PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0310914/CA

2 Revisão bibliográfica

Este capítulo tem como objetivo apresentar e discutir os modelos e os experimentos elaborados para o estudo do dano à formação devido ao processo de filtração profunda.

O dano à formação envolvido nos processos de filtração foi estudado por vários autores. Nestes estudos, foram analisados os efeitos dos parâmetros envolvidos nos processos de filtração utilizando diferentes tipos de modelagem matemática com soluções analíticas e numéricas. Existem também muitos estudos experimentais para a determinação dos parâmetros relevantes no processo de dano à formação devido à captura de partículas durante o transporte de suspensões através de meios porosos.

2.1. Modelo clássico para filtração profunda

O sistema de equações clássico que descreve o processo de filtração profunda consiste das equações de balanço de massa das partículas, da cinética de captura de partículas e da lei de Darcy (Iwasaki, 1937; Herzig *et al.*, 1970)

$$\begin{cases} \dfrac{\partial c(X,T)}{\partial T} + \dfrac{\partial c(X,T)}{\partial X} = -\dfrac{1}{\phi}\dfrac{\partial \sigma(X,T)}{\partial T} \\ \dfrac{\partial \sigma(X,T)}{\partial T} = \lambda(\sigma)\,\phi\,c(X,T) \\ U = -\dfrac{k_0\,k(\sigma)}{\mu L}\dfrac{\partial p}{\partial X} \end{cases} \tag{2.1}$$

onde $\lambda(\sigma)$ é o coeficiente de filtração adimensional que está relacionado à probabilidade de uma partícula ser capturada durante o fluxo através de uma amostra de comprimento L; X e T são a coordenada e o tempo adimensionais, respectivamente:

$$X = \frac{x}{L}; \qquad T = \frac{\int_0^t U(t')\,dt'}{L\phi}; \qquad \lambda = \lambda^{/} L, \tag{2.2}$$

$\lambda^{/}$ é o coeficiente de filtração dimensional, x e t são a coordenada e o tempo dimensionais, respectivamente; ϕ é a porosidade; $U(t)$ é a velocidade de Darcy (vazão por unidade de área da seção transversal ao fluxo); $c(X,T)$ é a concentração de partículas em suspensão (número de partículas em suspensão por unidade de volume poroso); $\sigma(X,T)$ é a concentração de partículas capturadas (número de partículas retidas por unidade de volume da amostra). A função de dano à formação $k(\sigma)$ relaciona a queda de permeabilidade com a retenção de partículas:

$$k(\sigma) = \frac{1}{1+\beta\sigma} \tag{2.3}$$

As condições iniciais e de contorno para o sistema (2.1) são dadas por:

$$\begin{cases} X = 0 : c(0,T) = c^{(0)} \\ T = 0 : c(X,0) = 0; \quad \sigma(X,0) = 0 \end{cases} \tag{2.4}$$

De acordo com o modelo clássico, no caso em que o coeficiente de filtração é constante, o comprimento de penetração médio para partículas é igual à $1/\lambda^{/}$. Portanto, pode-se interpretar o coeficiente de filtração como sendo o inverso da penetração média das partículas.

A velocidade $U(t)$ é independente de X devido a incompressibilidade da suspensão. Portanto, a terceira eq. (2.1) pode ser separada da primeira e segunda equações, que podem ser resolvidas independentemente. A primeira e segunda equações (2.1) formam um modelo cinético para o transporte e captura de partículas. A terceira equação é um modelo dinâmico que prevê o aumento do gradiente de pressão devido à queda de permeabilidade com o aumento da concentração de partículas capturadas.

