

DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DA FILTRAÇÃO CRUZADA EM GEOMETRIA CILÍNDRICA

¹ Sérgio da Cruz Magalhães Filho, ² Cristiano Agenor Oliveira de Araújo, ³ Luís Américo Calçada, ³ Cláudia Miriam Scheid.

¹ Bolsista de iniciação Científica CNPq/UFRRJ, discente do curso de Engenharia Química

² Aluno de mestrado do curso de pós graduação em engenharia química, DEQ/UFRRJ

³ Professor Associado da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro UFRRJ

^{1,2,3} DEQ/IT/UFRRJ. BR 465, Km 7, Seropédica, RJ. CEP: 23890-000.

E-mail: scheid@ufrj.br

RESUMO - A minimização da invasão do fluido de perfuração é um ponto chave na perfuração de rochas reservatório. Invasão excessiva em poços exploratórios pode comprometer seu processo de avaliação. Esta ocorre durante o contato do fluido de perfuração com a formação, ocasionando uma filtração dinâmica na parede do poço. Este trabalho teve como objetivo comparar parâmetros envolvidos no processo da filtração cruzada e plana de suspensões de carbonato de cálcio. Na primeira etapa do estudo foram adquiridos diferentes materiais porosos, fabricados com matérias primas distintas, com geometria similar e diferentes medidas de diâmetro interno, externo e comprimento. Quanto à geometria, a mesma foi cilíndrica para simular as condições reais de operação e gerar a componente radial onde a filtração ocorre. Posteriormente, construiu-se uma unidade piloto composta basicamente por uma bomba de deslocamento positivo, medidores de pressão diferencial, tanque de suspensão agitado, tubos, válvulas e conexões, onde os meios filtrantes foram instalados e testados. Para a filtração plana construiu-se uma segunda unidade experimental, de menores proporções, considerada de bancada, composta basicamente por vidrarias, mangueiras e uma bomba de vácuo. Também foi utilizado na filtração plana o filtro HPHT para gerar resultados e posteriormente serem comparados. Os experimentos foram conduzidos em diferentes concentrações de suspensão e pressão de filtração. Os parâmetros de resistividade e resistência do meio filtrante obtidos nestas unidades foram comparados com os resultados fornecidos pela filtração plana convencional.

Palavras-Chave: petróleo, escoamento, hidráulico

INTRODUÇÃO

O completo domínio da tecnologia de exploração de petróleo é sem dúvida um objetivo claro a ser seguido pelas grandes corporações petrolíferas. Em um mundo globalizado e competitivo, a melhoria de tal processo é uma busca incessante que tem como objetivo maior lucratividade e competitividade. O panorama nacional é bastante promissor, com recentes descobertas de grandes reservas de petróleo, o Brasil pode ascender na competitividade mundial, afinal energia é o que move um país e a exploração de petróleo é o ícone da energia mundial.

Durante uma das etapas de perfuração de poços de petróleo ocorre a invasão do fluido de perfuração na formação rochosa. Esta invasão se dá durante seu contato com a formação quando está retornando pela região anular, formada entre a parede do poço e a formação, até a superfície, vide figura 1.

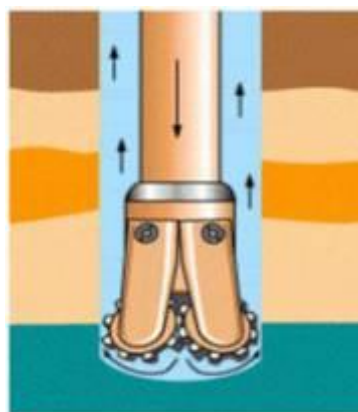
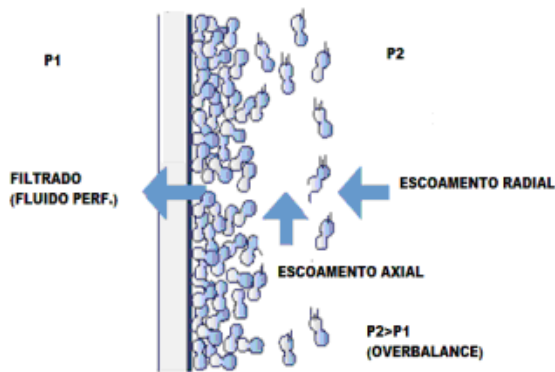


Figura 1 – Região Anular Formada entre a Coluna de Perfuração e a Formação Rochosa.

