

AValiação DE PARÂMETROS NO ESTUDO DA FILTRAÇÃO PLANA E CRUZADA

Cláudia Miriam Scheid¹, Luís Américo Calçada¹, Cristiano Agenor O. de Araújo¹, Sérgio da Cruz Magalhães Filho¹, André Leibsohn Martins²

¹Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Química, BR 465, Km 7, Seropédica, RJ, CEP: 23890-000, E-mail: calcada@ufrj.br e scheid@ufrj.br

²PETROBRAS S.A./CENPES/PDP/TEP, Av. Hum Quadra 07, Ilha do Fundão, Rio de Janeiro, CEP 21494-900, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

RESUMO

Na perfuração e completação de poços de petróleo, o fluido de perfuração ao escoar pela região anular invade a formação levando ao crescimento de uma torta na parede do poço, podendo comprometer a avaliação do reservatório, durante a testemunhagem, e causar danos irreversíveis ao mesmo. Dentro deste contexto, foram construídas duas unidades de filtração, uma cruzada e outra plana, para avaliação dos parâmetros da filtração como resistividade média da torta, resistência do meio filtrante, tempo de filtração e volume de filtrado. Os estudos foram conduzidos com suspensões de carbonato de cálcio. A unidade de filtração cruzada foi constituída de um tanque com agitação, tubos de PVC, bomba de deslocamento positivo, sendo utilizado tecido de filtração como meio filtrante. Em uma segunda etapa, foi proposto um modelo para avaliação do processo de filtração com formação de torta nas paredes do meio filtrante a partir do escoamento axial e radial do fluido. O modelo baseia-se em equações fenomenológicas a partir de balanços das propriedades conservativas massa e quantidade de movimento que levam à equação da filtração. Para o escoamento radial, direção onde ocorre a filtração, o escoamento é considerado no regime de Darcy. O modelo permite considerar o efeito do perfil de pressão na direção axial no processo de filtração e ainda, é possível levar em conta os efeitos de compressibilidade da torta a partir de equações constitutivas para a porosidade e pressão dos sólidos. Como restrição ao crescimento da torta, considera-se o efeito da tensão cisalhante oriunda do escoamento na direção axial, realizado a partir de testes de clássicos na mecânica dos solos. A estabilidade da torta na filtração cruzada está associada à quebra do equilíbrio de Coulomb na superfície da torta em contato com a suspensão.

Perfuração, invasão e formação rochosa.

1. INTRODUÇÃO

O completo domínio da tecnologia de exploração de petróleo é sem dúvida um objetivo a ser seguido pelas grandes corporações petrolíferas. Em um mundo globalizado e competitivo, a otimização 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, a energia move um país e a exploração de petróleo é o ícone da energia mundial.

Objetivando estudar o processo da filtração cruzada que está presente nas etapas de perfuração de poços de petróleo, este trabalho dispõe-se a avaliar a unidade experimental construída, os meios filtrantes utilizados para simular a porosidade da matriz rochosa e os resultados provenientes do processo da filtração em si, além de apresentar um modelo para a avaliação do processo de filtração com formação de torta. A avaliação consiste na coleta dos dados experimentais como pressão de filtração, volume de filtrado, diferencial de pressão no meio poroso, concentração da suspensão e vazão de retido.

A filtração ocorre com formação de torta nas paredes do meio poroso, com escoamento nas direções axial e radial, sendo, a filtração, presente na direção radial como mostra a figura 1. O processo ocorre na região anular entre a parede da formação rochosa, que nesse caso é o meio poroso em questão, e a parede externa da coluna de perfuração, figura 2.

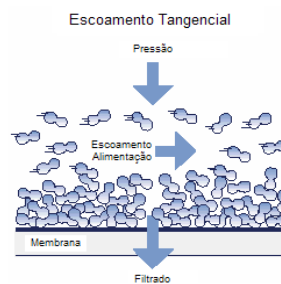


Figura 1: O processo da filtração cruzada.

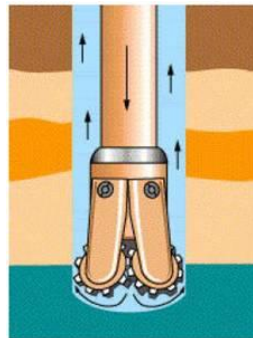


Figura 2: Região anular onde ocorre a filtração cruzada.

O ponto chave do projeto é o conhecimento quantitativo do fenômeno para a proposta de condições operacionais ótimas, visando minimizar a invasão de fluido na formação rochosa, o que pode danificar irreversivelmente o poço em questão. O conhecimento de novas técnicas operacionais que possam proporcionar mais segurança, agilidade e produtividade ao processo, são de extrema importância para o desenvolvimento da tecnologia de perfuração.

