

4. Resultados Experimentais

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados dos experimentos de visualização do escoamento de emulsões de óleo em água através de um meio poroso. Conforme descrito no capítulo anterior, o meio poroso é primeiramente saturado com água destilada para determinar o volume poroso e a permeabilidade do mesmo. Em seguida, é injetado óleo mineral para deslocar a água até atingir a saturação de água irreduzível. Posteriormente, inicia-se o processo de deslocamento de óleo por injeção de fase contínua (*solução água-surfactante*) com o objetivo de atingir a saturação de óleo residual e finalmente, é injetada de forma contínua emulsão no micromodelo. Toda a informação quantitativa adquirida e avaliada nesta dissertação foi possível utilizando o software Sigma Scan Pro 5.0, para o tratamento das imagens obtidas nos diferentes testes.

4.1 Saturação do Micromodelo com Água Destilada

4.1.1 Porosidade

A porosidade foi obtida pela razão entre o volume poroso e o volume total do micromodelo, conforme descrito na seção 2.2.1. No entanto, para estimar experimentalmente o valor desta propriedade, tornou-se necessário determinar inicialmente o volume poroso do micromodelo. Para isto, realizaram-se dois procedimentos de modo a obter melhores resultados, além de considerar possíveis incertezas nos testes experimentais.

O primeiro procedimento considerado o caso base, foi o cálculo geométrico dos volumes baseados nas dimensões do micromodelo. A partir das informações de comprimento, diâmetros de garganta e grãos, conforme se apresentam na Figura 4.1, foi possível obter o volume poroso da malha 2x2 mm do micromodelo, cujo valor foi de $V_{p\ 2x2} = 0.2372\ \mu\text{l}$ e lembrando que a área porosa do

micromodelo é formada por repetições (150 vezes) de quadros de 2 x 2 mm, obteve-se como resultado um volume poroso de $V_p = 150 \times 0.2372 \mu\text{l} = 35.6 \mu\text{l}$ e um volume total do micromodelo de $V_t = 56.3 \mu\text{l}$ (incluindo bifurcações e/o canais de entrada e saída).

Para determinar o volume poroso efetivo experimentalmente, primeiramente o micromodelo é submetido a um processo de secagem durante uma hora em uma estufa a temperatura de 80°C. A limpeza e a secagem do meio poroso podem perturbar na determinação do valor da porosidade, pois se não for retiradas impurezas, a sua estimativa não será determinada com precisão. Em seguida, o micromodelo é pesado em uma balança eletrônica para conhecer seu peso saturado com ar, chamado de peso seco. Posteriormente, o meio poroso vai-se saturando com água destilada, obtendo assim o peso embebido em água, chamado de peso úmido. O aumento do peso do micromodelo é devido à água que ficou nos poros ao deslocar o ar que nele estava contido.

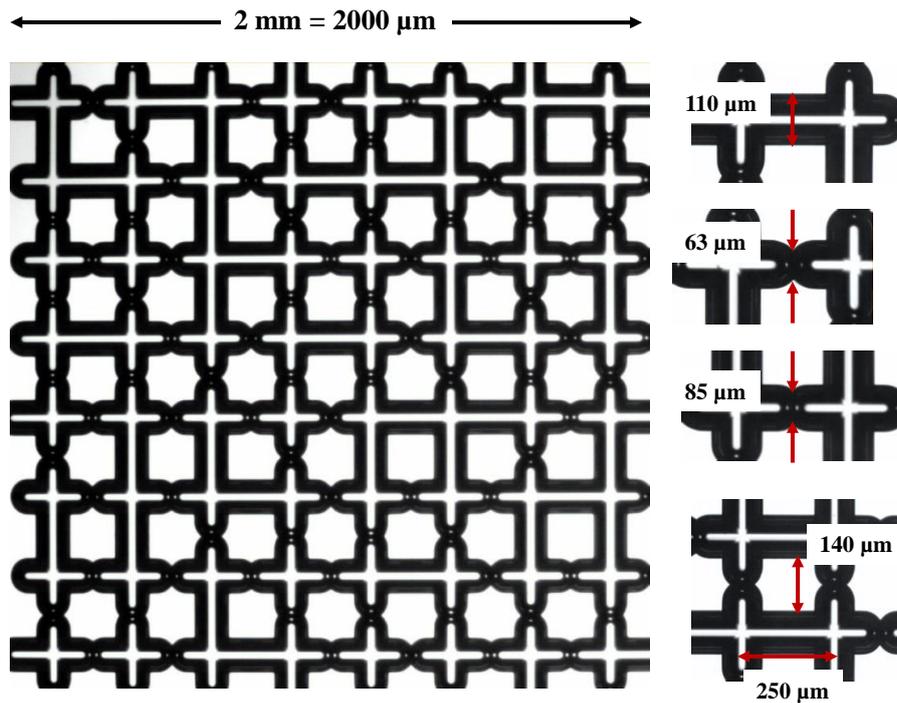


Figura 4. 1 Dimensões da estrutura interna do micromodelo, utilizadas no cálculo geométrico do volume poroso.

Foram feitos seis testes onde o volume poroso e porosidade do micromodelo obtiveram-se a partir da média ponderada de ditas medições. A Tabela 4.1 indica os resultados obtidos.

Tabela 4. 1 Volume poroso e porosidade dos diferentes testes.

Teste	Peso Seco (g)	Peso Úmido (g)	Volume Poroso (μl)	Porosidade (%)
1	14,3944	14,4290	30,5	50,8
2	14,3956	14,4303	30,6	51,0
3	14,3955	14,4290	29,4	49,0
4	14,3952	14,4286	29,3	48,8
5	14,3950	14,4295	30,4	50,6
6	14,3952	14,4290	29,7	49,5
Média	14,4	14,43	29,98	49,95
Desvio Padrão	0,00043	0,0006	0,58	0,96

Assim, foi estimado experimentalmente um volume poroso total de 30 μL e uma porosidade de 49.9% aproximadamente.

4.1.2 Permeabilidade Absoluta

A permeabilidade absoluta foi obtida conforme descrito na seção 2.2.2 utilizando água destilada como fluido que escoava através do micromodelo. Assim, foram feitos diferentes testes onde a água foi injetada a quatro diferentes vazões por pelo menos cinco volumes porosos, medindo-se um diferencial de pressão para cada vazão, conforme pode ser visto na Tabela 4.2. A tabela apresenta a média dos valores, que foi utilizada para obter o valor da permeabilidade do micromodelo.

Tabela 4. 2 Vazões e diferenciais de pressão usados para o cálculo da permeabilidade absoluta do micromodelo

Vazão ($\text{m}^3/\text{seg.}$)	Pressão Média ($\text{kg}/\text{m}.\text{s}^2$)
1.11E-09	3589,16
1.67E-09	6234,12
2.22E-09	8278,50
2.78E-09	9877,23

Conforme a lei de Darcy, a permeabilidade é determinada pelo coeficiente angular da reta que passa pelos pontos apresentados na Tabela 4.2. Desta forma, se construiu a curva vazão – pressão apresentada na Figura 4.2.

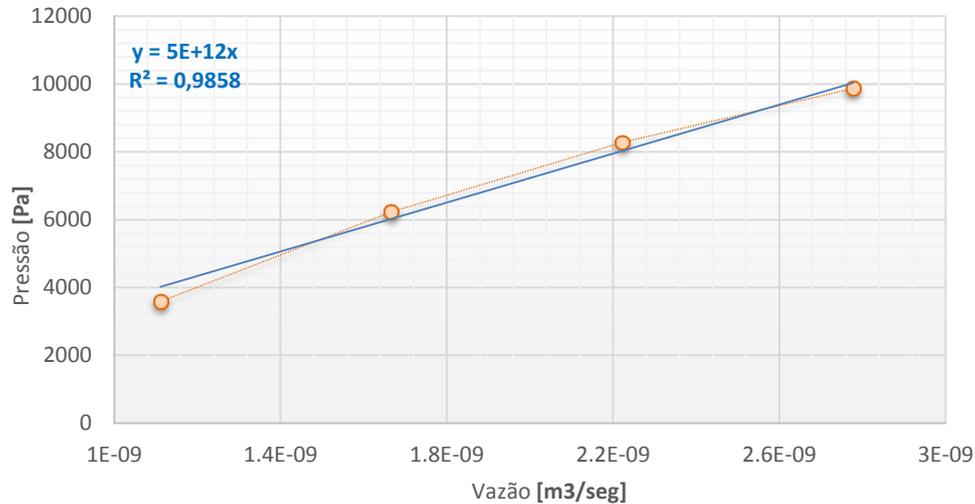


Figura 4. 2 Comportamento da pressão média ponderada com a vazão.

Por tanto, da equação 2.3 e a partir da inclinação da reta foi obtida a permeabilidade do meio poroso, com um valor de $k = 12.16 \text{ Darcy}$. Em dispositivos microfluídicos ou em micromodelos 2D esta propriedade tende a ser maior; na literatura é comum encontrar valores de permeabilidade entre 2-12D, valores normalmente associados a diâmetros de poro e gargantas de poro maiores às encontradas em rochas normais.

4.2

Visualização do Escoamento de Emulsões através do Micromodelo

Nesta seção, são apresentados os resultados dos experimentos de deslocamento de óleo mediante injeção de fase contínua e emulsão. Os experimentos no micromodelo foram realizados a diferentes vazões volumétricas, sendo este um parâmetro de entrada ajustado na bomba injetora. Em resumo, foram feitas diversas experiências, a Figura 4.3 apresenta um esquema resumo dos experimentos realizados no micromodelo e os resultados obtidos com cada teste são descritos a seguir.

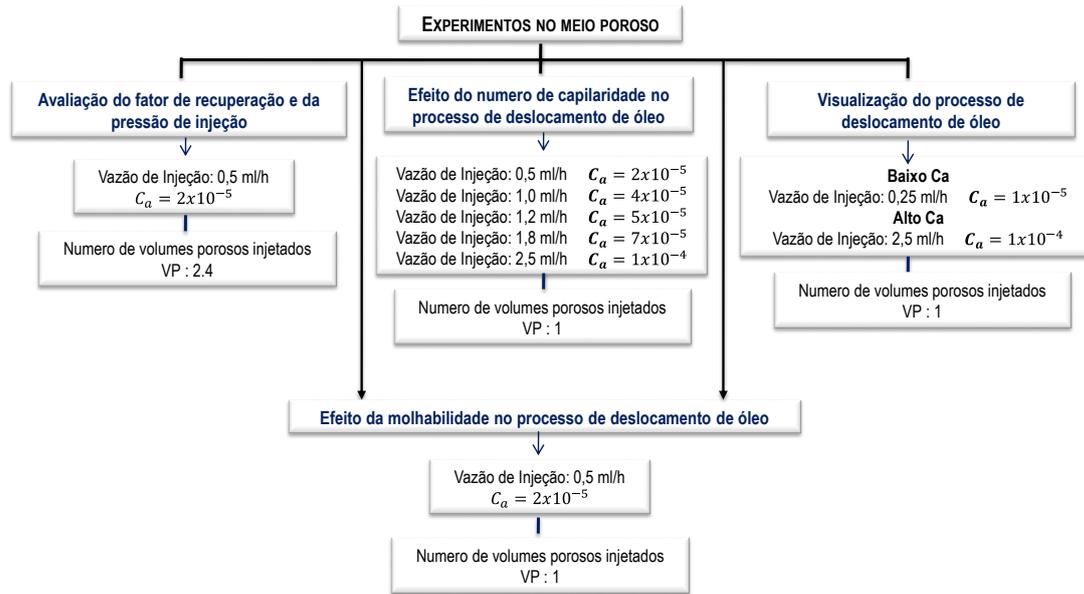


Figura 4. 3 Esquema resumo dos experimentos realizados.

4.2.1

Comportamento do fator de recuperação do óleo e pressão de injeção, em função do número de volumes porosos injetados

O foco principal neste experimento foi visualizar o deslocamento dos fluidos mediante a injeção de fase contínua e emulsão no micromodelo, realizando um monitoramento contínuo do comportamento da pressão durante o escoamento dos fluidos. Deste modo, foi selecionada uma área do micromodelo mostrando diversos poros em uma mesma imagem (Figura 4.4) com a finalidade de visualizar o que estava ocorrendo a nível de poros.

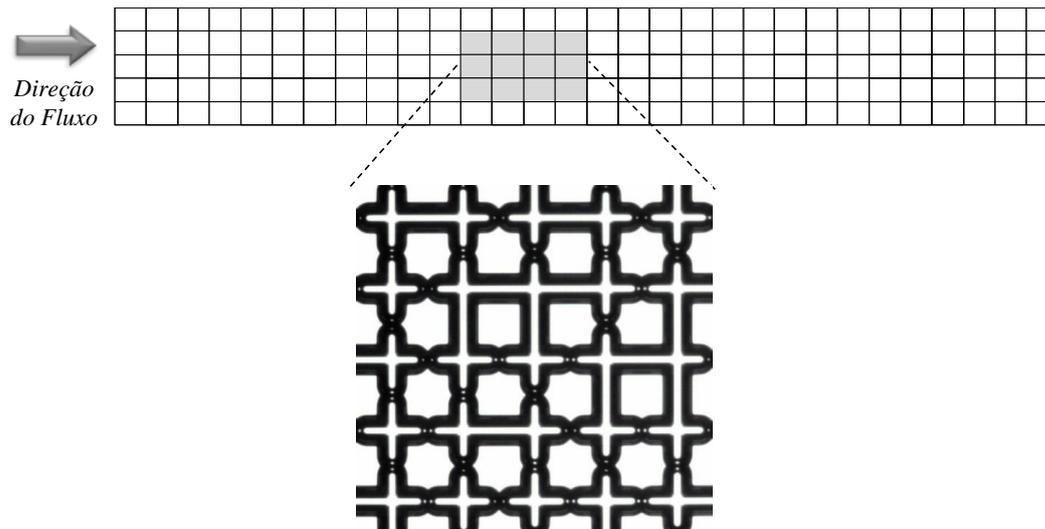


Figura 4. 4 Área do micromodelo selecionada para sua posterior análise e visualização.

O experimento foi desenvolvido a um número de capilaridade de $C_a = \mu v / \sigma = 2 \times 10^{-5}$. A Figura 4.4 mostra o comportamento do fator de recuperação e da pressão de injeção em função do número de volumes porosos (VP) injetados (tempo adimensional). Inicialmente se injetou a solução água-surfactante para deslocar o óleo do meio poroso. Na etapa inicial que compreende os primeiros 3.7 VP de fluido injetado, foi observada uma aceleração na produção do óleo, elevando rapidamente o fator de recuperação até um valor de aproximadamente 35.8% (a pressão aumenta consideravelmente chegando a um valor de 0.89 *psi*). A partir desse instante e durante os 2 VP injetados a fração de óleo produzido aumentou muito pouco ao passo que a pressão continuava aumentando. Este comportamento pode ser relacionado ao processo de invasão da fase contínua injetada em poros menores do meio poroso e formação de novos caminhos de fluxo. Durante esta fase o fator de recuperação aumenta até atingir um patamar de 39.8%. Neste ponto, o volume de água produzido cresceu gradativamente e o volume de óleo produzido atingiu o seu valor máximo.

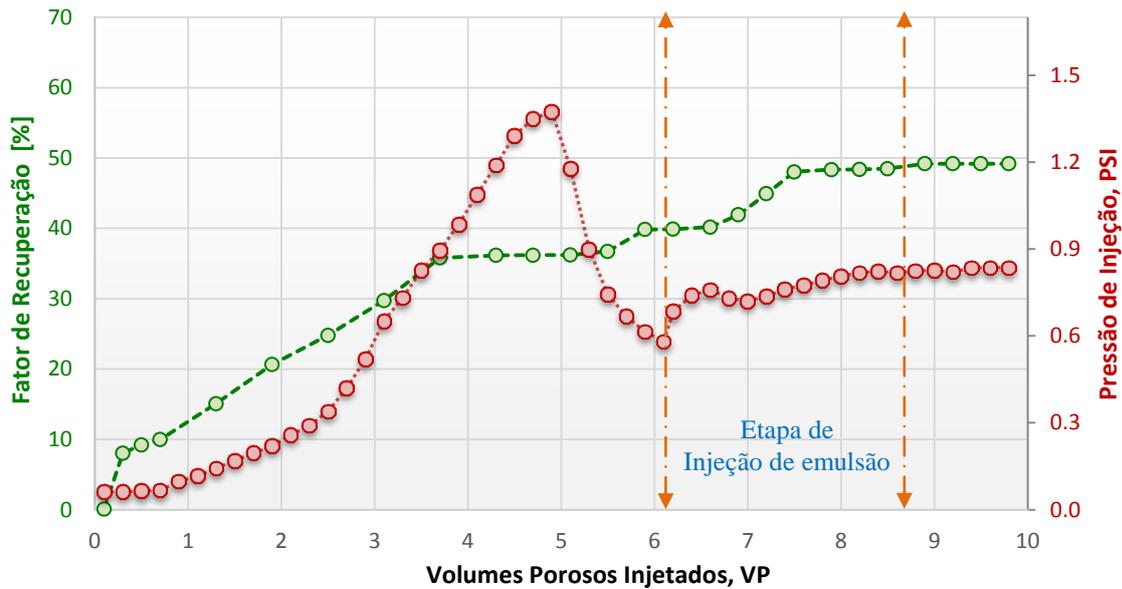


Figura 4. 5 Comportamento do fator de recuperação e pressão de injeção em função do número de volumes porosos injetados.

Da mesma forma, foi observado que no início do experimento a pressão se elevou abruptamente a um valor máximo de 1.375 *psi* e com o transcurso da injeção, a pressão vai diminuindo consideravelmente até um valor de 0.5 *psi*. Isto é explicado pelo fato que no início do experimento o micromodelo está na sua saturação máxima de óleo e no transcurso do experimento a água vai deslocando o óleo e invadindo os poros, diminuindo a pressão necessária para o fluido percorrer o meio poroso.

Posterior a esta etapa, foi injetado 2.4 VP de emulsão. Durante esta etapa a recuperação aumentou de 39.8% a 49.1% representando um incremento do 9.3%. A pressão de injeção aumenta de 0.5 *psi* a 0.83 *psi*, aproximadamente. A sequência de imagens registradas com o microscópio, mostradas nas Figuras 4.5 a 4.14 (mesma área do micromodelo em diferentes instantes de tempo), foram utilizadas para a determinação das saturações e fatores de recuperação locais. As imagens da Figura 4.6 até Figura 4.15 foram selecionadas nos instantes mais representativos ao longo do experimento de deslocamento de óleo, que serão descritas a seguir:

- **Foto # 1:** Nesta foto, se apresenta o início do experimento, mostrando o meio poroso saturado com óleo à saturação irreduzível de água. De

acordo com o processamento de imagens realizado, a saturação de óleo inicial nessa área foi de $S_o = 78\%$.

- **Foto # 2:** Neste instante, se observa o início do processo de injeção de fase contínua na parte direita superior da foto.
- **Foto # 3 até #6:** Com estas fotos é possível observar o aumento no número de poros ocupados pela água, formando caminhos preferenciais no micromodelo.
- **Foto # 7:** Mostra claramente a mobilização de gânglios de óleo (aprisionamento da fase não molhante), criando novos caminhos de água.
- **Foto # 8:** Esta fotografia mostra o meio poroso ao final da etapa do processo de injeção de água, à saturação de óleo residual. Nesta etapa foi atingido um fator de recuperação do 39.9% aproximadamente.
- **Foto # 9:** Neste instante, se ilustra o início do ciclo de injeção de emulsão no meio poroso, onde é possível observar como uma gota de emulsão de tamanho similar ao tamanho de poro invade uma zona preferencial formada pela injeção de água. Além disto, é possível notar que nesse caminho preferencial encontra-se um gânglio de óleo preso em uma garganta de poro, formado durante o deslocamento com água.
- **Foto # 10:** Esta fotografia mostra a gota de emulsão se aproximando ao gânglio de óleo mencionado anteriormente.
- **Foto # 11 até 12:** Nestas fotos, se ilustra como a gotinha da emulsão consegue atingir o gânglio de óleo, e ajudado de um aumento na pressão, acabaram se deslocando, dispersando e passando pelos poros sem maiores dificuldades.
- **Foto # 13 até 15:** Com o aumento no número de volumes porosos injetados de emulsão, se evidencia em algumas zonas do micromodelo uma redução na fração de óleo residual. Evidencia suficiente para observar o efeito da injeção de emulsões na mudança da saturação de óleo residual do meio poroso.

