

4 Resultados e comentários

A complexa dinâmica do escoamento de emulsões pode ser analisada por meio das curvas da redução da permeabilidade do meio poroso devido ao bloqueio dos poros por gotas da fase dispersa. A permeabilidade K de um meio poroso submetido a uma diferença de pressão Δp e a uma vazão volumétrica Q pode ser calculada diretamente pela Lei de Darcy:

$$Q = \frac{KA \Delta p}{\mu l} \quad (4.1)$$

A redução na permeabilidade do meio poroso durante a injeção é representada pela relação K/K_0 , que representa a razão entre a permeabilidade no decorrer da injeção e a permeabilidade inicial, antes da influência da emulsão no escoamento.

No início de cada simulação, quando a injeção da emulsão é iniciada, a permeabilidade da rede é igual à permeabilidade inicial (K_0); portanto, $K/K_0 = 1$. Com o andamento da injeção e o aumento da concentração de gotas de emulsão na rede, a permeabilidade do meio diminui até atingir um valor mínimo, que depende dos parâmetros da emulsão e das condições do processo de injeção. A variação dos resultados com o tempo é apresentada em função da quantidade injetada de emulsão, que é definida pela razão entre o volume de emulsão injetada até o instante T (calculado pelo produto QT) e o volume poroso da rede, V_{por} :

$$V_{inj} = \frac{QT}{V_{por}} \quad (4.2)$$

4.1. Injeção contínua de emulsão em rede saturada com água

A análise da injeção contínua de emulsão em um meio poroso saturado com água permite a avaliação dos parâmetros essenciais das emulsões e sua influência sobre o escoamento. Na seção seguinte, serão apresentados os resultados para injeção contínua de emulsão com uma concentração de 20% v/v (volume da fase dispersa/volume total de fluidos, $C_{inj} = 0,2$), permitindo a análise da influência da vazão de injeção e do raio de gota no bloqueio do fluxo. A seção posterior mostra os resultados de diferentes simulações com diferentes valores de concentração da emulsão injetada, possibilitando a análise da influência da concentração da emulsão injetada no comportamento do escoamento.

Os valores dos parâmetros físicos (α^* e Ca^*) e de ajuste (k_e e k_c), presentes na função de bloqueio e utilizados nas simulações de injeção contínua de emulsão são listados na tabela 4.1.

Parâmetro	α^*	Ca^*	$k_e=k_c$
Valor	0,1	1×10^{-5}	0,5

Tabela 4.1 Valores dos parâmetros da função de bloqueio utilizados na injeção de emulsão

4.1.1. Influência da vazão de injeção e tamanho de gotas

A fig. 4.1 mostra curvas típicas da evolução da permeabilidade e da concentração de gotas na saída da rede durante a injeção contínua de emulsão. Pode-se notar que, nas curvas referentes a gotas grandes ou a baixas vazões de injeção, o maior bloqueio exercido pela emulsão leva a uma maior queda da permeabilidade e a um aumento na taxa inicial de redução da permeabilidade.

O surgimento das primeiras gotas de emulsão na saída da rede, chamado de *breakthrough* da emulsão, causa o aumento da concentração na saída. Quanto maior é a inclinação do trecho inicial da curva de concentração, mais uniforme é a frente de concentração, indicando um melhor controle da mobilidade. A

concentração na saída não sofre alterações consideráveis com a variação isolada da vazão ou do tamanho de gota da emulsão.

