



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

## **“FLUXO RADIAL”**

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

**Prof. Eduardo César Sansone**



## **REGIMES DE FLUXO A SEREM ESTUDADOS**

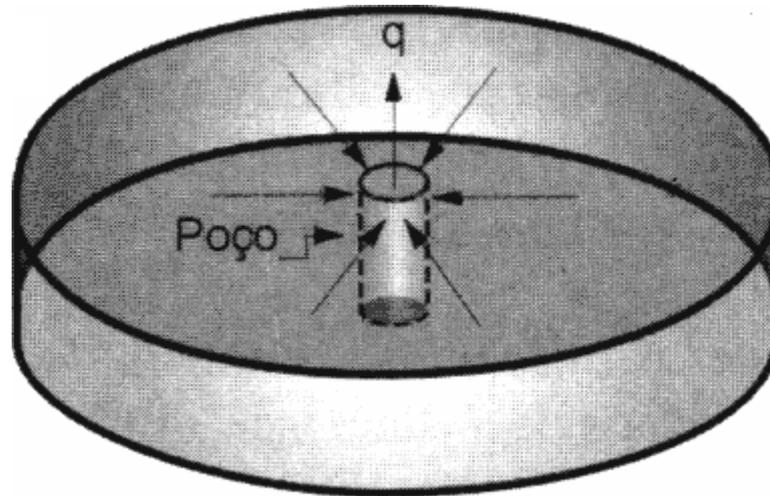
- **Fluxo radial.**
- **Fluxo radial de fluido compressível - gás.**



**FLUXO RADIAL**



**O fluxo radial é o que melhor caracteriza o movimento dos fluidos do reservatório para o poço e vice-versa.**



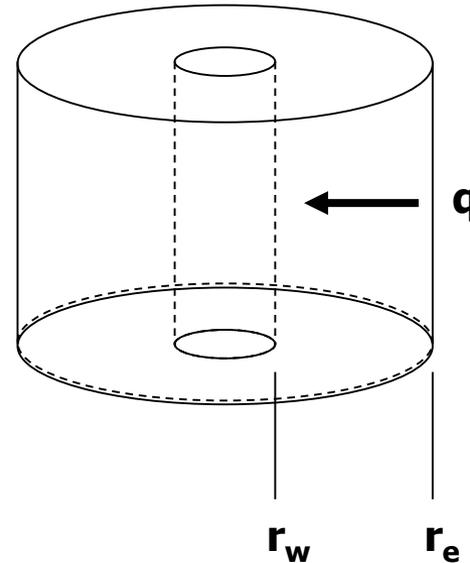
**Condições do modelo adotado:**

- Reservatório com espessura constante.
- Reservatório homogêneo com relação a todas as propriedades da rocha, especialmente em relação à permeabilidade.
- Rocha saturada por um único fluido.
- Poço completado em todo o intervalo produtor para assegurar o fluxo radial em toda a espessura do reservatório.



**Lei de Darcy para Fluxo Linear Horizontal:**

$$v = \frac{q}{A} = -\frac{k}{\mu} \left( \frac{dp}{ds} \right)$$



**Separando as variáveis:**

$$\frac{q}{2\pi rh} dr = \frac{k}{\mu} dp$$

**Integrando temos:**

$$q \int_{r_e}^{r_w} \frac{1}{r} dr = \frac{2\pi kh}{\mu} \int_{p_e}^{p_w} dp \Rightarrow q(\ln r_w - \ln r_e) = \frac{2\pi kh}{\mu} (p_w - p_e)$$

$$q(\ln r_e - \ln r_w) = \frac{2\pi kh}{\mu} (p_e - p_w) \Rightarrow q \ln(r_e/r_w) = \frac{2\pi kh}{\mu} (p_e - p_w)$$

