

4 Resultados e discussões

Nesta seção são apresentados os resultados experimentais obtidos de acordo com os procedimentos explicados no capítulo anterior. É apresentada a influência da concentração de óleo nas emulsões, o efeito do tamanho de gota, assim como o efeito da geometria do capilar.

Para estudar os diferentes efeitos do escoamento de emulsões através de capilares foram realizadas diversas experiências como mostra a Tabela 4.1.

Experiência Nº	Capilar	Fluido	Tamanho de gota	d(0.5) (µm)	d(0.9) (µm)
13	200/50	Fase Contínua	---	---	---
10		Emulsão 1	Grande	5.7	37.8
21		Emulsão 5	Grande	7.0	33.4
25		Emulsão 8	Pequena	2.2	7.4
5	100/50	Fase Contínua	---	---	---
9		Emulsão 1	Grande	5.7	37.8
20		Emulsão 5	Grande	7.0	33.4
27		Emulsão 8	Pequena	2.2	7.4
12	200/20	Fase Contínua	---	---	---
11		Emulsão 1	Grande	5.7	37.8
17		Emulsão 3	Pequena	2.0	7.0
18		Emulsão 4	Pequena	2.3	5.2
19		Emulsão 5	Grande	7.0	33.4
26		Emulsão 8	Pequena	2.2	7.4
28		Emulsão 10	Grande	11.5	35.8
30		Emulsão 11	Pequena	2.5	5.0

Tabela 4.1 Experiências realizadas de escoamento de emulsões através de micro-capilares.

A Fig. 4.1 mostra os valores de diferença de pressão em função de vazão do escoamento da fase contínua e da emulsão 1 através do capilar 100/50 µm. Como pode-se observar cada vazão foi mantida por um período de 15 minutos. No escoamento da fase contínua pode-se apreciar no início o aumento progressivo da pressão com cada variação de vazão. Como o objetivo da experiência é quantificar

dados característicos de pressão para cada valor de vazão, no escoamento da emulsão 1 considerou-se um tempo inicial de espera de 5 minutos antes de começar com a aquisição de dados. O dados apresentados para a emulsão 1 no mesmo gráfico refletem esta consideração, adquirindo-se valores de pressão mais estáveis. Todas as demais experiências foram realizadas levando em consideração aquele tempo inicial de espera.

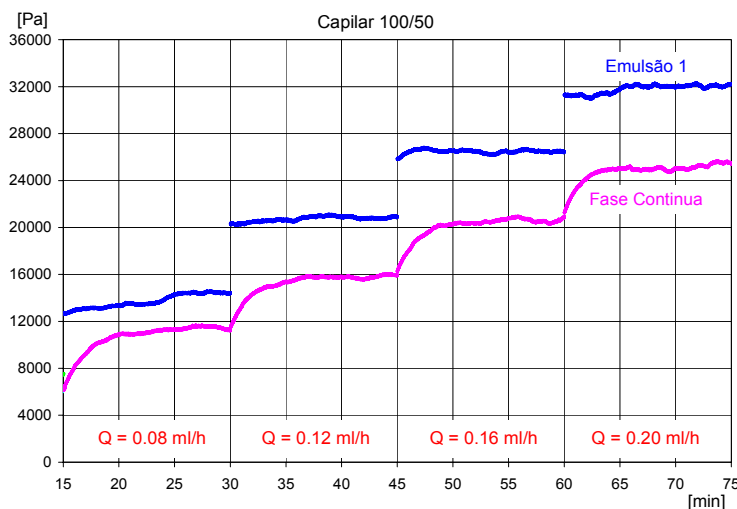


Figura 4.1 Diferença de pressão em função da vazão no capilar 100/50.

Uma amostra das diferentes experiências realizadas durante o presente estudo, em termos de pressão e vazão, é apresentada a seguir. A título de comparação, foi considerado o escoamento de fase contínua junto com 3 diferentes pares de emulsões em diversos micro-capilares.

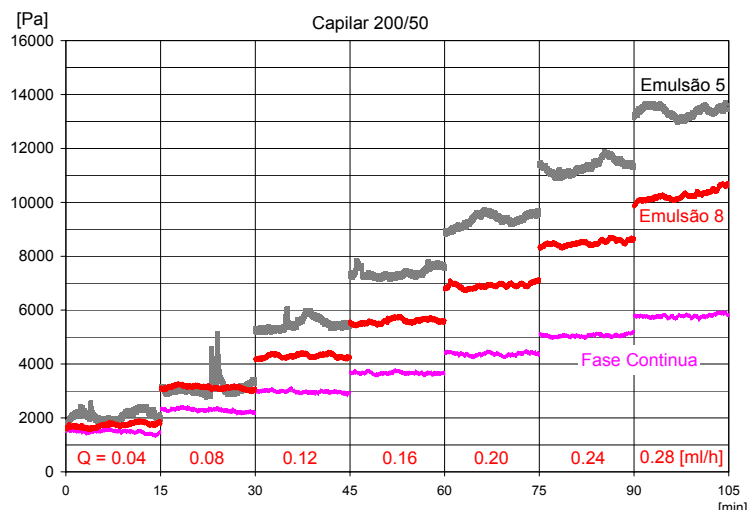


Figura 4.2 Diferença de pressão em função da vazão no capilar 200/50.

