

# **OBTENÇÃO DA PERMABILIDADE DE MEIOS POROSOS EM TESTES DE PERCOLAÇÃO EM ALTAS PRESSÕES**

A. Q. MAGIONI<sup>1</sup>, H. J. OLIVEIRA<sup>1</sup>, D.B.R. SILVA<sup>1</sup>, F.O. AROUCA<sup>1</sup> e J.J.R. DAMASCENO<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Química

E-mail: dricamagioni@hotmail.com, heliojuniorcom@yahoo.com,  
debora\_beatriz@hotmail.com, arouca@feq.ufu.br, damasceno@feq.ufu.br.

**RESUMO:** O entendimento do processo de percolação do fluido de perfuração em rochas-reservatório durante a prospecção de petróleo e os mecanismos envolvidos na formação do reboco da parede do poço como ação reparadora têm despertado o crescente interesse nos estudos acerca do assunto. No processo de perfuração de poços de petróleo em elevadas pressões ocorre naturalmente uma perda do fluido de perfuração que permeia o interior da formação rochosa da parede do poço, causando perdas significativas de materiais no processo. Uma alternativa eficiente para evitar tais perdas, consiste em promover a formação de uma fina camada de baixa permeabilidade, denominada de reboco, que se forma na parede do poço durante a percolação do fluido de perfuração contendo um agente obturante. O presente trabalho buscou obter a permeabilidade de meios porosos de agentes obturantes, tais como o Carbonato de Cálcio, em testes de percolação em altas pressões usando um filtro do tipo HTHP. Tal filtro consiste em um equipamento comumente utilizado na indústria de petróleo para o estudo da filtração estática. Os resultados se mostraram bastante promissores, indicando diferenças significativas na permeabilidade com aumento da pressão.

## **1. INTRODUÇÃO**

A filtração é uma operação unitária presente no processo de perfuração de poços de petróleo, neste sistema o fluido de perfuração é injetado pelo interior da coluna de perfuração e retorna a superfície pelo espaço anular existente entre a coluna de perfuração e a formação rochosa. O retorno do fluido de perfuração ocorre em um movimento ascendente (e, conseqüentemente, na direção axial), transportando o cascalho, lubrificando a broca e garantindo a pressão hidrostática no meio.

Sendo a formação rochosa um meio poroso, há uma tendência do fluido de perfuração permear para o interior dessa formação. Esta invasão de fluido de perfuração na formação rochosa é uma ação indesejada, podendo comprometer a amostragem e, conseqüentemente, a avaliação do óleo (Bourgoyne et al., 1991).

Uma maneira de evitar essa ação indesejada é o fluido de perfuração transportar agentes obturantes (e outros aditivos) até as gargantas de poros da rocha-reservatório e, com isso, em condições apropriadas, estabelecer a obstrução do meio poroso que permite a perda de materiais. A filtração do fluido de perfuração na formação rochosa contendo o agente obturante promove a formação de uma camada fina e de baixa permeabilidade denominada de reboco.

Os estudos relacionados às aplicações clássicas envolvendo a filtração com formação de torta compressível defrontam-se com a dificuldade experimental no levantamento do perfil de porosidades e da dependência entre a porosidade, pressão nos sólidos e permeabilidade (Massarani, 2002).

Neste contexto, o presente trabalho buscou em testes de percolação em altas pressões usando um filtro do tipo HTHP, onde o agente obturante é o carbonato de cálcio, obter a permeabilidade de meios porosos.

## **2. MATERIAL E MÉTODOS**

### **2.1 Material**

A avaliação resistividade média da torta, resistência do meio filtrante, porosidade, tempo de filtração e volume de filtrado, é desejável para a obtenção da permeabilidade da torta.

Neste trabalho os ensaios de separação sólido-líquido são realizados utilizando um filtro prensa de alta temperatura e alta pressão (Ofite Dynamic High-Pressure - HTHP).



Figura 1- Ofite Dynamic High-Pressure – HTHP.

O filtro mede propriedades de filtração sob diferentes condições dinâmicas de fundo de poço. Equipado com um motor de hélices, que fornece diferentes velocidades no interior de uma célula de 500 mL, podendo conferir fluxo laminar ou turbulento. A energia é conduzida ao motor, por uma correia dentada que é facilmente acessível para o um ajuste rápido ou para a remoção.

