

3

Medição do fator de bloqueio

3.1.

Abordagem experimental

3.1.1.

Introdução

O objetivo desta abordagem experimental é determinar o efeito da geometria e das propriedades das emulsões na relação entre vazão e queda de pressão no escoamento de emulsões óleo em água através de micro-capilares com garganta. Nesta análise, o efeito da geometria foi avaliado utilizando-se dois capilares com diferentes diâmetros de seção reta e o efeito das propriedades das emulsões foi determinado elaborando-se emulsões de três diferentes tamanhos de gota para duas concentrações volumétricas da fase dispersa.

Esta primeira abordagem experimental foi desenvolvida no Laboratório de Microhidrodinâmica e Escoamento em meios Porosos (LMMP) do Departamento de Engenharia Mecânica da PUC – Rio e consistiu em três processos principais: (i) formulação e preparação das emulsões, (ii) caracterização da distribuição de tamanho de gota das emulsões e, (iii) montagem da bancada experimental envolvendo a injeção, medição da queda de pressão e a visualização do escoamento das emulsões. Todos os procedimentos preparatórios e testes foram realizados a 23°C. O controle da temperatura do laboratório foi executado mediante o uso adequado do sistema de ar condicionado. Algumas dificuldades encontradas durante a abordagem experimental são discutidas na parte final desta seção.

3.1.2.

Formulação e preparação das emulsões.

Todos os procedimentos seguidos na elaboração das emulsões utilizadas nesta abordagem experimental foram efetuados sob as mesmas condições de

medição, para garantir a sua repetitividade. Nesta seção, serão descritos os procedimentos de preparação e caracterização das fases e finalmente a preparação das emulsões utilizadas nesta análise.

3.1.2.1. Preparação das fases

O principal critério aplicado na escolha da fase dispersa e na formulação da fase contínua foi evitar a segregação gravitacional das emulsões durante o desenvolvimento dos testes.

O óleo SHELL Tivela S460 (óleo sintético a base de polialquilenoglicol) foi selecionado como fase dispersa para preparar as emulsões. Este óleo, de viscosidade comparada com a de um óleo pesado e de densidade próxima a da água, diminuiu o efeito de separação gravitacional das fases. Nesta análise, as concentrações volumétricas da fase dispersa, consideradas na formulação das emulsões, foram de 5% e 15% em volume de óleo.

A fase contínua das emulsões foi formulada como 85% em volume de glicerina e 15% em volume de água destilada. A glicerina (Glicerol $C_3H_5(OH)_3$) foi usada nesta concentração para incrementar consideravelmente a viscosidade da água e diminuir a diferença de densidades das fases evitando a segregação gravitacional das emulsões ao longo dos testes. Adicionalmente, o surfactante dodecil sulfato de sódio (SDS, $C_{12}H_{25}SO_4Na$) foi usado na formulação da fase contínua, a uma concentração de três vezes sua concentração micelar crítica, para estabilizar as emulsões, reduzir a tensão interfacial entre as fases e impedir a coalescência das gotas da fase dispersa. A concentração de surfactante utilizada foi de 6.9×10^{-3} kg/l.

Para preparar a fase contínua a água destilada foi filtrada através de uma membrana de $0.20 \mu m$ de malha (NALGENE[®] Mod. 596-4520) e a quantidade necessária de surfactante foi pesada usando a balança QUIMIS Mod. Q-500L210C de $\pm 0.0001g$ de exatidão. A figura (3.1) mostra o surfactante e a balança empregada na preparação da fase contínua. O surfactante e a água foram colocados num béquer para serem misturados usando o agitador magnético FISATOM 754A. Para garantir a completa dissolução do surfactante, o tempo de mistura no agitador magnético, em velocidade média, foi estabelecido em uma

hora. Finalmente, incrementando a velocidade do agitador, a glicerina é adicionada lentamente, utilizando o dispensador de ajuste analógico DISPENSETTE[®] ORGANIC da BRAND de 10 - 100 ml de capacidade e $\pm 0.5\%$ de exatidão, até homogeneizar a solução [31]. Este processo é apresentado na figura (3.2).

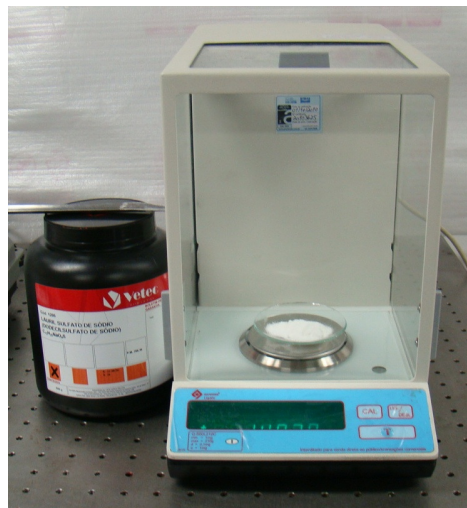


Figura 3.1: Balança e surfactante utilizados na preparação das fases.



Figura 3.2: Dispensador de glicerina e agitador magnético usados no processo de homogeneização da fase contínua.

Com o objetivo de evitar que qualquer possível impureza comprometesse o escoamento das emulsões através dos capilares, tanto a fase contínua (após a homogeneização) quanto a fase dispersa, foram filtradas a vácuo através de uma membrana de $0.45\mu\text{m}$ de malha (NALGENE® - Mod. 130-4045). A bomba de vácuo empregada foi da QUIMIS, Mod. Q355D2. Os filtros e a bomba são apresentados na figura (3.3).

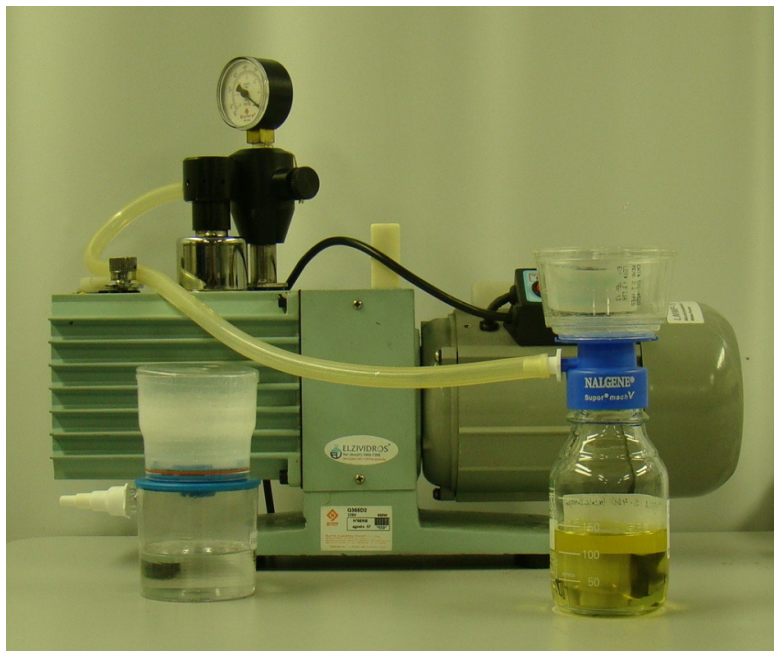


Figura 3.3: Bomba de vácuo e filtros empregados nos processos de filtração.

3.1.2.2. Caracterização das fases

A caracterização das fases das emulsões foi realizada a 23°C no Laboratório de Caracterização de Fluidos (LCF) da PUC – Rio.

As densidades (massa específica) das duas fases foram determinadas utilizando uma balança OHAUS Mod. Explorer de $\pm 0.0001\text{g}$ de exatidão e um picnômetro Gay-Lussac de 25ml de $\pm 0.003\text{ml}$ de exatidão. Ambos os equipamentos são apresentados na figura (3.4).



Figura 3.4: Balança e picnômetro utilizados na caracterização das fases.

A determinação das tensões superficiais foi realizada mediante o método do anel, empregando o tensiômetro LAUDA VO 2001. Este método é confiável para calcular valores de tensão superficial de líquidos como água, hidrocarbonetos, água/hidrocarbonetos e água/hidrocarbonetos/surfactante ($\sigma > 1.0 \text{ mN/m}$). Segundo este método, o anel é submerso no líquido e posteriormente é separado da superfície do líquido. A força necessária para o anel ultrapassar a superfície do líquido é medida e dividida pela circunferência do anel. O resultado obtido é corrigido por um fator geométrico. A figura (3.5) mostra o tensiômetro e o anel utilizado nesta abordagem.