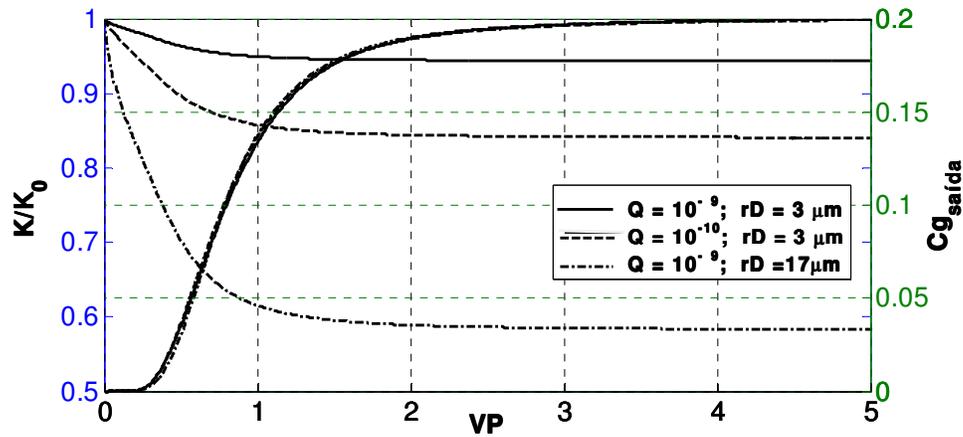


Figura 4.1 – Curvas típicas de permeabilidade e concentração na saída da rede para injeção contínua de emulsão

A fig. 4.2 mostra uma comparação dos resultados em função da vazão de injeção para tamanhos de gota fixos.

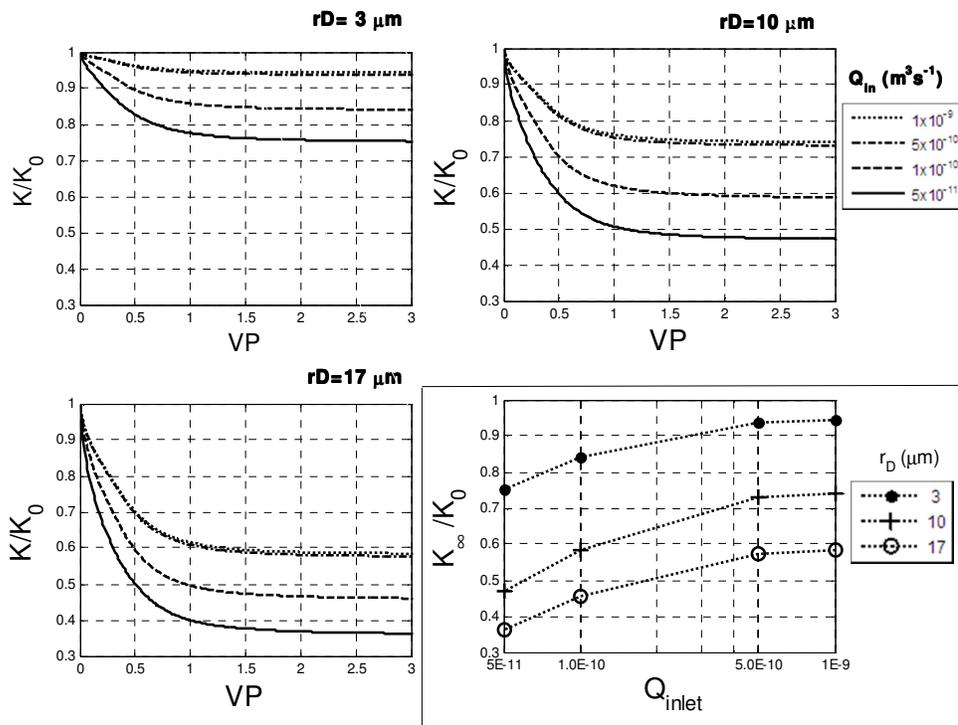


Figura 4.2 Redução na permeabilidade e permeabilidade final em função da vazão de injeção para tamanhos de gota fixos

A redução na vazão de injeção causa o deslocamento para baixo de todas as curvas de permeabilidade, independentemente do tamanho de gota considerado, indicando que não houve alteração no mecanismo de bloqueio, apenas o aumento de sua intensidade. Esta observação é comprovada pela análise dos resultados de redução final da permeabilidade (K_{∞}/K_0) em função da vazão de injeção para os três tamanhos de gota analisados, onde as três curvas permanecem aproximadamente paralelas com a redução na vazão de injeção, e apresentam um comportamento similar ao reportado por Romero *et al.* (2011) e Cobos (2009).