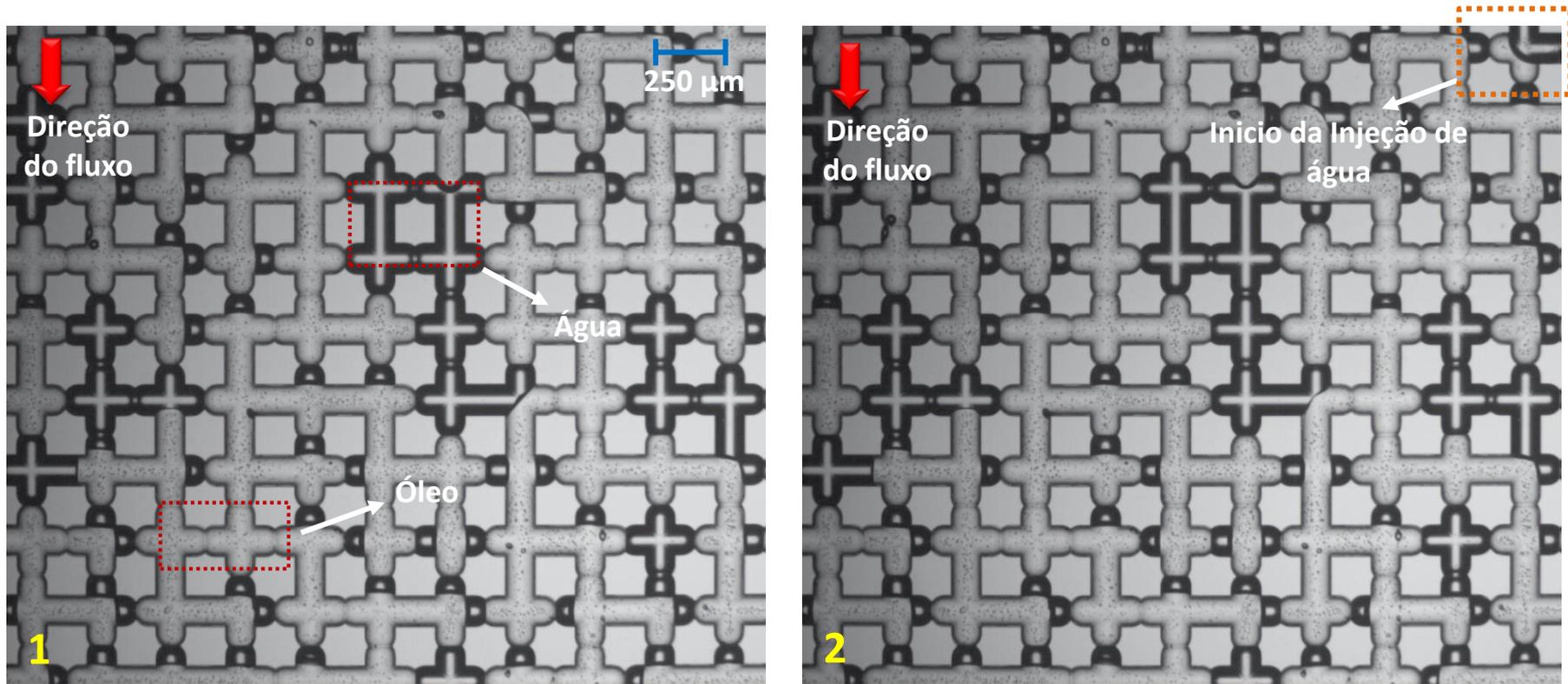


Figura 4. 6 Fotografias mostrando o processo de injeção de água e emulsão em uma seção do micromodelo. $C_a = 2 \times 10^{-5}$, $\sigma = 6.97 \text{ mN/m}$.

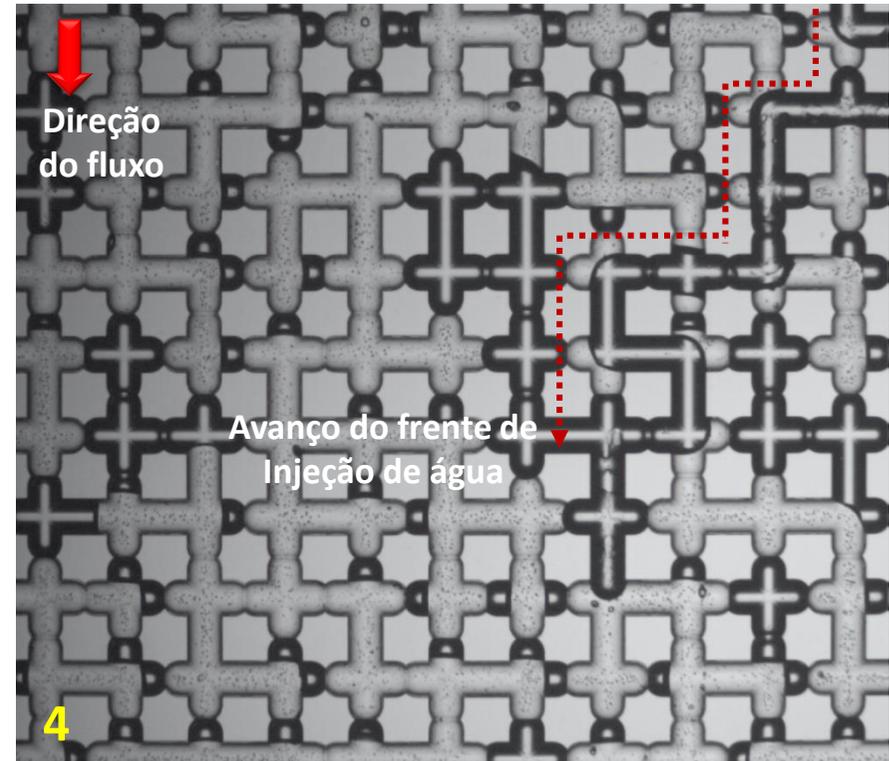
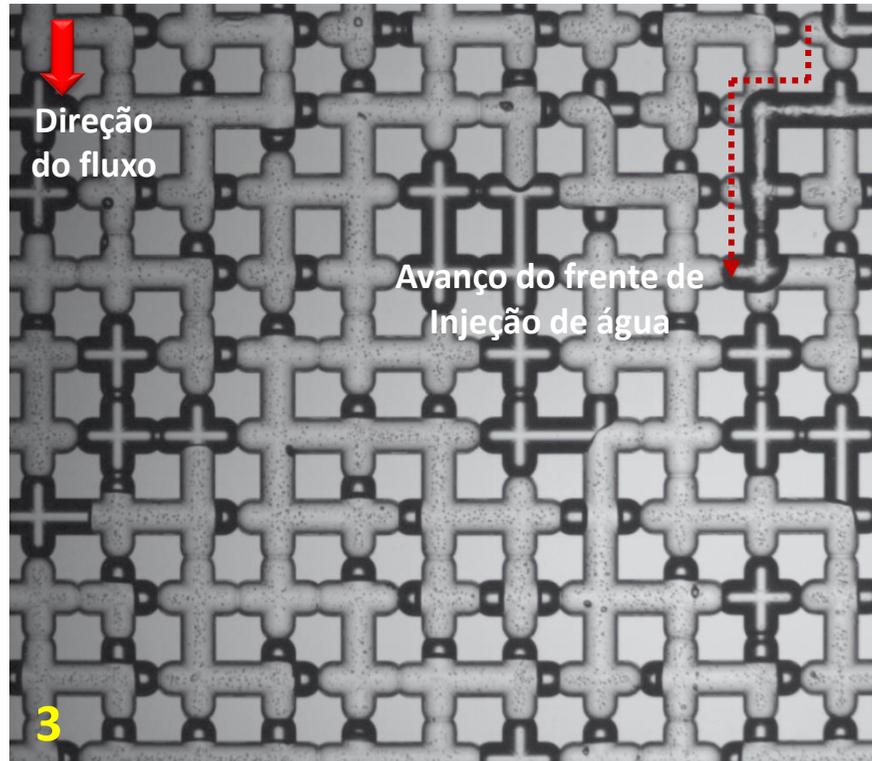


Figura 4. 7 Fotografias mostrando o processo de injeção de água e emulsão em uma seção do micromodelo. $C_a = 2 \times 10^{-5}$, $\sigma = 6.97 \text{ mN/m}$.

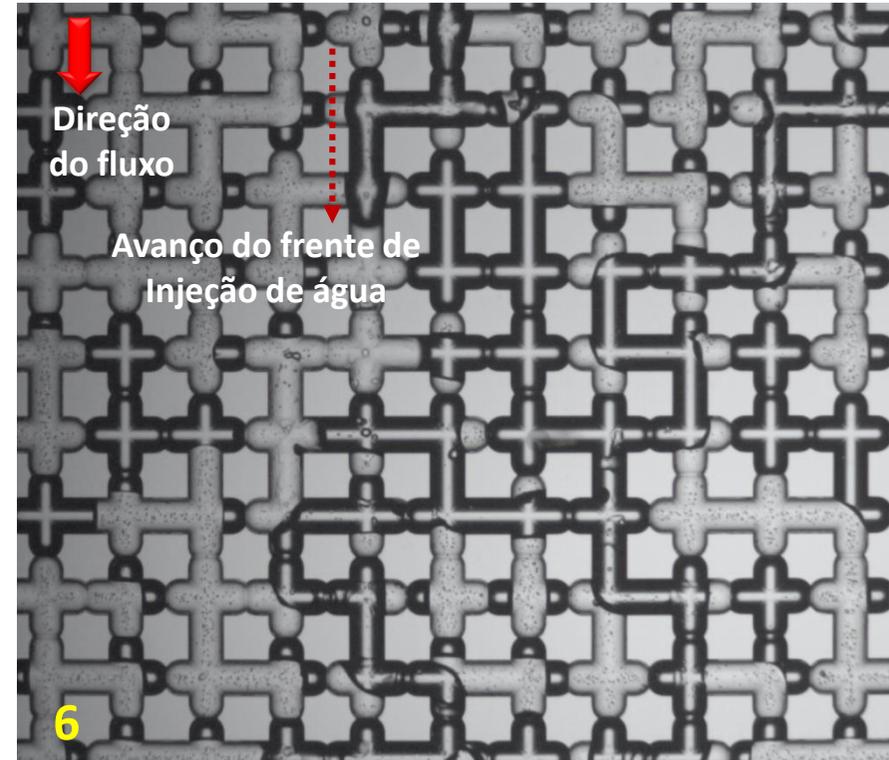
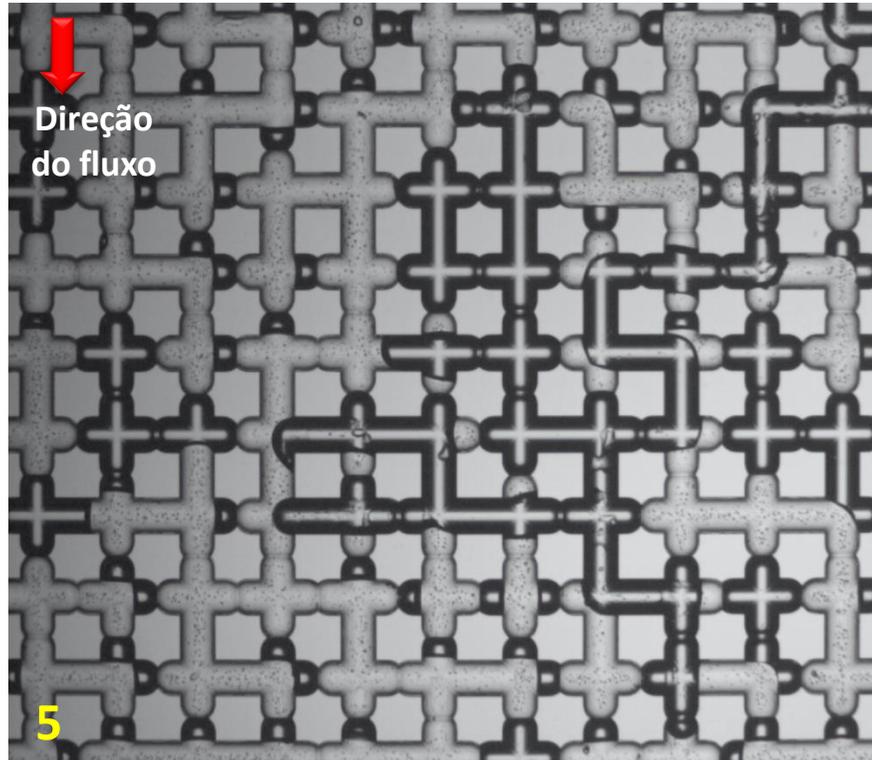


Figura 4. 8 Fotografias mostrando o processo de injeção de água e emulsão em uma seção do micromodelo. $C_a = 2 \times 10^{-5}$, $\sigma = 6.97 \text{ mN/m}$.

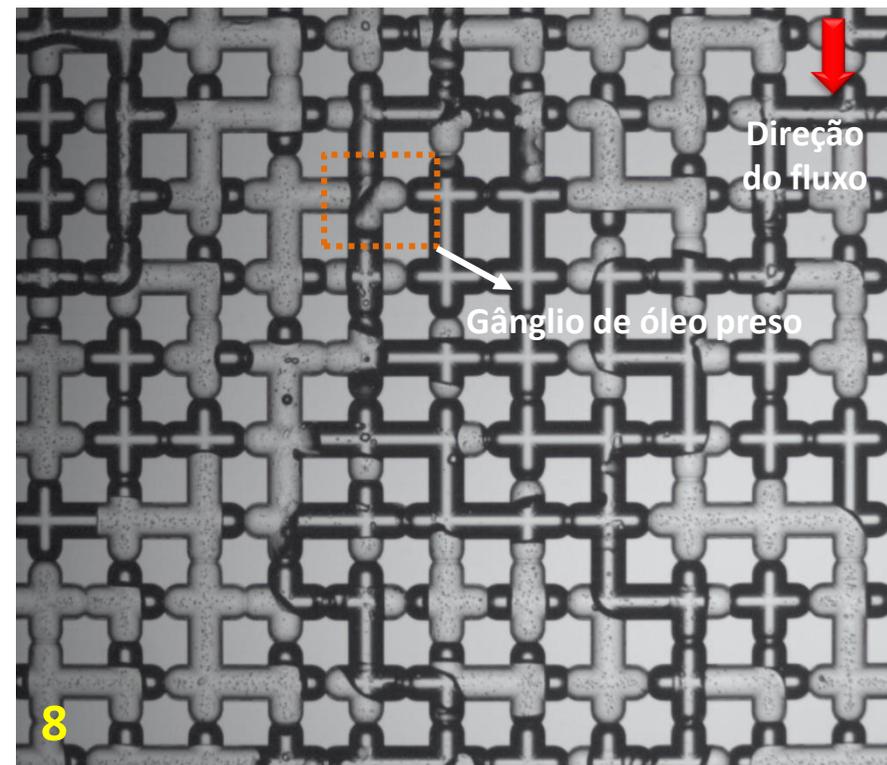
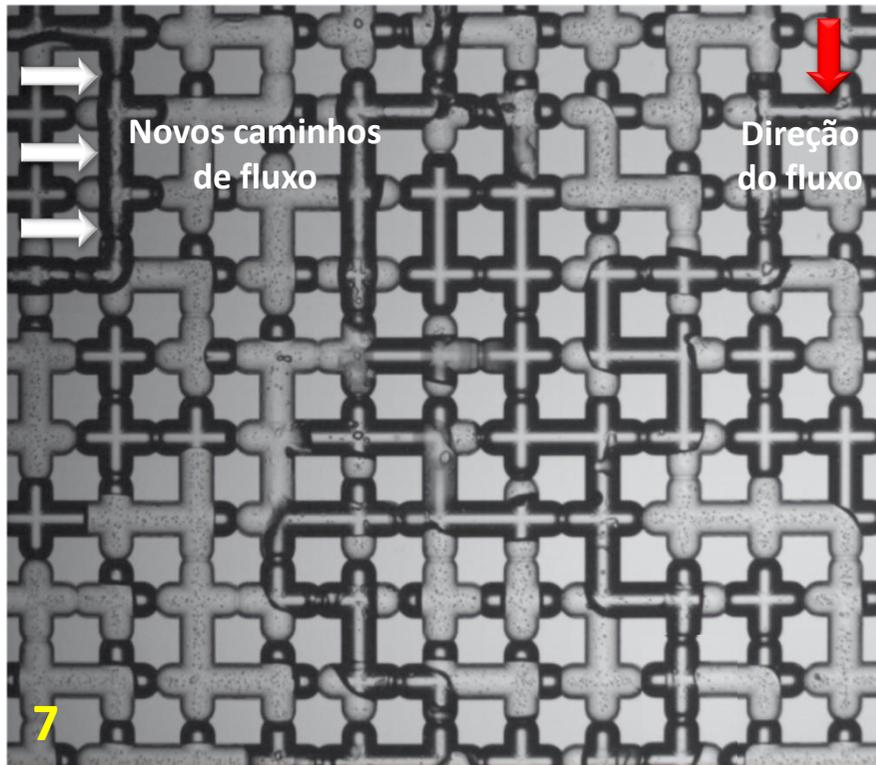


Figura 4. 9 Fotografias mostrando o processo de injeção de água e emulsão em uma seção do micromodelo. $C_a = 2 \times 10^{-5}$, $\sigma = 6.97 \text{ mN/m}$.

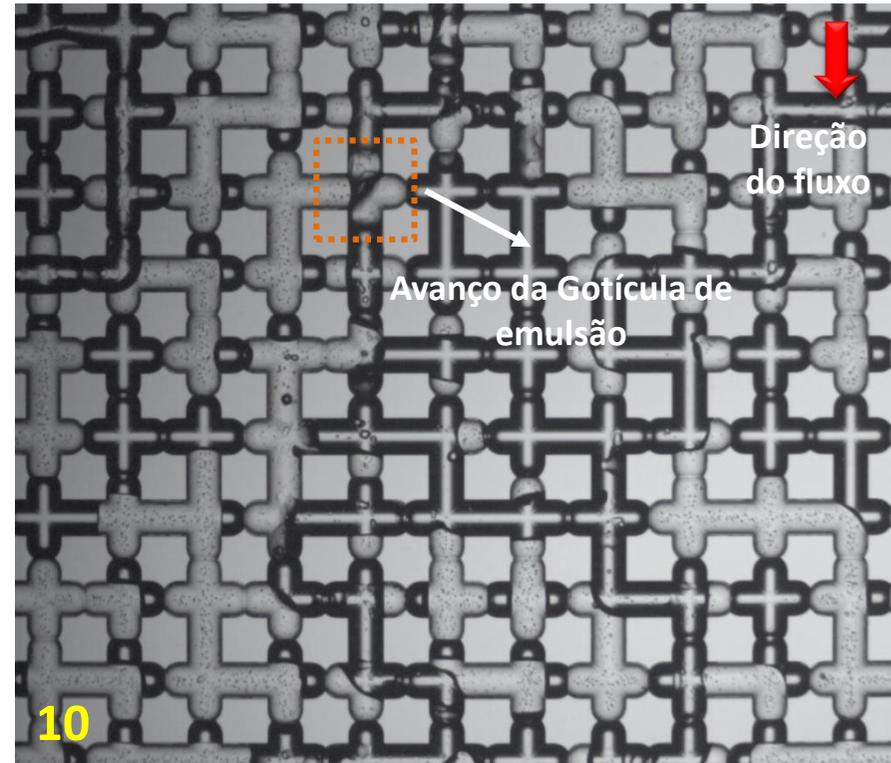
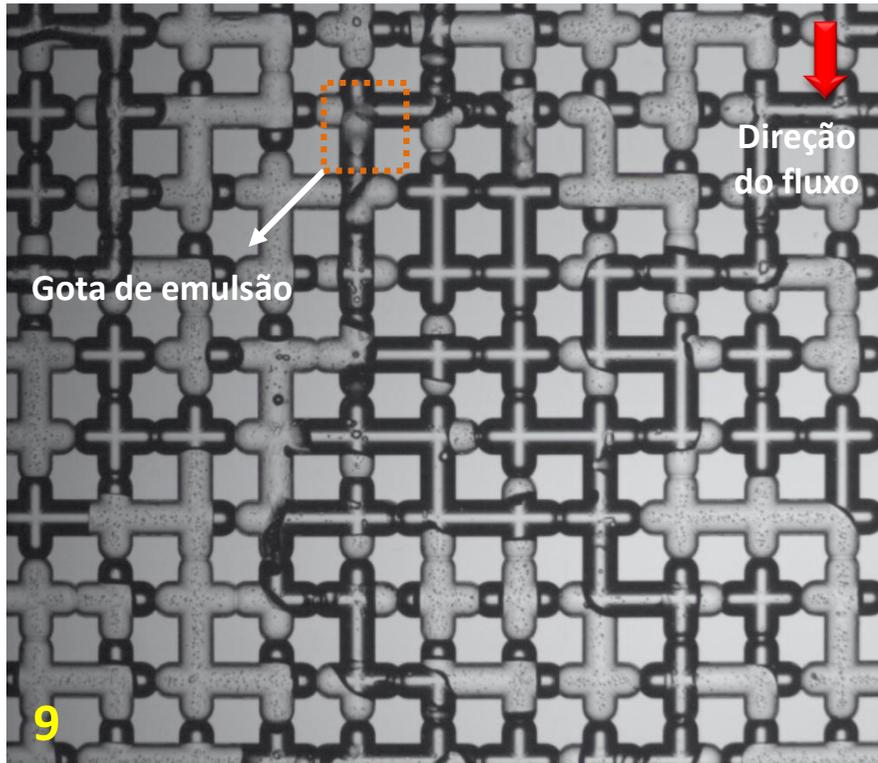


Figura 4. 10 Fotografias mostrando o processo de injeção de água e emulsão em uma seção do micromodelo. $C_a = 2 \times 10^{-5}$, $\sigma = 6.97 \text{ mN/m}$.