2. REVISÃO DA LITERATURA

A filtração cruzada resulta do escoamento axial de uma suspensão através de um duto, o qual as paredes são constituídas de um material filtrante, conduzindo a formação de um depósito sobre a superfície e a produção de um filtrado que percola através da mesma. Caracteristicamente, o escoamento do filtrado com o tempo pode estabilizar, em uma operação longa, como consequência da ação do mecanismo que limita a formação da torta. A filtração com formação de torta constitui-se num problema de mecânica dos fluidos no qual o fluido escoar através de um meio poroso, a torta, que cresce e se deforma continuamente.

A filtração cruzada é empregada na indústria como clarificante de suspensões e na concentração de suspensões em uma larga faixa de aplicações que empregam a tecnologia de membranas. A operação de preparação e perfuração dos poços de óleos envolve essencialmente o mesmo fenômeno que prevalece na filtração cruzada com micro-membranas. É o escoamento axial de uma suspensão não-Newtoniana no espaço

anular entre um cilindro de rotação e a formação do petróleo. Nessa situação, as propriedades e a espessura do depósito que é formado permitem o controle da invasão danificante do fluido de perfuração na formação do petróleo (FERREIRA & MASSARANI, 2005).

As propriedades da torta dependem de inúmeros fatores de difícil quantificação, como da físico-química da suspensão sólido-fluido, da colmatação causada pela migração das partículas de pequenas dimensões através da torta e da história do processo deformatório imposta pelo escoamento do fluido sobre a matriz sólida, o que significa que a configuração e as condições de operação do filtro afetam as características da torta nele produzida (MASSARANI, 1985).

A maior dificuldade na análise científica da filtração não reside propriamente na solução das equações não lineares resultantes da aplicação dos princípios básicos de conservação para este problema transiente e de contorno móvel, e sim da informação imperfeita e duvidosa transmitida pelas equações constitutivas. Esta análise evidencia, no entanto, os pontos obscuros da filtração, ajudam a interpretar e quantificar alguns fenômenos e permite vislumbrar as novas tendências no campo da separação sólido-fluido.

A determinação experimental dos parâmetros da filtração plana à pressão constante pode ser feita através da equação 1 (MASSARANI, 2002), onde os valores de $\langle \alpha \rangle$ e R_m resultam da dependência linear entre t/V e V ,

$$\frac{t}{V} = \frac{\mu_F}{A(\Delta p)} \left[\frac{\langle \alpha \rangle C \rho_F V}{2A} + R_m \right] \quad (1)$$

onde t é o tempo de filtração, μ_F a viscosidade do fluido, A a área de filtração, Δp a queda de pressão, $\langle \alpha \rangle$ a resistividade média da torta, ρ_F a densidade do fluido, V o volume de filtrado, C a concentração da suspensão e R_m a resistência do meio filtrante.

Um modelamento físico-matemático da filtração cruzada em coordenadas cilíndricas é proposto por FERREIRA & MASSARANI (2005), que resulta do escoamento axial da suspensão em tubos, que foram feitos com um meio poroso usado na filtração industrial. O modelamento é feito com base na equação da continuidade e do movimento para as fases, e teve como objetivo estabelecer a relação entre o campo de pressão, o escoamento do filtrado e a espessura da torta ao longo do processo. O modelo considera o período de crescimento da torta, com a concomitante redução na taxa de filtração e o estágio na qual a espessura da torta e o escoamento do filtrado pode estabilizar ao longo da operação, na qual o filtro funciona como um espessante.

O passo inicial da filtração cruzada é caracterizado pelo crescimento da torta que é formada próximo ao meio filtrante. As equações de conservação de massa para a fase e do movimento do fluido, na forma da equação de Darcy, conduz a equação para a filtração cruzada sobre uma superfície cilíndrica (FERREIRA & MASSARANI, 2005).

$$\frac{dt}{dv} = \frac{\mu_F}{(\Delta p)_f} \left\{ \alpha \varepsilon_s \rho_s r_i \ln \frac{r_i}{\left[r_i^2 - \frac{2c \rho_F r_i v}{\varepsilon_s \rho_s} \right]^{1/2}} + R_m \right\} \quad (2)$$

onde t é o tempo de filtração e v o volume de filtrado por unidade de área de filtração,

$$v = \frac{1}{2\pi r_i} \frac{dv}{dz} \quad (3)$$

A resistividade α e a fração volumétrica de sólidos ε_s , médias em cada sessão do filtro, variam não somente com a pressão de filtração no local, mas também com a estrutura da torta que é depositada.

