

5

Modelagem dinâmica de embebição através de um meio poroso

Neste capítulo apresenta-se uma modelagem dinâmica do escoamento de emulsões óleo em água através da rede Berea-M descrita no capítulo 3 que inicialmente está saturada com óleo. Este processo é denominado de embebição, uma vez que a fase molhante (emulsão) desloca a fase não molhante (óleo). O modelo não considera o termo de pressão capilar, i.e., a vazão da fase molhante é diretamente proporcional à diferença de pressão entre os centros dos poros ocupados pelo fluido molhante e não molhante. A interface é monitorada através dos elementos usando uma equação modificada de Poiseuille na qual considera-se uma resistência hidráulica equivalente entre os centros dos poros. Assume-se que a resistência hidráulica ao escoamento do fluido molhante através de suas camadas superficiais localizadas nos vértices dos elementos de seção transversal poligonal é constante durante todo o processo de simulação. Na modelagem dinâmica de redes, a vazão do fluido injetado na entrada da rede foi imposta e a subsequente resposta transiente de pressão e posição associada à interface é calculada. O campo de pressão rege o movimento e a vazão dos fluidos dentro da rede Berea-M.

A emulsão óleo em água é assumida como sendo monodispersa e ao mesmo tempo como se fosse de uma fase só, neste caso água devido à baixa concentração de óleo (10 %). A água contida inicialmente na rede é aquela que ficou na condição final do processo de drenagem modelado previamente no caso quase-estático, esta água será considerada como a fase contínua da emulsão.

Os mecanismos considerados neste trabalho como sendo os responsáveis pelo deslocamento dos fluidos na rede de capilares são comentados a seguir.

5.0.1

Escoamento através das finas camadas superficiais no meio poroso

Num meio poroso, a fase molhante mantém a conectividade entre os poros através de uma fina camada molhante que se forma sobre sua superfície. O escoamento desta fase molhante desempenha uma parte importante na remoção de componentes não molhantes do meio poroso. Uma forma clara e mais correta de incorporar o escoamento através de uma fina camada de líquido é solucionando dois problemas de escoamento linear, um para o fluido não molhante que escoar na parte central dos capilares e o outro para o fluido molhante que escoar nas paredes dos capilares. As soluções dos dois problemas

proporcionam o campo de pressões para os dois fluidos. As pressões existentes em cada fase num mesmo elemento estão relacionadas através da pressão capilar que define o novo raio de curvatura da interface $P_c = \frac{\sigma_i}{r}$. Logo, a condutância é calculada com o novo raio de curvatura e o procedimento de cálculo das pressões é repetido até atingir a convergência.

Uma análise mais simplificada é efetuada neste trabalho, uma vez que o termo de pressão capilar não é considerado, por tanto, a pressão das duas fases é a mesma em cada elemento da rede e o escoamento de cada fase é inversamente proporcional a sua resistência hidráulica entre os centros dos poros.

5.0.2 Deslocamento pistão

Este é um processo pela qual a pressão do fluido deslocante é alto o suficiente para permitir a invasão deste fluido no elemento avaliado. O fluido deslocante (fase molhante) empurra de forma uniforme o fluido deslocado (fase não molhante), como mostrado na Fig.(3.13).

5.1 Princípios do modelo dinâmico

O modelo considerado nesta pesquisa é desenvolvido considerando os seguintes princípios:

1. A quantidade de cada fase ou posição da interface em cada poro ou capilar é conhecido a cada passo de tempo. O volume de cada fase controla a configuração dos fluidos, o que é necessário para o cálculo da resistência hidráulica.
2. A resistência hidráulica dos fluidos através do meio poroso é representado por uma rede equivalente de resistores elétricos. As resistências hidráulicas dos fluidos entre os centros de dois poros conectados entre si é calculada e utilizada na equação da conservação de massa para obter a pressão nos poros. A utilização de uma rede equivalente de resistores permite o tratamento do problema de forma simples, como solucionar as equações de balanço de massa para um escoamento monofásico.
3. A diferença de pressão entre poros e a resistência hidráulica de cada fase calculada previamente, permitem o deslocamento das fases entre poros e, com isto, atualizar os volumes dos fluidos na rede de capilares.

5.1.1

Hipóteses

As seguintes hipóteses foram consideradas para a modelagem dinâmica bifásica do escoamento de emulsões através de uma rede de capilares:

- Fluidos Newtonianos, imiscíveis, incompressíveis e com propriedades constantes.
- Emulsões monodispersas, diluídas, estáveis e molhantes à superfície.
- A superfície da rede é preferencialmente molhada por água, por tanto o ângulo de contato θ entre a interface e a superfície sólida é 0° .
- O raio de curvatura, r , da interface, Fig. (5.2- a e b), é assumido constante com respeito ao tempo e à saturação. O valor do raio de curvatura é o valor encontrado no fase final do processo de drenagem no modelo quase-estático.
- O deslocamento da fase molhante num elemento só acontece quando a pressão da fase molhante é maior que a pressão da fase não molhante.

5.2

Escoamento bifásicos através de um capilar

O escoamento de dois fluidos através de um capilar é considerado como sendo o escoamento de um único fluido. Isto é possível mediante a utilização do conceito de resistência hidráulica equivalente de acordo com a configuração que assumem os dois fluidos presentes entre os dois poros. Estes poros, denominados de poro i e poro j , estão conectados por um capilar, esquematicamente mostrado na Fig. (5.1).

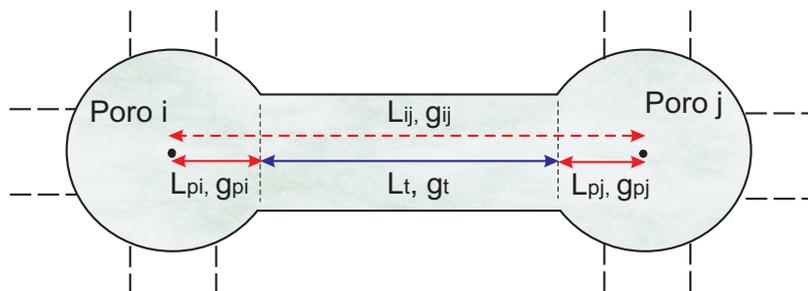


Figura 5.1: Representação de dois poros conectado por um capilar.

Considerando as hipóteses de fluidos imiscíveis e incompressíveis, a vazão no capilar de comprimento L_t e condutância g_t , é dada pela seguinte equação:

$$Q_{ij} = f_{bq,ij} \frac{g_{ij}}{L_{ij}} (P_i - P_j), \quad (5-1)$$

onde P_i e P_j são as pressões nos poros i e j respectivamente; $\frac{L_{ij}}{g_{ij}} (\frac{1}{f_{bq,ij}})$ é a resistência hidráulica aparente entre os centros dos dois poros a qual é calculada utilizando a Eq. (5-9).

5.2.1

Resistência hidráulica dos fluidos num elemento

Elementos com seções transversais não circulares apresentam a fase molhante aderida nos seus vértices. A fração da área ocupada pela fase molhante é identificada por A_c na Fig. (5.2- a e b), por tanto, suas resistências hidráulicas devem ser consideradas na resistência equivalente. A incorporação da resistência hidráulica de cada fase num capilar é apresentada a seguir.

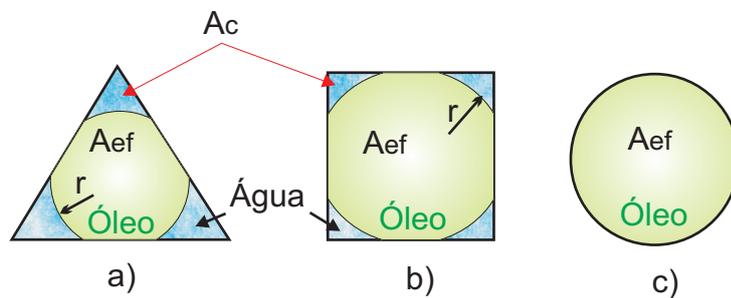


Figura 5.2: Seção transversal triangular, retangular e circular.

