

# Contribuição ao Estudo de Permeabilidade de um Maciço Não-Saturado

Lira, E.N.S. & Silva, A.L.A., FURNAS; Pereira, J.H.F., UnB (*in memoriam*).

**Resumo** - O conhecimento do comportamento de um solo não-saturado em relação à permeabilidade é de fundamental importância quando um maciço está sujeito a uma frente de saturação, seja esta por meio de precipitação pluviométrica, seja devido à elevação de níveis d'água, como é o caso de maciços de barragens. A frente de saturação avança inicialmente em um meio não-saturado do maciço. A velocidade de avanço depende de fatores diversos e neste trabalho buscou-se conhecer este comportamento, ainda pouco estudado para meios não-saturados, e sugerir práticas que possam fazer uso destas propriedades no projeto de empreendimentos de barragens mais econômicos e de menor impacto ambiental, uma vez que materiais antes descartados podem vir a serem utilizados reduzindo-se os desmatamentos na busca de materiais mais nobres.

**Palavras-Chaves:** Barragem, Não-Saturado, Permeabilidade, Solo, Sucção.

## I. INTRODUÇÃO

Geralmente os solos encontrados em aterros e encostas encontram-se com baixo grau de saturação, que é constantemente alterado durante os períodos chuvosos. A ruptura ocorre pela infiltração da água em meio não saturado, podendo ocorrer a formação de uma frente de saturação ou umedecimento e posteriormente a redução da sucção mátrica [1]. Esta situação pode representar perfeitamente o que ocorre em um maciço de barragem não apenas por efeito de precipitação pluviométrica, mas também devido o nível d'água no reservatório, por exemplo, de uma barragem de terra para geração de energia elétrica.

O conhecimento de como se comporta a permeabilidade no maciço de interesse cobre desde a situação de saturação completa a situações de percolação sob baixos níveis de saturação (condição não-saturada). Diversos métodos são utilizados na determinação da permeabilidade saturada / não-saturada. Dentre eles pode-se destacar: cava, ensaios pontuais, ensaios de perfil instantâneo, infiltrômetro, etc. Estes ensaios podem ser realizados em regime permanente ou transiente.

---

E. N. S. Lira & A. L. A. Silva trabalham no Departamento de Apoio e Controle Técnico de FURNAS Centrais Elétricas S.A. ([enslira@furnas.com.br](mailto:enslira@furnas.com.br) & [andsilva@furnas.com.br](mailto:andsilva@furnas.com.br))

## II. DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA

### A. Maciço de interesse à pesquisa

O maciço escolhido para a pesquisa está localizado no município de Aparecida de Goiânia (GO) e situa-se sobre rochas pertencentes ao Grupo Proterozóico Médio Araxá, ou seja, rochas metamórficas Araxá, que em algumas áreas apresentam na base dos metamorfitos um pacote de rochas guinássicas bandadas que em direção ao topo passam gradualmente para xistos feldspáticos e micaxistos.

No local escolhido para realização dos ensaios até uma profundidade de cerca de 1,50 m se tem um solo residual maduro com fragmentos de quartzo de tamanhos variados, a partir da qual se inicia a transição para um solo residual jovem com a presença de quartzo e mica-xisto. O solo residual maduro se estende a até pelo menos 7,70 m, profundidade máxima perfurada, por se atingir o lençol freático no local.

### B. Metodologia adotada de ensaio

Para pesquisar o comportamento de permeabilidade do maciço optou-se por utilizar o permeâmetro de Guelph, equipamento de fácil utilização, que permite a realização rápida de ensaios, permitindo a realização de diversos ensaios em uma mesma região de interesse, e que admite as seguintes hipóteses: fluxo em regime permanente, meio poroso homogêneo, isotrópico e rígido e um domínio de fluxo em um semi-espaço infinito.

