Formulação Matemática do escoamento de Emulsões

Emulsões são formadas *in-situ* em muitos processos de recuperação melhorada de petróleo ou injetados externamente, de forma isolada ou alternadamente com outros fluidos, para melhorar a eficiência do deslocamento de óleo devido a um melhor controle da mobilidade local. Conseqüentemente, uma representação quantitativa do escoamento de emulsões num meio poroso torna-se cada vez mais importante, sendo necessário para sua modelagem um melhor entendimento do comportamento da emulsão, das propriedades de transporte e as leis físicas que governam seu escoamento. O objetivo deste trabalho é incluir as características do escoamento das emulsões em simuladores de recuperação melhorada de petróleo para prever com maior precisão o desempenho da injeção de emulsões em recuperação melhorada.

4.1 Modelagem do escoamento de emulsões através de um meio poroso

Injeção de emulsões é um processo complexo na recuperação melhorada de petróleo envolvendo diversos mecanismos que ocorrem ao mesmo tempo durante o deslocamento. Pesquisadores têm classificado o escoamento de emulsões de acordo com a sua estabilidade e o tamanho de gota da fase dispersa relativa ao tamanho do poro no meio poroso. A seguir descrevem-se brevemente os mecanismos existentes na literatura.

4.1.1

4

Comportamento reológico da emulsão

Um modelo reológico usado para descrever o escoamento monofásico unidimensional é baseado na correlação desenvolvida inicialmente por Alvarado e Marsden [20]. O modelo é tratado como um fluido monofásico contínuo. Não existe interação entre gotas e parede de poros mesmo para o caso de gotas maiores que as gargantas dos poros. O comportamento reológico da emulsão é apresentado como uma viscosidade aparente que depende de vários parâmetros, entre eles: permeabilidade, porosidade, velocidade, distribuição de tamanho de poros e outros. As equações foram desenvolvidas considerando um fluido homogêneo e são válidas unicamente no caso de emulsões de concentração alta, na qual o estado de equilíbrio é atingido rapidamente e no qual as gotas são pequenas comparadas ao tamanho dos poros.

4.1.2

Modelo de retardamento do escoamento

Modelo inicialmente proposto por McAuliffe [1], considera a redução transiente da permeabilidade. Neste modelo, as gotas da emulsão são retardadas durante sua passagem através de caminhos tortuosos do meio poroso. Quando uma gota encontra um capilar ou poro de menor tamanho, ela se deforma e fecha parcialmente a sua passagem retardando o deslocamento da emulsão, causando assim uma redução na permeabilidade. Um estado de equilíbrio é atingido quando as gotas se rompem através do meio poroso para as condições impostas. O modelo de retardamento é apresentado como a relação entre permeabilidade transiente e a permeabilidade inicial que depende de alguns parâmetros, entre eles: viscosidade da fase continua (água) e da fase dispersa (óleo), velocidade do fluido, saturação do óleo nos poros, volume da emulsão injetada, concentração da emulsão na entrada e outros.

4.1.3 Mecanismo de captura de gotas

Soo e Radke [21] argumentam, com base em estudos experimentais, que as gotas da emulsão não são simplesmente retardadas quando escoam pelo meio poroso (Modelo de retardamento), mas na realidade, elas são capturadas. Este fenômeno de captura é descrito através do mecanismo de atração e o mecanismo de interceptação, como mostrado na Fig. (4.1). **O mecanismo de interceptação** acontece quando a gota da emulsão é maior que a garganta do poro, neste caso, a gota pode ficar obstruída pelas forcas capilares. A reentrada da gota pode ocorrer devido a altos gradientes de pressão e através da quebra ou por rompimento destas. **O mecanismo de atração** é atribuído à captura de gotas na superfície da rocha devido a forcas de atração tipo Van der Waals. A reentrada de gotas pode ocorrer quando as forças repulsivas acabam sendo maiores que as forças de atração. Interceptação de gotas perto da constrição do poro pode reduzir o diâmetro efetivo do poro e, portanto, permitir a atração das outras gotas. Este fenômeno desvia o fluxo de emulsões para poros maiores onde a probabilidade de captura das gotas é muito menor.