A Fig. 4.2 apresenta o escoamento de um par de emulsões com baixa concentração de óleo Tivela 460 (emulsão 5 e 8). Pode-se apreciar que a emulsão 5, de gotas grandes, produz uma maior diferença de pressão em comparação com a emulsão 8, de gotas pequenas. A Fig. 4.3 mostra o escoamento de um par de emulsões com elevada concentração de óleo Tivela 460 (emulsão 3 e 4), e finalmente a Fig. 4.4 mostra os dados de pressão em função da vazão de um par de emulsões de baixa concentração de óleo EMCAplus 350 (emulsão 10 e 11).

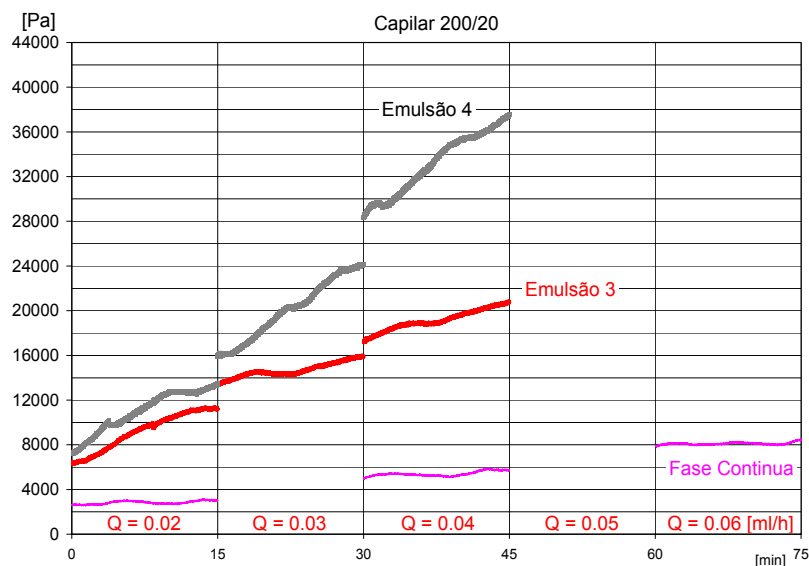


Figura 4.3 Diferença de pressão em função da vazão no capilar 200/20.

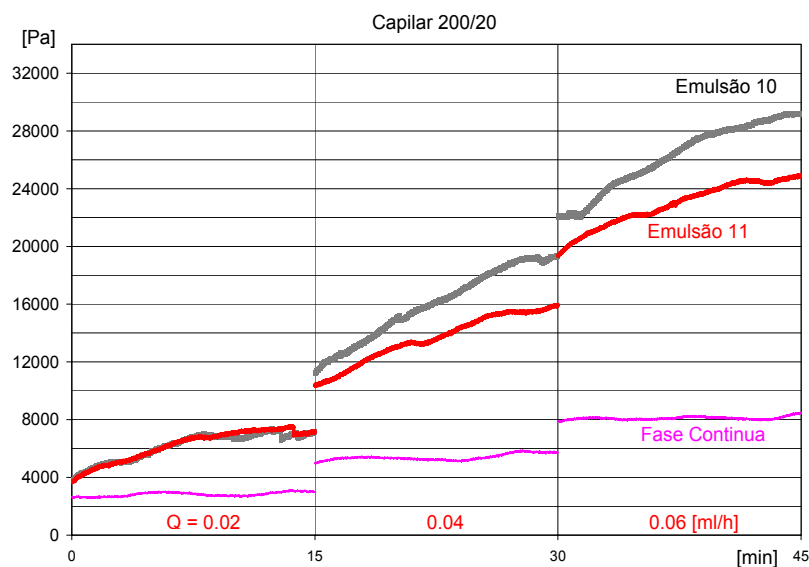


Figura 4.4 Diferença de pressão em função da vazão no capilar 200/20.

Para avaliar os resultados obtidos, os dados de pressão e vazão também foram expressos em termos de mobilidade, permeabilidade e número de capilaridade. A Eq. 4-1 define o número de capilaridade utilizado no presente trabalho. Onde V é a velocidade média do escoamento das emulsões, η a viscosidade da fase contínua e σ a tensão interfacial da emulsão.

$$Ca = \frac{V\eta_{FaseContinua}}{\sigma_{Interfacial}} \quad (4-1)$$

Para estabelecer as expressões de mobilidade e permeabilidade utilizou-se a Lei de Darcy (Eq. 4-2). Onde u_i é a velocidade da fase i , k_i é a permeabilidade efetiva da fase i , η_i a viscosidade da fase i , p é pressão, e x é a variável de comprimento.

