

## 5

### Apresentação e Discussão dos Resultados

Neste capítulo, são apresentados e discutidos os resultados dos experimentos de recuperação de óleo.

Primeiramente, serão apresentados os experimentos de injeção de água, para vazões de  $Q_1 = 0.005$  ml/min,  $Q_2 = 0.010$  ml/min e  $Q_3 = 0.015$  ml/min.

Seguidamente, serão apresentados os resultados dos experimentos de injeção de dois tipos de emulsões óleo em água “O/A”, ambas com composição de 30%/70%. Uma com diâmetro médio de gota  $\bar{D}_1 = 5 \mu\text{m}$  e, a outra com diâmetro médio de gota  $\bar{D}_2 = 20 \mu\text{m}$ .

Na ultima parte, será apresentado o resultado do experimento de injeção alternada da água e a emulsão  $\bar{D}_2 = 20 \mu\text{m}$ .

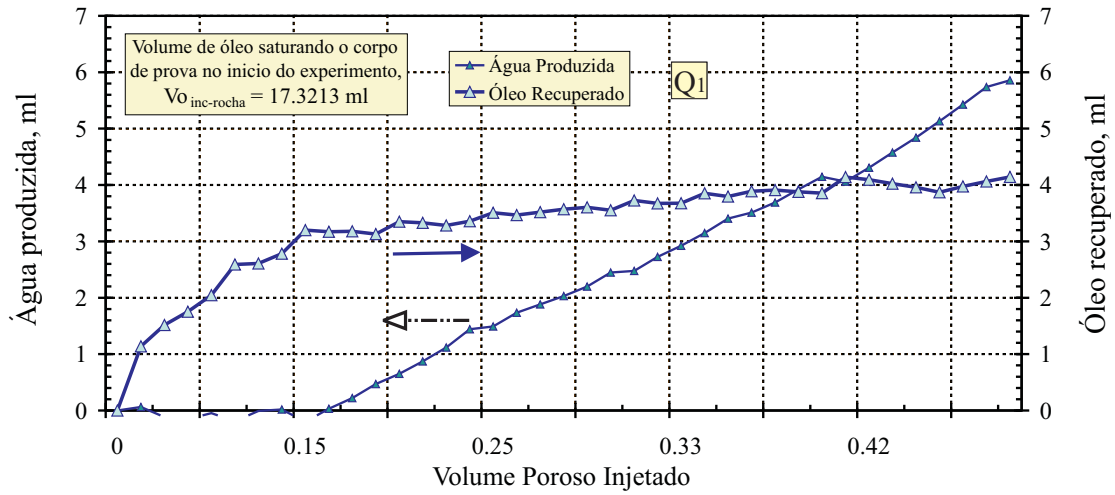
#### 5.1

##### Deslocamento do óleo por injeção de água

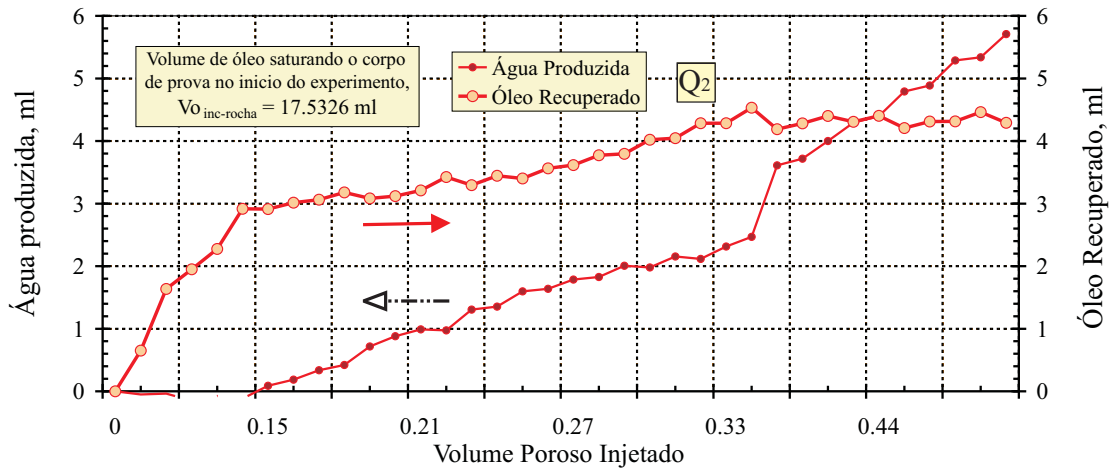
Utilizando o mesmo corpo de prova, foram realizados três experimentos com vazão de injeção diferente para cada um,  $Q_1 = 0.005$  ml/min,  $Q_2 = 0.010$  ml/min e  $Q_3 = 0.015$  ml/min.

As Figs. 5.1 apresentam o volume de óleo e água produzidos ao longo do experimento para as três vazões de água analisadas. Nos três casos, inicialmente o líquido produzido era somente óleo. A partir de um valor aproximadamente de 15% do volume poroso injetado, a água injetada atinge a saída do corpo de prova e o líquido produzido passa a ser uma mistura de óleo e água. Ao final do experimento, o volume de água produzido cresce quase linearmente e o volume de óleo produzido atinge seu valor máximo.

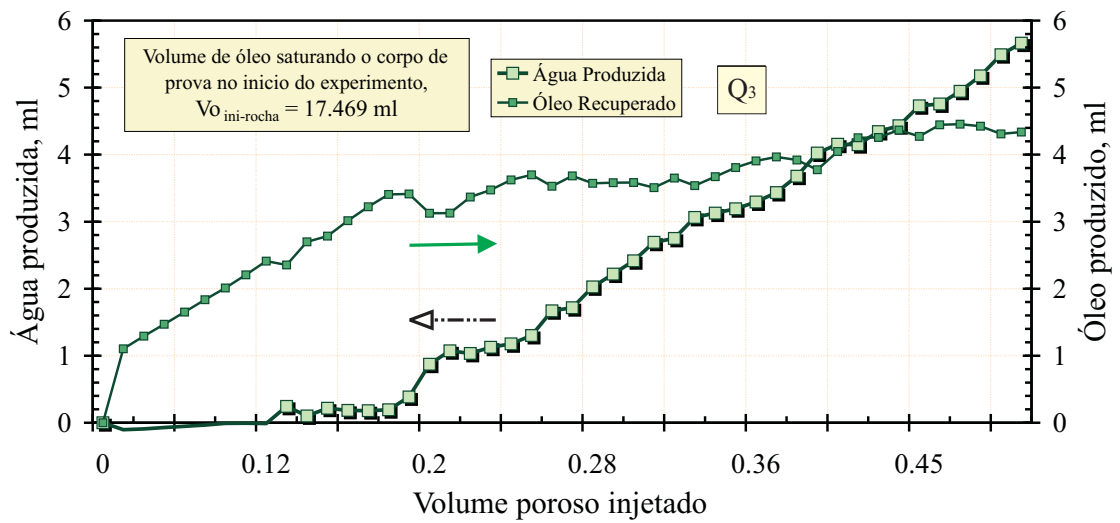
Nas Fig. 5.2, os resultados das figuras anteriores são apresentados em forma adimensional, como a razão do volume de água ( $V_a(t)$ ) ou óleo ( $V_o(t)$ ) pelo volume total produzido em determinado instante desde o início do experimento ( $V_a(t) + V_o(t)$ ).



a) Vazão  $Q_1 = 0.005$  m/min



b) Vazão  $Q_2 = 0.010$  m/min



c) Vazão  $Q_3 = 0.015$  m/min

Figura 5.1: Resultado da recuperação de óleo, mediante a injeção de água.

