



## **PROPOSTA DE UM SIMULADOR DE FILTRAÇÃO ESTÁTICA VISANDO A OTIMIZAÇÃO DO CONTROLE E MONITORAMENTO DA PERFURAÇÃO DE POÇOS DE PETRÓLEO**

RODRIGO F.O. BORGES<sup>1\*</sup>, LUÍS A. CALÇADA<sup>2</sup>, CLÁUDIA M. SCHEID<sup>2</sup>, BRUNO F. OECHSLER<sup>3</sup>, VERÔNICA M.A. CALADO<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Laboratório de Escoamento de Fluidos Giulio Massarani, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro

<sup>2</sup>Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro

<sup>3</sup>Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de Santa Catarina

<sup>4</sup>Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro

\*e-mail: rodrigoborgeseq@ufrj.br

**RESUMO** – A perda de circulação e a invasão de filtrado são fenômenos comumente observados durante a etapa de perfuração de poços de petróleo e podem levar a danos irreversíveis à formação. O controle desses processos é realizado a partir do uso de redutores de filtrado e monitoramento da taxa de crescimento da torta. Nesse aspecto, a literatura apresenta modelos de filtração baseados na lei de Darcy, como a teoria simplificada por exemplo, objetivando-se a obtenção da permeabilidade, a porosidade e a espessura da torta. Neste trabalho foi proposta uma nova metodologia que permite prever as propriedades da torta locais e médias, volume de filtrado e espessura de torta a partir dos dados de formulação do fluido e condições da operação desejada, considerando as equações fenomenológicas da fluidodinâmica de sistemas particulados. A metodologia adotada foi validada com dados experimentais de filtrações estáticas isobáricas em distintas pressões. O modelo desenvolvido é robusto e pode ser associado a sistemas de detecção, diagnóstico e monitoramento de controle de poços, baseado na obtenção de dados de perda de fluido em tempo real.

### **INTRODUÇÃO**

A perda de circulação e a invasão de filtrado são fenômenos comumente observados durante a etapa de perfuração de poços de petróleo. Enquanto a primeira está relacionada com elevadas taxas de perda de fluido, induzidos artificialmente pelo fraturamento ou pela propagação de fraturas já existentes na formação rochosa (Bourgoyne *et al.*, 1991), a segunda origina-se de um processo natural decorrente da manutenção de um gradiente de pressão entre o poço e a formação rochosa (Di Jiao e Sharma, 1992). Nesse caso, as partículas em suspensão no fluido de perfuração são retidas na superfície do reservatório poroso, o qual permite apenas a passagem majoritária da

fase fluida e de particulado fino arrastado pelo escoamento.

Ao longo do processo de perfuração, tem-se a formação de uma camada fina de reboco semipermeável (torta de filtração) na superfície da formação rochosa, que reduz a taxa de filtração até um valor estacionário constante (Calçada *et al.*, 2011).

Desde os estudos exploratórios de Weber e Hershey (1926) e/ou Ruth *et al.* (1933), diversos pesquisadores dedicaram seus esforços a desenvolver modelos matemáticos e metodologias de análise visando prever de forma acurada o volume de filtrado e características das tortas de filtração a partir do conhecimento da composição da suspensão e de condições operacionais bem definidas.

Conhecida como a abordagem mais clássica para a modelagem do processo de

filtração, a teoria simplificada foi concebida como um paralelo aos processos de condução térmica/elétrica, considerando a soma de duas resistências ao escoamento do sistema particulado. Essas resistências, a torta de filtração (meio poroso formado pela retenção de sólidos) e o meio filtrante, são descritas por equações constitutivas como a lei de Darcy (Massarani e Silva Telles, 2001). Embora aplicável para diversos sistemas na indústria global, a teoria simplificada detém algumas restrições ao uso que, quando desprezadas, pode levar a uma perda considerável de precisão do modelo e até mesmo inviabilizar uma operação. Dentre as restrições observadas, duas delas podem ser destacadas: a hipótese do comportamento newtoniano para a suspensão e a consideração de uma torta de filtração pré-formada, já consolidada ao início do processo. Trabalhos como aqueles desenvolvidos por Tiller (Tiller, 1953; 1955; 1958; Tiller e Cooper, 1960; Tiller e Crump, 1977) e Shirato (Shirato e Okamura, 1959; Shirato *et al.*, 1971; Shirato, Aragaki e Iritani, 1980) demonstraram que a dinâmica de construção e desenvolvimento da torta de filtração são fundamentais para a correta caracterização e discriminação do comportamento da curva de filtração. Adicionalmente, pesquisas desenvolvidas por Kozicki (Kozicki e Tiu, 1967; Kozicki, Tiu e Rao, 1968; Kozicki, 1990; Kozicki e Kuang, 1994) e Iwata *et al.* (2019) indicam a importância da consideração das características não-newtonianas na modelagem de sistemas que envolvam esse tipo de fluido.