Os resultados destas simulações são mostrados na figura 4.3 como função do tamanho de gota para vazões constantes. Estas curvas mostram de forma mais clara que a influência do tamanho de gotas na redução da permeabilidade é mais forte para vazões de injeção menores.

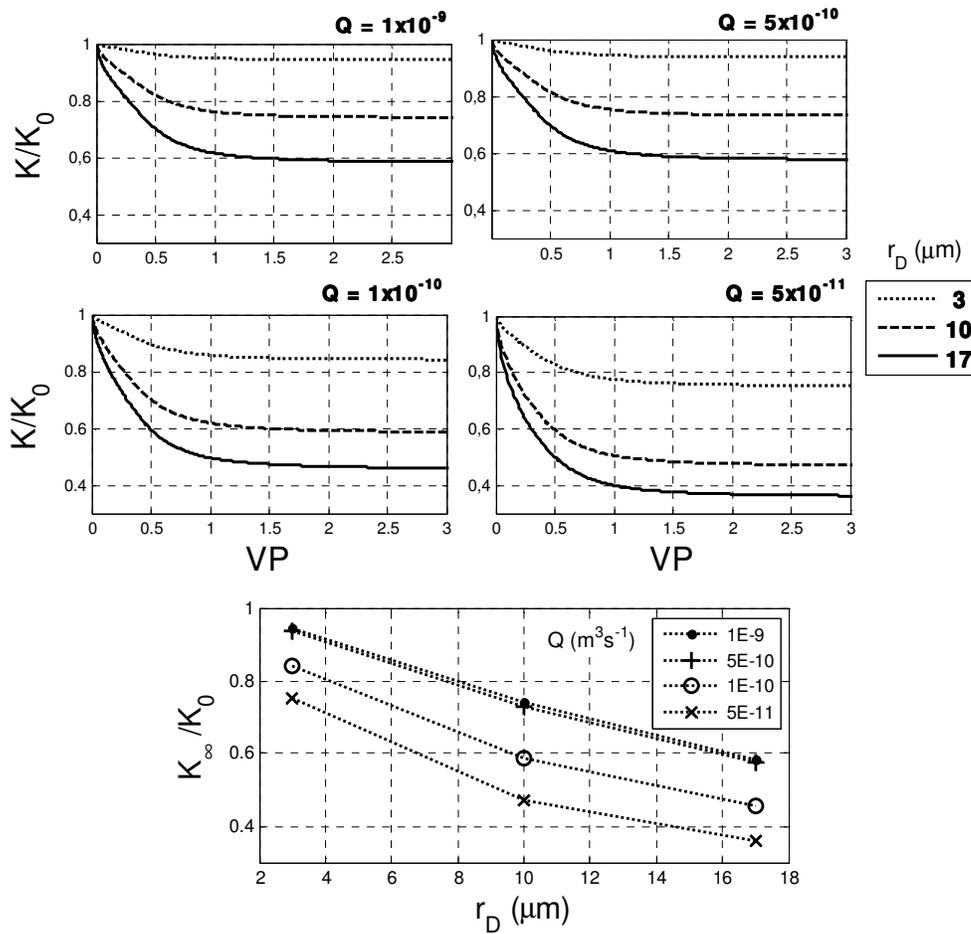


Figura 4.3 Redução na permeabilidade e permeabilidade final em função do tamanho de gota para vazão fixa

4.1.2. Influência da concentração de gotas

As curvas típicas de resultados da injeção de emulsão com vazão e tamanho de gota fixos, alterando-se a concentração da emulsão injetada, são mostradas na fig. 4.4. À medida que a rede é saturada com emulsão, a permeabilidade sofre uma redução proporcional à concentração da emulsão injetada. A concentração na saída da rede, $C_{saída}$, se aproxima da concentração da emulsão injetada, C_{inj} .