$$u_i = -\left(\frac{k_i}{\eta_i}\right)\left(\frac{dp}{dx}\right) \quad (4-2)$$

Segundo a definição de Darcy, a mobilidade da fase i pode ser expressa como a divisão entre a permeabilidade e a viscosidade da fase i (Eq. 4-3):

$$\lambda_i = \left(\frac{k_i}{\eta_i}\right) \quad (4-3)$$

No presente trabalho o termo mobilidade foi expresso em termos de dados experimentais tal como mostra a Eq. 4-4. Onde ΔP é a diferença de pressão ao longo do capilar e L o comprimento do capilar.

$$\lambda = \frac{V}{\left(\frac{\Delta P}{L}\right)} \quad (4-4)$$

A Eq. 4-5 define o termo permeabilidade, com base na mobilidade (λ) anteriormente obtida multiplicada pela viscosidade da emulsão (η), também obtida no laboratório. Mediante a utilização da permeabilidade, espera-se retirar o

efeito viscoso contido nos dados experimentais de diferença de pressão, em outras palavras, observar o comportamento do escoamento de emulsões sem considerar o efeito de aumento da viscosidade, quando comparado com o escoamento da fase contínua.

$$k = \lambda \eta \quad (4-5)$$

4.1 Efeito da concentração de óleo nas emulsões

Para avaliar o efeito da concentração de óleo nas emulsões utilizaram-se diferentes emulsões de gotas pequenas com concentrações de 5%, 30% e 50% de fase interna. A Fig. 4.5 apresenta a diferença de pressão média em função da vazão para as diferentes emulsões consideradas. O valor de pressão para cada vazão é a média dos 9000 pontos coletados durante os 15 minutos de escoamento nessa vazão. As barras de erros nessa vazão são o desvio padrão dos 9000 dados experimentais adquiridos.

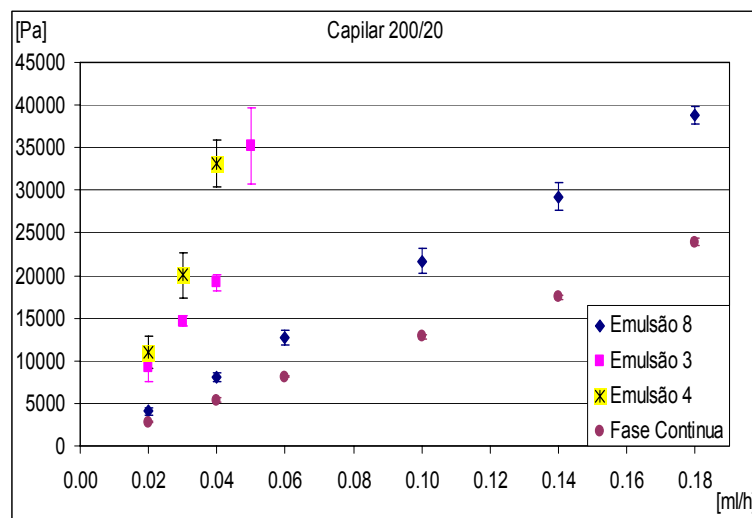


Figura 4.5 Diferença de pressão em função da vazão no capilar 200/20.

Como esperado, a emulsão 4, que possui 50% de fase oleosa, produz a maior perda de carga ao escoar através do capilar de 200 micrômetros de diâmetro interno e 20 micrômetros de constrição na garganta (200/20 μm). A menor perda de carga das emulsões é gerada pela emulsão 8 que possui 5 % em volume de fase interna. A relação vazão queda de pressão em termos de mobilidade é apresentada

na Fig. 4.6. Pode-se observar que a mobilidade aumenta à medida que a concentração da fase dispersa diminui. De certa forma isto já era esperado, já que a viscosidade da emulsão aumenta com a concentração. Os valores de mobilidade das barras de erros foram calculados com os valores máximos e mínimos de pressão, obtidos somando e restando da pressão média o valor do desvio padrão.

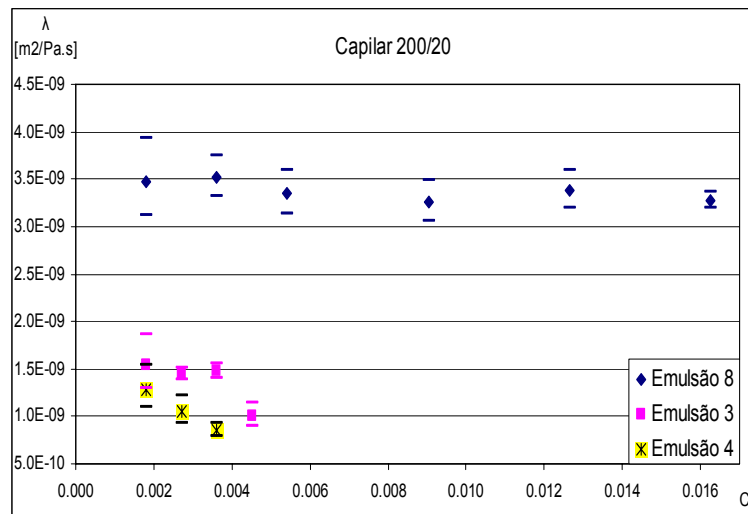


Figura 4.6 Mobilidade em função do número de capilaridade no capilar 200/20.