A condutividade hidráulica é a medição da capacidade do solo de conduzir água abaixo da unidade de gradiente de potencial hidráulico. O permeâmetro de Guelph permite basicamente a determinação *in situ* da condutividade hidráulica saturada / não-saturada, do potencial matricial de fluxo e da sorvidade do solo.

## III. TEORIAS DE INTERPRETAÇÃO DE RESULTADOS DE ENSAIOS DE PERMEABILIDADE TIPO GUELPH

### A. Método de Richards

Considera o efeito da capilaridade na zona de saturação dentro de um furo no qual é mantida a carga constante. Aplica-se o método dos mínimos quadrados.

$$K_{fs} = \frac{C \cdot Q - 2\pi \cdot H \phi m}{2\pi \cdot H^2 \left[ 1 + \left( \frac{C}{2} \right) \cdot \left( \frac{1}{H} \right)^2 \right]} \quad (1)$$

$$\phi m = \int_{\psi_i}^0 K(\psi) d\psi \quad (2)$$

onde:

C - constante que depende do tipo de solo, micro-estrutura e macroporos  
Q - Vazão  
H - Altura de carga hidráulica  
 $\psi$  - Carga de pressão  
 $\phi m$  - Potencial mátrico  
Kfs - Condutividade hidráulica não-saturada de campo

A referência [1], citando outros pesquisadores ([2],[3]), adverte que podem ocorrer valores negativos, que podem ser explicados por possíveis erros experimentais que afetam a vazão, mas não afetam o fluxo permanente.

#### B. Philip

$$\phi m = \frac{1}{\alpha} (Kfs - Ki) \quad (3) \text{ e } (4)$$

$$Ki = K(\psi_i) = Kfs \cdot e^{\alpha \cdot \psi_i}$$

onde o parâmetro  $\alpha$  é definido como:

$$\alpha = \frac{Kfs}{\phi m} \quad (5)$$

#### C. Método de Elrick et al.

Para uma altura de carga hidráulica H constante (regime permanente):

$$Kfs = \frac{C \cdot Q}{\left(2\pi \cdot H^2 + C\pi \cdot a^2 + \frac{2\pi H}{\alpha}\right)} \quad (6)$$

$$\phi m = \frac{C \cdot Q}{\left[(2\pi \cdot H^2 + C\pi \cdot a^2) \cdot \alpha + 2\pi H\right]} \quad (7)$$

onde a é área do furo.

#### D. Interpretação de Laplace e Gardner

$$Kfs = \frac{C \cdot Q}{(2\pi \cdot H^2 + C\pi \cdot a^2)} \quad (8)$$

$$\phi m = \frac{C \cdot Q}{2\pi \cdot H} \quad (9)$$

#### E. Interpretação de Elrick et al.

$$Kfs = \frac{C \cdot Q}{(2\pi \cdot H^2 + C\pi \cdot a^2 + \alpha^*)} \quad (10)$$

onde  $\alpha^* = 0,12 \text{ cm}^{-1}$  para solos estruturados

$$\phi m = \frac{C \cdot Q}{\left[(2\pi \cdot H^2 + C\pi \cdot a^2) \cdot \alpha^* + 2\pi H\right]} \quad (11)$$

$$\alpha^* = \frac{Kfs}{\phi m} = \frac{\alpha}{\left[1 - \left(\frac{Ki}{Kfs}\right)\right]} \quad (12)$$

Sorvidade:

$$S = \sqrt{2(\Delta\theta)\phi m} \quad (13)$$

$$\Delta\theta = \theta fs - \theta i \quad (14)$$

onde:

$\theta i$  = volume inicial de água  
 $\theta fs$  = conteúdo de água (saturado)

Parâmetro  $\alpha$ :

$$\alpha = \frac{Kfs}{\phi m} \quad (15)$$

Os valores de  $\alpha$  inferido por avaliação visual no método de uma altura de carga, embora apresente diferenças com o  $\alpha$  medido no campo não influi significativamente nos resultados de Kfs e  $\phi m$ .

