

## INFLUÊNCIA DA PERMEABILIDADE NO FLUXO RADIAL EM MEIO POROSO EM REGIME PSEUDOPERMANENTE

Analu Gonçalves da Silva Araújo<sup>1</sup>, Hosana Oliveira Ávila Neta<sup>2</sup>, Leonardo de Araújo Lisboa<sup>3</sup>, Cláudio Borba<sup>4</sup>.

<sup>1,2,3,4</sup>Universidade Tiradentes -

[analu\\_pilar@hotmail.com](mailto:analu_pilar@hotmail.com), [hosananeta27@gmail.com](mailto:hosananeta27@gmail.com), [leo\\_araujo05@hotmail.com](mailto:leo_araujo05@hotmail.com), [clborba@uol.com.br](mailto:clborba@uol.com.br)

### RESUMO

Na engenharia de reservatório, é de fundamental importância o conhecimento das propriedades dos fluidos e das rochas. A permeabilidade é uma propriedade que influencia diretamente no tipo de fluxo e regime no meio poroso. O conhecimento dessa e outras propriedades como viscosidade e porosidade é essencial para estudo completo do reservatório, assim como sua avaliação econômica que interfere na tomada de decisões. Através da Lei de Darcy, juntamente com outras equações, torna-se possível esboçar os tipos de fluxos no reservatório, estes podendo ser linear, onde a área do fluxo é constante, ou radial, onde o fluido converge em forma radial dentro de um poço. Além disso, pode-se determinar os tipos de regimes de fluxo -permanente, pseudopermanente e transiente - que descrevem o comportamento do fluxo de fluido e a distribuição da pressão do reservatório como uma função do tempo. O foco deste trabalho será em reservatório em regime pseudopermanente o qual produz a vazão constante com mecanismo de depleção. Para esse tipo de regime em fluxo radial, não há alimentação externa e a produção ocorre em decorrência da expansão do fluido do reservatório. A partir da variação de parâmetros do reservatório, considerando um regime pseudopermanente, o objetivo é analisar uma geometria radial que melhor caracteriza o movimento dos fluidos do reservatório para o poço na maioria das situações.

**Palavras-Chave:** reservatório; fluxo em meio poroso; regimes de fluxo; pseudopermanente; fluxo radial.

## 1. Introdução

Nos estudos de reservatório de petróleo é fundamental o conhecimento das propriedades básicas das rochas e dos fluidos nela contidos. A engenharia de reservatórios se preocupa basicamente com a retirada dos fluidos do interior das rochas, de modo que eles possam ser conduzidos até a superfície. Através dela podem-se caracterizar jazidas, propriedades das rochas, as propriedades dos fluidos nelas contidos, a maneira como estes fluidos interagem dentro da rocha e as leis físicas que regem o movimento dos fluidos no meio poroso. Um estudo de fluxo em meio poroso é indispensável para a avaliação econômica de reservatório de petróleo, com o objetivo de maximizar a produção de hidrocarbonetos (Thomas, 2001).

A queda da pressão na parede do poço interfere no índice de produtividade do reservatório, este fenômeno denomina-se dano. O dano é qualquer tipo de barreira à produção na região próxima ao poço ou no intervalo completado do poço, que restrinja a produção natural de fluidos do reservatório. É uma redução permanente ou temporária da permeabilidade original da formação nas imediações do poço, aumentando a perda de carga na interface poço formação e reduzindo o índice de produtividade (Moraes, 2010).

A partir da Lei de Darcy, da equação da continuidade e uma equação de estado envolvendo a compressibilidade dos fluidos e da rocha, obtém-se a equação da difusividade hidráulica que é a formulação utilizada para modelar o fluxo no reservatório. Os regimes de fluxo descrevem o comportamento do escoamento no reservatório, em função da posição (coordenada espacial) e do tempo. Levando-se em conta a distribuição espacial das linhas de fluxo no reservatório, os principais tipos de fluxo são o radial, linear, bilinear, pseudo-radial, esférico e em três dimensões (Lee, 2003).