$$\text{Assim: } q = \frac{2\pi kh(p_e - p_w)}{\mu \ln(r_e/r_w)}$$



**Em unidades inglesas a Lei de Darcy para Fluxo Radial fica:**

$$q = 0,00708 \frac{k h (p_e - p_w)}{\mu \ln\left(\frac{r_e}{r_w}\right)}$$

No reservatório

**Onde:**

**h = altura da camada em ft**

**k = permeabilidade em mD**

**p<sub>e</sub> = pressão externa em psi**

**p<sub>w</sub> = pressão no poço em psi**

**q = vazão bbl/dia**

**r<sub>e</sub> = raio externo em ft**

**r<sub>w</sub> = raio do poço em ft**

**μ = viscosidade do fluido em cP**



É possível determinar como a pressão varia ao longo do caminho,  $p(r)$ , considerando um ponto arbitrário,  $r_w \leq r \leq r_e$ .

Integrando de  $r$  a  $r_w$  temos:

$$q \int_r^{r_w} \frac{1}{r} dr = \frac{2\pi kh}{\mu} \int_{p(r)}^{p_w} dp$$

Assim:

No reservatório

$$p(r) = p_w + \frac{q\mu \ln(r/r_w)}{2\pi kh}$$



**Em unidades inglesas a pressão pode ser expressa como:**

$$p = p_w + 141,243 \frac{q \mu}{k h} \ln \left( \frac{r}{r_w} \right)$$

No reservatório

**Onde:**

**h = altura da camada em ft**

**k = permeabilidade em mD**

**p<sub>w</sub> = pressão no poço em psi**

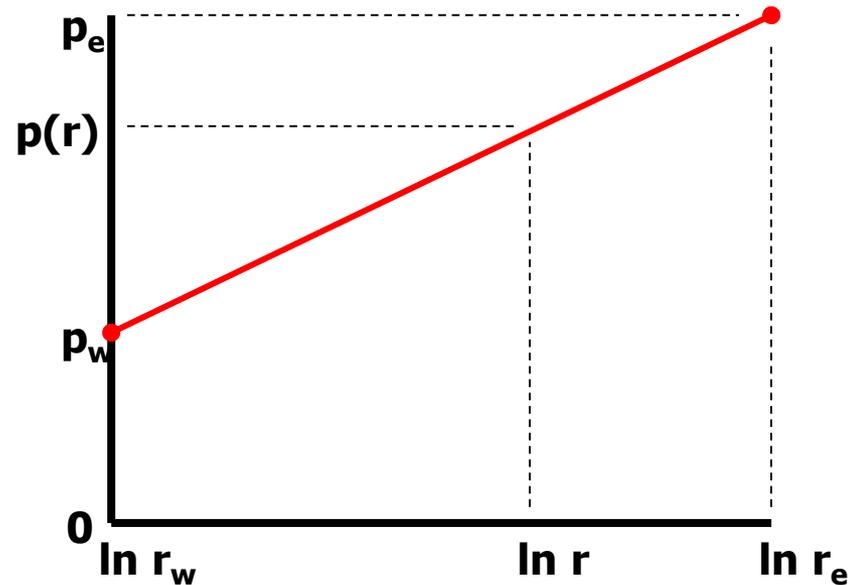
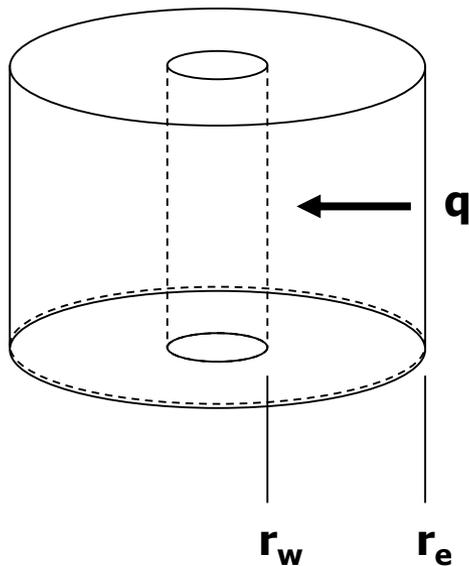
**q = vazão bbl/dia**