Verificou-se que um maior valor de  $\alpha$  induz valores de condutividade menores para um mesmo valor de sucção, pois a inclinação da função exponencial depende deste parâmetro. Um maior valor de  $\alpha$  implica em maior porosidade. Assim os efeitos matriciais são menos atuantes devido a uma maior facilidade de percolação da água no meio poroso, o que implica numa grande diminuição da condutividade com pequenas mudanças de sucção.

A função de condutividade é definida pela equação (16).

$$K\psi = Kfs(e^{\alpha\psi}) \quad (16)$$

onde  $\alpha$  é definido conforme a Tabela I.

Tabela I – Valores de  $\alpha$

$\alpha \text{ (cm}^{-1}\text{)}$	Tipo de solo
0,01	Argilas compactas (aterros, liners, sedimentos lacustres e marinhos)
0,04	Solos de textura fina, principalmente sem macroporos e fissuras

0,12	Argila até areias finas com alta e moderada quantidade de macroporos e fissuras
0,36	Areia grossa inclui solos com macroporos e fissuras

Verificou-se que os métodos apresentam Kfs na mesma ordem de grandeza.

A referência [1] cita a redução da condutividade e  $\alpha$  com o aumento da porcentagem de argila, assim como com a distribuição da umidade com a profundidade.

#### IV. MÉTODOS DE LABORATÓRIO

A referência [1] apresenta métodos alternativos para a determinação da condutividade hidráulica não-saturada em laboratório.

##### A. Propostas de Van genuchten

$$K(\theta) = K \left[ \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right]^{1/2} \left\{ 1 - \left[ 1 - \left( \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^{1/m} \right]^m \right\}^2$$

Equação (17)

onde:

K - Condutividade hidráulica para o solo saturado, determinada em laboratório

$\theta_r$  - Umidade volumétrica residual

$\theta_s$  - Umidade volumétrica de saturação

$\alpha$  e n - parâmetro de ajuste

$$\theta = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{(1 + (\alpha v \cdot \Psi)^n)^m} \quad (18)$$

$$m = 1 - \frac{1}{n} \quad (19)$$

onde  $\alpha_v$  e n são parâmetros de ajustes.

Para solos com distribuição do tamanho dos poros bastante estreita verifica-se uma curva de retenção íngreme, com valores elevados de n.

##### B. Propostas de Gardner

$$\alpha = \left[ \int_0^\Psi \Theta^{1-5} \left[ 1 - (1 - \Theta^{1/m})^m \right]^2 d\Psi \right]^{-1} \quad (20)$$

$$\Theta = \frac{(\theta - \theta_r)}{(\theta_s - \theta_r)} \quad (21)$$

#### V. APRESENTAÇÃO DE RESULTADOS

As Figuras 1, 2, 3, 4 e 5 apresentam as curvas características obtidas em laboratório, e que mostram, em

função das diferentes das curvas, que o maciço de interesse possui forte heterogeneidade na distribuição de poros, fato b