O movimento dos fluidos em meios porosos e permeáveis está regido por equações baseadas na lei empírica de Darcy, que tomam diferentes formas segundo o fluido (gás, petróleo), os tipos de fluxo - linear, radial - e os regimes de fluxo -permanente, pseudopermanente e transiente. No regime permanente existe alimentação externa e por isso a pressão se mantém constante no tempo. No regime transiente a pressão varia com a distância e com o tempo, e o limite do reservatório não é atingido pela queda de pressão produzida pela produção no poço. No regime pseudopermanente não há alimentação externa e a pressão varia com o tempo. (Rosa et al., 2006).

No regime pseudoestável ou pseudopermanente numa geometria radial, as paredes externas são seladas, não existindo alimentação externa e a produção ocorre em decorrência da expansão do fluido do reservatório. Usualmente ocorre nas seguintes situações: poço produzindo a vazão constante de um pequeno reservatório fechado, reservatório drenando através de muitos poços, sendo que cada poço na região central produz de uma área considerada hidráulicamente isolada das demais (Rosa et al., 2006).

Este trabalho tem como objetivo analisar uma geometria radial, que melhor caracteriza o movimento dos fluidos do reservatório para o poço na maioria das situações, em meio poroso no regime pseudopermanente, fazendo variar alguns parâmetros de reservatório.

## 2. Metodologia

Utilizou-se parâmetros de reservatório variando algumas de suas propriedades, tais como porosidade, viscosidade e permeabilidade. A fim de obter dados para construção dos gráficos utilizou-se planilhas Excel, com isso pôde-se analisar e testar à sensibilidade do comportamento da pressão no tempo e no espaço, assim como as propriedades do reservatório, principalmente permeabilidade.

## 3. Resultados e Discussão

Para cada tipo de regime de fluxo existem condições de contorno utilizadas para a resolução da equação da difusividade hidráulica. No regime pseudopermanente com fluxo radial a solução da equação é apresentada abaixo, na forma da pressão em função do tempo, da distância do poço produtor e das propriedades do reservatório, em unidades Petrobras (Rosa et al. 2006) (Equação1).

$$p(t) = p_i - \frac{19,03 \cdot q_o \cdot \mu}{2 \cdot \pi \cdot k \cdot h} \left[ \frac{2,0,0003484 \cdot k \cdot 24 \cdot t}{\phi \cdot \mu \cdot c_t \cdot r_e^2} - \ln\left(\frac{r}{r_w}\right) + \frac{r^2}{2 \cdot r_e^2} + \ln\left(\frac{r_e}{r_w}\right) - \frac{3}{4} \right] \quad (1)$$

Para analisar o comportamento do reservatório ao longo do tempo, é necessário conhecer os parâmetros do reservatório. A Tabela 1 demonstra estes parâmetros que foram utilizados para o desenvolvimento da modelagem.

**Tabela 1:** Parâmetros de reservatório

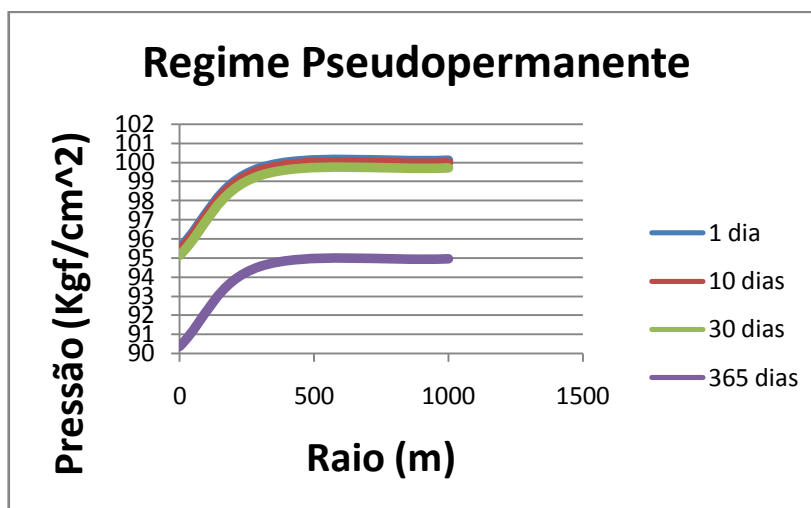
$\Phi$	$B_o$ ( $m^3/m^3$ )	$h$ ( $m^3/m^3$ )	$\mu$ ( $cp$ )	$ct$ ( $Kgf/cm^2$ ) <sup>-1</sup>	$Q_o$ ( $m^3/d$ )	$r_w$ ( $m$ )	$r_e$ ( $m$ )	$p_i$ ( $kgf/cm^2$ )
--------	------------------------	----------------------	-------------------	--------------------------------------	----------------------	------------------	------------------	-------------------------