Figura 3.5: Tensiômetro LAUDA VO 2001 e anel utilizado na medição da tensão superficial da fase contínua.

O valor da tensão interfacial entre as fases que compõem as emulsões, conforme discutido no capítulo 2, foi calculada como a diferença entre as tensões superficiais das fases.

As medidas das viscosidades cinemáticas foram efetuadas utilizando um viscosímetro Cannon-Fenske submerso em um banho termostático para garantir a estabilidade da temperatura (23°C) durante as medições. A metodologia seguida consistiu em medir o intervalo de tempo que um volume de fluido demora a escoar através de uma distância específica do capilar do viscosímetro. A equação (3.1) foi utilizada para calcular as viscosidades cinemáticas, em função do tempo t , da gravidade g e da constante C do viscosímetro. O valor de C depende do diâmetro D , da inclinação do capilar θ e do volume de fluido a escoar no viscosímetro.

$$v = \frac{\mu}{\rho} = \frac{\pi D^4}{128V} g \cos \theta t = C t \quad (3.1)$$

Com os valores de densidade e viscosidade cinemática calculados, os valores das viscosidades dinâmicas das fases são obtidos através da equação (3.2).

$$\mu = v \cdot \rho \quad (3.2)$$

Os valores resultantes do processo de caracterização da fase contínua e da fase dispersa são apresentados na tabela 3.1.

FASE	FORMULAÇÃO	ρ [kg/m ³]	v [m ² /s]	μ [Pa.s]	σ_{superf} [mN/m]	σ_{interf} [mN/m]
CONTÍNUA	85% Glicerina 15% Água	1222.2	88.5x10 ⁻⁶	0.11	41.5	4.4
DISPERSA	Óleo SHELL Tivela S460	997.1	1194x10 ⁻⁶	1.19	45.9	

Tabela 3.1: Propriedades das fases contínua e dispersa das emulsões a 23°C.

3.1.2.3. Preparação das emulsões.

Como mencionado anteriormente, as concentrações de fase dispersa escolhidas foram de 5% e 15% em volume de óleo e os tamanhos de gota obtidos para cada concentração foram três: gota pequena (GP), gota média (GM) e gota grande (GG). Nesta seção são apresentados os procedimentos e critérios seguidos na elaboração das seis emulsões, incluindo uma breve descrição do equipamento utilizado.

O volume de emulsão preparada para cada amostra foi fixado em 150 ml. A medição dos volumes das fases, foi feita utilizando pipetas automáticas de volume ajustável de 1–5 ml fabricadas pela KACIL[®], apresentada na figura (3.6). As duas fases foram adicionadas lentamente em um béquer de 200 ml, primeiro a fase aquosa e posteriormente o óleo. É importante mencionar que o tipo de béquer utilizado e a ordem de adição das fases sempre foram os mesmos durante a preparação de todas as emulsões, pois ambos os fatores têm forte influência no processo de emulsificação, afetando diretamente o tamanho de gota da fase dispersa das emulsões.



Figura 3.6: Pipeta de volume ajustável usada na preparação das emulsões.

Para o processo de emulsificação foi utilizado o misturador mecânico rotativo ULTRA TURRAX T-25 com seis velocidades de rotação, de 6500 até 24000 rpm. Este misturador fabricado pela IKA-WERKE usa um dispersor do tipo rotor-estator. A figura (3.7) mostra o misturador e o dispersor. A formação das gotas é produzida por cisalhamento no espaço anular entre o rotor e o estator. Para iniciar a mistura das fases, o dispersor foi posicionado até o fundo no centro

do béquer. Durante o processo de mistura o béquer foi movimentado manualmente de modo suave, tanto no sentido vertical quanto no horizontal.

O tempo de mistura e a velocidade rotação do misturador foram os fatores controlados para determinar os diferentes tamanhos de gota das emulsões. A tabela 3.2 apresenta as velocidades de rotação e tempos de mistura empregados na elaboração das emulsões.

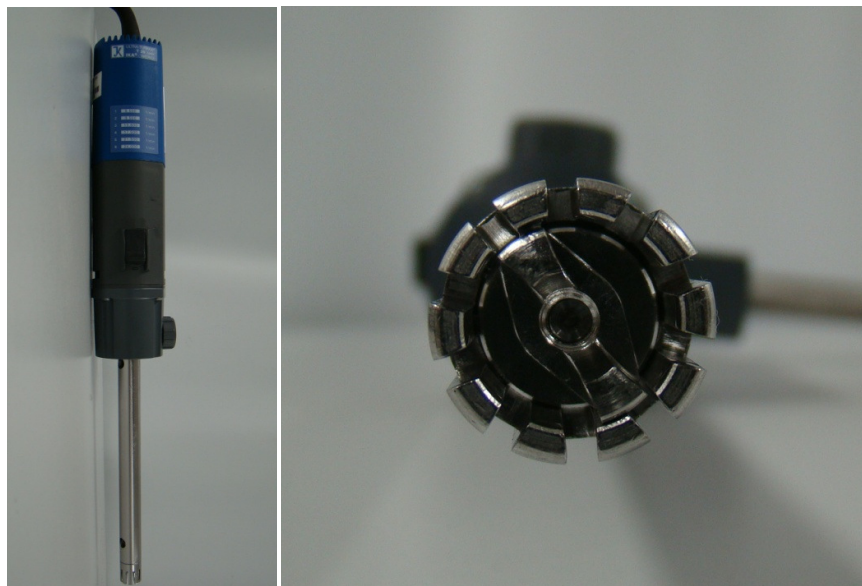


Figura 3.7: Misturador mecânico rotativo Ultra Turrax T-25 e dispersor rotor-estator.

% ÓLEO	EMULSÃO	VELOCIDADE DE ROTAÇÃO [rpm]	TEMPO DE MISTURA [s]
5%	5GP	24000	60
	5GM	6500	30
	5GG	6500	15
15%	15GP	24000	75
	15GM	6500	45
	15GG	6500	20

Tabela 3.2: Parâmetros considerados no processo de emulsificação.

3.1.3.

Caracterização da distribuição do tamanho de gota das emulsões

A distribuição do tamanho de gota da fase dispersa das emulsões foi determinada através de um método óptico utilizando o analisador de partículas MASTERSIZER 2000 fabricado pela MALVERN INSTRUMENTS. A figura (3.8) mostra os componentes deste analisador.

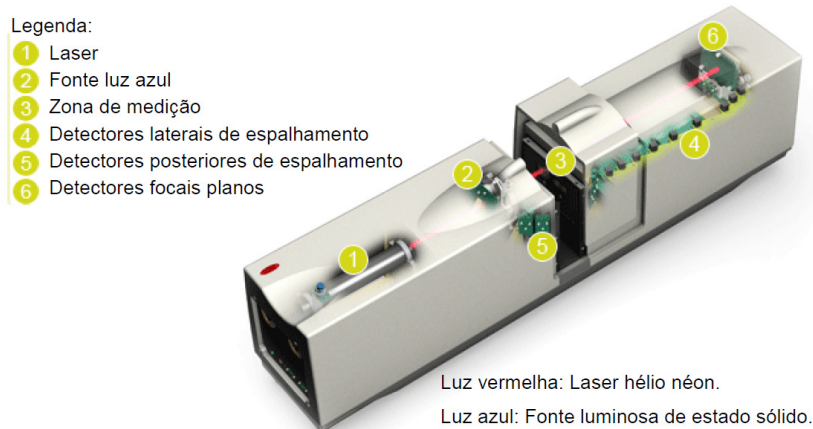


Figura 3.8: Componentes do analisador de partículas Mastersizer 2000 [32].

O MASTERSIZER utiliza o princípio da difração da luz, enviando um feixe de laser através de um dispositivo óptico pelo qual escoia a amostra líquida a ser analisada. Quando o feixe colimado encontra as partículas, parte do laser é difratado e, subsequentemente, focado, por meio de lentes, no detector. Quanto menor o tamanho da partícula, maior será o ângulo de difração [33]. O princípio esquemático de medição do MASTERSIZER 2000 é mostrado na figura (3.9).

