



Eduardo Martín Cabellos Villalobos

**Formação de Emulsão no Escoamento
Bifásico de Óleo e Água através de Orifícios**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da PUC - Rio.

Orientador: Prof. Márcio da Silveira Carvalho
Co-Orientadora: Dra. Ranena Ponce Flores

Rio de Janeiro, Agosto de 2010



Eduardo Martín Cabellos Villalobos

Formação de Emulsão no Escoamento Bifásico de Óleo e Água através de Orifícios

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. Márcio da Silveira Carvalho

Orientador

Departamento de Engenharia Mecânica PUC-Rio

Dra. Ranena Verónica Ponce Flores

Co-orientadora

Departamento de Engenharia Mecânica PUC-Rio

Prof.^a Mônica Feijó Naccache

Departamento de Engenharia Mecânica - PUC-Rio

Prof. Geraldo Afonso Spinelli Martins Ribeiro

PETROBRAS

José Eugenio Leal

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 20 de Agosto de 2010.

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

Eduardo Martín Cabellos Villalobos

Graduou-se em Engenharia Mecânica na Universidad Nacional de Trujillo - UNT (Trujillo, Peru) em 2003

Ficha Catalográfica

Villalobos, Eduardo Martín Cabellos

Formação de emulsão no escoamento bifásico de óleo e água através de orifícios / Eduardo Martín Cabellos Villalobos ; orientador: Márcio da Silveira Carvalho ; co-orientadora: Ranena Ponce Flores. – 2010.

104 f. : il. (color.) ; 30 cm

Dissertação (mestrado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Mecânica, 2010.

Inclui bibliografia

1. Engenharia mecânica – Teses. 2. Emulsões. 4. Válvulas. 5. Escoamento bifásico. I. Carvalho, Márcio da Silveira. II. Ponce Flores, Ranena. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Mecânica. IV. Título.

CDD: 621

A Deus, meu pai Jaime, minha mãe Teresalina, meu irmão Jaime, e minhas queridas irmãs Alexandra, Claudia e Silvana.

Agradecimentos

Quero agradecer

A Deus por tudo o que ele me deu durante minha permanência no Brasil.

Ao Departamento de Engenharia Mecânica da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro pela oportunidade de realizar este trabalho, por se constituir na minha casa de estudos e valorizar minha formação profissional.

Ao CNPq e à PUC-Rio, pelo auxílio financeiro concedido, indispensável na realização do trabalho.

À PETROBRAS, pelo apoio concedido no desenvolvimento desta pesquisa.

Ao meu orientador Prof. Márcio da Silveira Carvalho, pela oportunidade, pela confiança a mim prestada, pelo apoio constante, pelo direcionamento durante a realização deste trabalho e por todo o aprendizado que com ele ganhei. Muito obrigado.

À minha co-orientadora Ranena Ponce Flores, pelas inúmeras ajudas no laboratório, pelo grande apoio, pela exigência no desenvolvimento deste trabalho, e pelo aprendizado que ganhei com ela. Muito obrigado.

À minha família, pelo amor e por ser meu suporte desde sempre.

Aos meus amigos do grupo de trabalho do Professor Márcio Carvalho, Danmer, Raúl, Melisa, Mao, Ana Cecília, Oswaldo, Alessandro, Ana Gabriela, Bruno, Giovane, Deibi, José Francisco, pela amizade e ajuda que sempre me dedicaram.

Aos profissionais do Laboratório de Termociências, em especial aos amigos do grupo de trabalho do Professor Paulo Roberto, Priscila, André, Carina, pela amizade e ajuda que sempre me dedicaram.

Aos meus colegas de graduação da Universidad Nacional de Trujillo, José Luis, Miguel, Edwin, Oswaldo e Deibi, que compartilharam e que ainda compartilham esta enriquecedora experiência aqui no Brasil, pela amizade duradoura e apoio em todo momento.

Aos meus colegas e amigos da PUC-Rio, pela amizade, apoio e por fazerem da minha permanência no Brasil, uma experiência enriquecedora.

À Banca Examinadora, pelas observações contribuídas ao presente trabalho.

A todos os professores e funcionários do Departamento de Engenharia Mecânica, pelos ensinamentos e ajuda.