---

0,22      1,2      5      2      0,00013      40      0,1      1000      100

---

A Figura 1 apresenta a relação entre pressão e distância (raio) em um sistema submetido ao fluxo radial e regime pseudopermanente, para diversos tempos de produção. Utilizou-se o parâmetro permeabilidade com valor de 92 mD.



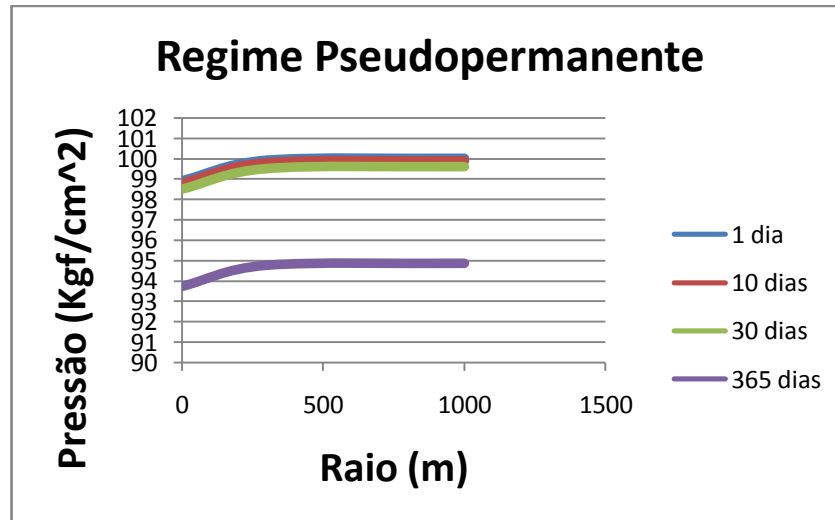
**Figura 1:** Distribuição de pressão no sistema radial de fluxo pseudopermanente.

A partir dos resultados obtidos na Tabela 2 e analisando o Figura 1, pode-se perceber que com o passar tempo a pressão cai próximo e distante do poço, pois o reservatório continua produzindo, e a queda de pressão se acentua em direção ao poço produtor.

**Tabela 2:** Resultado das pressões em função do tempo e distância.

<b>Tempo/Distância</b>	<b>0,1</b>	<b>1</b>	<b>10</b>	<b>30</b>	<b>365</b>
<b>0,1</b>	95,5	95,5	95,4	95,1	90,3
<b>300</b>	99,7	99,7	99,5	99,3	94,5
<b>1000</b>	100,0	100,0	99,9	99,7	94,9

A Figura 2 apresenta a relação entre pressão e distância (raio) em um sistema submetido ao fluxo radial e regime pseudopermanente. Utilizou-se o parâmetro permeabilidade aumentada para 380 mD.



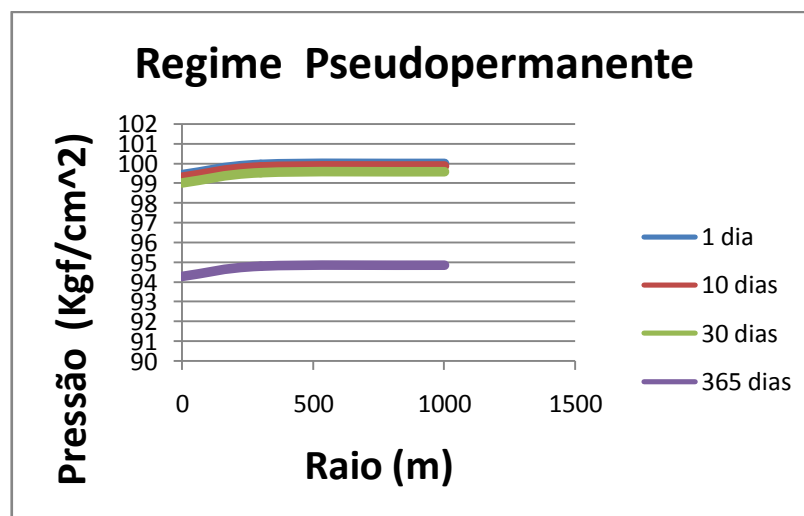
**Figura 2:** Distribuição de pressão no sistema radial de fluxo pseudopermanente.