O surgimento de modelos empíricos, como o modelo proposto por Dewan e Chenevert (1993; 2001), trouxe uma nova abordagem para a investigação do fenômeno da filtração, possibilitando a determinação da taxa de filtração e de características das tortas de filtração de forma dinâmica, em função do conhecimento de poucas propriedades dos sistemas de processo. Recentemente, Borges *et al.* (2021) e Azevedo (2021) propuseram modelos fenomenológicos para o processo de filtração estática unidimensional, considerando fluidos não-newtonianos cuja relação tensão-taxa de cisalhamento é descrita pelos modelos Power-Law e Herschel-Buckley, respectivamente. A partir da adoção de uma pressão de referência, Borges *et al.* (2021)

foram capazes de obter dados confiáveis e precisos para as propriedades da torta de filtração, como concentração média de sólidos, permeabilidade e compressibilidade, assim como de taxa de filtração e volume de filtrado, utilizando dados experimentais de volume de filtrado e porosidade média da torta em diferentes corridas isobáricas e condições de processo. Raheem e Vipulanandan (2019) propuseram um modelo complexo baseado na teoria de infiltração-consolidação de tortas de filtração, comparando os resultados simulados com aqueles obtidos com experimentos realizados em condições segundo o padrão internacional (API).

Apesar da existência majoritária de modelos determinísticos para quantificação do volume de filtrado, nos últimos anos, esforços têm sido feitos para adaptar modelos estocásticos ao processo. Nesse segmento, Kim e Hoek (2002) apresentaram uma metodologia para determinação da distribuição radial de porosidades locais em tortas já consolidadas ao final da filtração, utilizando um modelo probabilístico a partir da aplicação da técnica com simulações de Monte Carlo. Essa abordagem se mostrou eficiente na descrição de interações inter partículas e no estabelecimento/consolidação da torta de filtração e se mostra como uma metodologia promissora, já que permite a consideração das propriedades da suspensão e das condições de processo.

Gul e Van Oort (2020) investigaram a utilização de técnicas de *machine learning* e *deep learning* como *Random Forest* (RF), XGBoost (XGB), máquina de vetores de suporte (SVM) e percepção multicamadas (MLP) para correlacionar o volume de filtrado obtido, utilizando fluidos de perfuração base água e base óleo, com medidas reológicas, de densidade e de temperatura. Os autores obtiveram bons resultados na correlação do volume final de filtrado (após 30 minutos de teste), com erros de predição da ordem de 0,83 mL/30 min. Embora a aplicação de técnicas de *machine learning* seja promissora, algumas restrições devem ser levadas em consideração: a) necessita-se de uma grande quantidade de dados disponíveis para treinamento das redes de aprendizado, assim como o monitoramento em tempo real da variável de interesse (volume de

filtrado), o qual depende de considerações logísticas de processo; e, b) campanhas investigativas de efeitos de  $n$  variáveis devem ser realizadas de forma a mapear corretamente as relações associadas a elas, não somente individuais, mas também combinadas entre si.

Embora já centenária, a pesquisa da filtração continua necessária para melhor compreensão de efeitos de variáveis no processo e para a obtenção de modelos confiáveis de previsão das propriedades da torta e volume de filtrado, com validade em uma maior faixa operacional. Com foco na indústria 4.0 e na crescente visão de automação de processos em campos *off-shore*, para redução de risco humano e operacional, novos modelos são desejados para implementação em sistemas inteligentes de controle e diagnóstico. Baseado em dados em tempo real de perda de fluido, um algoritmo/simulador de volume de filtrado baseado apenas na composição de fluidos de perfuração e em condições de operação do poço é essencial para o sucesso da operação autônoma e/ou assistida.

Este trabalho teve como objetivo desenvolver as equações fenomenológicas da fluidodinâmica de sistemas particulados, objetivando-se obter um modelo dinâmico para a filtração estática. O modelo em questão é capaz de prever a dinâmica de formação da torta (espessura e demais propriedades) e o decaimento do fluxo de filtrado ao longo do tempo. Adicionalmente, a robustez do modelo permite a sua associação a sistemas de detecção, diagnóstico e monitoramento de controle de poços, baseado na obtenção de dados de perda de fluido em tempo real.

## MODELAGEM MATEMÁTICA E ESTIMAÇÃO DE PARÂMETROS

A etapa de modelagem e simulação propõe-se a desenvolver um modelo capaz de atuar como uma rotina auxiliar ao sistema de diagnóstico proposto em projeto paralelo, de forma a verificar se o fluido real está alcançando a performance desejada na etapa de projeto do fluido de perfuração. Neste cenário, o software atua em duas vertentes: (a) com dados de volume de filtrado simulado sendo confrontados com os dados em tempo real de perda de fluido, de forma a avaliar a

performance do fluido; e (b) a obtenção de dados para as propriedades da torta de filtração formada no poço a partir de dados de perda de fluido em tempo real, durante o processo de perfuração.

A Figura 1 apresenta um esquema do processo de filtração unidimensional com formação de torta.

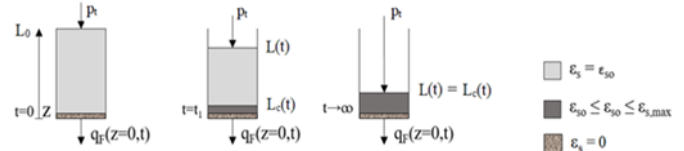


Figura 1: Etapas para a filtração unidimensional a pressão constante.