Se o coeficiente de filtração é constante $\lambda(\sigma) = \lambda_0$, a solução analítica para o modelo clássico (2.1) é representada por uma onda de concentração de partículas em suspensão que se move com a velocidade média do fluido percolante. Ou seja, para $X < T$, tem-se:

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0310914/CA

$$c(X,T) = c^{(0)} e^{-\lambda_0 X} \tag{2.5}$$

$$\sigma(X,T) = \lambda_0 \phi c^{(0)} (T - X) e^{-\lambda_0 X} . \tag{2.6}$$

As concentrações de partículas capturadas e suspensas são iguais a zero na frente do choque de concentração ($X > T$):

$$c(X,T) = \sigma(X,T) = 0 . \tag{2.7}$$

Bedrikovetsky et al. (2002, 2004 e 2005), propuseram uma solução do problema inverso da determinação simultânea dos coeficientes de filtração λ e de dano à formação β (ver equação (2.3)).

Após a injeção de um volume poroso (T = 1 pvi), as partículas alcançam a saída do meio poroso (X = 1), ou seja:

$$c(1,T) = \begin{cases} 0, & T < 1 \\ c^{(0)} e^{-\lambda_0} , & T \geq 1 \end{cases} \tag{2.8}$$

A eq. (2.8) mostra que a concentração na saída do reservatório permanece constante com o tempo.

De acordo com a equação da continuidade (2.1), as partículas são transportadas com uma velocidade média igual a do fluido que as transporta.

Vários autores (Herzig et al., 1970, Bedrikovetsky et al., 2002, 2004) discutem diferentes formas para o coeficiente de filtração em função da concentração de partículas capturadas ($\lambda = \lambda(\sigma)$) e propõem soluções analíticas explícitas para alguns casos particulares. Bedrikovetsky et al., (2001) propõem um método geral para a solução do sistema de equações (2.1).

No caso da captura de partículas pelo mecanismo de exclusão pelo tamanho, quanto maiores forem as partículas e menores forem os poros, maior é a taxa de captura de partículas em suspensão e, conseqüentemente, maior é o dano à formação. Vários autores (Sharma e Yortsos, 1987, A. Suri e M. Sharma 2001,

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0310914/CA

Payatakes et al, 1973 e 1974) sugerem que, quando o mecanismo de exclusão pelo tamanho é dominante, as distribuições de tamanho de poros e de partículas em suspensão desempenham um papel fundamental no processo de filtração profunda.

Entretanto, no modelo clássico (2.1) não são consideradas as distribuições de tamanho de poros e de partículas. Por outro lado, se o tamanho dos poros e das partículas em suspensão forem aumentados simultaneamente, a taxa de captura pelo mecanismo de exclusão pelo tamanho não deveria ser afetada. Portanto, o coeficiente de filtração no mecanismo de exclusão pelo tamanho deveria ser uma função monotonicamente crescente da razão entre os tamanhos das partículas e dos poros η (η = raio médio das partículas/raio médio dos poros). Bedrikovetsky et al. (2001), tentaram relacionar o coeficiente de filtração com a razão entre o raio médio das partículas e o raio médio dos poros. Foram analisados 34 testes laboratoriais e não foi obtida nenhuma correlação entre os parâmetros mencionados acima (ver Figura 3).