Soo e Radke [23, 24] propõem uma teoria geral, com base nos conceitos de filtração, para emulsões diluídas e estáveis em meios porosos não-consolidados, onde o tamanho das gotas da emulsão são da mesma ordem que o tamanho dos poros ou capilares. O modelo inclui um fenômeno de redistribuição assim como grandes reduções de permeabilidade. Três parâmetros com clara interpretação física surgem nesta teoria, são eles: um coeficiente de filtragem que controla a facilidade de penetração da emulsão no meio, um parâmetro de redistribuição de fluido e um parâmetro de restrição de escoamento que descreve a eficácia das gotas retidas em reduzir a permeabilidade. Estes parâmetros podem ser tratados como uma função da distribuição do tamanho de gotas e da distribuição de tamanhos de poros.



Figura 4.1: Mecanismo de captura de gotas proposto por Soo & Radke [21].

4.2 Fluxo de emulsões através de um capilar com constrição

Estudos experimentais foram realizados por Cobos [3, 35] e Montalvo [11] sobre a injeção de emulsões óleo-em-água, com diferentes distribuições de tamanho de gotas, em capilares com constrição de tamanhos diferentes. Um dos objetivos destes trabalhos foi estudar a influência da relação entre o tamanho de gota e o tamanho da constrição (r_e/r_c) e da vazão da emulsão, representada pelo número de capilaridade N_{Ca} , na diferença de pressão entre as extremidades do capilar. As emulsões foram injetadas no capilar a uma vazão constante, e a pressão na entrada do capilar foi medida para diferentes condições após o regime permanente ser atingido. A pressão na saída do capilar foi considerada como sendo a pressão atmosférica. As gotas maiores que a garganta do capilar se deformam durante o escoamento, como mostrada na Fig. (4.2).



Figura 4.2: Fotografia da injeção de emulsão óleo-em-água através de um capilar com constrição utilizado por Cobos [3, 35] e Montalvo [11].

4.2.1 Breve descrição do experimento realizado por Cobos [3, 35]

Cobos [3, 35] mostra a queda da pressão em função do tempo, para diferentes vazões, como mostrado na Fig. (4.3). Ele utilizou diferentes tipos de emulsões, entre estes, dois tipos de emulsões foram considerados para a análise do fluxo de emulsões através de um capilar com constrição, estas são: a) emulsão 2L com gotas maiores que o tamanho da constrição e com r_e/r_c $\cong 0.85, b$) emulsão 2S com gotas menores que o tamanho da constrição e com $r_e/r_c \cong 0.206$. r_e é o raio médio da distribuição do tamanho de gotas da emulsão e r_c é um raio equivalente do capilar com constrição, mostrada na Fig. (4.2). Neste caso, $r_c = 86.73$ mm.

Para cada uma das diferentes vazões estudadas, o registro de pressão quando as gotas atravessam a constrição no capilar, mostram que a emulsão 2Lapresenta uma variação significativamente maior de pressão com o tempo que a obtida com a emulsão 2S, que possui uma maior viscosidade. Estas variações da pressão com o tempo são mostradas na Fig. (4.3). Pode-se observar uma forte influência do r_e/r_c na resposta da queda de pressão em função do tempo.



Figura 4.3: Variação da pressão com o tempo para diferentes vazões, Cobos [35].

Um fator de escala definido como sendo a relação das diferenças de pressões necessárias para conduzir o escoamento da fase continua e o escoamento da emulsão através do capilar a uma mesma vazão é dado pela seguinte equação:

$$f = \frac{\Delta P_c}{\Delta P}.\tag{4-1}$$

O fator de escala f foi usado para medir ou avaliar o bloqueio parcial das gotas na constrição do capilar. Todas as emulsões, incluindo as emulsões 2L e 2S, foram testados para diferentes números de capilaridade N_{Ca} . Os resultados experimentais são mostrados na Fig. (4.4). Observa-se que o mecanismo de bloqueio de gotas, relacionado com a presença de gotas grandes na emulsão injetada, unicamente ocorre se o número de capilaridade é menor que um valor crítico, que é uma função das propriedades da emulsão, neste caso; N_{Cac} = 0,008. Se as propriedades da emulsão e as condições do processo são tais que o número de capilaridade é maior que o número capilar crítico ($N_{Ca} > N_{Cac}$) então não há bloqueio do poro devido ao escoamento de emulsões.



Figura 4.4: Fator de escala usado sobre a definição da mobilidade capilar para fluxos de emulsões, Cobos [3].

