

### 3 Comportamento das emulsões em meios porosos

O escoamento de emulsões através dos microcanais dos meios porosos ainda não é completamente compreendido. Estudos têm sido conduzidos com o objetivo de explicar alguns dos mecanismos que alteram o escoamento, dentre eles:

- Interações mecânicas e elétricas entre as gotas e as paredes rugosas do meio poroso e interações das gotas entre si;
- Perdas de carga devido à presença de gotas de fluido mais viscoso que a fase contínua e à diferença de pressão necessária para deformação das gotas nos canais mais estreitos, conforme indicado na fig. 3.1.

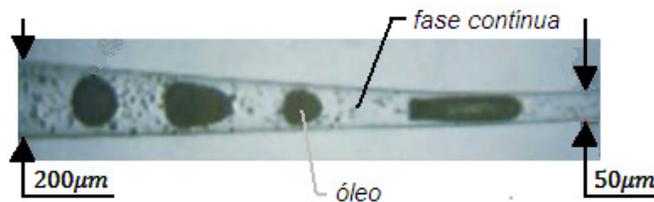


Figura 3.1 Micrografia de tubo capilar com gotas de emulsão deformadas (Cobos, 2009)

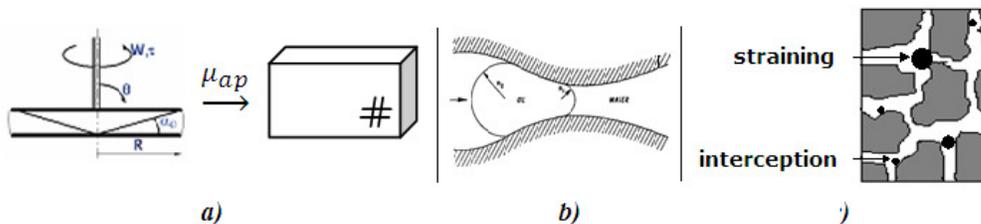
Alguns modelos existentes, esquematizados na figura 3.2, auxiliam a compreensão do escoamento das emulsões e podem ser classificados em:

a) Emulsão tratada como fluido pseudo-plástico: o modelo considera o comportamento de emulsões escoando em meio poroso descrito pela curva de viscosidade obtida em um escoamento viscométrico. Alvarado e Marsden (1979) e

Gogarty (1967) adotaram este modelo e propuseram correções da permeabilidade com base no comportamento reológico da emulsão.

b) Retardamento das gotas: modelo para macroemulsões diluídas atribuído a McAuliffe (1973) e Devereux (1974), assume uma queda na taxa de propagação das gotas grandes ao passar pelas constrições dos poros, dada a redução temporária da permeabilidade local. No entanto, apresenta duas falhas: as previsões errôneas de uma frente plana de avanço de emulsão e do retorno da permeabilidade ao seu valor inicial após a reinjeção de água;

c) Captura de gotas: baseando-se na teoria da filtração, a atração e fixação de gotas pequenas nas paredes do meio poroso (*interception*) e o preenchimento das entradas das constrições por gotas grandes (*straining*) são considerados indiretamente através do coeficiente de filtração e dos parâmetros de restrição ao escoamento e de redistribuição do fluxo (Soo & Radke, 1986). Este sofisticado modelo não apresenta as falhas do modelo anterior.



**Figura 3.2** Modelos dos mecanismos de atuação da emulsão sugeridos: a) análise reológica da emulsão, b) retardamento das gotas e c) captura de gotas

Entretanto, tais modelos não descrevem de forma eficiente o controle da mobilidade associado ao escoamento de emulsões em meios porosos (Sarma *et al.*, 1998). Estudos recentes promovem avanços na compreensão nos mecanismos de bloqueio parcial na escala de poros, analisando-se a diferença de pressão durante o escoamento da fase contínua e o incremento de pressão (extrapressão) necessário para manter-se um fluxo de emulsão à mesma vazão volumétrica (Khambhratna *et al.*, 1998; Bai *et al.*, 2000; Cobos *et al.*, 2009), o que será detalhado a seguir.