A espessura da torta e o volume total de filtrado podem ser calculados através das expressões (4) e (5).

$$\ell(z, t) = r_i - \left[r_i^2 - \frac{2c r_i v(z, t)}{\varepsilon_s \rho_s} \right]^{1/2} \quad (4)$$

$$V(t) = \pi D_i \int_0^L v(z, t) dz \quad (5)$$

Integrando a equação (2) a relação entre volume de filtrado com o tempo de filtração quando o fluido que percola é Newtoniano pode ser escrita pela equação 6.

$$t = \frac{\mu_F}{(\Delta p)_f} \left\{ \alpha \varepsilon_s \rho_s r_i \sum_{n=1}^{\infty} \frac{b^n}{2n(n+1)r_i^{2n}} v^n + R_m \right\} v \quad (6)$$

Onde,

$$b = \frac{2c \rho_F r_i}{\varepsilon_s \rho_s}$$

t é o tempo de filtração, μ_F a viscosidade do fluido, α a resistividade da torta, ε a porosidade da torta, Δp a queda de pressão, c a concentração da suspensão, ρ_F e ρ_s a densidade do fluido e sólido respectivamente, r_t o raio do tubo, v o volume de filtrado e R_m a resistência do meio filtrante.

3. Modelo Proposto

Modelamento matemático da filtração cruzada para fluido não-Newtoniano

Assumindo que o fluido não Newtoniano segue o modelo da potência, ele pode ser representado pela Equação (7).

$$\tau(\lambda) = M \cdot \lambda^n \quad (7)$$

onde, τ é a tensão cisalhante, M o índice de consistência e n o índice de comportamento do fluido e λ^* a taxa de deformação.

A viscosidade efetiva μ_{ef} pode ser calculada pela Equação (8). Sendo a taxa de deformação característica λ^* para os escoamentos no meio poroso filtrante e na torta, segundo a Equação (9).

$$\mu_{ef} = \frac{\tau(\lambda^*)}{\lambda^*}, \quad (8)$$

$$\lambda^* = \frac{q}{\sqrt{k}} \quad (9)$$

onde k é a permeabilidade.

A partir das Equações (7) e (9) em (8), pode-se calcular a viscosidade efetiva do fluido em função da velocidade q_r , segundo a Equação (10).

$$\mu_{ef} = M \cdot \left(\frac{q_r}{\sqrt{k}} \right)^{n-1} \quad (10)$$

A equação do movimento para o fluido que percola a torta na direção radial é dada pela Equação (11).

$$-\frac{dP}{dr} = \frac{\mu_{ef}}{k} \cdot q_r \quad (11)$$

A equação do movimento para o fluido que percola o meio filtrante,

$$-\frac{dP}{dr} = \frac{\mu}{k_m} \cdot q_m \quad (12)$$

Pode-se estabelecer uma relação entre a concentração da suspensão e o raio r que caracteriza o início da torta e o raio r_m que caracteriza o raio interno do meio filtrante.

$$c = \frac{\varepsilon_s \cdot \rho_s \cdot L \cdot \pi \cdot (r_m^2 - r^2)}{(2 \cdot \pi \cdot r_m \cdot L) \cdot v(z, t) \cdot \rho} = \frac{\varepsilon_s \cdot \rho_s \cdot L \cdot (r_m^2 - r^2)}{(2 \cdot r_m \cdot L) \cdot v(z, t) \cdot \rho} \quad (13)$$

onde c é a concentração da suspensão, ε_s é a porosidade da torta, ρ_s é a densidade do sólido, r_m é o raio do meio filtrante e r a distância do centro do tubo até o início da torta e $v(z, t)$ é a variação do volume de filtrado por unidade de área de filtração, segundo a equação

$$v(z, t) = \frac{dV(t)}{dA}, \text{ ver figura 3.}$$

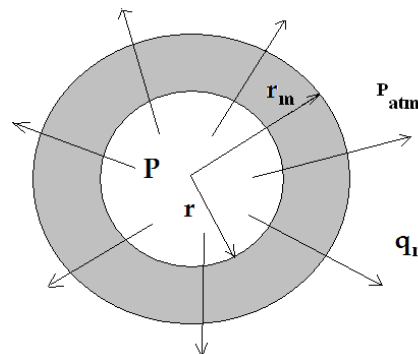


Figura 3: Esquema representativo da filtração com formação de torta de espessura $e = r_m - r$.