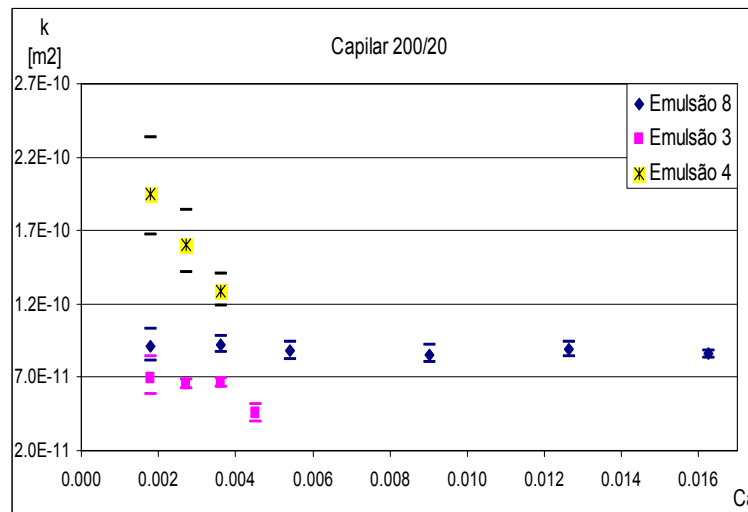


Figura 4.7 Permeabilidade em função do número de capilaridade no capilar 200/20.

A permeabilidade do capilar em função do número de capilaridade é apresentada na Fig. 4.7. Vale ressaltar que para um fluido Newtoniano simples, a permeabilidade não varia com a viscosidade do líquido e é apenas uma função da geometria do capilar. Isto não ocorre no caso de emulsões. A permeabilidade da

emulsão 4 (mais concentrada) é maior que as demais permeabilidades. Isto pode ser um efeito do tamanho das gotas da fase dispersa. As emulsões 3 e 8 possuem uma distribuição de tamanho de gota muito similar, na faixa de 0.5 até 20 micrômetros, enquanto a emulsão 4 possui uma distribuição na faixa de 0.5 a 10 micrômetros. Este fato demonstra que mesmo com gotas menores do que o tamanho da garganta o escoamento de emulsões gera um efeito de bloqueio parcial através da constrição do micro-capilar.

4.2

Efeito do tamanho de gota

Para apresentar o efeito do tamanho de gotas no escoamento de emulsões através de micro-capilares utilizou-se dois pares de emulsões. Cada par de emulsões possui as mesmas características de composição, sendo que uma emulsão é de gotas grandes e outra de gotas pequenas. Em ambos os casos pode-se observar que as emulsões de gotas pequenas possuem uma viscosidade maior do que seus pares de gotas grandes, produto da maior interação de partículas pequenas. Mesmo assim, o efeito gerado pelo tamanho de gota é maior do que o gerado pela viscosidade.

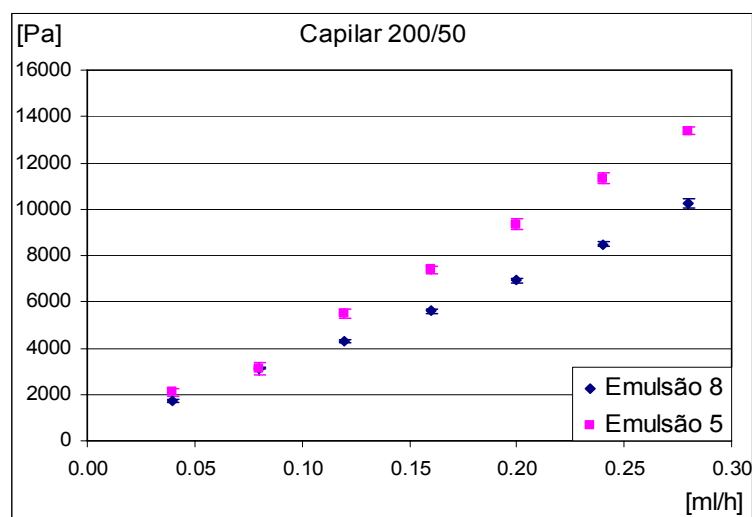


Figura 4.8 Diferença de pressão em função da vazão no capilar 200/50.

Na Fig. 4.8 pode-se observar a diferença de pressão média em função da vazão para as emulsões 5 e 8 no escoamento através de um capilar de 200 micrômetros de diâmetro interno e 50 micrômetros de constrição. A emulsão 5, de

gotas grandes, gera uma perda de carga maior do que a emulsão 8 a pesar de sua viscosidade ser menor. Esta diferença fica evidente quando os resultados são apresentados em termos de permeabilidade, como mostrado na Fig. 4.9, comprovando o efeito de bloqueio parcial devido ao tamanho de gota.