Considerando o sistema apresentado na Figura 1, a Equações 1 e 2 são referentes à aplicação da equação da continuidade para um sistema particulado, para as fases fluida e sólida, respectivamente. Adicionalmente, a Equação 3 é obtida a partir da equação do movimento na fase fluida. Algumas hipóteses simplificadoras que foram adotadas nesse desenvolvimento são:

- H0: Fluido incompressível;
- H1: Escoamento unidirecional;
- H2: Fluido Newtoniano e forças viscosas desprezíveis;
- H3: Efeitos de aceleração desprezíveis;
- H4: Forças de campo desprezíveis;
- H5: Meio filtrante com permeabilidade constante.

$$\frac{\partial}{\partial t} \varepsilon_F = - \frac{\partial}{\partial z} q_f \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \varepsilon_s = - \frac{\partial}{\partial z} q_s \quad (2)$$

$$q_F - \frac{k(p_s)}{\eta} \frac{\partial}{\partial z} p_F = 0 \quad (3)$$

sendo  $\varepsilon_F$  a porosidade ou fração volumétrica da fase fluida,  $q_f$  a velocidade superficial do fluido;  $\varepsilon_s$  a fração volumétrica de sólidos;  $q_s$  a velocidade superficial do sólido;  $p_F$  – pressão na fase fluida;  $p_s$  a pressão nos sólidos;  $mZ$  a força resistiva;  $t$  o tempo e  $z$  a coordenada espacial axial.

Levando em consideração as Equações 1 a 3, definem-se as equações constitutivas para o cálculo da permeabilidade e fração de sólidos

locais ao longo da torta (Tiller, Yeh e Leu, 1987):

$$k(p_s) = k^0 \left[ 1 + \frac{p_s}{p_a} \right]^{-\delta} \quad (4)$$

$$\varepsilon_s(p_s) = \varepsilon_s^0 \left[ 1 + \frac{p_s}{p_a} \right]^\beta \quad (5)$$

sendo  $k$  a permeabilidade local da torta;  $k^0$ ,  $\varepsilon_s^0$  a permeabilidade e a fração de sólidos sob compressão nula;  $p_a$  um parâmetro de ajuste;  $\delta$ ,  $\beta$  os coeficientes de compressibilidade e  $\eta$  a viscosidade da fase fluida. Substituindo as derivadas parciais da Equação 03 com as Equações 1, 2, 4 e 5, podemos obter:

$$\left( \frac{\partial p_s}{\partial t} \right) \left( \frac{d}{dp_s} \varepsilon_s \right) = \frac{1}{\eta} \left[ \frac{d}{dp_s} k(p_s) \right] \left( \frac{\partial p_s}{\partial z} \right)^2 + \frac{k(p_s)}{\eta} \left( \frac{\partial^2 p_s}{\partial z^2} \right) \quad (06)$$

Que define o problema de valor inicial e de contorno para a filtração estática unidimensional de fluidos newtonianos, cujas condições de contorno e inicial são:

$$p_s(z, 0) = p_{s0} \quad (7)$$

$$\left( \frac{\partial p_s}{\partial z} \right) \Big|_{z=0} = 0 \quad (8)$$

$$p_s(L_c(t), t) = 0 \quad (9)$$

sendo  $L_c(t)$  a espessura da torta de filtração (dependente do tempo) e  $p_s(0,t)$  a pressão nos sólidos na interface torta-meio filtrante. Estas condições definem a ausência de fluxo de sólidos na interface torta-meio filtrante (Equação 8), a ausência de quaisquer indícios de torta ao início da filtração, ou seja, há apenas a suspensão (Equação 9) e a definição da pressão na fase sólida na interface torta-meio filtrante (Equação 7).

Pretende-se agora adimensionalizar a equação diferencial do problema (Equação 06). Para tal, utiliza-se as seguintes variáveis adimensionais:

$$\mathcal{G}(Z, t) = \frac{p_s(z, t)}{p_s(0, t)} \quad (10)$$

$$Z = \frac{z}{L_c(t)} \quad (11)$$

Considerando ainda a hipótese do estado pseudo estacionário, podemos desprezar os termos referentes à dinâmica da evolução do perfil de pressão nos sólidos, resultando em:

$$\xi_i \left( \frac{\partial^2 \mathcal{G}}{\partial Z^2} \right) - \frac{p_s(0, t) \xi_i^2 \delta}{p_a} \left[ 1 + \frac{p_s(0, t)}{p_a} \mathcal{G} \right]^{-1} \left( \frac{\partial \mathcal{G}}{\partial Z} \right)^2 - \left[ \frac{d}{dt} L_c(t) \right] \left( \frac{\partial \mathcal{G}}{\partial Z} \right) = 0 \quad (12)$$

$$\xi_i = 1 - Z \left[ \frac{d}{dt} L_c(t) \right] \quad (13)$$

$$\mathcal{G}(0) = 1 \quad (14)$$

$$\mathcal{G}(1) = 0 \quad (15)$$

Discretizando o sistema com a técnica de diferenças finitas, temos que:

$$4\xi_i (\mathcal{G}_{i+1} - 2\mathcal{G}_i + \mathcal{G}_{i-1}) [p_a + p_s(0, t) \mathcal{G}_i] - p_s(0, t) \xi_i^2 \delta (\mathcal{G}_{i+1}^2 - 2\mathcal{G}_{i+1} \mathcal{G}_{i-1} + \mathcal{G}_{i-1}^2) - \quad (16)$$

$$2\Delta Z (\mathcal{G}_{i+1} - \mathcal{G}_{i-1}) \left[ \frac{d}{dt} L_c(t) \right] = 0$$

onde os subscritos 'i' representam a propriedade calculada no ponto 'i' interno da torta de filtração, conforme o esquema apresentado na Figura 2.

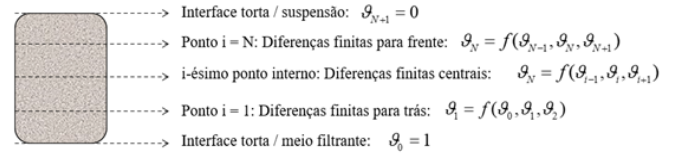


Figura 2: Esquema ilustrativo para a discretização do espaço (espessura da torta de filtração) a partir da técnica de diferenças finitas.