### 3.1. Escoamento de emulsões em tubos capilares

A extrapressão devida à passagem de uma única gota por um tubo capilar foi inicialmente relacionada ao número de capilaridade, à razão entre os raios da gota e do capilar, e à razão de viscosidades do óleo e da fase contínua (Ho e Leal, 1975; Olbricht e Leal, 1982). Em tubos capilares de diâmetro variável, a extrapressão é maior em escoamentos com baixo número de capilaridade (Olbricht e Leal, 1983). Experimentos em capilares com garganta (Martinez e Udell, 1990) mostram que a extrapressão não depende do número de capilaridade para gotas pequenas (razão entre os raios da gota e capilar menor que 0,7).

No entanto, os números de capilaridade impostos em tais experimentos ( $10^{-2} < Ca < 1$ ) são muito maiores que os observados em reservatórios reais. Estudos recentes (Cobos *et al.*, 2009) apresentam experimentos de injeção de emulsão em capilares a números de capilaridade mais realistas. A relação entre as pressões necessárias para injeção da fase contínua ( $\Delta p_{fc}$ ) e da emulsão a uma mesma vazão imposta ( $\Delta p_{em}$ ) é relatada como um parâmetro importante para o entendimento do fenômeno de bloqueio parcial. Essa relação é representada por um fator de bloqueio,  $f$ :

$$f = \frac{\Delta p_{fc}}{\Delta p_{em}} \quad (3.1)$$

O comportamento do escoamento através de capilares pode ser estendido para sua utilização em um modelo de rede, como é discutido a seguir.

### 3.2. Aplicação do fator de bloqueio na rede de capilares

Neste trabalho, a emulsão é considerada diluída, estável e com distribuição monodispersa do tamanho de gotas, podendo ser tratada como um sistema monofásico newtoniano. Dada a baixa concentração de óleo na emulsão, o efeito individual de cada gota na velocidade da fase contínua é desprezível. Portanto, o

presente modelo do escoamento considera um bloqueio parcial local como efeito da emulsão como um todo (e não de cada gota individualmente).

Os modelos de rede possibilitam a análise detalhada do escoamento em escala de poro: durante o avanço da emulsão, as gotas atravessam poros e capilares de diferentes formas e tamanhos, e com diferentes velocidades, o que causa variações na intensidade do bloqueio local. Assim, o tipo e influência da emulsão presente em cada elemento são analisados em cada passo de tempo.

Do exposto até aqui, e dado que  $0 < f \leq 1$  para emulsões óleo em água, nota-se que o bloqueio parcial em cada elemento devido ao escoamento de emulsão a uma determinada diferença de pressão provoca a redução da vazão ( $Q_{el}^{em} = fQ_{el}^{fc}$ ). Para escoamentos de emulsão a vazão constante, de forma análoga, há um aumento na diferença de pressão em relação à diferença de pressão para fluxo da fase contínua:

$$\Delta P_{el}^{em} = \frac{\Delta P_{el}^{fc}}{f} \quad (3.2)$$

Assim, a vazão de emulsão em cada elemento pode ser obtida por:

$$Q_{el}^{em} = \frac{g}{l} \Delta P_{el}^{em} \quad \therefore \quad Q_{el}^{em} = \frac{g}{l} \frac{\Delta P_{el}^{fc}}{f} \quad (3.3)$$

Já na rede de capilares, o bloqueio de alguns elementos provoca a redistribuição do fluxo como um efeito adicional atuando na variação das vazões dos elementos. Assim, o fator de bloqueio é aplicado diretamente no termo da resistência hidráulica de cada sistema poro-capilar-poro:

$$\mathfrak{R}_{em} \equiv \frac{l}{g} \frac{1}{f} = \frac{l}{\epsilon A^2 M} \frac{\mu_{fc}}{f} \quad (3.4)$$

A razão entre a viscosidade da fase contínua e o fator de bloqueio,  $\mu_{fc}/f$ , pode ser vista como a viscosidade local efetiva da emulsão, embora as emulsões

diluídas usadas em recuperação melhorada possam ter viscosidade com valores similares aos da água injetada.

