



**Escola Politécnica da Universidade de São Paulo  
Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo**

## **“PERMEABILIDADE DAS ROCHAS”**

**PMI 1673 - Mecânica de Fluidos Aplicada a Reservatórios**

**Prof. Eduardo César Sansone**



## **FLUXO EM MEIOS POROSOS**



## **ESCOAMENTO COM SUPERFÍCIE LIVRE**

- **Escoamento de um fluido em contato com a atmosfera.**
- **Problemas estudados pela Hidráulica.**

## **ESCOAMENTO EM PRESSÃO**

- **Escoamento de um fluido em um tubo fechado, preenchendo completamente a sua secção.**
- **Problemas estudados pela Mecânica dos Fluidos tradicional.**



## **ESCOAMENTO EM MEIO POROSO**

- **Quando um fluido escoar através dos poros de um material, este escoamento apresenta características diferentes dos dois tipos anteriores, pois forças de outras naturezas são mobilizadas.**
- **Atuam especialmente as forças de superfície em razão da maior área de contato entre o fluido e as paredes dos poros do material (grande área específica).**
- **Os problemas típicos estão relacionados à percolação de rochas, solos e filtros por fluidos de diversas naturezas.**



## **ESTUDO DO ESCOAMENTO EM MEIOS POROSOS EM RELAÇÃO AO TEMPO**

- Se as características do escoamento em cada ponto são independentes do tempo, tem-se um Regime Permanente.
- Se as características do escoamento variam ao longo do tempo, tem-se um Regime Variável, Transitório, ou Transiente.



## **PERMEABILIDADE DAS ROCHAS**





## **DEFINIÇÃO**

**Permeabilidade é uma propriedade que caracteriza a capacidade de um meio poroso de permitir a passagem de fluidos, é a medida da condutividade de fluidos de um material em particular.**

## **CLASSIFICAÇÃO DA PERMEABILIDADE DAS ROCHAS**

- **Permeabilidade Primária**: originada no período de deposição da camada sedimentar.
- **Permeabilidade Secundária**: resulta da alteração da matriz rochosa por compactação e cimentação (redução da permeabilidade) e por fraturamento e dissolução (aumento da permeabilidade).