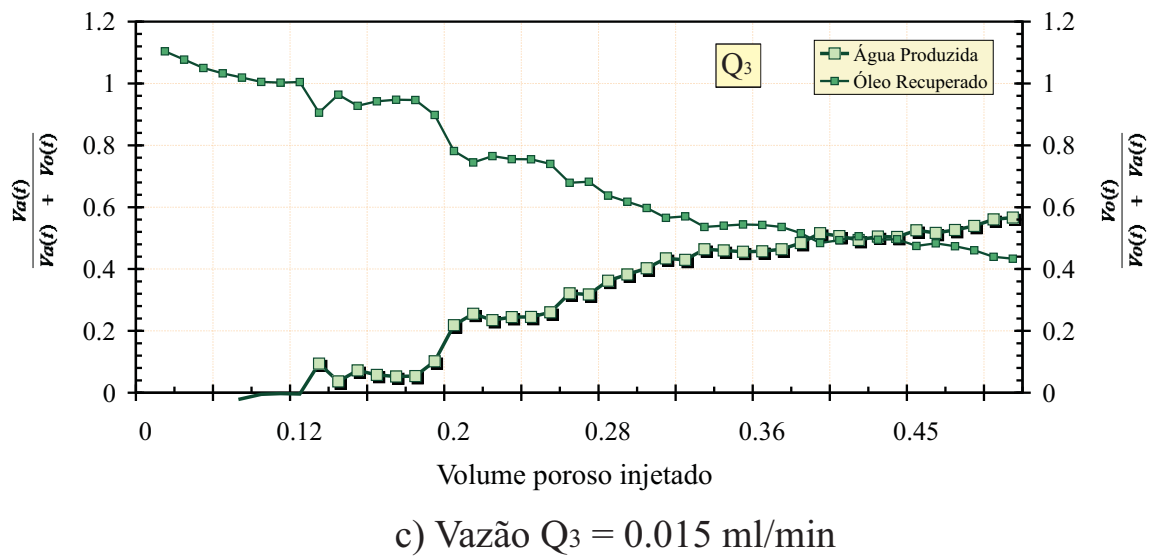
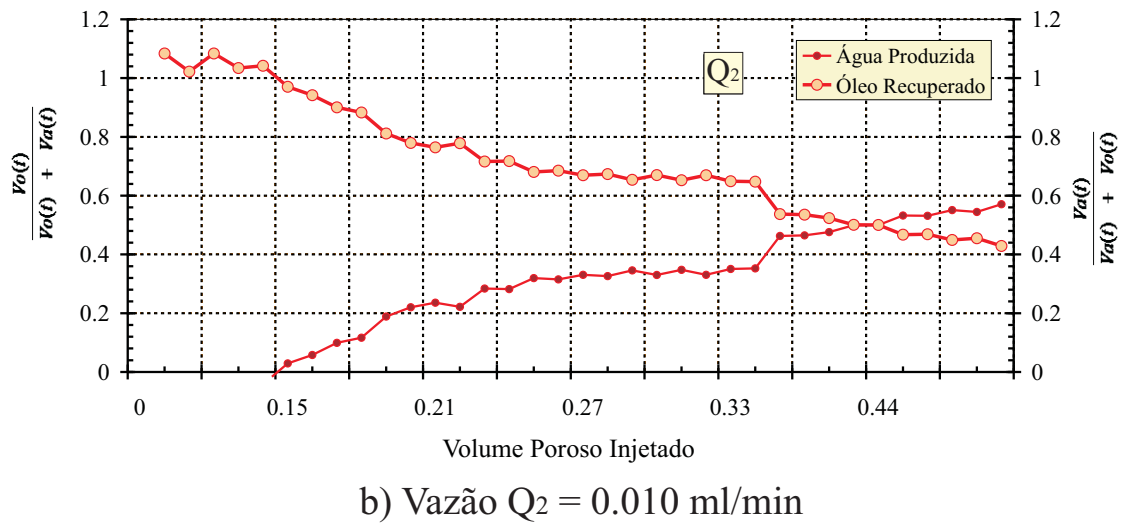
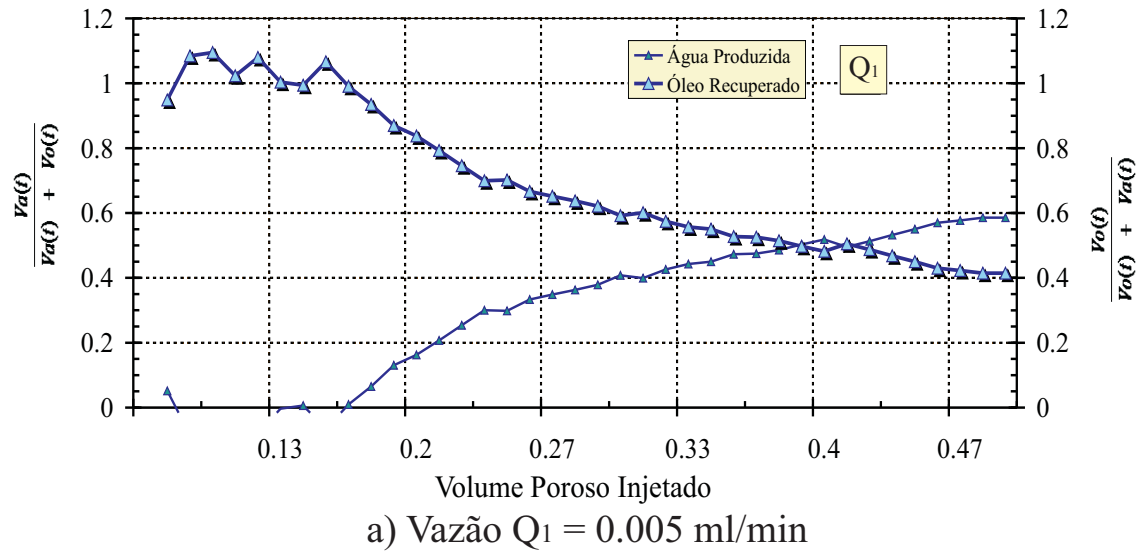


Figura 5.2: Resultado do balanço de volumes produzidos, mediante a injeção de água.

O óleo produzido pode ser apresentado em termos da fração de recuperação, definida como a razão entre o volume acumulado de óleo produzido pelo volume de óleo saturando o meio poroso no início do experimento,

$$f_R = \frac{\text{volume acumulado de óleo produzido}}{\text{volume inicial de óleo saturando o meio poroso}} \quad (5-1)$$

A Fig. 5.3 apresenta a fração de óleo produzido ao longo dos experimentos através de injeção de água para vazões de  $Q_1$ ,  $Q_2$  e  $Q_3$ .

