

6 Modelo analítico para filtração profunda com redução de fluxo e acessibilidade

Soluções analíticas para o caso onde os fatores de acessibilidade e de redução de fluxo permanecem constantes com o tempo são obtidas neste capítulo.

6.1. Caso onde os fatores de acessibilidade e de redução de fluxo são constantes

Nesta seção, o caso da injeção de uma suspensão de partículas intermediárias ($r_{pmin} < r_s < r_{pmax}$) com baixa concentração é discutido. Neste caso, a alteração do espaço poroso durante a captura de partículas pode ser ignorada. Portanto, as variações nos coeficientes de acessibilidade e de redução de fluxo podem ser desprezadas. Neste caso, o modelo para filtração profunda (5.49) pode ser escrito como:

$$\begin{cases} \gamma \frac{\partial c}{\partial T} + \alpha \frac{\partial c}{\partial X} = - \frac{1}{\phi} \frac{\partial \sigma}{\partial T} \\ \frac{\partial \sigma}{\partial T} = \lambda(1-\alpha)\phi c \\ U = - \frac{k_0 k(\sigma)}{\mu L} \frac{\partial p}{\partial X} \end{cases} \quad (6.1)$$

Durante a filtração profunda, a permeabilidade diminui devido ao processo de captura de partículas e obstrução de poros. A forma hiperbólica para a função de queda de permeabilidade é assumida, ou seja:

$$k(\sigma) = \frac{1}{1 + \beta\sigma}. \quad (6.2)$$

Considerando que uma concentração constante de partículas em suspensão é injetada na seção de entrada do meio poroso e que inicialmente não existem partículas no interior do meio poroso, tem-se:

$$\begin{cases} T=0 : & c = 0 ; \sigma = 0 \\ X=0 : & c = c^{(0)} \end{cases} \quad (6.3)$$

A solução analítica para o sistema (6.1), considerando as condições iniciais e de contorno (6.3), é dada por:

$$c(X, T) = \begin{cases} c^{(0)} \exp\left(-\lambda \frac{1-\alpha}{\alpha} X\right) : T > \frac{\gamma}{\alpha} X \\ 0 : T < \frac{\gamma}{\alpha} X \end{cases} \quad (6.4)$$

$$\sigma(X, T) = \begin{cases} \lambda(1-\alpha) \phi\left(T - \frac{\gamma}{\alpha} X\right) \times \\ \quad \times c^{(0)} \exp\left(-\lambda \frac{1-\alpha}{\alpha} X\right) : T > \frac{\gamma}{\alpha} X \\ 0 : T < \frac{\gamma}{\alpha} X \end{cases} \quad (6.5)$$

Na frente da “frente de deslocamento” ($X > (\alpha/\gamma)T$), ambas as concentrações de partículas c e σ são iguais a zero.

A concentração c é não estacionária antes do tempo de chegada (T_{br}), que é igual a:

$$T_{br} = \frac{\gamma}{\alpha}. \quad (6.6)$$

Para $T \geq T_{br}$, a frente de concentração de partículas em suspensão, c , já alcançou a saída do meio poroso e o estado estacionário é estabelecido para c . Por outro lado, a distribuição de partículas capturadas σ nunca é estacionária.

A concentração de partículas em suspensão na saída do meio poroso ($X = 1$) é igual a zero antes do tempo de chegada (T_{br}). Após o tempo de chegada ($T \geq T_{br}$), a concentração de partículas intermediárias em suspensão é igual a:

$$c(1, T) = c^{(0)} \exp\left(\lambda \frac{1-\alpha}{\alpha}\right). \tag{6.7}$$

A Figura 43 mostra a propagação da frente de concentração no plano (X, T). Os perfis de concentração na saída da amostra são apresentados na Figura 44.

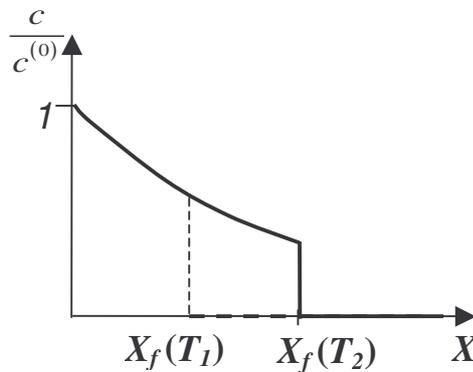


Figura 43: Perfil de concentração de partículas em suspensão. A frente se move com velocidade α/γ .