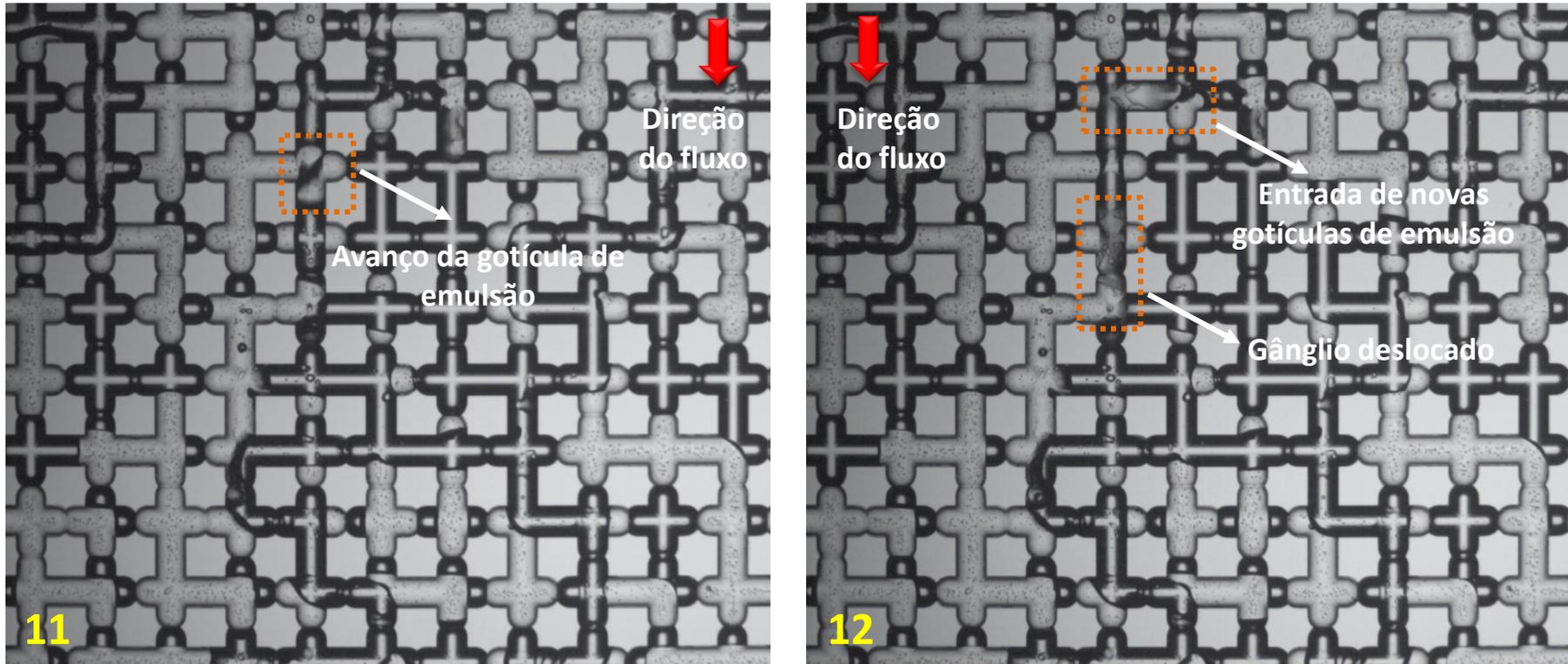


Figura 4. 11 Fotografias mostrando o processo de injeção de água e emulsão em uma seção do micromodelo. $C_a = 2 \times 10^{-5}$, $\sigma = 6.97 \text{ mN/m}$.

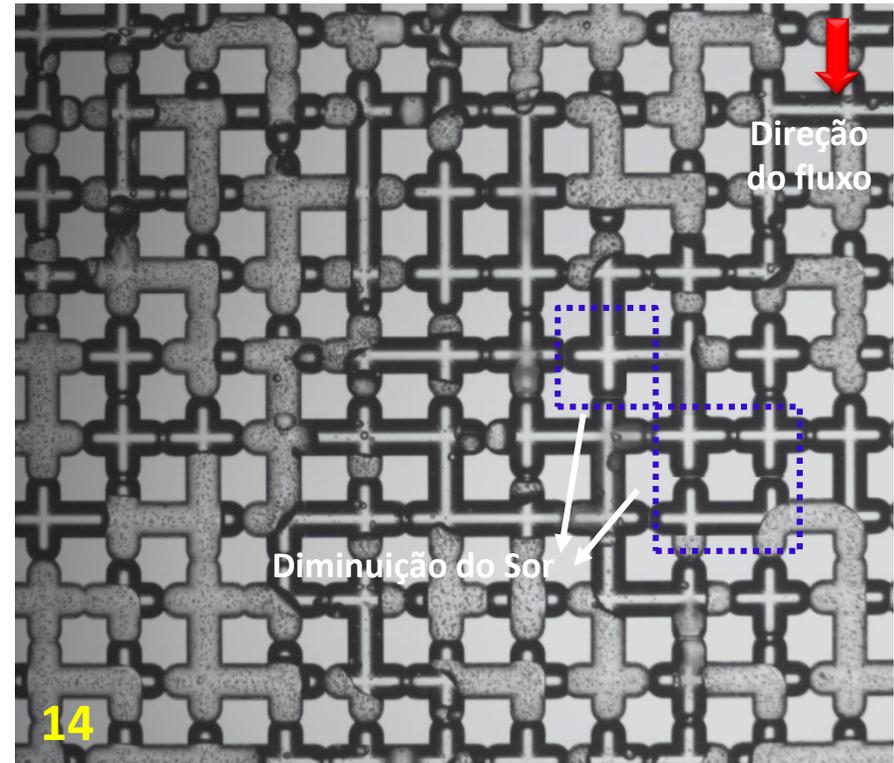
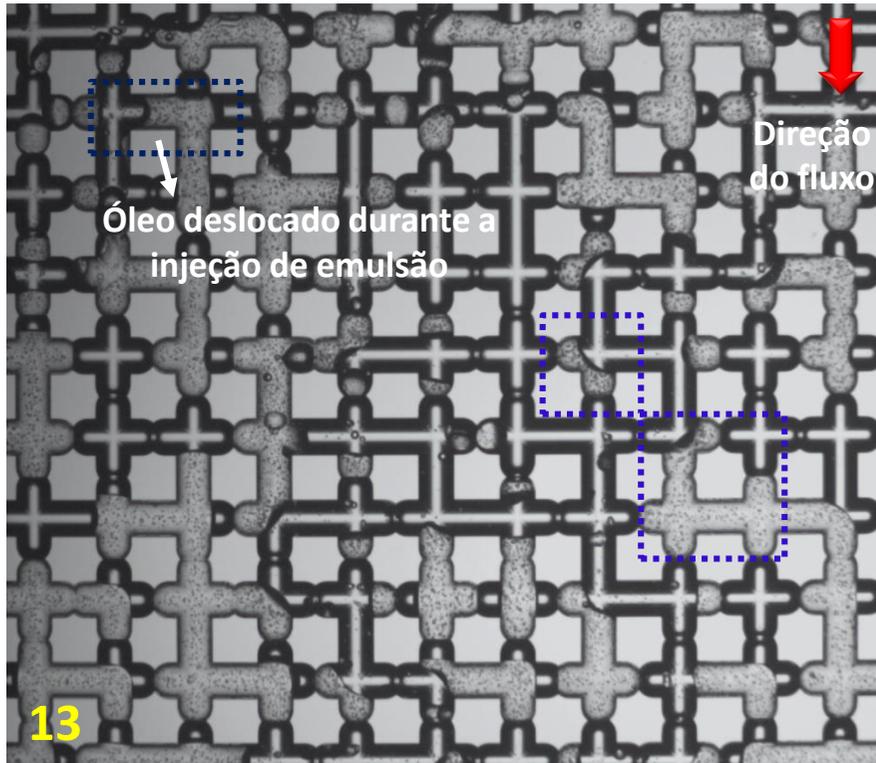


Figura 4. 12 Fotografias mostrando o processo de injeção de água e emulsão em uma seção do micromodelo. $C_a = 2 \times 10^{-5}$, $\sigma = 6.97 \text{ mN/m}$.

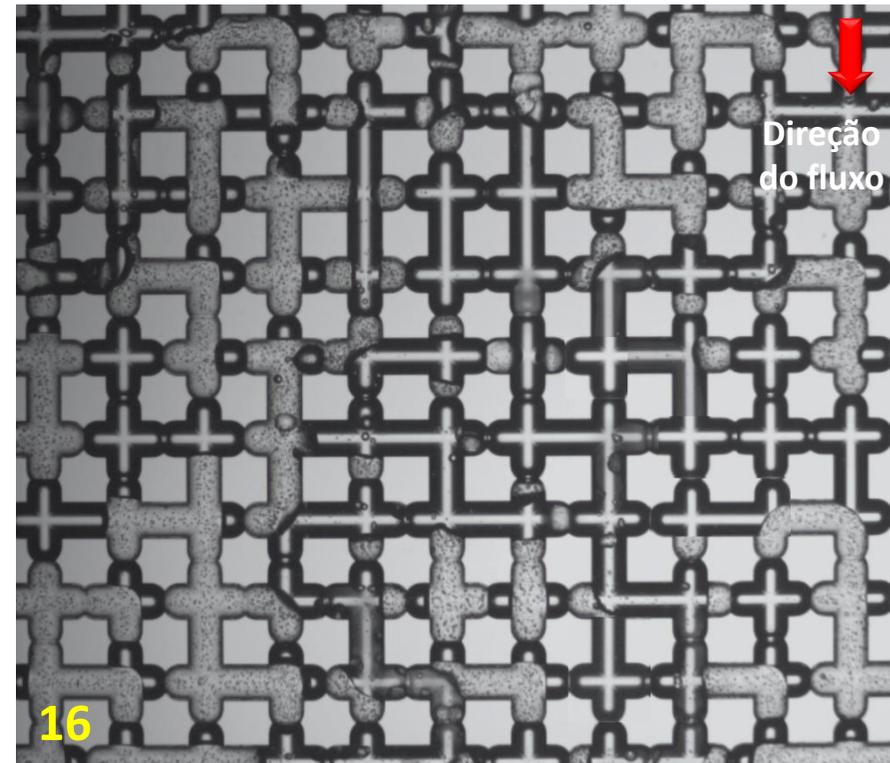
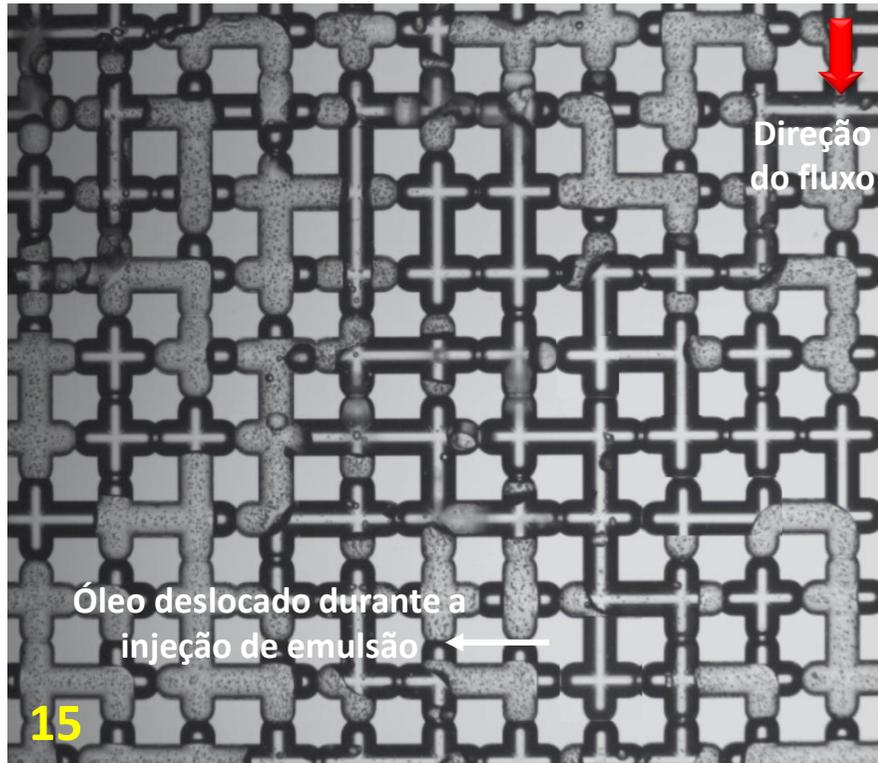


Figura 4. 13 Fotografias mostrando o processo de injeção de água e emulsão em uma seção do micromodelo. $C_a = 2 \times 10^{-5}$, $\sigma = 6.97 \text{ mN/m}$.

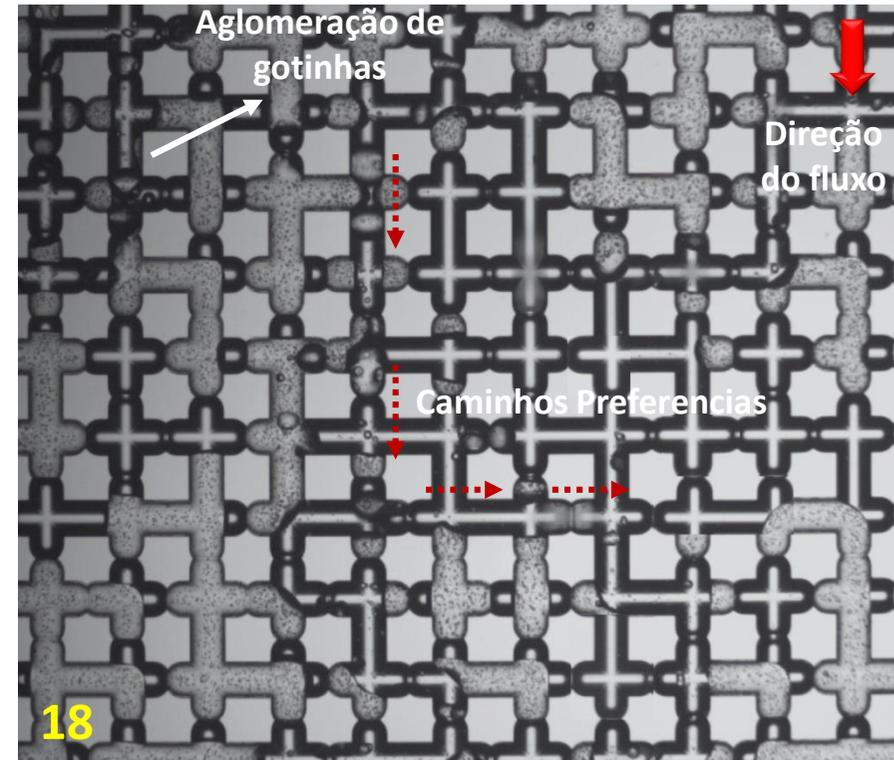
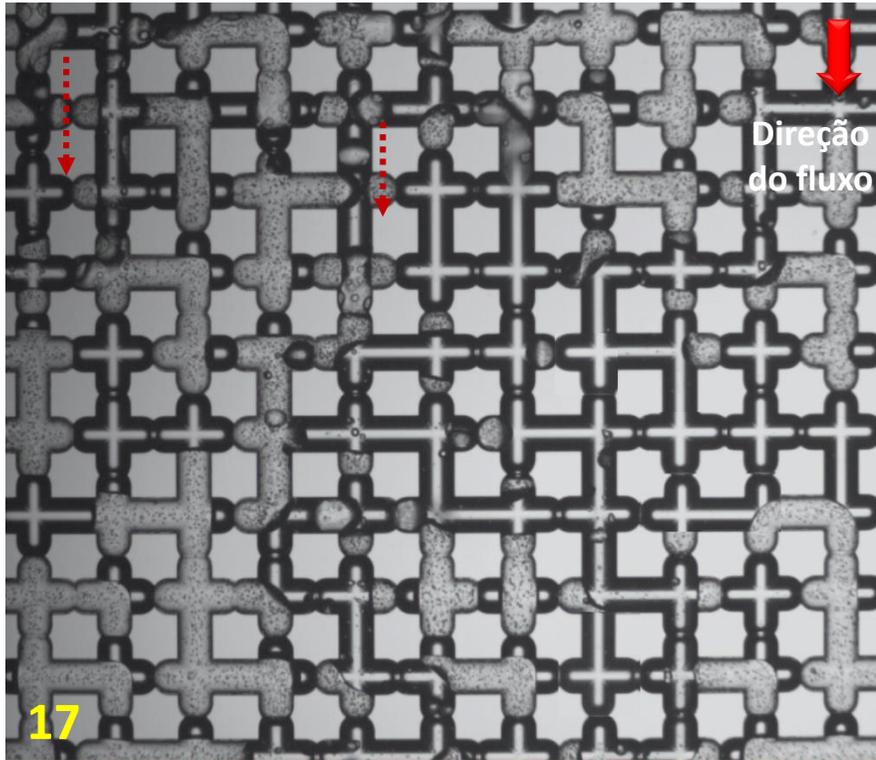


Figura 4. 14 Fotografias mostrando o processo de injeção de água e emulsão em uma seção do micromodelo. $C_a = 2 \times 10^{-5}$, $\sigma = 6.97 \text{ mN/m}$.

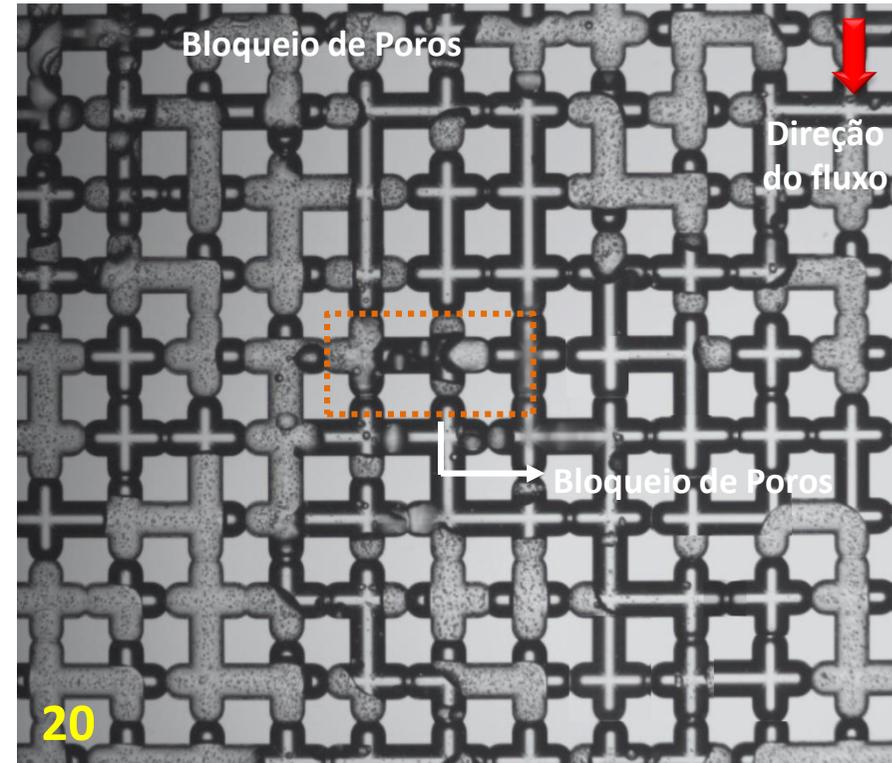
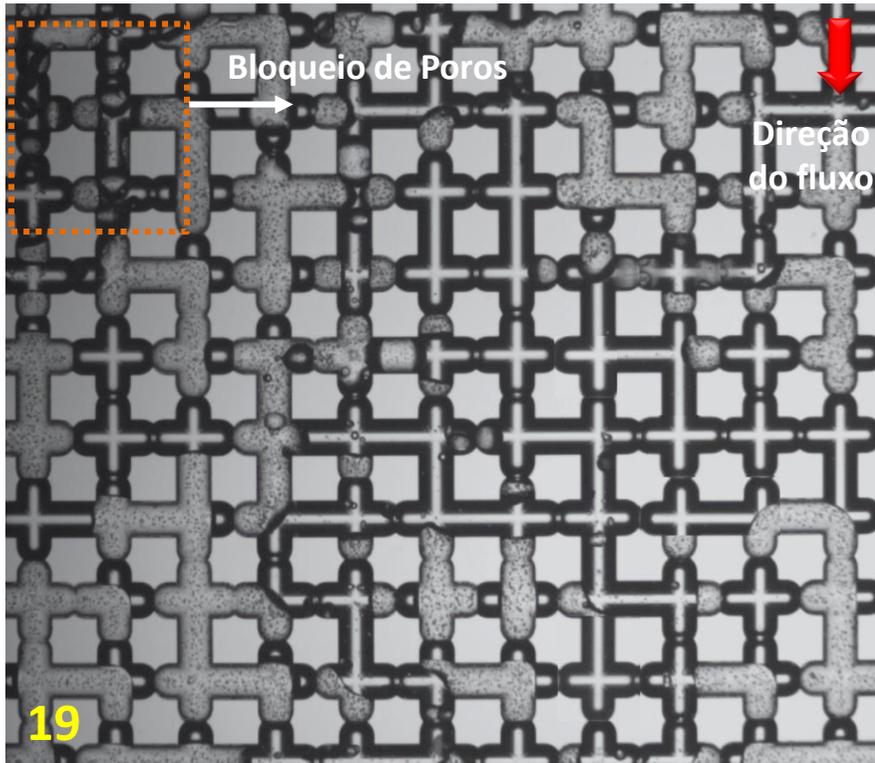


Figura 4. 15 Fotografias mostrando o processo de injeção de água e emulsão em uma seção do micromodelo. $C_a = 2 \times 10^{-5}$, $\sigma = 6.97 \text{ mN/m}$.