A tabela 5.1 mostra os resultados da fração de recuperação de óleo mediante injeção de água, para vazões de  $Q_1$ ,  $Q_2$  e  $Q_3$ .

| Resultados                                  | unidades | $Q_1$  | $Q_2$  | $Q_3$  |
|---|----------|--------|--------|--------|
| Vazão                                       | (ml/min) | 0.005  | 0.010  | 0.015  |
| Volume poroso injetado                      | (#)      | 0.5    | 0.5    | 0.5    |
| Volume de óleo inicial no corpo de prova    | (ml)     | 17.321 | 17.533 | 17.469 |
| Volume total de óleo recuperado             | (ml)     | 4.143  | 4.29   | 4.34   |
| $f_R$ total de óleo no final do experimento | (%)      | 24     | 24.5   | 24.8   |

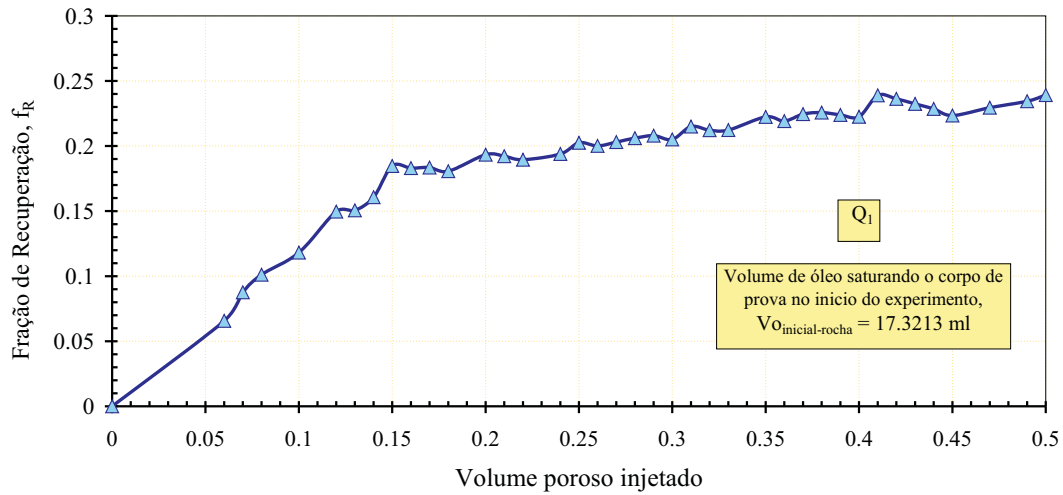
Tabela 5.1: Tabela de resultados do deslocamento de óleo por injeção de água.

A pressão resultante na entrada do corpo de prova ao longo dos experimentos para as três vazões analisadas de injeção de água, é apresentada na Fig. 5.4.

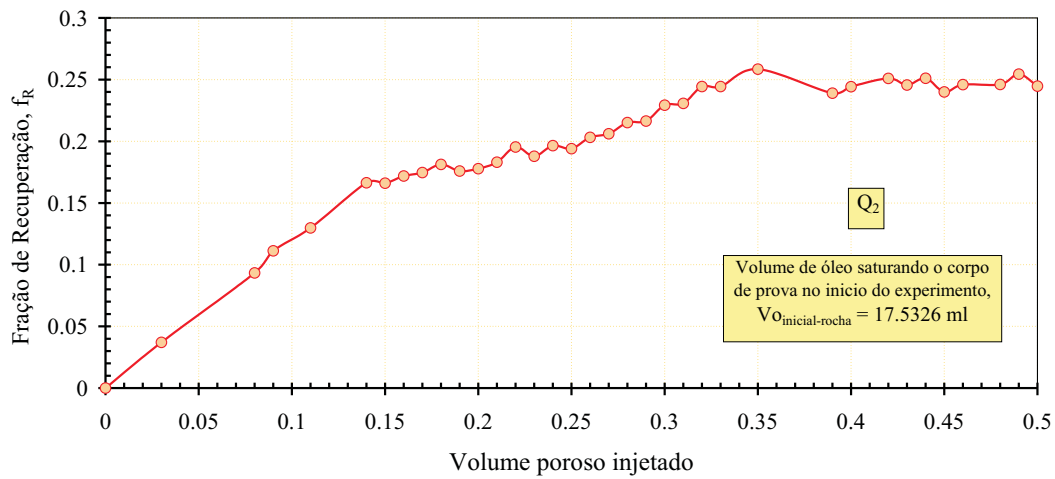
Nos três experimentos é observado que, a pressão na entrada do corpo de prova no início do experimento é maior e com o transcurso do experimento, a pressão vai diminuindo. Isto é explicado pelo fato que no início do experimento o corpo de prova está na saturação máxima de óleo, e no transcurso do experimento a água vai deslocando o óleo e invadindo os poros do corpo de prova, diminuindo assim a pressão necessária para o fluido atravessar o corpo de prova.

A Fig. 5.5 são apresentados a fração de óleo recuperado e o balanço dos volumes produzidos dos três experimentos de injeção de água.

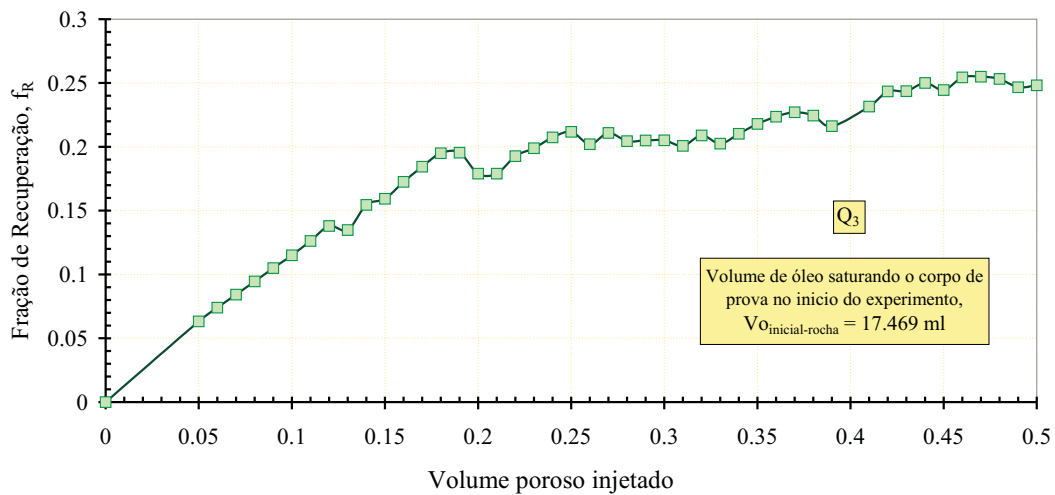
Observa-se que a produção de óleo para as três vazões foram muito próximas, concluindo que, a variação da vazão não influi no processo de recuperação de óleo nas condições do experimento.



a) Vazão  $Q_1 = 0.005$  ml/min



b) Vazão  $Q_2 = 0.010$  ml/min



c) Vazão  $Q_3 = 0.015$  ml/min

Figura 5.3: Resultado da fração de óleo recuperado, mediante injeção de água.