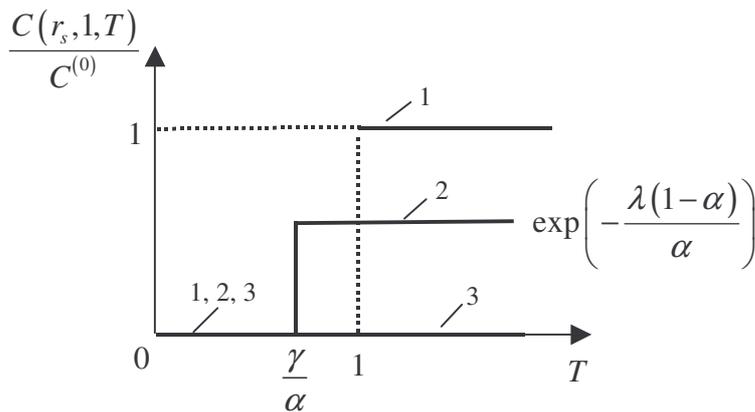


Figura 44: Concentração de partículas na saída do meio poroso ($X=1$). As linhas (1), (2) e (3) correspondem as concentrações c_1 , c_2 e c_3 , respectivamente (ver Figura 42).

Da solução (6.5) conclui-se que o acúmulo de partículas intermediárias capturadas na face de entrada da amostra ($X = 0$) é dado por:

$$\sigma(0, T) = \lambda(1-\alpha)c^{(0)}\phi T. \quad (6.8)$$

A impedância $J(T)$ (que é o inverso do índice de injetividade) é definida como:

$$J(T) = \frac{k_0}{k(T)} = \frac{k_0\Delta p(T)}{\mu LU(T)}. \quad (6.9)$$

Substituindo (6.2) na terceira equação do sistema (6.1) e integrando a equação resultante sobre X de zero até um, obtém-se a expressão para o gradiente de pressão ao longo do reservatório $\Delta p(T)$. Substituindo esta expressão na eq. (6.9) tem-se a impedância $J(T)$ após o tempo de chegada das partículas na saída do reservatório, ou seja, $T \geq (\gamma/\alpha)$:

$$J(T) = mT + 1 - d, \quad (6.10)$$

onde:

$$m = \alpha\beta\phi c^{(0)} \left(1 - e^{\left(-\lambda\frac{1-\alpha}{\alpha}\right)} \right), \quad (6.11)$$

$$d = \beta\gamma\phi c^{(0)} \left\{ e^{\left(-\lambda\frac{1-\alpha}{\alpha}\right)} + \frac{e^{\left(-\lambda\frac{1-\alpha}{\alpha}\right)} - 1}{\lambda\frac{1-\alpha}{\alpha}} \right\}. \quad (6.12)$$

O parâmetro d na eq. (6.12) é da ordem de 10^{-4} e pode ser desprezado. Portanto, pode-se usar somente a inclinação m para determinar o crescimento da impedância $J = J(T)$:

$$J(T) = mT + 1. \quad (6.13)$$

6.1.1. Determinação experimental dos coeficientes do modelo

Para prever o declínio de injetividade durante a injeção de água, os coeficientes (α , γ , β e λ) para o modelo (6.1) devem ser estimados através de testes laboratoriais.

Com o intuito de determinar os coeficientes do modelo, a concentração de partículas em suspensão na saída da amostra – $c(1,T)$, a concentração de partículas capturadas na face de entrada do meio poroso – $\sigma(0,T)$, a queda de pressão – (ΔP) e o tempo de chegada (T_{br}) da concentração de partículas em suspensão devem ser medidos durante a injeção da suspensão particulada.

No caso em que a concentração na saída é constante para $T > T_{br}$ e a concentração de partículas depositadas na face de entrada aumenta linearmente com o tempo, os parâmetros λ e α podem ser determinados a partir da eqs. (6.7) e (6.8). Subseqüentemente, o coeficiente γ pode ser determinado a partir da eq. (6.6).