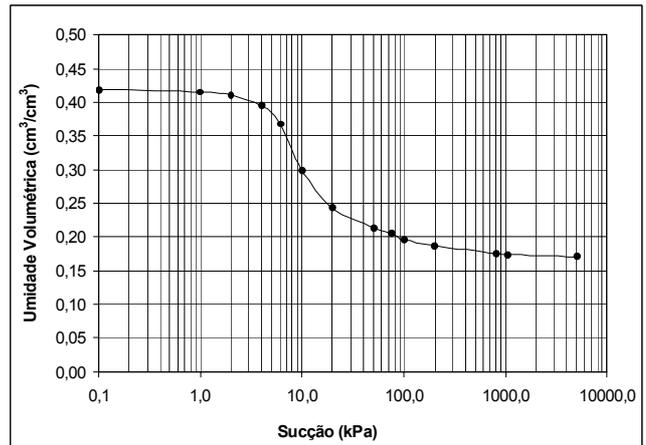


Figura 1 – Curva característica / Amostra 01

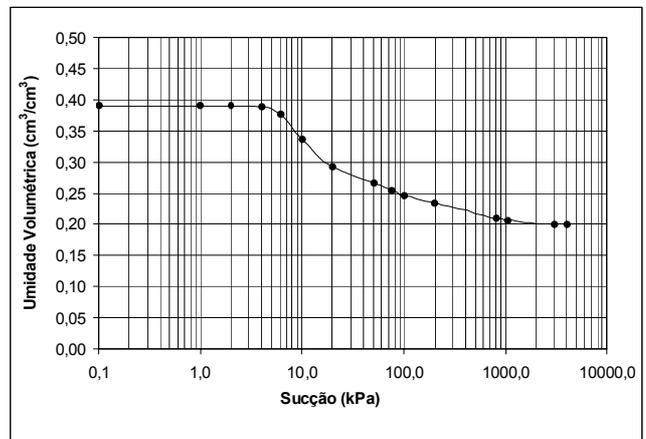


Figura 2 – Curva característica / Amostra 02

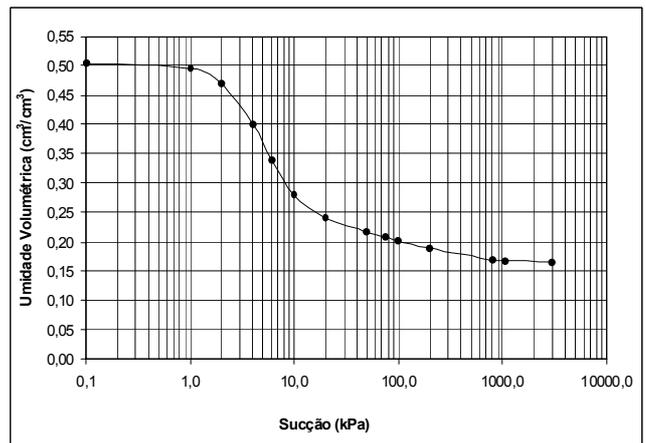


Figura 3 – Curva característica / Amostra 03

## VI. CONSIDERAÇÕES

O valor de  $\alpha$  adotado para determinação de permeabilidade pelo método de Gardner, em função dos parâmetros apresentados na Tabela I, foi de 0,25.

As diferentes formas das curvas características obtidas para o maciço de interesse mostram que o perfil é de um material poroso com distribuição errática de poros, o que dificulta a análise dos resultados obtidos. Em maciços compactados, como é o caso de barragens para obras de geração de energia, existe no maciço uma melhor uniformidade na distribuição de poros ficando o comportamento de sucção mais previsível e, portanto, permitindo previsões de comportamento mais realistas e que podem ser utilizados na análise de fluxo.

Os resultados de permeabilidade alcançados mostram que a porosidade encontrada no maciço levou a dispersões elevadas, principalmente para baixos valores de sucção. No entanto, os resultados mostram ser possível a utilização destes resultados em uma análise de comportamento não-saturado do maciço, utilizando-se softwares de análise numérica que permitem acompanhar a frente de saturação no interior do maciço, permitindo, em associação com os demais ensaios de interesse (ensaios de resistência e deformabilidade), uma criteriosa análise de comportamento.

## VII. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] B. D. M. Moreira, E. A. Vargas Jr., T. M. P. Campos e F. S. Antunes, "Estudo de um método para a determinação da condutividade hidráulica saturada – não-saturada de um solo de encosta no Rio de Janeiro," 1997, Anais do 3º Simpósio Brasileiro de Solos Não-Saturados, Volume 2, pp. 581 – 592.
- [2] J. R. Philip, "Approximate analysis of the borehole permeameter in unsaturated soil," WaterResources Research, 21, pp. 1025 – 1033, 1985.
- [3] A. P. Salverda and J. H. Dane, "A examination of the Guelph permeameter for measuring the soil's hydraulic properties," Gooderma, 57, pp. 405 – 421, 1993.
- [4] M. A. Soto e O. M. Vilar, "Estudo da função condutividade hidráulica de alguns solos através do permeâmetro de Guelph," 2002, XII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Volume 1, pp. 347 – 358.