A **resistência hidráulica do óleo** ($\frac{L_t}{g_o} (\frac{1}{f_{bq,o}})$), num elemento contendo este fluido na condição de não retido, configuração descrita em detalhe na próxima sub-seção, é calculada pela seguinte equação:

$$\frac{L_t}{g_o} (\frac{1}{f_{bq,o}}) = \frac{L_t \mu}{A_{ef}^2 G \xi} (\frac{1}{f_{bq,o}}), \tag{5-2}$$

onde G é o fator de forma representado na Fig. (3.3), L_t o comprimento do capilar, μ a viscosidade do fluido e ξ é uma constante que varia dependendo da forma do elemento, tal como proposto por [33] para círculos $\xi = 1/2$, para triângulos $\xi = 3/5$ e para retângulos $\xi = 0,5623$; A_{ef} é a área efetiva ou a área aberta ao fluxo do óleo, Fig. (5.2), e obtida mediante

$$A_{ef} = A_t - \sum_{j=1}^m A_{c(j)}, \tag{5-3}$$

onde A_t é a área da seção transversal dada pelas Eqs. (3-2), (3-3) ou (3-7), m é o número de vértices da seção transversal e A_c é a área no vértice calculada pela Eq. (3-9).

A **resistência hidráulica da emulsão** é calculada em todos os elementos que contém ou não contém o óleo, exceto os elementos de seção circular

contendo óleo. **Para capilares que não contem óleo**, a resistência hidráulica ($\frac{L_t}{g_w}(\frac{1}{f_{bq,w}})$) é dada pela seguinte equação

$$\frac{L_t}{g_w}(\frac{1}{f_{bq,w}}) = \frac{L_t \mu}{A_t^2 G \xi}(\frac{1}{f_{bq,w}}), \quad (5-4)$$

Para capilares que contem parcialmente ou completamente óleo, a resistência hidráulica devido à emulsão no vértices ($\frac{L_t}{g_{wc}}(\frac{1}{f_{bq,wc}})$) é dada pela seguinte equação (Hui e Blunt [46, 47]):

$$\frac{L_t}{g_{wc}}(\frac{1}{f_{bq,wc}}) = \left(\frac{A_c^2 (1 - \sin \beta)^2 (\varphi_2 \cos \theta - \varphi_1) \varphi_3^2}{12 L_t \mu \sin^2 \beta (1 - \varphi_3)^2 (\varphi_2 + \varphi_1)^2} \right)^{-1} (\frac{1}{f_{bq,wc}}), \quad (5-5)$$

$$\varphi_1 = \left(\frac{\pi}{2} - \beta - \theta \right), \quad (5-6)$$

$$\varphi_2 = \cot \beta \cos \theta - \sin \theta, \quad (5-7)$$

$$\varphi_3 = \left(\frac{\pi}{2} - \beta \right) \tan \beta, \quad (5-8)$$

sendo β o ângulo médio de um vértice numa seção transversal triangular ou retangular. Tal como estabelecido por Hui e Blunt [46], estas equações são validas quando o ângulo de contato θ está sujeito à seguinte restrição $\theta \leq \pi/2 - \beta$; neste trabalho consideramos $\theta = 0^\circ$ devido à hipótese assumida de que o meio é preferencialmente molhado pela emulsão.

5.2.2

Configurações e resistências equivalentes dos fluidos entre poros

Durante o processo de embebição num elemento da rede de capilares, o escoamento pode assumir diversas configurações, isto é, a interface formada pelo fluido molhante (neste caso emulsão) e pelo fluido não molhante (óleo) depende das condições em que ocorre o deslocamento. Neste trabalho considerase 4 configurações possíveis que são denominadas de: *i*) condição inicial, Fig. (5.3); *ii*) elemento invadido, Fig. (5.4); *iii*) elemento com interface, Fig. (5.5); e *iv*) óleo retido, Fig. (5.6).

A formulação da resistência hidráulica equivalente, $\frac{L_{ij}}{g_{ij}^e}(\frac{1}{f_{bq,ij}})$, do escoamento bifásico entre o poro *i* de comprimento médio L_{pi} e o poro *j* de comprimento médio L_{pj} conectados por um capilar de comprimento L_t e esquematizado na Fig. (5.1), é calculada como sendo a resistência equivalente das resistências individuais, Eq. (5-9). Observe que a distância entre os centros dos poros *i* e *j* (L_{ij}) é igual a $L_{pi} + L_t + L_{pj}$,

$$\frac{L_{ij}}{g_{ij}^e}(\frac{1}{f_{bq,ij}}) = \frac{L_i}{g_i^e}(\frac{1}{f_{bq,i}}) + \frac{L_t}{g_t^e}(\frac{1}{f_{bq,t}}) + \frac{L_j}{g_j^e}(\frac{1}{f_{bq,j}}), \quad (5-9)$$

onde L_t é o comprimento do capilar, g_t^e é a condutividade da emulsão no capilar,

$f_{bq,ij}$ é o fator de bloqueio no capilar, L_i e L_j são os comprimentos médios dos poros, g_i^e , g_j^e e $f_{bq,i}$, $f_{bq,j}$ são as condutâncias e os fatores de bloqueio nos poros i e j , respectivamente. **A resistência hidráulica do capilar** pode ter qualquer um das quatro das configurações mencionadas anteriormente e suas formulações são apresentadas nas próximas sub-seções.

5.2.2.1

Configuração - condição inicial

A configuração mostrada na Fig. (5.3-a) é a condição inicial em que as duas fases estão presentes em cada elemento da rede Berea-M. Esta configuração corresponde à condição final encontrada no deslocamento quase-estático de um processo de drenagem. A área A_c dos vértices da seção reta ocupada pelo fluido molhante (emulsão), mostrada na Fig. (5.2), permanecerá constante em todos os elementos que apresentem duas fases durante todo o processo. A resistência equivalente no capilar é dada pela seguinte equação:

$$\frac{L_t}{g_t} \left(\frac{1}{f_{bq,t}} \right) = \left(f_{bq,o} \frac{g_o}{L_t} + f_{bq,wc} \frac{g_{wc}}{L_t} \right)^{-1}, \quad (5-10)$$

onde $\frac{L_t}{g_o} \frac{1}{f_{bq,o}}$ e $\frac{L_t}{g_{wc}} \frac{1}{f_{bq,wc}}$ são calculados usando as Eqs. (5-2) e (5-5), respectivamente. Na Fig. (5.3-b) é mostrado também a representação mediante um arranjo de resistências elétricas para esta configuração.

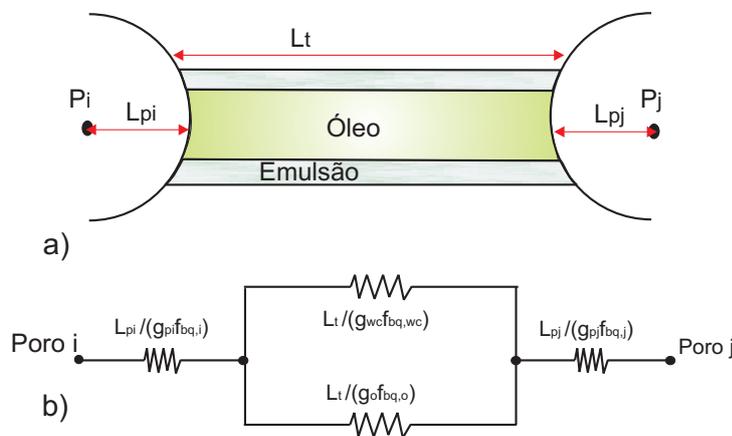


Figura 5.3: Configuração de um elemento na condição inicial.