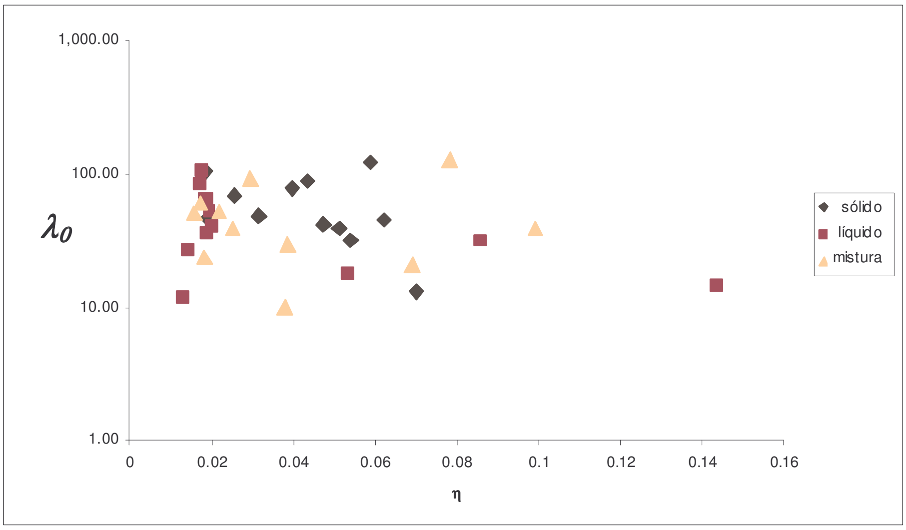

Figura 3: Relação entre o coeficiente de filtração λ_o e o parâmetro η (razão entre o raio médio das partículas e o raio médio dos poros). Neste gráfico estão representados os resultados para partículas sólidas (losangos), líquidas (quadrados) e uma mistura de ambas (triângulos) (Bedrikovetsky et al., 2001).

A dificuldade em correlacionar o coeficiente de filtração com os raios das partículas e dos poros significa que o mecanismo de exclusão pelo tamanho não dominou nos testes laboratoriais estudados, ou que o modelo (2.1) para

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0310914/CA

concentrações totais não descreve adequadamente o processo de filtração com exclusão pelo tamanho. Uma forma de estudar este problema é a modelagem em micro-escala de cada mecanismo de captura.

Além disso, de acordo com o modelo clássico, para que uma partícula injetada na face de entrada chegue até a face de saída do meio poroso seria necessário injetar um volume poroso (ver (2.8)). Entretanto, vários casos onde o tempo de chegada ("breakthrough") difere significantemente de um volume poroso injetado têm sido reportados na literatura para polímeros e suspensões particuladas (Massei *et al*, 2002; Veerapen *et al*, 2001; Bartelds *et al*, 1997; Dawson e Lantz, 1972).

2.2. Modelo estocástico na micro-escala

Sharma e Yortsos (1987a) desenvolveram equações básicas para o balanço de populações durante o transporte de suspensões particuladas através do meio poroso. O modelo considera variações nas distribuições de tamanho de partículas e de poros devido a diferentes mecanismos de captura. Também é assumido que todo o espaço poroso é acessível para todas as partículas e que as populações de partículas movem-se com a velocidade média do fluido percolante. No caso de um meio poroso com uma distribuição uniforme de tamanho de poros, esta consideração resulta num processo de filtração profunda independente para todos os tamanhos de partículas. Entretanto, no mecanismo de exclusão pelo tamanho, partículas menores que o raio dos poros devem ser transportadas sem ser capturadas e partículas maiores que o raio dos poros não devem entrar no meio poroso.

Devido ao mecanismo de exclusão pelo tamanho, as partículas podem passar somente através de poros maiores; isto é, apenas uma fração da porosidade está acessível para as partículas. Portanto, as partículas são efetivamente transportadas pela fração de água fluindo através do espaço poroso acessível, isto é, o fluxo de água transportando partículas de um dado tamanho é apenas uma fração do fluxo total de água.

Os efeitos da acessibilidade do espaço poroso e da redução de fluxo para partículas devido ao tamanho finito das moléculas de polímeros foram observados

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0310914/CA

e matematicamente descritos para o transporte de polímeros em rochas (Bartelds *et al*, 1997; Dawson e Lantz, 1972).

Massei et al. (2002) fizeram experimentos injetando pulsos de partículas em meios porosos e também observaram que a velocidade média das partículas pode ser significantemente diferente da velocidade média do fluido percolante.

2.3.Modelos de rede

Vários modelos de rede, incluindo diferentes mecanismos físicos de retenção de partículas, foram desenvolvidos por Imdakm e Sahimi (1987), Payatakes *et al*. (1973, 1974), Sahimi *et al*. (1990, 1991), Rege e Fogler (1987, 1988), Siqueira e Shecaira (2003), entre outros.