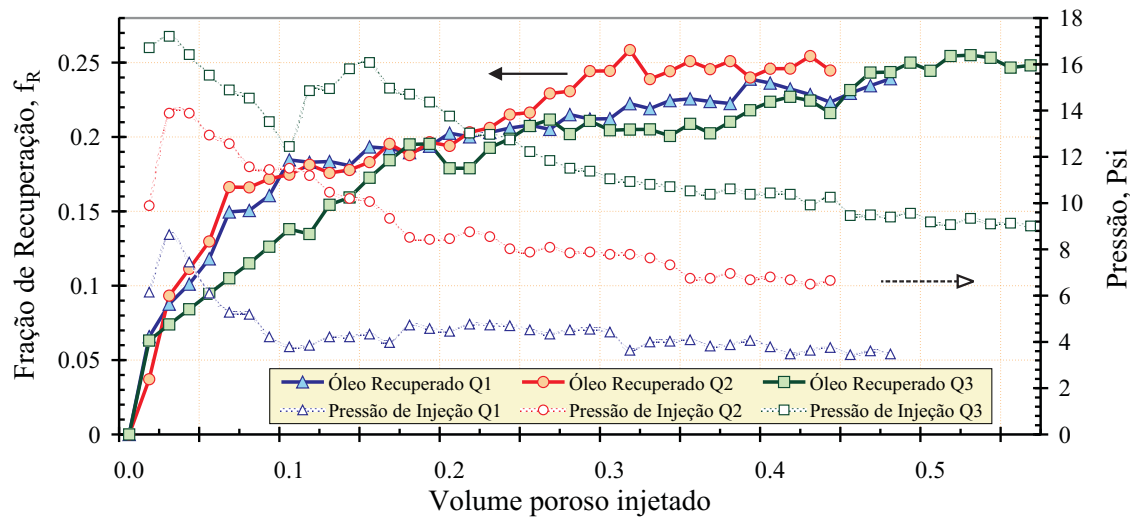


Figura 5.4: Resultado da fração de recuperação de óleo, mediante a injeção de água para as três vazões  $Q_1$ ,  $Q_2$ ,  $Q_3$ , e as pressões de injeção resultantes.

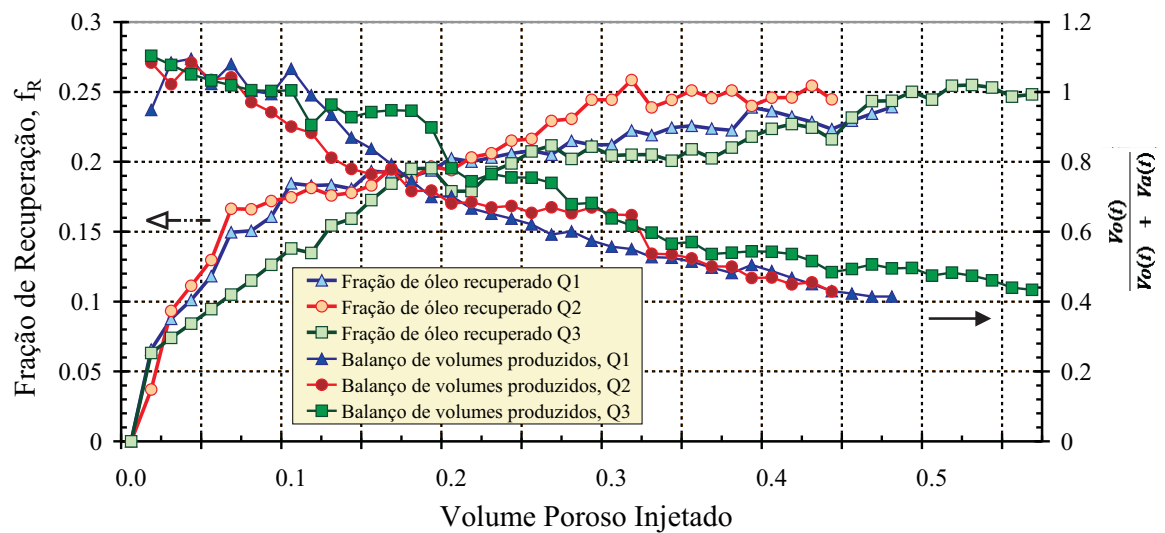


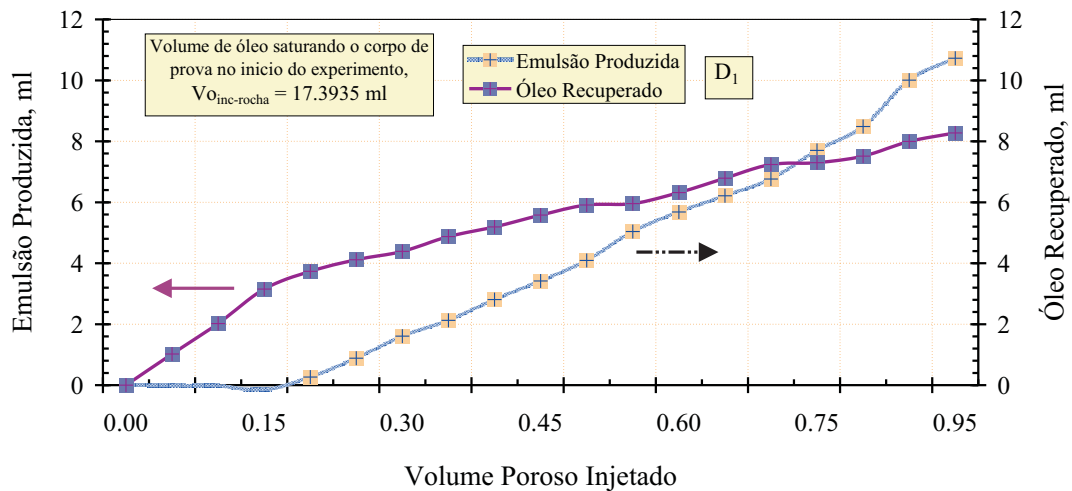
Figura 5.5: Resultados da fração de recuperação de óleo e balanço de volumes produzidos, mediante a injeção de água para as três vazões.

## 5.2

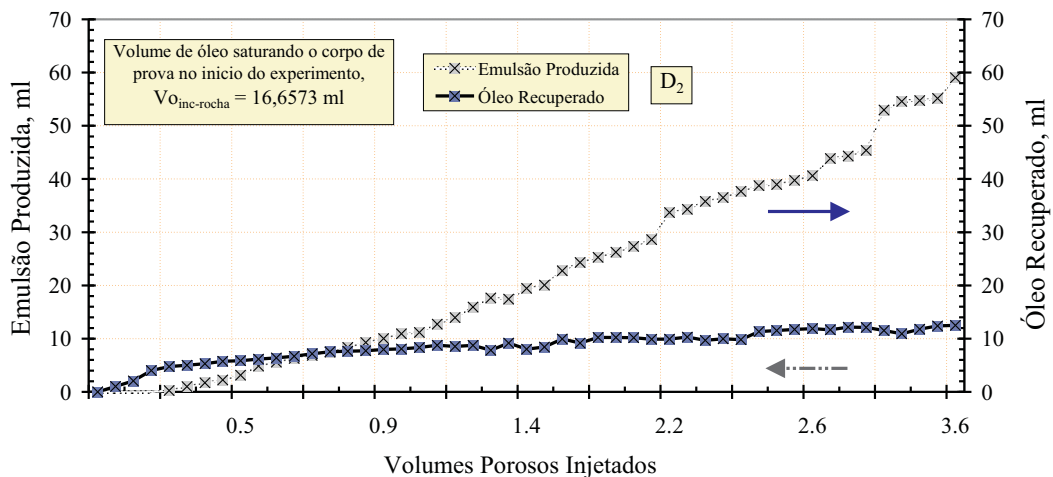
### Deslocamento do óleo por injeção de emulsões

Como já era esperado pela bibliografia, [15], nos experimentos de injeção de água, a recuperação de óleo não foi muito alta, ficando numa fração de recuperação ao redor de 25%. Nesta seção serão apresentados experimentos de recuperação de óleo por injeção de emulsões, para determinar se a injeção de emulsões altera o fator de recuperação.