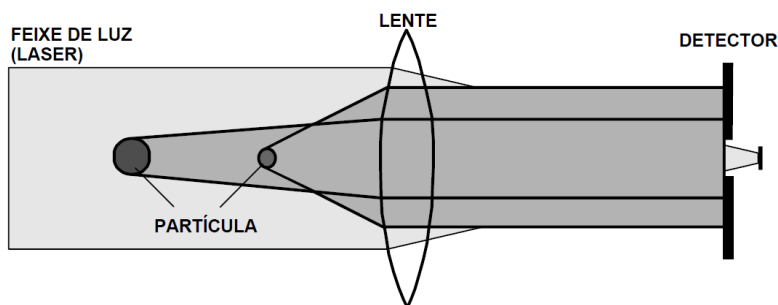


Figura 3.9: Princípio de determinação da distribuição do tamanho de partículas por difração laser [33].

Adicionalmente o sistema opera com um equipamento de dispersão e bombeio HYDRO 2000MU para realizar a recirculação e escoamento da amostra a ser analisada através do MASTERSIZER 2000. A figura (3.10) apresenta o sistema de bombeio e o Mastersizer.



Figura 3.10: Sistema Mastersizer 2000 e Hydro 2000MU.

Nesta análise, foram avaliados três dos resultados fornecidos pelo software da MALVERN INSTRUMENTS:

- A distribuição percentual em volume da fase dispersa em função do diâmetro de gota ou distribuição de tamanho de gota.
- O diâmetro máximo de gota do volume de 50% da fase dispersa da emulsão analisada ou $d(0.5)$.
- O diâmetro máximo de gota do volume de 90% da fase dispersa da emulsão analisada ou $d(0.9)$.

A caracterização do tamanho de gota das emulsões foi efetuada após 24 horas da sua preparação e antes da sua injeção nos capilares com o objetivo de conferir a estabilidade das emulsões no desenvolvimento dos testes. Antes de cada caracterização foi necessário agitar manualmente de modo suave a emulsão. A amostra de emulsão selecionada para a análise através do MASTERSIZER 2000 foi de 2 ml.

Os gráficos das distribuições de tamanho de gota das seis emulsões são apresentados nas figuras (3.11) e (3.12) para as concentrações de 5% e 15% em volume de óleo, respectivamente.

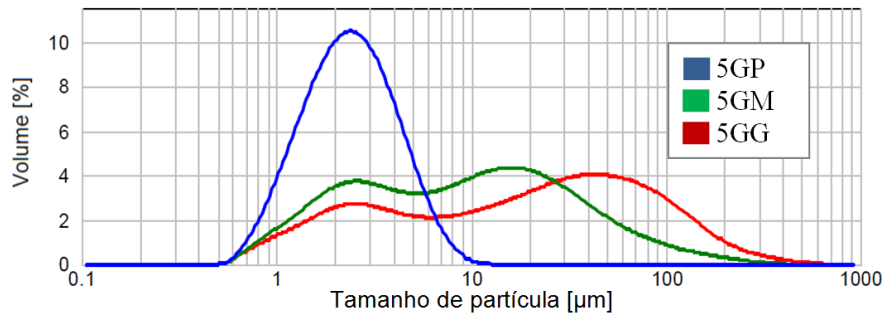


Figura 3.11: Distribuição de tamanho de gota das emulsões de 5% em volume de óleo.

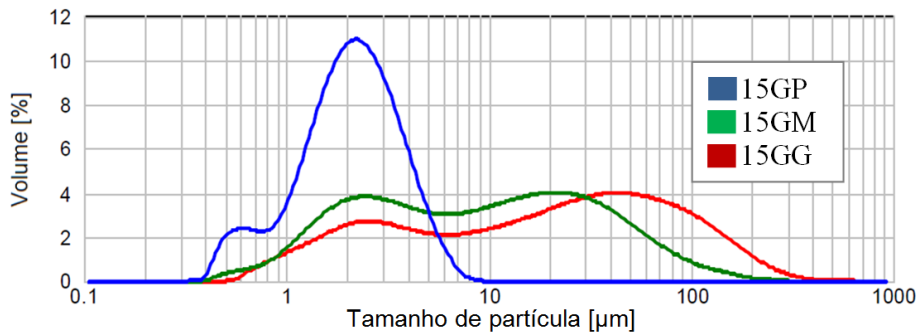


Figura 3.12: Distribuição de tamanho de gota das emulsões de 15% em volume de óleo.

Os diâmetros de gota $d(0.5)$ e $d(0.9)$ são apresentados na tabela 3.3 acompanhados dos parâmetros antes mostrados na tabela 3.2 a fim de expor os resultados em função das condições dos processos de formação das emulsões.

EMULSÃO	VELOCIDADE DE ROTAÇÃO [rpm]	TEMPO DE MISTURA [s]	$d(0.5)$ [μm]	$d(0.9)$ [μm]
5GP	24000	60	2.370	4.805
5GM	6500	30	9.437	48.654
5GG	6500	15	20.952	109.737
15GP	24000	75	2.1	4,094
15GM	6500	45	9.3	49.689
15GG	6500	20	21.018	111.174

Tabela 3.3: Parâmetros de emulsificação e características morfológicas das emulsões.

3.1.4. Bancada experimental

A bancada experimental empregada para obter os resultados apresentados no presente capítulo é composta de três sistemas: (i) o sistema de injeção, (ii) o sistema de medição da queda de pressão e, (iii) o sistema de visualização do escoamento. A figura (3.13) é uma representação esquemática da bancada experimental desenvolvida nesta abordagem.

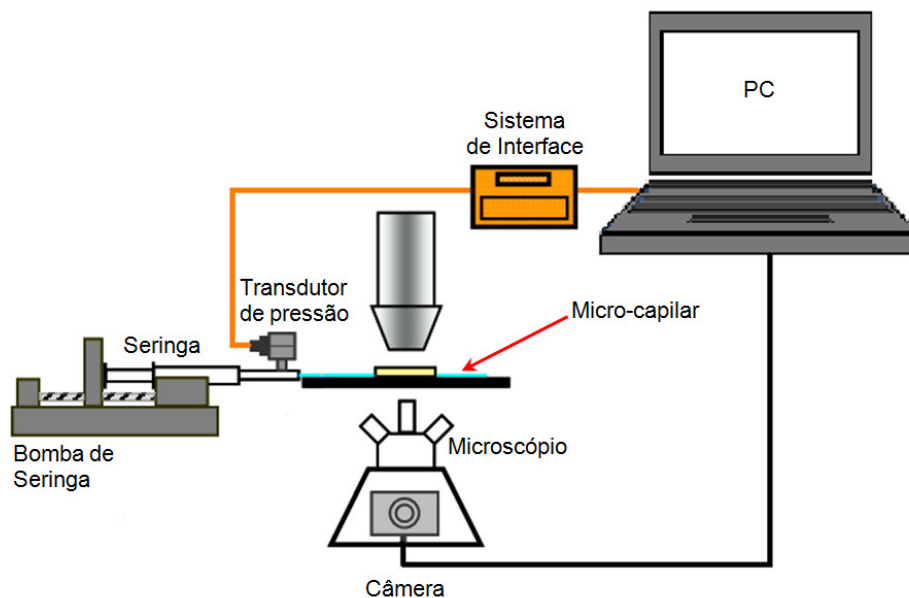


Figura 3.13: Esquema da bancada experimental.

3.1.4.1. Sistema de Injeção

Este sistema é composto pela bomba de seringa, a seringa, o micro-capilar e os acessórios utilizados para a montagem do circuito.

As emulsões foram injetadas utilizando uma bomba de seringa COLE-PALMER[®] 78-0100C. Este tipo de bomba possui um motor de passo e engrenagens controlado por um microprocessador, que permite fornecer taxas volumétricas de injeção com $\pm 0.5\%$ de exatidão e $\pm 0.2\%$ de reprodutibilidade das medições [34].

A seringa utilizada foi a MULTIFIT de vidro de 3 ml e ponta com conexão tipo “*luer lock*”, que permite uma conexão hermética com uma torneira três vias EMBRAMED de plástico com o mesmo tipo de conexão em duas das suas vias. Este tipo de torneira facilitou o uso do menor número de acessórios possíveis no sistema seringa-capilar-transdutor. A figura (3.14) apresenta os componentes do sistema de injeção e a sua montagem.