### 3.3. Fator de bloqueio

Neste trabalho, a intensidade do efeito de bloqueio da emulsão nos canais porosos são considerados indiretamente através do uso de uma função para o fator de bloqueio, similar à obtida em trabalhos experimentais anteriores (Cobos, 2007; Montalvo, 2008; Romero, 2009), e adicionados os efeitos da concentração da fase dispersa no bloqueio. Esta seção aborda a influência do tamanho de gota e número de capilaridade no bloqueio local, resultando na função de bloqueio  $f'$ , independente da concentração de gotas da fase dispersa. Na seção a seguir será considerado o efeito a concentração de gotas na função bloqueio.

1) Número de capilaridade ( $Ca$ ): experimentos com diferentes números de capilaridade indicam a existência de um número de capilaridade crítico,  $Ca^*$ , acima do qual não ocorre um bloqueio parcial considerável ( $f' \cong 1$ ), o que pode ser visto na figura 3.3 (Cobos *et al.*, 2009). Naquele trabalho,  $Ca^* = 8 \times 10^{-3}$ . Este fenômeno pode ser explicado pelo fato de as forças capilares serem pequenas em escoamentos com altos números de capilaridade e a força necessária para deformar as gotas (revelada pela extrapressão) ser desprezível quando comparada às forças viscosas.

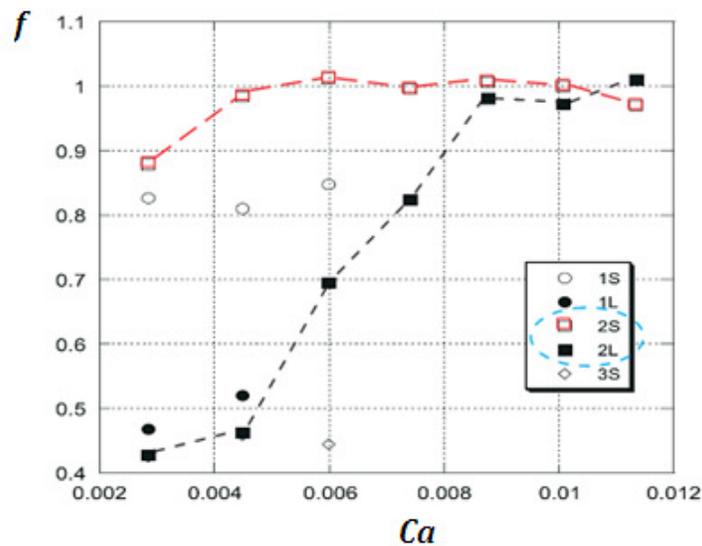


Figura 3.3 Fator de bloqueio em fluxo de emulsão em tubo capilar (Cobos *et al.*, 2009)

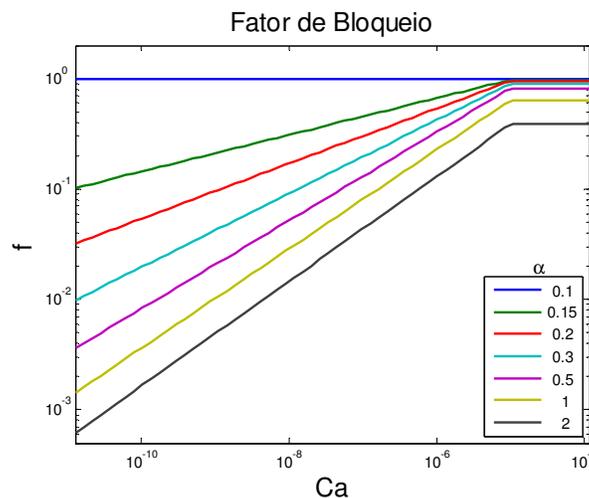
2) Razão entre o raio das gotas e o raio da garganta ( $\alpha \equiv r_D/r_{ele}$ ): os experimentos mostram que as gotas pequenas em relação ao tamanho do capilar causam uma extrapressão desprezível ( $f' \cong 1$ ), como a emulsão 2S na figura 3.4. Os dados sugerem a existência de uma razão de raios crítica,  $\alpha^*$ , acima da qual a influência do tamanho de gota é notada.