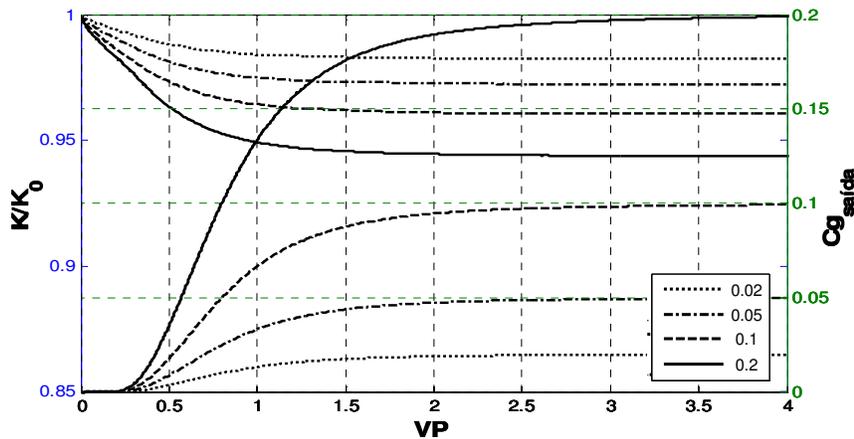


Figura 4.4 Curvas típicas de permeabilidade e concentração na saída da rede para injeção de emulsão com diferentes concentrações

Ainda, caso a concentração da saída seja normalizada pela concentração máxima injetada neste grupo de simulações, as curvas de concentração se sobrepõem, indicando que o mecanismo de bloqueio não é alterado pela variação apenas na concentração da emulsão. No entanto, esta similaridade não é observada na comparação entre os casos extremos analisados (fig. 4.5). No início da simulação, a concentração na saída cresce mais lentamente para as condições de maior bloqueio (linha contínua), o que indica uma melhor redistribuição de fluxo devido a um melhor controle da mobilidade. Este resultado é importante por mostrar a possibilidade de se obter uma frente de avanço mais uniforme através do correto ajuste das características da emulsão.

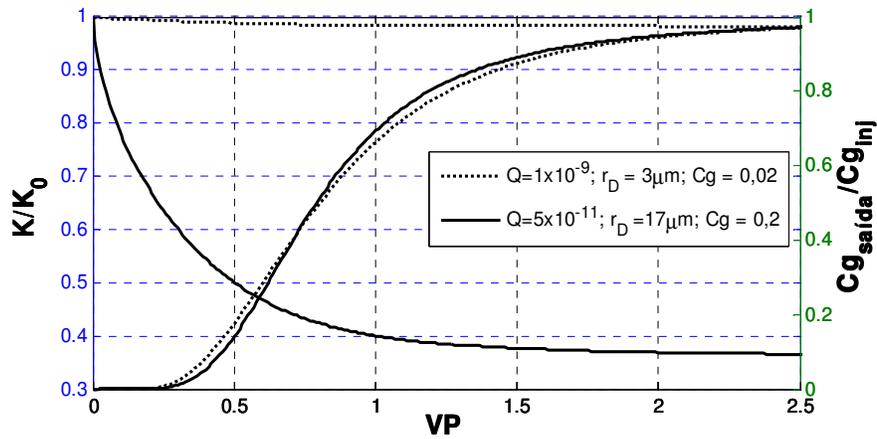


Figura 4.5 Resultados das simulações com maior e menor bloqueio obtidas para injeção contínua

A fig. 4.6 mostra a evolução da variação da permeabilidade em função da concentração, para vazão de injeção e tamanhos de gota fixos, bem como a permeabilidade final para os casos analisados.