## **LEI DE DARCY**



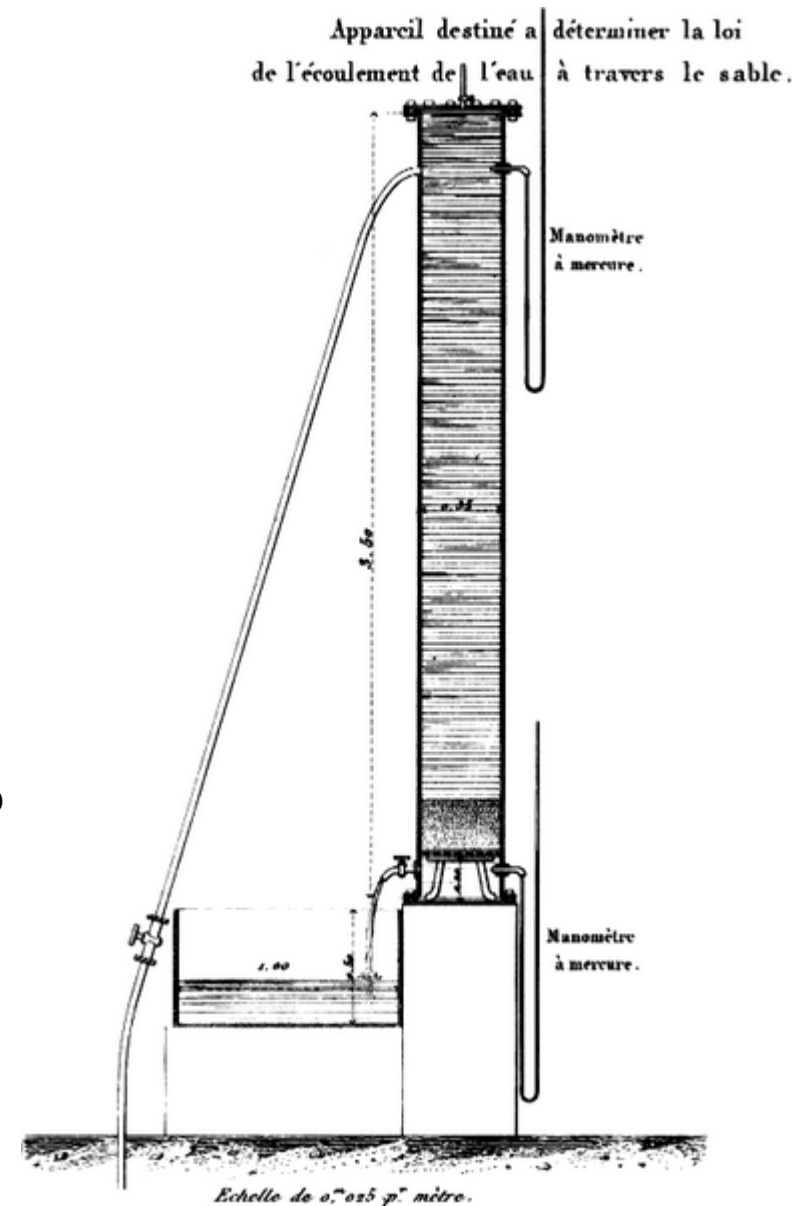


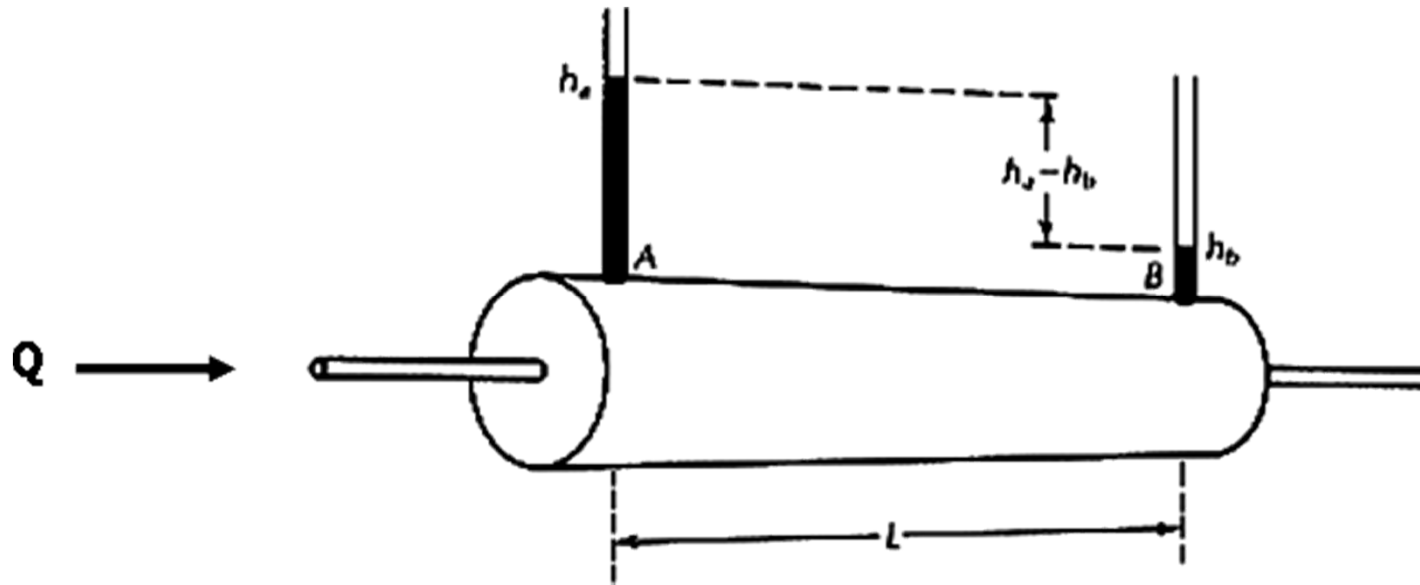
# LEI DE DARCY



**A partir de 1856 o francês Henry Darcy estudou o fluxo de fluidos através de filtros de areia utilizados no sistema de tratamento de água da cidade de Paris.**

**Ele descobriu que a vazão era proporcional à diferença de pressão ao longo do fluxo, à área da seção do conduto e a uma constante K característica do meio poroso e do fluido, além de inversamente proporcional ao comprimento do conduto.**





$v \propto \Delta h$  (diferença de pressão)

$v \propto d^2$  (conduto – rocha porosa)

$v \propto K$  (fluido e meio poroso)

$v \propto \frac{1}{L}$  (comprimento do conduto)



## **APLICAÇÕES DA LEI DE DARCY**

- **Fluxo em filtros.**
- **Fluxo em rochas ou solos (meios granulares).**
- **Fluxo em reservatórios de petróleo.**
- **Fluxo em aquíferos.**
- **Fluxo saturado ou insaturado.**
- **Fluxo em sistemas homogêneos ou heterogêneos.**
- **Fluxo em meios isotrópicos ou anisotrópicos.**
- **Fluxo em regime transiente ou permanente.**



O fluido no meio poroso ocorre à “Velocidade de Darcy”, que é dada por:

$$v = \frac{q}{A} = K i$$

Com:

$$i = \frac{\Delta h}{L} \quad \text{e} \quad K = \frac{k \rho g}{\nu} \quad \text{assim:} \quad v = \frac{q}{A} = -\frac{k}{\mu} \left( \frac{dp}{ds} \right)$$

Onde:

**q = vazão**

**A = área da seção de escoamento**

**K = condutividade hidráulica**

**i = gradiente hidráulico**

**$\Delta h$  ou  $\Delta p$  = diferença de pressão**

**k = coeficiente de permeabilidade**

**$\rho$  = densidade do fluido**

**g = aceleração da gravidade**

**$\nu$  = viscosidade cinemática do fluido**

**$\mu$  = viscosidade dinâmica do fluido**

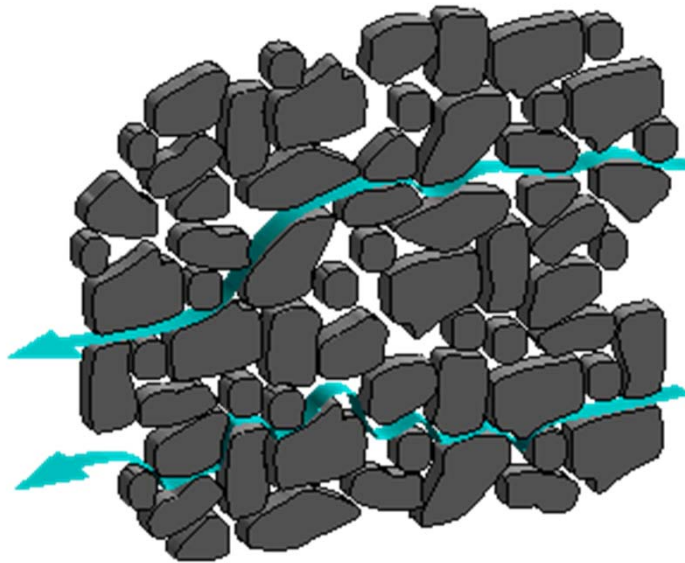


**A velocidade de Darcy é um conceito macroscópico e de fácil determinação.**

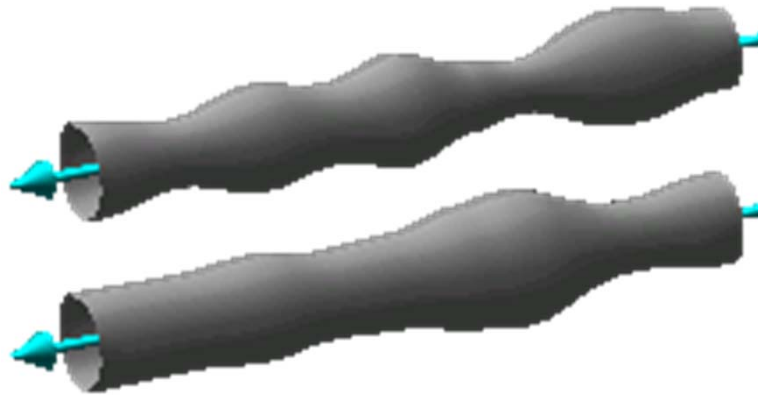
**Esta velocidade é diferente da velocidade microscópica de partículas do fluido associadas aos seus particulares caminhos de fluxo através dos grãos do meio poroso.**

**As velocidades microscópicas possuem existência real, mas são impossíveis de se medir.**

**A velocidade de Darcy é uma velocidade fictícia, pois em seu cálculo assume-se que o fluxo ocorre através da seção toda do meio poroso, quando na realidade o fluxo se desenvolve apenas através dos poros interconectados.**