Este processo resulta assim em uma filtração dinâmica na parede do poço com formação de torta e um volume de filtrado (fluido percolado para dentro da rocha), esta filtração dinâmica é conhecida como filtração cruzada, vide figura 2.



<http://people.clarkson.edu>

Figura 2 – Processo de Filtração Cruzada com Formação de Torta nas Paredes da Formação

O modelo matemático proposto abaixo para a filtração cruzada (1) foi proposta por FERREIRA & MASSARANI (2005).

$$t = \frac{\mu_F}{(\Delta p)_f} \left\{ \alpha \varepsilon_s \rho_s r_t \sum_{n=1}^{\infty} \frac{b^n}{2n(n+1)r_t^{2n}} v^n + R_m \right\} v \quad (1)$$

onde, $b = \frac{2c\rho_F r_t}{\varepsilon_s \rho_s}$

t- tempo de filtração; μ_F - viscosidade do fluido; A- área de filtração; Δp - queda de pressão; ε - porosidade da torta; R_m - resistência meio filtrante; α - resistividade da torta; ρ_F - densidade do fluido; v- volume de filtrado por área de filtração; r_t - raio da torta; c- concentração da suspensão.

Para a filtração plana convencional, o filtro folha e HPHT foram utilizados. Esses modos de filtração consistem em filtrar uma suspensão de carbonato de cálcio agitada em um recipiente, sendo a força motriz para o processo de filtragem, a diferença de pressão provocada por uma bomba de vácuo, filtro folha, e sob pressão, filtro HPHT, acoplada a linha. A equação da filtração plana descrita abaixo pode ser encontrada em MASSARANI (2002).

$$\frac{t}{V} = \frac{\mu}{A(\Delta p)} \left[\frac{\langle \alpha \rangle C \rho_1 V}{2A} + R_m \right] \quad (2)$$

onde, $\langle \alpha \rangle$ - resistividade média da torta; V- volume de filtrado, e os demais variáveis já descritas na equação 1.

O cerne deste trabalho é a comparação entre os parâmetros dos diferentes tipos de filtração e conhecer como estes se comportam.

MATERIAIS E MÉTODOS

Unidades Experimentais

Objetivando comparar os parâmetros obtidos tanto para a filtração cruzada como para a plana, parâmetros estes que são a permeabilidade da torta formada e a resistência do meio filtrante utilizado, duas unidades experimentais foram construídas. Nas figuras 3 e 4 é mostrada a unidade experimental da filtração cruzada. Para a filtração cruzada os dados experimentais foram obtidos na unidade experimental que opera em circuito fechado composto por tubos de PVC. O sistema é composto por uma linha com tubos de 2,54 cm onde se encontra o filtro para recolher o volume de filtrado. O filtro construído a partir do tecido de filtração (TECITEC) possui um diâmetro de 2,54 cm, espessura de 0,1 cm e comprimento de 100 cm. O líquido que não permeia o filtro, chamado de retido, segue até o final da linha para retornar ao tanque. Uma outra linha com tubulação de 5,08 cm constitui-se em um By-pass com o objetivo de controlar a vazão de filtrado. O sistema encontra-se conectado a um tanque de 500 litros. O deslocamento da suspensão de carbonato de cálcio na unidade foi feito através de uma bomba de deslocamento positivo de 1,5 cv (GEREMIA PUMPS). As medidas de perda de carga foram feitas com um transdutor de pressão (SMAR) calibrado na seguinte faixa: 0 a 35 mmHg. As vazões volumétricas foram determinadas por técnica gravimétrica, com triplicata de cada ponto.