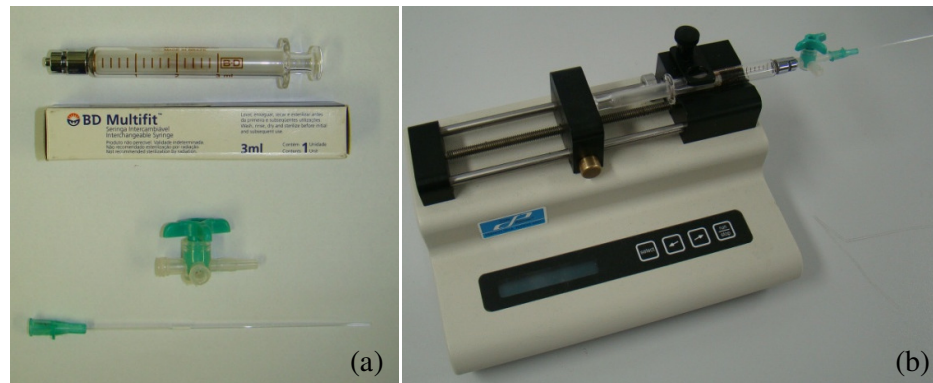


Figura 3.14: (a) Seringa, torneira três vias e capilar utilizados na injeção das emulsões. (b) Montagem dos componentes na bomba de seringa.

Dois tipos de micro-capilares de vidro com garganta, fabricados pela HILGENBERG®, foram utilizados nesta abordagem experimental para avaliar o efeito da geometria no escoamento. O comprimento e o diâmetro externo de ambos os capilares foram de 80 mm e 1.0 mm respectivamente. O diâmetro da seção reta do primeiro micro-capilar foi de 200 μ m e o diâmetro da sua garganta de 50 μ m. Os diâmetros da seção reta e da garganta do segundo micro-capilar foram 100 μ m e 50 μ m respectivamente. A figura (3.15) apresenta a configuração da geometria destes capilares.

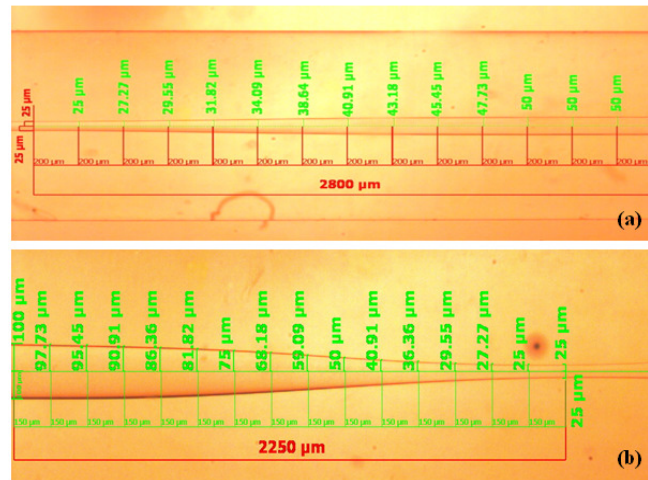


Figura 3.15: (a) Capilar 100/50µm. (b) Capilar 200/50µm [19].

3.1.4.2. Sistema de medição da queda de pressão

Na aquisição de dados da queda de pressão do escoamento foram utilizados: um transdutor de pressão, uma placa de terminais externa, uma placa de interface e um computador para controlar o sistema e salvar os dados.

O transdutor de pressão utilizado foi do tipo diafragma da VALIDYNE Mod. DP15-TL, No. 132116, de $\pm 0.25\%$ de exatidão no total da escala (FS - full scale). O transdutor é apresentado na figura (3.16).



Figura 3.16: Transdutor de pressão Validyne DP15-TL.

A variação de pressão no diafragma do transdutor é transmitida como valor de voltagem para a placa de terminais externa VALIDYNE P/N 12871-1. Esta

placa, com conexão independente para termopares e oito conjuntos de terminais para diversos sensores, transmite o sinal analógico para a placa de interface VALIDYNE UPC2100 conectada diretamente no computador através de uma porta PCI. A conexão entre as placas é feita mediante o cabo de fita P/N 12870-5 [35]. As figuras (3.17) e (3.18) mostram os componentes do sistema de medição de queda de pressão.

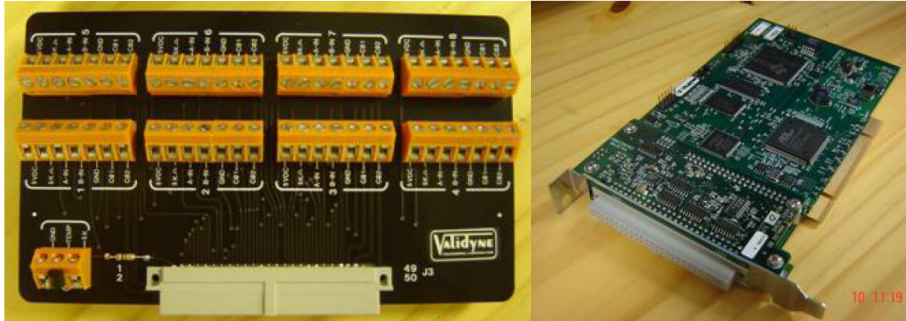


Figura 3.17: Placa de terminais Validyne P/N 12871-1 (esquerda) e placa de interface Validyne UPC2100 (direita).

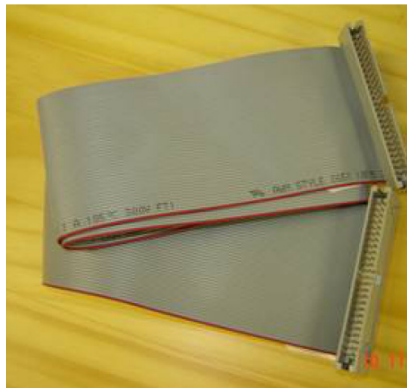


Figura 3.18: Cabo P/N 12870-5 utilizado na conexão entre as placas.

A aquisição e o tratamento dos dados no computador foram efetuados mediante o software EASY SENSE 2100 fornecido pela VALIDYNE, compatível com Visual Basic e C++ permitindo o armazenamento dos dados em Excel. Na configuração do software foi necessário obter a curva de calibração do transdutor, definindo o fator de escala, o fator de “offset” e o sistema de unidades a ser utilizado. Também é possível programar a aquisição de dados segundo o tempo de

aquisição, o número de dados a ser obtido, o intervalo de aquisição e as unidades de tempo.

3.1.4.3. Sistema de visualização do escoamento

O sistema de visualização desenvolvido para visualizar o escoamento das emulsões através de micro-capilares constava de um microscópio ótico invertido Carl Zeiss Axiovert 40MAT operado com luz transmitida e com cinco objetivas (2.5x, 5x, 10x, 20x e 50x), como apresentado na figura (3.19). Uma câmera PixeLINK PL-A662, apropriada para aplicações de microscopia, foi adaptada diretamente com o microscópio permitindo transmitir as imagens em tempo real para o computador. A aquisição, visualização e análise das imagens foram feitas usando o software AxioVision 4.7 fornecido pela Carl Zeiss.



Figura 3.19: Microscópio invertido Carl Zeiss Axiovert 40MAT.

3.1.5. Procedimento experimental

Após a caracterização do tamanho de gota para conferir a estabilidade da emulsão, um volume aproximado de 5 ml foi vertido lentamente na seringa de vidro conectada à torneira. Antes de conectar o micro-capilar no extremo liso da torneira, tomou-se o cuidado de expulsar o ar contido na seringa e na torneira. Um volume adicional de emulsão foi vertido cuidadosamente na cavidade interior do

transdutor, no lado onde o fluido está em contato com o diafragma a fim de evitar a presença de bolhas que pudessem comprometer a medição da queda de pressão. O transdutor, finalmente, foi conectado à montante do capilar, na conexão “*luer lock*” livre da torneira três vias. A outra conexão do diafragma no transdutor foi deixada aberta para atmosfera, como apresentado na figura (3.20).

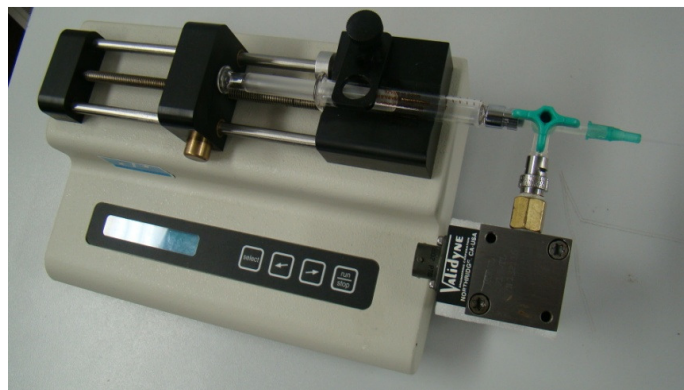


Figura 3.20: Montagem do sistema de injeção e transdutor.