**Caminhos reais do fluxo**



**Caminhos lineares para o fluxo, assumidos pela Lei de Darcy**

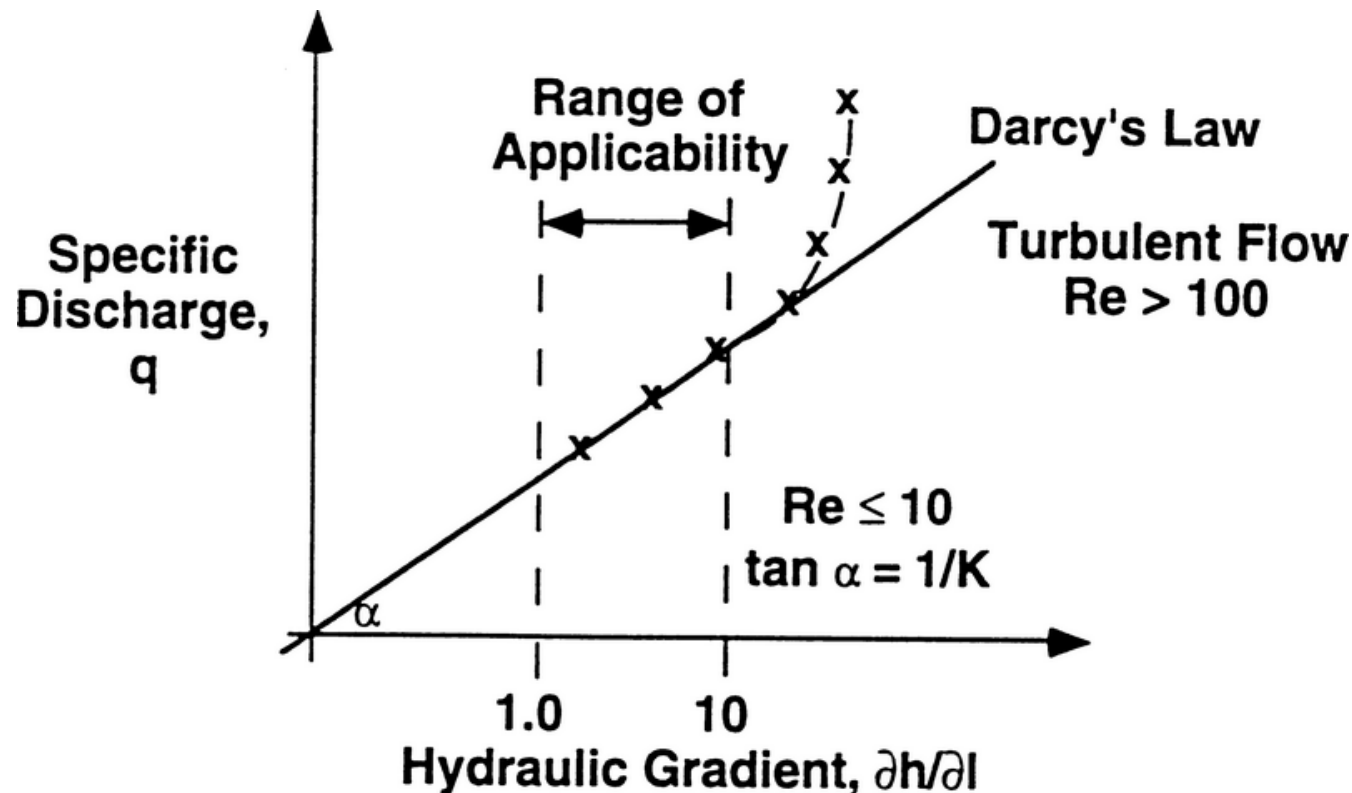
## APLICABILIDADE DA LEI DE DARCY



A Lei de Darcy é aplicável apenas quando o fluxo é laminar.

O número de Reynolds,  $Re$ , é utilizado para caracterizar a condição de fluxo laminar ou turbulento.

A Lei de Darcy's é aplicável na faixa:  $1 < Re < 10$  (faixa normalmente adequada para estudos de reservatórios).





## **PERMEABILIDADE**







**A permeabilidade é um dos mais importantes parâmetros na definição do desempenho do reservatório.**

**A qualidade do reservatório, representada pela permeabilidade, pode ser classificada como segue:**

- $k < 1$  mD - Reservatório Pobre**
- $1 < k < 10$  mD - Reservatório Médio**
- $10 < k < 50$  mD - Reservatório Moderado**
- $50 < k < 250$  mD - Reservatório Bom**
- $K > 250$  mD - Reservatório Muito Bom**

**(mD = millidarcy)**

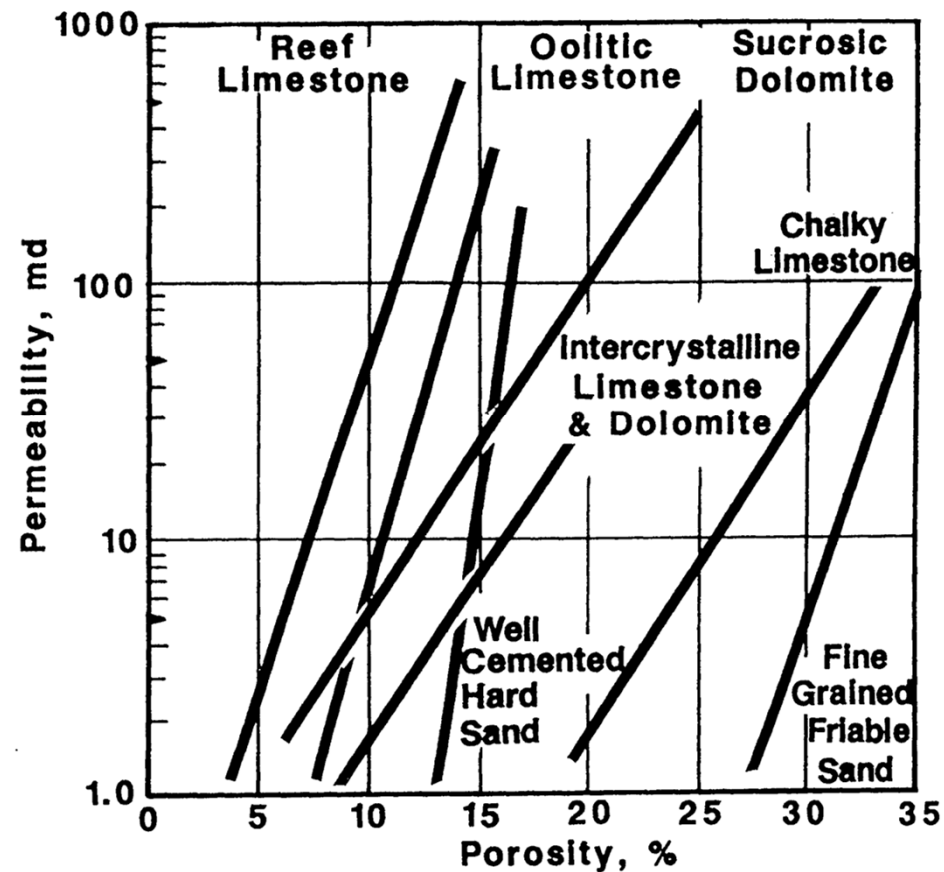
**Esta escala sofre modificações ao longo do tempo. Por exemplo, a 30 anos  $k < 50$  mD era considerado um valor pobre.**

# RELAÇÃO ENTRE POROSIDADE E PERMEABILIDADE



## FATORES QUE AFETAM A PERMEABILIDADE

- Forma e tamanho do sistema de poros.
- Classificação.
- Fraturamento e dissolução.
- Tipo de rocha.