Os testes são realizados basicamente em uma cela de filtração, e um meio poroso de cerâmica (FANN), com 6 cm de diâmetro e 0,63 cm de espessura. Para a célula são transferidos 400 ml de água destilada e o agente obturante, carbonato de cálcio, a 5% de

concentração, possuindo uma densidade de  $2885 \text{ kg/m}^3$ , está foi medida no picnômetro de hélio.

Após a efetuação dos ensaios no filtro, a torta é pesada e levada para estufa na temperatura de  $70^\circ\text{C}$  por 48 horas.

Os testes foram feitos nas seguintes pressões em triplicata: 100, 200, 400, 600 e 800 KPa, e podem ser representados das seguintes formas:

Tabela 1- Índice de reconhecimento dos testes.

P= 100 KPa	Teste 1
	Teste 2
	Teste 3
P= 200 KPa	Teste 1
	Teste 2
	Teste 3
P= 400 KPa	Teste 1
	Teste 2
	Teste 3
P=600 KPa	Teste 1
	Teste 2
	Teste 3
P=800 KPa	Teste 1
	Teste 2
	Teste 3

## 2.2 MATERIAIS E MÉTODOS

Uma massa de carbonato de cálcio é previamente pesada (61,01 g) e transferida para um recipiente com 400 ml de água destilada. Logo após a mistura é colocada no filtro e agitada por 3 minutos. E a partir disso é medido o tempo a cada 20 ml de volume de filtrado retirados, para obter a permeabilidade.

A torta molhada é retirada, sua massa é aferida e depois colocada na estufa por quarenta e oito horas na temperatura de  $80^\circ\text{C}$ . Após o tempo determinado na estufa, a massa torta é aferida novamente para obter o cálculo da porosidade.

A metodologia proposta por Massarani (2002), para a determinação da concentração de sólidos, resistividade média da torta, resistência do meio filtrante, porosidade, tempo de filtração e volume de filtrado pode ser estabelecida partindo das seguintes considerações e hipóteses simplificadoras:

a) Admitir que a velocidade superficial do sólido na torta seja substancialmente menor do que aquela do líquido;

b) Torta é moderadamente compressível;

Adotando as considerações acima:

$$q_F = q_F(t) \quad (1)$$

A equação do Movimento para o fluido na torta toma a seguinte forma:

$$\frac{d}{dz} p(z, t) = - \frac{d}{dz} p_s(z, t) = \frac{\mu_F}{k} q_F(t) \quad (2)$$

Correlacionando os resultados da filtração com as condições operacionais expressas pela queda de pressão no filtro. Seja M a massa de sólido seco que compõe a torta:

$$dM = \rho_s(1 - \varepsilon) A dz \quad (3)$$

Onde A é área da superfície de filtração. Vem da equação (1):

$$-dp_s = \frac{1}{\rho_s(1-\varepsilon)k} \times \frac{\mu_F q_F}{A} dM = \alpha(\varepsilon) \frac{\mu_F q_F}{A} dM, \quad (4)$$

Sendo a resistividade local (L/M),

$$\alpha = \frac{1}{\rho_s(1-\varepsilon)k(\varepsilon)} \quad (5)$$

A torta e o meio filtrante são meios porosos percolados em série pelo fluido. A expressão para a queda de pressão no filtro pode ser estabelecida:

$$p(l, t) - p(-l_m, t) = \Delta p = \left[ \langle \alpha \rangle \frac{M}{A} + R_m \right] \mu_F q_F \quad (6)$$

A velocidade superficial do fluido e a massa de sólido seca na torta estão relacionados ao volume de filtração V, ao tempo t, à área de filtração A e à concentração de sólidos na suspensão, c:

$$q_F = \frac{1}{A} \frac{dV}{dt} \quad (7)$$

$$c \cong \frac{M}{\rho_F V} \quad (8)$$

A equação da filtração resulta da combinação das equações (6) a (8),

$$\frac{dt}{dV} = \frac{\mu_F}{A(\Delta p)} \left[ \frac{\langle \alpha \rangle V \rho_F c}{A} + R_m \right], \quad \langle \alpha \rangle = f(\Delta p) \quad (9)$$