A figura (4.4) mostra que a mobilidade da emulsão 2L tem uma forte dependência com N_{Ca} . Para baixas vazões o escoamento da emulsão é controlado pela presença da interface da gota quando se aproxima a constrição, isto é, pelas forças capilares. Já para vazões maiores que um número capilar crítico o mecanismo de bloqueio diminui, até chegar um ponto no qual, a emulsão flui no capilar sem apresentar bloqueio na constrição.

4.2.2

Breve descrição do experimento realizado por Montalvo [11]

Montalvo [11] estudou o efeito do tamanho de gotas no escoamento de emulsões através de micro-capilares com constrição utilizando dois tipos emulsões. Ambas as emulsões possuem as mesmas características de composição, sendo que a emulsão G apresenta uma distribuição de tamanhos de gotas maiores que a distribuição de tamanhos de gotas da emulsão P. O tamanho das gotas das duas emulsões são menores que o tamanho da constrição do capilar, apresentando um $r_e \cong 33,65 \ \mu m$ para a emulsão G e um $r_e \cong 7,46 \ \mu m$ para a emulsão P. r_e é considerado como sendo o raio médio da distribuição do tamanho de gotas na emulsão. Emulsões de gotas grandes possuem uma viscosidade menor do que as emulsões de gotas pequenas, produto da maior interação de partículas pequenas.

A Fig. (4.5) mostra que a emulsão G gera uma perda de carga maior do que a emulsão P, apesar de sua viscosidade ser menor. Esta diferença entre as perdas de carga fica evidente quando os resultados são apresentados em termos de permeabilidade, como mostrado na Fig. (4.6).



Figura 4.5: Diferença de pressão em função da vazão da emulsão, [11].

A Fig. (4.6) mostra as permeabilidades da fase continua da emulsão, a permeabilidade da emulsão G e a permeabilidade da emulsão P, em função do número de capilaridade. O gráfico (4.6-a) mostra a permeabilidade destes três fluidos quando injetados num capilar 200/50 com $r_c = 70,47$ mm, e o gráfico

(4.6-b) quando injetados estes três fluidos num capilar 200/20, com $r_c = 37,7$ mm. r_c é o raio equivalente do capilar mostrado na Fig. (4.2). Observa-se que as permeabilidades dos fluidos são quase constantes para qualquer número de capilaridade e diminui com o aumento do tamanho das gotas na emulsão. Outro mecanismo, diferente ao mecanismo de bloqueio, é responsável por estes resultados experimentais.

Comparando os gráficos (4.6- a) e (4.6- b) pode-se observar uma diminuição na permeabilidade conforme diminui o tamanho da constrição no capilar. A variação das permeabilidades das emulsões é feita tendo como referencia a permeabilidade de sua fase continua injetada no mesmo capilar.



Figura 4.6: Permeabilidade em função do número de capilaridade,[11].

4.3 Formulação matemática do escoamento de emulsões em capilares

Baseados nos resultados experimentais obtidos por Cobos *et al.* [3] e Montalvo [11], um fator de bloqueio de poros (f_{bq}) é proposto como uma função de: (*I*) a relação geométrica r_e/r_c entre o tamanho de gota e o tamanho da constrição, e (*II*) a vazão da emulsão, representada pelo número de capilaridade N_{Ca} . Os dados experimentais disponíveis para simular o comportamento do escoamento de emulsões na escala de poros não é suficiente para derivar uma função f_{bq} bem precisa, mas o objetivo é principalmente reproduzir qualitativamente o comportamento macroscópico observado nos experimentos de: (*A*) injeção de emulsões num meio poroso inicialmente saturado com água, descrito no capitulo 2, e (*B*) injeção de emulsões num meio poroso inicialmente saturado com óleo, experimentos realizado por Núnez [5].

O escoamento da emulsão entre dois poros, denominados de poro i e poro j, conectados por um capilar, como mostrado na Fig. (3.9), é representado por uma expressão similar à Eq. (3-10) mas que considera o fator de bloqueio, como é mostrada na seguinte equação:

$$Q_{ij}^{e} = f_{bq,ij} \frac{g_{ij}^{e}}{L_{ij}} (P_{i}^{e} - P_{j}^{e}), \qquad (4-2)$$

onde $P_i^e \in P_j^e$ são as pressões da emulsão nos poros $i \in j$, respectivamente. $L_{ij} \in g_{ij}^e$ são a distancia e a condutância entre os centros dos dois poros conectados, respectivamente.