Foram realizados dois experimentos de injeção de emulsões óleo em água “O/A” 30/70, uma com diâmetro médio de gota  $\bar{D}_1 = 5 \mu\text{m}$  e, a outra com diâmetro médio de gota  $\bar{D}_2 = 20 \mu\text{m}$ . Nos dois experimentos a vazão foi de  $Q_3 = 0.015 \text{ ml/min}$ .



a) Injeção de emulsão  $D_1$

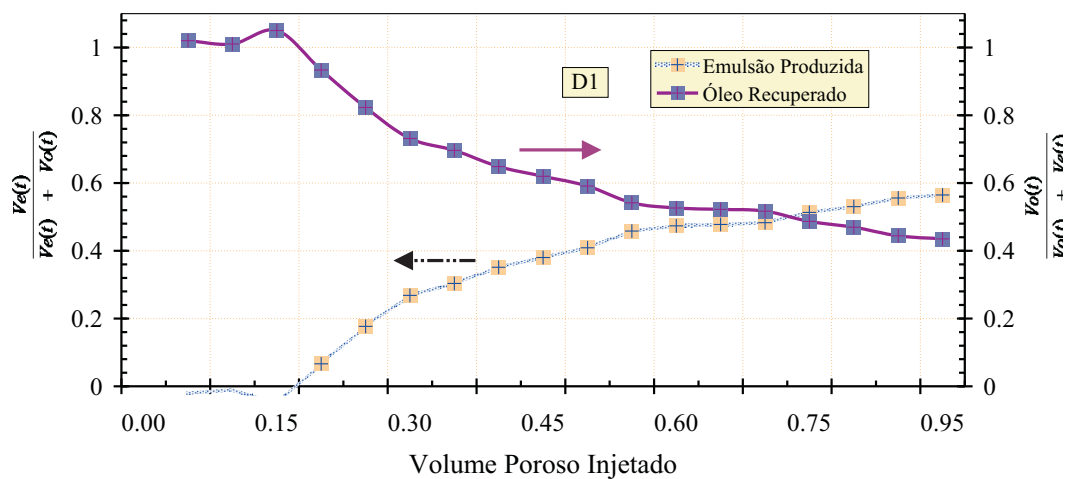


b) Injeção de emulsão  $D_2$

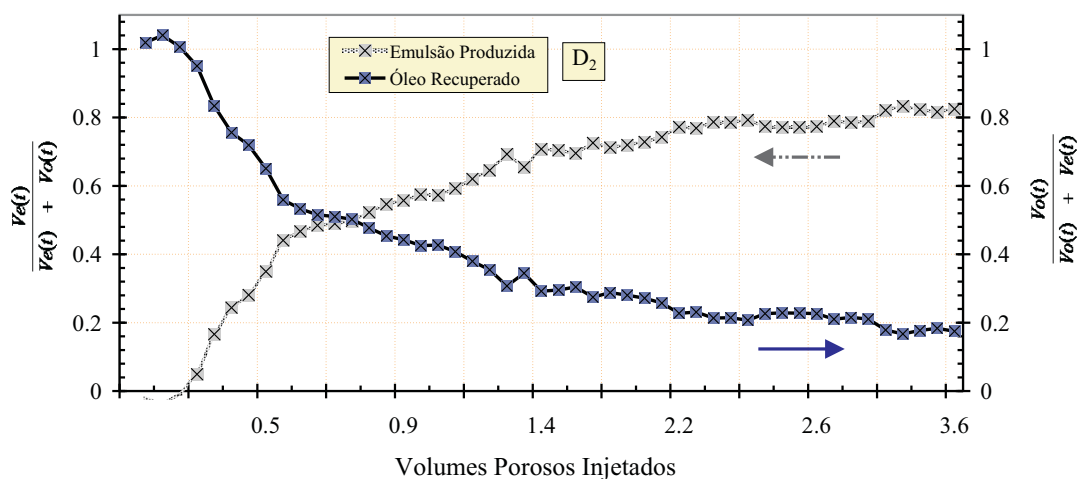
Figura 5.6: Resultado da recuperação de óleo e emulsão, mediante a injeção de emulsão.

A Fig. 5.6 apresenta o volume de óleo e emulsão produzidos ao longo do experimento para os dois tamanhos de gotas analisados. Como nos experimentos de injeção de água, nos dois casos de injeção de emulsão inicialmente o líquido produzido era somente óleo. A partir de um valor aproximadamente de 20% do volume poroso injetado, a emulsão injetada atinge a saída do corpo de prova e o líquido produzido passa a ser uma mistura de emulsão e óleo. Ao final do experimento a produção de emulsão cresce quase linearmente e o volume de óleo produzido atinge o seu valor máximo.

Na Fig. 5.7, os resultados das figuras anteriores são apresentados em forma adimensional, como a razão do volume de água (ou óleo) pelo volume total produzido.



a) Injeção de emulsão D<sub>1</sub>

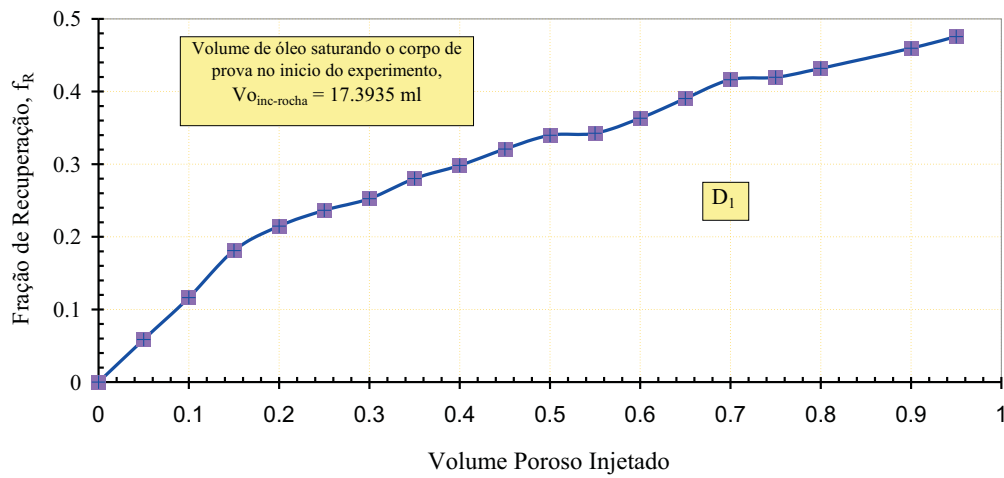


b) Injeção de emulsão D<sub>2</sub>

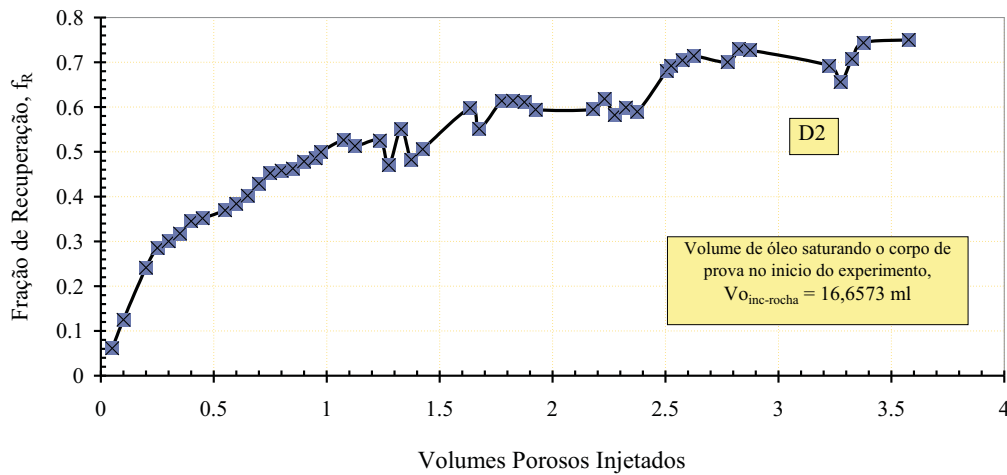
Figura 5.7: Resultados do balanço de volumes produzidos do óleo e emulsão, mediante a injeção de emulsão.