5.2.2.2

Configuração - elemento invadido

A configuração mostrada na Fig. (5.4-a) é a condição de elemento invadido, isto é, óleo totalmente deslocado pela emulsão. Neste caso, como somente existe emulsão no capilar, a resistência hidráulica do capilar $\frac{L_t}{g_t} \left(\frac{1}{f_{bq,t}} \right)$

é calculada pela expressão

$$\frac{L_t}{g_t} \left(\frac{1}{f_{bq,t}} \right) = \frac{L_t}{g_w} \left(\frac{1}{f_{bq,w}} \right), \quad (5-11)$$

onde $\frac{L_t}{g_w} \left(\frac{1}{f_{bq,w}} \right)$ é calculada com a Eq. (5-4). Na Fig. (5.4-b) é mostrado também a representação mediante um arranjo da resistência elétrica para esta configuração.

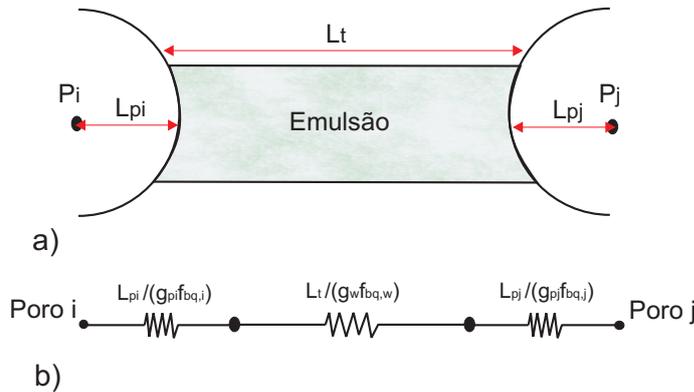


Figura 5.4: Configuração de um elemento invadido por emulsão.

5.2.2.3 Configuração - elemento com interface

A condição de elemento invadido parcialmente, isto é, óleo parcialmente deslocado pela emulsão é a configuração mostrada na Fig. (5.5-a). A formulação da resistência equivalente no capilar é dada pela seguinte equação:

$$\frac{L_t}{g_t} \left(\frac{1}{f_{bq,t}} \right) = (1 - f_{inv}) \frac{L_t}{g_w} \left(\frac{1}{f_{bq,w}} \right) + \left(\frac{f_{bq,o}}{f_{inv}} \frac{g_o}{L_t} + \frac{f_{bq,wc}}{f_{inv}} \frac{g_{wc}}{L_t} \right)^{-1}, \quad (5-12)$$

onde $\frac{L_t}{g_o} \left(\frac{1}{f_{bq,o}} \right)$, $\frac{L_t}{g_w} \left(\frac{1}{f_{bq,w}} \right)$ e $\frac{L_t}{g_{wc}} \left(\frac{1}{f_{bq,wc}} \right)$ são calculados usando a Eq. (5-2), Eq. (5-4) e (5-5), respectivamente; f_{inv} é um fator que indica a fração de óleo existente no elemento e varia entre 1 e 0; $f_{inv} = 1.0$ corresponde a um capilar totalmente preenchido por óleo e $f_{inv} = 0$ corresponde a um capilar totalmente preenchido por emulsão. Na Fig. (5.5-b) é mostrado também a representação mediante arranjo de resistências elétricas para esta configuração.

5.2.2.4 Configuração - óleo retido

A configuração mostrada na Fig. (5.6-a) é a condição de elemento com óleo retido, isto é, o óleo fica imóvel no capilar durante todo o processo de invasão. O óleo retido não tem conexão ou não segue um caminho contínuo desde sua localização até a entrada ou até a saída da rede Berea-M simulada. A

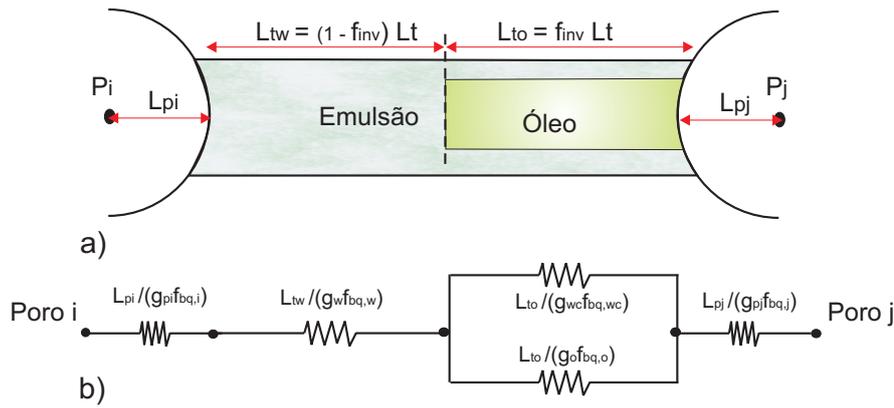


Figura 5.5: Configuração de um elemento com interface móvel.

formulação da resistência equivalente no capilar é dada pela seguinte equação:

$$\frac{L_t}{g_t} \left(\frac{1}{f_{bq,t}} \right) = (1 - f_{inv}) \frac{L_t}{g_w} \frac{1}{f_{bq,w}} + f_{inv} \frac{L_t}{g_{wc}} \frac{1}{f_{bq,wc}}, \quad (5-13)$$

onde $\frac{L_t}{g_w} \left(\frac{1}{f_{bq,w}} \right)$ e $\frac{L_t}{g_{wc}} \left(\frac{1}{f_{bq,wc}} \right)$ são calculados usando a Eqs. (5-4) e (5-5), respectivamente. Tal como na configuração de elemento com interface, o escalar f_{inv} indica a fração de óleo existente num elemento e varia entre 1 e 0. Na Fig. (5.6-b) é mostrado também a representação mediante um arranjo de resistências elétricas para esta configuração.

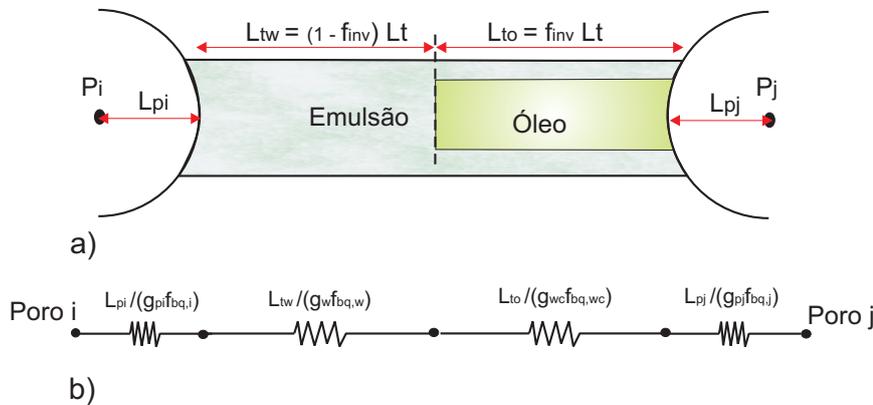


Figura 5.6: Configuração de um elemento com óleo retido.

5.3

Modelagem da injeção de emulsões num meio poroso (Embebição)

Com a introdução do conceito de resistência hidráulica equivalente na equação de conservação de massa, a cada instante a solução do modelo bifásico pode ser considerada como sendo similar a um problema de fluxo monofásico, na qual a condutância das fases entre os poros é dada pela resistência hidráulica equivalente calculada no instante de tempo anterior. A aplicação do princípio

de conservação de massa em cada poro resulta em

$$\sum_{j=1}^m Q_{i,j} = 0, \quad (5-14)$$

onde $Q_{i,j}$ é o fluxo volumétrico através de um capilar que conecta o poro i com o poro j , m o número de poros vizinhos conectados ao poro i . O número máximo de conectividade de um poro na rede Berea-M é 19.

