

## 2

### Modelo simplificado de escoamento bifásico em um micro-capilar com garganta

#### 2.1.

#### Conceitos fundamentais

##### 2.1.1.

##### Emulsões

Uma emulsão é uma dispersão de líquidos imiscíveis, sendo um deles a fase contínua que contém os demais, chamados de fases dispersas, na forma de gotículas.

Segundo o tamanho das gotas da fase dispersa as emulsões podem ser consideradas como macro-emulsões ou micro-emulsões. Nas macro-emulsões, as gotas da fase dispersa têm diâmetros maiores a  $0,01 \mu\text{m}$ . Estes sistemas heterogêneos possuem estabilidade mínima, precisando de agentes emulsionantes ou surfactantes para serem estabilizados, evitando a coalescência das gotas. Já nas micro-emulsões, as gotas da fase dispersa são menores do que o comprimento de onda de luz visível (380 a 780 nm), o que faz com que sejam misturas transparentes ou translúcidas [14]. A tabela 2.1 apresenta as semelhanças e diferenças entre macro-emulsões e micro-emulsões.

| Propriedade                   | Macro-emulsão         | Micro-emulsão              |
|-------------------------------|-----------------------|----------------------------|
| Componentes                   | Óleo-água-surfactante | Óleo-água-surfactante      |
| Número de surfactante         | Um ou mais de um      | Um ou mais de um           |
| Tipo de surfactante           | Todos                 | Todos                      |
| Concentração de surfactante   | Muito baixo           | Muito alto                 |
| Tamanho de gota               | Micrômetros           | $0.01 - 0.001 \mu\text{m}$ |
| Estabilidade termodinâmica    | Instável              | Estável                    |
| Estabilidade de armazenamento | Função da formulação  | Infinito                   |

Tabela 2.1: Macro-emulsões versus micro-emulsões [14].

Na produção de petróleo, os líquidos imiscíveis que interagem são o óleo e a água. Dependendo da proporção volumétrica relativa entre ambos os fluidos, as emulsões produzidas podem ser água-em-óleo (A/O: a água é a fase dispersa) ou óleo-em-água (O/A: o óleo é a fase dispersa). As formações mais complexas, como água-em-óleo-em-água (A/O/A) ou óleo-em-água-em-óleo (O/A/O), podem ser classificadas como emulsões múltiplas [15]. A figura (2.1) apresenta os tipos de emulsão segundo as fases que as compõem.

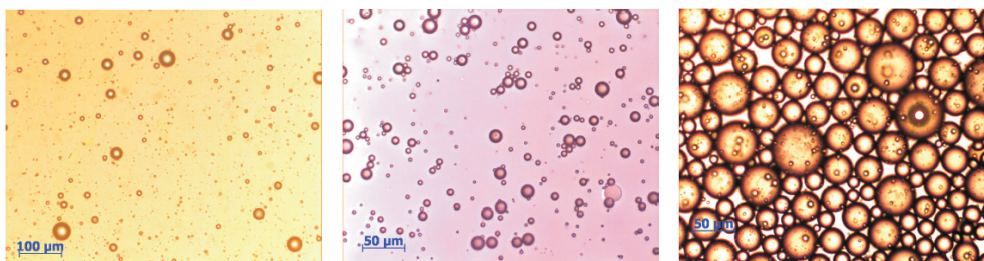


Figura 2.1: Tipos de emulsão segundo os seus componentes: emulsão água em óleo (esquerda), emulsão óleo em água (centro) e emulsão múltipla a/o/a (direita) [16].

No desenvolvimento das análises apresentadas nos seguintes capítulos, foram utilizadas emulsões de óleo em água, sendo o diâmetro das gotas da fase dispersa suficientemente grande para serem consideradas macro-emulsões.

### 2.1.2. Estabilidade das emulsões

Uma emulsão é considerada estável quando acontece pequena ou nenhuma mudança no tamanho de gota da fase dispersa num determinado intervalo de tempo. As emulsões apresentam uma tendência natural para se separarem em suas fases constitutivas diminuindo a área interfacial e conseqüentemente a energia interfacial. A maioria das emulsões geradas na produção de petróleo são cineticamente estáveis devido à presença de agentes estabilizantes (surfactantes), que se concentram na interface óleo/água formando filmes que reduzem a tensão interfacial, evitam a coalescência e promovem a dispersão e emulsificação das gotas [14, 17].