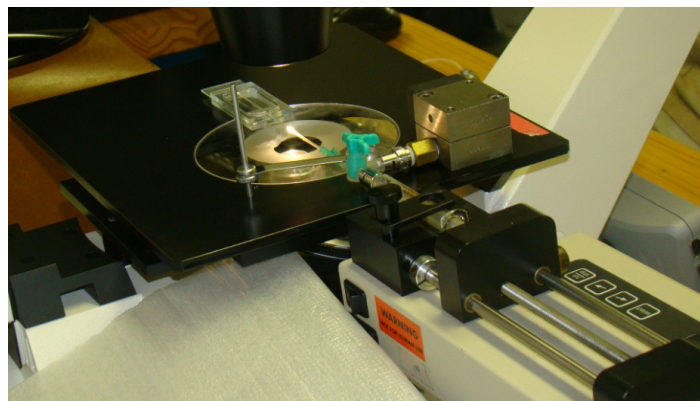


Figura 3.21: Montagem do sistema de injeção e transdutor no microscópio.

No momento da montagem do sistema seringa-capilar-transdutor na bomba de seringa, foi necessário nivelar o conjunto com a mesa de trabalho do microscópio para evitar que possíveis deslocamentos da seringa na bomba alterassem as medições e para evitar também deslocamentos do capilar no microscópio, como apresentado na figura (3.21). Antes de realizar os ajustes de foco no microscópio, o capilar foi submerso em uma piscina de glicerina para melhorar a visualização do escoamento.

Para injetar as emulsões, a bomba de seringa operou em modo de injeção contínua. Os parâmetros requeridos pelo controlador da bomba neste modo foram vazão de injeção e diâmetro da seringa, fornecido pela BD-MULTIFIT®.

Na injeção das emulsões, para iniciar a aquisição de valores da queda de pressão no micro-capilar, foi necessário aguardar até o sistema estabilizar na vazão determinada. Desta forma, testes prévios foram desenvolvidos a fim de determinar o tempo necessário para o sistema estabilizar para as diferentes vazões e as diferentes emulsões a serem injetadas nos dois micro-capilares.

A aquisição de dados foi efetuada em intervalos de 500 milissegundos (2 valores de queda de pressão por segundo). O tempo de aquisição de dados foi de 15 minutos por teste e cada teste foi repetido 5 vezes. No final de cada teste a injeção de emulsão e a aquisição de dados foram interrompidas. Após esperar 20 minutos, a injeção foi reiniciada. Para começar a aquisição de dados foi necessário esperar o sistema estabilizar na mesma forma como efetuado na primeira vez.

Nesta abordagem experimental o sistema de visualização permitiu monitorar o escoamento ao longo do capilar com o objetivo de revelar a presença de qualquer impureza ou bolhas que pudessem comprometer o escoamento, garantindo que os incrementos na queda de pressão fossem gerados unicamente pelo passo das gotas da fase dispersa através da garganta.

Finalmente, a saída de emulsão pelo capilar foi controlada submergindo o extremo livre do capilar em uma piscina de fase contínua.

3.1.6. Dificuldades encontradas no processo experimental

Durante os processos de preparação e injeção das emulsões foram encontradas algumas dificuldades. As medidas tomadas para superá-las ou controlá-las são descritas nesta seção a fim de serem consideradas em futuras pesquisas.

Estudar o escoamento de emulsões através de diâmetros de 200 μm até 50 μm implica que qualquer corpo estranho desta ordem de grandeza pode perturbar o escoamento. Como mencionado anteriormente, esta dificuldade foi superada controlando o escoamento mediante o sistema de visualização. Desta forma, quando detectadas impurezas ou bolhas no capilar o teste foi interrompido,

detendo a aquisição de dados. No caso de impurezas, o capilar foi desmontando para ser limpo, já no caso de presença de bolhas, a injeção continuou até conseguir expulsá-las completamente do sistema. Em ambos os casos o teste foi descartado iniciando outro teste, segundo o procedimento acima descrito.

Para evitar a presença de impurezas no escoamento, os fluidos foram filtrados em cada etapa da elaboração das emulsões. Adicionalmente a vidraria e os equipamentos utilizados na preparação e manipulação das emulsões foram devidamente limpos para evitar a contaminação das fases.

Na formulação e preparação das emulsões, foi confirmado que as emulsões são sensíveis aos métodos e procedimentos de preparo [14]. Portanto, os procedimentos seguidos durante as diferentes etapas de preparação, montagem e operação nos testes, foram padronizados para garantir a repetitividade e a comparação dos resultados.

A tentativa de procurar estabelecer um tempo médio de estabilização do escoamento para as diferentes emulsões foi inconveniente. A forte influência da concentração da fase dispersa, do tamanho de gota e da vazão de injeção no escoamento das emulsões determinou ser necessário estabelecer experimentalmente, mediante testes prévios, o tempo de estabilização para cada tipo de emulsão.

3.2. Resultados

Nesta seção são apresentados os resultados experimentais obtidos a partir dos testes efetuados sob as condições anteriormente descritas. A análise destes resultados permitirá determinar o efeito da geometria de capilar, da concentração da fase dispersa e do tamanho de gota no escoamento de emulsões através de micro-capilares com garganta. As vazões de injeção para todos os testes foram de 0.02, 0.03, 0.04, 0.05, 0.06, 0.07 e 0.08 ml/h. Na figura (3.22) é apresentado o esquema resumo do roteiro seguido para o desenvolvimento dos testes na presente abordagem experimental.

Como explicado anteriormente, a queda de pressão necessária para deslocar as gotas da fase dispersa através do capilar é assumida como a queda de pressão adicional considerada a partir da queda de pressão requerida para a fase contínua

escoar através do capilar. Desta forma, os resultados a seguir mostram os valores de queda de pressão em função da vazão do escoamento das emulsões e da fase contínua através dos dois tipos de capilares para as duas concentrações em volume de óleo.

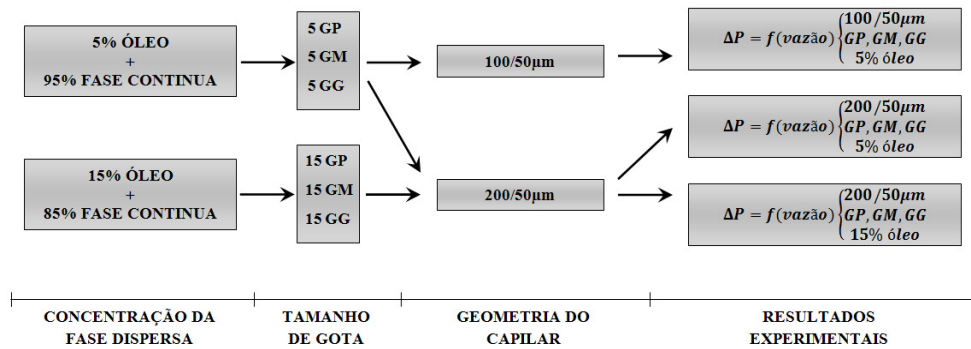


Figura 3.22: Roteiro seguido no desenvolvimento da presente abordagem experimental.

As figuras (3.23) e (3.24) mostram a queda de pressão do escoamento da fase contínua e das emulsões de 5% em volume de óleo através dos capilares de 100/50µm e 200/50µm respectivamente. O tempo de injeção para cada vazão foi de 15 minutos.