- **Foto # 17 até 18:** Neste instante, se observa a incorporação de novas gotas de emulsão em outras áreas do micromodelo, percorrendo outros caminhos preferenciais até se juntar ou se-aglomerar em alguns poros e gargantas de poro.
- **Foto # 19 até 20:** Finalizando a injeção se observa como gotas da fase dispersa da emulsão são retidas bloqueando poros e gargantas de poro dos canais varridos pela água injetada, restringindo o fluxo nessas regiões. Conseqüentemente, e considerando em uma possível injeção alternada de água e emulsão, este bloqueio parcial pode promover o desvio do fluxo para outras regiões fazendo com que a água posteriormente injetada desloque o óleo presente nestas regiões (inicialmente não atingidas) aumentando assim a eficiência de recuperação através da mudança na mobilidade dos fluidos injetados.

Este primeiro experimento de visualização mostrou de forma clara uma forte influência da injeção de emulsões na redução de óleo residual do meio poroso. Por consequência, os seguintes experimentos tiveram como objetivo continuar avaliando o efeito no processo de deslocamento de óleo por injeção de emulsões.

4.2.2

Efeito do número de capilaridade no processo de deslocamento de óleo por injeção de emulsões no meio poroso

Esta seção apresenta o resultado de cinco experimentos, que mostram como o número de capilaridade influencia no processo de recuperação de óleo mediante a injeção de água e emulsão através do micromodelo. Os testes foram feitos com diferentes vazões, de maneira a obter uma faixa de números de capilaridade, (equação 2.8). O número de capilaridade é proporcional à vazão volumétrica, assim; as vazões variaram de 0.4 ml/h a 2.0 ml/h, compreendendo números de capilaridade que variavam de 2×10^{-5} a 1×10^{-4} , garantindo um regime predominante capilar.

Os testes de deslocamento iniciaram-se injetando fase contínua (*solução água-surfactante*) para deslocar o óleo do micromodelo até atingir a sua saturação de óleo residual. O óleo produzido nesta etapa era definido 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. Em seguida, injetava-se um banco de emulsão correspondente a 1 VP, assim cada experimento durava desde poucos segundos a alguns minutos, de acordo com a vazão utilizada.

Antes da realização dos testes e com a finalidade de quantificar o nível de confiança nos resultados do processamento de imagens, realizou-se uma análise das imagens a oito regiões do micromodelo, selecionadas aleatoriamente. Para isto, foi realizado um experimento a uma vazão de 1.0 ml/h , que corresponde a um número de capilaridade igual a $C_a = \mu v / \sigma = 4.8 \times 10^{-5}$, onde a partir dos dados de saturação obtidos em cada região, conseguiu-se determinar a saturação residual de óleo local. A Figura 4.16 exhibe esquematicamente as regiões selecionadas para sua posterior análise.

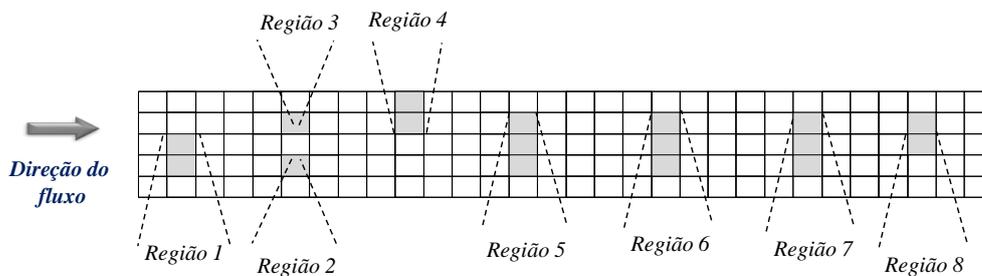


Figura 4. 16 Regiões do micromodelo selecionadas para sua posterior análise de incertezas.

A Tabela 4.3 contém os resultados das frações de recuperação de óleo e saturações de cada região e na Tabela 4.4 são detalhados os erros e o desvio padrão da saturação de óleo remanente após o processo de injeção de emulsão.

Tabela 4. 3 Saturações e fatores de recuperações obtidos para o cálculo das incertezas nos experimentos.

Resultados (%)	R1	R2	R3	R 4	R5	R6	R7	R8
S_{oi}	79,25	83,63	81,38	70,36	81,60	86,58	79,83	87,04
S_{or}	23,68	24,62	39,08	32,27	22,57	26,21	12,91	16,72
$F_{RÁGUA}$	70,12	70,56	51,98	54,14	72,34	69,72	83,82	80,80
S_{OR}	20,23	21,32	31,22	25,84	17,49	21,75	11,54	10,79
$F_{rIncremental}$	4,36	3,95	9,65	9,14	6,22	5,15	1,72	6,80

Onde:

- S_{oi} = Saturação de óleo inicial no experimento de deslocamento.
- S_{or} = Saturação de óleo residual após a injeção de água
- F_{RAGUA} = Fator de recuperação de óleo do experimento de inj. de água.
- S_{oR} = Saturação de óleo remanente após a injeção de emulsão.
- F_{RINCRE} = Fator de recuperação incremental após a injeção de emulsão.

Tabela 4. 4 Variação das saturações em diferentes regiões do micromodelo.

Regiões	S_{oR} (%)	Erro (%)	Erro ² (%)	Desvio Padrão (%)
R1	20,23	0,20	0,04	
R2	21,32	1,30	1,69	
R3	31,22	11,19	125,35	
R4	25,84	5,81	33,82	
R5	17,49	2,53	6,40	6,39
R6	21,75	1,73	2,98	
R7	11,54	8,48	71,99	
R8	10,79	9,22	85,16	

Por outro lado, da informação de fatores de recuperação incrementais devido à injeção de um volume poroso de emulsão, observou-se como em uma delas regiões, especificamente na região três, foi obtida uma recuperação incremental equivalente a 9.65% como efeito da injeção do banco de emulsão. A Figura 4.17 e 4.18 apresenta esta região à saturação irreduzível de água e ao final do experimento de injeção de água respectivamente. A Figura 4.19 ilustra como após a injeção de um volume poroso de emulsão, ocorre uma redução da fração de óleo residual além de um bloqueio em algumas zonas pela captura de gotas nas gargantas de poro do meio poroso. Este mecanismo com uma subsequente injeção de água ocasiona redução da mobilidade da água nessas zonas afetadas pela emulsão abrindo novos caminhos para serem varridos pela água injetada.

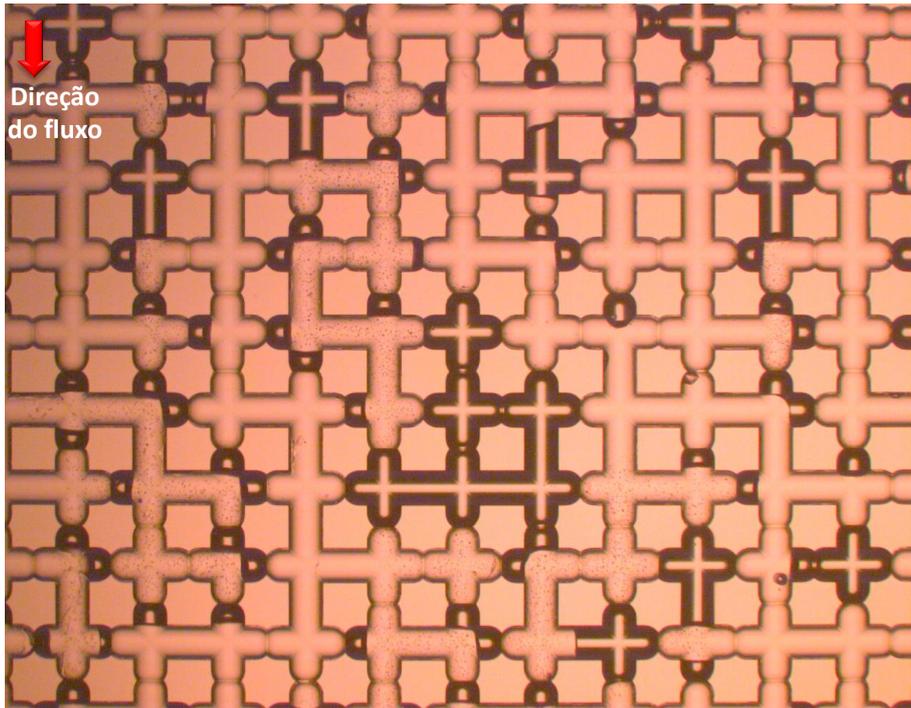


Figura 4. 17 Região três saturada com óleo à saturação irreductível de água

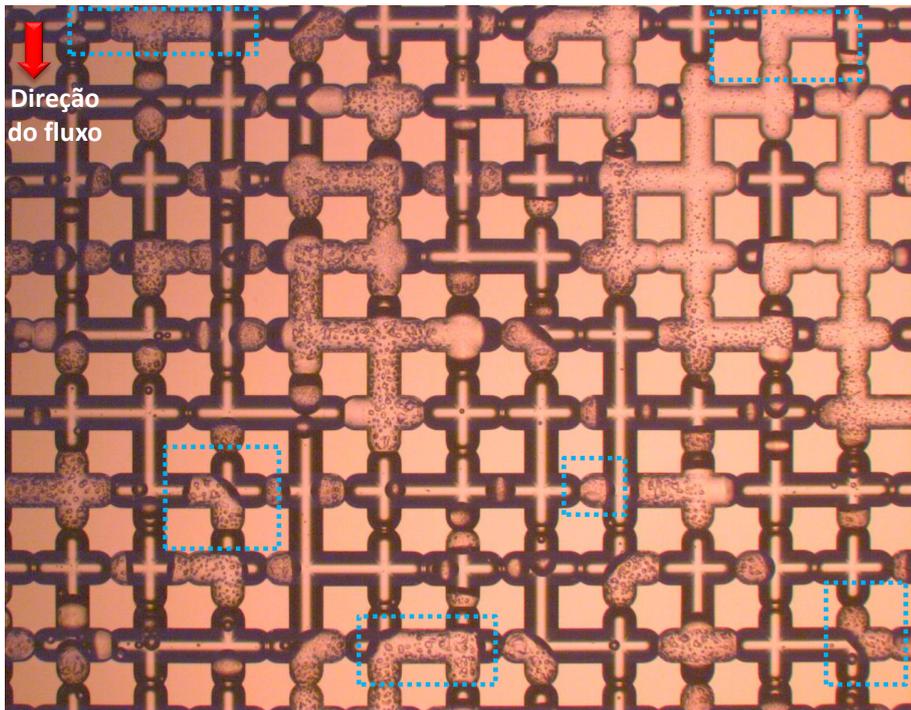


Figura 4. 18 Região três ao final do experimento de injeção de água.

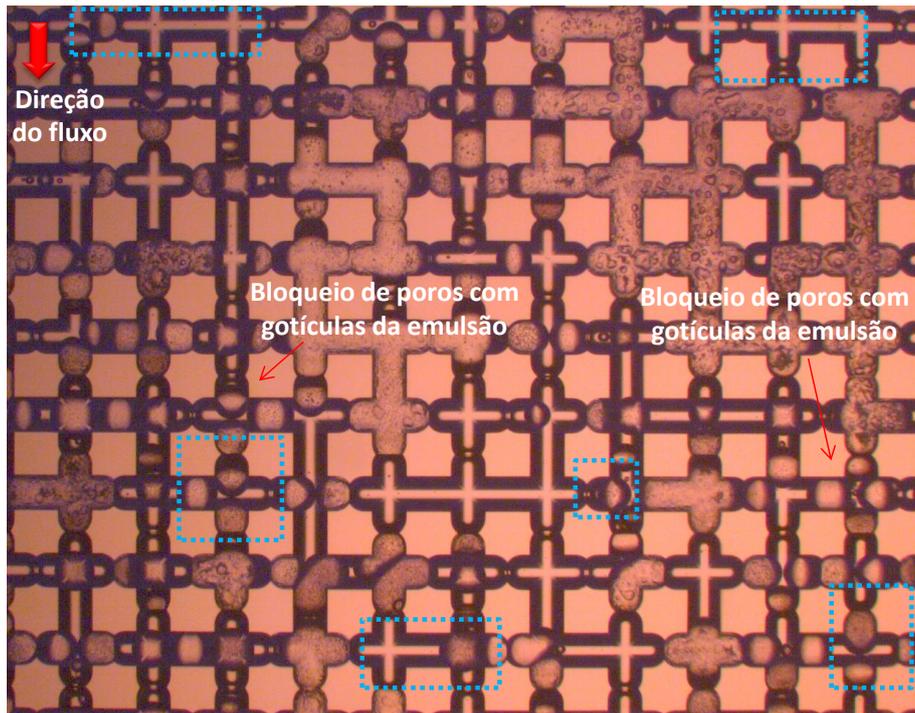


Figura 4. 19 Região três ao final do experimento de injeção de um banco de emulsão.

Para dar continuação com o experimento, trabalhou-se com cinco números de capilaridade: 2×10^{-5} , 4×10^{-5} , 5×10^{-5} , 7×10^{-5} e 1×10^{-4} e conforme o experimento anterior foram selecionadas três áreas do meio poroso para visualizar e quantificar o efeito (na medida em que foi realizado cada experimento) tanto no óleo residual remanente quanto no fator de recuperação final.

A seleção das regiões foi aleatória também, o objetivo foi visualizar o que estava ocorrendo a nível de poro em diferentes regiões do micromodelo (contemplando regiões da entrada, centro e saída do meio poroso). Uma representação esquemática das zonas avaliadas estão apresentadas pela cor vermelha na Figura 4.20.

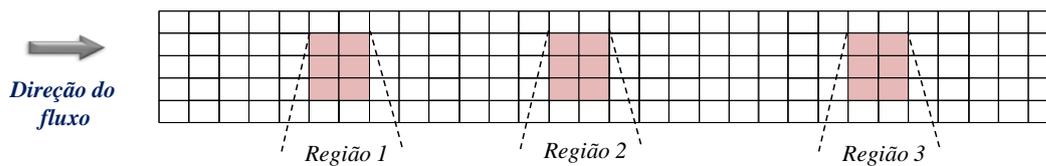


Figura 4. 20 Regiões do micromodelo selecionadas para sua posterior análise e visualização.

As Figuras 4.21 e 4.22 apresentam a comparação dos resultados obtidos em função do número de capilaridade para o fator de recuperação e para a saturação de óleo residual, respectivamente, das três regiões estudadas. Nestes gráficos e em relação com a injeção de água (curvas apresentadas em azul) observa-se claramente o que já foi mencionado na literatura por diferentes autores, foi encontrado que a recuperação do óleo nos experimentos de injeção de água, aumenta à medida que aumenta a vazão e com esta a pressão de injeção, até um limite máximo a partir do qual começa a diminuir ou se estagnar.

Os testes levados a baixas vazões aumentam gradativamente o fator de recuperação, enquanto que o teste com um número de capilaridade correspondente a $C_a = 1 \times 10^{-4}$, na região três especificamente, levou a um patamar na recuperação de aproximadamente 76.04% a 76.83% (tendência similar observada nas frações de óleo residual, Figura 4.22 região3). É por esta tendência que em processos de deslocamento de óleo por injeção de água existe uma vazão ótima de injeção para se obter boas recuperações.

Os resultados da injeção de emulsão revelam que o óleo retido nos poros das zonas invadidas pela fase continua injetada e posteriormente pelo banco de emulsão é consequência direta das forças capilares. Os experimentos desenvolvidos ao maior número de capilaridade $C_a = 1 \times 10^{-4}$ foram os que apresentaram menores eficiências de recuperação, isto é; menores efeitos na mobilização do óleo residual do meio poroso e, por conseguinte baixos valores de recuperação incremental. Por exemplo, no caso da região 2, o incremental devido ao processo de emulsão, para o número de capilaridade $C_a = 2 \times 10^{-5}$ foi de 6.06%, já para o maior número de capilaridade foi cinco vezes menor, ou seja 1.06%. Um comportamento similar na região três foi obtido. Assim que para o caso estudado, considera-se como número de capilaridade crítico $C_a = 7 \times 10^{-5}$, acima do qual não ocorre efeito importante na eficiência de deslocamento por injeção de emulsão.

Isto é, os resultados da Figura 4.21 e 4.22 quando comparadas com a visualização experimental nas diferentes regiões, Figura 4.23 e 4.24 permitem observar que para baixas vazões a intensidade do efeito de bloqueio é maior nos poros e gargantas mais permeáveis. A vazões altas, não ocorre um bloqueio considerável, conforme pode ser visto nas Figuras 4.25 e 4.26.

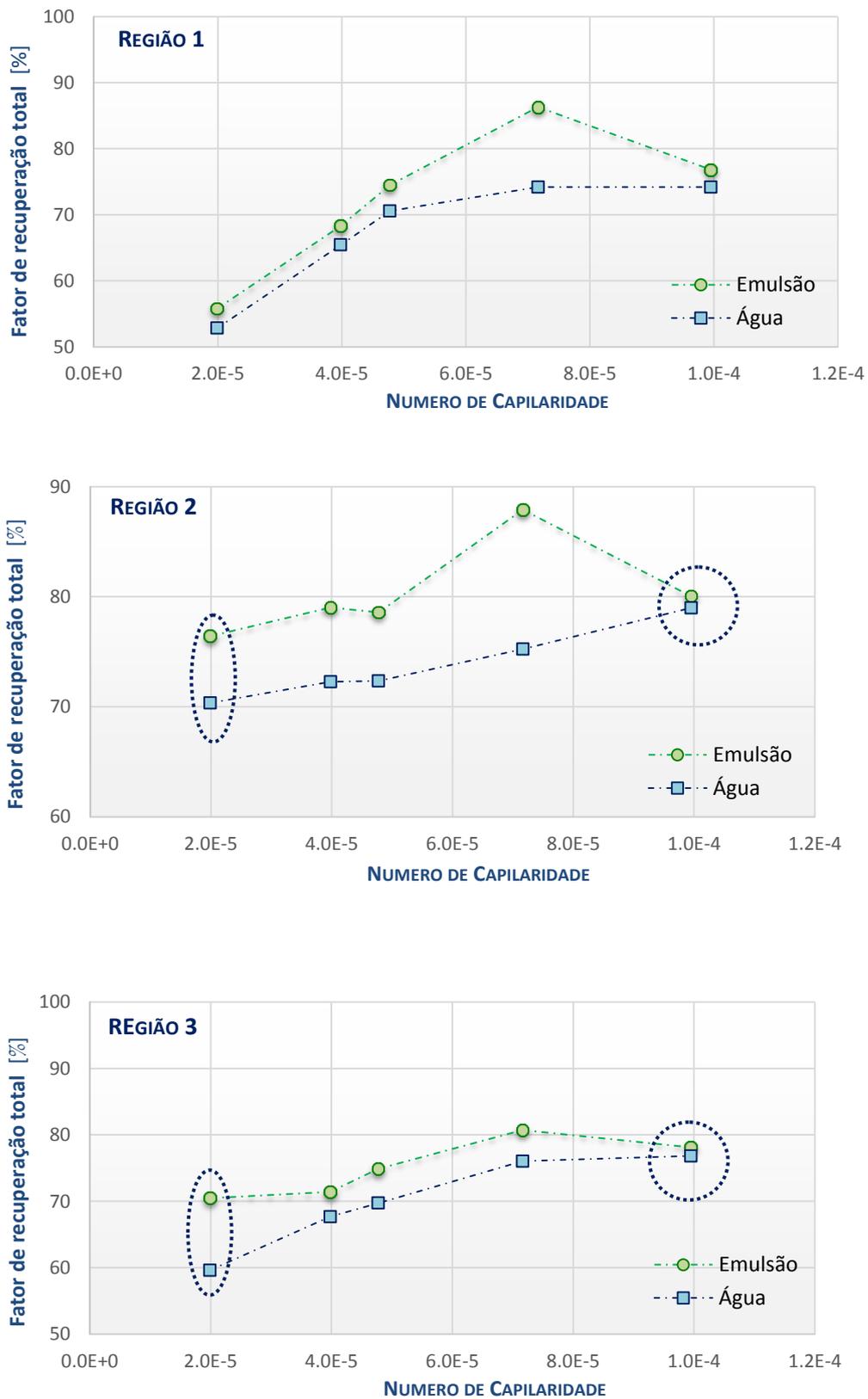


Figura 4. 21 Comportamento do fator de recuperação de óleo mediante injeção de água e emulsão.