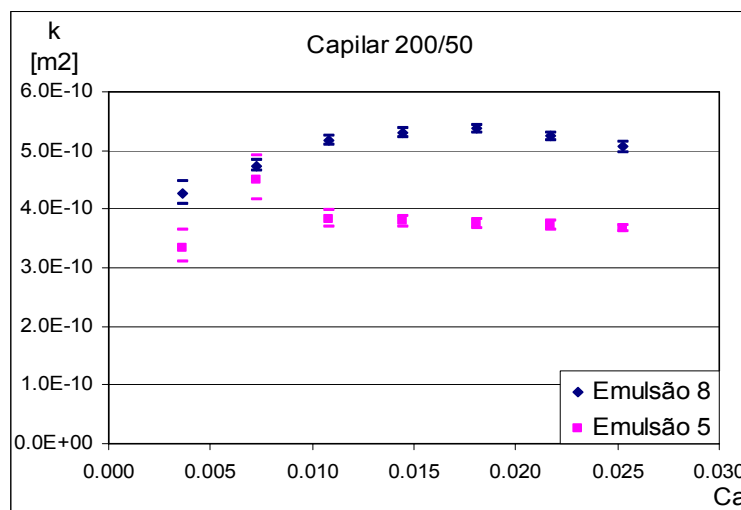


Figura 4.9 Permeabilidade em função do número de capilaridade no capilar 200/50.

Nas Fig. 4.10, 4.11, 4.12 e 4.13 pode-se observar as diferenças de pressão e permeabilidade através de mais duas geometrias, um capilar de 100 micrômetros de diâmetro interior e 50 micrômetros de constrição (100/50 μm), e outro microcapilar de 200 micrômetros de diâmetro interior e 20 micrômetros de garganta (200/20 μm).

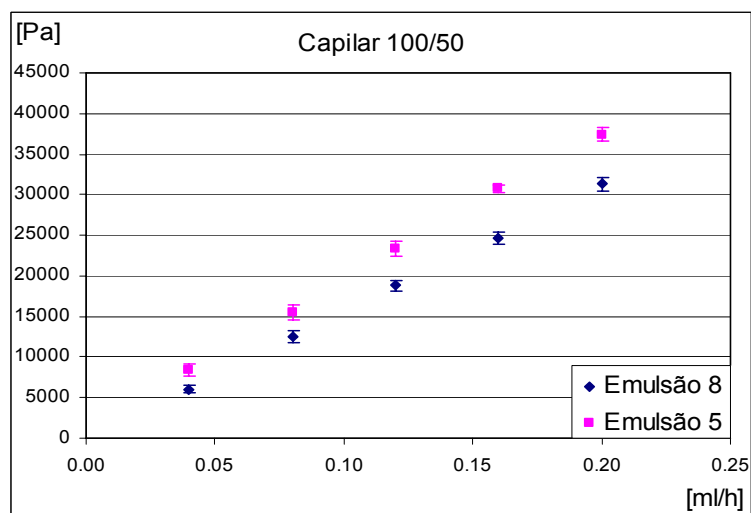


Figura 4.10 Diferença de pressão em função da vazão no capilar 100/50.

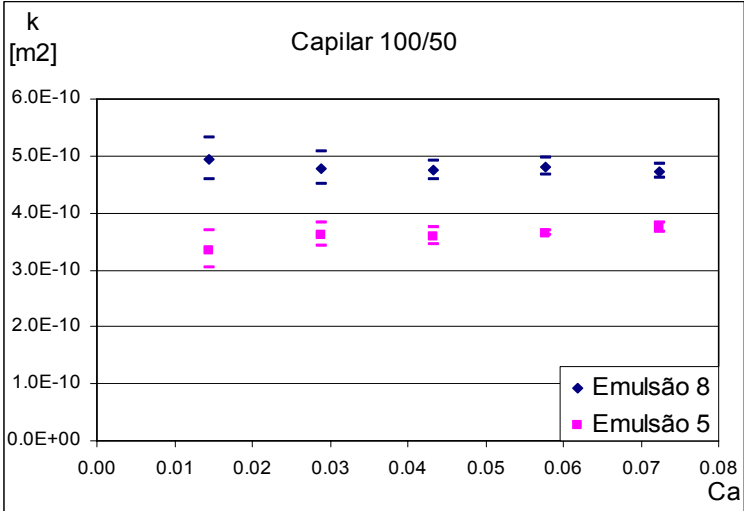


Figura 4.11 Permeabilidade em função do número de capilaridade no capilar 100/50.