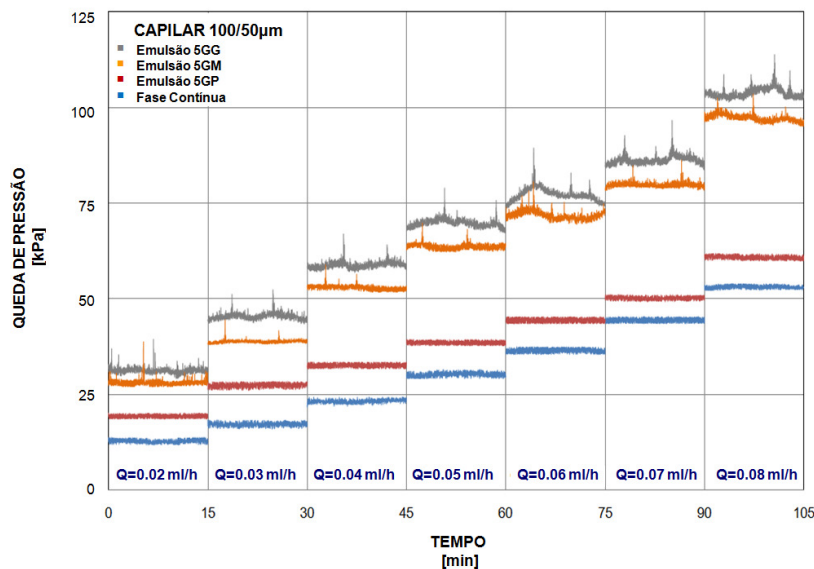


Figura 3.23: Queda de pressão em função da vazão no escoamento das emulsões de 5% de óleo através do capilar 100/50µm.

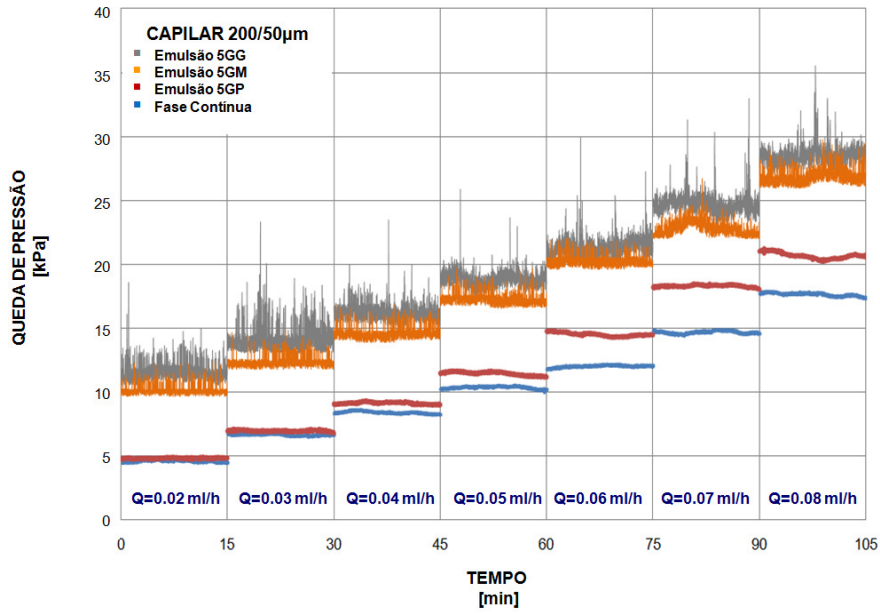


Figura 3.24: Queda de pressão em função da vazão no escoamento das emulsões de 5% de óleo através do capilar 200/50 μ m.

Da mesma forma, considerando também um tempo de injeção de 15 minutos para cada vazão, na figura (3.25) é apresentada a queda de pressão do escoamento da fase contínua e das emulsões de 15% em volume de óleo através do capilar de 200/50 μ m.

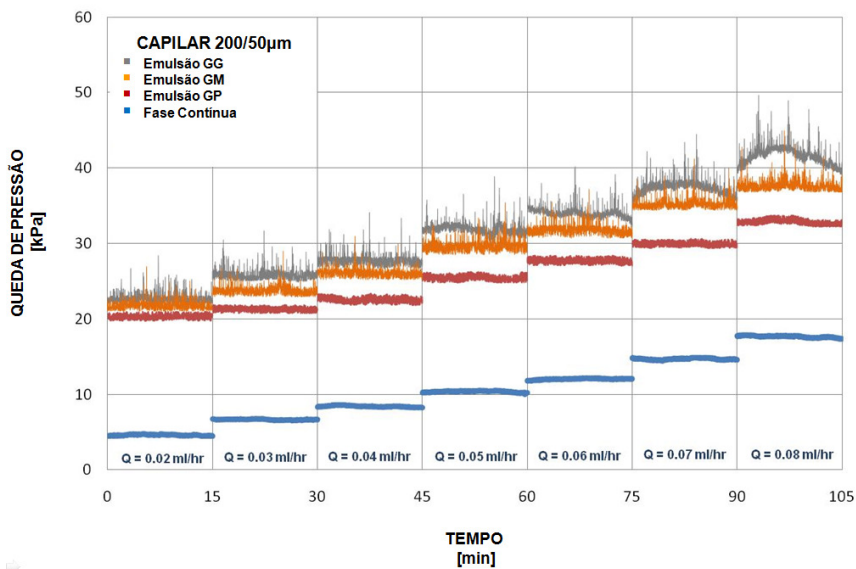


Figura 3.25: Queda de pressão em função da vazão no escoamento das emulsões de 15% de óleo através do capilar 200/50 μ m.

O processamento dos resultados experimentais, apresentados acima, foi realizado em termos dos valores médios de queda de pressão da fase contínua e das emulsões para cada vazão do escoamento através dos diferentes microcapilares, como apresentado nas figuras (3.26), (3.27) e (3.28).

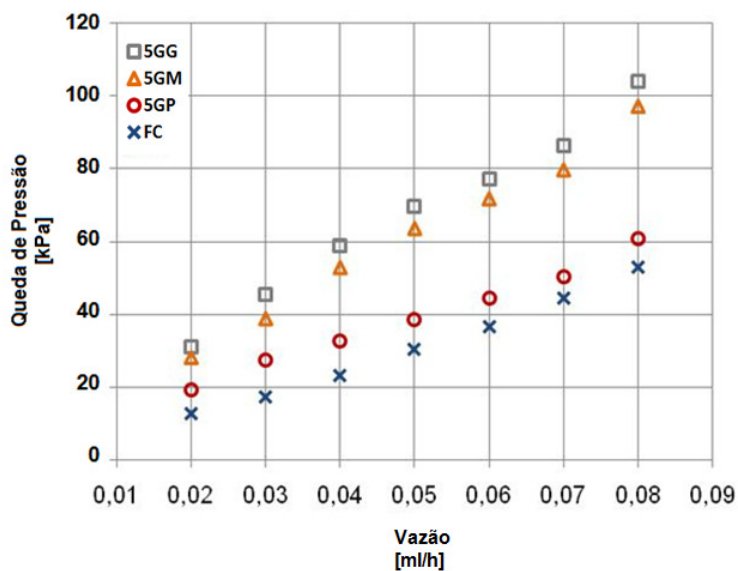


Figura 3.26: Valores médios de queda de pressão em função da vazão no escoamento das emulsões de 5% de óleo através do capilar 100/50µm.

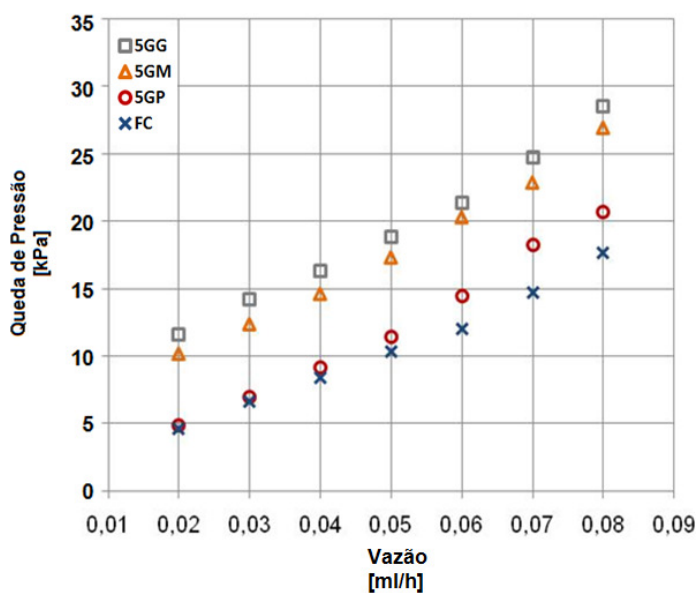


Figura 3.27: Valores médios de queda de pressão em função da vazão no escoamento das emulsões de 5% de óleo através do capilar 200/50µm.