A Fig. 5.8 apresenta os resultados da fração de recuperação de óleo através da injeção da emulsão.



a) Injeção de emulsão  $D_1$



b) Injeção de emulsão  $D_2$

Figura 5.8: Resultados da fração da recuperação de óleo, mediante a injeção de emulsão.

A tabela 5.2 mostra os resultados da fração de recuperação de óleo mediante injeção de emulsão, para diâmetros de gota de  $\bar{D}_1$ ,  $\bar{D}_2$  e  $Q_3$ .

Pode-se observar que a produção de óleo no experimento  $\bar{D}_1$  não havia atingido seu valor final ao término do experimento. Porém, esta recuperação dobra o volume de óleo recuperado quando comparado ao caso de injeção de água.

A Fig. 5.9 mostra a comparação dos resultados da recuperação de óleo por injeção dos dois tipos de emulsões  $\bar{D}_1$  e  $\bar{D}_2$ .

Pode-se observar na Fig. 5.9, que a fração de recuperação de óleo por injeção da emulsão  $\bar{D}_2$  é ligeiramente maior do que a fração de recuperação de óleo por injeção da emulsão  $\bar{D}_1$ , neste gráfico é também comparada a

| Resultados                                  | unidades          | D <sub>1</sub> | D <sub>2</sub> |
|---|-------------------|----------------|----------------|
| Diâmetro médio                              | ( $\mu\text{m}$ ) | 5              | 20             |
| Volume poroso injetado                      | (#)               | 1.0            | 3.7            |
| Volume de óleo inicial no corpo de prova    | (ml)              | 17.39          | 16.7           |
| Volume total de óleo recuperado             | (ml)              | 8.28           | 12.525         |
| $f_R$ total de óleo no final do experimento | (%)               | 47.6           | 75             |

Tabela 5.2: Tabela de resultados do deslocamento de óleo por injeção de água.

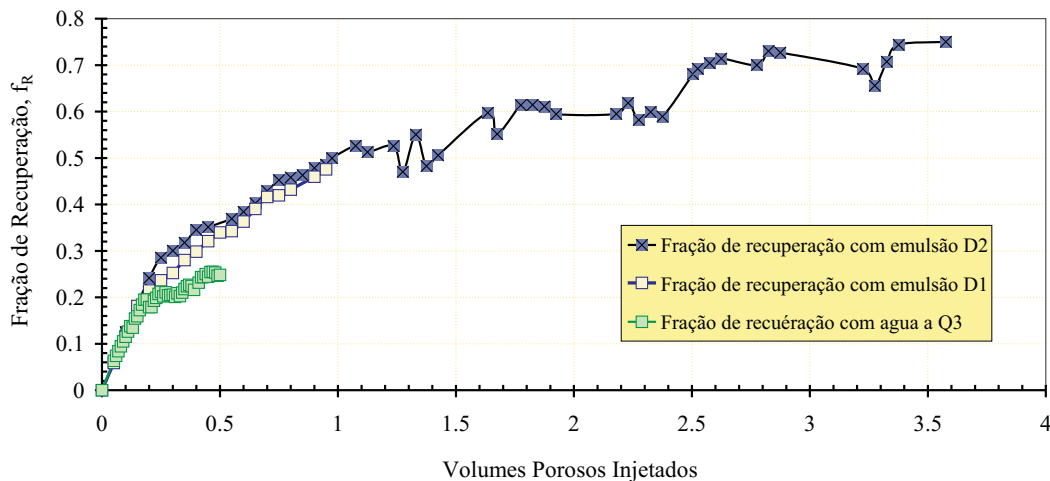


Figura 5.9: Comparação dos resultados da fração de recuperação de óleo, mediante a injeção água  $Q_3$  e a injeção de emulsões  $\bar{D}_1$  e  $\bar{D}_2$  à mesma vazão.

fração de recuperação de óleo por injeção de água a vazão  $Q_3$ , que é muito menor.

A Fig. 5.10 apresenta a variação de pressão de injeção ao longo dos experimentos de injeção de emulsões.

Apesar da emulsão de menor diâmetro médio possuir uma viscosidade maior (Figs. 4.11 e 4.12), a pressão de injeção é maior quando a emulsão de gotas grandes ( $\bar{D}_2 = 20 \mu\text{m}$ ) é injetada. Isto pode ser explicado pelo fenômeno de bloqueio de alguns poros pelas gotas de óleo. Este resultado comprova que os modelos que descrevem o escoamento de emulsões através de uma viscosidade efetiva não são corretos. O bloqueio de poros explica também o aumento do fator de recuperação de óleo.

Ao contrário dos experimentos de injeção de água, a pressão de injeção não cai ao longo do experimento. Estas altas pressões de injeção podem comprometer o uso de injeção de emulsões como método de recuperação avançada.

A seguir serão apresentados experimentos de injeção alternada da

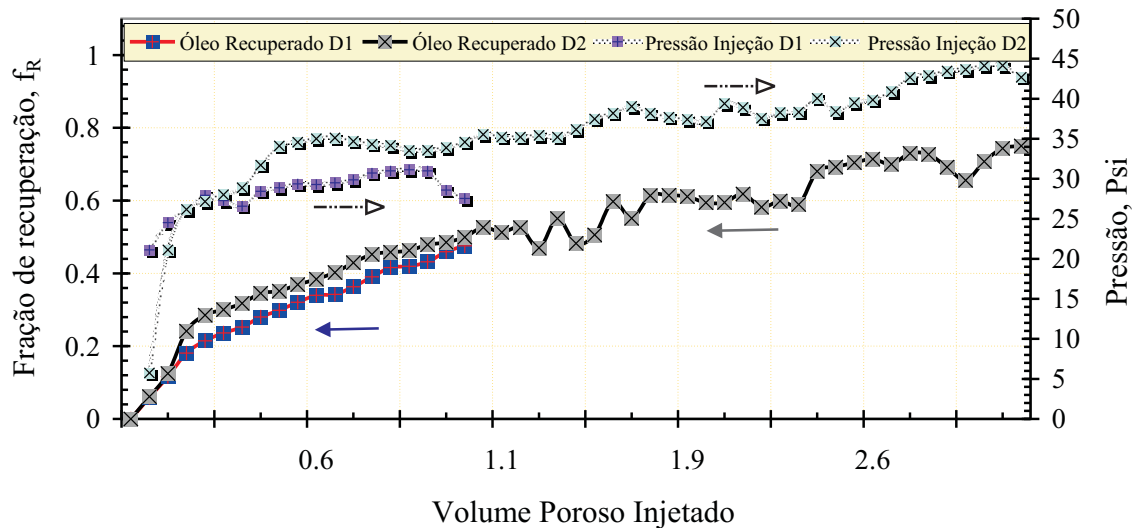


Figura 5.10: Resultado da fração de recuperação de óleo, mediante a injeção de emulsões  $\bar{D}_1$  e  $\bar{D}_2$ , e suas pressões de injeção resultantes.

emulsões e água com o objeto de reduzir a pressão de injeção.