A partir da Equação 3, podemos obter uma expressão para o cálculo do fluxo de filtrado:

$$q_F = \frac{d}{dt} \left( \frac{V}{A} \right) = - \frac{k(p_s) p_s(0, t)}{\eta L_c(t)} \left( \frac{\partial \mathcal{G}}{\partial Z} \right) \left[ 1 - Z \frac{d}{dt} L_c(t) \right] \quad (17)$$

$$q_F(0) = 0 \quad (18)$$

E ainda, a partir de um balanço de massa na torta de filtração:

$$\frac{d}{dt} L_c(t) = \frac{k(p_s) p_s(0,t) (\rho_{susp} - \rho_l)}{Zk(p_s) p_s(0,t) (\rho_{susp} - \rho_l) - \eta L_c(t) [\bar{\epsilon}_s (\rho_s - \rho_l) - \rho_{susp} + \rho_l]} \left( \frac{\partial}{\partial Z} g \right) \quad (19)$$

$$q_F(0) = 0 \quad (20)$$

Dessa forma, o sistema algébrico-diferencial a ser resolvido é composto pelas Equações 16, 18 e 20. Este sistema foi resolvido a partir de um script de programação em linguagem Fortran, utilizando o pacote DASSL, para solução do sistema algébrico-diferencial, e do pacote Estima para a determinação dos coeficientes de compressibilidade do modelo. Após a implementação do modelo e solução do sistema, foram realizadas análises de convergência numérica em função do número de pontos internos da torta, análises de sensibilidade paramétrica e estimação de parâmetros com dados experimentais obtidos em bancada

Os ajustes do modelo e as estimações de parâmetros foram conduzidas com o pacote Estima, escrito em linguagem Fortran 90 (Schwaab *et al.*, 2008). A rotina computacional utilizou um método híbrido, utilizando os métodos de otimização via enxame de partículas e Gauss-Newton. Para todas as simulações, 300 partículas foram utilizadas e 200 iterações foram realizadas. A tolerância para o critério de parada foi assumida como  $10^{-4}$ . Os parâmetros foram estimados considerando o método da máxima verossimilhança como função a ser minimizada.

## METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Nesta pesquisa, realizaram-se experimentos para validar o modelo de filtração proposto (apresentado na seção anterior). Nesse cenário, um planejamento a um fator foi proposto e a partir de uma suspensão de composição conhecida (Tabela 1), foram avaliados três níveis para o diferencial de pressão: 300, 500 e 700 psi.

Tabela 1: Composição da suspensão utilizada no estudo de caso.

Componente	Função	Concentração
CMC	Viscosificante	2,54 g/L
Barita	Adensante	10% v/v

Utilizou-se carboximetilcelulose (CMC) como agente viscosificante da suspensão. A concentração de 2,0 lb/bbl ( $5,7 \text{ g/cm}^3$ ) foi definida de forma a manter as características reológicas da suspensão semelhantes às aquelas observadas em fluidos de perfuração em base aquosa. Como material adensante, utilizou-se sulfato de bário ( $\text{BaSO}_4$ ) ou barita, como normalmente conhecido, na concentração de 10% (v/v), sendo esta uma concentração típica do material usada em fluidos de perfuração. Os valores de pressão foram definidos de forma a manter um intervalo equidistante do ponto central (500 psi) definido pela norma padrão internacional (API RP 13B-1, 2003) como diferencial de pressão para experimentos de filtração HTHP (alta pressão e alta temperatura). Entretanto, para os experimentos apresentados neste trabalho, optou-se por manter a temperatura em  $25^\circ\text{C}$  (temperatura ambiente).

A caracterização do sólido adensante foi realizada a partir da determinação da densidade e da distribuição granulométrica do material. A densidade foi obtida a partir da técnica de picnometria a gás, realizada em quintuplicata, obtendo-se um valor de  $(3,82 \pm 0,01) \text{ g/cm}^3$ . A distribuição de tamanhos de partícula foi obtida a partir da técnica de espalhamento de luz, com o analisador de partículas Malvern Mastersizer 2000. Os resultados para os diâmetros característicos da barita são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2: Diâmetros característicos para a amostra de barita: D10, D50, D90 e diâmetro médio de Sauter. Dados a  $25^\circ\text{C}$  e 1 atm.

Diâmetros característicos ( $\mu\text{m}$ )			
d (0,1)	d (0,5)	d (0,9)	D <sub>Sauter</sub>
1,767	11,044	29,086	4,542

Os experimentos de filtração foram realizados em uma célula padrão comercial de bancada (Ofite®), com capacidade nominal de 490 mL, equipada com jaqueta de aquecimento de 500 W. O sistema de pressurização utilizado é composto por um cilindro de  $N_{2(g)}$ , acoplado a um ramal de distribuição, com conexão via mangote a uma válvula de alívio de pressão na seção superior da célula de filtração. O esquema da unidade experimental utilizada é apresentado na Figura 3. Utilizou-se papel de filtro FANN® como meio filtrante, com área útil de filtração de  $23,3 \text{ cm}^2$  e faixa de retenção de partículas de  $2,7$  a  $5,0 \text{ }\mu\text{m}$ .