Imdakm, A. O. e Sahimi Muhammad, 1987 utilizaram o método de Monte Carlo para modelar apenas o efeito da exclusão pelo tamanho no dano à formação. Neste caso, o meio poroso foi representado por uma rede quadrada bidimensional, onde as gargantas dos poros são representadas pelas ligações da rede. O modelo estudado pressupõe que os poros são tubos capilares cilíndricos de raio r_p, distribuídos segundo a função de distribuição de probabilidade de Rayleigh $f(r_p) = 2\alpha^2 r_p.\exp(-\alpha^2 r_p{}^2)$, onde α é uma característica do raio do poro.

Além disso, foi assumido que as partículas injetadas são esféricas e se distribuem de acordo com a distribuição de Rayleigh ou segundo uma distribuição uniforme.

Como os poros são representados por tubos capilares, o fluxo em um poro de raio r_p é proporcional a $r_p{}^4$ (Poiseuille). Desta forma, a probabilidade de uma partícula encontrar uma garganta será proporcional à porção de fluxo que está passando por ela. Quanto maior o raio da garganta, maior será o fluxo. Sendo assim, maior será a probabilidade da garganta ser acessada. Após a partícula ter "selecionado" um poro, seu raio efetivo (r_s) é comparado com o raio do poro (r_p). Se $r_s < r_p$, a partícula passa, senão ela é capturada.

Devido à excelente concordância com os resultados experimentais analisados, eles concluíram que o mecanismo dominante na queda de permeabilidade é a exclusão pelo tamanho. Os resultados obtidos no modelo descrito acima indicam que o dano à formação depende da distribuição de

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0310914/CA

tamanho de poros, da topologia do meio poroso, da distribuição do tamanho de partículas injetadas e da concentração de partículas.

O grau de semelhança entre a permeabilidade da rede e a do meio poroso real irá depender muito das considerações adotadas no modelo, onde os atributos mais importantes da estrutura porosa real são suas morfologia (tamanho e forma dos poros), topologia (relações de conectividade dos poros entre si) e propriedades de percolação (Dullien, 1992; Ioannidis *et al.*, 1997).

Em geral, com os modelos de rede tenta-se determinar as propriedades macroscópicas do sistema incorporando as heterogeneidades do meio na escala de poros. Eles são os únicos modelos que levam em conta a conectividade do meio, o que lhes possibilita prever com maior acerto a permeabilidade e o comportamento durante o transporte de partículas através do espaço poroso (Sahimi et al., 1990).

A principal desvantagem dos modelos de rede é o esforço computacional requerido, o que limita o tamanho da rede a ser processada.

2.4. Modelo de reboco com tempo de transição

Geralmente as distribuições de tamanho de partículas e de poros desempenham um papel fundamental no processo de crescimento do reboco. Quando a suspensão contém partículas de tamanhos diferentes, as partículas maiores formam o esqueleto do "reboco externo" e as menores podem ser transportadas e eventualmente capturadas no interior do reboco formado pelas partículas maiores. Simultaneamente, pode ocorrer a compactação do reboco devido ao efeito da força de arraste causada pelo fluxo da suspensão através do reboco. Conseqüentemente, ocorrem variações da porosidade, da permeabilidade e da espessura do reboco afetando o comportamento do processo de filtração.

Pang e Sharma (1994) consideraram a formação do reboco interno (*deep bed filtration*) e externo (*external cake*) simultaneamente e introduziram o conceito de tempo de transição (t_{tr}).

Eles postularam que inicialmente um reboco interno é formado. Com o aumento de partículas retidas na superfície da rocha haverá um momento onde pouquíssimas partículas poderão invadir a rocha, inicia-se então a formação de um

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0310914/CA

reboco externo. O tempo de transição é atingido quando não há mais invasão de partículas na rocha, ou seja, o reboco interno é completamente formado.

Sendo assim, o processo global de filtração foi aproximado aplicando-se um modelo para a formação do reboco interno antes do tempo de transição e um modelo para a formação do reboco externo após o tempo de transição. Quando $t_{tr} \to \infty$, ocorre apenas a formação do reboco interno e quando $t_{tr} \to 0$, ocorre somente a formação do reboco externo.