Assim, a influência da razão de raios em cada elemento e do número de capilaridade local no fator de bloqueio pode ser considerada através de uma função arbitrária,  $f' = f'(\alpha, \alpha^*, Ca, Ca^*, k_A)$ , que descreva o comportamento observado nos experimentos, como a função:

$$\alpha \leq \alpha^*, \quad f' = 1 \quad (3.5a)$$

$$\alpha > \alpha^*, \quad \begin{cases} Ca > Ca^*, & f' = e^{-k(\alpha-\alpha^*)} \\ Ca \leq Ca^*, & f' = e^{-k(\alpha-\alpha^*)} \left( \frac{Ca}{Ca^*} \right)^{k \frac{(\alpha-\alpha^*)}{\alpha^*}} \end{cases} \quad (3.5b)$$

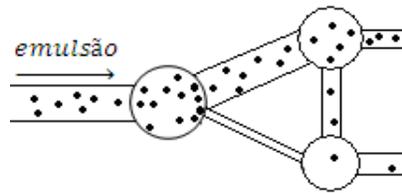
onde os parâmetros  $\alpha$  e  $Ca$  são calculados para cada elemento (a cada passo de tempo),  $\alpha^*$  e  $Ca^*$  são parâmetros característicos da emulsão utilizada e o parâmetro  $k$  pode ser usado para o ajuste da função de bloqueio a dados experimentais. A função fator de bloqueio varia com a razão de raios,  $\alpha$ , e o número de capilaridade,  $Ca$ , de acordo com a figura 3.4, para  $\alpha^* = 0,1$  e  $Ca^* = 1 \times 10^{-5}$ :



**Figura 3.4** Influência do tamanho de gota e número de capilaridade no fator de bloqueio

### 3.4. Concentração volumétrica de gotas na emulsão

Até o presente, na descrição do escoamento de emulsão através de cada capilar, não foi levado em conta o efeito da concentração de gotas da fase dispersa. A concentração é considerada a mesma em todos os elementos da rede. Esta é uma aproximação bem forte, pois na injeção de emulsão O/A em um meio poroso saturado de água, algumas gargantas do espaço poroso vão ser bloqueadas pela presença de gotas da fase dispersa, levando a uma variação da concentração de gotas na rede, como esquematizado na fig. 3.5.



**Figura 3.5** Esquema da injeção de emulsão em elementos saturados com água

Em processos de recuperação com injeção de emulsões, a emulsão geralmente é aplicada após a injeção de um volume considerável de água. O fenômeno de mistura de gotas que ocorre a nível de poros e de difusão molecular (quando importante) faz com que a concentração da fase dispersa varie sensivelmente em cada elemento do meio poroso (fig. 3.5), o que deve ser levado em conta no modelo de escoamento. Ainda, é de fundamental importância que se possa variar a concentração da emulsão injetada na entrada, permitindo a avaliação do seu efeito global sobre o bloqueio de fluxo na rede.

No cálculo do avanço da concentração da emulsão nos elementos da rede, deve-se considerar outro importante fenômeno referente ao fluxo de emulsões. Além do bloqueio parcial exercido pelas gotas, torna-se necessário a definição do caminho (capilar) que cada gota vai seguir ao sair dos poros. Uma classe de abordagens considera o tratamento das gotas com uma abordagem *lagrangeana* e a determinação do caminho de cada gota (saindo de cada poro para os capilares conectados) de forma aleatória (*randomwalk*). Apesar de considerar a natureza estocástica do processo de filtração, esta abordagem não considera os efeitos da velocidade dos fluidos. Numa abordagem, deve-se garantir que a probabilidade de

entrada de gotas em cada capilar de saída seja proporcional à sua velocidade (*flow-biased random walk*).

Esta última abordagem foi considerada neste trabalho através do uso de uma equação para o cálculo da evolução da concentração na rede, obtida através da análise da conservação do volume da fase dispersa da emulsão em cada elemento. Assim, a dispersão molecular não é considerada diretamente, e sim representada através da hipótese de mistura completa dos fluidos em cada elemento a cada passo de tempo.