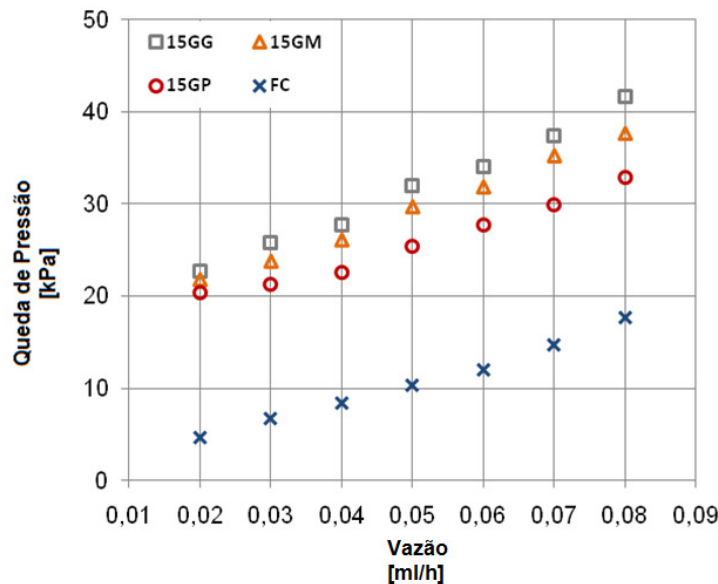


Figura 3.28: Valores médios de queda de pressão em função da vazão no escoamento das emulsões de 15% de óleo através do capilar 200/50 μ m.

A análise do efeito de cada parâmetro no escoamento é desenvolvida nas seções a seguir.

3.2.1. Efeito da geometria do capilar.

O efeito da geometria do capilar no escoamento de emulsões óleo em água é avaliado fixando os parâmetros de concentração da fase dispersa e o tamanho de gota. Desta forma, foram injetados os três tipos emulsões de 5% em volume de óleo (5GP, 5GM e 5GG) através dos dois tipos de micro-capilares. A vantagem de utilizar estas duas geometrias de capilar é que ambos os capilares têm o mesmo diâmetro de garganta, mas diferente diâmetro da seção reta, o que permite avaliar o escoamento das emulsões através de diferentes geometrias de poro, representadas por cada diâmetro da seção reta do capilar.

A diferença de pressão total é a soma da queda de pressão através da seção reta do capilar e através da garganta. Como a queda de pressão, a uma vazão fixa, é inversamente proporcional ao raio do capilar, observa-se uma queda de pressão bem maior no caso do capilar com 100 μ m de diâmetro de seção reta.

3.2.2. Efeito da concentração de óleo nas emulsões

O efeito da concentração de óleo no escoamento das emulsões foi avaliado utilizando emulsões de 5% e 15% em volume de óleo. Os parâmetros fixados para esta avaliação foram a geometria de capilar e o tamanho de gota da fase dispersa. Assim, foram injetadas as emulsões com ambas as concentrações de óleo através do micro-capilar 200/50 μ m. Como explicado anteriormente, cada tamanho de gota (pequeno, médio e grande) obtido, são da mesma ordem de grandeza para ambas as concentrações de óleo.

Dos resultados apresentados nas figuras (3.27) e (3.28) para as concentrações de 5% e 15% em volume de óleo respectivamente, é possível notar, em ambos os casos, a mesma tendência no aumento da queda de pressão conforme a vazão é incrementada. Entretanto, em todas as vazões os valores de queda de pressão são maiores no escoamento das emulsões de maior concentração de óleo.

No caso particular das emulsões de gota pequena são observadas duas tendências contrárias para cada concentração. A emulsão 5GP apresenta valores de queda de pressão muito próximos aos valores registrados pela fase contínua. Já os valores de queda de pressão no escoamento da emulsão 15GP estão muito próximos aos valores obtidos na injeção de emulsões de tamanho de gota maiores, sendo estes valores de aproximadamente três vezes o valor da queda de pressão da fase contínua, para as menores vazões, e de aproximadamente o dobro para as vazões maiores.

Este comportamento é uma indicação do mecanismo responsável pelo aumento da queda de pressão devido à presença da fase dispersa. Em emulsões com concentração alta (15%), o efeito viscoso devido à substituição de um fluido menos viscoso (fase contínua) por um fluido mais viscoso (fase dispersa) é mais forte que o efeito capilar associado à deformação da gota.

No caso do escoamento das emulsões de gota grande (5GG e 15GG), o aumento da concentração de óleo nas emulsões gerou um incremento significativo da queda de pressão.

3.2.3. Efeito do tamanho de gota da fase dispersa

O efeito do tamanho de gota no escoamento de emulsões óleo em água através de micro-capilares foi avaliado em termos de três tamanhos de gota. Como apresentado na tabela 3.3, a emulsão de gota pequena (GP) apresenta gotas de diâmetro menor que o diâmetro da garganta dos capilares. O tamanho das gotas da emulsão de gota média (GM) é aproximadamente do mesmo valor que o diâmetro da garganta dos capilares. E no caso das emulsões de gota grande (GG) o tamanho das gotas é maior que o diâmetro da garganta. Vale ressaltar também que as maiores gotas das emulsões GG são aproximadamente do mesmo tamanho do diâmetro da seção reta do capilar de $100\mu\text{m}$.

Os resultados nas figuras (3.26), (3.27) e (3.28) mostram em todos os casos que as emulsões de tamanho de gota grande produzem maiores valores de queda de pressão no escoamento para toda faixa de vazão e para ambas as concentrações. Este efeito se deve à resistência apresentada pela gota na sua deformação durante a passagem através da garganta e no escoamento através da seção reta do capilar. Especificamente, os maiores valores de queda de pressão foram produzidos no escoamento da emulsão 5GG através do capilar $100/50\mu\text{m}$, onde o tamanho da gota é da mesma ordem de grandeza que o diâmetro da seção reta e maior que o diâmetro da garganta.

As emulsões de gota pequena não têm efeito significativo no incremento da perda de pressão. Como mencionado na seção anterior este efeito é considerável só no caso de emulsão gota pequena com concentração de 15% em volume de óleo.

Estes resultados demonstram que o escoamento de emulsões de maior tamanho de gota gera valores maiores de queda de pressão, sendo este efeito predominante para todas as geometrias de capilar, vazões e concentração em volume de óleo.

3.2.4. Fator de bloqueio em função do número de capilaridade

Nesta seção, os valores médios de queda de pressão e de vazão foram expressos adimensionalmente através do fator de bloqueio e do número de

capilaridade definidos no capítulo 2 através das equações (2.5) e (2.2) respectivamente.

No cálculo do fator de bloqueio foram utilizados os valores médios da queda de pressão da fase contínua e das emulsões para cada vazão imposta. O cálculo do número de capilaridade foi efetuado considerando a velocidade média do escoamento, a viscosidade da fase contínua e a tensão interfacial da emulsão.

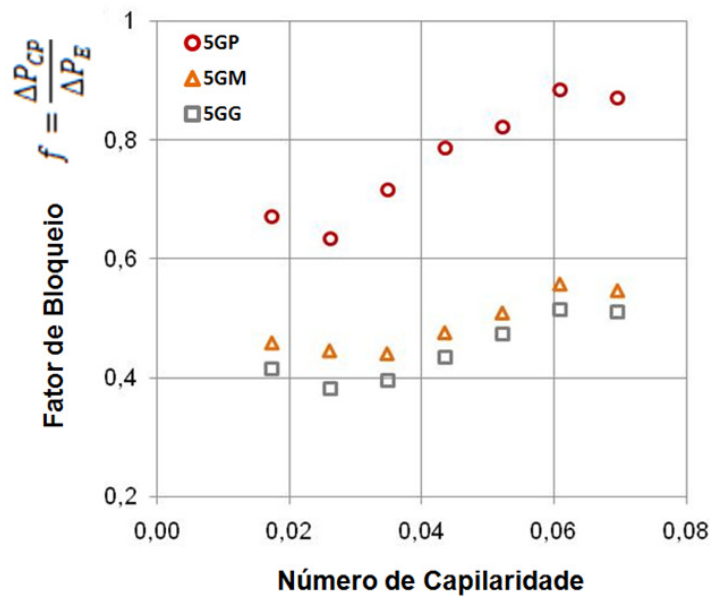


Figura 3.29: Fator de bloqueio em função do número de capilaridade no escoamento das emulsões de 5% de óleo através do capilar 100/50 μ m.