A vazão que atravessa a rede Berea-M é encontrado solucionando simultaneamente a Eq. (5-14) em todos os poros da rede. A substituição da Eq. (5-1) na Eq. (5-14) gera um sistema de n equações lineares que depende da pressão em cada poro,

$$\sum_{j=1}^m f_{bq,ij} \frac{g_{ij}}{L_{ij}} (P_i - P_j) = 0, \quad (5-15)$$

a resistência hidráulica equivalente $\frac{L_{ij}}{g_{ij}} \left(\frac{1}{f_{bq,ij}} \right)$ é calculada pela Eq. (5-9), apresentada na seção anterior.

Para efeitos de comparação, as condições de contorno utilizadas para resolver o sistema de equações são as mesmas dos experimentos, isto é: (i) fluxo constante nos capilares conectados com a seção de entrada do fluido e (ii) pressão constante nos capilares conectados com a seção de saída do fluido. Utilizando notação matricial, o conjunto de equações algébricas pode ser representado como

$$[A][P] = [B], \quad (5-16)$$

onde $[A]$ é a matriz dos coeficientes ($n \times n$), $[P]$ e $[B]$ são matrizes ($n \times 1$), sendo n o número de poros na rede, neste caso 12.351. A matriz é armazenada em formato esparsa e resolvida mediante o método iterativo *GMRES*, desenvolvido por Saad e Schultz [49]. Subrotinas da biblioteca Sparskit foram baixadas de <http://www-users.cs.umn.edu/saad/software/SPARSKIT/sparskit.html> e adicionadas no programa principal desenvolvido neste trabalho para resolver o sistema linear resultante. Como resultado, a diferença de pressão em cada elemento da rede é agora conhecida. Por tanto, o fluxo em cada capilar também é conhecido. Desta forma, a configuração da interface entre as duas fases pode ser atualizada para o cálculo no próximo instante de tempo.

A simulação procede com a emulsão deslocando o óleo. O objetivo da simulação é determinar qual dos dois fluidos ocupa cada capilar e poro na rede, isto é a saturação das fases em função do tempo para uma vazão de injeção imposta.

5.3.1

Processo de invasão do fluido injetado

O processo de embebição analisado neste trabalho consiste no deslocamento do óleo, que inicialmente está saturando a rede Berea-M, pelo fluido injetado, neste caso emulsão. A emulsão óleo-em-água é considerada como sendo um fluido monofásico que escoar através do meio poroso conforme discutido no capítulo 4.

Uma das hipóteses mencionada inicialmente considera que o deslocamento do óleo num elemento só acontece quando a pressão da fase emulsão é maior que a pressão da fase óleo, além disso, o óleo tem que estar conectado, através de um caminho contínuo com o lado da saída ou com a entrada da rede.

A Fig. (5.7)-(a₁-a₅) mostra um processo de invasão segundo o mecanismo deslocamento pistão. Em cada seqüência das figuras (a₁-a₄) a pressão da emulsão é maior que a pressão do óleo e um dos capilares conectados ao poro j com óleo tem que percorrer um caminho contínuo até a saída para o deslocamento acontecer. A pressão do poro j será considerada como pressão de óleo até o poro ser invadido completamente pela emulsão, como mostra a figura (a₅). Neste instante, o número de elementos possíveis de ser invadidos por emulsão é incrementado de acordo ao número de conectividade, neste caso 3.

A Fig. (5.7)-(b₁-b₅) mostra um processo de invasão segundo o mecanismo deslocamento pistão com formação de óleo retido. Em cada seqüência das figuras (b₁-b₃) a pressão da emulsão é maior que a pressão do óleo e um dos capilares conectados ao poro j com óleo tem que percorrer um caminho contínuo até a saída para o deslocamento acontecer. A pressão do poro j será considerada como pressão de óleo até o poro ser invadido completamente pela emulsão, como mostra a figura (b₄). Neste instante, o número de elementos possíveis de ser invadidos por emulsão é incrementado de acordo ao número de conectividade, neste caso 2, e um volume de óleo ficou retido no capilar. Assume-se a hipótese de que o óleo retido no capilar, configuração mostrada na figura (b₅), permanecerá com a mesma configuração durante todo o processo de simulação.

5.3.2

Seleção do passo de tempo

O algoritmo desenvolvido escolhe o passo de tempo (Δt) da simulação de acordo à seguinte equação:

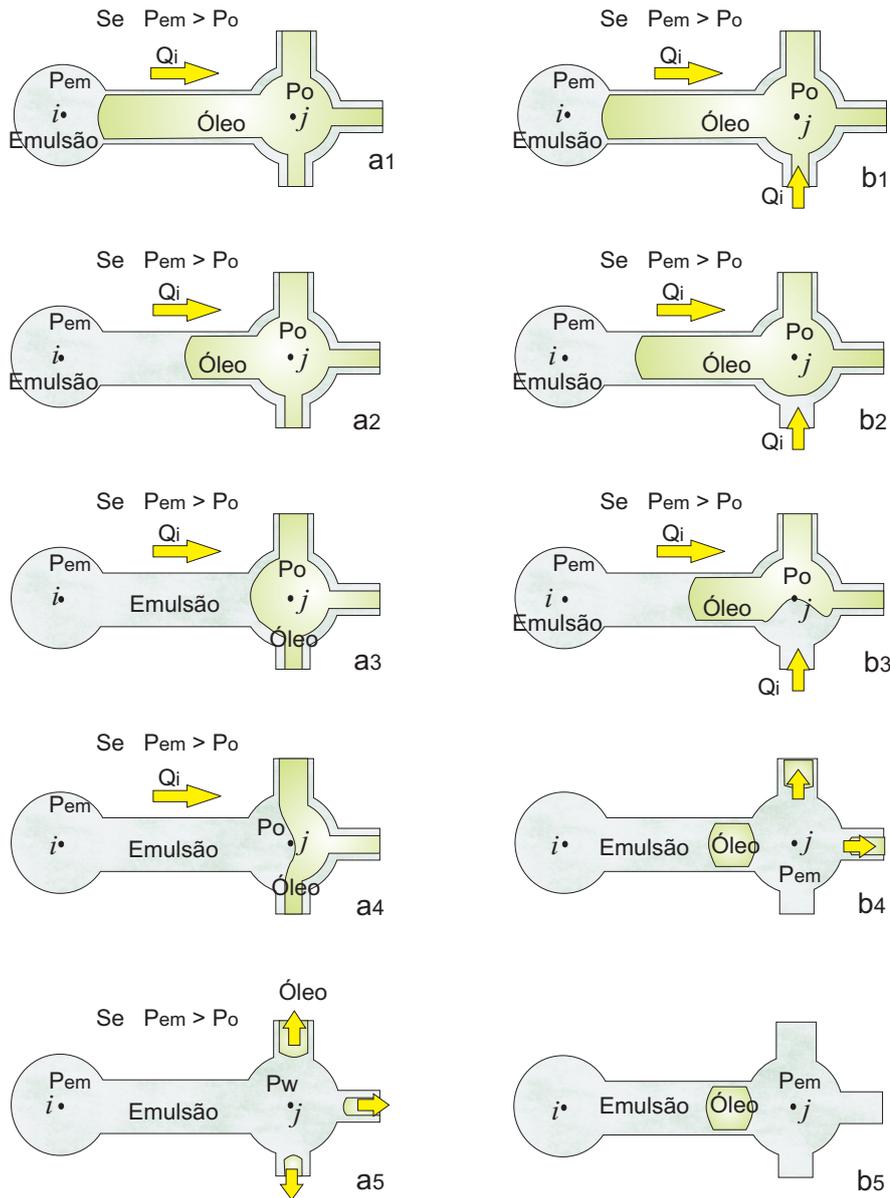


Figura 5.7: Processo de invasão dinâmica em embebição.

$$\Delta t = \min \left\{ \frac{Vol_i}{Q_i} \mid i = 1, \dots, n \right\}, \quad (5-17)$$

Vol_i é o volume da fase injetada no i th elemento necessária para preencher o elemento com esta fase, Q_i é a vazão total do fluido injetado no i th elemento. A Eq. (5-17) assegura que um elemento é preenchido em cada passo de tempo.