Em cada elemento contendo um volume de fluidos  $V_{el}$  com uma concentração volumétrica de gotas local  $C_{loc}$ , submetido à vazão volumétrica  $Q_{el}$  por um intervalo de tempo  $dt$ , à entrada de fluido com concentração ( $C_{entra}$ ) e à saída de fluido com concentração ( $C_{sai}$ ), a variação do volume de fase dispersa em cada elemento é:

$$V_{el} \frac{dC_{loc}}{dt} = Q_{el}(C_{entra} - C_{sai}) \quad (3.6)$$

A discretização desta equação no tempo para aplicação em cada elemento da rede será mostrada na seção a seguir. Como não há dados suficientes disponíveis sobre a influência da concentração local sobre o escoamento nos poros, o presente trabalho faz uso de uma função de interpolação para estimar este efeito. Desta forma, a partir de uma função de bloqueio  $f'$  (ajustada de forma a representar o bloqueio do escoamento em cada elemento como uma função do tamanho de gota e do número de capilaridade), a influência da concentração local pode ser estimada através da aplicação da seguinte função para o fator de bloqueio final,  $f = f(f', k_C, C_{loc}, C_{max})$ :

$$f = 1 + (f' - 1) \left( \frac{C_{loc}}{C_{max}} \right)^{k_C} \quad (3.7)$$

A razão  $C_{loc}/C_{max}$  foi utilizada arbitrariamente como uma forma direta de se considerar a influência da concentração da emulsão no bloqueio do

escoamento. Desta forma, o bloqueio local permanece desprezível quando a concentração local é baixa ( $f \approx 1$  quando  $C_{loc} \approx 0$ ); à medida que a concentração aumenta, o fator de bloqueio diminui segundo a variação definida pelo parâmetro  $k_c$  (fig. 3.6). Quando a concentração local atinge o valor máximo de concentração,  $C_{loc}/C_{max} = 1$  e, dado que  $f$  assume o valor de  $f'$ , o bloqueio naquele elemento será o máximo para aquela configuração ( $\alpha$  e  $Ca$  locais).

Desta forma, torna-se possível o cálculo da evolução da concentração de gotas de uma emulsão em um meio saturado com água. Ainda, com a função  $f'$  ajustada para uma emulsão com dada concentração,  $C_{max}$ , a expressão de  $f$  permite a variação da concentração da emulsão injetada ( $0 \leq C \leq C_{max}$ ) de forma simples e direta.

### 3.5. Modelo computacional

As expressões para atualização da concentração volumétrica nos elementos da rede podem ser obtidas a partir da expansão da equação de concentração em séries de Taylor. Tendo em vista que são utilizados passos de tempo muito pequenos no modelo dinâmico de rede, os termos de ordem maior que um podem ser desprezados.

Desta forma, a atualização da concentração nos capilares,  $C_c^t$ , após a entrada de emulsão durante um passo de tempo,  $\Delta t$ , é dada por:

$$C_c^t = C_c^{t-1} + \frac{Q_c(C_{p,entra}^{t-1} - C_c^{t-1})\Delta t}{V_c} \quad (3.8)$$

onde  $Q_c$  é a vazão volumétrica,  $V_c$  é o volume do capilar e  $C_{p,entra}^{t-1}$  é a concentração volumétrica da emulsão que entra no capilar. Visto que cada capilar está situado entre dois poros, a emulsão que entra no capilar é proveniente do poro com maior pressão.

Após a atualização da concentração nos capilares, o cálculo da concentração nos poros deve considerar a taxa volumétrica de entrada de gotas de fase dispersa nos mesmos. Esta é dada pelosomatório dos produtos entre as vazões e as concentrações dos capilares de entrada. Tais capilares de entrada são aqueles, dentre todos os  $n$  capilares vizinhos, que o conectam a poros vizinhos com maior pressão que a sua própria pressão ( $p_j > p_i$ ). Assim, a taxa volumétrica de entrada de fase dispersa em um dado poro é:

$$\dot{V}_{P,entra}^{\acute{o}leo} = \sum_{j, p_j > p_i}^n Q_c C_c^{t-1} \quad (3.9)$$