A partir da Figura 2 e Tabela 3 observa-se que ocorre resultado semelhante ao da Tabela 2, todavia a pressão tende a cair menos, pois a permeabilidade utilizada foi maior ( $K=380$  mD), enquanto que no gráfico da Figura 1 a permeabilidade foi de 92 mD.

**Tabela 3:** Resultado das pressões em função do tempo e distância.

Tempo/Distância	0,1	1	10	30	365
0,1	98,9	98,9	98,7	98,4	93,7
300	99,9	99,9	99,7	99,5	94,7
1000	100,0	100,0	99,8	99,6	94,8

A Figura 3 apresenta a relação entre pressão e distância (raio) em uma geometria radial em regime pseudopermanente. Utilizou-se o parâmetro permeabilidade com valor de 742 mD.



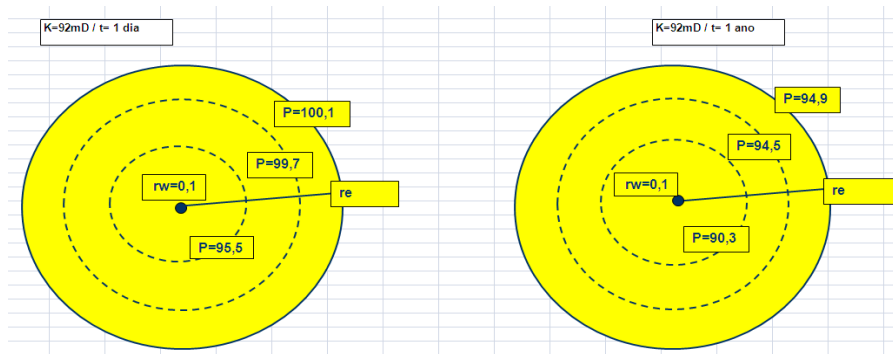
**Figura 3:** Distribuição de pressão no sistema radial de fluxo pseudopermanente.

Com os resultados obtidos com a Tabela 4 e análise da Figura 3, nota-se que o efeito da permeabilidade na queda de pressão ocorre próximo ao poço, não afetando distancias longe do poço. Além disso, se comparado aos outros valores de permeabilidade já apresentados, na figura 3 a pressão cai ainda menos devido a permeabilidade ser a mais elevada ( $K = 742 \text{ mD}$ ).

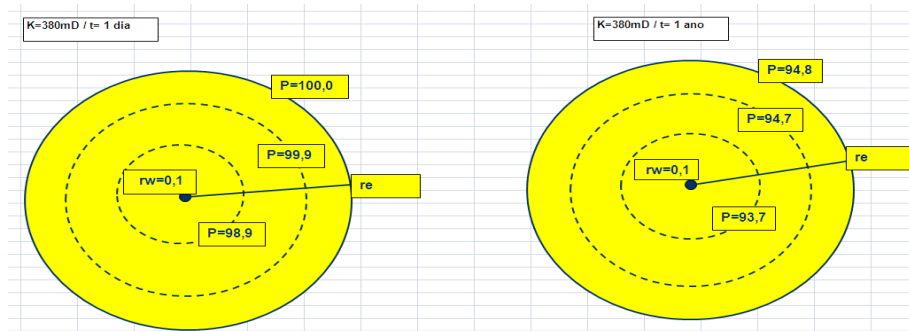
**Tabela 4:** Resultado das pressões em função do tempo e distância.