A figura (3.29) mostra o fator de bloqueio f , em função do número de capilaridade Ca , para o escoamento dos três tipos de emulsões de 5% em volume de óleo através do capilar 100/50 μ m. No caso do escoamento da emulsão de gota pequena o valor do fator de bloqueio é aproximadamente $f \sim 0.9$ para os maiores números de capilaridade e maior que 0.6 para os números de capilaridade menores. Já no escoamento de gotas com tamanho igual ou maior que o diâmetro da garganta, os valores do fator de bloqueio oscilam entre 0.4 e 0.6, apresentando incrementos pouco significativos conforme o número de capilaridade aumenta. Esta dependência fraca do fator de bloqueio com o número de capilaridade confirma que os efeitos viscosos dominam o escoamento destas emulsões através do capilar 100/50 μ m.

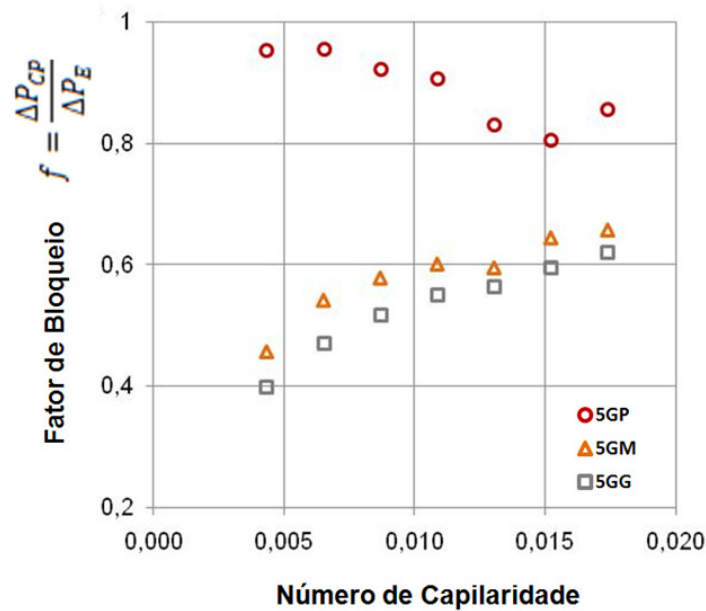


Figura 3.30: Fator de bloqueio em função do número de capilaridade no escoamento das emulsões de 5% de óleo através do capilar 200/50 μ m.

O fator de bloqueio em função do número de capilaridade para o escoamento dos três tipos de emulsões de 5% em volume de óleo através do capilar 200/50 μ m, é apresentado na figura (3.30). O escoamento de gotas pequenas não mostra dependência com o número de capilaridade, pois o valor do fator de bloqueio é aproximadamente $f \sim 1$ tanto para valores menores quanto maiores do número de capilaridade. O efeito da presença das gotas da fase dispersa é muito pequeno. No caso do escoamento das gotas médias e grandes é observada uma queda significativa no valor do fator de bloqueio conforme o número de capilaridade decai. Esta variação indica uma forte dependência do fator de bloqueio com o número de capilaridade, confirmando que os efeitos capilares dominam o escoamento para estes dois tamanhos de gota. Desta forma, o bloqueio de poro é possível a baixos valores de número de capilaridade mediante a injeção de emulsões de tamanho de gota maiores que o diâmetro da garganta.

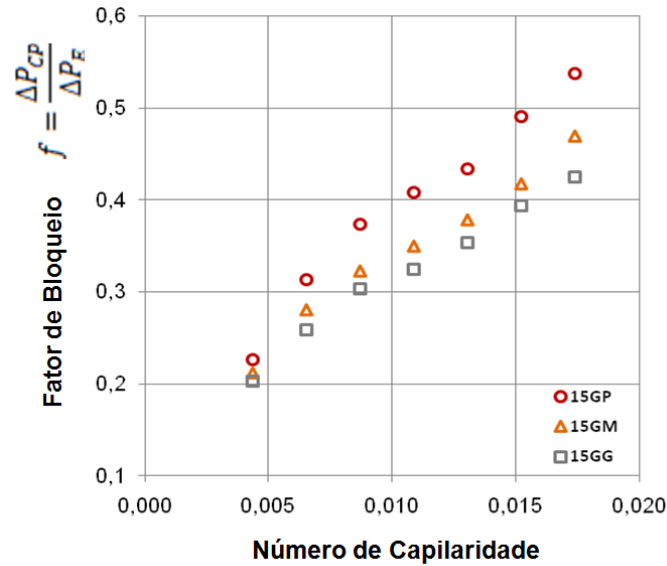


Figura 3.31: Fator de bloqueio em função do número de capilaridade no escoamento das emulsões de 15% de óleo através do capilar 200/50 μ m.

Finalmente, a figura (3.31) apresenta o fator de bloqueio em função do número de capilaridade para o escoamento dos três tipos de emulsões de 15% em volume de óleo através do capilar 200/50 μ m. No escoamento das três emulsões injetadas o valor do fator de bloqueio aumenta conforme o número de capilaridade cresce. Esta forte dependência no número de capilaridade demonstra o domínio dos efeitos capilares no escoamento dos três tamanhos de gota. Neste caso, o bloqueio de poro é factível a baixos números de capilaridade mediante a injeção de quaisquer dos três tamanhos de gota. No escoamento de gotas pequenas o efeito de bloqueio de poro é possível devido ao incremento da concentração de óleo na emulsão produzindo uma aglomeração de gotas na entrada da garganta.

Adicionalmente, é importante mencionar que, comparando as figuras (3.30) e (3.31), o efeito do incremento da concentração de óleo gerou de forma geral uma diminuição do fator de bloqueio no escoamento das três emulsões.

3.3. Comentários

O estudo do escoamento de emulsões óleo em água através de micro-capilares com garganta foi desenvolvido mediante a análise dos efeitos produzidos pelas propriedades das emulsões e pelas características geométricas do meio por onde elas escoam na relação entre queda de pressão e vazão das emulsões. As propriedades das emulsões avaliadas foram tamanho de gota e concentração de óleo. Dois tipos de micro-capilares foram utilizados para representar duas geometrias de poro.

Os resultados do escoamento das emulsões foram avaliados em termos dos valores médios da queda de pressão para diferentes vazões e adimensionalmente através do fator de bloqueio em função do número de capilaridade.

A análise do efeito do tamanho de gota na relação queda de pressão – vazão mostrou que o escoamento de emulsões de tamanho de gota próximo ou maior ao diâmetro da garganta produz maior queda de pressão.

Da análise do efeito da concentração de óleo, deduz-se uma relação diretamente proporcional entre concentração de óleo e queda de pressão no escoamento. O efeito mais significativo da concentração se apresentou no escoamento das emulsões de gota pequena atingindo valores de queda de pressão próximos aos valores gerados no escoamento de gotas médias.

A análise da geometria de capilar mostrou que a relação, diretamente proporcional, entre queda de pressão e vazão apresenta os maiores valores e os maiores incrementos de queda de pressão no escoamento das emulsões através do capilar 100/50 μm .

A análise do fator de bloqueio em função do número de capilaridade mostrou que o escoamento das emulsões de 5% através do capilar 100/50 μm é dominado pelos efeitos viscosos, independente do tamanho de gota, alcançando maiores valores de fator de bloqueio. No escoamento das emulsões de 15% em volume de óleo através do capilar 200/50 μm , é dominante o efeito capilar acompanhado de baixos valores de fator de bloqueio nos três tamanhos de gota. Finalmente, o escoamento das emulsões de 5% em volume de óleo através do capilar 200/50 μm apresentou dois resultados. Para a emulsão de gota pequena, a tendência dos valores de fator de bloqueio mostra que o escoamento é dominado

pelos efeitos viscosos, já no caso das gotas de tamanho médio e grande o efeito capilar é dominante a baixos valores de número de capilaridade.

A partir da avaliação dos resultados apresentados nesta pesquisa, o bloqueio de poro acontecerá a baixos números de capilaridade mediante a injeção de emulsões com tamanho de gota próximo o maior que o tamanho da garganta de poro (garganta do capilar) no caso de concentrações de 5% em volume de óleo e para concentrações de 15% em volume de óleo o bloqueio aconteceu também a baixos números de capilaridade na injeção dos três tamanhos de gota.

Os resultados obtidos representam informação importante na aplicação de emulsões como agentes de controle da mobilidade e no desenvolvimento do modelo de rede de capilares na recuperação avançada de petróleo.