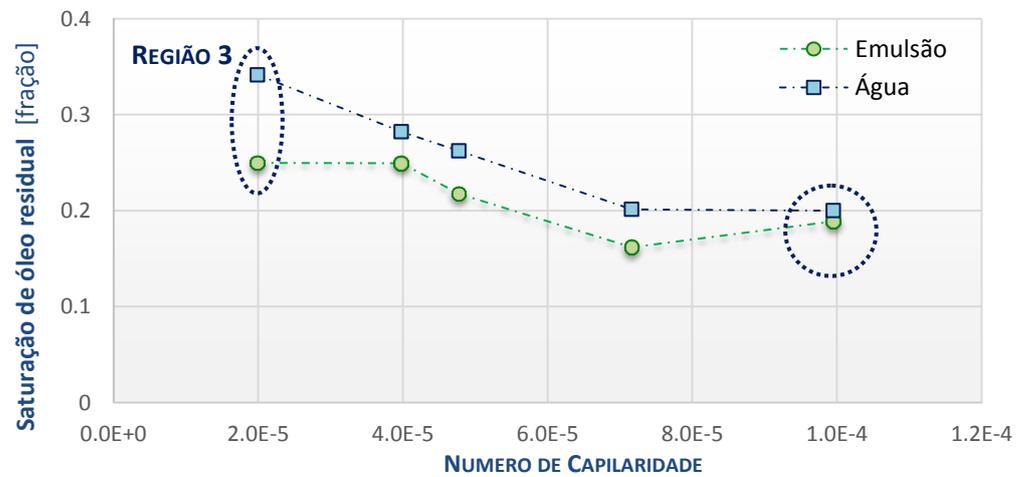
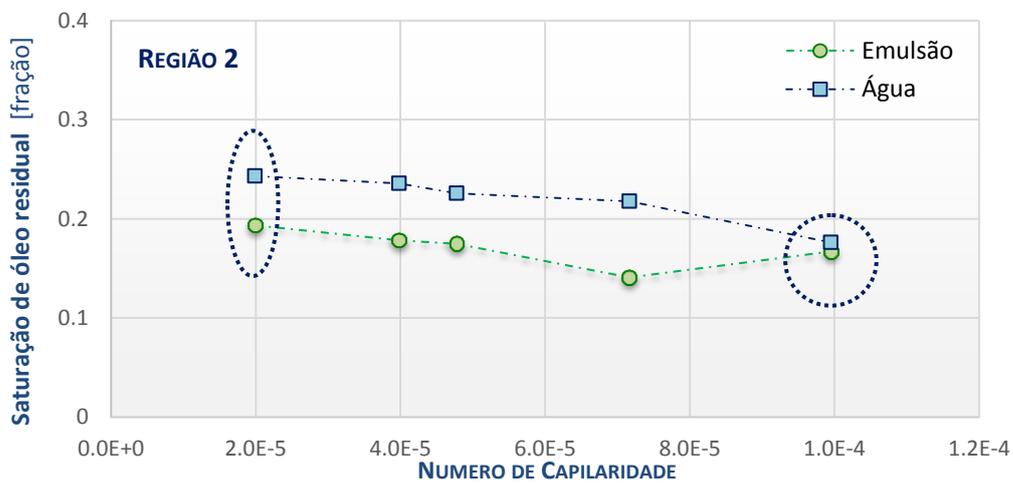
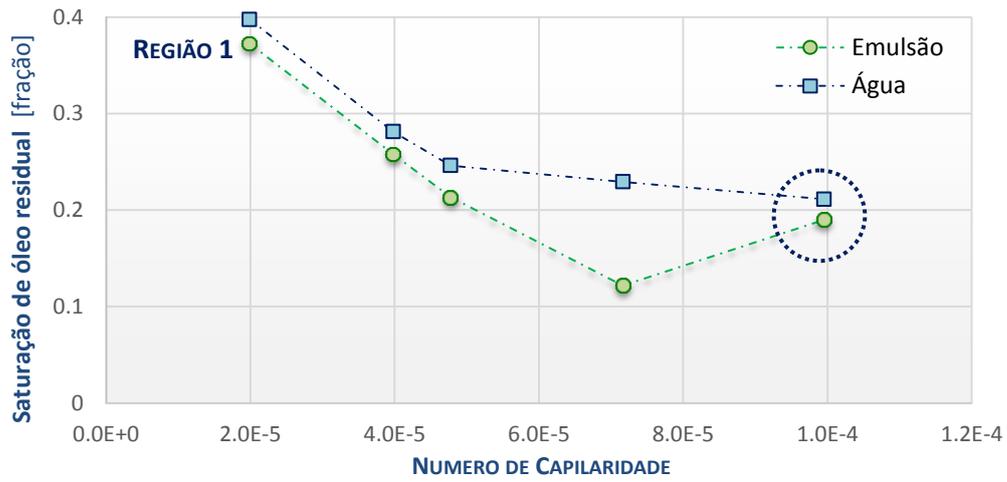


Figura 4. 22 Comportamento da saturação de óleo residual mediante injeção de água e emulsão.

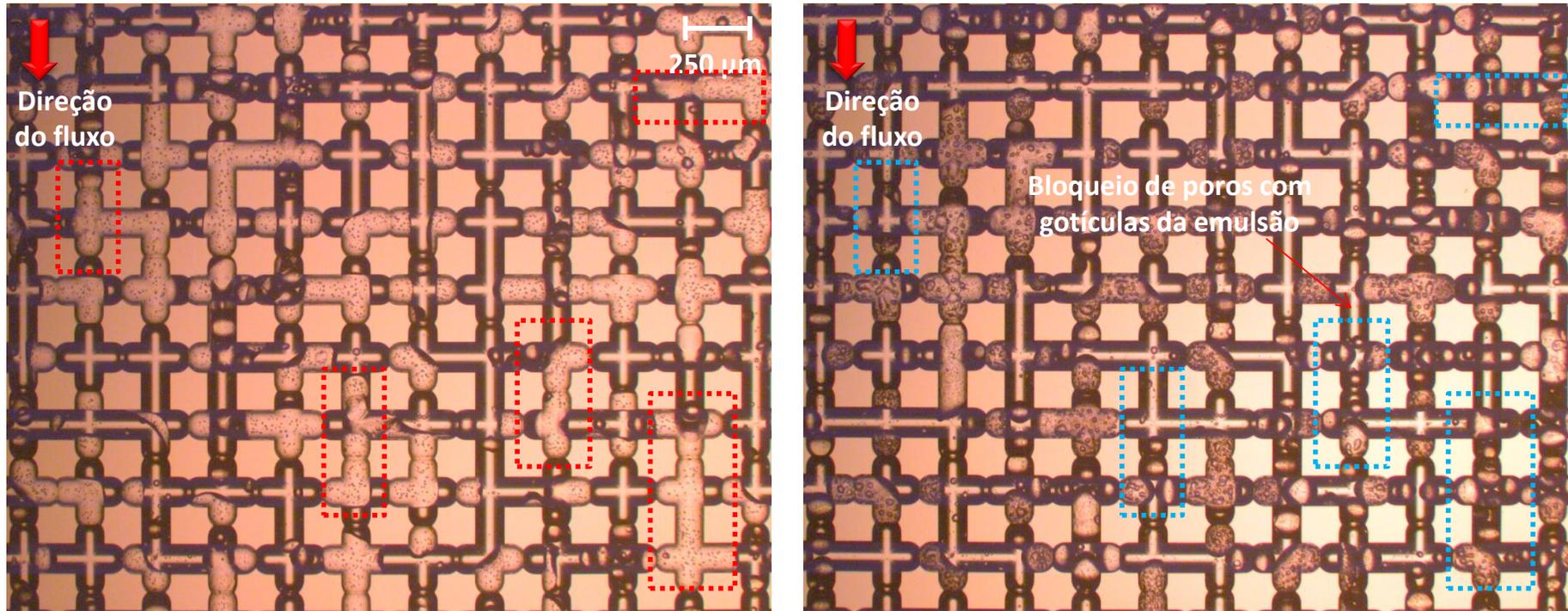


Figura 4. 23 Fotografias mostrando o processo de injeção de água (esquerda) e emulsão (direita). *Região 2.* $C_a = 2 \times 10^{-5}$, $\sigma = 6.97 \text{ mN/m}$.

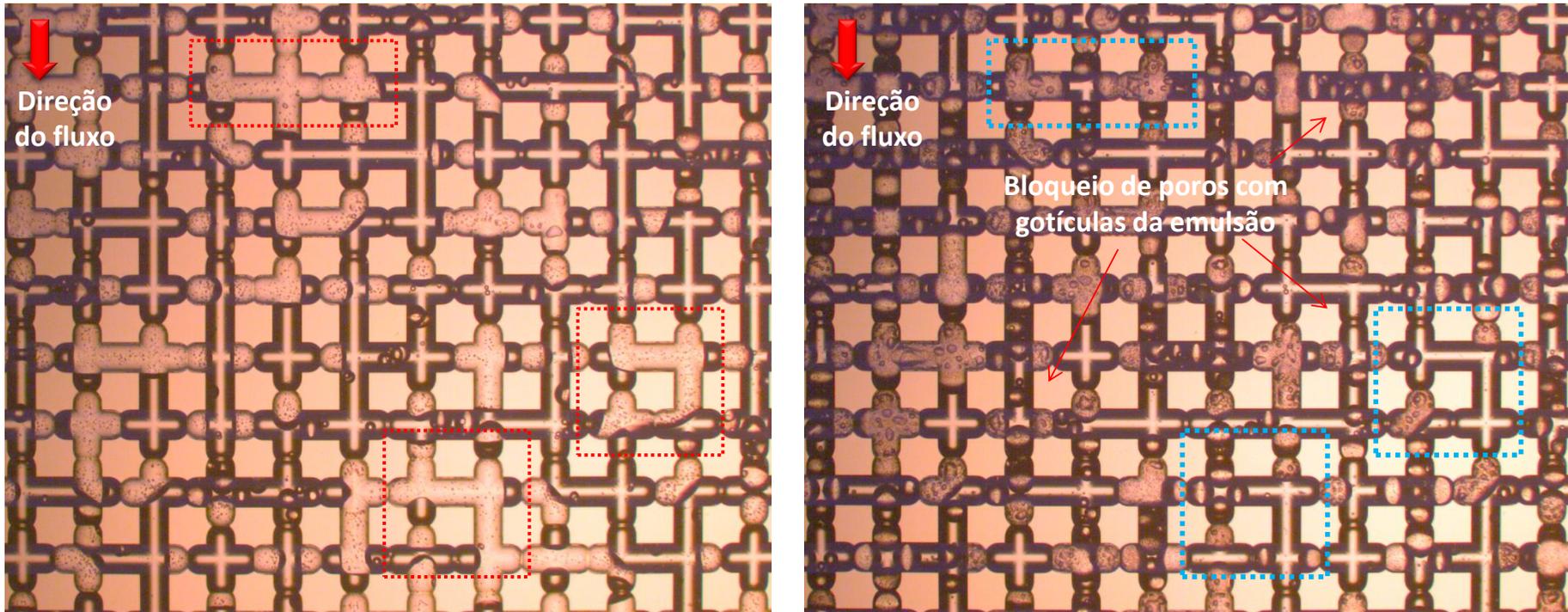


Figura 4. 24 Fotografias mostrando o processo de injeção de água (esquerda) e emulsão (direita). Região 3. $C_a = 2 \times 10^{-5}$, $\sigma = 6.97 \text{ mN/m}$.

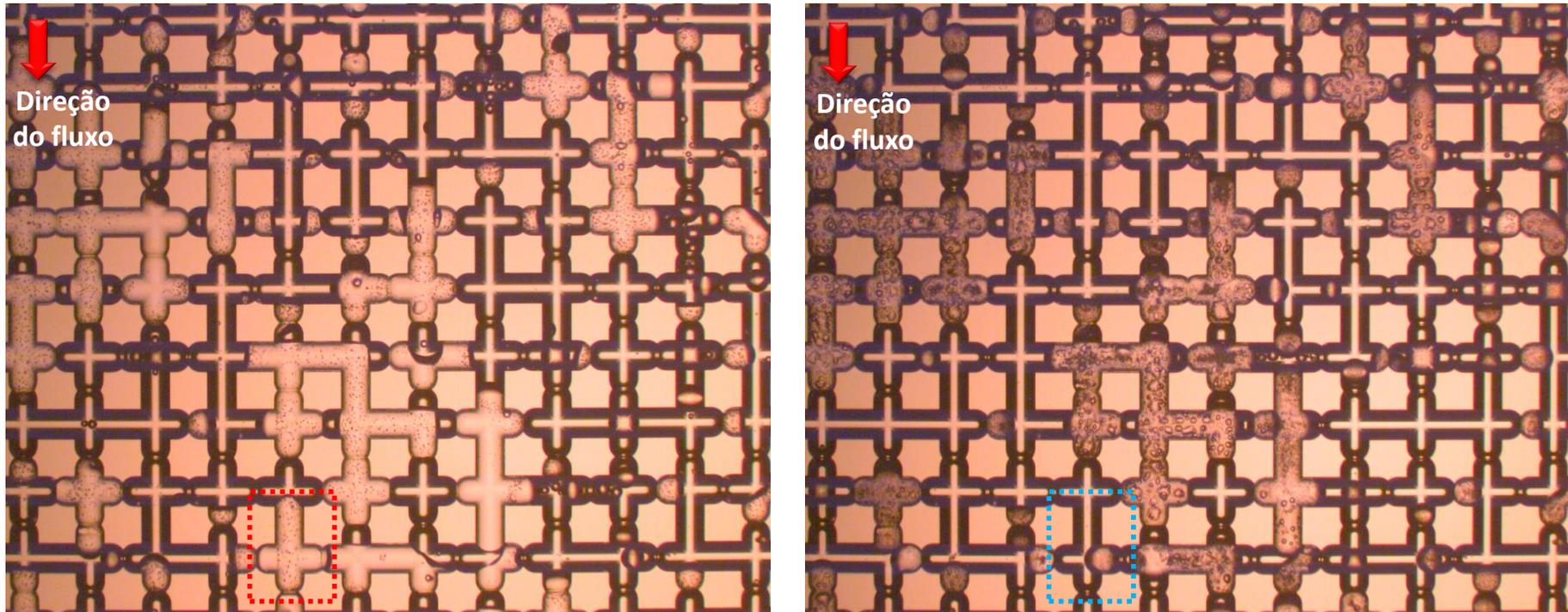


Figura 4. 25 Fotografias mostrando o processo de injeção de água (esquerda) e emulsão (direita). Região 2. $C_a = 1 \times 10^{-4}$, $\sigma = 6.97 \text{ mN/m}$.

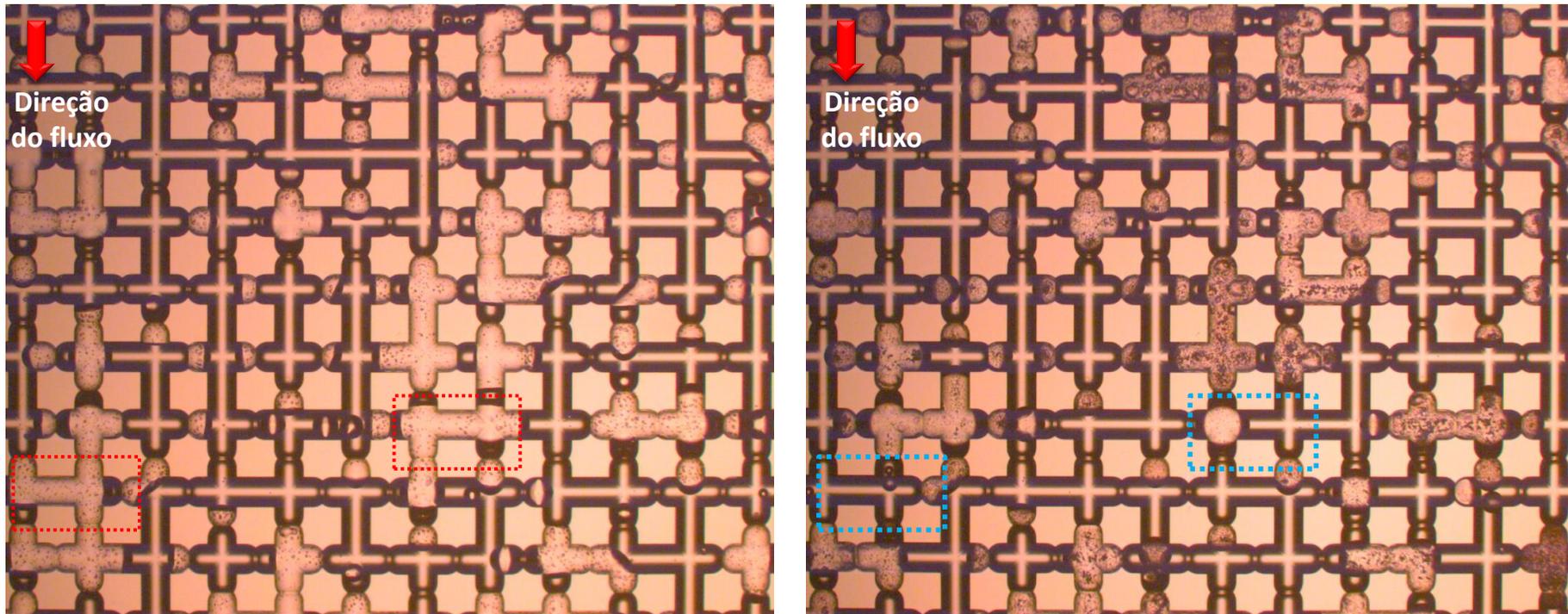


Figura 4. 26 Fotografias mostrando o processo de injeção de água (esquerda) e emulsão (direita). *Região 3. $C_a = 1 \times 10^{-4}$, $\sigma = 6.97 \text{ mN/m}$.*

Ao realizar uma média ponderada das três regiões estudadas, Figura 4.27, observa-se que apesar de algumas flutuações há um comportamento comum para todo o micromodelo, assim; a justificativa, mas plausível a este fenômeno é que em escoamentos com altos números de capilaridade as forças capilares se tornam menos importantes quando comparadas com as forças viscosas. Isto é, a altas velocidades, a queda de pressão devido aos efeitos viscosos é mais alta, e o bloqueio devido a pressão capilar necessária para deformar a gota torna-se menos intenso. Caso contrário em experimentos desenvolvidos a baixos números de capilaridade, onde existe uma maior resistência ao esforço de deformação das gotas da emulsão ao passar através das constrições resultando em uma maior acumulação / deposição de gotinhas da emulsão nos poros e gargantas de poro do meio poroso.