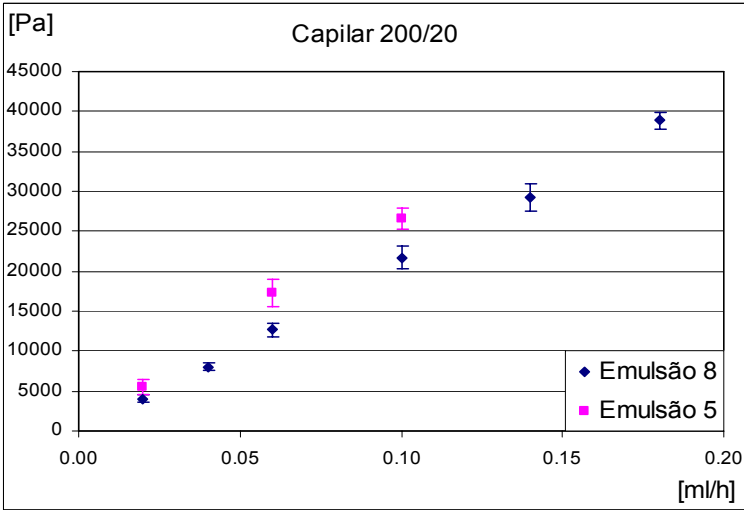


Figura 4.12 Diferença de pressão em função da vazão no capilar 200/20.

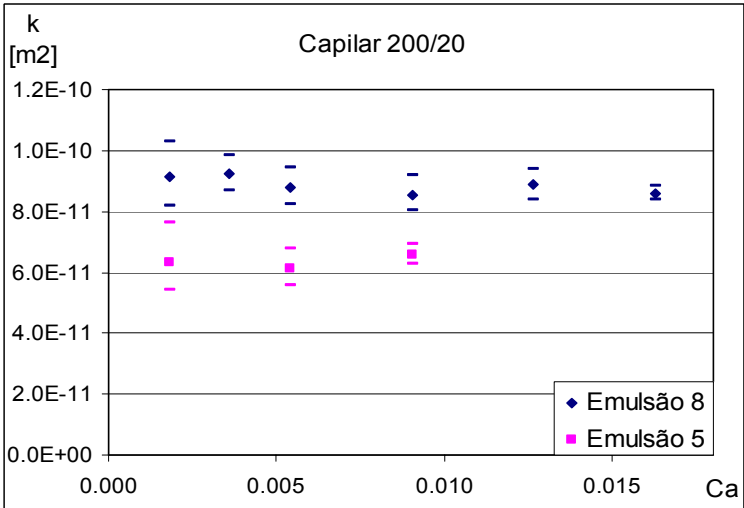


Figura 4.13 Permeabilidade em função do número de capilaridade no capilar 200/20.

Novamente, a diferença apresentada pelas emulsões 5 e 8, na perda de carga ao longo de diferentes vazões é mantida em termos de permeabilidade. Este fato demonstra que mesmo através de diversos capilares, com diferentes intensidades de alteração de geometria, o efeito do tamanho de gota é predominante.

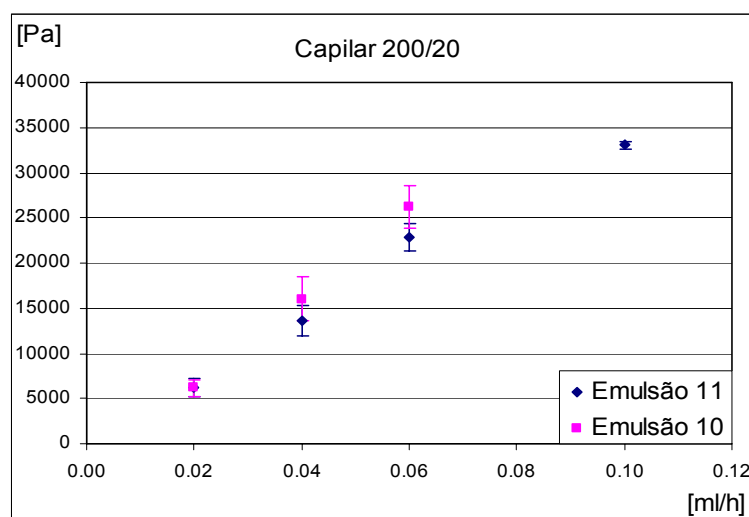


Figura 4.14 Diferença de pressão em função da vazão no Capilar 200/20.

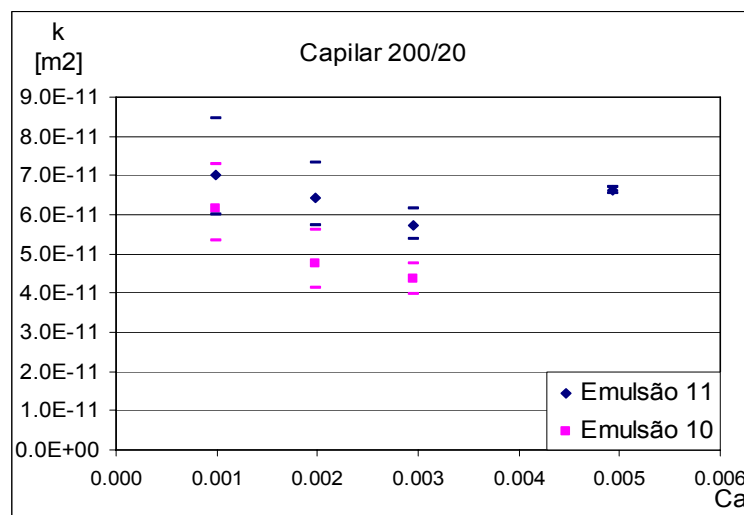


Figura 4.15 Permeabilidade em função do número de capilaridade no capilar 200/20.