Finalmente, a concentração nos poros será:

$$C_P^t = C_P^{t-1} + \frac{(\dot{V}_{P,entra}^{\acute{o}leo} - Q_P C_P^{t-1})\Delta t}{V_P} \quad (3.10)$$

Nas equações anteriores, os índices sobrescritos,  $t$  e  $t - 1$ , indicam o uso dos valores de concentração obtidos no passo de tempo anterior, conforme antecipado na seção 2.3. Dado que cada poro está conectado aos poros vizinhos através de capilares, o termo  $C_c^{t-1}$  da eq. 3.8 merece uma atenção especial. Este termo reforça a necessidade de que a equação anterior seja aplicada em todos os poros com base nas concentrações dos capilares do passo de tempo anterior, ou seja, antes da atualização da concentração dos capilares.

As vazões  $Q_c$  e  $Q_P$  não recebem índices sobrescritos com o intuito de indicar que as vazões do passo imediatamente anterior podem permanecer com os valores calculados a alguns passos de tempo atrás, devido ao esquema de otimização computacional utilizado.

Dado que os passos de tempo devem ser pequenos, a concentração local de óleo varia lentamente a cada passo. Assim, notam-se dois fatos inerentes aos modelos dinâmicos da injeção de emulsões em meios porosos, ainda não relatados explicitamente na literatura:

I) No início da invasão de um elemento pela emulsão, a concentração ainda é muito baixa para efetuar algum bloqueio parcial no elemento. Assim, a concentração local transiente deve ser considerada um parâmetro adicional que influencia o fator de bloqueio em cada elemento (seção anterior);

II) Tal como os fatores de bloqueio locais, a distribuição de pressão (e consequentemente de vazão) também varia lentamente. Nota-se, então, não ser estritamente necessário atualizar-se a distribuição de pressão a cada passo de tempo. Neste trabalho, a pressão é atualizada somente quando o fator de bloqueio varia consideravelmente em alguns elementos a ponto de alterar a distribuição de pressão de forma importante. A acurácia da simulação é mantida pela atualização da taxa volumétrica de entrada de óleo rigorosamente a cada passo de tempo (eq. 3.9) e pela atualização dos fatores de bloqueio como função da concentração local (eq. 3.7) nos passos em que não foi necessária a atualização da pressão. Garante-se, assim, uma redução considerável no tempo de execução, visto que a atualização da pressão é a etapa que consome a maior parte do tempo de execução.

Os desvios referentes ao cálculo das concentrações locais foram obtidos através da análise da conservação de massa da fase dispersa e apresentaram valores desprezíveis em todas as simulações realizadas neste trabalho. Os desvios relativos ( $\xi_{fd}$ ) foram calculados em cada passo de tempo através do balanço entre os volumes de gotas injetado,  $\sum \Delta t Q C_{inj}$ , e produzido,  $\sum \Delta t Q_{c,s} C_{c,s}$ , comparados com o volume de gotas presente na rede,  $V_{el} C_{el}$ .

$$\xi_{fd} = \frac{\sum t Q C_{inj} - \sum t Q_{c,s} C_{c,s}}{\sum V_{el} C_{el}} - 1 \quad (3.11)$$

A concentração da emulsão escoando na saída da rede pode contribuir para as análises do modelo de escoamento utilizado e da influência do bloqueio de poros na redistribuição de fluxo.

A concentração na saída é calculada pela média das concentrações dos capilares conectados à saída da rede,  $C_{c,s}$ , ponderada pelas respectivas vazões volumétricas,  $Q_{c,s}$ .

$$C_{saída} = \frac{\sum C_{c,s} Q_{c,s}}{\sum Q_{c,s}} \quad (3.12)$$

Este trabalho utilizou um modelo de rede não-estruturado, onde não há uma estrutura padrão topológica. Assim, após a definição das características que representam a amostra de rocha-reservatório considerada, de um modelo para o fluido e de seus mecanismos de escoamento, é necessária a utilização de uma estrutura de dados para o acesso aos elementos da rede.

Esta envolve a varredura de cada elemento da rede para a atualização das variáveis locais desejadas. O fluxograma a seguir ilustra o funcionamento básico do simulador desenvolvido no presente trabalho para o escoamento de emulsões na escala de poros.