**O coeficiente de permeabilidade tem dimensão derivada da equação de Darcy:**

$$v_s = \frac{q}{A} = \frac{k \Delta p}{\mu L} \Rightarrow k = \frac{q \mu L}{A \Delta p}$$

$$\left[ \frac{L^3}{T} \cdot \frac{P \cdot T}{1} \cdot \frac{L}{1} \cdot \frac{1}{L^2} \cdot \frac{1}{P} \right] = [L^2]$$

**Assim, a dimensão da permeabilidade é comprimento ao quadrado.**

**A unidade da permeabilidade é denominada "Darcy":**

**k [D] (1 darcy é equivalente a  $9,869233 \cdot 10^{-13} \text{ m}^2$ )**



## **DETERMINAÇÃO DA PERMEABILIDADE**



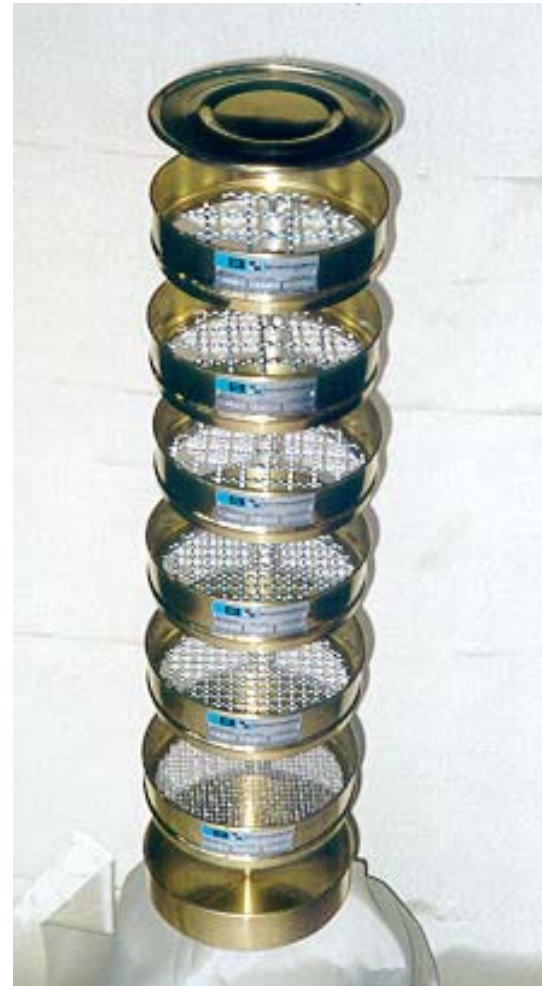


## MÉTODOS

- **Análise de testemunhos**: análise granulométrica ou testes de laboratório.
- **Testes em poços**: ensaios de fluxo.
- **Dados de produção**: registro do fluxo de fluidos drenados pelo poço no processo de produção.
- **Perfilagem de poços**: ex. MRI - Magnetic Resonance Imaging.



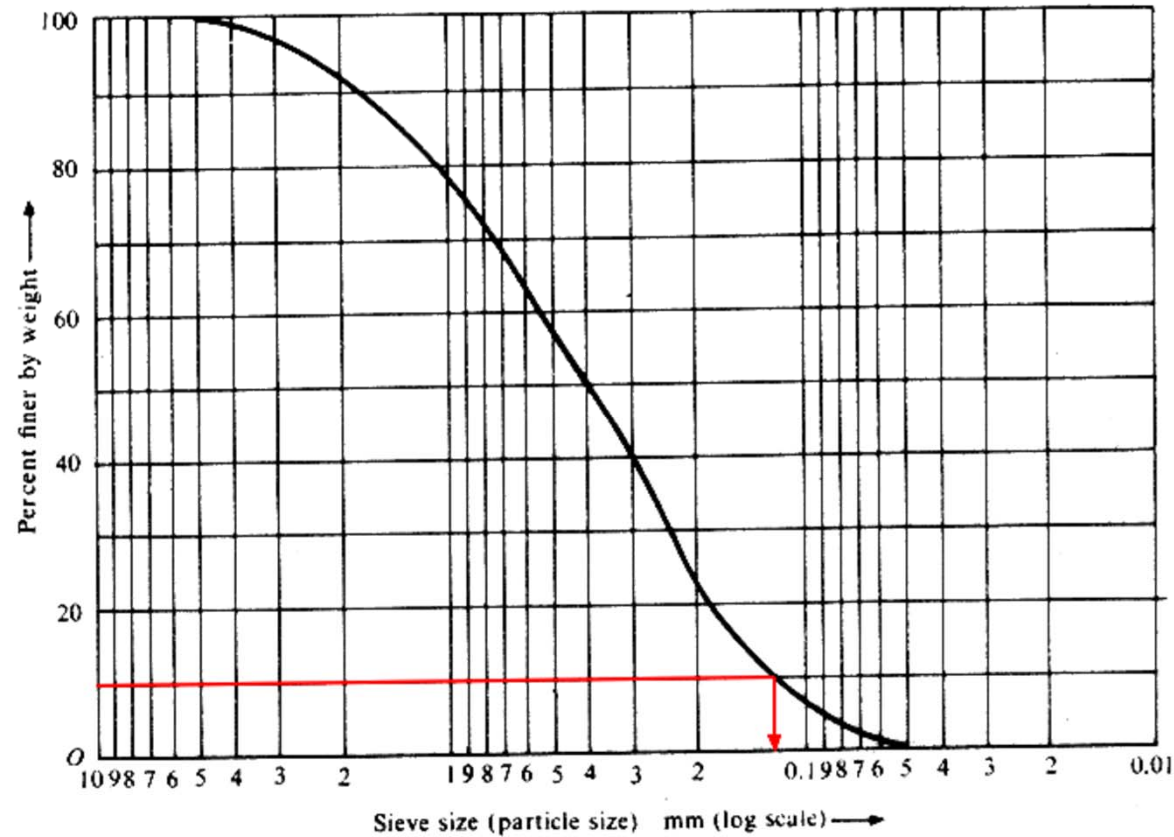
**Determinação a partir da distribuição de tamanho dos grãos da rocha.**



**Operação de peneiramento**



**Gráfico característico da distribuição de tamanho dos grãos da rocha:**



$$K = 100D_{10}^2 \quad (\text{cm/s})$$

Onde:

$D_{10}$  = tamanho de grão abaixo do qual estão os 10% mais finos (cm)