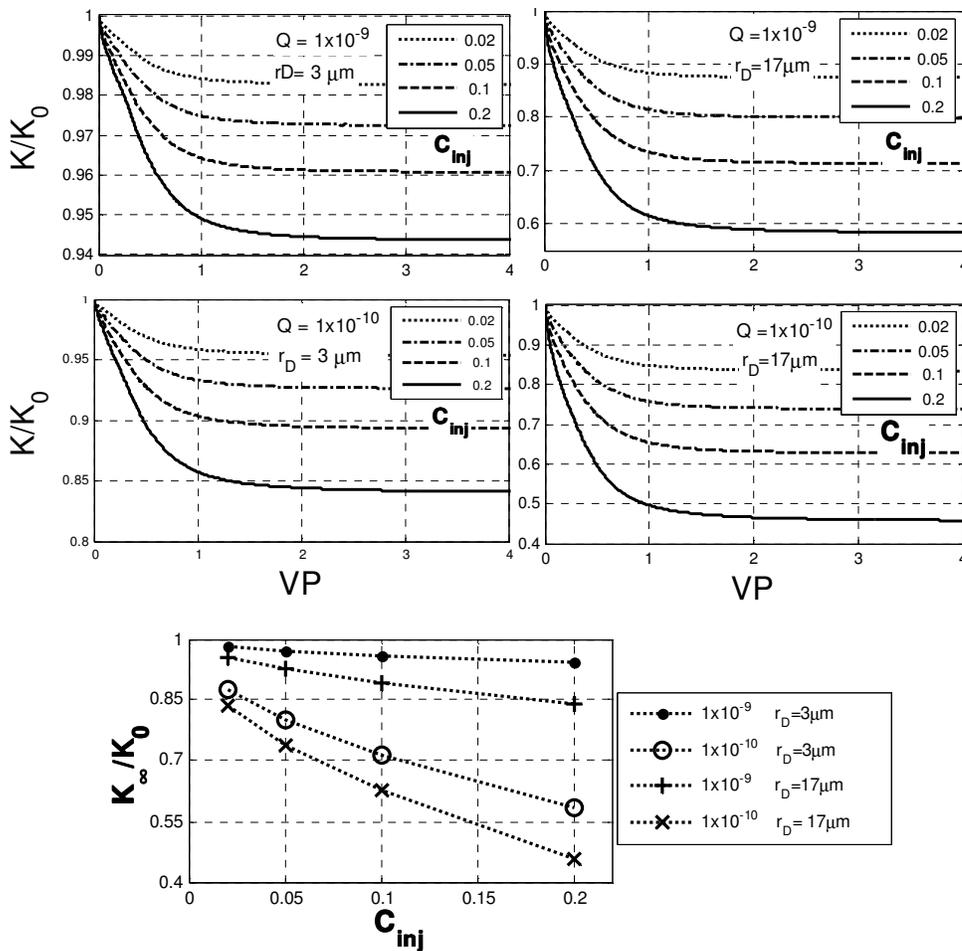


Figura 4.6 Redução na permeabilidade e permeabilidade final em função da concentração

A influência do aumento da concentração é mais pronunciada para injeção a baixas vazões, conforme pode ser visto nas curvas de permeabilidade final.

4.2. Injeção alternada de emulsão e água

A aplicação das equações para a concentração da fase dispersa tornam possível a injeção de água ou emulsão a qualquer instante da simulação (injeção alternada), viabilizando a análise do efeito de um banco de emulsão no bloqueio seletivo do escoamento em meios porosos. O parâmetro de processo específico da injeção alternada é a quantidade de emulsão injetada (V_{inj}), que será analisada através de simulações utilizando um meio saturado inicialmente com água. A quantidade de emulsão injetada é expressa como a razão entre o volume de emulsão, V_e , e o volume poroso do meio considerado, V_{por} :

$$V_{inj} = \frac{V_e}{V_{por}} \quad (4.3)$$

A análise dos resultados de injeção alternada fornece um melhor entendimento do comportamento da emulsão e do seu efeito de redistribuição do escoamento, e deve servir de base para o desenvolvimento de simuladores de injeção alternada de emulsão para deslocamento de petróleo.

A fig. 4.7 mostra curvas típicas de variação da permeabilidade e da concentração de gotas da emulsão na saída da rede para uma injeção alternada de um determinado volume de emulsão com concentração de 20%, vazão de $5 \times 10^{-10} \text{ m}^3/\text{s}$ e gotas com $17 \mu\text{m}$ de raio. A quantidade de emulsão injetada foi de 0,5, 1 e 1,5.