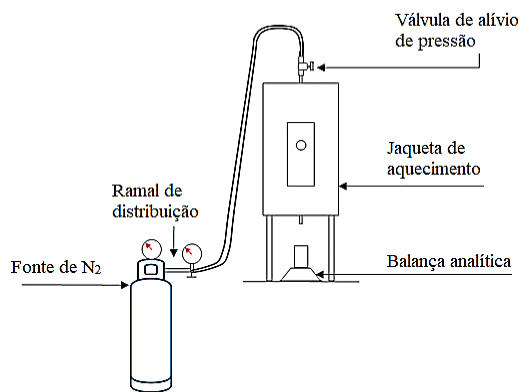


Figura 3: Esquema ilustrativo do aparato experimental, para os ensaios de filtração: sistema composto por uma célula comercial (OFITE) e cilindro de pressurização a gás ( $N_2$ ). Adaptado de Borges *et al.* (2021).

Deve-se ressaltar que foi realizada uma triplicata no ponto central do planejamento (500 psi), considerando um nível de confiança de 95% para a determinação das incertezas experimentais.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após a implementação do modelo, realizou-se a análise de convergência em função do número de pontos internos na torta de filtração, acompanhando o volume final de filtrado (após 30 minutos de filtração simulada) e a fração de sólidos e porosidade médias da torta. A Figura 4 apresenta o resultado da análise de convergência, com incrementos de 20 pontos a cada simulação. Não foram registradas informações a respeito do tempo de simulação necessário para cada passo.

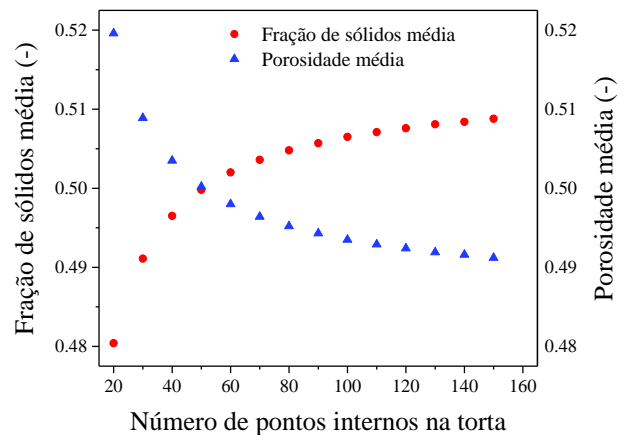
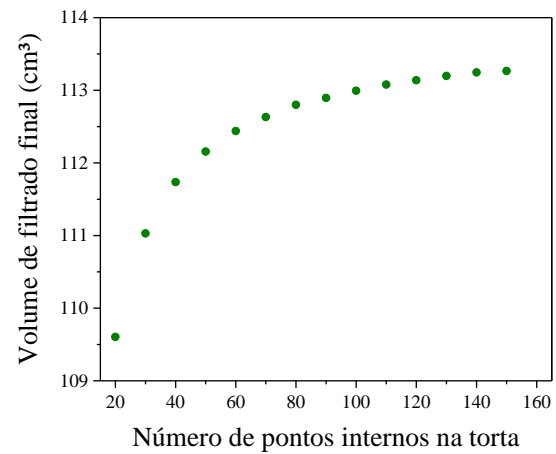


Figura 4: Análise de convergência do modelo, considerando o efeito da quantidade de pontos internos na discretização espacial da torta. Dados de volume de filtrado e fração de sólidos/porosidade média na torta.

Pode-se observar que os dados discretos de volume de filtrado e fração de sólidos média tendem a se aproximar do comportamento de resposta de primeira ordem, caminhando para um valor estável e invariante com o número de pontos internos a partir de, aproximadamente, 140 pontos internos. Esse comportamento é descrito por uma curva de alta taxa de crescimento inicial, com consecutiva redução de taxa de crescimento até alcançar um comportamento assintótico próximo de um valor “crítico”, aproximadamente constante. Portanto, para todas as análises apresentadas neste estudo, foram utilizados 140 pontos internos à torta de filtração nas simulações. A Figura 4 ilustra, como exemplo, a sensibilidade do modelo frente às variações da pressão total aplicada. Pode-se observar que as variáveis volume de filtrado, espessura da torta e perfil de pressão nos sólidos apresentam um comportamento esperado em relação ao efeito da pressão no processo.