A resistência hidráulica da emulsão $\frac{L_{ij}}{g_{ij}^e}(\frac{1}{f_{bq,ij}})$, entre os centros dos poros conectados por um capilar é considerado como sendo a suma das resistências hidráulicas de cada elemento, poro *i* - capilar - poro *j*, dado pela seguinte equação:

$$\frac{L_{ij}}{g_{ij}^e}(\frac{1}{f_{bq,ij}}) = \frac{L_i}{g_i^e}(\frac{1}{f_{bq,i}}) + \frac{L_t}{g_t^e}(\frac{1}{f_{bq,t}}) + \frac{L_j}{g_j^e}(\frac{1}{f_{bq,j}}),$$
(4-3)

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, $L_i \in L_j$ são os comprimentos médios dos poros, g_i^e , $g_j^e \in f_{bq,i}$, $f_{bq,j}$ são as condutâncias e os fatores de bloqueio nos poros $i \in j$, respectivamente.

4.3.1 Fator de bloqueio

O fator de bloqueio (f_{bq}) depende do fator f_C resultante dos dados experimentais obtidos por Cobos *et al.* [3] e do fator f_M resultante dos dados experimentais obtidos por Montalvo [11], representado na seguinte equação:

$$f_{bq} = f_C \times f_M. \tag{4-4}$$

Assume-se que a emulsão injetada é monodispersa. As emulsões monodispersas são sistemas onde todas as gotas da fase dispersa têm um mesmo diâmetro, mas na realidade, as emulsões monodispersas são caracterizadas por apresentar uma distribuição de tamanho de gotas com um desvio padrão muito pequenas.

Uma redução do fator f_{bq} aumentará a resistência hidráulica da emulsão, conseqüentemente aumentará a diferença de pressão entre a entrada e a saída do capilar quando mantida uma vazão constante, este comportamento é visto nos experimentos de Cobos *et al.* [3] mostrados na Fig. (4.3).

4.3.2 Fator f_C , obtido dos experimentos de Cobos [3, 35]

Observa-se que a emulsão 2*S* apresenta variações mínimas da pressão em função do tempo para diferentes vazões, como mostra a Fig. (4.3); e pequenas variações do fator de escala em função do número de capilaridade, como mostra a Fig.(4.4). Estas duas observações levam a considerar que emulsões monodispersas com $r_e/r_c < 0.85$, como mostrado de forma esquemática na Fig. (4.7), não apresentam variação na mobilidade com o número de capilaridade.



Figura 4.7: Fluxo de uma gota através de capilares de maior diâmetro.

A emulsão 2L é representada na Fig. (4.8) como sendo uma emulsão monodispersa com $r_e/r_c \ge 0.85$. Dos resultados experimentais apresentados na Fig. (4.3), observa-se uma forte dependência do fator f_C como função de $r_e/r_c \in N_{Ca}$.

Esta dependência é representada pelas seguintes condições:

- 1. $f_C=1$ quando $r_e/r_c<0.85$ para qualque
r $N_{Ca}.$
- 2. $f_C = 1$ quando $r_e/r_c \ge 0.85$ para $N_{Ca} \ge 0.008$.
- 3. $0 < f_C \leq 1$ quando $r_e/r_c \geq 0.85$ para $N_{Ca} < 0.008$.



Figura 4.8: Fluxo de uma gota através de capilares de menor diâmetro.

A formulação matemática que representa o fator f_c , proposta neste trabalho, que inclui as condições listadas acima, é representado pelas seguintes equações:

– Para
$$r_e/r_c < 0.85$$
,

$$f_C(\frac{r_e}{r_c}) = 1.0$$
 (4-5)

- Para
$$r_e/r_c \ge 0.85$$
,

$$f_C(\frac{r_e}{r_c}, N_{Ca}) = \left[4 - \frac{5r_e}{0,85r_c} + 4\left(\frac{r_e}{0,85r_c}\right)^{1,1}\right]^{(1-\frac{r_e}{0,85r_c})(1-\frac{N_{Ca}}{N_{Cac}})} \left[\frac{N_{Ca}}{N_{Cac}}\right]^{\frac{1}{5}(1-\frac{0,85r_c}{r_e})}.$$
(4-6)

A dependência do fator f_c com o número de capilaridade N_{Ca} é mostrado na Fig. (4.9). As diferentes curvas mostram a influência do tamanho de gota da emulsão no fator f_c . A equação proposta e a dependência quantitativa com r_e/r_c é totalmente arbitrária já que não existem dados experimentais suficientes para a determinação desta função. Mas, como discutido anteriormente, o objetivo é prever o comportamento qualitativo do escoamento. Por exemplo, no caso de injeção de emulsões monodispersas com tamanho de gotas diferentes através do mesmo capilar à mesma vazão, as emulsões com maior tamanho de gota apresentaram um fator f_c menor, como mostra a Fig. (4.9), reduzindo diretamente o fator de bloqueio f_{bq} , Eq. (4-4).