Tempo/Distância	0,1	1	10	30	365
0,1	99,4	99,4	99,3	99,0	94,2
300	99,9	99,9	99,8	99,5	94,7
1000	100,0	100,0	99,8	99,6	94,8

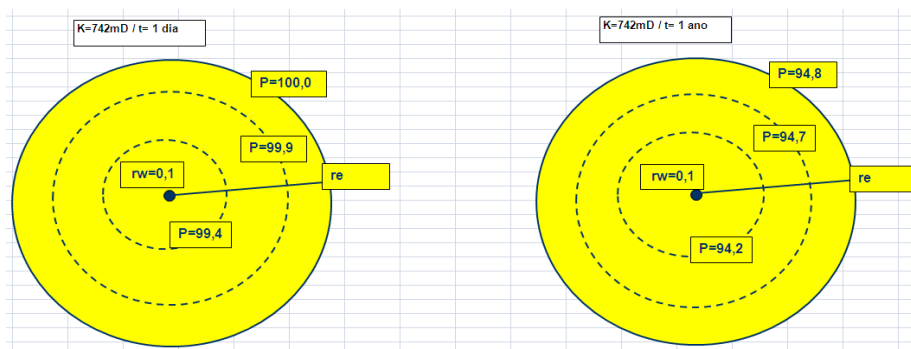
A seguir, as Figuras 4,5 e 6 mostram de forma esquemática a representação da geometria radial – regime pseudopermanente para as três diferentes permeabilidades utilizadas analisando a pressão em um dia e após um ano.



**Figura 4:** Fluxo radial – regime pseudopermanente ( $K= 92\text{mD}$ )



**Figura 5:** Fluxo radial – regime pseudopermanente ( $K= 380\text{mD}$ )



**Figura 6:** Fluxo radial – regime pseudopermanente ( $K= 742\text{mD}$ )

Com relação à influência da porosidade sobre a pressão, em todos os gráficos desenvolvidos foi utilizada igual porosidade nos cálculos, e a mesma é considerada média ( $\Phi=22\%$ ), obtendo-se assim queda de pressão alta próximo e distante do poço. Enquanto que se a porosidade utilizada fosse maior a queda de pressão seria menor. Considerando os parâmetros viscosidade e espessura (volume do reservatório), percebe-se que influencia apenas na região do poço e distante do poço, respectivamente. Em relação ao tempo, o regime torna-se pseudopermanente a partir de 1 dia em diante.

### 3. Conclusão

Diante do que foi apresentado, conclui-se que o regime de fluxo de um reservatório de petróleo influencia diretamente o comportamento de pressões. Foi possível analisar o fluxo em meio poroso, em regime pseudopermanente, com auxílio de parâmetros de reservatório como viscosidade, permeabilidade, porosidade e espessura. A partir desses parâmetros identificaram-se quais deles influenciavam a componente pressão apenas na região do poço, região do reservatório e região próxima ou distante do poço.

### 4. Referências

LEE, J., ROLLINS, J.B. & SPIVEY, J.P. Pressure Transient Testing. SPE Textbook Series, V.9.,2003;

MORAIS, R. Simulador de dano à formação, aplicado ao projeto e à execução da perfuração de poços de petróleo. 2010. 202 f. Dissertação (Mestrado – Engenharia de Petróleo) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Rio Grande do Norte. 2010.

ROSA, A.J.; CARVALHO, R.S.; XAVIER, J.A. - Engenharia de Reservatórios de Petróleo – Rio de Janeiro : Interciência : PETROBRAS, 2006;

THOMAS, J.E. - Fundamentos de Engenharia de Petróleo, 2ª edição, Editora Interciência, 2004.



## Anexo

Lista de Variáveis:

$\mu$  - viscosidade

$\Phi$  - porosidade

$B_o$  - volume inicial do reservatório

$h$  - espessura

$c_t$  - fator de compressibilidade

$q_o$  - vazão inicial

$r_w$  - raio do reservatório

$r_e$  - raio do poço

$p_i$  - pressão inicial

$k$  - permeabilidade

$t$  - tempo

$r$  - raio