5.3.3 Atualização dos volumes dos fluidos

Uma vez determinado Δt , uma nova configuração dos fluidos na rede Berea-M é determinada. Todas as interfaces são deslocadas durante um Δt , ocupando uma nova posição ao longo do elemento. Isto é controlado usando

um fator de invasão f_{inv} em cada elemento, como mostrada na Fig. (5.8) e calculada pela seguinte equação:

$$f_{inv}^{t+1} = f_{inv}^t - \frac{\Delta t Q_i}{L_t A_{ef}} \tag{5-18}$$

onde f_{inv}^t é o fator de invasão na condição inicial, sendo igual a 1 quando a rede esta saturada com óleo, e f_{inv}^{t+1} é o fator de invasão que atualiza a configuração dos volumes dos fluidos na rede Berea-M.

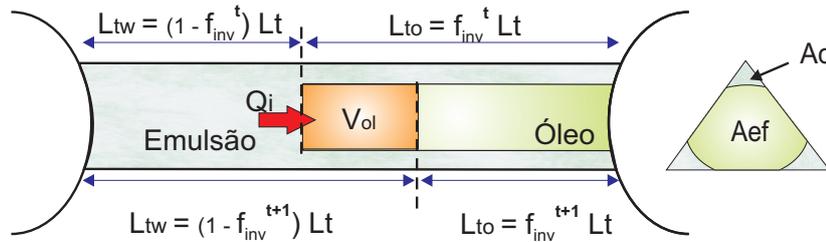


Figura 5.8: Movimento da interface água-óleo.

5.3.4 Procedimento de cálculo

No modelo de redes dinâmico, o campo de pressão é avaliado a cada passo de tempo, e em cada instante de tempo a queda de pressão entre dois corpos de poros não é conhecida *a priori*. Por isso, o cálculo da vazão e o fator de redução f_{rk} requer uma abordagem iterativa. Um chute inicial é feito para a vazão em cada capilar da rede, este fluxo na rede é calculado como se a fase molhante fosse um fluido Newtoniano com viscosidade constante igual à viscosidade da fase contínua da emulsão. Um registro dos elementos contendo duas fases e onde é possível de haver deslocamento da interface, isto é, condição de pressão da emulsão maior que a pressão do óleo e a existência de um caminho contínuo do óleo até a saída da rede, é realizado para logo encontrar o tempo mínimo no qual o fluido injetado, neste caso emulsão, invade completamente um dos elementos registrados. Com a nova configuração dos fluidos na rede, uma resistência equivalente entre poros é calculada em toda a rede e substituída no sistema de equações gerado ao fazer o balanço de massa em cada poro da rede. A solução de este sistema de equações, utilizando o método iterativo *GMRES*, fornece o campo de pressão e com isso a vazão em cada capilar da rede. O fator de bloqueio em cada elemento é atualizada usando a Eq. (4-4), e a pressão, recalculada. O método é repetido até uma convergência satisfatória ser atingida. Em nosso caso, a convergência deve ser atingida simultaneamente

em todos os elementos da rede. A tolerância usada para estudos de simulação é dada pela Eq. (3-27).

O processo descrito é repetido para cada passo de tempo. O processo de invasão de elementos na rede termina quando não existe registro de elementos possíveis de ser invadidos.

A sequência descrita do procedimento de cálculo indicando as equações a serem resolvidas é mostrado no fluxograma da Fig. (5.9).

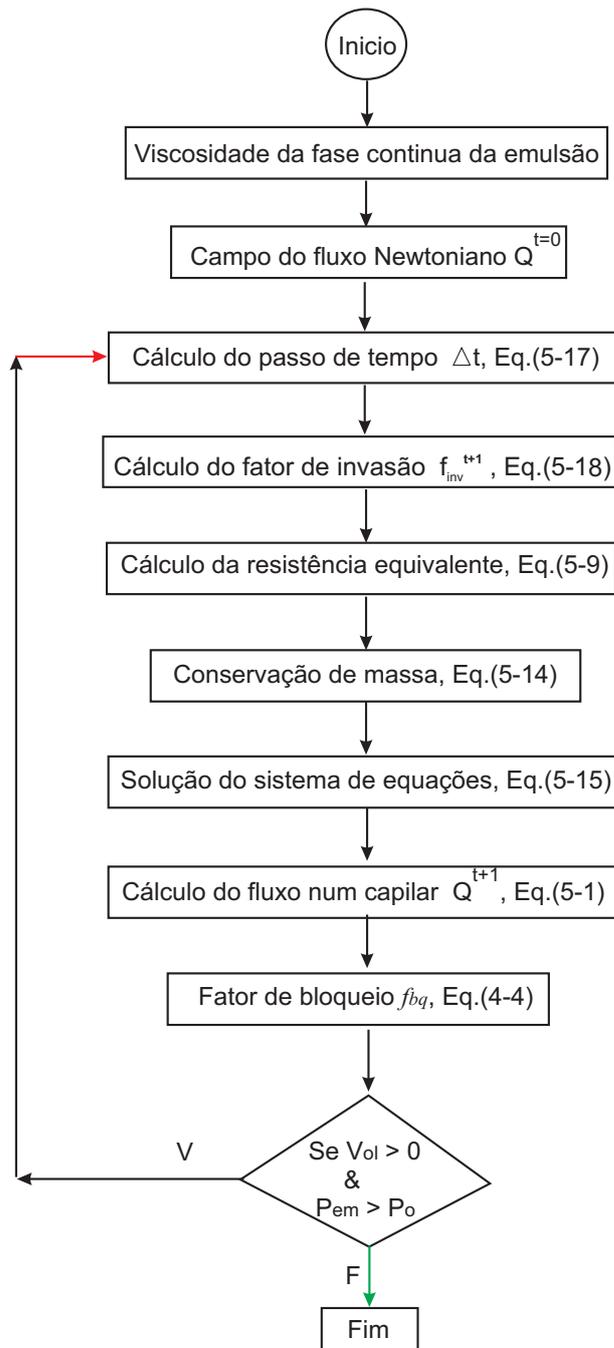


Figura 5.9: Fluxograma da modelagem do escoamento de emulsões através de um meio poroso.

5.4

Resultados numéricos

Uma análise da influência do tamanho de gota e do número de capilaridade no fator de recuperação de óleo foi realizada com o modelo de rede dinâmico desenvolvido neste trabalho. As propriedades do modelo de rede Berea-M utilizado para a simulação foram descritas no Capítulo 3. As seções transversais dos elementos na rede não foram modificadas, i.e., os elementos podem ter seções transversais triangulares, retangulares ou circulares. Uma comparação do processo de invasão do fluido injetado, num processo de embebição, considerando a emulsão sem a fase dispersa (sem gotas) e a emulsão com gotas de $10 \mu\text{m}$ é realizada. Também é analisada a variação da permeabilidade relativa dos fluidos durante o escoamento através da rede Berea-M, isto é feito para emulsões sem a fase dispersa e para emulsões com gotas de $5 \mu\text{m}$ e $10 \mu\text{m}$. Os resultados destas simulações são mostrados a seguir.

5.4.1

Influência do tamanho de gota no fator de recuperação

A figura (5.10-a) mostra o fator de recuperação de óleo definida como a relação entre o volume de óleo recuperado e o volume poroso, em função do volume do fluido injetado dividido pelo volume poroso para diferentes emulsões injetadas a uma mesma vazão através da rede Berea-M. A vazão de injeção é representada pelo número de capilaridade, neste caso $5,2 \times 10^{-4}$. O comportamento da emulsão sem a fase dispersa (sem gotas) e com gotas de $2 \mu\text{m}$ são representadas pelas curvas vermelha e verde na Fig. (5.10-a), respectivamente. Observa-se, nestas curvas, que o fator de recuperação de óleo é atingido mais rapidamente no caso de injeção de emulsão com gotas, mas é igual para as duas emulsões para um volume injetado grande. Observa-se também uma mínima diferença entre as pressões de injeção para o caso da fase contínua e da emulsão com gotas de $2 \mu\text{m}$, como mostrado na Fig. (5.10-b).