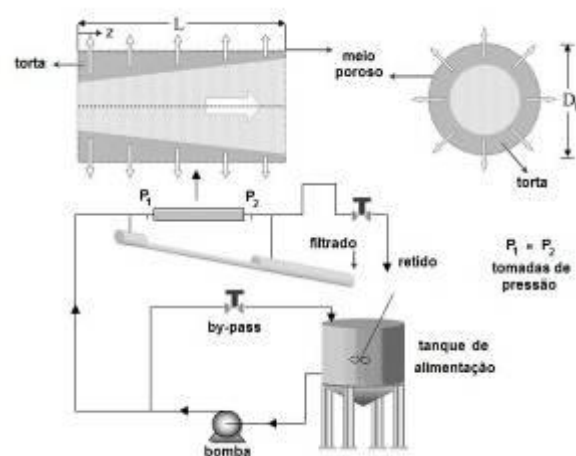


Figura 3 – Desenho Esquemático da Unidade Experimental de Filtração Cruzada.



Figura 4 – Foto da Unidade Experimental de Filtração Cruzada.

Nas figuras 5 e 6 é mostrada a unidade de filtração plana que é composta de um reservatório de suspensão (Becher), com capacidade de 2 litros, ligado a uma bomba de vácuo através de mangueiras. O sistema também constava de agitador magnético (placa de agitação) para garantir a homogeneização da suspensão. Um septo filtrante (filtro folha) constituído de tecido de filtração (Tecitec) foi utilizado para realizar a filtração. Uma proveta graduada de 0 a 1000 mililitros foi utilizada entre o filtro folha e a bomba de vácuo com o objetivo de quantificar o volume de filtrado de acordo com o tempo de filtração. Um suporte também foi utilizado para fixar o filtro folha e o vacuômetro.

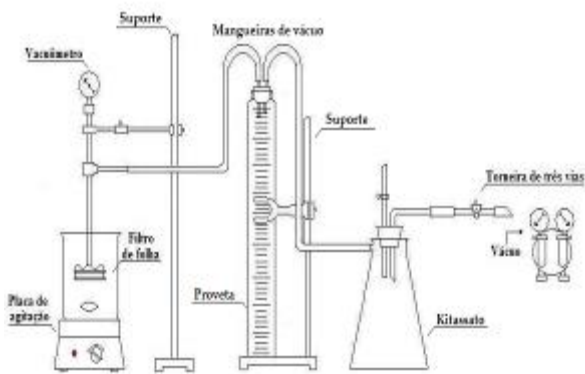


Figura 5 – Desenho Esquemático da Unidade Experimental de Filtração Plana



Figura 6 – Foto da Unidade Experimental de Filtração Plana

Uma avaliação secundária que este trabalho traz é a avaliação de qual meio poroso seria mais adequado para ser usado no processo da filtração cruzada. Três diferentes materiais foram testados, um em aço sinterizado, outro em fibras de polipropileno e outro feito de tecido de filtração. Nas figuras 7, 8, e 9 são mostrados estes materiais porosos, respectivamente.



Figura 7 – Material Poroso Constituído de Aço Inox Sinterizado.



Figura 8 – Material Poroso Constituído de Fibras de Polipropileno.



Figura 9 – Material Poroso Constituído de Tecido de Filtração.

O objetivo do meio filtrante é reter o carbonato de cálcio e estabilizar o fluxo de permeado.

A filtração plana HPHT é um modo de filtração plana realizada sob pressão. Este equipamento, FANN (FILTER PRESS HPHT) é constituído basicamente por uma cela de filtração, uma linha pressurizada e um meio poroso de cerâmica (FANN), com 6 cm de diâmetro e 0,63 cm de espessura. Os resultados experimentais foram obtidos com o auxílio desse equipamento que se encontra no centro de pesquisas da Petrobrás.

Procedimento experimental

Os experimentos foram realizados nas duas unidades experimentais com uma concentração fixa e diferentes pressões. Os primeiros experimentos foram conduzidos na unidade construída para a filtração cruzada e, posteriormente, no filtro folha de laboratório (filtração a vácuo).