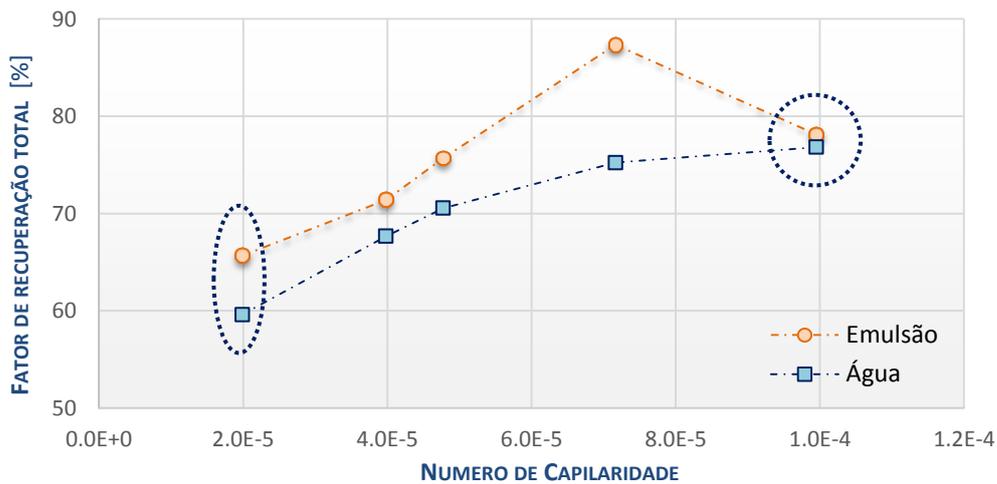


Figura 4. 27 Comportamento do fator de recuperação de óleo mediante injeção de água e emulsão para as três regiões estudadas.

Dois experimentos adicionais foram desenvolvidos a números de capilaridade, $C_a = \mu v / \sigma = 1 \times 10^{-5}$ e $C_a = \mu v / \sigma = 1 \times 10^{-4}$, com o mesmo procedimento dos experimentos anteriores, consistindo na injeção de um VP de emulsão e avaliando os instantes mais representativos do processo, que são apresentados da Figura 4.28 até Figura 4.32 e descritos a seguir.

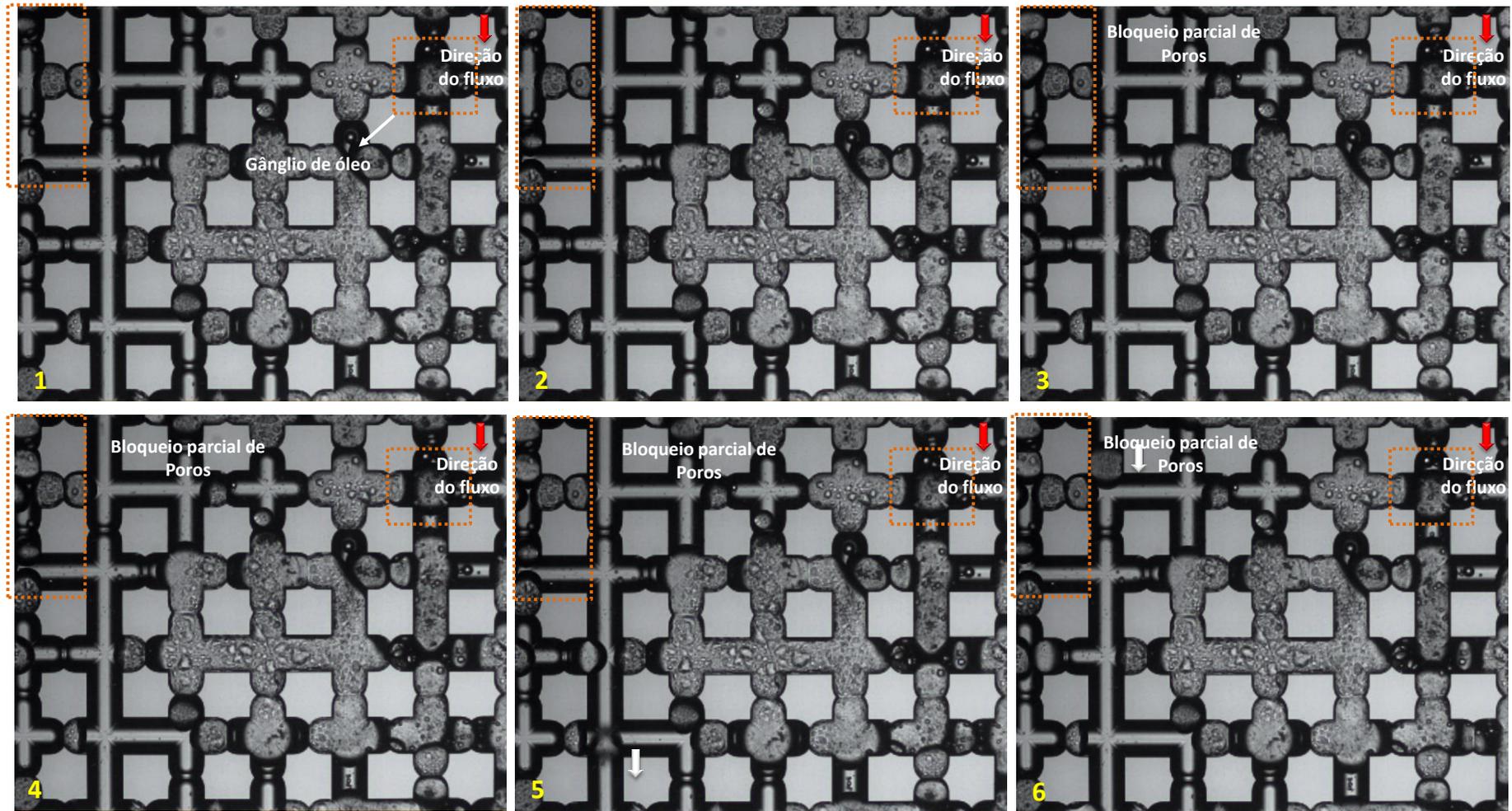


Figura 4. 28 Fotografias mostrando o processo de injeção de um VP de emulsão. $C_a = 1 \times 10^{-5}$, $\sigma = 6.97 \text{ mN/m}$.

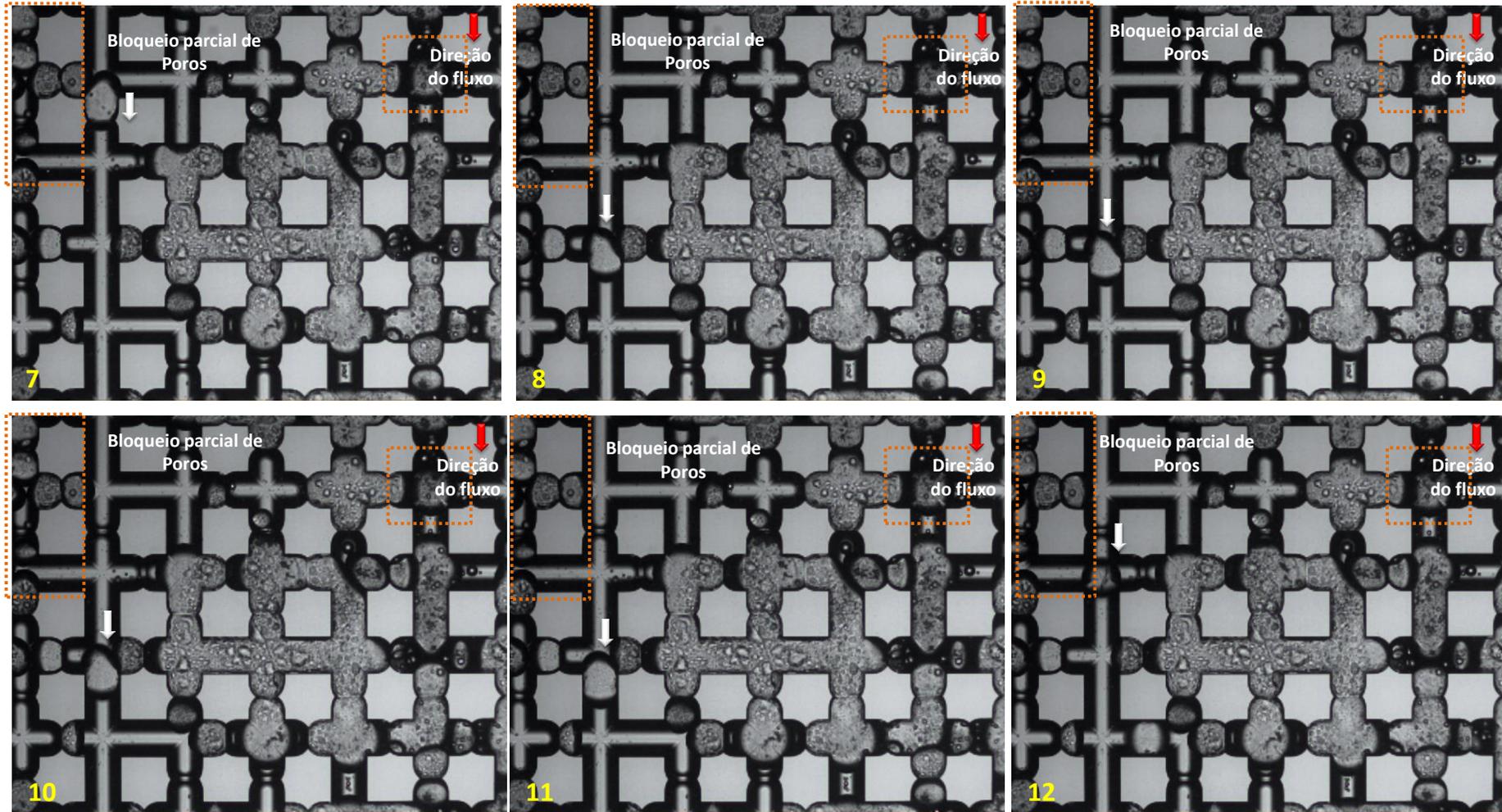


Figura 4. 29 Fotografias mostrando o processo de injeção de um VP de emulsão. $C_a = 1 \times 10^{-5}$, $\sigma = 6.97 \text{ mN/m}$.

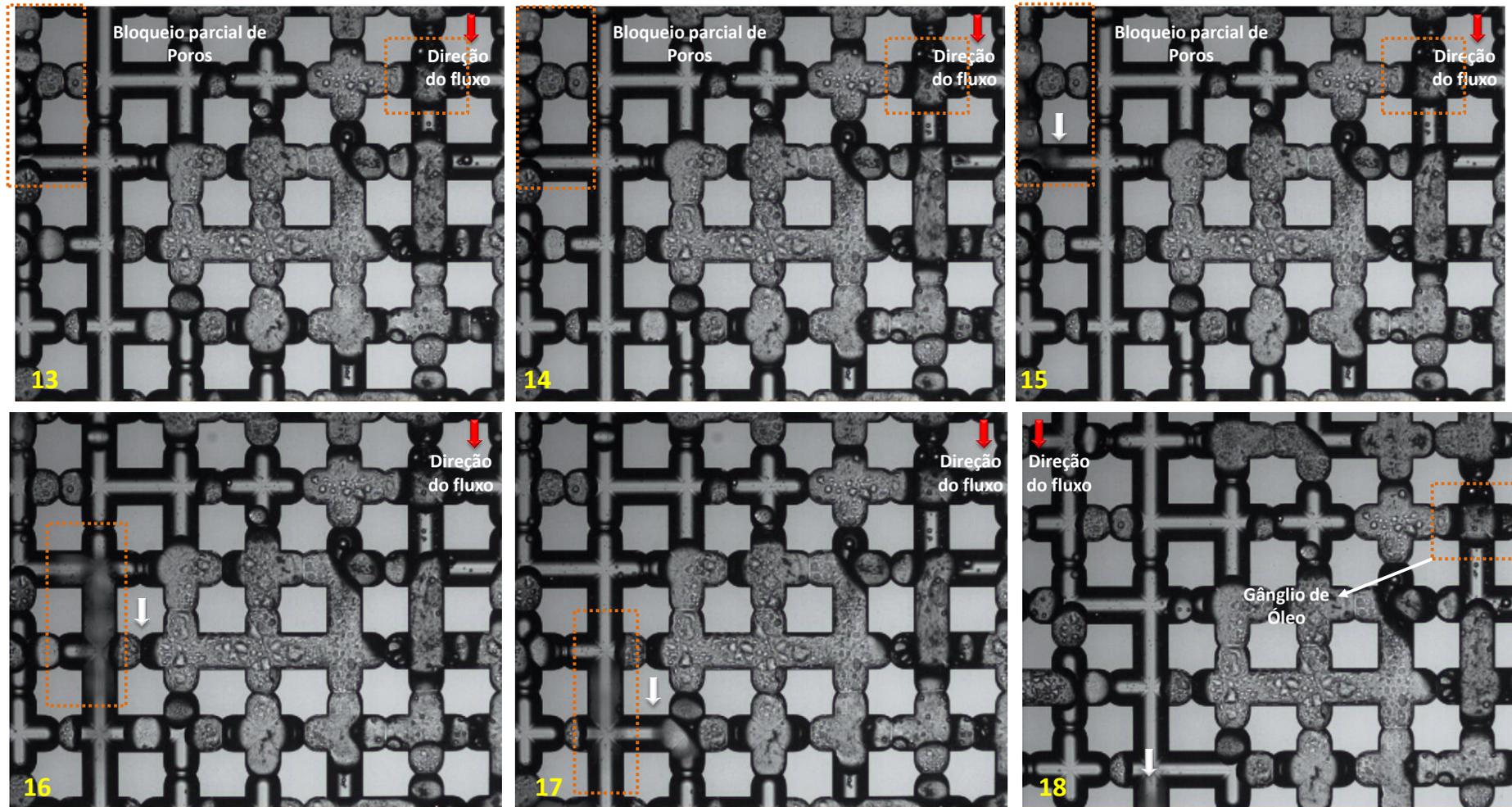


Figura 4. 30 Fotografias mostrando o processo de injeção de um VP de emulsão. $C_a = 1 \times 10^{-5}$, $\sigma = 6.97 \text{ mN/m}$.

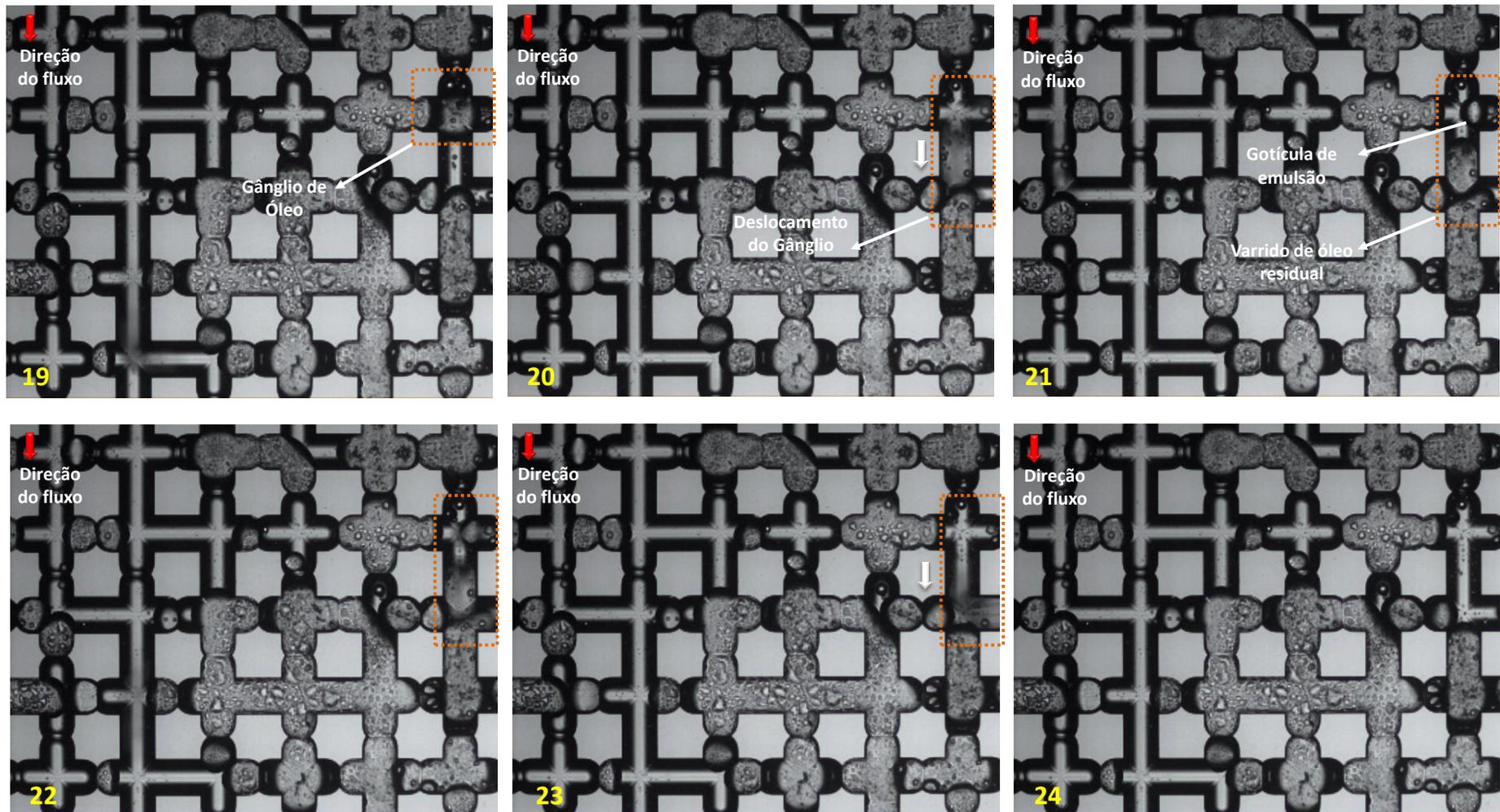


Figura 4. 31 Fotografias mostrando o processo de injeção de um VP de emulsão. $C_a = 1 \times 10^{-5}$, $\sigma = 6.97 \text{ mN/m}$.

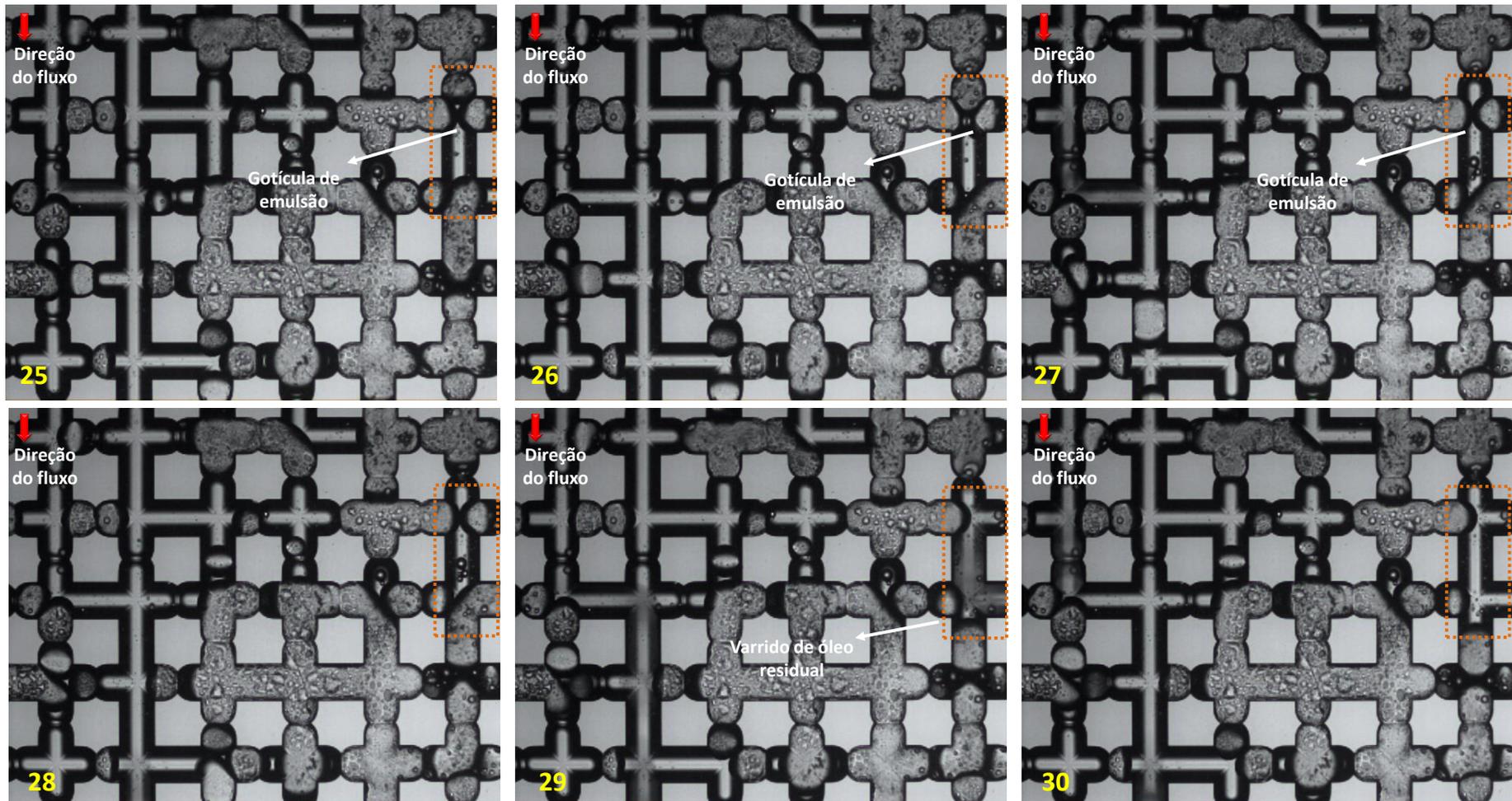


Figura 4. 32 Fotografias mostrando o processo de injeção de um VP de emulsão. $C_a = 1 \times 10^{-5}$, $\sigma = 6.97 \text{ mN/m}$.