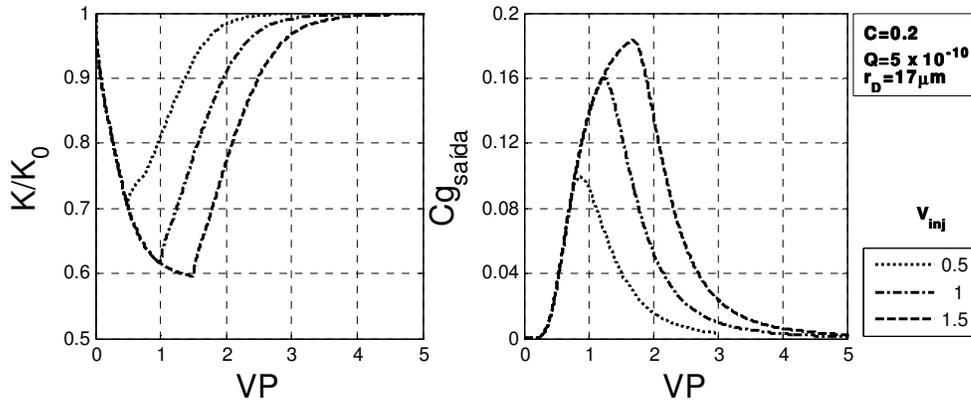


Figura 4.7 Curvas típicas de permeabilidade e concentração para injeção alternada

Para todos os casos analisados, a permeabilidade decresce durante a injeção de emulsão. A taxa de declínio é a mesma para os três casos da fig.4.7, como esperado. No reinício da injeção de água, pode-se observar um aumento da permeabilidade com o tempo (volume injetado) até a permeabilidade inicial ser recuperada. O volume de água injetado para recuperação da permeabilidade inicial varia com o volume de emulsão injetada. Após a injeção de 1 volume poroso de emulsão, foi necessária a injeção de 2,5 volumes porosos de água para a permeabilidade voltar à permeabilidade original. A permeabilidade da rede aproxima-se do valor de permeabilidade em regime permanente para um volume injetado de emulsão de aproximadamente 1,5 volume poroso. É interessante observar que a taxa de aumento da permeabilidade após o reinício da injeção de água é praticamente a mesma se o volume de emulsão injetada for alto o suficiente (neste caso, $V_{inj} \gtrsim 1 VP$).

A concentração de gotas na saída da rede permanece nula até um volume injetado de aproximadamente 0,2 volume poroso. Após este tempo, a concentração de gotas na saída aumenta. Após o reinício de injeção de água, a concentração na saída decresce depois de um determinado volume de água ter sido injetado na rede.

Estes resultados mostram a capacidade do modelo desenvolvido em descrever fenômenos observados experimentalmente no escoamento de emulsões em meios porosos.

4.2.1. Influência do volume de emulsão injetado

Para se obter uma melhor concordância qualitativa com os resultados experimentais e aproximar os resultados do comportamento estabelecido pela teoria de filtração, realizou-se um ajuste nos parâmetros do fator de bloqueio no sentido de aumentar sua intensidade e considerar uma maior redução na vazão volumétrica de alguns elementos da rede já para um baixo valor de concentração local. Deste modo, a vazão volumétrica é reduzida consideravelmente nestes elementos e conseqüentemente a velocidade das gotas é reduzida, impedindo que estas sejam deslocadas pela injeção posterior de água. Este comportamento é mais próximo do comportamento discutido nas teorias de filtração e de captura de gotas.

Desta forma, os parâmetros da função de bloqueio alterados nas simulações da seção a seguir são mostrados na tabela 3.

Parâmetro	k	k_C
Valor	0,85	0,01

Tabela 1 Parâmetros de bloqueio alterados utilizados nas simulações de injeção alternada

Com base no novo fator de bloqueio, foi realizada a análise da injeção alternada de quantidades variáveis de uma emulsão com concentração volumétrica constante. A simulação foi feita para diferentes valores da vazão de injeção ($Q = 10^{-9}$ e $10^{-10} m^3/s$), raio de gota ($r_D = 3$ e $17 \mu m$) e volume de emulsão injetado ($V_{inj} = 0,1; 0,2; 0,5$ e $0,8$). Os resultados são apresentados na fig. 4.8. Pode-se observar que, para a vazão mais alta ($Q = 10^{-9} m^3/s$) e gotas pequenas ($r_D = 3 \mu m$), a que da permeabilidade não é tão acentuada. Porém, após o reinício da injeção de água, a permeabilidade não retorna a seu valor inicial, estabilizando-se em um valor mais baixo. Isto é uma indicação que gotas da fase dispersa ficam retidas em alguns capilares, mesmo após a reinjeção de água. Para uma vazão menor, onde a redução de mobilidade em cada capilar é mais acentuada, podem-se observar os mesmo efeitos, porém em maior intensidade.