**r<sub>w</sub> = raio do poço em ft**

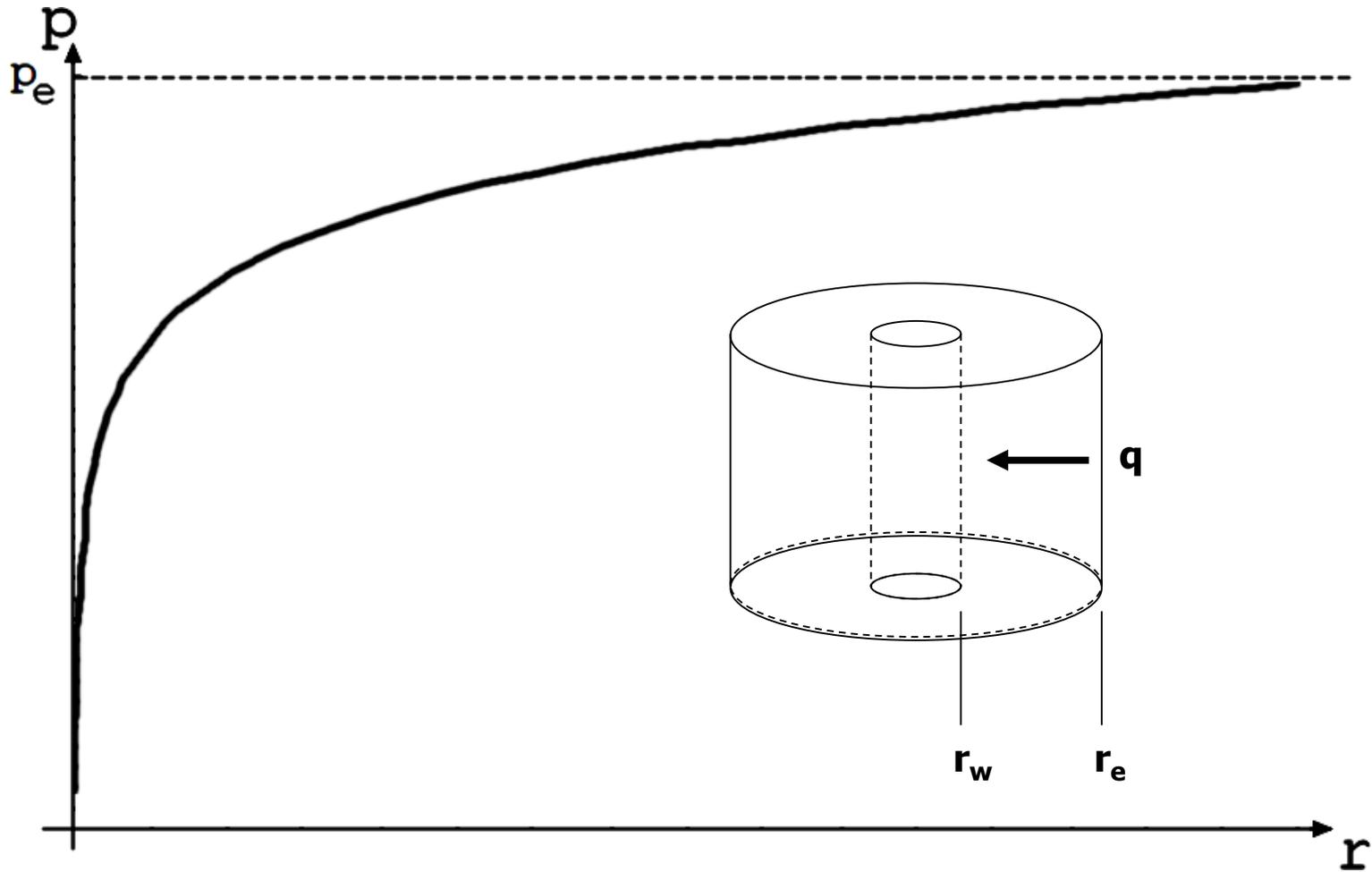
**μ = viscosidade do fluido em cP**