O tamanho de gota da fase dispersa representa também um fator determinante na estabilidade das emulsões. As emulsões de menor tamanho de gota apresentam maior estabilidade, sendo mais difícil a separação das fases [18].

### 2.1.2.1. Surfactante

O surfactante é uma substância composta de moléculas formadas por uma parte não polar afim aos óleos ou lipofílica e uma parte polar afim à água ou hidrofílica. A parte lipofílica da molécula de surfactante, composta por um hidrocarboneto de cadeia simples ou ramificada, é usualmente chamada de cauda e a parte hidrofílica de cabeça [19,20]. A figura (2.2) apresenta a estrutura típica de uma molécula de surfactante.

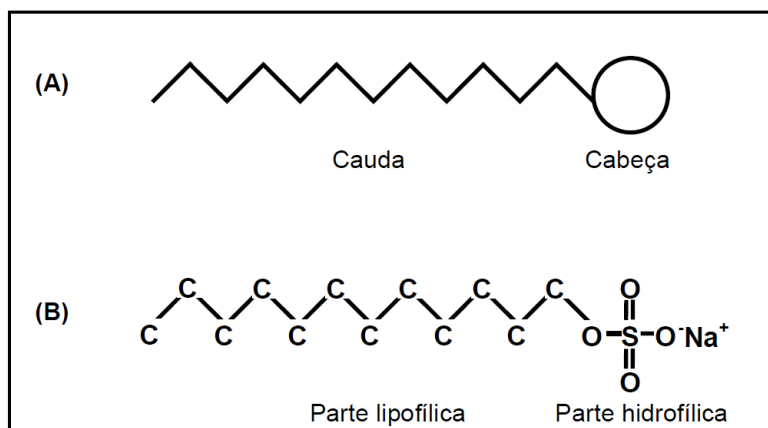


Figura 2.2: (A) Esquema simplificado de uma molécula ativa de superfície. (B) Estrutura molecular do surfactante dodecil sulfato de sódio [19].

Como descrito anteriormente, em um sistema heterogêneo de duas substâncias imiscíveis de polaridade diferente, o surfactante se concentra na interface entre as duas substâncias. Desta forma, a parte hidrofílica, ou cabeça, orienta-se na direção da fase polar (aquosa) e a parte lipofílica, ou cauda, na direção da fase não polar (oleosa) [14]. A orientação e a estrutura das moléculas de surfactante são apresentadas na figura (2.3).

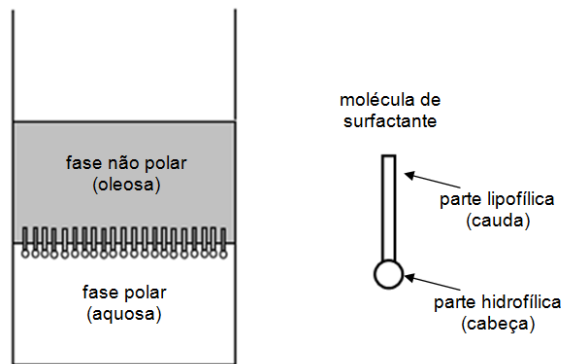


Figura 2.3: Estrutura e orientação das moléculas de surfactante.

### 2.1.2.2. Concentração micelar crítica

O efeito estabilizador de um surfactante, além de depender da sua compatibilidade química com as fases, depende também da sua concentração na mistura. A concentração acima da qual a interface torna-se saturada, fazendo com que as moléculas de surfactante excedentes formem aglomerados na solução, conhecidos como micelas, é denominada concentração micelar crítica (CMC). A partir desta concentração a tensão interfacial entre as fases atinge o seu valor mínimo permanecendo praticamente constante. A formação das micelas acontece em uma das fases e produz mudanças nas propriedades da solução [14].