As Figura 4.28 até Figura 4.32 apresentam os resultados obtidos da visualização com o menor número de capilaridade. Na parte esquerda da foto #1 até a foto #14 se observa como uma gota de emulsão de tamanho menor que o tamanho de poro invade o caminho preferencial formado pela injeção de fase contínua sem causar um efeito considerável no propósito de bloquear poros. Porém, à medida que avança a injeção juntamente com a concentração de gotas, novas gotinhas escoam e começam a se aglomerar sendo retidas e bloqueando parcialmente os poros nessa região. Do mesmo modo, se percebe como nos poros vizinhos (à direita) as gotículas de tamanho levemente menor que o tamanho de poro escoam e conseguem passar pelos canais do meio poroso. Nas três fotos seguintes, foto #15 até a foto #17, pode-se notar como ajudado por um aumento na pressão no micromodelo, as gotículas conseguiram se deformar e deslocar por poros vizinhos, para serem bloqueadas novamente. No mesmo experimento (região direita das fotos subsequentes) foi visualizado como um gânglio de óleo formado durante o deslocamento de óleo com fase contínua e que se encontrava imobilizado, consegue ser removido pelo deslocamento das gotículas da emulsão nessa região trazendo um varrido mais eficiente do óleo.

O experimento de injeção de emulsão desenvolvido ao maior número de capilaridade $C_a = \mu v / \sigma = 1 \times 10^{-4}$ e cujos resultados são apresentados nas Figuras 4.33 até Figura 4.39 mostrou que incrementando a vazão em aproximadamente 6 vezes ($0.4 \text{ mL/h} - 2.5 \text{ mL/h}$), o fenômeno de bloqueio diminui o que reduz a vantagem do uso de emulsões ao deixar grandes porções do meio poroso intactas e sem efeitos consideráveis na eficiência de varrido e deslocamento. Foi também observado que durante a injeção de emulsões as gotículas atravessam os poros com diferentes velocidades causando alterações no processo de bloqueio.

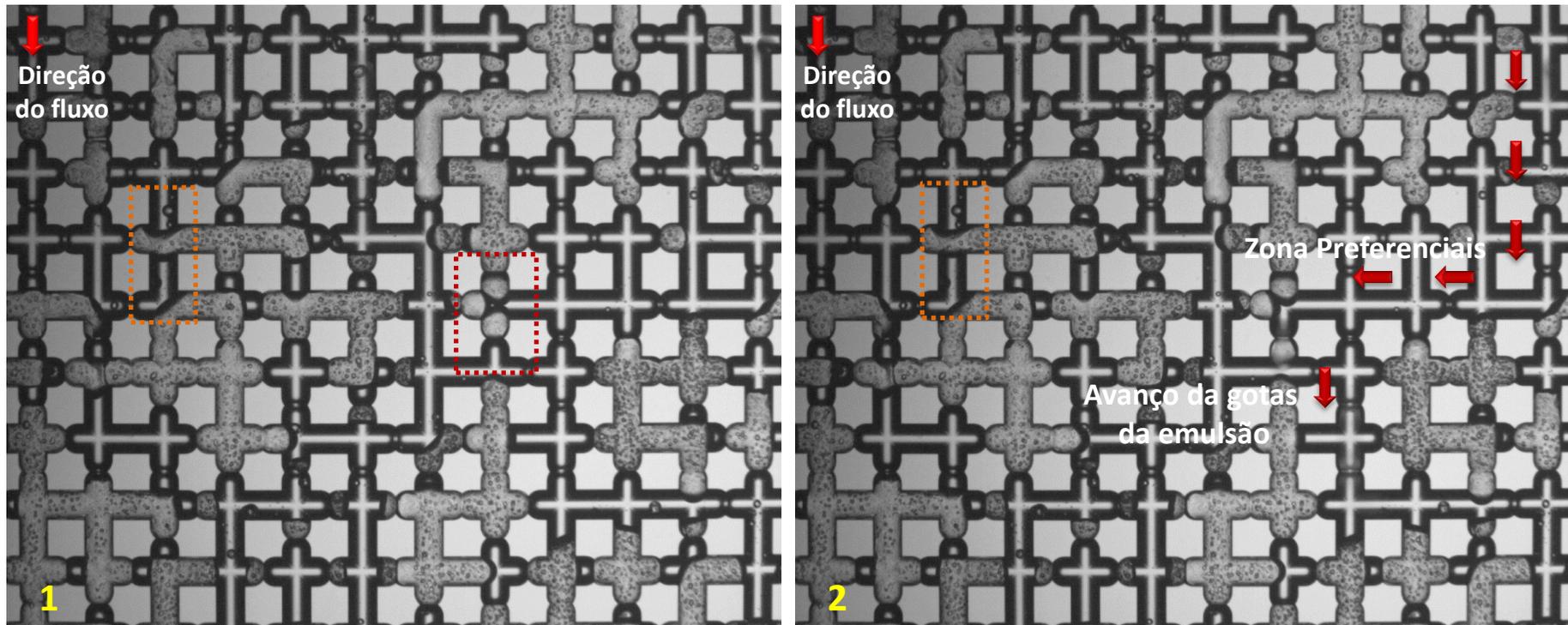


Figura 4. 33 Fotografias mostrando o processo de injeção de um VP de emulsão. $C_a = 1 \times 10^{-4}$, $\sigma = 6.97 \text{ mN/m}$.

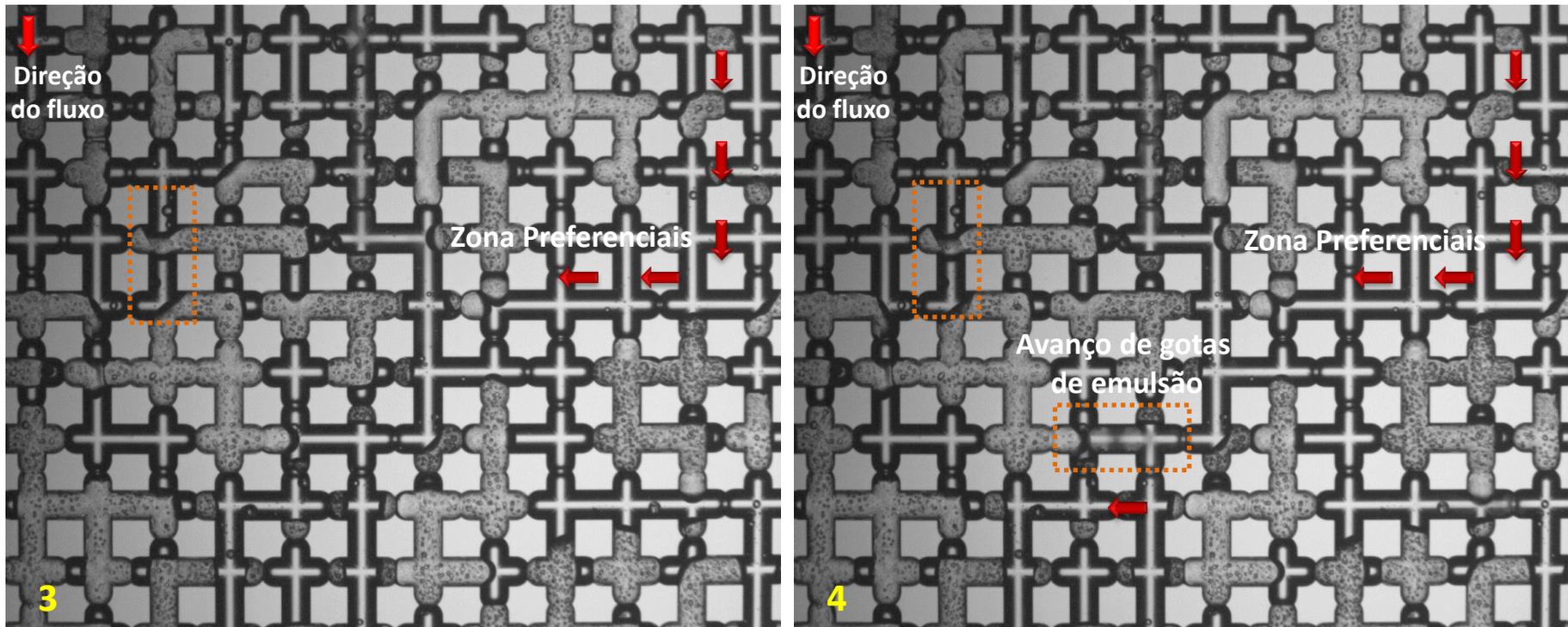


Figura 4. 34 Fotografias mostrando o processo de injeção de um VP de emulsão. $C_a = 1 \times 10^{-4}$, $\sigma = 6.97 \text{ mN/m}$.

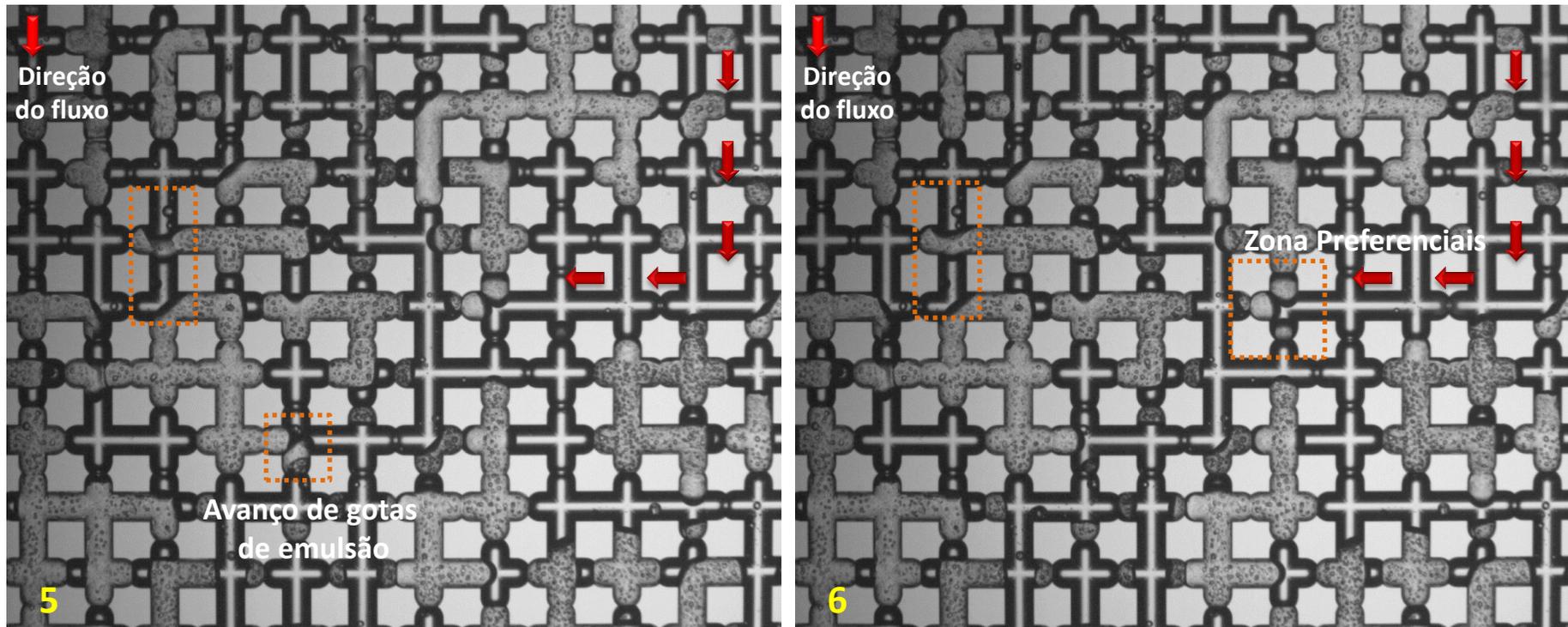


Figura 4. 35 Fotografias mostrando o processo de injeção de um VP de emulsão. $C_a = 1 \times 10^{-4}$, $\sigma = 6.97 \text{ mN/m}$.

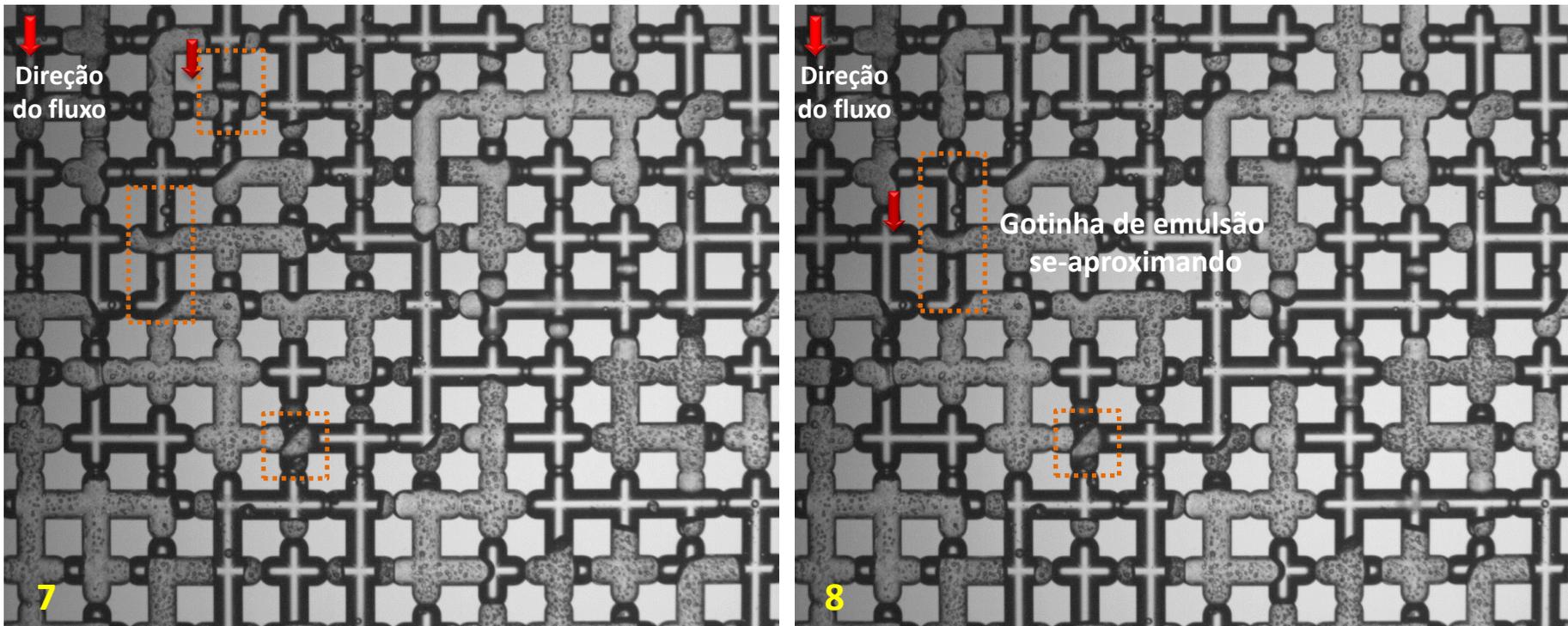


Figura 4. 36 Fotografias mostrando o processo de injeção de um VP de emulsão. $C_a = 1 \times 10^{-4}$, $\sigma = 6.97 \text{ mN/m}$.

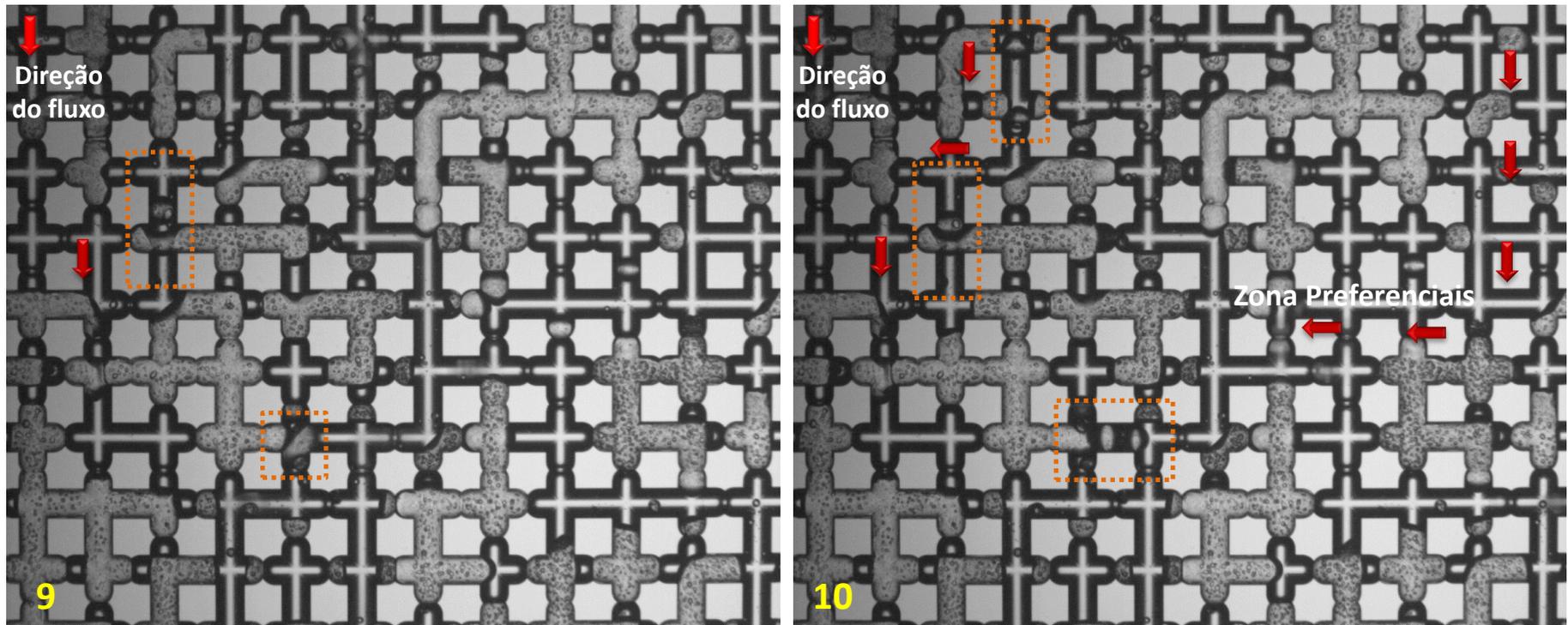


Figura 4. 37 Fotografias mostrando o processo de injeção de um VP de emulsão. $C_a = 1 \times 10^{-4}$, $\sigma = 6.97 \text{ mN/m}$.