Para o processo da filtração cruzada, a sistemática de realização do experimento consistia simplesmente em regular a vazão de “by-pass” através da válvula de modo a obter uma determinada leitura de pressão na alimentação. Com o equipamento em circuito fechado, aguardavam-se alguns instantes para que o processo entrasse em regime. A suspensão de carbonato de cálcio ($\rho = 2,7 \text{ g/cm}^3$ e granulometria compreendida entre 2-44 μm) utilizada nos experimentos foi preparada adicionando o carbonato em uma determinada quantidade de água previamente calculada. Fazia-se a suspensão circular na linha produzindo um volume de filtrado (volume advindo do escoamento radial) e de retido (volume advindo do escoamento axial). O volume de filtrado foi quantificado com o tempo de filtração. A pressão de filtração foi medida pelo manômetro e as alíquotas de suspensão foram recolhidas durante a filtração para a determinação da concentração. A vazão de retido foi medida por técnica gravimétrica com triplicata para cada ponto. A temperatura também

foi aferida para cada experimento. Uma fração da torta formada foi retirada ao final de cada experimento para a determinação da porosidade. O tecido de filtração era lavado após cada experimento e utilizado novamente no experimento posterior em ambos os processos de filtração. A pressão de filtração foi medida através de um manômetro de Bourdon posicionado imediatamente antes do meio filtrante. O diferencial de pressão ao longo do meio poroso foi aferido por um transdutor de pressão (SMAR) calibrado na faixa de 0 – 35 mmHg.

Realizaram-se três experimentos na filtração cruzada com o objetivo de determinar a resistividade da torta α , e a resistência do meio filtrante R_m . Os experimentos foram realizados com uma concentração de 2%, 4% e 6% (p/p) de carbonato de cálcio e a pressão de filtração de 1 kgf/cm^2 . O volume de filtrado com o tempo foi trabalhado em uma planilha do Excel, e plotados em um gráfico t/v (tempo por volume de filtrado por área de filtração, s/cm^2) versus v (volume de filtrado por área de filtração, cm^3/cm^2). O objetivo do gráfico t/v versus v é a obtenção do coeficiente angular e linear, para a determinação de α e R_m , respectivamente.

Para o processo da filtração cruzada é necessário desprezar os pontos iniciais do experimento, permanecendo apenas a reta final descrita pelo gráfico de t/v versus v , onde realmente está ocorrendo o processo de filtração. A equação 1 foi utilizada para o cálculo de α e R_m .

Com relação aos experimentos no filtro folha, a suspensão foi homogeneizada com o auxílio de agitador magnético (placa de agitação) e o septo filtrante, filtro folha, foi introduzido no reservatório. Uma proveta graduada de 0 a 1000 mililitros foi colocada entre o filtro folha e a bomba de vácuo com o objetivo de quantificar o volume de filtrado com o tempo de filtração. A bomba a vácuo foi acionada e o processo de filtração iniciou-se. O volume de filtrado foi quantificado através da proveta, o tempo de filtração foi anotado e a pressão de filtração foi fornecida pelo vacuômetro. A temperatura foi medida para cada experimento. Uma fração da torta formada também foi retirada ao final do experimento para a determinação da porosidade. Através da equação 2, descrita para a filtração plana (filtro folha), é possível também obter os valores de $\langle\alpha\rangle$ e R_m com base nos dados experimentais.