Da Equação (13) é possível obter uma expressão para o raio r da torta em função de z e t

$$r = \left(r_m^2 - \frac{2 \cdot c \cdot \rho \cdot r_m \cdot v(z,t)}{\varepsilon_s \cdot \rho_s} \right) \quad (14)$$

Substituindo a Equação (10) na Equação (11), obtém-se a Equação (15).

$$-\frac{dP}{dr} = \frac{M}{k^{\frac{n+1}{2}}} \cdot q_r^n \quad (15)$$

Definindo segundo a Equação (16),

$$q_r = \frac{dQ_f}{2 \cdot \pi \cdot r \cdot dz} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot r} \frac{dQ_f}{dz} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot r} \cdot Q_f^* \quad (16)$$

Levando a Equação (16) em (17),

$$-\frac{dP}{dr} = \frac{M}{k^{\frac{n+1}{2}}} \cdot \left(\frac{Q_f^*}{2 \cdot \pi \cdot r} \right)^n \quad (17)$$

Rearranjando Equação (17) em r, obtém-se a Equação (18).

$$-dP = \frac{M}{k^{\frac{n+1}{2}}} \cdot \left(\frac{Q_f^*}{2 \cdot \pi} \right)^n \frac{dr}{r^n} \quad (18)$$

Integrando a Equação (18) em r, obtém-se a Equação (19).

$$P - P_m = \frac{M}{k^{\frac{n+1}{2}}} \cdot \left(\frac{Q_f^*}{2 \cdot \pi \cdot r_m} \right)^n \cdot r_m^n \cdot \left(\frac{r_m^{1-n} - r^{1-n}}{1-n} \right) \quad (19)$$

Substituindo a Equação (14) na Equação (19) e sabendo que $\frac{Q_f^*}{2 \cdot \pi \cdot r_m} = \frac{dv(z,t)}{dt}$, na parede interna do meio filtrante obtém-se a Equação (20).

$$P - P_m = \frac{M}{k^{\frac{n+1}{2}}} \left(\frac{dv}{dt} \right)^n \cdot r_m^n \cdot \left(\frac{r_m^{1-n} - \left(r_m^2 - \frac{2 \cdot c \cdot \rho \cdot r_m \cdot v}{\rho_s \cdot \varepsilon_s} \right)^{1-n}}{1-n} \right) \quad (20)$$

Adotando a mesma metodologia para a Equação (12), obtém-se a perda de carga para o meio filtrante.

$$P_m - P_{atm} = \frac{M}{k_m^{\frac{n+1}{2}}} \left(\frac{dv}{dt} \right)^n \cdot r_m^n \cdot \left(\frac{r_{ext}^{1-n} - r_m^{1-n}}{1-n} \right) \quad (21)$$

Somando as Equações (20) e (21), obtém-se a equação para a perda de carga na filtração, Equação (22).

$$\Delta P_f = \frac{M}{k^{\frac{n+1}{2}}} \left(\frac{dv}{dt} \right)^n \cdot r_m^n \cdot \left(\frac{r_m^{1-n} - \left(r_m^2 - \frac{2 \cdot c \cdot \rho \cdot r_m \cdot v}{\rho_s \cdot \varepsilon_s} \right)^{1-n}}{1-n} \right) + \frac{M}{k_m^{\frac{n+1}{2}}} \left(\frac{dv}{dt} \right)^n \cdot r_m^n \cdot \left(\frac{r_{ext}^{1-n} - r_m^{1-n}}{1-n} \right) \quad (22)$$

A espessura da torta pode ser obtida pela equação abaixo.

$$e(z,t) = r_m - \left[r_m^2 - \frac{2 \cdot c \cdot r_m \cdot v(z,t)}{\varepsilon_s \rho_s} \right]^{1/2}$$

Definindo,

$$f_T(v) = r_m^n \left(\frac{r_m^{1-n} - \{r(v)\}^{1-n}}{1-n} \right) \quad \text{e} \quad f_M = r_m^n \left(\frac{r_{ext}^{1-n} - r_m^{1-n}}{1-n} \right).$$

Pode-se chegar a expressão que permite avaliar fluxo de filtrado como uma função do tempo

$$\frac{dv(t)}{dt} = \sqrt[n]{\frac{\Delta P_f}{\frac{M}{k \frac{n+1}{2}} \cdot f_T(v(t)) + \frac{M}{k_m \frac{n+1}{2}} \cdot f_M}} \quad (23)$$

O volume de filtrado em cada tempo t pode ser obtido pela integração da Equação (24) a partir dos dados de $v(z,t)$ obtidos pela integração da Equação (23).