As emulsões 10 e 11 formam o segundo par usado para comparação. A fase dispersa destas emulsões é formada pelo óleo leve EMCAplus 350. Mesmo assim, o escoamento das emulsões através do capilar 200/20 μm , mostrado na Fig. 4.14, apresenta um comportamento similar ao primeiro par de emulsões porém em

menor intensidade. A emulsão 10 de gotas grandes gera um diferencial de pressão maior do que a emulsão 11 de gotas pequenas. O efeito do tamanho de gota é corroborado ao observar a menor permeabilidade da emulsão 10, mesmo tendo uma viscosidade menor do que a emulsão de gotas pequenas, Fig. 4.15. Porém, vale ressaltar que a intensidade do bloqueio parcial (diminuição da permeabilidade entre emulsões) é menor, devido à menor viscosidade da fase dispersa.

4.3

Efeito da geometria do capilar

Para avaliar o efeito da geometria através da qual escoam as emulsões, fez-se uma análise comparativa do escoamento das emulsões 5 e 8 em duas geometrias diferentes. Os dois micro-capilares utilizados têm um diâmetro interno de 200 micrômetros, com 50 micrômetros de constrição num caso e 20 micrômetros no segundo capilar.

A Fig. 4.16 apresenta a permeabilidade para o escoamento das emulsões 5 e 8, emulsões com tamanho de gota grande e pequena respectivamente. A diferença de permeabilidade do escoamento da emulsão 5 em relação da emulsão 8 é de aproximadamente 24%. Isto significa que o escoamento da emulsão de gotas grandes (emulsão 5) é, em média, 24% menos permeável do que o escoamento da emulsão de gotas pequenas (emulsão 8) através do capilar 200/50 μm .

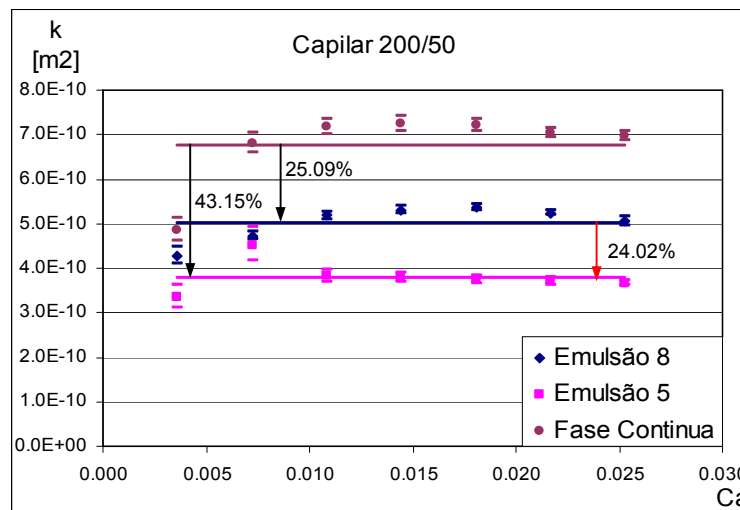


Figura 4.16 Permeabilidade em função do número de capilaridade no capilar 200/50.

Da mesma forma, na Fig. 4.16 é possível visualizar uma diminuição na permeabilidade de aproximadamente 25%, em relação da fase contínua, no escoamento da emulsão de gotas pequenas (emulsão 8), e uma diminuição maior de aproximadamente 43% no escoamento da emulsão de gotas grandes (emulsão 5).

A Fig. 4.17 mostra uma diferença, em relação da emulsão 8, de aproximadamente 28% na permeabilidade entre o escoamento das emulsões de gotas grandes e pequenas. Em outras palavras, a emulsão de gotas grandes escoou através do capilar 200/20 μm com uma permeabilidade 28% menor do que a emulsão de gotas pequenas. Igualmente, pode-se apreciar uma diminuição de aproximadamente 32% na permeabilidade do escoamento da emulsão de gotas pequenas, e uma diminuição de aproximadamente 51% no escoamento da emulsão 5 (gotas grandes), ambas as diferenças em relação do escoamento de fase contínua através do mesmo micro-capilar.