### 5.3

#### Recuperação avançada de óleo por injeção de água e emulsão em forma alternada

A Fig. 5.11 apresenta a fração de recuperação de óleo em um experimento de injeção alternada de água e emulsão de diâmetro  $\bar{D}_2 = 20 \mu\text{m}$ . As áreas cinzas do gráfico indicam os intervalos de tempo nos quais ocorrem injeção de emulsão.

Água foi injetada no corpo de prova até a saturação irreduzível de óleo for atingida. Pode-se observar que entre os instantes 2 e 3 volumes porosos injetados, a fração de recuperação ficou praticamente constante e igual ao 40%, aproximadamente no 3ro volume poroso injetado, um total de 0.30 VP de emulsão foi injetado. A partir do instante em que a injeção de emulsão é interrompida, a injeção de água foi reiniciada. Pode-se observar um aumento significativo do fator de recuperação de óleo durante a injeção de água até que uma nova saturação irreduzível de óleo é atingida, correspondendo a um fator de recuperação de aproximadamente 45%. Aproximadamente no 5to volume poroso injetado, um novo ciclo de injeção de emulsão foi iniciado, 0.6 VP. Pode-se observar novamente um aumento significativo do fator de recuperação. O segundo ciclo de injeção de emulsão foi seguido por um ciclo

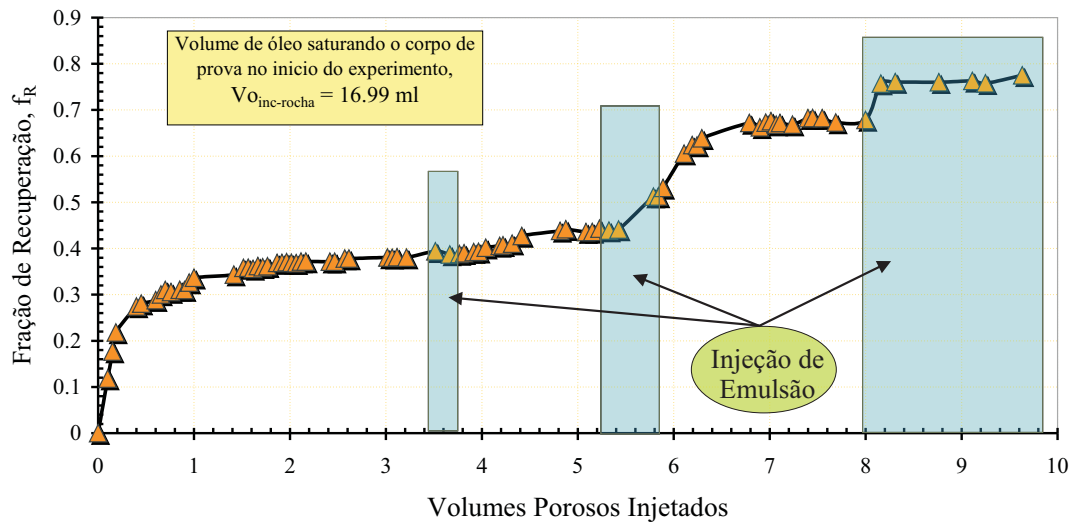


Figura 5.11: Fração de recuperação de óleo, mediante a injeção alternada de água e emulsão de 20  $\mu\text{m}$  a vazão de 0.015 ml/min.

de injeção de água até um novo valor do fator de recuperação final, em torno de 70%. Um terceiro ciclo de injeção de emulsões elevou o fator de recuperação de óleo a aproximadamente 75%.

Na Fig. 5.13, os resultados da figura anterior são também apresentados em forma adimensional, como a razão do volume de óleo pelo volume total produzido. Como pode-se observar, a pressão de injeção aumenta consideravelmente no início de cada ciclo de injeção de emulsão. Porém, a injeção de água após cada ciclo de injeção de emulsão faz com que a pressão de injeção diminua consideravelmente.

Na Fig. 5.14, é mostrada a comparação dos resultados da fração de recuperação de óleo, mediante a injeção de emulsões com diâmetro médio de gota  $\bar{D}_1$ ,  $\bar{D}_2$ , injeção de água à vazão  $Q_3$  e a injeção alternada de água  $Q_3$  e emulsão  $\bar{D}_2$ .

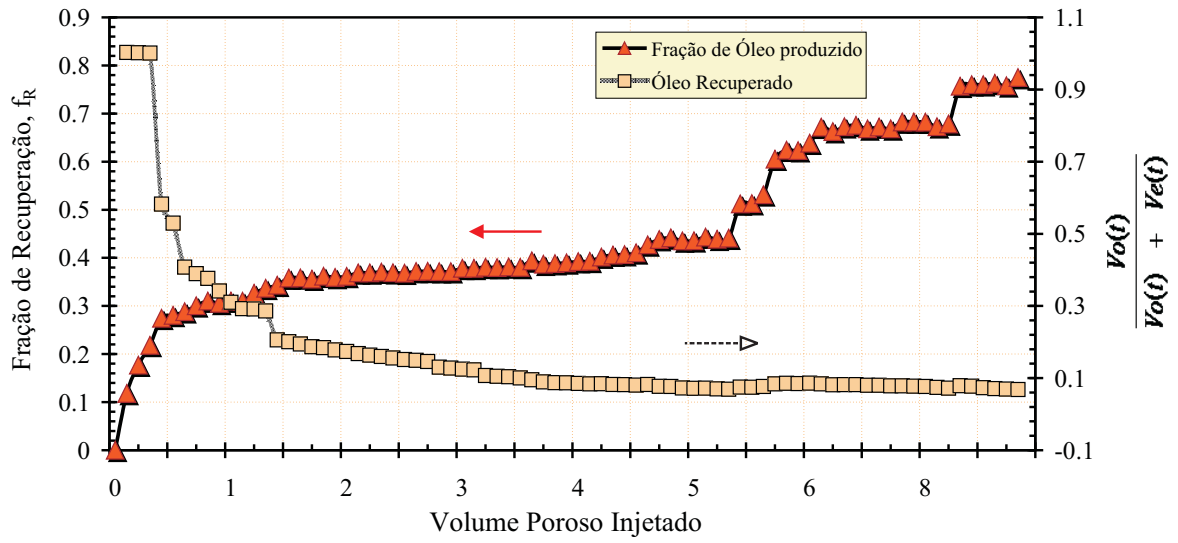


Figura 5.12: Fração de recuperação de óleo e balanço de volumes produzidos para o óleo, mediante injeção alternada de água  $Q_3$  e emulsão  $\bar{D}_2$ .