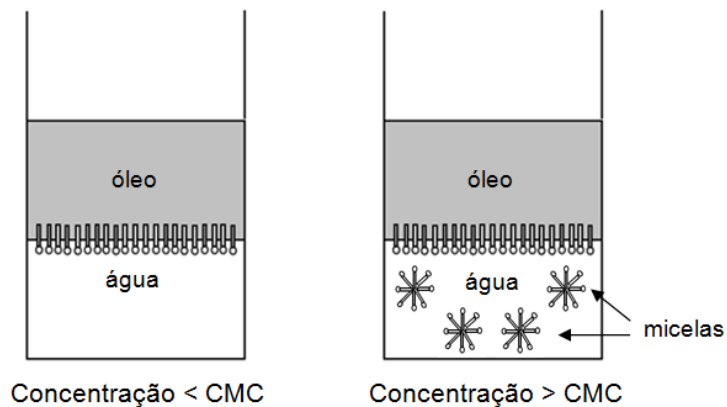


Figura 2.4: Processo de formação de micelas de surfactante.

O surfactante utilizado no presente estudo foi o dodecil sulfato de sódio com concentração micelar crítica de 2.3 g/l. A figura (2.4) é uma representação da formação de micelas.

### **2.1.3. Reologia das emulsões**

De forma geral, as propriedades reológicas de uma emulsão dependem dos seguintes parâmetros: viscosidade da fase contínua, concentração da fase dispersa, distribuição do tamanho de gotas e natureza e concentração do surfactante.

A viscosidade de uma emulsão pode ser significativamente maior do que a viscosidade das suas fases. No caso das emulsões bem diluídas o comportamento é Newtoniano. Para maiores concentrações da fase dispersa, as emulsões apresentam um comportamento não Newtoniano, sendo a viscosidade uma função da taxa de cisalhamento. Desta forma, quando a viscosidade decresce com o aumento da taxa de cisalhamento, o comportamento é denominado pseudo-plástico. O comportamento oposto, difícil de ser observado em emulsões, é denominado dilatante. O comportamento visco-plástico acontece a altas concentrações de fase dispersa, onde é gerada uma estrutura que só pode ser destruída aplicando uma tensão maior do que um valor crítico, conhecido como tensão limite de escoamento [16,19].

### **2.1.4. Tensão superficial e tensão interfacial**

A tensão interfacial pode ser definida como a força por unidade de comprimento que age isotropicamente tangente ao plano da interface entre duas fases líquidas. Se a força é aplicada na interface líquido-gás, é denominada tensão superficial, sendo dependente da temperatura e da concentração das fases. Mesmo com aplicações diferentes, não existe diferença entre ambos os fenômenos, sendo esta distinção unicamente por convencionalismo [8, 14].

Antonoff, em 1907, desenvolveu uma relação entre a tensão interfacial e a tensão superficial. A relação, apresentada na equação (2.1), postula que em uma mistura de dois líquidos imiscíveis em equilíbrio, a tensão interfacial é aproximadamente igual à diferença das tensões superficiais de cada fase.

$$\sigma_i = \sigma_{s1} - \sigma_{s2} \quad (2.1)$$

Onde,  $\sigma_i$  é a tensão interfacial,  $\sigma_{s1}$  e  $\sigma_{s2}$  são as tensões superficiais da fase 1 e 2, respectivamente. [21, 22].

### 2.1.5. Número de capilaridade

Para um melhor entendimento da interação das forças viscosas e capilares no escoamento de emulsões através de micro-capilares, a análise dos resultados experimentais é efetuada através do uso de um parâmetro adimensional que define a razão entre as forças viscosas e capilares. Este parâmetro é denominado de número de capilaridade. A equação (2.2) define o número de capilaridade,  $Ca$ , em termos da velocidade média do escoamento  $\bar{V}$ , a viscosidade da fase contínua  $\mu_{FC}$  e a tensão interfacial da emulsão  $\sigma_{int}$  [7].

$$Ca = \frac{\mu_{FC} \bar{V}}{\sigma_{int}} \quad (2.2)$$

## 2.2. Escoamento de emulsões através de micro-capilares

### 2.2.1. O fator de bloqueio

Para o escoamento laminar completamente desenvolvido no interior de um tubo horizontal, onde o gradiente de pressão é constante, a vazão em volume pode ser expressa como uma função da queda de pressão [23]. No caso do escoamento da fase contínua, de viscosidade  $\mu_{FC}$ , através de um micro-capilar reto de raio  $R$  e comprimento  $L$ , a vazão em volume é definida na equação (2.3).