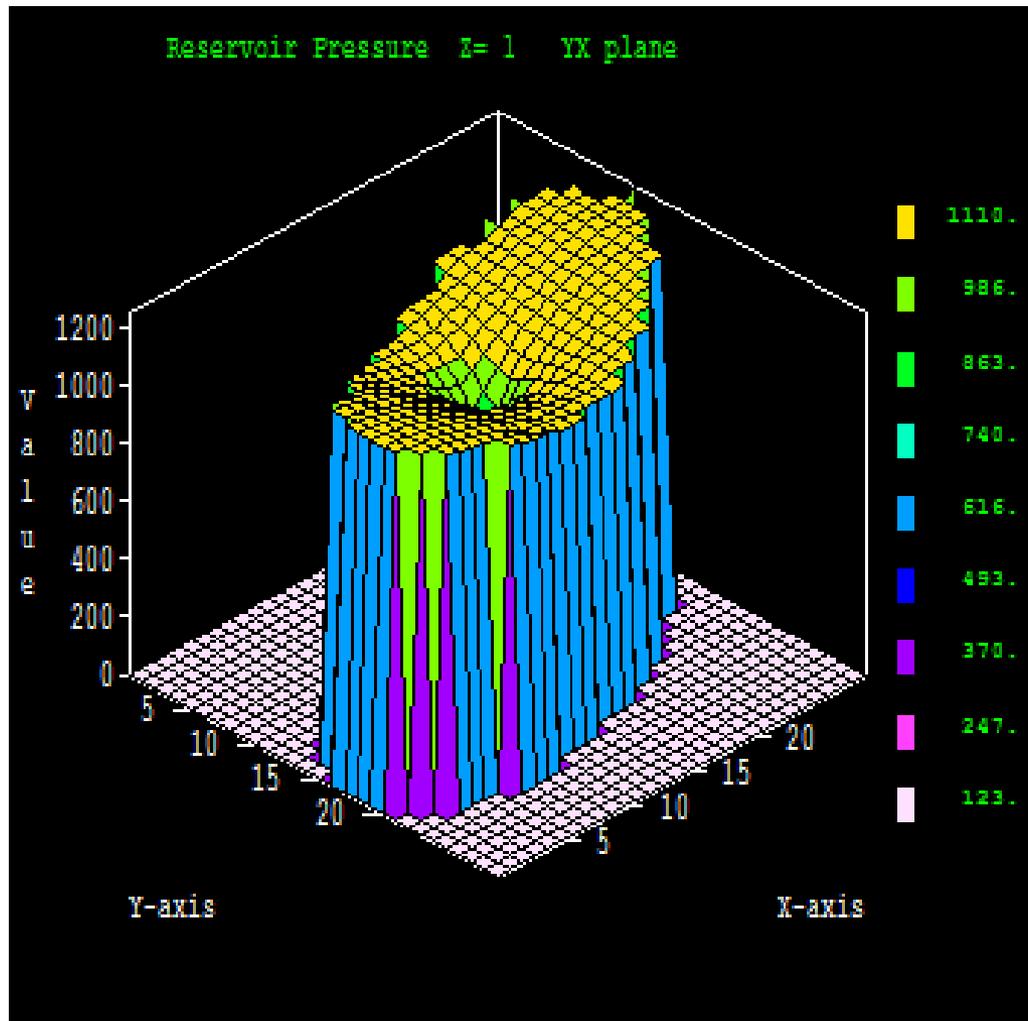
O perfil de pressões é uma função linear de  $\ln(r)$  se as propriedades são constantes ao longo do caminho.