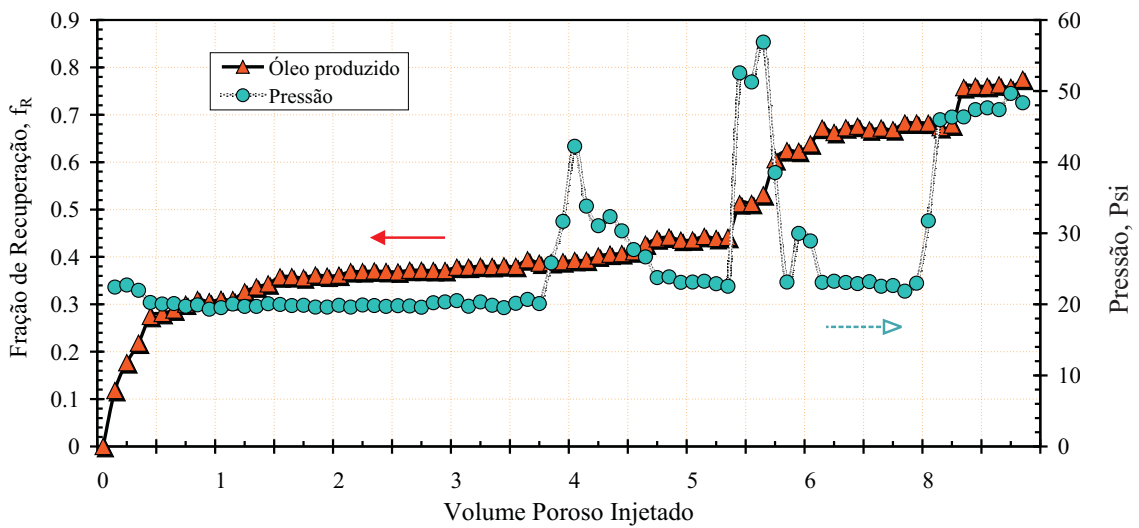


Figura 5.13: Fração de recuperação de óleo, mediante a injeção alternada de água  $Q_3$  e emulsão  $\bar{D}_2$ , e as pressões resultantes.

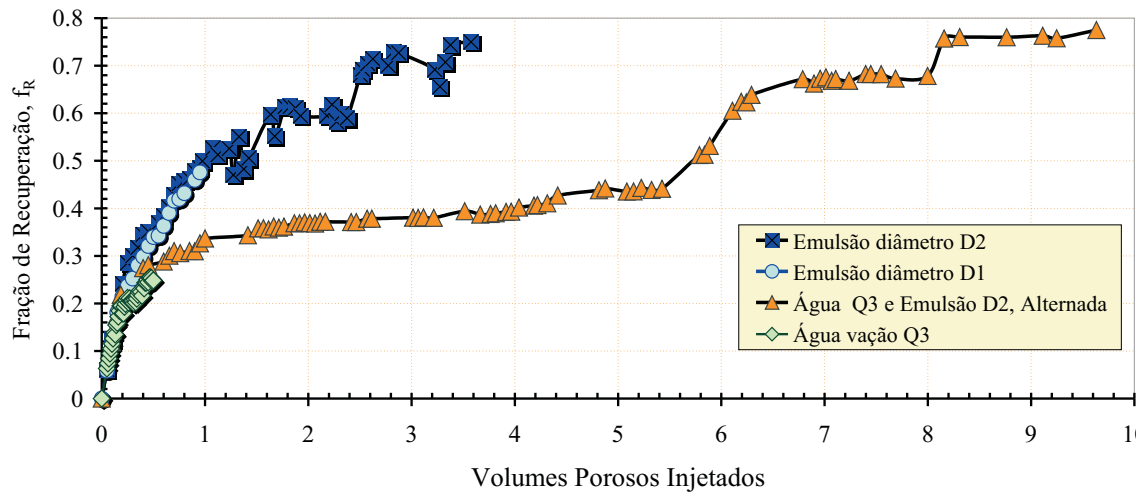


Figura 5.14: Comparação de resultados  $f_R$  de óleo mediante experimentos de: injeção alternada de água e emulsão  $\bar{D}_2$ , injeção de água  $Q_3$ , injeção de emulsões de  $\bar{D}_1$  e  $\bar{D}_2$  a vazão de 0.015 ml/min.

## 5.4 Análise de incertezas

É interessante realizar uma análise de incertezas. Aplicando a expressão de Kleine e McClintock [16] para a propagação de incertezas realizamos uma análise no fator de recuperação, então a equação 5-1 resulta em:

$$\delta_{f_R} = \left\{ \left( \frac{\varphi f_R}{\varphi m_{oac}} \delta m_{oac} \right)^2 + \left( \frac{\varphi f_R}{\varphi m_i} \delta m_i \right)^2 + \frac{\varphi f_R}{\varphi m_o} \right\}^{(0,5)} \quad (5-2)$$

Sabendo que  $V_o = \frac{m}{\rho}$ , foi encontrado que a incerteza da massa específica é de 0.05%, a incerteza do vaso coletor é de 0.2% e a incerteza de leitura é de 0.5%.

Finalmente a incerteza do fator de recuperação é  $\delta_{f_R} = 0,036 = 3,6\%$

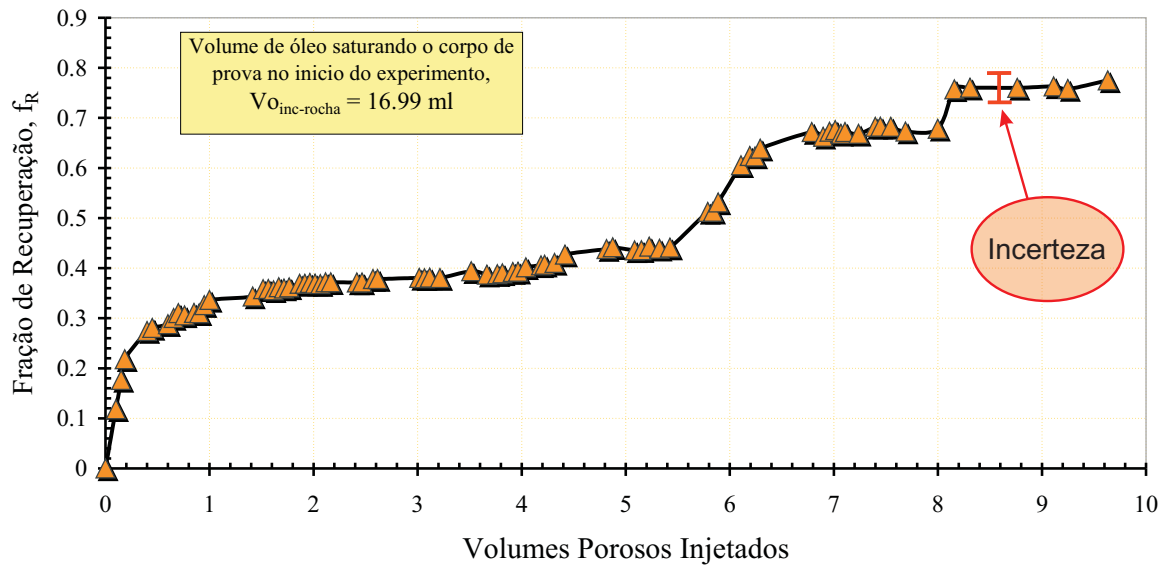


Figura 5.15: Incerteza no experimento de injeção de emulsão  $\bar{D}_2$ .