A curva que representa a relação $r_e/r_c = 2,0$ na Fig. (4.9) mostra um comportamento similar à curva 2L da Fig. (4.4) obtida experimentalmente por Cobos *et al.* [3].

A dependência do fator f_c com a relação r_e/r_c é mostrado na Fig. (4.10). As diferentes curvas mostram a influência do regime do escoamento, representado pelo número de capilaridade Eq. (2-6), no fator f_c . Por exemplo, no caso de injeção de uma emulsão monodispersa a diferentes vazões através do mesmo capilar, vazões menores apresentaram um fator f_c menor, como mostra a Fig. (4.10), reduzindo diretamente o fator de bloqueio f_{bq} , Eq. (4-4).



Figura 4.9: Curvas de f_C em função de N_{Ca} para diferentes r_e/r_c .



Figura 4.10: Curvas de f_C em função de r_e/r_c para diferentes N_{Ca} .

4.3.3 Fator f_M , obtido dos experimentos de Montalvo [11]

As duas emulsões $G \in P$ apresentam uma distribuição de tamanho de gotas menor que o tamanho dos capilares usados. Isto é representado por emulsões monodispersas com $r_e/r_c < 0.85$, como mostrado na Fig. (4.7). Considerando os

92

resultados experimentais mostrados na Fig. (4.5), onde a relação entre a vazão e a diferença de pressão é constante, o calculo da permeabilidade, mostrada nos gráficos da Fig. (4.7), vai depender da viscosidade efetiva local (μ_{ef}), Eq. (??). As reduções nas permeabilidades das emulsões injetadas nos capilares, com referência à permeabilidade da fase continua, é considerada como sendo o efeito de um fator f_M sobre a viscosidade da fase continua.

A dependência do fator f_M em função de r_e/r_c é mostrada na Fig. (4.11). Os pontos representam o fator de redução das permeabilidades observadas nos gráficos a e b da Fig. (4.7), dois pontos experimentais são obtidos de cada gráfico apresentado. A linha continua é a curva de tendência que melhor ajusta estes dados experimentais e é representada pelas seguintes equações:

- Para $r_e/r_c < 0.85$,

$$f_M(\frac{r_e}{r_c}) = 0,5079\left(\frac{r_e}{r_c}\right)^{-0,154}.$$
 (4-7)

- Para $r_e/r_c \ge 0.85$,

$$f_M(\frac{r_e}{r_c}) = 0,52. \tag{4-8}$$



Figura 4.11: Curvas de f_M em função de r_e/r_c .

4.4

Simulação numérica do escoamento de emulsões através de um meio poroso

Neste trabalho as emulsões óleo-em-água são consideradas como um fluido incompressível, monofásico, monodispersa, estável e com propriedades constantes.

Os modelos de rede Berea-M e Berea-H, mostrados na Tab. (3.3), foram usados para a simulação de injeção da emulsão *Small-Drop* mostrada na Fig. (2.1). As seções transversais dos elementos não circulares, de ambas as redes, são transformadas como sendo seções circulares utilizando a Eq. (3-26).

4.4.1 Procedimento de cálculo

A resistência hidráulica da emulsão definida na Eq. (4-3) é função do fator de bloqueio f_{bq} que depende da vazão, representada pelo número de capilaridade N_{Ca} , que atravessa o elemento avaliado. Realizada esta observação, pode-se concluir que o procedimento de cálculo para prever o escoamento de emulsões através de um meio poroso é similar ao utilizado na modelagem de um escoamento monofásico não-Newtoniano atravessando um meio poroso, descrito no Capítulo 3. O fluxograma mostrado na Fig. (4.12) representa o processo utilizado no cálculo do escoamento da emulsão que atravessa as redes Berea-M e Bere-H.