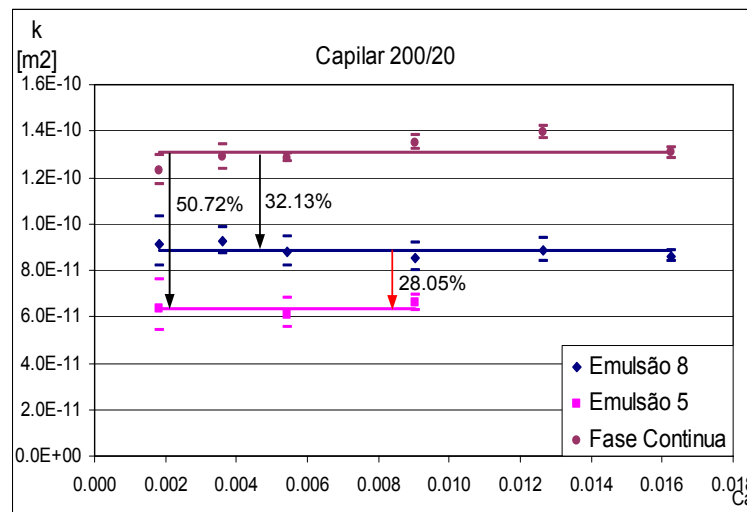


Figura 4.17 Permeabilidade em função do número de capilaridade no capilar 200/20.

A menor permeabilidade no escoamento de emulsões de gotas grandes comparado com as emulsões de gotas pequenas e a diferença destes escoamentos em relação da fase contínua quantifica mais uma vez o efeito produzido pelo tamanho de gotas, mas a maior intensidade destas diferenças no escoamento através do capilar 200/20 μm em comparação do capilar 200/50 μm demonstra

que o menor tamanho de garganta gera uma maior intensidade de bloqueio parcial no escoamento de emulsões através de micro-capilares.

Segundo o trabalho desenvolvido por Cobos (2008), sobre escoamento de emulsões óleo em água através de um capilar 200/50 μm , a mobilidade aumenta com o número de capilaridade. Na Fig. 4.18 pode-se observar este comportamento no escoamento das emulsões 2S e 2L. A mobilidade da emulsão 2S, emulsão de gotas pequenas (small drops), é maior do que a mobilidade do sistema 2L, emulsão de gotas grandes (large drops), para baixos números de capilaridade. Para altos números de capilaridade a mobilidade de ambas as emulsões são virtualmente as mesmas. O mecanismo de bloqueio parcial relacionado a presença de gotas grandes na injeção de emulsões ocorre se o número de capilaridade local encontra-se abaixo de um valor crítico. Neste caso, o número de capilaridade crítico seria 0.012.

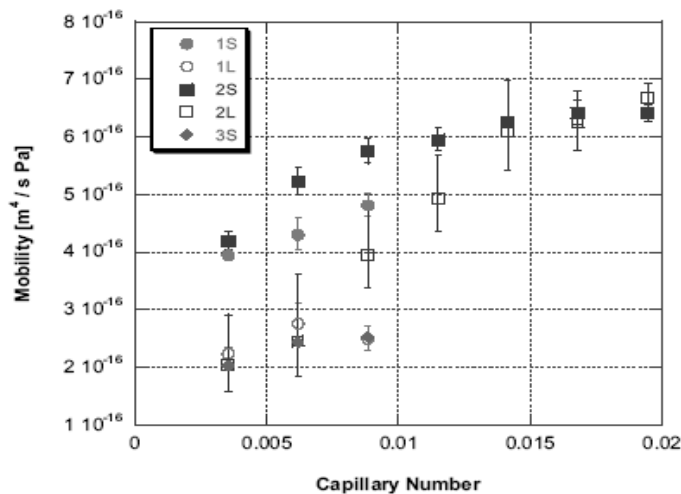


Figura 4.18 Mobilidade em função do número de capilaridade.

Fonte: Cobos (2008).

Se as propriedades da emulsão e as condições de operação são tais que o número de capilaridade local é maior do que o valor crítico, então a vantagem do bloqueio seletivo de poros não aconteceria. Portanto, as emulsões a serem utilizadas em processo de recuperação avançada de óleo teriam que ser projetadas para produzir o fenômeno de bloqueio parcial na localização desejada no interior do reservatório. Este desafio pode ser realizado ajustando as propriedades da

emulsão, como a tensão interfacial, viscosidade e distribuição de tamanho de gotas, para obter valores de número de capilaridade menores que o valor crítico.

No presente trabalho, não se observou mudanças significativas nas propriedades do escoamento das emulsões através dos diversos micro-capilares, seja em termos de mobilidade ou permeabilidade. Mesmo sabendo das diferenças existentes entre os sistemas utilizados por Cobos em relação aos usados neste trabalho, como diferenças na composição da fase contínua, concentração de fase interna, entre outros; acredita-se que a permeabilidade constante com o número capilar em todas as experiências desenvolvidas neste estudo pode ser um efeito da utilização de emulsões com distribuições de tamanho de gotas menores. A presença de gotas de maior tamanho nas emulsões utilizadas por Cobos gera, ao escoar através das gargantas dos capilares, uma resistência adicional pelo esforço de deformação da própria gota ao passar através da constrição. Esta resistência seria posteriormente afetada diminuindo seu valor com o aumento do número de capilaridade, neste caso, com o aumento da velocidade do escoamento.