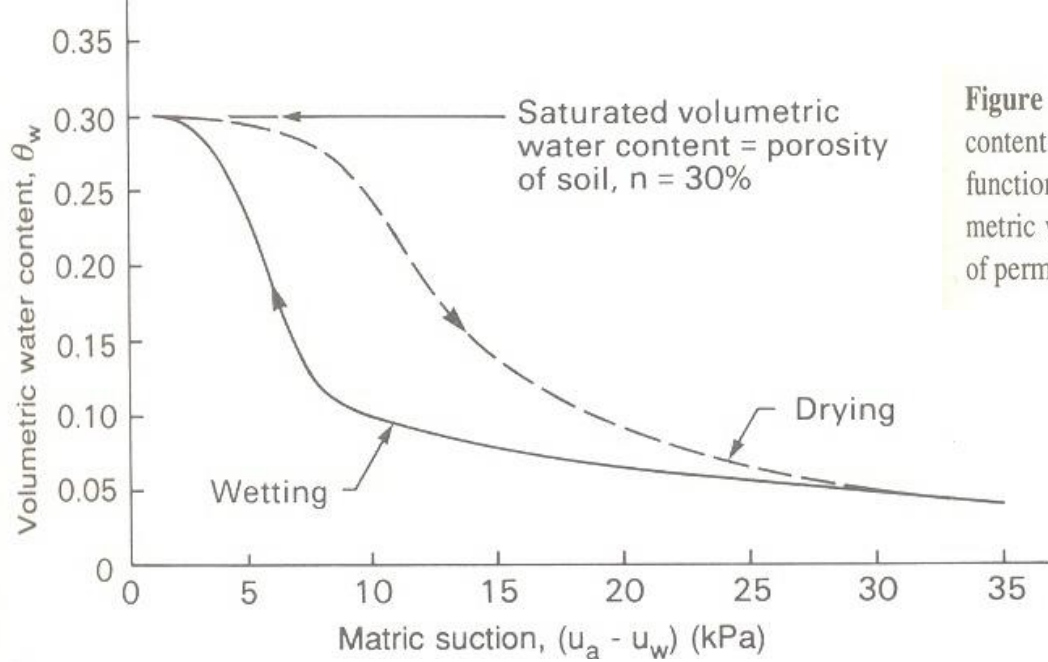
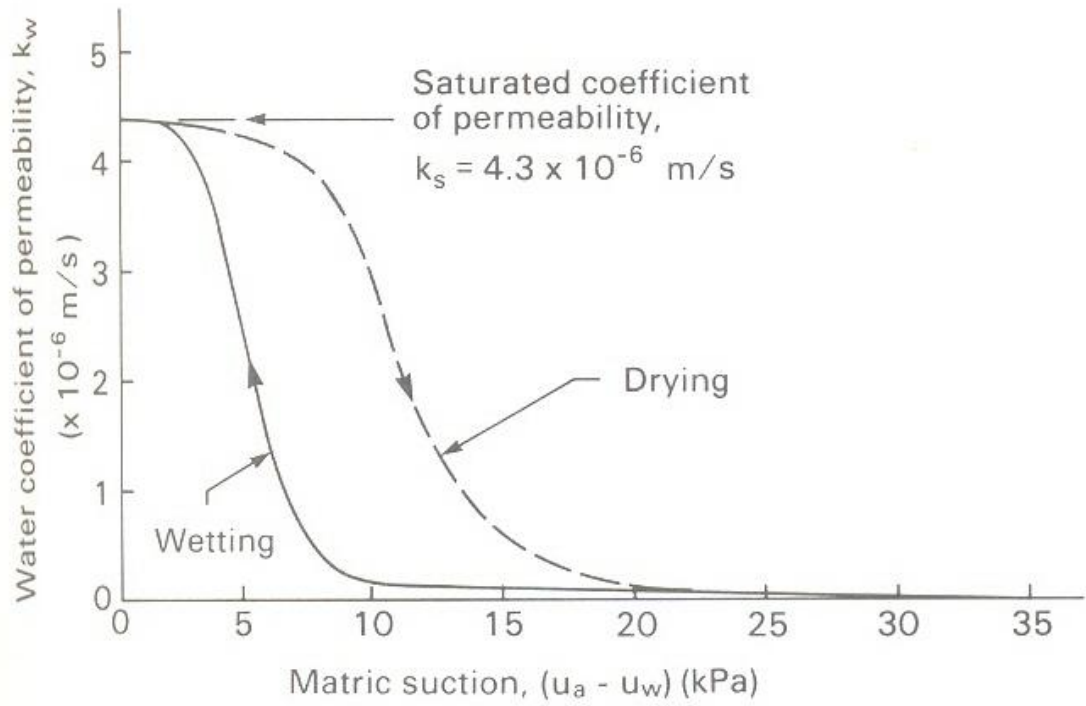


Figure 5.13 Similar hysteresis forms in the volumeric water content and water coefficient of permeability when plotted as a function of $(u_a - u_w)$ for a naturally deposited sand. (a) Volumetric water content versus matric solution; (b) water coefficient of permeability versus matric suction (from Liakopoulos, 1965a).



(b)



Referências

- Estudo da viabilidade técnica da utilização de cobertura monolíticas em aterros sanitários no Estado de São Paulo. José João de Oliveira Filho. Dissertação de mestrado, PEF, EPUSP, 2004.
- Fluxo unidirecional de gás através de de um solo compactado – Determinação laboratorial dos parâmetros. Scandar Gasperazzo Ignatius. Tese de doutorado, PEF, EPUSP, 1999.
- Soil Mechanics for Unsaturated Soils. D.G. Fredlund & H. Rahardjo. Editado por John Wiley & Sons, 1993.
- Dinâmica da água no solo. P.L. Libardi. Notas de aula, ESALQ-USP, Piracicaba, 1995.