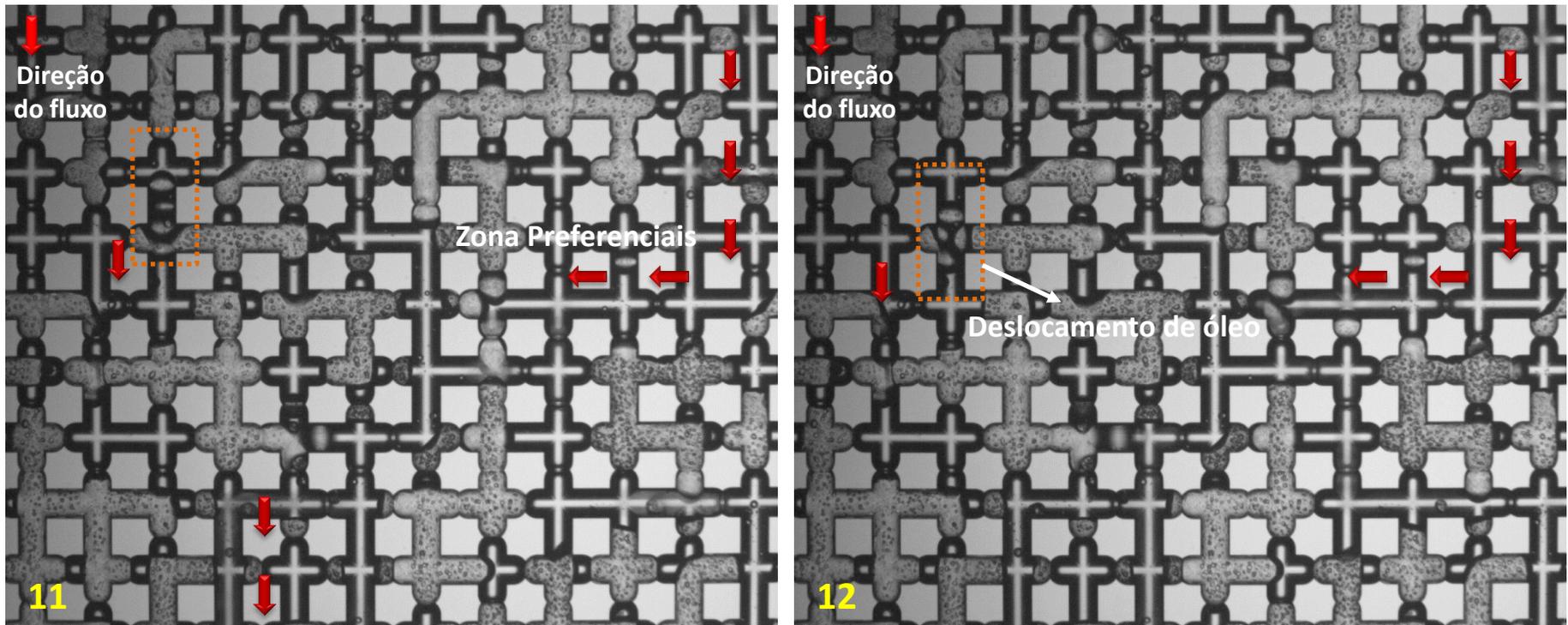


Figura 4. 38 Fotografias mostrando o processo de injeção de um VP de emulsão. $C_a = 1 \times 10^{-4}$, $\sigma = 6.97 \text{ mN/m}$.

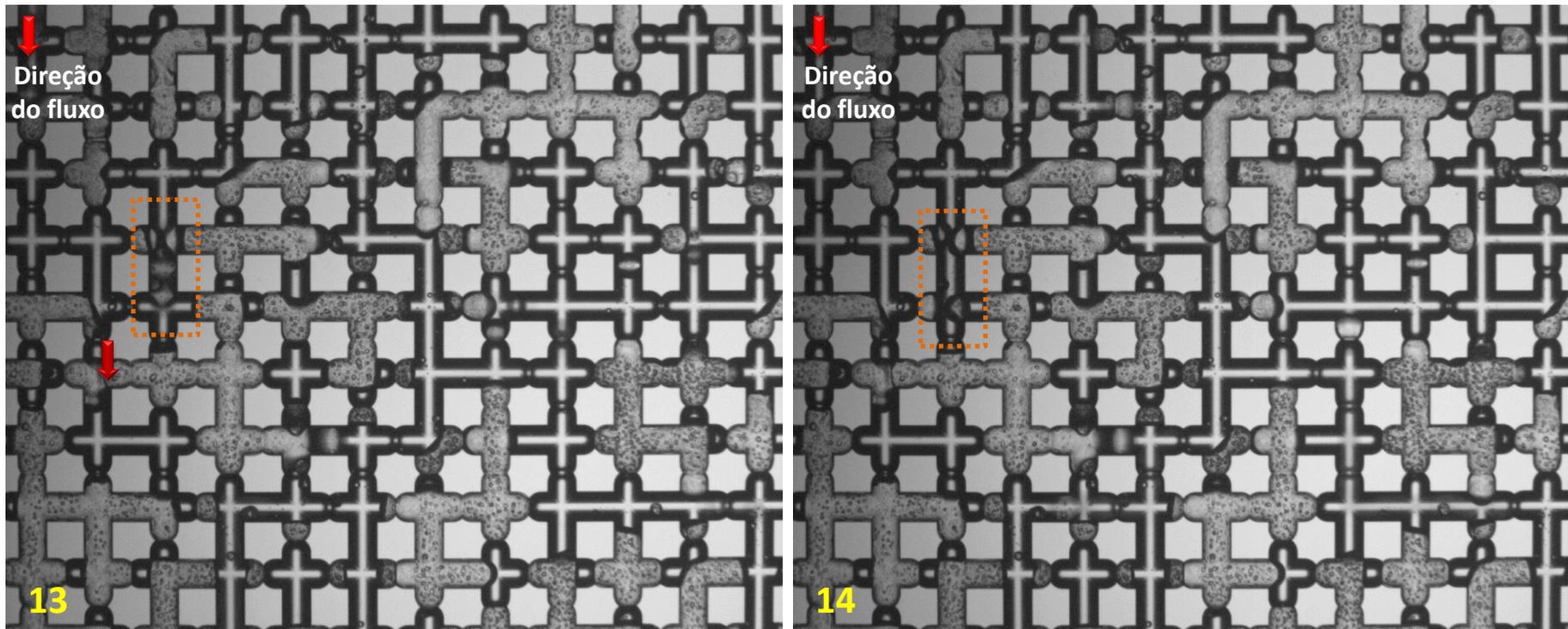


Figura 4. 39 Fotografias mostrando o processo de injeção de um VP de emulsão. $C_a = 1 \times 10^{-4}$, $\sigma = 6.97 \text{ mN/m}$.

O desenvolvimento destes experimentos demonstrou a aplicabilidade da emulsão como agente de bloqueio em meios porosos. Com relação à eficácia das gotas para bloquear o meio poroso de acordo com os seus tamanhos, na Figura 4.40 observa-se como as gotas bem maiores do que as gargantas dos poros, foram suficientes para bloquear efetivamente as gargantas do micromodelo e como a presença do surfactante impediu uma possível coalescência das gotas da fase dispersa.

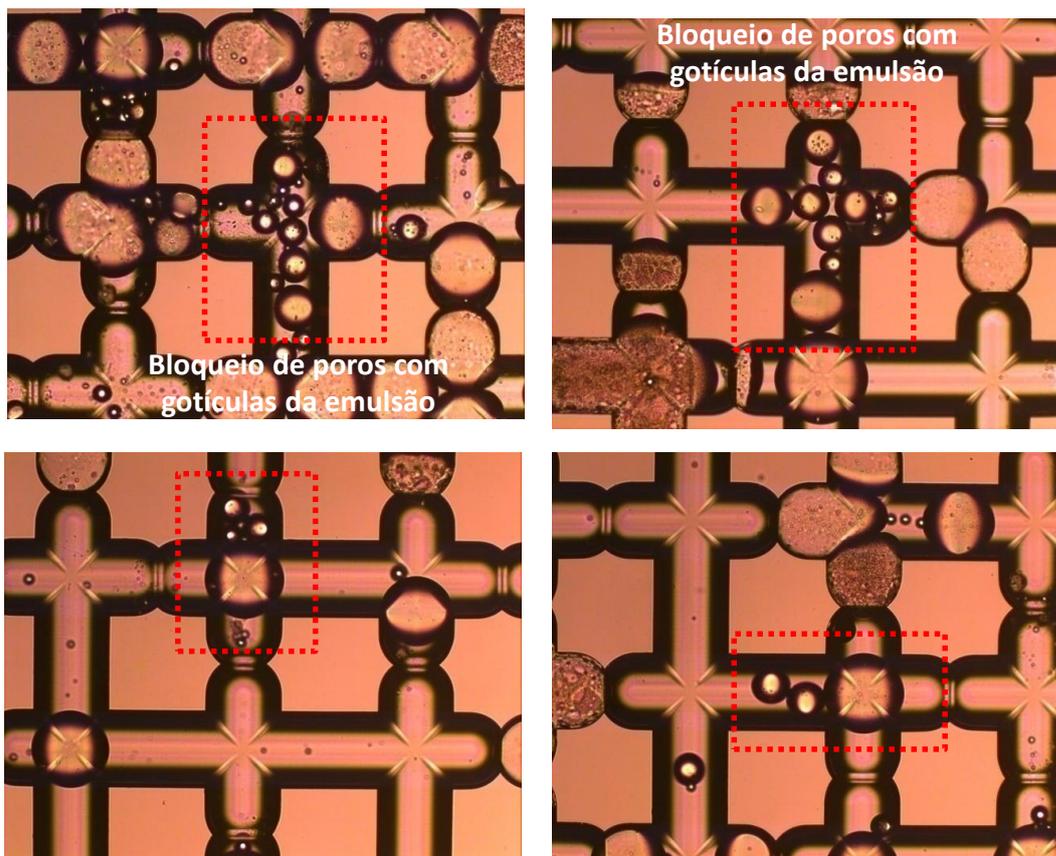


Figura 4. 40 Captura e acumulação de gotículas da emulsão O/A no meio poroso.

4.3 Efeito da Molhabilidade no Processo de Deslocamento de Óleo

De acordo com o procedimento adotado para a alteração da molhabilidade do meio poroso descrito na seção 3.4.2, foram obtidos ângulos de contato nas duas interfaces avaliadas (Óleo/Fase Contínua) e (Fase Contínua/Ar), medidos de forma estática e dinâmica, tanto em laminas de vidro após tratamento quanto em placas sem nenhum tipo de tratamento prévio. Os resultados obtidos para cada sistema são apresentados na Figura 4.41.

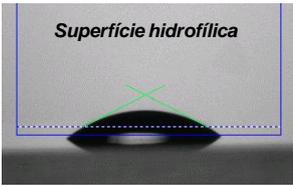
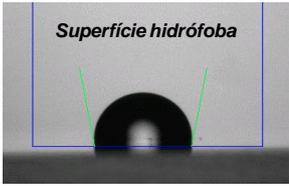
Ângulo de Contato	Sem Tratamento		Com Tratamento	
				
Interface Ar-Água	Estática	27,5°	Estática	100°
	Dinâmica	20 - 30°	Dinâmica	108°
Interface Óleo - Água	Estática	18,5°	Estática	91,3 - 92,8 °
	Dinâmica	20°	Dinâmica	94,2°

Figura 4. 41 Ângulo de contato medido nas interfaces ar/fase contínua e óleo/fase contínua em uma superfície de vidro.

Os resultados revelaram que por meio da alteração da molhabilidade, as lâminas de vidro possuem ângulos de contato maiores que os observados nas lâminas sem tratamento, indicando um aumento na hidrofobicidade nas superfícies. Porém, de acordo com valores comumente utilizados na literatura para definir a molhabilidade, nesta dissertação a tendência obtida foi definida como levemente molhável ao óleo.

Esta metodologia uma vez testada nas lâminas de vidro, foi aplicada no micromodelo, realizando os mesmos procedimentos de deslocamento dos experimentos anteriores, com a finalidade de avaliar o impacto da molhabilidade, na recuperação de óleo por injeção de fase contínua e emulsão. Assim, foi desenvolvido um experimento com número de capilaridade equivalente a $C_a = \mu v / \sigma = 2.0 \times 10^{-5}$ (número de capilaridade estudado na seção 4.2.2) avaliando as mesmas regiões que no caso do meio poroso molhável à água. A tabela 4.5 apresenta o resumo dos fatores de recuperação e saturações residuais de óleo para cada cenário.

Tabela 4. 5 Comparação das saturações e fatores de recuperação para os dois casos de molhabilidade estudada.

Resultados	Meio Poroso Molhável à água			Meio Poroso Molhável ao óleo		
	<i>Região1</i>	<i>Região2</i>	<i>Região3</i>	<i>Região1</i>	<i>Região2</i>	<i>Região3</i>
[%]						
S_{oi}	84.26	82.01	84.58	85.07	89.34	84.12
S_{or}	39.75	24.32	70.34	66.66	62.73	52.86
$F_{RÁGUA}$	52.82	70.34	59.61	22.10	29.78	37.16
S_{OR}	37.27	19.35	24.98	55.91	49.53	31.98
$F_{Remulsão}$	55.77	76.40	70.46	34.67	44.56	61.98

Segundo os dados fornecidos na Tabela 4.5, foi observada uma pequena diferença na saturação inicial de óleo no micromodelo. Observa-se que no caso do meio poroso levemente molhável ao óleo o volume de óleo original foi maior. Esta variação é função da distribuição da saturação de água conata e saturação de óleo irreduzível no meio poroso. De uma forma geral, quanto mais molhável ao óleo, menores as saturações irreduzíveis de água.

Depois do deslocamento de óleo pela injeção de fase contínua, se evidenciou como a molhabilidade impacta fortemente a eficiência nos processos de injeção de água. A evolução dos fatores de recuperação finais alcançados nas três regiões foram bem menores quando comparados com os obtidos no meio poroso molhável à água. Assim, concluiu-se que quanto mais molhável ao óleo o micromodelo, pior é a eficiência do processo.

É interessante notar que apesar da injeção de emulsão levar a fatores de recuperação menores no caso do micromodelo molhável ao óleo (Figura 4.43), quando comparado ao micromodelo molhável à água (Figura 4.42), o ganho em relação ao fator de recuperação obtido ao final do processo de injeção de emulsão foi maior.

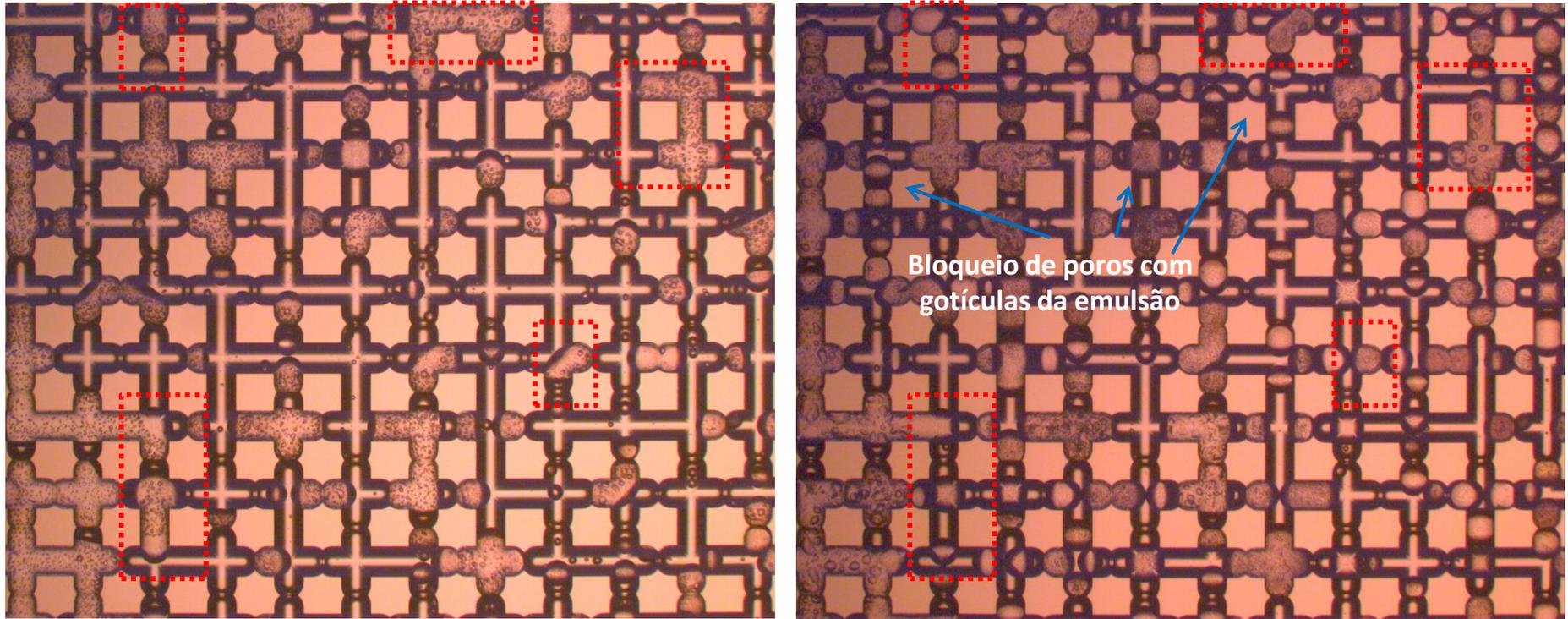


Figura 4. 42 Fotografias mostrando o processo de injeção de água (esquerda) e emulsão (direita). Micromodelo molhável à água. $C_a = 2 \times 10^{-5}$,
 $\sigma = 6.97 \text{ mN/m}$.

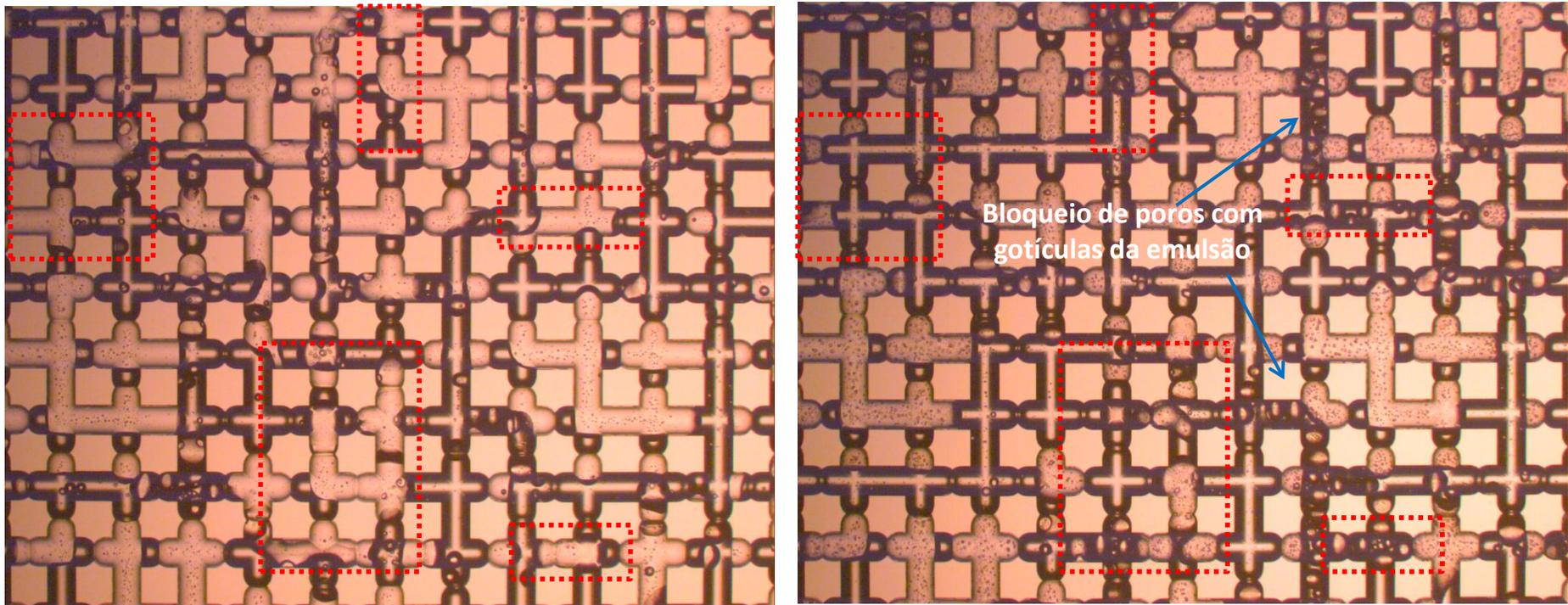


Figura 4. 43 Fotografias mostrando o processo de injeção de água (esquerda) e emulsão (direita). Micromodelo molhável ao óleo. $C_a = 2 \times 10^{-5}$,
 $\sigma = 6.97 \text{ mN/m}$.

Estes resultados são coerentes com a visualização realizada durante a injeção de emulsão, isto é, durante o teste de deslocamento observou-se uma rápida formação de canalizações pelos poros (mecanismo oposto ao deslocamento tipo pistão visualizado no micromodelo com preferência pela água) acarretando uma baixa eficiência de varrido e deslocamento. Do mesmo modo, foi percebida uma provável mistura das gotas da fase dispersa da emulsão com o óleo residual além de uma aderência das gotas na superfície do meio poroso.

A realização destes cenários de molhabilidade nos micromodelos, permitiu destacar alguns aspectos importantes, por exemplo; como esta propriedade impacta o volume original de fluidos e o volume móvel do meio poroso, e como o impacto nesse volumes tem evidentes consequências no fator de recuperação.