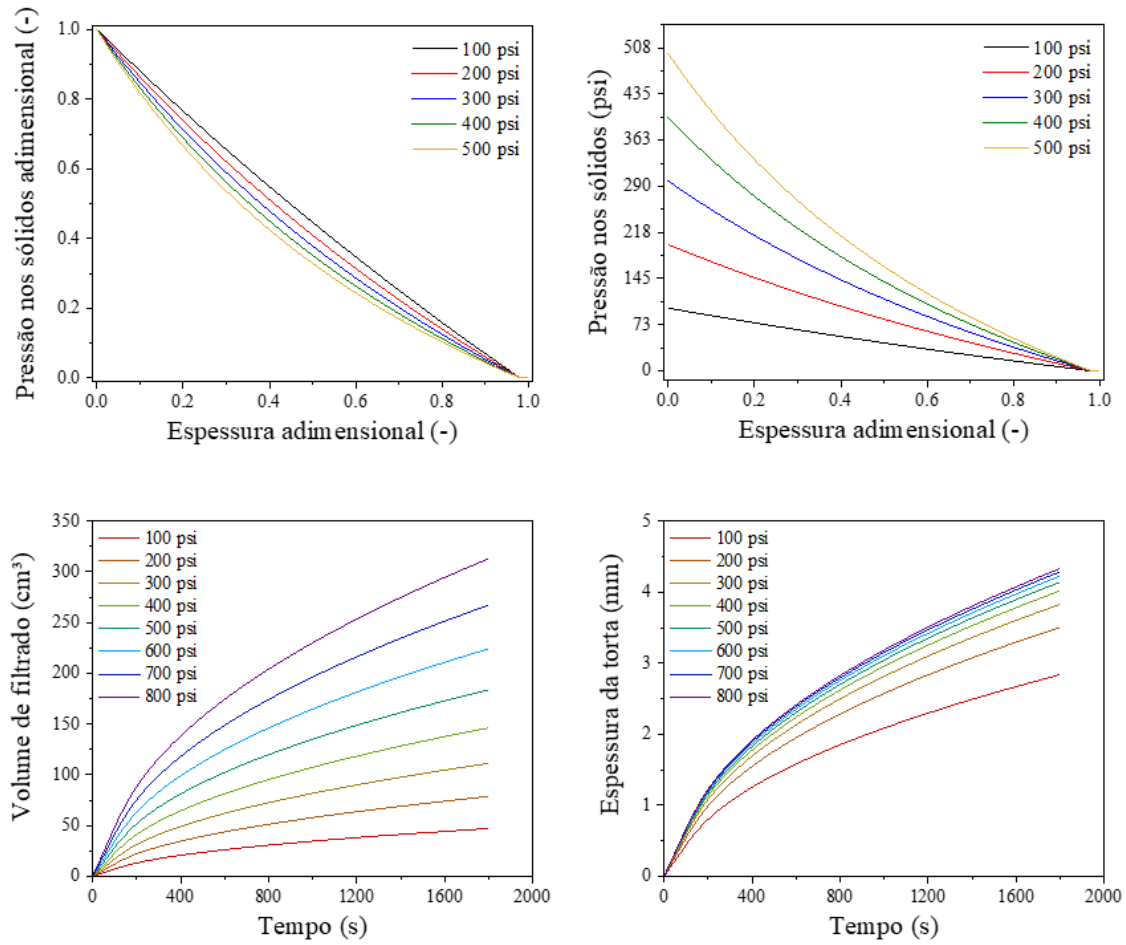


Figura 5: Sensibilidade do modelo em função do diferencial de pressão aplicado no sistema. Dados de pressão nos sólidos, volume de filtrado e espessura da torta.

Tabela 3: Parâmetros estimados na simulação.

Parâmetro	$\epsilon_s^0$	$\beta$	$k^0$ (mD)	$\delta$
300 psi	$0,339 \pm 0,009$	$1,96 \pm 0,11$	$0,016 \pm 0,012$	$1,48 \pm 0,17$
500 psi	$0,337 \pm 0,009$	$1,33 \pm 0,07$	$0,024 \pm 0,018$	$0,67 \pm 0,10$
700 psi	$0,288 \pm 0,006$	$1,20 \pm 0,05$	$0,027 \pm 0,020$	$0,91 \pm 0,07$

Um estudo de caso foi proposto de forma a avaliar a qualidade do modelo e das hipóteses tecidas ao longo de seu desenvolvimento. Para tal, dados de volume de filtrado foram obtidos a partir de experimentos de filtração estática isobárica, para três diferentes pressões de operação: 300, 500 e 700 psi. A suspensão filtrada possuía composição tal qual àquela apresentada na Tabela 1.

A Figura 6 ilustra os resultados das simulações para os perfis de pressão nos sólidos e fração de sólidos local e média. Deve-se reiterar que a obtenção de dados experimentais correspondentes só é possível mediante o tratamento posterior à filtração, levando a torta formada para uma célula de compressão, onde a permeabilidade local é determinada em alguns poucos pontos (função da espessura de torta disponível).

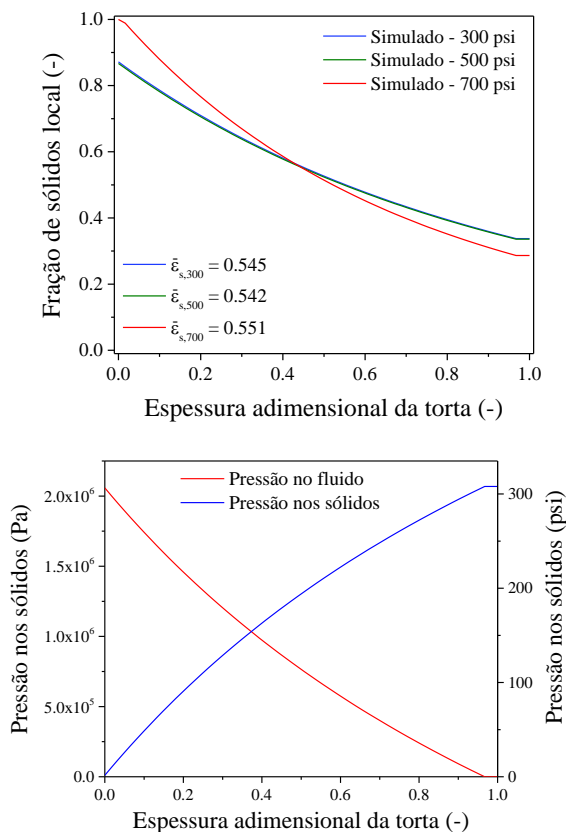


Figura 6: Detalhe para o sistema de controle da célula de filtração comercial de bancada (OFITE).