$$Q = \frac{\pi R^4}{8\mu_{FC}} \frac{\Delta P_{FC}}{L} \quad (2.3)$$

No caso do escoamento de emulsões através de micro-capilares com garganta, a vazão da emulsão pode ser expressa utilizando a equação (2.3), através da aplicação dos seguintes critérios. Primeiro, a queda de pressão produzida pela passagem das gotas da fase dispersa através da garganta do micro-capilar, é considerada como uma queda de pressão adicional à queda de pressão produzida no escoamento da fase contínua. Segundo, o gradiente de pressão por unidade de comprimento ( $\Delta P/L$ ) produzido no micro-capilar com garganta é equivalente ao gradiente de pressão por unidade de comprimento produzido num capilar reto com um raio equivalente  $\bar{R}$ . Finalmente, no cálculo da vazão da emulsão, a viscosidade da emulsão foi aproximada à viscosidade da fase contínua. Desta forma, incluindo um coeficiente que relacione as aproximações descritas anteriormente, a equação (2.4) foi desenvolvida para calcular a vazão de uma emulsão através de um micro-capilar com garganta.

$$Q = f \frac{\pi \bar{R}^4}{8\mu_{FC}} \frac{\Delta P_E}{L} \quad (2.4)$$

Para um mesmo valor de vazão, o coeficiente  $f$ , pode ser definido em função de ambas as quedas de pressão, como apresentado na equação (2.5).

$$f = \frac{\Delta P_{FC}}{\Delta P_E} \quad (2.5)$$

A partir desta definição, o coeficiente  $f$  é denominado fator de bloqueio. Valores do fator de bloqueio próximos a 1 indicam que a presença das gotas da fase dispersa no escoamento não leva a incrementos consideráveis da queda de pressão para uma vazão fixa. Já valores menores do que 1 indicam que a presença das gotas da fase dispersa leva a um aumento da queda de pressão do escoamento a uma vazão fixa.

No estudo do escoamento de emulsões através de micro-capilares, a relação vazão-gradiente de pressão pode ser expressa como o fator de bloqueio, que depende dos parâmetros do escoamento, e.g. geometria do capilar, tamanho de gotas da emulsão, viscosidade das fases, etc...

## 2.2.2. Mecanismos de bloqueio

A variação da mobilidade do escoamento de uma gota de óleo através de um micro-capilar, isto é o bloqueio parcial do escoamento, ocorre por dois diferentes mecanismos: viscoso e capilar.

### 2.2.2.1. Mecanismo Viscoso

No mecanismo de bloqueio viscoso, o incremento da queda de pressão é produzido pela substituição de fluido de baixa viscosidade, neste caso a fase contínua, por outro de elevada viscosidade, fase dispersa, como apresentado na figura (2.5).

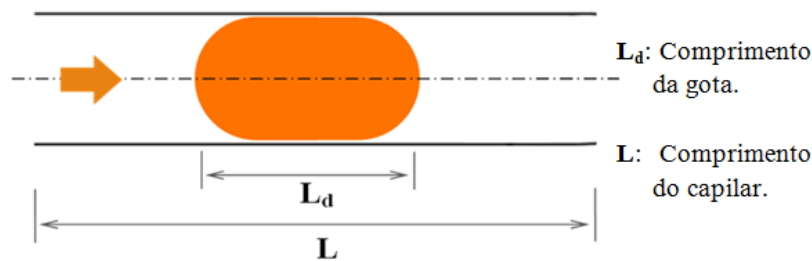


Figura 2.5: Esquema do escoamento de uma gota de fase dispersa através de um capilar reto.

A velocidade de uma gota diminui à medida que o seu diâmetro cresce, até atingir um limite de diâmetro próximo ao diâmetro do capilar [24]. O mecanismo viscoso de mudança de mobilidade será discutido aqui para gotas com diâmetros próximos ao diâmetro do capilar.

Para uma diferença de pressão fixa, é fácil explicar a queda da vazão do escoamento com a presença de uma gota viscosa observando o perfil de velocidade nas duas fases, como esquematizado na figura (2.6), que compara os perfis de velocidade do escoamento monofásico de água com o escoamento bifásico óleo-água.