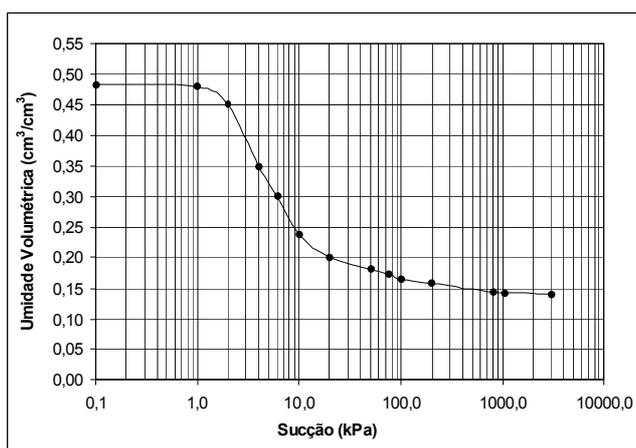


Figura 4 – Curva característica / Amostra 04

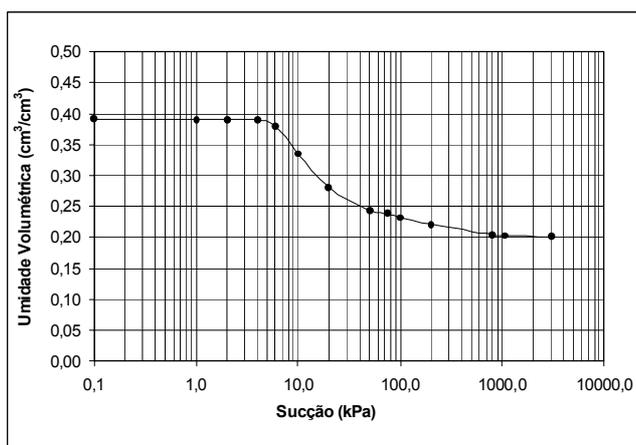


Figura 5 – Curva característica / Amostra 05

Foram realizados três ensaios de permeabilidade utilizando-se o permeâmetro tipo Guelph. Em função da porosidade elevada e da distribuição de poros dentro do maciço ocorreram dificuldades de interpretação dos resultados, inerentes à metodologia de ensaio. Alguns métodos de análise de resultados desse tipo de ensaio foram utilizados tendo o método de Gardner se mostrando mais adequado.

A Figura 6 apresenta os resultados dos ensaios de permeabilidade tipo Guelph, em que se fez uso do método de Gardner.

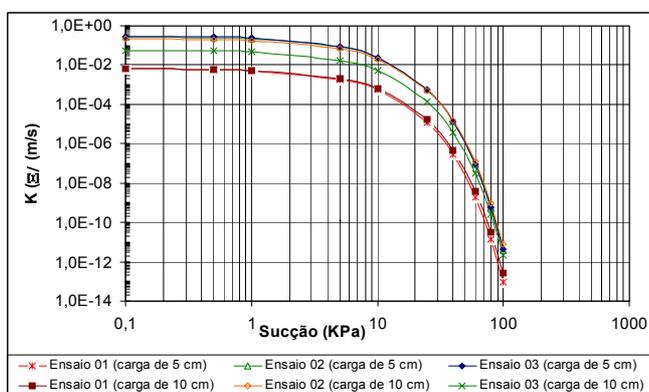


Figura 6 – Resultados dos ensaios de permeabilidade tipo Guelph analisados pelo método de Gardner