Na maioria das situações de interesse industrial a filtração é conduzida sob queda de pressão constante:

$$\frac{t}{V} = \frac{\mu_F}{A(\Delta p)} \left[ \frac{\langle \alpha \rangle V \rho_F c}{2A} + R_m \right] \quad (10)$$

### 3.0 ANÁLISE DOS RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os dados obtidos para a construção dos perfis de Permeabilidade e de Concentração Volumétrica de Sólidos encontram-se abaixo:

Tabela 2- Valores de  $\alpha$ 

Valores de $\alpha$ (g/cm)					
Pressões	100 KPa	200 KPa	400 KPa	600 KPa	800 KPa
$\alpha$ (teste1)	$4,912 \times 10^9$	$1,402 \times 10^{10}$	$3,435 \times 10^{10}$	$5,750 \times 10^{10}$	$8,059 \times 10^{10}$
$\alpha$ (teste2)	$4,810 \times 10^9$	$1,391 \times 10^{10}$	$3,477 \times 10^{10}$	$5,570 \times 10^{10}$	$8,062 \times 10^{10}$
$\alpha$ (teste3)	$4,746 \times 10^9$	$1,363 \times 10^{10}$	$3,446 \times 10^{10}$	$5,562 \times 10^{10}$	$8,049 \times 10^{10}$
Média $\alpha$	$4,823 \times 10^9$	$1,385 \times 10^{10}$	$3,453 \times 10^{10}$	$5,627 \times 10^{10}$	$8,057 \times 10^{10}$

Os dados acima da Tabela 2 foram obtidos pela regressão linear da equação 10, com os cálculos dos coeficientes angulares, formadas pelos pontos experimentais gerados em cada teste. Conforme o esperado os valores de  $\alpha$  aumenta com a pressão.

 Tabela 3- Valores de  $\epsilon_s$ 

Valores de Concentração Volumétrica de Sólidos $\epsilon_s$					
Ps	59,3 KPa	121,4 KPa	244,8 KPa	370,8 KPa	496,8 KPa
$\epsilon_s$ (teste 1)	0,600	0,606	0,612	0,616	0,622
$\epsilon_s$ (teste 2)	0,601	0,609	0,612	0,619	0,622
$\epsilon_s$ (teste 3)	0,597	0,607	0,612	0,620	0,620
Média	0,593	0,607	0,612	0,618	0,621

Usando os dados da Tabela 3 foi deduzido uma equação constitutiva, equação 11, que modela o comportamento da pressão no sólido ( $P_s$ ) em função da concentração volumétrica de sólidos ( $\epsilon_s$ ), com a ajuda do software Statistica 7.0, com um  $R^2 = 0.9993$ .

$$P_s = 3,653 \times 10^8 \epsilon_s^{32,7} - 155,39 \quad (11)$$

A Tabela 3 possui os dados de concentração volumétrica de sólidos, que com tais resultados e a densidade do sólido obtido com o picnômetro de gás hélio,  $2,885 \text{ g/cm}^3$ , podemos calcular a permeabilidade ( $K_s$ ) a partir da equação 5, os valores são listados na Tabela 4.

Com os dados da Tabela 4 foi chegou-se a equação constitutiva, equação 12, que modela o comportamento da pressão no sólido ( $P_s$ ) em função da permeabilidade ( $K_s$ ), com a ajuda do software Statistica 7.0, com um  $R^2 = 0.9995$ .

$$P = 3,69 \times 10^{-8} K^{-0,7982} \quad (12)$$

Tabela 4- Valores de Ks

Valores de Permeabilidade Ks (m <sup>2</sup> )					
Pressões	100 KPa	200 KPa	400 KPa	600 KPa	800 KPa
K	$1,795 \times 10^{-12}$	$6,372 \times 10^{-13}$	$2,587 \times 10^{-13}$	$1,615 \times 10^{-13}$	$1,136 \times 10^{-13}$

O perfil de Pressão versus Concentração Volumétrica de Sólidos comportou-se como esperado, a pressão varia como uma função exponencial da concentração volumétrica de sólidos. A concentração de sólidos mostrou-se pouco sensível em relação a variação de pressão na faixa estudada, que foi entre 100 a 800 KPa.