A partir da medida da queda de pressão na amostra a impedância $J(T)$ pode ser calculada; conseqüentemente o coeficiente m pode ser obtido. Finalmente, o fator de dano β pode ser determinado a partir da eq. (6.11).

6.1.2. Tratamento de dados experimentais

Nesta seção, os parâmetros (λ , α e β) do modelo proposto são determinados analisando os dados experimentais apresentados por Al-Abduwani et al. (2005). No referido trabalho, os autores estudaram o processo de filtração durante a injeção de água com partículas sólidas em suspensão. Utilizando a tomografia computadorizada (*X-ray Computed Tomography*), Al-Abduwani et al. (2005) obtiveram perfis de deposição ao longo do meio poroso (ver Figura 46). Além disso, foram medidas a impedância $J(T)$ (ver Figura 47) e a concentração na saída do meio poroso $c(X = 1, T)$.

A partir dos dados de concentração na saída (ver Figura 45) e dos perfis de deposição (ver Figura 46), os coeficientes de filtração λ e de redução de fluxo α foram calculados utilizando as eqs. (6.7) e (6.8).

Além disso, o coeficiente de dano à formação β foi calculado a partir da curva de impedância (ver Figura 47) e das eqs. (6.11) e (6.13) (ver Tabela 2).

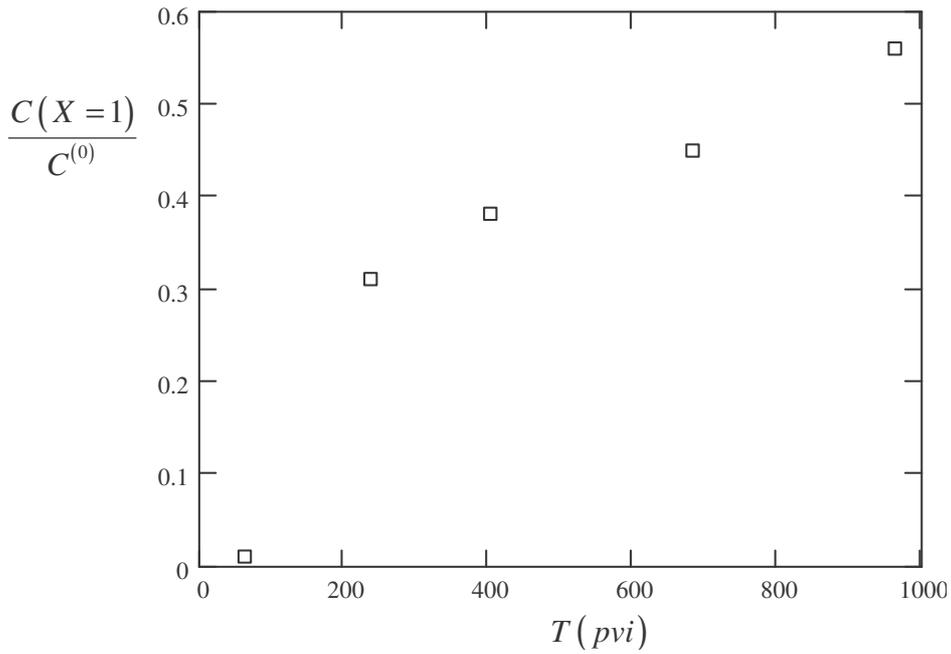


Figura 45: Concentração de partículas em suspensão na saída do meio poroso (Al-Abduwani et al., 2005).