Raio de influência do poço



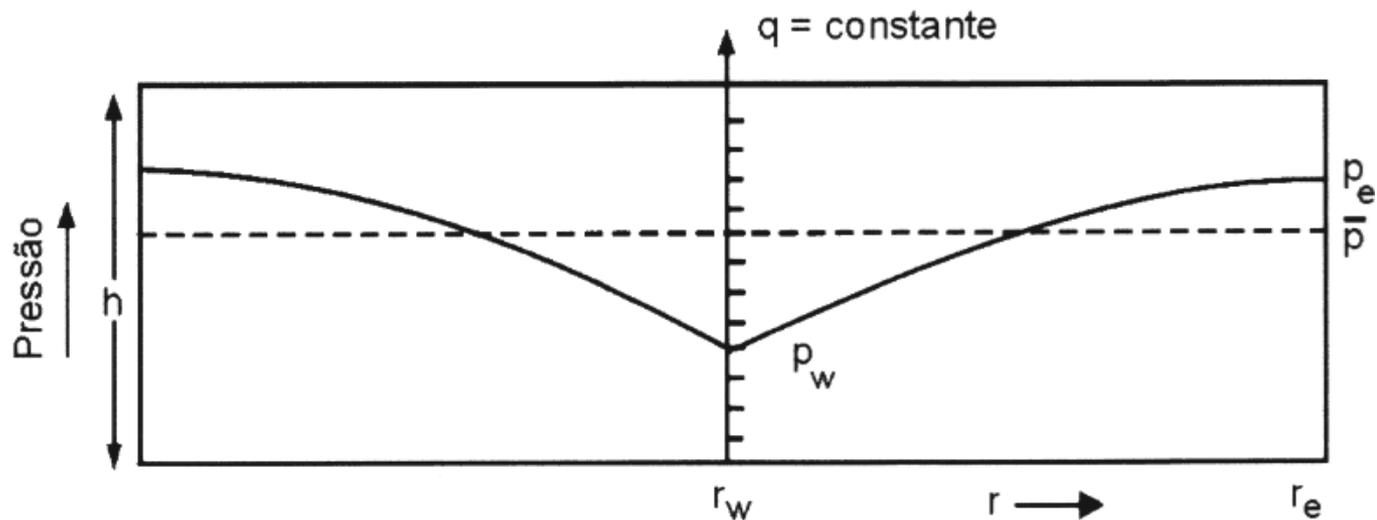
Distribuição de pressões ao longo do reservatório



Perfil de pressões no entorno de um poço



A figura mostra esquematicamente a distribuição de pressões ao longo do reservatório, com o poço produzindo em condições estabilizadas a uma vazão constante  $q$ , sendo  $\bar{p}$  a média das pressões ao longo do reservatório ponderada em relação ao volume.





## EXERCÍCIO

Um poço produz óleo em um reservatório em regime permanente. São conhecidas as informações:

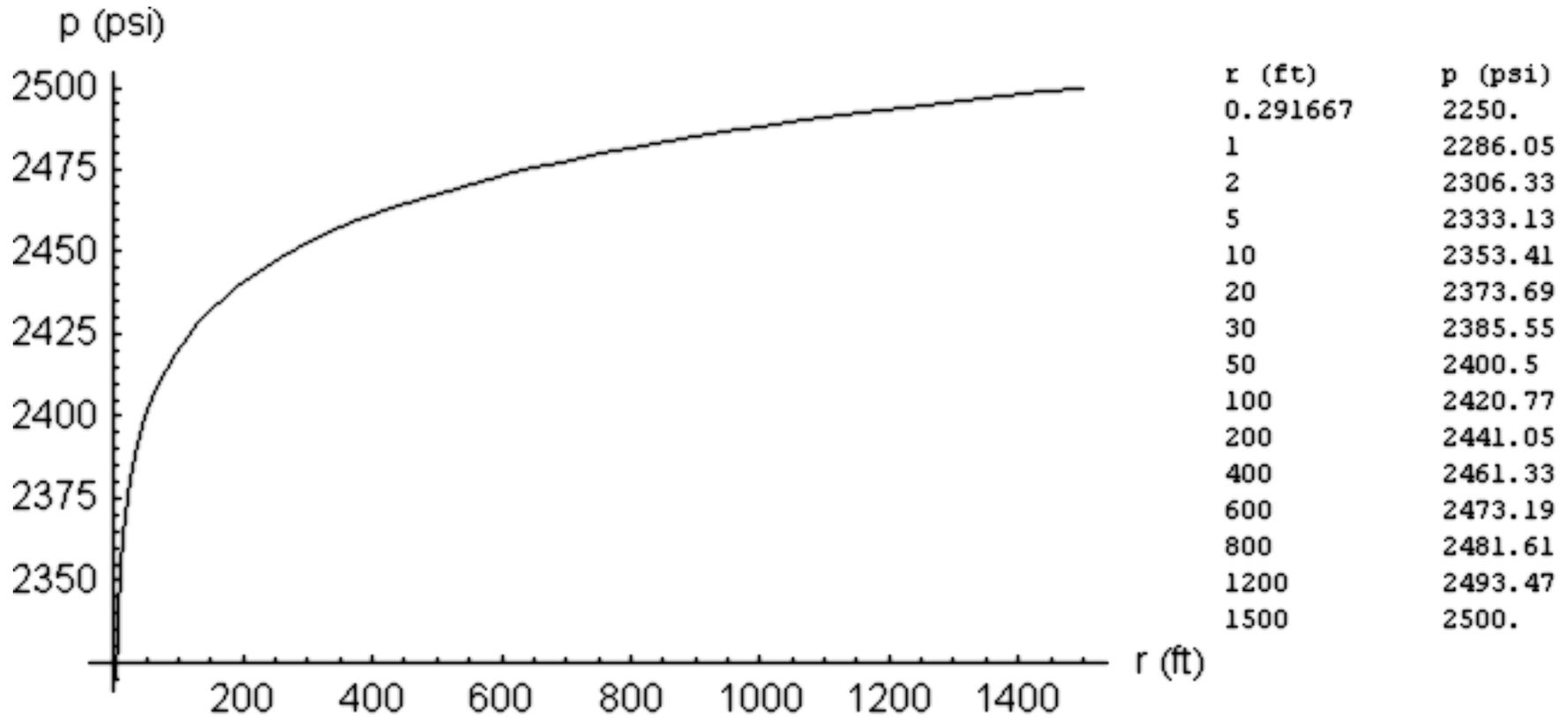
Permeabilidade do reservatório	$k = 180 \text{ mD}$
Espessura do reservatório	$h = 25 \text{ ft}$
Pressão do reservatório	$p_e = 2500 \text{ psi}$
Pressão no poço	$p_w = 90\% \text{ de } p_e$
Viscosidade do óleo	$\mu = 2,5 \text{ cP}$
Fator volume de formação do óleo	$B_o = 1,25 \text{ bbl/STB}$
Diâmetro do reservatório	$\phi_e = 3000 \text{ ft}$
Diâmetro do poço de produção	$\phi_w = 7''$

Determine:

- A vazão do poço nas condições de superfície.
- O perfil de pressões desde o poço até o limite do reservatório.
- A distância do poço onde a pressão da formação é igual a 95% da pressão original do reservatório.
- A pressão no poço para que a produção seja de 600 bbl/dia.  
Determine a vazão do poço para as condições de superfície, mantidas as outras condições iniciais:
- Caso a permeabilidade do reservatório seja de 300 mD e a viscosidade do óleo seja 2,1 cP.
- Caso o reservatório possua um diâmetro 50% maior que o inicialmente previsto.
- Caso o diâmetro do poço seja de 5 1/2''.