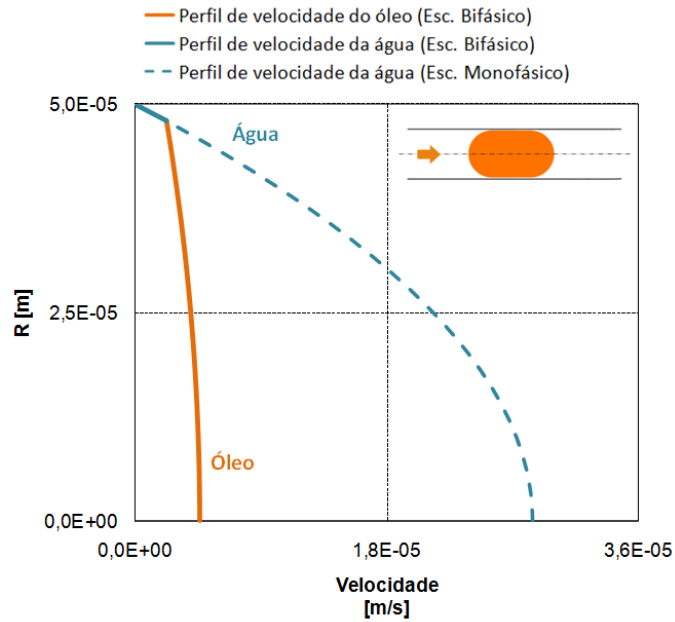


Figura 2.6: Perfis de velocidade do escoamento bifásico óleo-água através de um capilar reto de 100  $\mu\text{m}$  de diâmetro para uma queda de pressão de 5 kPa.

A derivada da velocidade na parede é uma função direta do gradiente de pressão. Se a diferença de pressão for constante, o perfil de velocidade do filme de água adjacente à parede do capilar será idêntico ao perfil do escoamento monofásico de água, como indicado na figura. No caso do escoamento bifásico, o perfil de velocidade da fase oleosa será mais chato devido a sua maior viscosidade. Claramente a vazão do escoamento bifásico é menor que a do escoamento monofásico.

A razão entre as vazões pode ser quantificada em função da viscosidade das fases e espessura da camada de água junto à parede através do cálculo dos perfis de velocidade com as condições de contorno apropriadas.

A mobilidade do escoamento bifásico em um tubo capilar de raio  $R$  pode ser calculada como:

$$\bar{k} = \frac{Q}{\Delta P/L} = 1 + \left(\frac{R_d}{R}\right)^4 \left[\frac{\mu_{FC}}{\mu_o} - 1\right] \quad (2.6)$$

A mobilidade cai à medida que o raio da gota,  $R_d$ , aproxima-se ao raio do capilar,  $R$ , e  $\mu_o \rightarrow \infty$ .

Adicionalmente, a concentração da fase dispersa da emulsão foi aproximada pela relação entre o comprimento da gota  $L_d$  e o comprimento do capilar  $L$ , como apresentado na equação (2.7).

$$\phi \sim \frac{L_d}{L} \quad (2.7)$$

Desta forma, a análise do mecanismo de bloqueio viscoso é realizada através da definição do fator de bloqueio expressa na equação (2.8).

$$f = \frac{\bar{k}}{\bar{k}(1 - \phi) + \phi} \quad (2.8)$$

Este mecanismo é caracterizado pelo decréscimo do fator de bloqueio no escoamento de emulsões com fase dispersa de elevada viscosidade e para incrementos da concentração da fase dispersa e da relação entre o raio da gota e o raio do capilar. O escoamento de emulsões, neste mecanismo, é governado pelos efeitos viscosos apresentando uma dependência fraca com o número de capilaridade, que influi no diâmetro da gota (espessura do filme na parede).

#### 2.2.2.2. Mecanismo Capilar

No mecanismo de bloqueio capilar, o incremento da queda de pressão no escoamento bifásico é gerado pela variação da curvatura (deformação) da gota da fase dispersa na sua passagem através da garganta do micro-capilar, como esquematizado na figura (2.7).