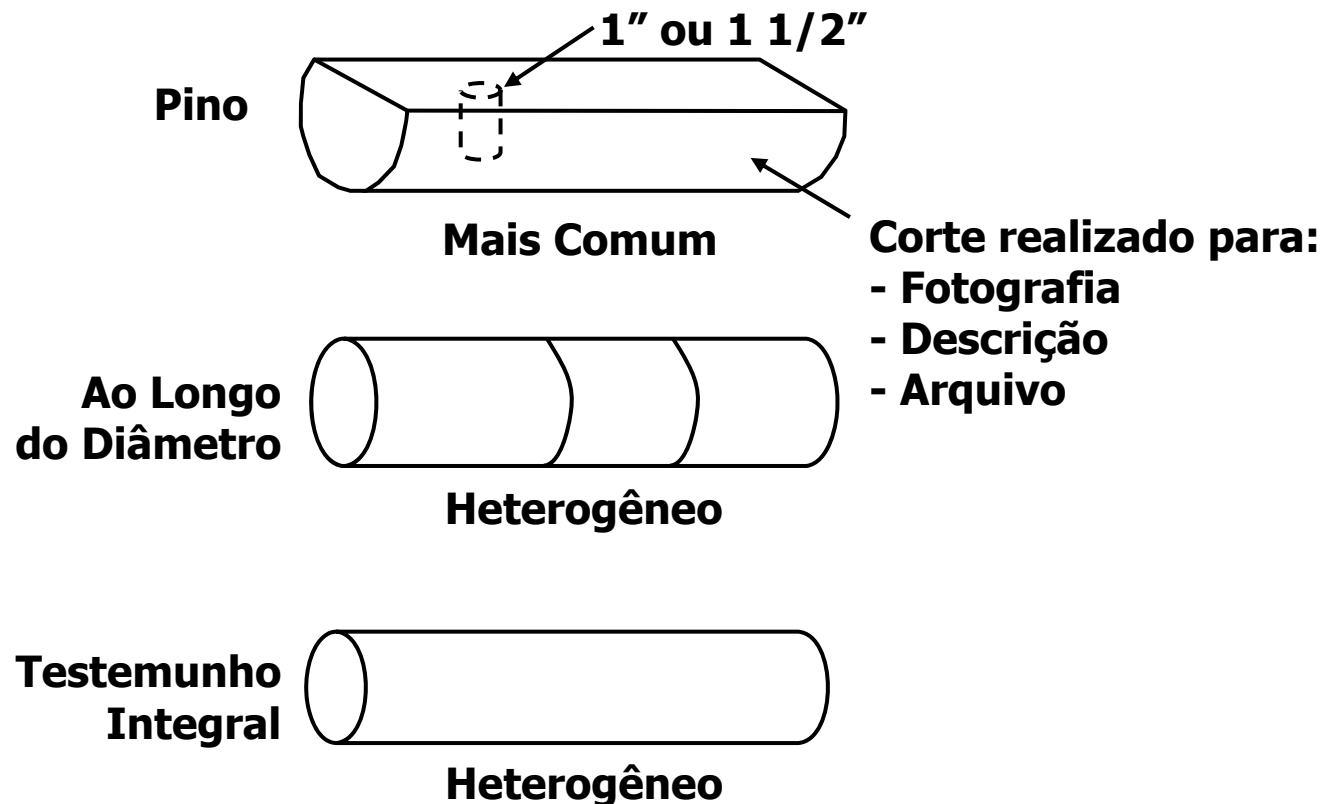
# DETERMINAÇÃO DA PERMEABILIDADE EM LABORATÓRIO



Quando o testemunho chega ao laboratório, a prática comum é cortá-lo em duas partes.

Sobre uma parte são feitas fotografias, descrição geológica e arquivamento. Sobre a outra parte são cortados pinos ("plugs") para a realização de ensaios.

Se o reservatório é muito heterogêneo são coletadas amostras ao longo do diâmetro ou de todo o testemunho.







## LITOLOGIAS

**Tipo I:** Reservatório homogêneo.

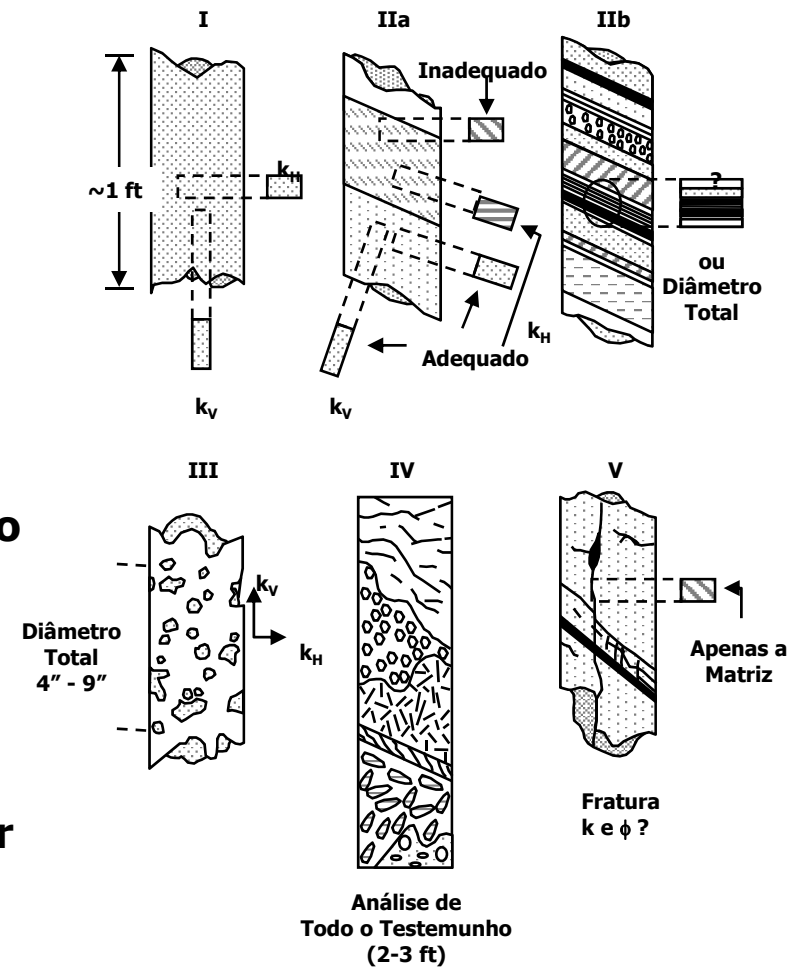
**Tipo IIa:** Zona estratificada com camadas uniformes mais grossas que o pino.