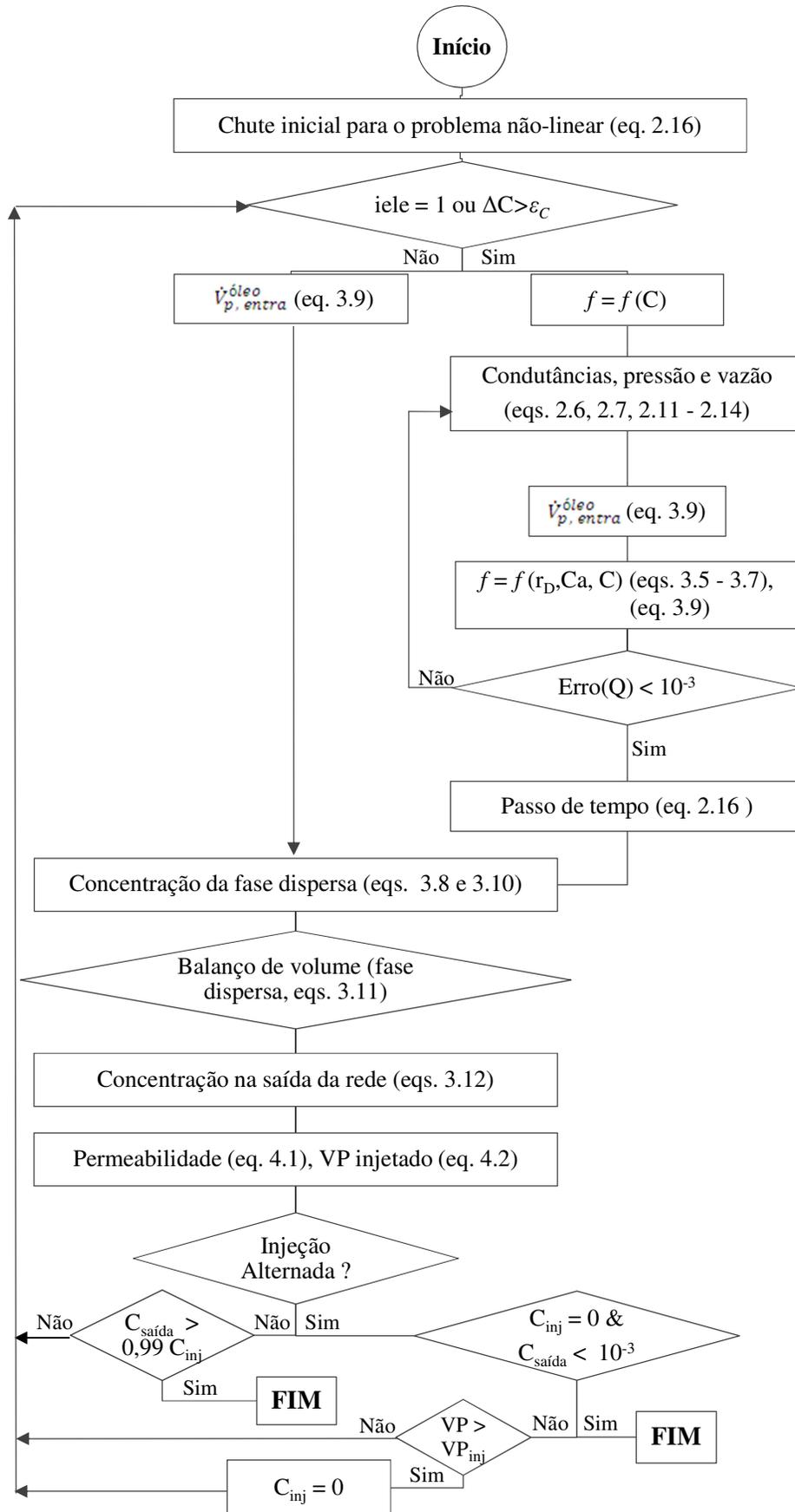


Figura 3.6 Fluxograma referente ao código desenvolvido