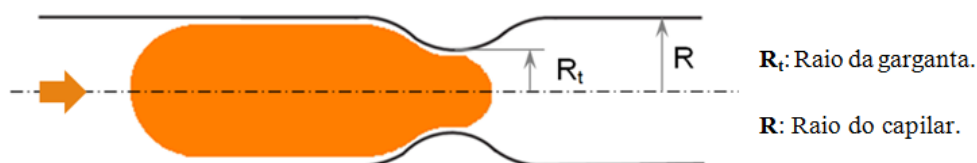


Figura 2.7: Esquema do escoamento de uma gota de fase dispersa através da garganta do capilar.

A passagem da gota de fase dispersa através da garganta do capilar produz uma queda de pressão adicional, que em alguns casos é maior do que a queda de pressão produzida pelo escoamento da mesma gota através do capilar reto. Esta queda de pressão adicional está associada à diminuição do raio de curvatura da frente da gota e será máxima na passagem da gota através das menores seções da garganta. Nas condições necessárias, com a aplicação de um gradiente de pressão constante adequado, pode-se reter uma gota de tamanho conhecido em uma garganta de diâmetro específico. O procedimento descrito representa o mecanismo de bloqueio de um meio poroso através da injeção de emulsões [25].

Nesta análise simplificada, a queda de pressão do escoamento a uma vazão constante é alterada pela pressão capilar  $\Delta P_{cap}$ , necessária para a gota passar pela garganta de raio  $R_t$ . A pressão capilar é definida pela equação (2.9) em função da variação da curvatura da frente da gota e da tensão interfacial.

$$\Delta P_{cap} = 2\sigma \left( \frac{1}{R_t} - \frac{1}{R} \right) \quad (2.9)$$

Considerando que a queda de pressão do escoamento de uma emulsão através de um micro-capilar com garganta é a soma da queda de pressão produzida no escoamento da fase contínua através deste micro-capilar e a pressão capilar, o fator de bloqueio pode ser definido como:

$$f = \frac{\Delta P_{FC}}{\Delta P_{FC} + \Delta P_{cap}} = \frac{1}{1 + \frac{\bar{R}^2}{4LCa} \left( \frac{1}{R_t} - \frac{1}{R} \right)} \quad (2.10)$$

Neste mecanismo o decréscimo do fator de bloqueio é mais forte em capilares com gargantas menores e a baixos valores do número de capilaridade. Para valores do número de capilaridade altos, o fator de bloqueio se aproxima a 1, demonstrando uma forte dependência do escoamento com o número de capilaridade.

### 2.3. Revisão bibliográfica

Nesta seção, são apresentados os estudos realizados na área de escoamento de emulsões em meios porosos e no desenvolvimento do modelo de micro-capilar, que serviram de base e motivação para a presente dissertação.

McAuliffe, em 1973 [11], estudou o escoamento de emulsões através de meios porosos, demonstrando que as emulsões óleo em água podem ser utilizadas como agente de bloqueio seletivo para melhorar a recuperação de óleo através da injeção de água. No estudo, o autor observou que a eficiência de deslocamento de óleo no meio poroso é maior no caso da injeção de emulsões com tamanho de gota igual ou ligeiramente maior que o diâmetro da constricção poro-capilar.

Alvarado e Marsden, em 1979 [26], estudaram experimentalmente o escoamento de emulsões de óleo em água através de meios porosos e tubos capilares. Os resultados mostraram o mesmo comportamento reológico em ambos os casos. Desta forma, as emulsões com concentrações de fase dispersa menores a 40% apresentaram um comportamento Newtoniano, enquanto o comportamento das emulsões com concentrações maiores foi pseudo-plástico.

Olbricht e Leal, em 1983 [25], avaliaram o escoamento de uma gota através de um tubo capilar de diâmetro periodicamente variável (gargantas), observando oscilações de pressão devido à passagem da gota através das gargantas. A análise dos resultados foi efetuada para regimes de baixo e elevado número de capilaridade. No primeiro caso, só foram avaliadas gotas com viscosidade menor do que a viscosidade da fase contínua, registrando oscilações de pressão para as gotas com tamanho da ordem do diâmetro da garganta do capilar. Já no segundo caso, avaliando viscosidades tanto maiores quanto menores do que a viscosidade da fase contínua, as oscilações de pressão foram mínimas, observando-se uma forte dependência da queda de pressão com a relação entre viscosidades de ambas as fases.