$$V(t) = \pi D_t \int_0^L v(z,t) dz \quad (24)$$

4. Materiais e Métodos

4.1 Aparato experimental

4.1.1 A Unidade Piloto para a filtração cruzada

Para o estudo da filtração cruzada, construiu-se uma unidade piloto como mostra o esquema na figura 4. Na figura 5 pode ser vista uma foto da unidade montada no laboratório. A unidade consistia basicamente de um reservatório de suspensão (capacidade total de 500 litros) ligado a uma bomba de deslocamento positivo (1,5 cv – Weatherford) que alimentava uma linha contendo o filtro e uma corrente de “by-pass”. O tanque era dotado também de um agitador mecânico de forma a manter a suspensão homogênea dentro do reservatório. A descarga do “by-pass” e o volume de filtrado recolhido foram direcionadas para o próprio reservatório mantendo assim um circuito fechado. O controle da pressão de filtração desejada para cada experimento foi feito com o auxílio de um manômetro de Bourdon instalado imediatamente antes do início do filtro. Para fixar uma determinada pressão de filtração, manipulava-se a vazão de suspensão presente na corrente de “by-pass”. A queda de pressão no filtro foi medida com o auxílio de transdutores de pressão (SMAR), como mostra a figura 6, calibrados na faixa de 0-36 mmHg, 0-350 mmHg e 0-1800 mmHg. A tubulação empregada para a construção da unidade era de PVC (Tigre) e com diâmetro de 1 polegada.

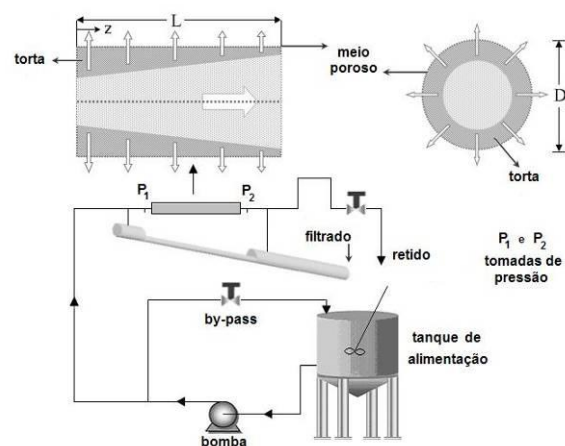


Figura 4: Esquema representativo da unidade piloto.



Figura 5: Foto da unidade experimental equipada para a filtração



Figura 6: Medidores de pressão diferencial (SMAR).

Para a determinação dos parâmetros da filtração cruzada como resistividade da torta e resistência do meio filtrante, objetivo desse trabalho, em cada experimento foi necessário medir as seguintes variáveis: volume de filtrado, tempo de filtração, pressão de filtração, concentração da suspensão, temperatura da suspensão, vazão do retido e porosidade da torta.

4.1.2 Unidade de bancada para a filtração plana

Um esquema da unidade de bancada para a filtração plana pode ser vista na figura 7. A unidade construída consistia 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.

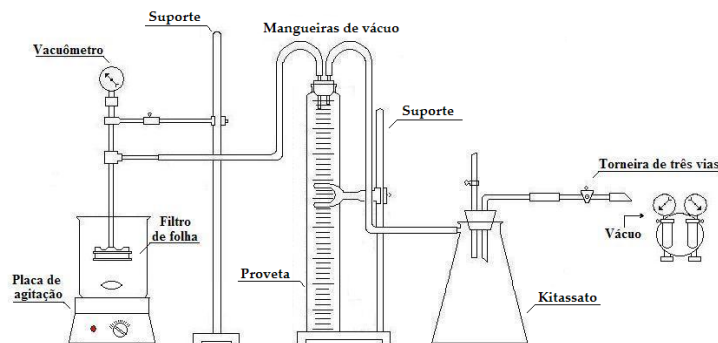


Figura 7: Esquema da unidade de bancada do filtro folha.

Uma foto da unidade montada para a filtração em filtro folha pode ser mostrada na figura 8.



Figura 8: Foto da unidade de bancada do filtro folha.

Todos os resultados apresentados ao longo desse trabalho foram obtidos com a unidade descrita acima. Foram feitos também ensaios em filtro folha com o objetivo de determinar parâmetro experimental α , resistividade da torta, e R_m , resistência do meio filtrante.

Para cada experimento foi necessário medir as seguintes variáveis: volume de filtrado, tempo de filtração, pressão de filtração, concentração da suspensão, temperatura da suspensão e porosidade da torta.

4.1.3 Medidas de concentração e vazão

As concentrações de sólidos nas correntes foram medidas pela técnica gravimétrica. Durante cada experimento, recolhiam-se três amostras de cada uma das três correntes, em recipientes previamente pesados. Estas amostras eram pesadas e depois levadas a uma estufa para secar. As amostras secas e frias eram pesadas novamente. Desta forma, conhecendo-se a quantidade de água e de sólidos residuais calculava-se a concentração, em peso, de cada corrente.

A vazão mássica da corrente de retido para a filtração cruzada foi obtida através da coleta de suspensão durante um determinado tempo. Repetia-se este procedimento três vezes com o intuito de obter um valor médio.

4.1.4 Material particulado.

A distribuição granulométrica do carbonato de cálcio utilizado para preparar a suspensão foi determinada pelo analisador de partículas MALVERN – MASTERSIZE 2000. A distribuição do tamanho de partículas pode ser avaliada pela figura 9.