Para a filtração plana HPHT, os volumes de filtrado de acordo com o tempo de filtração foram obtidos com o auxílio do equipamento FANN. A suspensão foi preparada analogamente ao processo já descrito na filtração cruzada. O aparato era conectado a uma linha pressurizada a qual foi possível controlar a pressão para cada um dos experimentos.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para os Meios Filtrantes

Por questões de ordem operacional, o meio filtrante utilizado foi o tecido de filtração. O aço sinterizado apresentou colmatação precoce, menos de 1 minuto de experimento era necessário para que isso ocorresse, e o filtro de polipropileno apresentou um tempo muito longo para que o sistema entrasse em regime permanente. Para este último, a causa deste efeito se dá na espessura de sua parede ser muito grande, algo em torno de 1 cm. Para o meio filtrante utilizado, o mesmo apresenta boa facilidade de lavagem e manuseio, sua parede possui 1 mm de espessura sendo o tempo para estabilização curto. Por sua porosidade ser relativamente alta, o processo de colmatação é lento, o que permite longas durações de teste.

Para a Filtração Cruzada

Na figura 10 é mostrado o gráfico resultante dos experimentos na unidade de filtração cruzada.

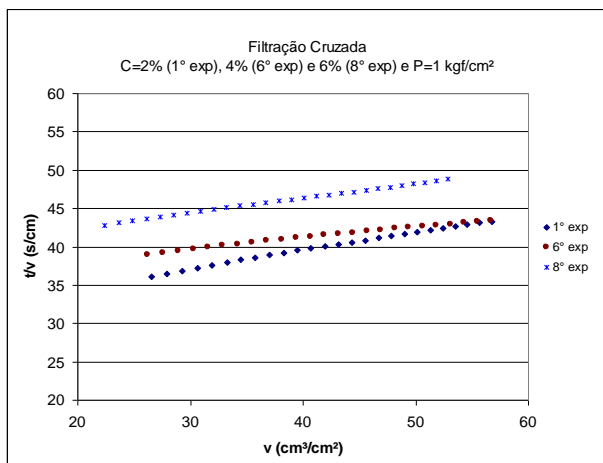


Figura 10 – Gráfico dos Resultados Experimentais para os Ensaios na Filtração Cruzada.

Na figura 10 são mostrados diferentes valores para a relação t/v . Tendo em vista que todos os experimentos foram realizados no mesmo intervalo de tempo, é notório que há então uma diferença no volume de filtrado para cada um deles.

A tabela 1 abaixo mostra os valores de α e R_m calculados pela equação 1, a partir dos valores dos coeficientes angulares e lineares extraídos para cada um dos nove experimentos. Um valor médio para α e R_m também é apresentado na tabela.

Tabela 1 – Valores de α e R_m para os Experimentos na Filtração Cruzada.

Exp.	α (cm/g)	R_m (cm ⁻¹)
1	$2,01 \times 10^9$	$2,90 \times 10^9$
6	$3,69 \times 10^8$	$3,64 \times 10^9$
8	$1,22 \times 10^9$	$3,32 \times 10^9$
Média	$1,20 \times 10^9$	$3,28 \times 10^9$

Os valores de resistividade da torta e de resistência do meio filtrante são os valores de coeficientes angulares e lineares para cada uma das retas dos experimentos expostos na figura 10.

Para a Filtração Plana

A figura 11 mostra o gráfico e suas respectivas tendências resultantes dos experimentos da unidade da filtração plana do tipo folha.

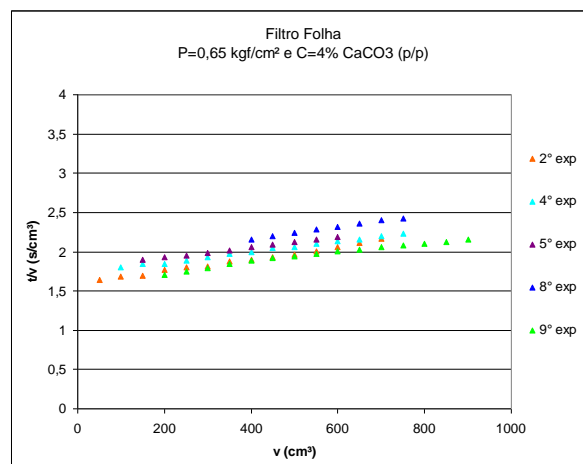


Figura 11 – Gráfico dos Pontos Experimentais para os Ensaios na Filtração Plana (Filtro Folha).