A figura (5.10-a) também mostra que o fator de recuperação de óleo aumenta quando o tamanho da gota da fase dispersa na emulsão é incrementada. Emulsões com gotas de $2 \mu\text{m}$, $5 \mu\text{m}$ e $10 \mu\text{m}$ apresentam um fator de recuperação de 0,52, 0,55 e 0,63, respectivamente. Um incremento de 21% no fator de recuperação é obtido ao injetar uma emulsão com gotas de $10 \mu\text{m}$ comparado com a injeção da fase contínua somente.

O processo de invasão da emulsão sem gotas (fase contínua) e da emulsão com gotas de $10 \mu\text{m}$ através da rede Berea-M, num processo de embebição, é mostrado na Fig. (5.11)-(a₁ - f₁) e na Fig. (5.11)-(a₂ - f₂), respectivamente. Cada uma destas figuras mostra a vista superior da rede de capilares Berea. As

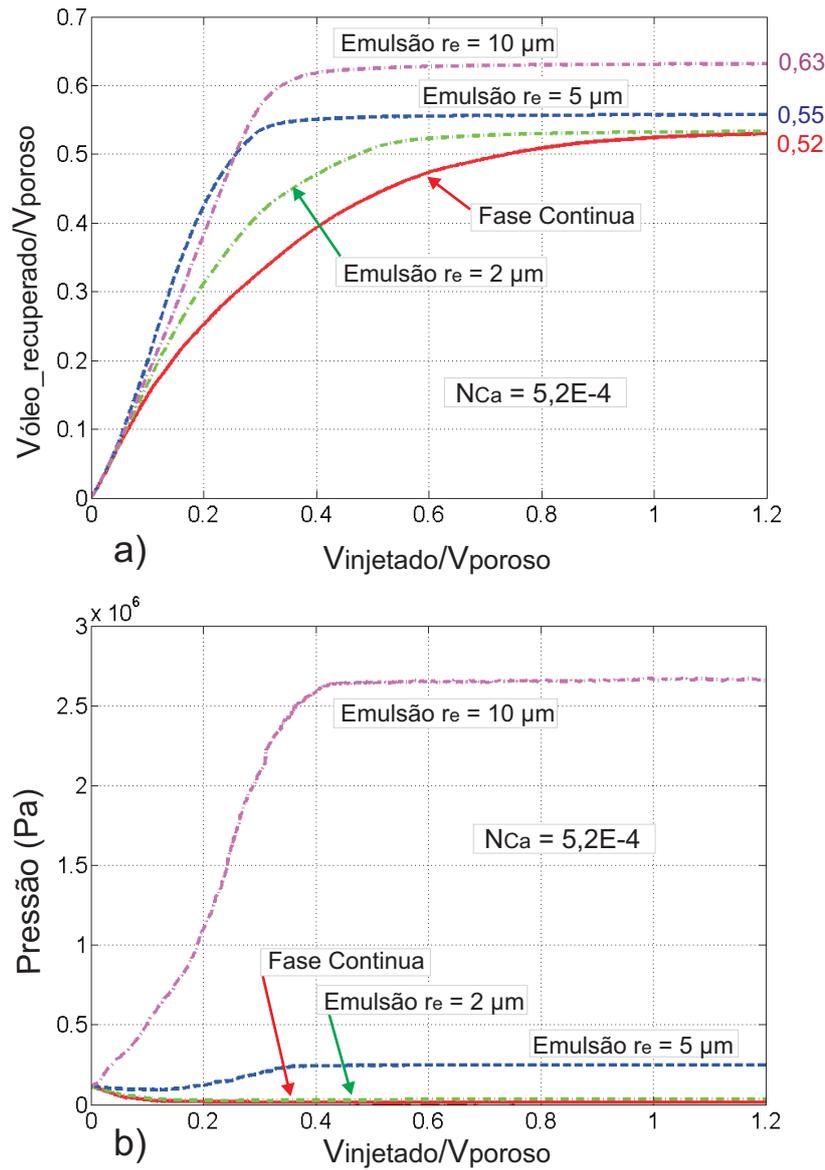


Figura 5.10: Influência do tamanho de gota da emulsão no fator de recuperação de óleo e na pressão de injeção em função do volume injetado através da rede Berea-M.

comparações entre ambas seqüências de invasão dos fluidos é dado pelo igual número de elementos invadidos, por exemplo, a Fig. (5.11- a_1) e a Fig. (5.11- a_2) possuem 500 elementos invadidos, isto é repetido nas figuras seguintes. Pode-se observar uma frente mais uniforme no caso de injeção de emulsões explicando o aumento do fator de recuperação. No caso de injeção da fase continua, pode-se observar a formação de *fingers* viscosos.

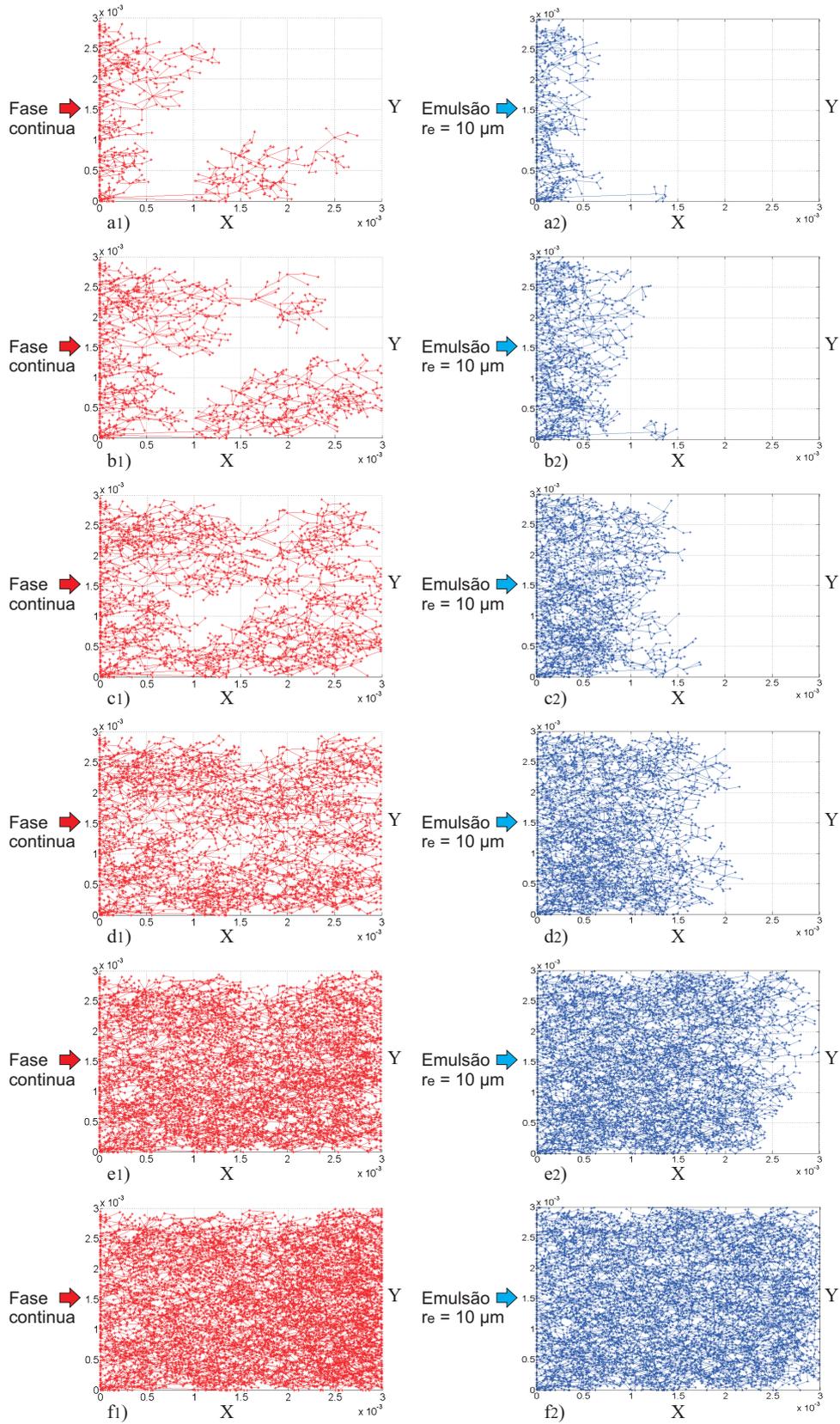


Figura 5.11: Comparação do processo de invasão entre a injeção da fase continua e a emulsão com $r_e = 10 \mu m$