**b) O perfil de pressões desde o poço até o limite do reservatório.**





## **FLUXO RADIAL DE FLUIDO COMPRESSÍVEL - GÁS**



**Durante o fluxo sob diferença de pressão, os gases sofrem variações de volume que serão caracterizadas pela Lei dos Gases:  $PV = nzRT$ .**

**Conseqüentemente a vazão do gás também sofrerá variação em relação ao previsto pela Lei de Darcy:**

$$\mathbf{v} = \frac{\mathbf{q}}{\mathbf{A}} = -\frac{\mathbf{k}}{\mu} \left( \frac{d\mathbf{p}}{d\mathbf{s}} \right)$$



**A viscosidade ( $\mu$ ) e o coeficiente de compressibilidade ( $z$ ) do gás são funções da pressão do gás ( $p$ ) que varia ao longo do fluxo.**

**De maneira aproximada, para pequenas variações de pressão, pode-se considerar  $\mu$  e  $z$  constantes, utilizando-se os seus valores para o cálculo da pressão quadrática média do reservatório.**

**A pressão quadrática média no reservatório será:**

$$\bar{p} = \sqrt{\frac{p_w^2 + p_e^2}{2}}$$

**Onde:**

**$p_e$  = pressão externa em psi**

**$p_w$  = pressão no poço em psi**



Em unidades inglesas a Lei de Darcy para Fluxo Radial de gases utilizando o método da "Pressão Quadrática" fica:

$$q_g = \frac{k h (p_e^2 - p_w^2)}{1422 T \bar{\mu}_g \bar{z} \ln\left(\frac{r_e}{r_w}\right)}$$

Onde:

**h** = altura da camada em ft

**k** = permeabilidade em mD

**p<sub>e</sub>** = pressão externa em psi

**p<sub>w</sub>** = pressão no poço em psi

**q<sub>g</sub>** = vazão de gás em Mft<sup>3</sup>/dia (standard conditions)

**r<sub>e</sub>** = raio externo em ft

**r<sub>w</sub>** = raio do poço em ft

**T** = viscosidade média do gás para a pressão quadrática média em cP

**z̄** = fator z médio do gás para a pressão quadrática média

**T** = temperatura em °R



## EXERCÍCIO

Um poço produz gás em um reservatório em regime permanente. São conhecidas as informações:

<b>Espessura do reservatório</b>	<b><math>h = 15</math> ft</b>
<b>Permeabilidade do reservatório</b>	<b><math>k = 65</math> mD</b>
<b>Diâmetro do poço de produção</b>	<b><math>\phi_w = 7</math>"</b>
<b>Diâmetro do reservatório</b>	<b><math>r_e = 2000</math> ft</b>
<b>Pressão do reservatório</b>	<b><math>p_e = 4400</math> psi</b>
<b>Pressão no poço</b>	<b><math>p_w = 3600</math> psi</b>
<b>Temperatura</b>	<b><math>T = 600</math> °R</b>

**Determine a produção do poço.**



$\mu$  e  $z$  em função da pressão para  $T = 600$  °R

$p$ (psi)	$\mu_g$ (cp)	$z$
0	0.0127	1.000
400	0.01286	0.937
800	0.01390	0.882
1200	0.01530	0.832
1600	0.01680	0.794
2000	0.01840	0.770
2400	0.02010	0.763
2800	0.02170	0.775
3200	0.02340	0.797
3600	0.02500	0.827
4000	0.02660	0.860
4400	0.02831	0.896



## **REGIMES DE FLUXO**

- **Fluxo radial.**
- **Fluxo radial de fluido compressível - gás.**



**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.**

**TIAB, D.; DONALDSON, E. C. Petrophysics: theory and practice of measuring reservoir rock and fluid transport properties. Boston: Gulf Professional Pub, 2004.**