Para $Q = 10^{-10} m^3/s$, o volume de emulsão injetada altera o valor da permeabilidade após o reinício da injeção de água.

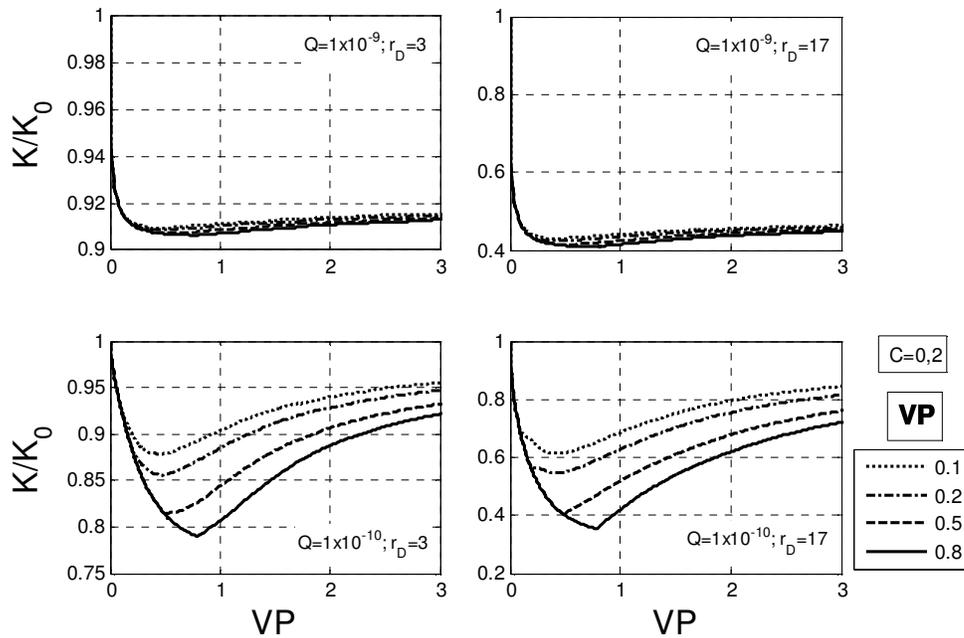


Figura 4.8 Evolução da permeabilidade durante a injeção alternada com concentração constante

O mecanismo de redirecionamento de fluxo no espaço poroso devido à ação das gotas da fase dispersa é bem ilustrado nos resultados apresentados na Fig. 4.9. A figura apresenta um corte na rede por um plano horizontal. Os capilares que cortam este plano são representados por pontos nos dois gráficos. A Fig. 4.9(a) apresenta a variação relativa do inverso da condutância dos capilares, comparando os valores no instante final da injeção da emulsão com os valores durante a injeção de água, para $r_D = 17 \mu m$ e $Q = 10^{-10} m^3/s$. Os capilares onde a maior variação do inverso da condutância ocorre (barras mais altas) representam os capilares onde a presença das gotas da fase dispersa causou o maior efeito de redução da mobilidade. De forma análoga, a Fig.4.9b) apresenta a variação relativa do fluxo em cada capilar, comparando os valores de fluxo ao final do processo de injeção de emulsão com o fluxo durante a injeção de água.

A redistribuição do fluxo fica clara observando-se a região destacada nas figuras. Nesta região, pode-se observar um conjunto de capilares nos quais a redução de mobilidade foi alta, com um conjunto de capilares vizinhos onde a variação da mobilidade foi baixa. Na Fig. , observa-se uma redução considerável no fluxo através dos capilares parcialmente bloqueados pela emulsão e um aumento da vazão nos capilares vizinhos.