5.4.2

Influência do número de capilaridade no fator de recuperação

Uma análise da influência da vazão, representada pelo número de capilaridade, sobre o fator de recuperação de óleo para emulsões com gotas de $2\ \mu\text{m}$ e $10\ \mu\text{m}$ é apresentada na Fig. (5.12) e na Fig. (5.13), respectivamente. Os números de capilaridade ($N_{Ca} = \frac{\mu U}{\sigma}$) analisados são: $5,2 \times 10^{-4}$, $5,2 \times 10^{-3}$ e $5,2 \times 10^{-2}$.

Na figura (5.12-a) observa-se um pequeno aumento no fator de recuperação de óleo ao incrementar o número de capilaridade numa emulsão com gotas de $2\ \mu\text{m}$. Um aumento considerável é observado na pressão de injeção quando aumentado o número de capilaridade, como mostra a Fig. (5.12-b). Observa-se nesta figura que para uma maior vazão de injeção, representada pela curva azul, a pressão apresenta uma diminuição e logo um aumento com o volume injetado, isto pode ser devido ao aumento dos elementos invadidos que possuem tamanhos menores à gota da emulsão resultando numa resistência maior ao escoamento do fluido.

Um mesmo fator de recuperação de óleo é obtido quando incrementado a vazão de injeção de uma emulsão com gota de $10\ \mu\text{m}$ através da rede Berea-M, como é mostrada na Fig. (5.13-a). Um aumento significativo da pressão de injeção com o aumento da vazão é observado na Fig. (5.13-b). A medida que o número de capilaridade aumenta, o bloqueio de gargantas torna-se menos efetivo, reduzindo assim o aumento do fator de recuperação observado no caso anterior.

Pode-se observar que uma emulsão com gotas de $10\ \mu\text{m}$ requer um menor volume de fluido injetado para atingir o máximo fator de recuperação de óleo comparado ao volume de fluido necessário quando injetado um fluido (emulsão) sem gotas.

5.4.3

Curva de permeabilidade relativa

As curvas de permeabilidade relativa para os dois fluidos escoando através de uma rede Berea-M são representadas pela relação entre a vazão de saída Q de cada fase e a vazão constante Q_0 imposta na condição de contorno, como uma função da saturação do fluido injetado. As Figs. (5.14)-(a-c) mostram que o fluido injetado apresenta um processo de invasão mais uniforme conforme aumenta o tamanho das gotas na emulsão. Por exemplo; a injeção da fase contínua, da emulsão com $r_e = 5\ \mu\text{m}$ e da emulsão com $r_e = 10\ \mu\text{m}$, só atingem a saída da rede quando a sua saturação na rede é de 29 %, 38 % e 59 %, respectivamente. Deste mesmo modo, a saturação do óleo residual na

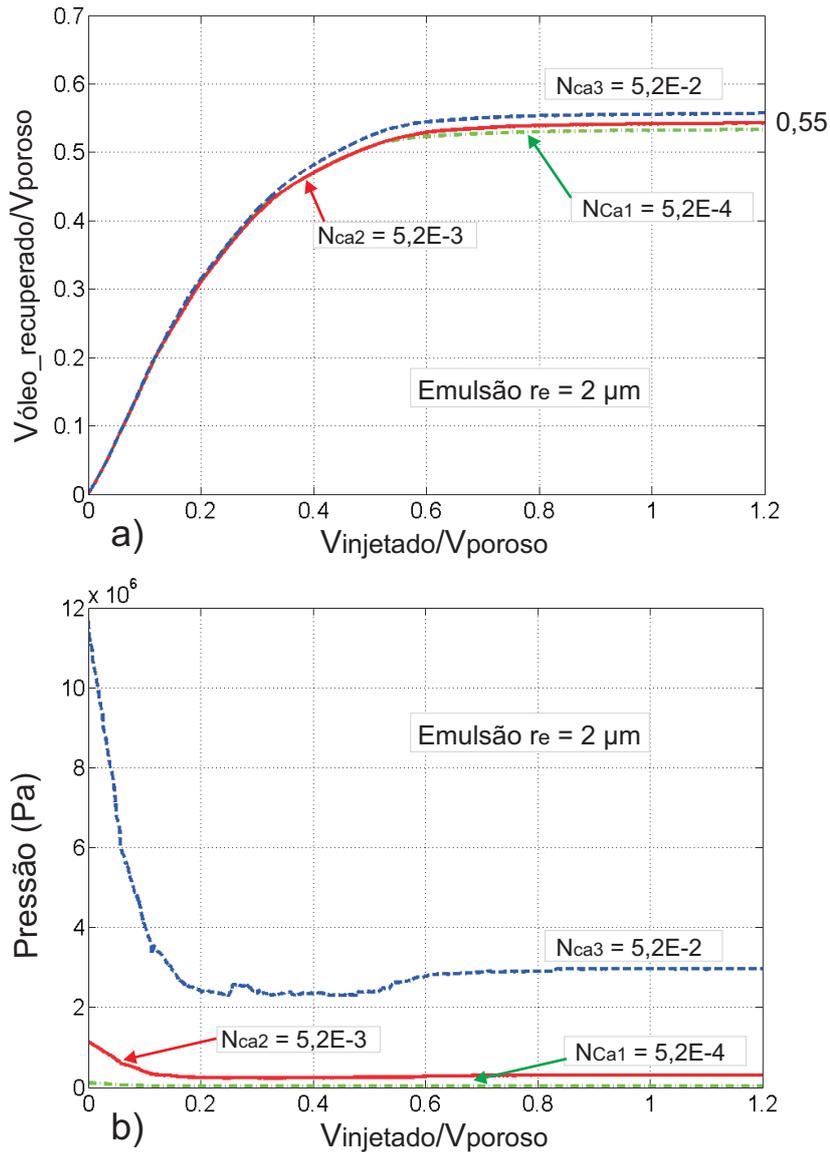


Figura 5.12: Influência da vazão no fator de recuperação de óleo e na pressão de injeção em função do volume injetado através da rede Berea-M para uma emulsão com $r_e = 2\mu m$.

rede diminui com o aumento do tamanho das gotas na emulsão, por exemplo: na seqüência de injeção mencionada anteriormente a saturação residual de óleo é de 35 %, 31 % e 27 %, respectivamente. Isto indica que um fator de recuperação maior de óleo é obtido quando injetada a emulsão com maior tamanho de gotas.

Estas curvas de permeabilidade relativa podem ser utilizadas em modelos macroscópicos para estudar o processo de deslocamento de óleo por injeção de emulsões.