2.5. Modelo multicomponente para filtração e formação do reboco

No modelo clássico (2.1) um coeficiente de filtração efetivo (λ) é definido e as distribuições de tamanho de poros e de partículas não são consideradas. Muitas vezes, o tamanho das partículas varia muito e o modelo clássico leva a previsões incoerentes. No caso da adição de polímeros em fluidos de perfuração, por exemplo, verificou-se que o modelo clássico não descreve corretamente o processo de filtração (Suri e Sharma, 2001).

A. Suri e M. Sharma (2001) propuseram um modelo para a filtração multicomponente, considerando suspensões com partículas de tamanho variável. De acordo com estes autores, as distribuições de tamanho de poros e de partículas no fluido de perfuração têm um papel fundamental na determinação do comprimento de penetração e da queda de permeabilidade. O modelo assume partículas de tamanhos discretos e consiste das equações de balanço de massa e cinética de captura para cada tamanho de partícula:

$$\frac{\partial c_i}{\partial T} + \frac{\partial c_i}{\partial X} = -\frac{1}{\phi}\frac{\partial \sigma_i}{\partial T}, \tag{2.9}$$

onde c_i é a concentração de partículas da i-ésima espécie em suspensão, σ_i é a concentração de partículas da i-ésima espécie capturadas pelo meio poroso, ϕ é a porosidade e X e T são a coordenada e o tempo adimensionais (2.2), respectivamente.

A taxa de captura para a i-ésima população de partículas é assumida como sendo proporcional ao fluxo de partículas dessa população Uc_i:

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0310914/CA

$$\frac{\partial \sigma_i}{\partial t} = \lambda_i' \, U c_i \,, \tag{2.10}$$

onde σ_i é a concentração de partículas da i-ésima população que foram capturadas, c_i é a concentração de partículas suspensas da população "i" e λ_i' é o coeficiente de filtração para partículas suspensas da i-ésima população. Portanto, em geral, cada população tem um coeficiente de filtração diferente.

Introduzindo as transformações adimensionais (2.2) na eq. (2.10), obtém-se:

$$\frac{\partial \sigma_i}{\partial T} = \lambda_i \, \phi \, c_i \tag{2.11}$$

As condições iniciais e de contorno para o sistema (2.9), (2.11) são dadas por:

$$\begin{aligned} T = 0 &: c_i = 0, \ \sigma_i = 0 \,, \\ X = 0 &: c_i = c_i^{(0)} \,, \end{aligned} \tag{2.12}$$

ou seja, é assumido que inicialmente não existem partículas no interior do meio poroso e que uma concentração $c_i^{(0)}$ é injetada na face de entrada do meio poroso ($X = 0$).

O modelo (2.9), (2.11), sujeito as condições iniciais e de contorno (2.12), tem a seguinte solução analítica:

$$c_i = \begin{cases} c_i^{(0)} \exp\left(-\lambda_i X\right), \ X \le T \\ 0 \,, \ X > T \end{cases} \tag{2.13}$$

$$\sigma_i = \begin{cases} \lambda_i \, \phi \left(T - X\right) c_i^{(0)} \exp\left(-\lambda_i X\right), \ \ X \le T \\ 0 \,, \ X > T \end{cases} \tag{2.14}$$

É bom salientar que o modelo (2.9), (2.11) não considera a variação da distribuição de tamanho de poros durante o processo de filtração profunda, bem

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0310914/CA

como os efeitos da acessibilidade do espaço poroso e da redução de fluxo de partículas.

A solução (2.13) mostra que o perfil de concentração de partículas da i-ésima população se move com a mesma velocidade do fluido percolante. Por outro lado, vários autores (Massei et al., 2002, Bartelds *et al*, 1997; Dawson e Lantz, 1972) observaram experimentalmente que a velocidade média das partículas pode ser significantemente diferente da velocidade média do fluido percolante.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0310914/CA