As Figuras 7 e 8 ilustram a comparação entre os dados experimentais e aqueles obtidos a partir da simulação numérica. Pode-se observar que o modelo se ajusta bem aos dados

experimentais, considerando as incertezas associadas às medições, tanto para o volume de filtrado quanto para a taxa de filtração (Figura 7). Em relação à espessura da torta, pode-se observar uma diferença considerável entre os dados simulados e aqueles obtidos experimentalmente. Essa diferença pode estar vinculada às hipóteses simplificadoras do problema, à efeitos adicionais de interação entre os materiais ou até mesmo pela precisão experimental na determinação dos valores de espessura final de torta.

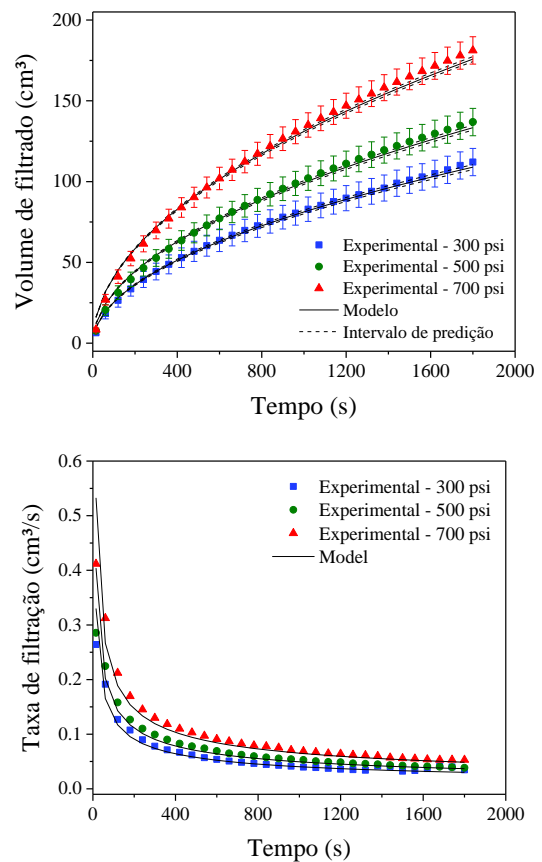


Figura 7: Validação do modelo com dados experimentais: volume de filtrado e taxa de filtração em função do diferencial de pressão aplicado.

A Tabela 3 apresenta os parâmetros estimados para os três casos simulados. Pode-se observar que todos os parâmetros apresentam significância estatística, a um nível de confiança de 95%. Os parâmetros  $\beta$  e  $\delta$ , referentes à compressibilidade das tortas de filtração, indicam uma elevada compressibilidade da torta formada.



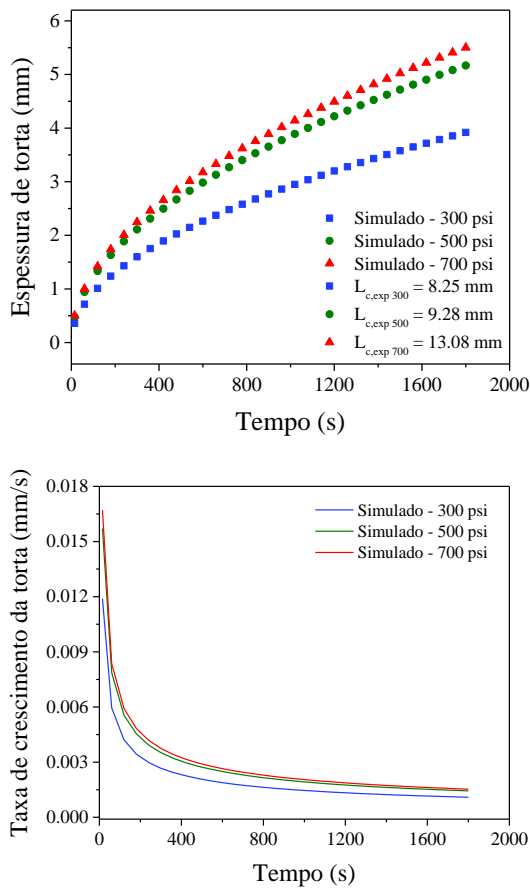


Figura 8: Validação do modelo com dados experimentais: espessura da torta e taxa de crescimento da torta em função do diferencial de pressão aplicado.

## CONCLUSÕES

Com este trabalho, buscou-se desenvolver um modelo de filtração robusto, baseado nas equações fenomenológicas da fluidodinâmica clássica, acoplado com equações constitutivas para as propriedades da torta de filtração, com posterior validação utilizando dados experimentais de filtrações estáticas isobáricas em distintas pressões. Pode-se concluir que o modelo se mostrou eficiente na predição do volume de filtrado e da porosidade e espessura médias da torta de filtração. Portanto, constitui uma ferramenta valiosa para associação à sistemas de controle e diagnóstico de poços, possibilitando uma otimização de tempo de resposta e redução de risco operacional.

## AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer à CAPES pelo suporte oferecido ao desenvolvimento deste projeto, ao CENPES

(Centro de Pesquisa da PETROBRAS) pelo apoio financeiro e aos membros do PPGEQ/UFRRJ e EPQB/UFRRJ pelo apoio no desenvolvimento científico.