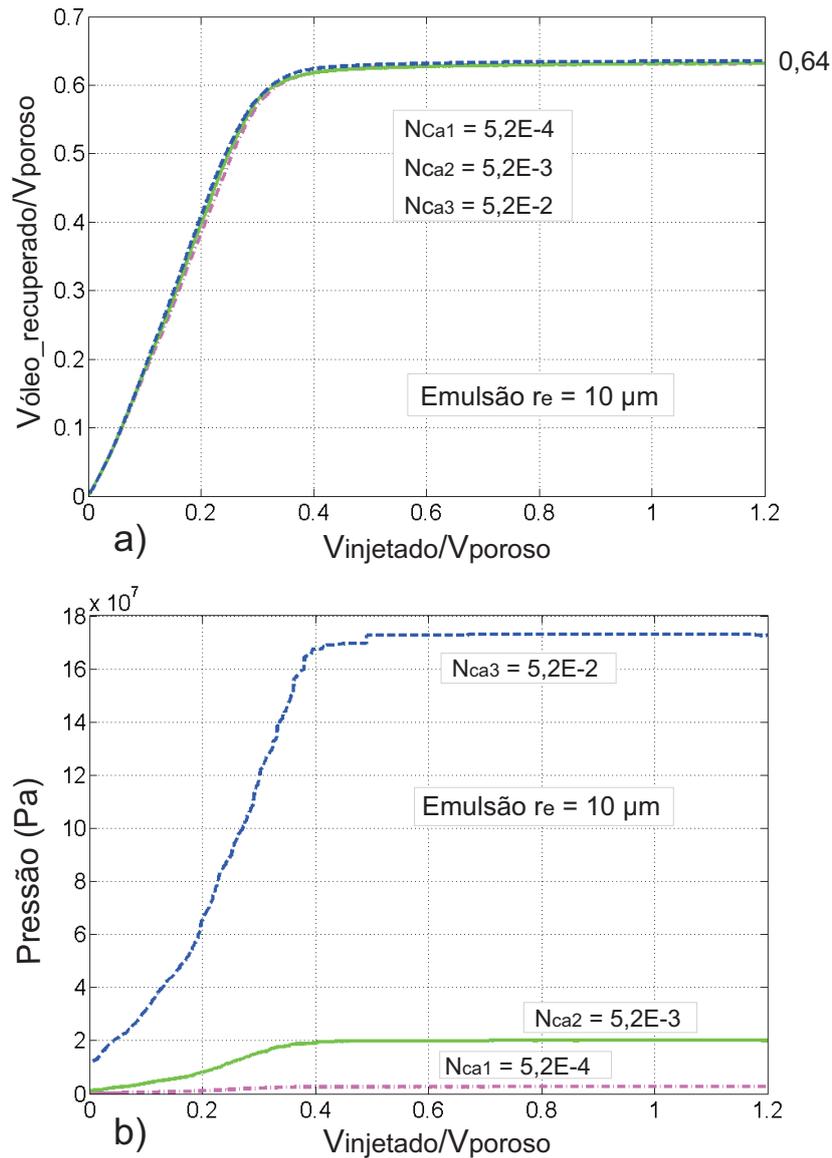


Figura 5.13: Influência da vazão no fator de recuperação de óleo e na pressão de injeção em função do volume injetado através da rede Berea-M para uma emulsão com $r_e = 10 \mu\text{m}$.

5.5 Resumo

Foi desenvolvido um modelo de rede dinâmico para estudar o escoamento bifásico de óleo e emulsões monodispersas através da rede Berea-M. Este modelo leva em consideração o escoamento da fase molhante através das finas camadas superficiais do meio poroso e os mecanismos responsáveis pelo deslocamento dos fluidos considerados são o mecanismo de deslocamento pistão e o mecanismo de quebra de gota. A rede Berea-M é composta de elementos com seções transversais triangulares, retangulares e circulares, sua topologia

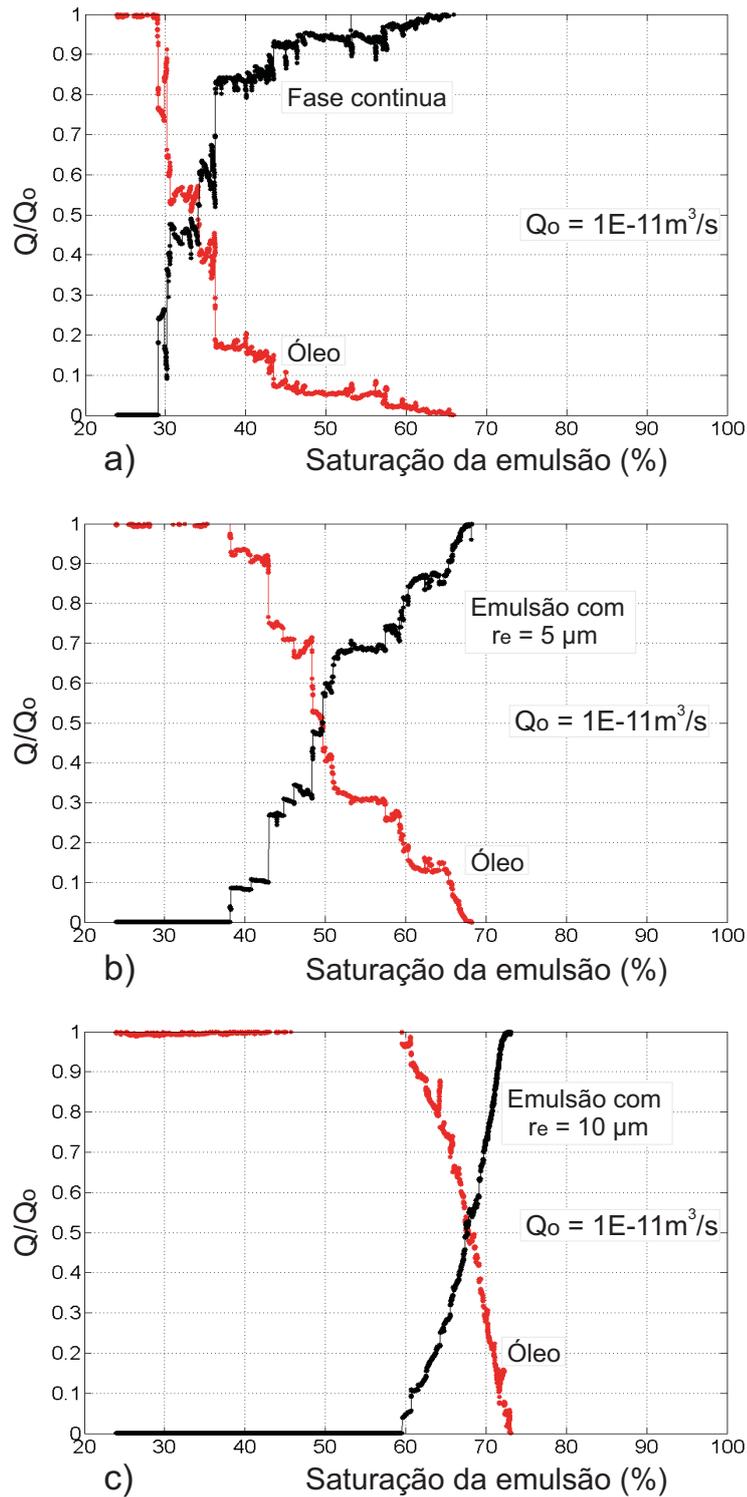


Figura 5.14: Curvas de permeabilidade relativa para diferentes fluidos injetados através da rede Berea-M à mesma vazão.

representa o espaço poroso de uma rocha Berea real. As pressões transientes no centro de cada poro na rede foram calculadas e as posições das interfaces foram atualizadas usando uma equação modificada de Poiseuille na qual uma

resistência hidráulica equivalente entre o centro de dois poros conectados por um capilar foi usada.

Resultados numéricos foram apresentados para simulações de um processo de embebição, onde a emulsão injetada é o fluido molhante e o óleo deslocado é o fluido não molhante. Destes resultados nós concluímos o seguinte:

1. Um aumento considerável no fator de recuperação de óleo ao incrementar o tamanho das gotas na emulsão, Fig. (5.10).
2. Um mínimo aumento no fator de recuperação de óleo ao incrementar a vazão da emulsão injetada através da rede. Este incremento na vazão gera um significativo aumento na pressão de injeção, Figs. (5.12) e (5.13).
3. Uma frente de deslocamento mais uniforme é gerada ao injetar emulsões através da rede, Figs. (5.11) e (5.14).