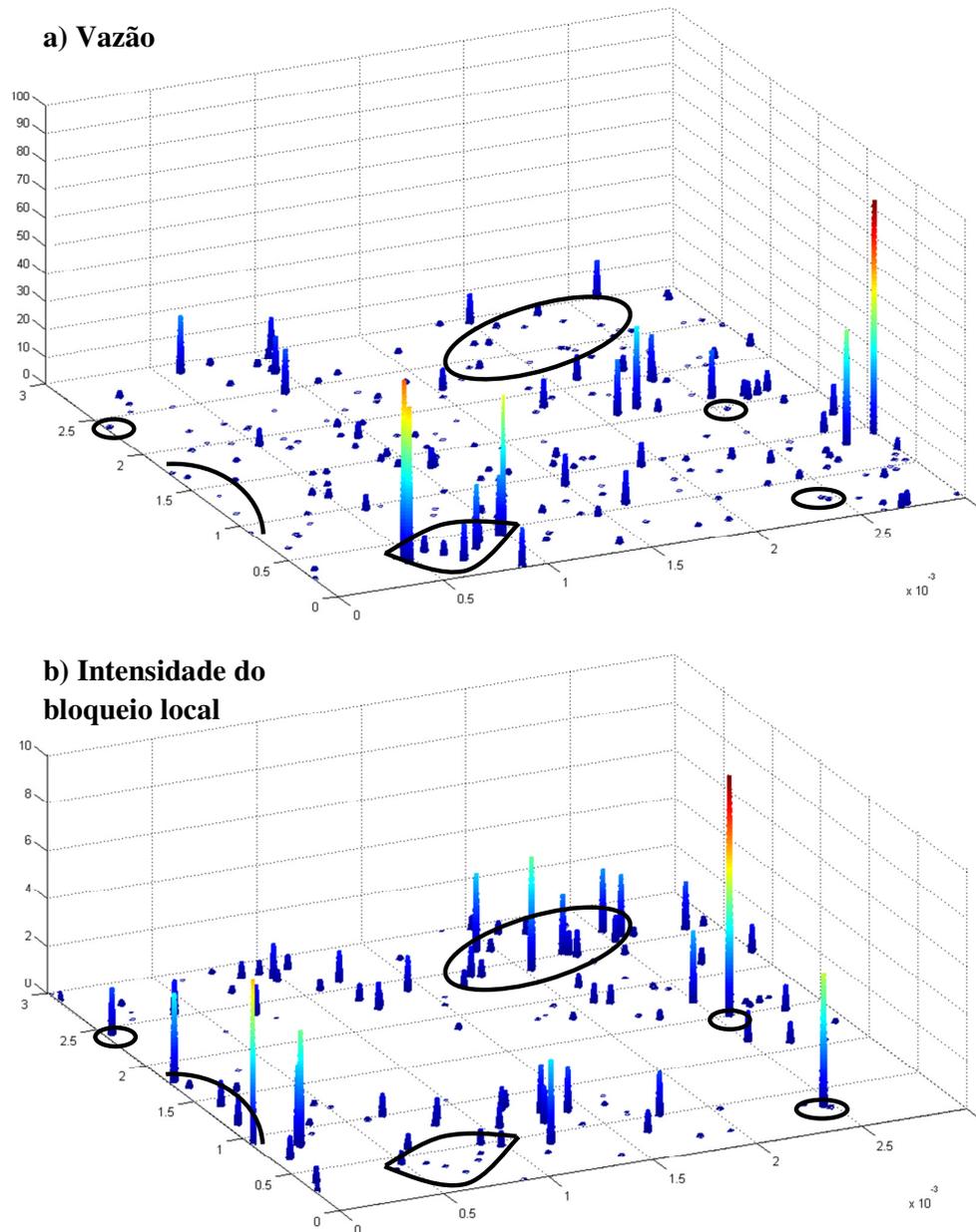


Figura 4.9 Corte transversal da rede durante fluxo de emulsão, relacionando (a) as vazões dos capilares na seção transversal com (b) as respectivas intensidades de bloqueio local