4.4.2 Influência do fator de bloqueio

Examina-se a influência, por separado, dos fatores f_C , f_M e f_{bq} sobre a permeabilidade da rede Berea-M representado pelo fator de redução definida como $f_{rk} = \frac{\Delta P_{cf}}{\Delta P_{emu}}$ de uma emulsão monodispersa com 10 μ m de tamanho escoando através desta rede. A dependência do fator de redução com o número de capilaridade para os três fatores são mostrados na Fig. (4.13). Observa-se nesta figura que a influência do fator $f_{bq} = f_C$ sobre o fator de redução diminui conforme aumenta o número de capilaridade, diferente do fator $f_{bq} = f_M$ que não origina nenhuma dependência com o número de capilaridade mas reduz o valor da permeabilidade da rede Berea-M. Para altos números de capilaridade o fator $f_{bq} = f_C$ não influencia no fator de redução chegando a ter o mesmo fator de redução quando injetada a fase continua da emulsão *Small-Drop*. O fator de bloqueio $f_{bq} = f_C x f_M$ representa a influência conjunta dos fatores $f_C e f_M$ sobre a permeabilidade da rede Berea-M representado pelo fator de redução, mostrado na Fig. (4.13)



Figura 4.12: Fluxograma usado na modelagem do escoamento da emulsão através de um meio poroso.

A seguir é analisada separadamente a influência do tamanho de gota da emulsão sobre o fator f_C e f_M , representados mediante o comportamento da variação da permeabilidade quando a emulsão escoa através da rede Berea-M. A curva de cor amarela e a reta de cor azul apresentadas na Fig. (4.13), obtidas nesta seção usando emulsão monodispersa com tamanho de gota igual a 10 μ m, são usadas como referência para a análise da variação do tamanho de gota da emulsão nas Figs. (4.14 e 4.15, respectivamente.

4.4.2.1 Influência do tamanho de gota considerando o fator de bloqueio $f_{bq} = f_C$

Observa-se na Fig. (4.14) que as emulsões com tamanho de gota igual a 2,5 μ m e 20 μ m apresentam um fator de redução maior e menor, respectivamente, ao obtido para uma emulsão com tamanho de gota igual a 10 μ m para baixos números de capilaridade. Para altos números de capilaridade o



Figura 4.13: Influência dos fatores f_C , f_M e f_{bq} na permeabilidade da rede Berea-M representado pelo fator de redução.

fator de redução apresentados pelas três emulsões analisadas tende a ser igual ao fator de redução quando injetada a fase continua da emulsão *Small-Drop*, f_{rk} =1.0. Com estes resultados pode-se concluir que não existe efeito nenhum do tamanho de gotas para altos números de capilaridade. A emulsão com tamanho de gota igual a 2,5 μ m apresenta uma pequena diminuição do fator de redução para baixos números de capilaridade.

4.4.2.2

Influência do tamanho de gota considerando o fator de bloqueio $f_{bq} = f_M$

Observa-se na Fig. (4.15) que a variação da permeabilidade, representado pelo fator de redução, das diferentes emulsões não dependem do número de capilaridade, apenas do tamanho de gota da emulsão. As emulsões com tamanho de gota menor apresentam um fator de redução maior, no caso das emulsões com tamanho de gota igual a 10 μ m e 20 μ m o fator de redução é o mesmo. Conforme o tamanho da gota da emulsão diminui, o fator de redução tende a ser igual ao fator de redução obtida quando injetada a fase continua da emulsão *Small-Drop*.



Figura 4.14: Influência do tamanho de gota sobre o fator de redução f_{rk} considerando o fator de bloqueio $f_{bq}=f_C$.



Figura 4.15: Influência do tamanho de gota sobre o fator de redução f_{rk} considerando o fator de bloqueio $f_{bq} = f_M$.

4.5 Comparação de dados experimentais com dados numéricos

Os dados experimentais da injeção da emulsão *Small-Drop* nas rochas denominadas de Amostra-M e Amostra-H, processo descrito no Capítulo 2, será comparado com resultados numéricos obtidos ao injetar emulsões monodispersas através das redes denominadas de Berea-M e Berea-H, respectivamente. A geração das redes foi mostrado no Capítulo 3. Na formulação matemática das emulsões será usado o fator de bloqueio f_{bq} , Eq. (4-4), que leva em consideração os efeitos dos fatores $f_C \in f_M$ descritos na seção anterior.