**Tipo IIb:** Mesmo de IIa exceto por camadas mais finas.

**Tipo III:** Uniforme com heterogeneidades igualmente distribuídas. Método do testemunho integral é recomendado.

**Tipo IV:** Muito heterogêneo. Método do testemunho integral é recomendado.

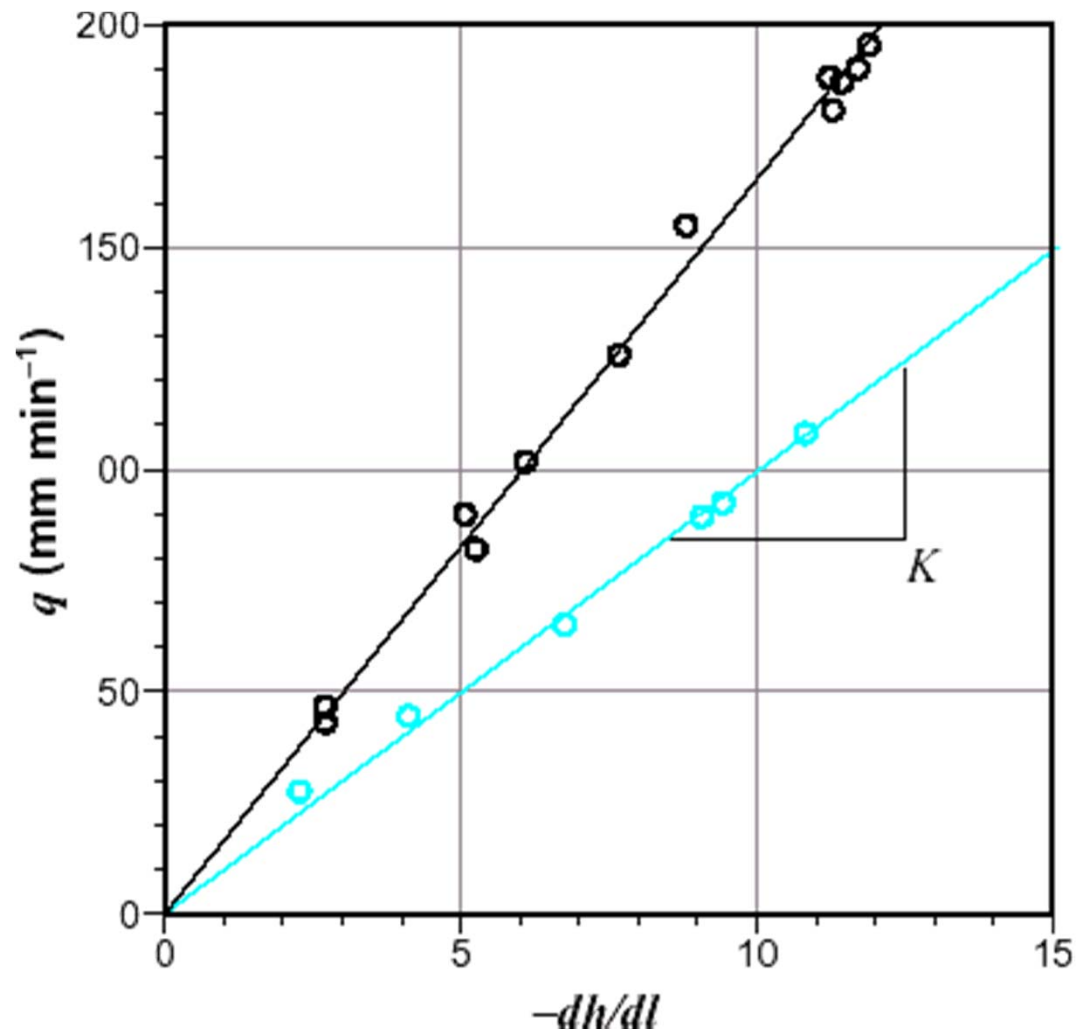
**Tipo V:** Testemunho fraturado. Pinos podem ser retirados para a determinação de propriedades da matriz. Análise de fluxo deve ser feita em testes de desempenho de poços.





## **PROCEDIMENTO**

- **Corte dos pinos de parte do testemunho ou uso do testemunho integral.**
- **Limpeza da amostra, extração de fluidos do reservatório e secagem.**
- **Aplicação de fluxo através da amostra a diferentes vazões.**
- **Registro das pressões de entrada e saída ( $p_1$  e  $p_2$ ) para cada vazão.**
- **Traçagem do gráfico: vazão por área " $q/A$ " x relação " $(p_1-p_2)/L$ ".**
- **Na região de fluxo laminar, o gráfico tem comportamento linear com inclinação  $k/\mu$ .**
- **Para maiores vazões, ocorre o desenvolvimento de fluxo turbulento, indicado pelo desvio da curva do comportamento linear.**