Soo e Radke (1984) [27] desenvolveram uma análise experimental do escoamento de emulsões estáveis diluídas através de meios porosos. Nesta abordagem, foi possível determinar uma diminuição da permeabilidade considerando o mecanismo de captura de gotas de fase dispersa como um processo de filtragem. As gotas de óleo da emulsão injetada, além de ser retidas

bloqueando os poros e capilares de menor tamanho, também são capturadas pelas paredes dos poros e fissuras. O resultado do processo de filtração foi avaliado em função da variação da distribuição do tamanho de gota medida na entrada e na saída da amostra porosa.

Khambharatana (1993) [28] realizou uma análise teórica e experimental do escoamento de emulsões em meios porosos, estudando os mecanismos físicos que acontecem durante o escoamento. Nesta análise, observou-se que o mecanismo descrito por Soo e Radke, é governado por um processo de filtração. Adicionalmente, para as taxas de cisalhamento estudadas, foi observado que a variação da viscosidade das emulsões no meio poroso apresentou uma tendência similar ao comportamento num viscosímetro.

Bragg, em (1999) [12], apresentou a injeção de emulsões como um método químico alternativo de recuperação de óleo pesado com a capacidade de desenvolver um eficiente controle da mobilidade da água no deslocamento do óleo através do meio poroso. O estudo, fundamentado em testes de campos com resultados de relativo sucesso, considera a aplicação da injeção de emulsões mais favorável que o uso da injeção de polímeros.

Janssen (2000) [29] estudou o escoamento de gotas imersas em uma fase líquida através de capilares a fim de desenvolver um melhor entendimento do escoamento de emulsões em meios porosos, observando uma forte influência da interface líquido-líquido no escoamento em meios porosos.

Guillen, em 2007 [7], injetou alternadamente água e emulsões óleo-em-água através de uma amostra de rocha de arenito arcósico, melhorando significativamente o fator de recuperação de óleo. Adicionalmente, os resultados experimentais demonstraram incrementos da queda de pressão devido ao mecanismo bloqueio no meio poroso.

Del Águila, em 2008 [19], desenvolveu o estudo experimental do escoamento de emulsões através de diferentes capilares com garganta. Nesta análise foi demonstrado que no escoamento de emulsões através de capilares de menor diâmetro, a queda de pressão aumenta. Adicionalmente, foi mostrado que a mobilidade da emulsão decresce com o incremento da concentração da fase contínua.

Cobos 2009 [30] reparou que as propriedades macroscópicas das emulsões não descrevem o comportamento das emulsões na escala de poro. Com o objetivo

de avaliar o comportamento das emulsões na escala microscópica, um estudo teórico-experimental foi desenvolvido utilizando um micro-capilar com garganta para modelar dois poros adjacentes conectados por uma garganta. O mecanismo de bloqueio no meio poroso foi estudado por meio do escoamento de emulsões óleo em água através de micro-capilares, onde a interação das gotas da fase dispersa com a geometria do capilar produz um bloqueio parcial incrementando a queda de pressão no escoamento. O efeito do tamanho de gota na relação vazão-queda de pressão foi analisado injetando duas emulsões de diferente distribuição de tamanho de gota com a mesma concentração de fase dispersa. Os resultados demonstraram que a flutuação da queda de pressão aumenta no escoamento de emulsões de tamanho de gota grande, reduzindo a mobilidade na passagem das gotas através da garganta do capilar.

Tendo em conta os resultados verificados na literatura, na presente análise serão desenvolvidas duas abordagens experimentais com o objetivo de obter um melhor entendimento do efeito das propriedades das emulsões e da geometria do micro-capilar no escoamento de emulsões através de micro-capilares com garganta. Na primeira abordagem, a queda de pressão será quantificada para diferentes vazões com emulsões de três tamanhos de gota e duas concentrações de óleo em dois micro-capilares diferentes. Na segunda abordagem experimental, os campos de velocidade do escoamento bifásico através de micro-capilares com garganta serão medidos utilizando o sistema de micro-velocimetria por imagem de partículas ou  $\mu$ -PIV. Os resultados das duas análises experimentais fornecerão informação importante para o desenvolvimento de modelos de redes de capilares no estudo do escoamento de emulsões através de meios porosos.