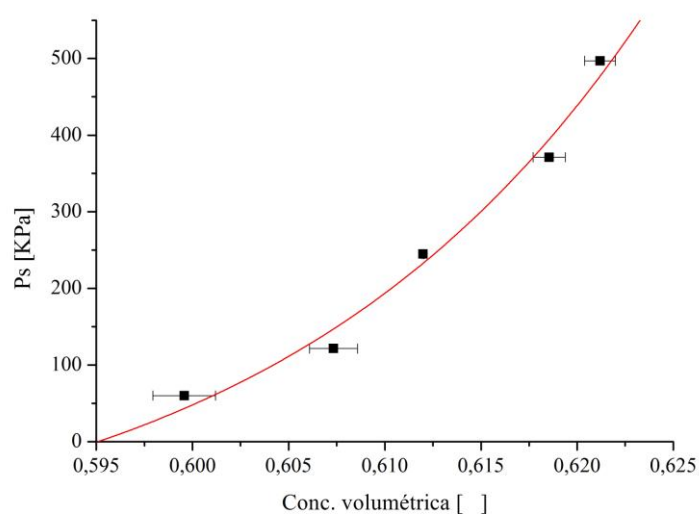


Figura 2- Perfil de Pressão versus Concentração Volumétrica de Sólidos.

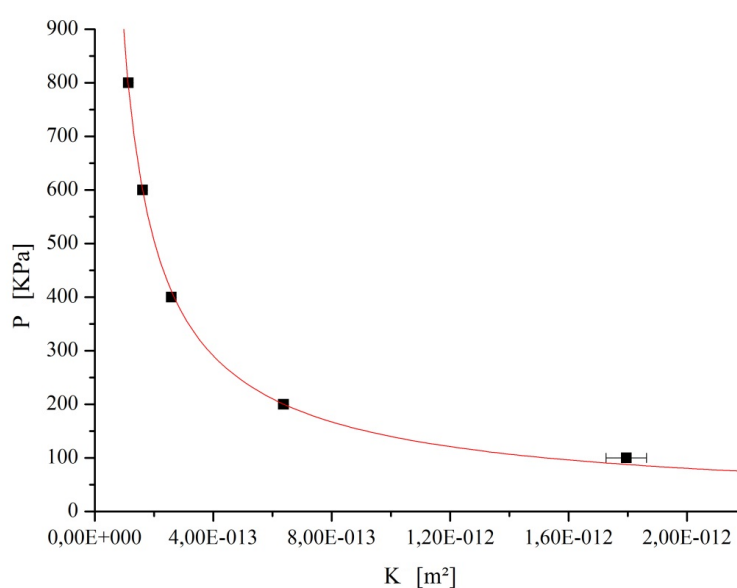


Figura 3- Distribuição de Pressão versus Permeabilidade.

## 4.0 CONCLUSÃO

A técnica utilizada com o filtro HPHT é uma alternativa bastante viável por ser uma técnica que responde a dados replicados precisamente. Com os dados pode-se obter equações constitutivas para pressão no sólidos e permeabilidade com ajustes satisfatórios que podem ser utilizados para modelar processos de separação sólido-líquido.

Pode-se concluir também que a concentração de sólidos tem pouca variação com a pressão, contrária á permeabilidade que varia expressivamente com a pressão para o carbonato de cálcio utilizado na faixa de pressão de 100 a 800 KPa.

## 5.0 AGRADECIMENTOS

“Agradecemos a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pelos recursos concedidos no Projeto de Participação Coletiva em Eventos Técnicos-Científicos (PCE-00082-14)”.

## 6.0 REFERÊNCIAS

MASSARANI, G. *Fluidodinâmica em Sistemas Particulados*. Rio de Janeiro: E-Papers Serviços Editoriais, 2002.

FERREIRA, A.S; MASSARANI, G.; *Physico-mathematical modeling of crossflow filtration*, Chemical Engineering Journal, 111, 199-204, 2005.

BOURGOYNE, A.T., MILLHEIM, K.K., CHENEVERT, M.E., YOUNG JR, F.S., *Applied drilling engineering*, Society of Petroleum Engineers, Richardson, TX, USA, Second Print, citado por: Scheid, C.M.; Martins, A.L.; Massarani, G.; “Escoamento axial de fluidonão-Newtoniano em duto com paredes permeáveis”, 1991.

ARAÚJO, C.A.O; *Estudo da Filtração em Geometria Cilíndrica*. Tese de Mestrado, UFRRJ, 2010.