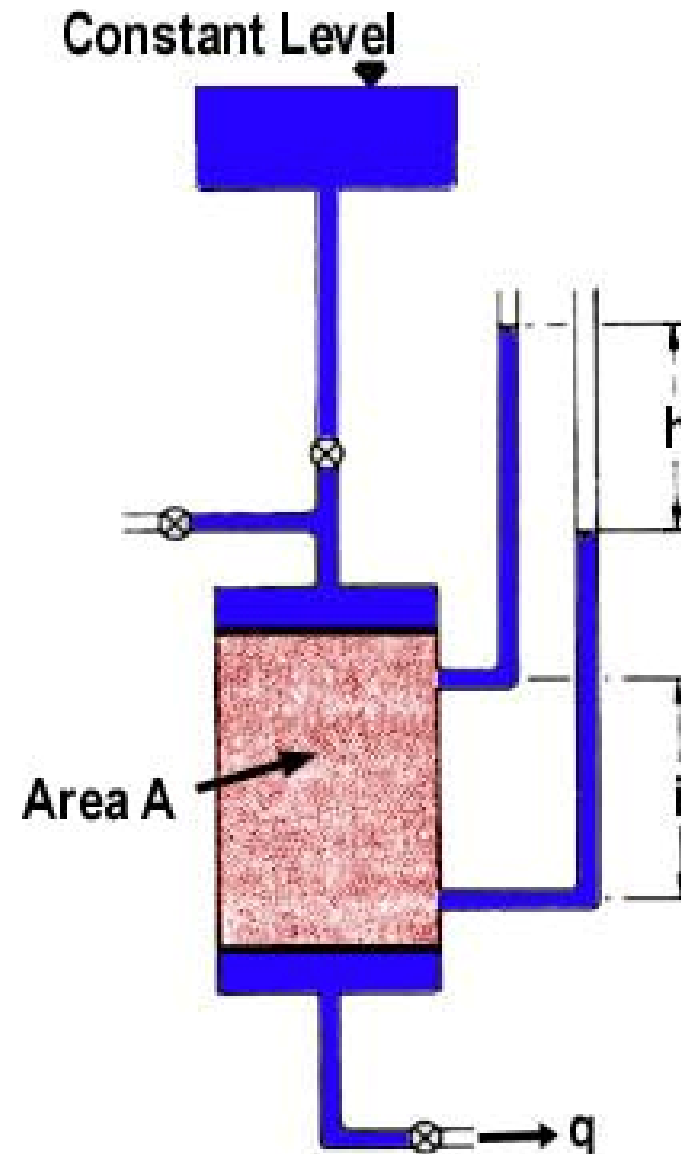


**Determinação da condutividade hidráulica a partir de dados de ensaios**



## ENSAIO A CARGA CONSTANTE

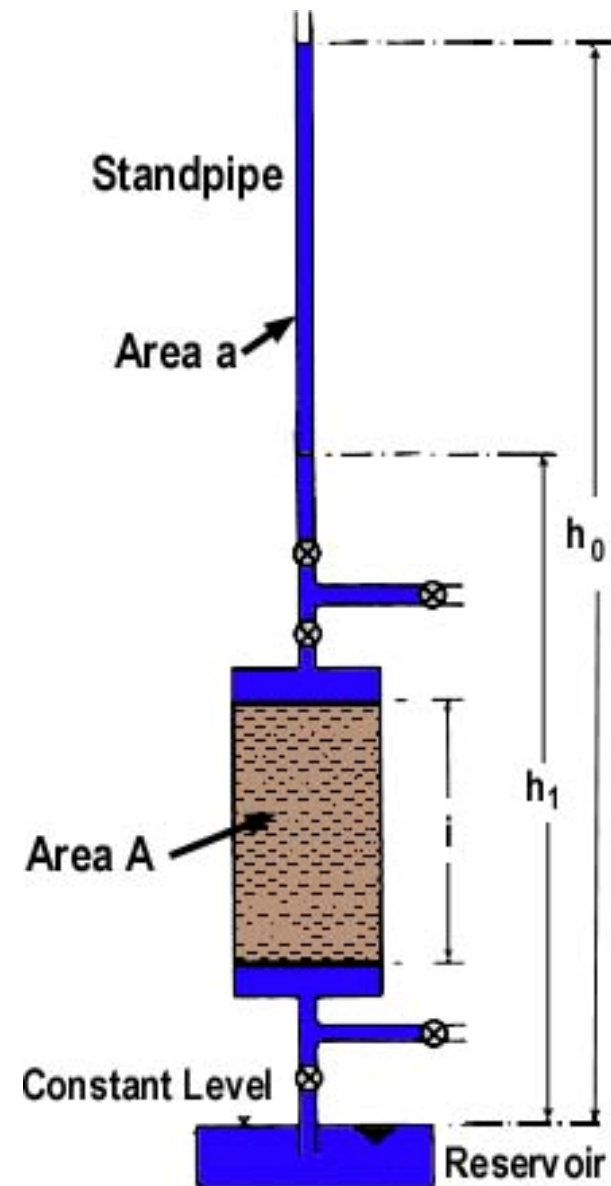
$$k = \frac{q \mu L}{\rho g A \Delta h}$$





## ENSAIO A CARGA VARIÁVEL

$$k = \frac{a\mu L}{\rho g A(t_1 - t_0)} \ln \frac{h_0}{h_1}$$





## **PROBLEMAS QUE AFETAM OS RESULTADOS DO ENSAIO**

- **Manuseio, limpeza e amostragem do testemunho.**
- **Interações fluido-rocha.**
- **Mudanças de pressão.**
- **Heterogeneidades da rocha (fraturas).**



## **FLUXO MULTIFÁSICO E DIRECIONAL**





**Normalmente os reservatórios contém 2 ou 3 fluidos.**

**Sistemas com 2 fases:**

- **Água-Óleo.**
- **Óleo-Gás.**
- **Água-Gás.**

**Sistema com 3 fases:**

- **Água-Óleo-Gás.**

**Para o equacionamento deste tipo de sistemas deve ser introduzido o conceito de "Permeabilidade Efetiva e Relativa".**





**Quando o espaço da rocha ocupado por poros contém mais de um fluido, a sua permeabilidade em relação a um particular fluido é chamada de permeabilidade efetiva.**

**Assim, a permeabilidade efetiva é a medida da capacidade de um meio poroso conduzir um fluido em particular, na presença de outros fluidos.**

**Cálculo das permeabilidades efetivas:**

$$q_o = \frac{k_{eo} A \Delta p_o}{\mu_o L} \Rightarrow \text{Óleo}$$

$$q_a = \frac{k_{ea} A \Delta p_a}{\mu_a L} \Rightarrow \text{Água}$$

$$q_g = \frac{k_{eg} A \Delta p_g}{\mu_g L} \Rightarrow \text{Gás}$$



A permeabilidade relativa é definida como a razão entre a permeabilidade efetiva para um fluido a certa saturação, em relação a uma permeabilidade-base.

A permeabilidade-base normalmente utilizada é a permeabilidade efetiva de um dos fluidos a 100% de saturação, ou seja, sua permeabilidade absoluta.