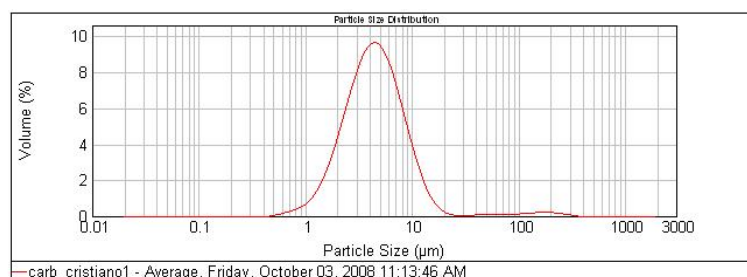


Figura 9: Distribuição do tamanho das partículas para o carbonato de cálcio.

O valor da densidade do carbonato de cálcio foi de 2,7 g/cm³ (PERRY, 1953).

4.1.5 Determinação da porosidade

Através do recolhimento de uma fração da torta, após o experimento para ambos os processos de filtração, determinou-se a porosidade da mesma pela seguinte relação:

$$\varepsilon = \frac{\text{volume de vazios}}{\text{volume total}}$$

onde, o volume de vazios é representado pelo volume de água presente na estrutura da torta recolhida.

4.1.6 Os meios filtrantes

Foram adquiridos diferentes meios porosos fabricados com diferentes matérias primas e dimensões. Partiu-se do princípio que o meio poroso deveria ter forma geométrica cilíndrica, para que a filtração ocorresse na direção radial, simulando assim a mesma condição existente na filtração durante o processo de perfuração de poços. O primeiro material adquirido foi constituído de aço inox sinterizado como mostra a figura 10a. O princípio da sinterização consiste na fundição de granulometria de materiais metálicos formando assim uma peça sólida, porém porosa pela existência de vazios entre os grãos. A peça utilizada tinha diâmetro interno de $\frac{3}{4}$ de polegadas e 20 centímetros de comprimento, com porosidade de 1 Darcy e 0,4 centímetros de espessura de parede. O segundo material adquirido era constituído de fibras prensadas de polipropileno fabricadas especificamente para tratamento de água, conforme mostrado na figura 10b, com porosidade variável entre 1 e 50 micrômetros, comprimento de 50 centímetros, espessura da parede entre 1 cm e diâmetro interno de 1 polegada. Por terceiro e último, utilizou-se tecidos de filtração fabricados pela TECITEC mostrado na figura 10c, feitos em polietileno e costurados em forma cilíndrica com diâmetro interno de 1 polegada, com espessura de parede de aproximadamente 0,1 centímetros e comprimento de 1 metro.

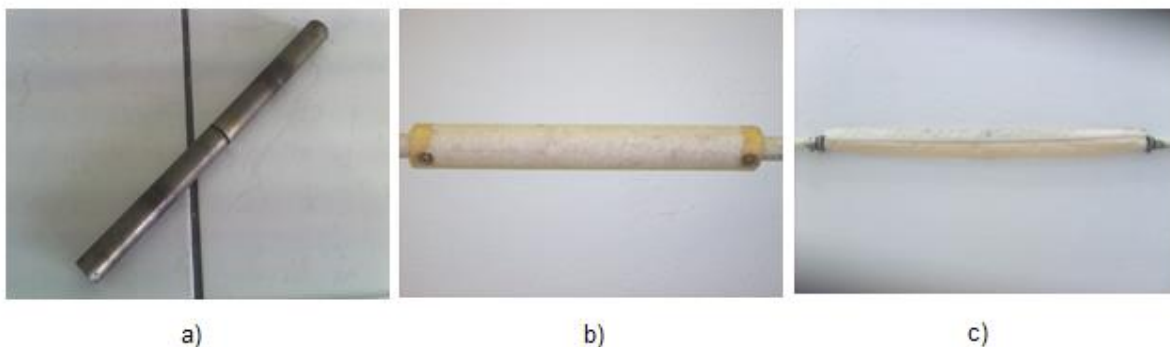


Figura 12: a) Meio poroso sinterizado de aço inox, b) Meio poroso em polipropileno e detalhe da tomada de pressão e c) Meio poroso composto por tecido de filtração.

Dentre os meios filtrantes acima testados, o que foi utilizado para gerar os resultados parciais, presentes nesse trabalho, foi o tecido de filtração da empresa TECITEC, pois, o mesmo, apresentou menor tempo para a estabilização de ΔP e vazão de filtrado em experimento com água pura.

4.2 Metodologia

Os experimentos foram realizados em dois modelos de filtro 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 à vácuo). O experimento iniciava com o estabelecimento da concentração de sólidos na alimentação pela adição do material sólido a uma massa de água conhecida.