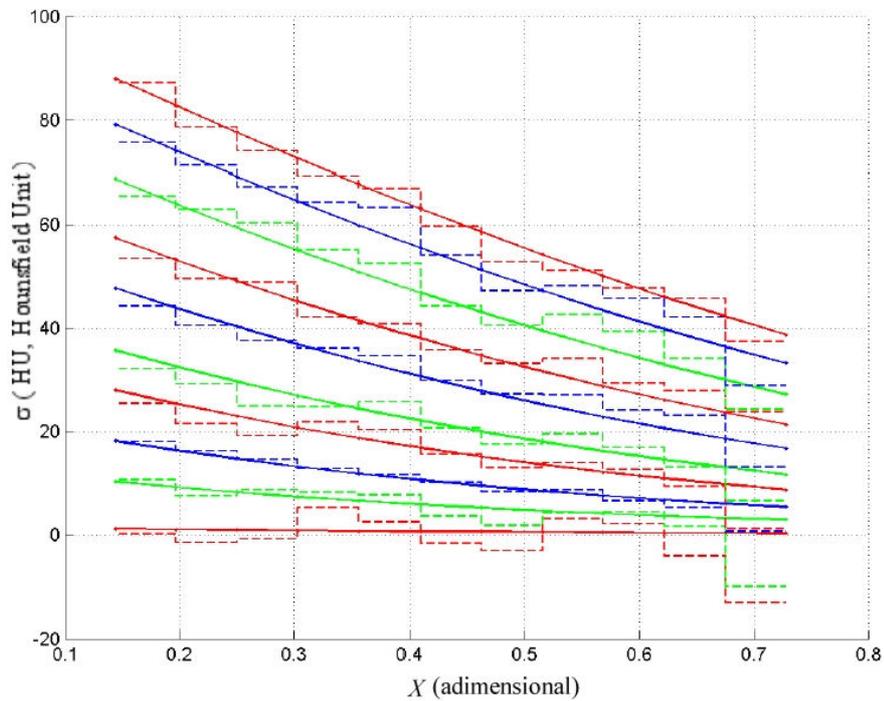


Figura 46: Perfis de deposição ($\sigma(X)$, em unidades HU) ao longo da amostra para vários tempos. A primeira curva (de baixo para cima) corresponde ao tempo $T=19.7$ pvi. As curvas subseqüentes são para os tempos 189, 367, 646, 927, 1500, 2090, 2920, 3770 e 4560 pvi (Al-Abduwani et al., 2005).

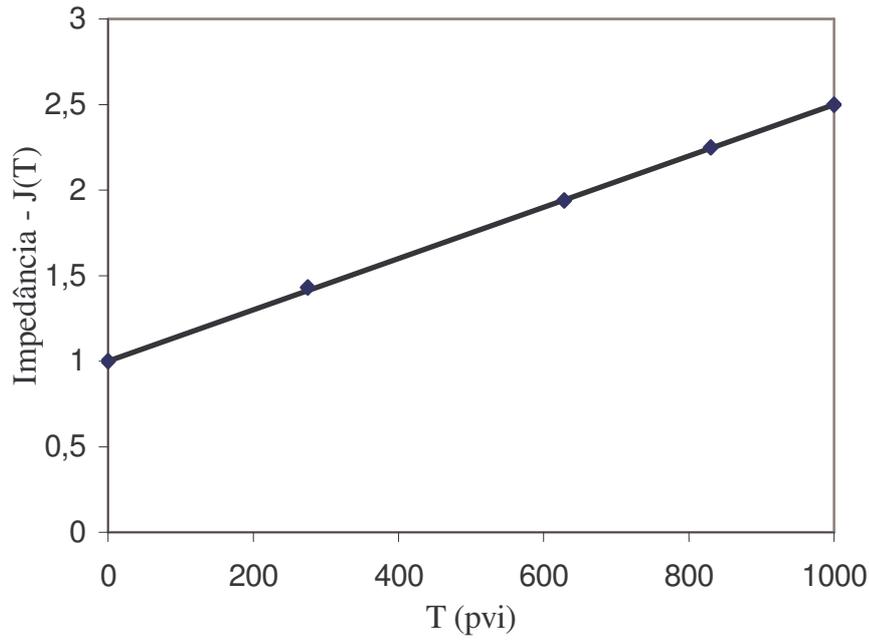


Figura 47: Variação da impedância em função do tempo adimensional (volumes porosos injetados, pvi) segundo Al-Abduwani et al. (2005).

Tempo (pvi)	λ (adimensional)	α (adimensional)	β (adimensional)
19.7	0.52	0.33	5.82×10^3
189	0.51	0.32	5.93×10^3
367	0.42	0.28	6.79×10^3
646	0.32	0.23	8.34×10^3
927	0.27	0.20	9.64×10^3

Tabela 2: Valores dos coeficientes de filtração e de redução de fluxo, obtidos a partir da análise dos dados experimentais apresentados por Al-Abduwani et al. (2005). Neste caso, foi considerada uma concentração normalizada na saída $C(X = 1)/C^{(0)}$ igual à 0.34 (ver Figura 45).