**Exemplo:**

$$k_{ro(0.5,0.3,0.2)} = \frac{k_{o(0.5,0.3,0.2)}}{k} \Rightarrow \text{Óleo}$$

$$k_{ra(0.5,0.3,0.2)} = \frac{k_{a(0.5,0.3,0.2)}}{k} \Rightarrow \text{Água}$$

$$k_{rg(0.5,0.3,0.2)} = \frac{k_{g(0.5,0.3,0.2)}}{k} \Rightarrow \text{Gás}$$

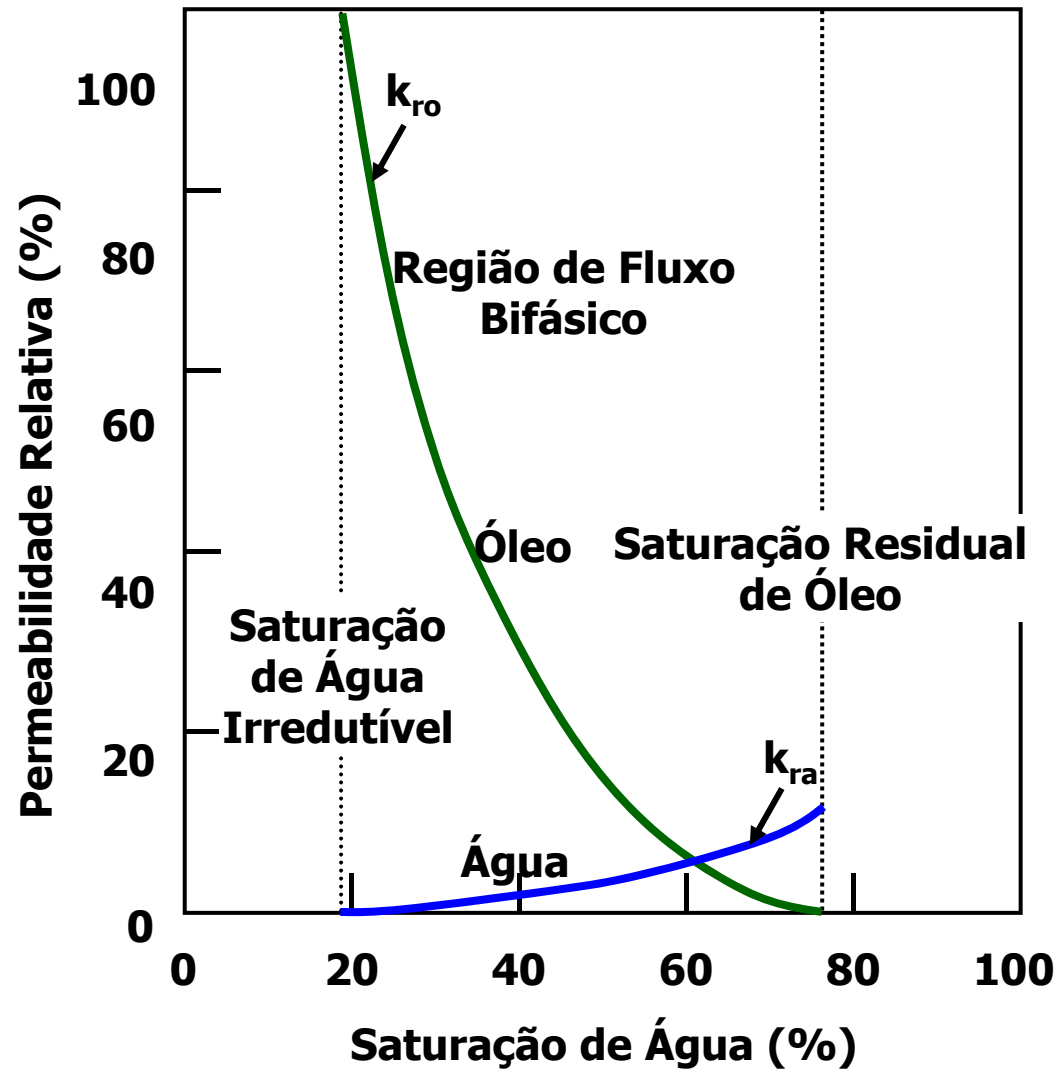
**Para:**

$$S_o = 50\%$$

$$S_a = 30\%$$

$$S_g = 20\%$$

# PERMEABILIDADE RELATIVA ÓLEO-ÁGUA





**A permeabilidade de uma rocha pode variar segundo a direção do fluxo.**

**Neste caso é necessário caracterizar-se permeabilidades segundo diferentes direções:**

$$\mathbf{K} = \begin{Bmatrix} \mathbf{K}_{xx} & \mathbf{K}_{xy} & \mathbf{K}_{xz} \\ \mathbf{K}_{yx} & \mathbf{K}_{yy} & \mathbf{K}_{yz} \\ \mathbf{K}_{zx} & \mathbf{K}_{zy} & \mathbf{K}_{zz} \end{Bmatrix}$$



**A Lei de Darcy generalizada ficará da seguinte maneira, de acordo com um particular sistema de coordenadas:**

$$\mathbf{q}_x = -\mathbf{K}_{xx} \frac{\partial \mathbf{p}}{\partial \mathbf{x}} - \mathbf{K}_{xy} \frac{\partial \mathbf{p}}{\partial \mathbf{y}} - \mathbf{K}_{xz} \frac{\partial \mathbf{p}}{\partial \mathbf{z}}$$

$$\mathbf{q}_y = -\mathbf{K}_{yx} \frac{\partial \mathbf{p}}{\partial \mathbf{x}} - \mathbf{K}_{yy} \frac{\partial \mathbf{p}}{\partial \mathbf{y}} - \mathbf{K}_{yz} \frac{\partial \mathbf{p}}{\partial \mathbf{z}}$$

$$\mathbf{q}_z = -\mathbf{K}_{zx} \frac{\partial \mathbf{p}}{\partial \mathbf{x}} - \mathbf{K}_{zy} \frac{\partial \mathbf{p}}{\partial \mathbf{y}} - \mathbf{K}_{zz} \frac{\partial \mathbf{p}}{\partial \mathbf{z}}$$



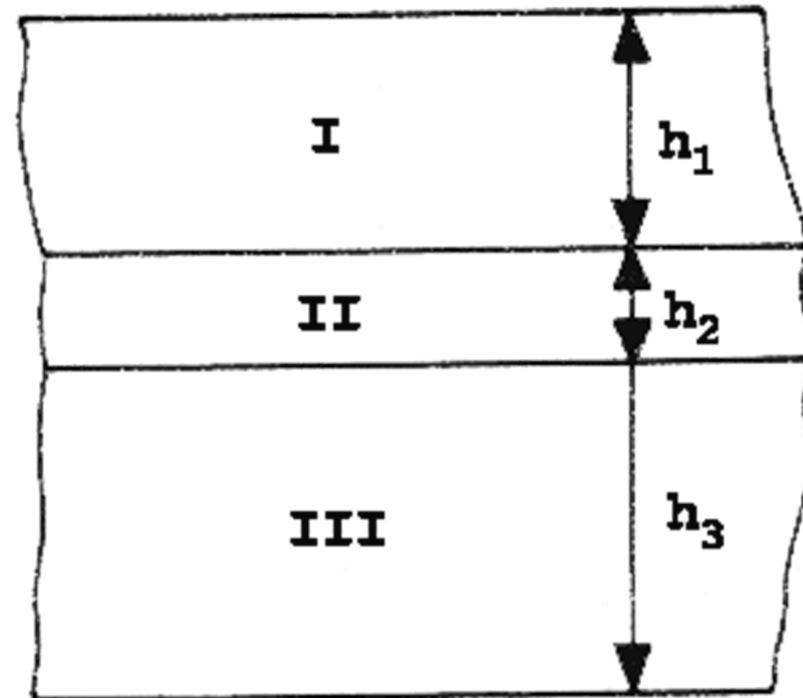
## EFEITO DA PRESENÇA DE CAMADAS COM CONDUTIVIDADES HIDRÁULICAS DIFERENTES

NA DIREÇÃO HORIZONTAL

$$K_h = \frac{K_1 h_1 + K_2 h_2 + K_3 h_3}{h_1 + h_2 + h_3}$$

NA DIREÇÃO VERTICAL

$$K_v = \frac{h_1 + h_2 + h_3}{\frac{h_1}{K_1} + \frac{h_2}{K_2} + \frac{h_3}{K_3}}$$





## **TIPOS DE ESCOAMENTO**

- Escoamento com superfície livre, em pressão e em meio poroso.

## **REGIMES EM RELAÇÃO AO TEMPO**

- Regimes permanente e variável, transitório, ou transiente.

## **PERMEABILIDADE**

- Permeabilidades primária e secundária.

## **LEI DE DARCY**

- Aplicabilidade.
- Velocidade de Darcy.

## **DETERMINAÇÃO DA PERMEABILIDADE**

- Análise de testemunhos: análise granulométrica e testes de laboratório.
- Testes em poços.
- Dados de produção.
- Perfilagem de poços.

## **FLUXO MULTIFÁSICO E DIRECIONAL**

- Fluxo multifásico.
- Permeabilidades efetiva e relativa.
- Permeabilidades direcional e equivalente.



**AHMED, T. Reservoir engineering. Gulf Professional Publishing: Houston, 2001.**

**BRADLEY, H. B. Petroleum engineering handbook. Society of Petroleum Engineers: Richardson, 2005.**

**ROSA, A. J.; CARVALHO, R. S.; XAVIER, J. A. D. Engenharia de reservatórios de petróleo. Interciência: Rio de Janeiro, 2006.**