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, aguardava-se alguns instantes para que o processo entrasse em regime. Fez-se a suspensão circular na linha produzindo um volume de filtrado e de retido. 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 ao final do experimento por técnica gravimétrica com triplicata para cada ponto. A temperatura também foi medida para cada experimento. Uma fração da torta formada foi retirada ao final do experimento para a determinação da porosidade. O tecido de filtração foi lavado após cada experimento e utilizado novamente no experimento posterior em ambos os processos de filtração.

Realizaram-se 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 a 4 % p/p de carbonato de cálcio e as pressões de filtração variáveis de acordo com os experimentos na faixa de 1,0 a 2,0 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) versus v (volume de filtrado por área de filtração). 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 6 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 à 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. Com a equação 1, 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.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Filtração cruzada

A partir dos dados de vazão de filtrado com o tempo de filtração determinou-se, através da equação 6 com $n=1$, o valor de α e R_m , para cada um dos experimentos, utilizando-se o trecho linear do gráfico. Os resultados obtidos para os parâmetros foram então alimentados na equação 2 que foi integrada numericamente utilizando o *software* MATLAB. A equação 2 também foi resolvida utilizando-se um valor médio para a resistividade da torta, obtido a partir dos sete experimentos realizados. As figuras 11 e 12 mostram uma comparação entre os resultados obtidos para as duas simulação realizadas e os dados experimentais obtidos em 2 ensaios. Como se pode observar, o modelo apresenta a mesma tendência dos dados experimentais, o que também ocorre para os demais experimentos, embora em alguns casos com desvios maiores que os apresentados nas figuras. Serão realizados mais experimentos para validar a metodologia utilizada.

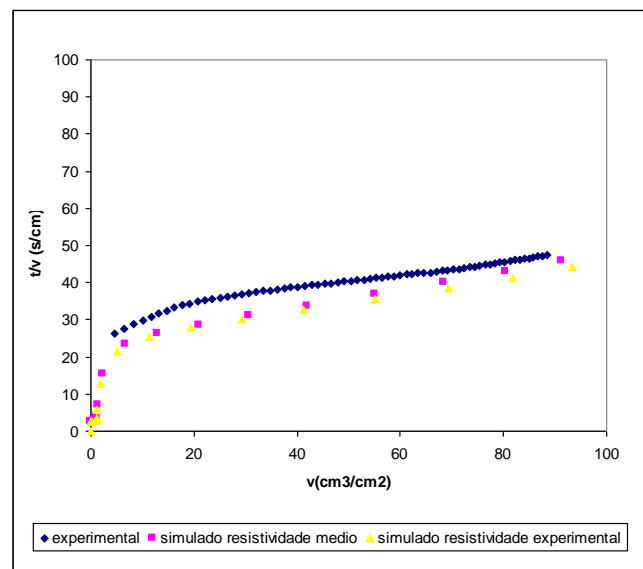


Figura 11: Experimento de filtração cruzada realizado com concentração de 4,3% em p/v, com $\Delta P = 1,5 \text{ kgf/cm}^2$.

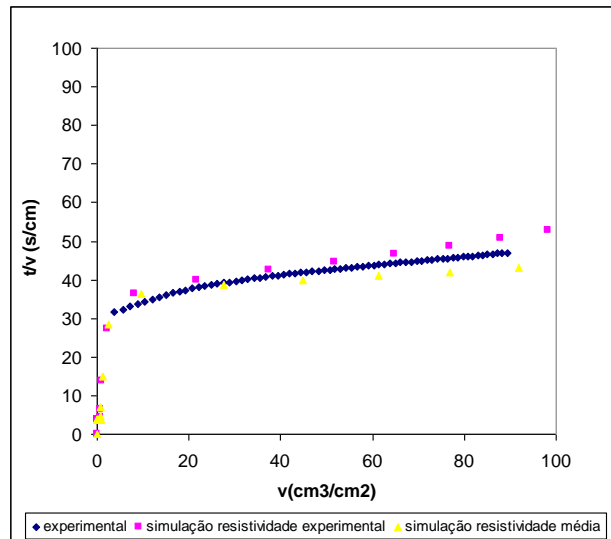


Figura 12: Experimento de filtração cruzada realizado com concentração de 5,9% em p/v, com $\Delta P = 1,0 \text{ kgf/cm}^2$.

5.2) Filtro folha

Com o objetivo de se verificar a possibilidade de se obter os parâmetros em filtração convencional. Foram realizados ensaios de filtração em filtro folha, os resultados obtidos para estes testes são apresentados na figura 13.