Os experimentos relativos à filtração plana, em filtro tipo folha, como mostrado na figura 11, foram realizados com pressão em torno de $0,65 \text{ kgf/cm}^2$ e concentração em torno de 4%. A escolha dessas condições de pressão e concentração foi feita para que se tornasse possível a comparação com os experimentos da filtração cruzada. Os resultados mostram boa reprodutibilidade. Seus valores para coeficientes lineares e angulares não diferem de forma significativa.

Os valores dos parâmetros α e R_m , e também a média dos mesmos, são apresentados na tabela 2.

Tabela 2 – Valores de α e R_m para os Experimentos na Filtração Plana.

Exp.	α (cm/g)	R_m (cm ⁻¹)
2	$7,61 \times 10^9$	$6,04 \times 10^9$
4	$6,04 \times 10^9$	$5,65 \times 10^9$
5	$5,97 \times 10^9$	$6,44 \times 10^9$
8	$4,74 \times 10^9$	$4,46 \times 10^9$
9	$4,15 \times 10^9$	$5,16 \times 10^9$
<i>Média</i>	$5,70 \times 10^9$	$5,55 \times 10^9$

Quanto a filtração HTHP os pontos resultantes dos experimentos realizados no centro de pesquisas da petrobrás, são mostradas na figura 12.

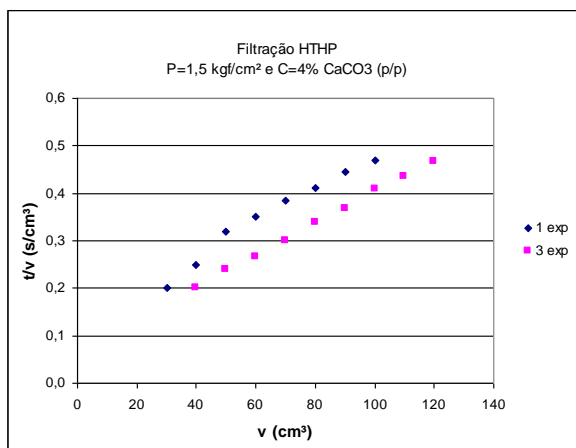


Figura 12 – Gráfico dos Pontos Experimentais para os Ensaio na Filtração Plana (Filtro HTHP).

Fica claro a partir dos gráficos dos diferentes modos de filtração que os volumes de filtrados são diferentes, gerando obviamente, diferentes relações de t/v .

Os valores dos parâmetros α e R_m , e também a média dos mesmos, são apresentados na tabela 3.

Exp.	α (cm/g)	R_m (cm ⁻¹)
1	$2,32 \times 10^{10}$	$4,67 \times 10^8$
2	$2,02 \times 10^{10}$	$2,94 \times 10^8$
<i>Média</i>	$2,17 \times 10^{10}$	$3,80 \times 10^8$

Os resultados para a resistividade da torta e resistência do meio filtrante provenientes da filtração cruzada e plana são divergentes. Os valores para α chegam a ser três vezes maior na filtração plana que na cruzada e, os valores de R_m , duas vezes. É importante lembrar que, como já citado anteriormente, os experimentos para filtração cruzada e plana não foram feitos exatamente com os mesmos valores de concentração e pressão.

CONCLUSÃO

Os valores de resistividade da torta (α) e de resistência do meio filtrante (R_m) foram determinados com a aplicação dos dados experimentais nas equações para ambos os modos de filtrações. Verificou-se que os parâmetros obtidos nos ensaios de filtração diferem entre si, indicando que o modo de filtração influencia no processo de formação da torta.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

FERREIRA, A.S; MASSARANI, G.; Physico-mathematical modeling of crossflow filtration, Chemical Engineering Journal, 111, 199-204, 2005.
 MASSARANI, G.; "Fluidodinâmica em Sistemas Particulados", 2a edição, Rio de Janeiro, E-Papers Serviços Editoriais, 2002.

AGRADECIMENTOS

Este projeto foi apoiado pela FINEP, PETROBRAS e CNPq.