## REFERÊNCIAS

- API RP 13B-1 (2003), Recommended practice for field testing water-based drilling fluids. API recommended practice 13B-1, ANSI/API 13B-1/ISO 10414-1, Third Edition, Dezembro.
- AZEVEDO, G. C. (2021), Desenvolvimento e avaliação de um sistema on-line para determinação dos parâmetros de filtração de fluidos de perfuração. PPGEQ/UFRRJ – Rio de Janeiro – RJ, 106p. (dissertação de mestrado).
- BORGES, R. F., OECHSLER, B. F., OLIVEIRA, B. R., ANDRADE, L. D., CALÇADA, L. A., SCHEID, C. M., & CALADO, V. (2021), Reparameterization of static filtration model of aqueous-based drilling fluids for simultaneous estimation of compressible mudcake parameters. *Powder Technology*, v. 386, p. 120-135.
- BOURGOYNE, A. T., MILLHEIM, K. K., CHENEVERT, M. E., YOUNG, S. F. (1991), *Applied drilling engineering*, 2nd Ed. v.2, Textbook Series, SPE.
- CALCADA, L. A., SCHEID, C. M., DE ARAÚJO, C. A. O., WALDMANN, A. T. A., MARTINS, A. L. (2011), Analysis of dynamic and static filtration and determination of mud cake parameters, *Brazilian Journal of Petroleum and Gas*, v.1. 5, n.3, p.159-170.
- DEWAN, J. T., CHENEVERT, M. E. (1993), Mudcake buildup and invasion in low permeability formations; Application to permeability determination by measurement while drilling, SPWLA 34th Annual Logging Symposium, Junho.
- DEWAN, J. T., CHENEVERT, M. E. (2001), A model for filtration of water-base mud during drilling: Determination of mudcake parameters, *Petrophysics*, v.42 (3), p.237-250.
- DI JIAO, SHARMA, M. M. (1992), Formation damage due to static and dynamic

- filtration of water-based muds, SPE23823, USA.
- GUL, S., & VAN OORT, E. (2020), A machine learning approach to filtrate loss determination and test automation for drilling and completion fluids. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 186, 106727.
- IWATA, M., SHIMO, T., TANAKA, T., & JAMI, M. S. (2019), Constant pressure expression of power law non-Newtonian fluid/solid mixture. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 94, 37-42.
- KIM, A. S., HOEK, E. M. V. (2002), Cake structure in dead-end membrane filtration: Monte Carlo simulations, *Environmental Engineering Science*, v.19 (6), p.373-386.
- KOZICKI, W., & TIU, C. (1967), Non-newtonian flow through open channels. *The Canadian journal of chemical engineering*, 45(3), 127-134.
- KOZICKI, W., TIU, C., & Rao, A. R. K. (1968), Filtration of non-Newtonian fluids. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 46(5), 313-321.
- KOZICKI, W. (1990), Factors affecting cake resistance in non-Newtonian filtration. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 68(1), 69-80.
- KOZICKI, W., & KUANG, P. Q. (1994), Cake filtration of suspensions in viscoelastic fluids. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 72(5), 828-839.
- MASSARANI, G. (2001), *Fluidodinâmica de sistemas particulados*. Programa de Engenharia Química, COPPE/Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2ª Ed.
- RAHEEM, A. R., VIPULANANDAN, C. (2019), Testing and modeling of filter cake formation using new seepage-consolidation concept, *Engineering Science and Technology, an International Journal*, v.22(3), p.979-989.
- RUTH, B. F., MONTILLON, G. H., MONTONNA, R. E. (1933), Studies in filtration I. Critical analysis of filtration theory, *Journal of Industrial and Chemical Engineering*, v.25 (1), p.76-82.
- SCHWAAB, M., BISCAIA, E. C., MONTEIRO Jr, J. L., PINTO, J. C. (2008), Nonlinear parameter estimation through particle swarm optimization, *Chemical Engineering Science*, v. 63 (6), p. 1542-1552.
- SHIRATO, M., OKAMURA, S. (1959), Behaviour of various kaolin slurries in constant pressure filtration, *Journal of Chemical Engineering of Japan*, v.23 (11), p.226.
- SHIRATO, M., SAMBUICHI, M., KATO, H., ARAGAKI, T. (1969), Internal flow mechanism in filter cakes, *A.I.Ch.E. Journal*, v.15 (3), p.405-409.
- SHIRATO, M., ARAGAKI, T., IRITANI, E. (1980), Analysis of constant pressure filtration of power-law non-Newtonian fluids, *Journal of Chemical Engineering of Japan*, v.13 (1), p.61-66.
- TILLER, F. M. (1953), The role of porosity in filtration I. Numerical methods for constant rate and constant pressure filtration based on Kozeny's Law, *Chemical Engineering Progress*, v.49 (9), p.467-479.
- TILLER, F. M. (1955), The role of porosity in filtration II. Analytical equations for constant rate filtration, *Chemical Engineering Progress*, v.51 (6), p.282-290.
- TILLER, F. M. (1958), The role of porosity in filtration III. Variable-pressure – variable-rate filtration, *A.I.Ch.E. Journal*, v.4 (2), p.170-174.
- TILLER, F. M., COOPER, H. R. (1960), The role of porosity in filtration IV. Constant pressure filtration, *A.I.Ch.E. Journal*, v.6 (4), p.595-601.
- TILLER, F. M., CRUMP, J. R. (1977), Solid-liquid separation: An overview.
- TILLER, F. M., LEU, W. (1983), Experimental study of the mechanism of constant pressure cake filtration: Clogging of filter media, *Separation Science and Technology*, v.18 (12), p.1351-1369.
- WEBER, H. C., HERSHEY, R. L. (1926), Some practical application of the Lewis filtration equation, *Journal of Industrial and Chemical Engineering*, v.18 (4), p.341.