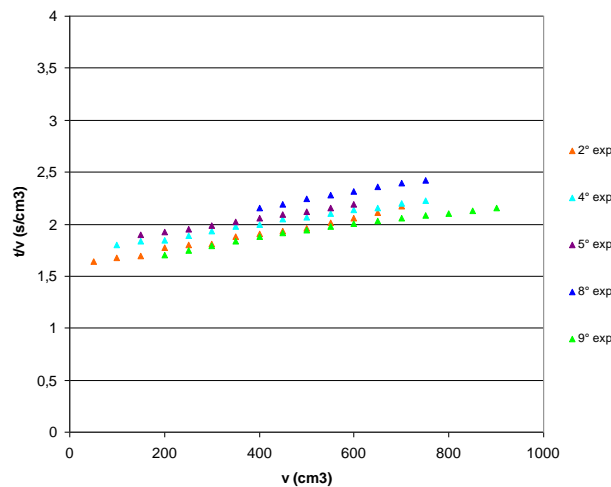


Figura 13: Gráfico representando os pontos experimentais para os ensaios na filtração plana.

Os experimentos relativos à filtração plana, como mostrado na figura 13, foram realizados com pressão em torno de $0,65 \text{ kgf/cm}^2$ e concentração em torno de 4%. Os valores dos parâmetros α e R_m , e também a média dos mesmos, são apresentados na tabela 2 para estes experimentos.

Tabela 1: Valores de α e R_m para os experimentos na filtração plana.

Experimento	$\alpha \text{ (cm/g)}$	$R_m \text{ (cm}^{-1}\text{)}$
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	$4,15 \times 10^9$	$5,16 \times 10^9$
Média	$(5,70 \pm 1,34) \times 10^9$	$(5,55 \pm 0,83) \times 10^9$

Pode-se perceber pela tabela que os desvio experimentais são da ordem tanto para resistividade quanto para a resistência do meio filtrante.

A título de comparação foram realizados ensaio de filtração cruzada com condições semelhante a do filtro folha obtendo-se como resultado médio $\alpha = 1,22 \times 10^9 \text{cm/g}$ e $R_m = 3,32 \times 10^9 \text{cm}^{-1}$

Os resultados para a resistividade da torta e resistência do meio filtrante provenientes da filtração cruzada e plana são divergentes, indicando que a resistividade da torta varia com o tipo de filtração empregado. Tais observações experimentais, informam que não é possível utilizar os dados provenientes da filtração plana para a implementação de um modelo matemático, que possa prever o comportamento da filtração cruzada.

5. CONCLUSÃO

Foram construídas unidades de filtração cruzada e plana para o desenvolvimento dos experimentos. Um modelo matemático para o cálculo do volume de filtrado com o tempo de filtração, quando o fluido tem comportamento não-Newtoniano, foi apresentado. Os valores de resistividade da torta e da resistência do meio filtrante foram determinados com a aplicação dos dados experimentais nas equações para a filtração. Foi observado que os resultados da integração da equação 2 fornecem a tendência dos dados de filtração cruzada obtidos experimentalmente. Verificou-se que os parâmetros obtidos nos ensaios de filtro folha são diferentes dos obtidos na filtração cruzada indicando que o processo de filtração influencia a resistência da torta formada.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradece a Petrobras, CNPq e FINEP o apoio financeiro recebido.

7. REFERÊNCIAS

- FERREIRA, A.S; MASSARANI, G.; Physico-mathematical modeling of crossflow filtration, Chemical Engineering Journal, 111, 199-204, 2005.
- MASSARANI, G.; “Filtração”, Revista Brasileira de Engenharia, Set. 1985.
- MACCABE, W.L., SMITH, J.C.; “Unit Operations of Chemical Engineering”, McGraw-Hill, Inc., Nova Iorque, 3a edição, p. 938, 1976.
- MASSARANI, G.; “Fluidodinâmica em Sistemas Particulados”, 2a edição, Rio de Janeiro, E-Papers Serviços Editoriais, 2002.
- MASSARANI, G., SILVA TELLES, A., DAMASCENO, J.J.R., “Evaluation of the Compression-Permeability Behavior of Sediments Subject to Small Deformations”, Anais do 6th World Filtration Congress, Nagoya, Japão, maio, 91-95, 1993.
- PERRY, J.H.; “Chemical engineer’s handbook”, R 660.2, P 463, 1953.
- SHIRATO, M., KOBAYASHI, K., TANIMURA, M., “Analysis of Constant Pressure Filtration of Compressible Cakes on Cylindrical Surface”, Kagaku, 37, 1, 76.
- SILVA TELLES, A., MASSARANI, G.; “Compactação de meios deformáveis: Uma descrição segundo a mecânica do contínuo”, Anais do X ABCM, Rio de Janeiro, dezembro, vol.2, 13-16, 1989.