4.5.1 Emulsões diferentes injetadas na mesma rede Berea-M

Resultados numéricos para o escoamento de emulsões monodispersas com tamanho de gotas de 10 μ m e 20 μ m através da rede Berea-M é comparada com os dados experimentais obtidos ao injetar a emulsão *Small-Drop* na rocha denominada de Amostra-M, estes resultados são apresentados na Fig. (4.16), onde os pontos são os dados experimentais e as linhas são os resultados numéricos.

A distribuição do tamanho de gotas da emulsão *Small-Drop*, Fig. (2.1), é simulada como sendo uma emulsão monodispersa com tamanho de gota igual a 10 μ m. Este valor foi escolhido por representar o 50 % da fração em volume de gotas maiores da emulsão *Small-Drop*. Com base na observação anterior, a emulsão *Small-Drop* injetada após 2 dias é simulada como sendo uma emulsão monodispersa com tamanho de 20 μ m.



Figura 4.16: Comparação das simulações (linhas) e dos experimentos (pontos) da injeção de emulsões aparentemente diferentes num mesmo meio poroso.

Os resultados numéricos de ambas as emulsões apresentam um fator de

redução bem menor para baixos números de capilaridade. Conforme o número de capilaridade aumenta, este fator de redução cresce até um valor na qual permanece constante. Os resultados experimentais mostram uma tendência similar. Dados experimentais para maiores números de capilaridade não foram obtidos devido à elevada pressão requerida. Observa-se que a comparação com os dados experimentais apresentam uma boa concordância qualitativa.

4.5.2 Emulsão Small-Drop injetada em amostras diferentes

Resultados numéricos da injeção de uma emulsão monodispersa com tamanho de gota de 10 μ m através das redes Berea-M e Berea-H é comparada com os dados experimentais obtidos ao injetar a emulsão *Small-Drop* nas rochas denominadas de Amostra-M e Amostra-H. Estes resultados são apresentados na Fig. (4.17), onde os pontos são os dados experimentais e as linhas são os resultados numéricos.

Como foi descrito na seção anterior a distribuição do tamanho de gotas da emulsão *Small-Drop*, Fig. (2.1), é simulada como sendo uma emulsão monodispersa com tamanho de gota igual a 10 μ m.

Os resultados experimentais da injeção de emulsão em ambas as amostras apresentam um menor fator de redução para baixos números de capilaridade. Conforme o número de capilaridade aumenta, este fator de redução cresce até um valor no qual tende a permanecer constante. Os resultados numéricos mostram uma tendência similar.

A diferença entre os fatores de redução para a mesma emulsão *Small-Drop* injetada é devido às permeabilidades diferentes das redes. O fator de redução é bem menor para a rede de baixa permeabilidade. As comparações destes resultados, numérico e experimental, apresentaram uma boa concordância qualitativa.

4.5.3 Discussões

Os resultados numéricos obtidos com o modelo de rede prevêem qualitativamente o escoamento de emulsões com diferentes diâmetros em meios porosos com diferentes permeabilidades. O modelo leva em conta aspectos microestruturais do meio poroso e o tamanho de gota da emulsão. Uma melhor concordância quantitativa não foi obtida devido aos seguintes fatores:

 Limitações da faixa de dados experimentais disponíveis para definição do fator de bloqueio.



Figura 4.17: Comparação das simulações (linhas) e dos experimentos (pontos) quando injetada a mesma emulsão em meios porosos diferentes.

- 2. A emulsão foi considerada monodispersa.
- 3. Todos os elementos da rede foram considerados com seção reta circular, já que os fatores de bloqueio foram obtidos somente com microcapilares.

4.6 Resumo

Descrevem-se brevemente os mecanismos existentes na literatura responsáveis pelo transporte de emulsões num meio poroso. Com o objetivo de prever as propriedades macroscópicas do transporte de emulsões num meio poroso que é representado como uma rede de poros conectados por capilares, foi proposto uma formulação matemática para a injeção de emulsões monodispersas em capilares, baseada nos resultados experimentais de Cobos *et al.* [3] e Montalvo [11], que determinam a mobilidade de uma emulsão em um capilar como função da relação entre tamanho de gota e tamanho de capilar e do número de capilaridade. A formulação proposta para um capilar foi estendida para uma rede de capilares que representa um meio poroso, e os resultados foram comparados com dados experimentais obtidos ao injetar diferentes emulsões no mesmo meio poroso e ao injetar a mesma emulsão em diferentes meios porosos. Pode-se concluir que as comparações de resultados numéricos com resultados experimentais apresentam uma boa concordância qualitativa.