Resumo

Villalobos, Eduardo Martín Cabellos; Carvalho, Márcio; Ponce, Ranena. **Formação de Emulsão no escoamento Bifásico de Óleo e Água através de Orifícios.** Rio de Janeiro, 2010. 104p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A produção de óleo diminui e a produção de água aumenta com o passar do tempo na vida de um reservatório. A mistura de óleo e água é geralmente produzida na forma de uma emulsão. A formação da emulsão começa no escoamento bifásico no interior do reservatório e sua estrutura muda na medida em que os líquidos escoam através de tubulações, bombas e válvulas até as instalações de superfície. Durante a produção, as gotas maiores da fase dispersa quebram-se mudando a distribuição do tamanho das gotas. É importante conhecer a distribuição de tamanho de gota da fase dispersa da emulsão a fim de projetar as unidades de separação e prever as quedas de pressão ao longo do escoamento. O objetivo do presente trabalho é o estudo do processo de quebra de gotas em capilares retos e válvulas agulha a fim de prever o tamanho das gotas resultantes em função das condições de escoamento. O principal desafio é entender como os diferentes parâmetros operacionais de escoamento afetam o processo de quebra. Duas bancadas experimentais foram utilizadas para o estudo do processo. Na primeira, foi realizada uma análise paramétrica de formação de emulsões em um escoamento laminar através de capilares retos. Os experimentos foram realizados utilizando duas seringas conectadas através de um capilar. A emulsão óleo-em-água foi forçada a uma passagem de ida e vinda através do capilar. O diâmetro médio de gota e a superfície específica da fase dispersa foram obtidos em função da vazão de injeção, taxa de cisalhamento, tempo de residência e trabalho dissipado na parede do capilar. Como esperado, o diâmetro médio da fase dispersa diminui com o aumento do tempo de cisalhamento atingindo um valor assintótico e possui uma grande dependência com a taxa de cisalhamento na parede do capilar. Na segunda bancada, foi realizada uma análise paramétrica de um

escoamento turbulento de emulsão óleo-em-água através de uma válvula agulha. Os experimentos foram realizados utilizando uma bomba helicoidal para controlar a vazão através da válvula. O diâmetro médio de gota e a superfície específica da fase dispersa a montante e a jusante da válvula foram obtidos em função da queda de pressão, vazão e taxa de dissipação de energia na válvula. O diâmetro médio da fase dispersa diminui e a superfície específica aumenta com o aumento da queda de pressão na válvula agulha até atingir um valor assintótico.

Palavras-chave

Emulsões; Válvulas; escoamento Bifásico.

Abstract

Villalobos, Eduardo Martín Cabellos; Carvalho, Márcio (Advisor); Ponce, Ranena. **Emulsion Formation in the Two-Phase Oil-Water Flow through Small Passages**. Rio de Janeiro, 2010. 104p. MSc. Dissertation – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Oil production decreases and water production increases as time goes by in the life of a hydrocarbon reservoir. The mixture of oil and water is usually produced as an emulsion. Emulsion formation starts in the two-phase flow inside the reservoir. The emulsion structure changes as it flows through pipes, pumps and valves up to the surface facilities. During all stages, large drops of the dispersed phase break up leading to smaller drops. It is important to know the droplet size distribution of the dispersed phase in order to design separation units and predict the pressure drop along the flow. The aim of this work is to study the droplets break-up process that takes place in capillaries and in a needle valve in order to make predictions of the size of the resulting droplets that emerge from this process. The main challenge is to understand how the different operating flow parameters affect the break up process. In order to achieve this goal, two laboratory scale experimental set-ups have been used. In the first experiment, we conducted a parametric analysis of oil-water emulsion formation in laminar flow through straight capillaries. The experiments were carried out using two syringe pumps connected by a double-hubbed capillary pipe. The oil-water emulsion is forced back and forth through the pipe. The mean diameter and the specific surface area of the dispersed phase were obtained as a function of flow rate, shear rate, residence time and rate of energy dissipation at the capillary wall. As expected, keeping all other variables fixed, the dispersed phase mean diameter decreases with the shearing time, reaching an asymptotic value, which was a strong function of the shear rate at the capillary wall. Secondly, we conducted a parametric analysis of turbulent oil-in-water emulsion flow through a needle valve. The experiments were carried out using a helicoidal pump to control the

flow rate through the needle valve. The mean diameter and the specific surface area of the dispersed phase upstream and downstream of the valve were obtained as a function of the pressure drop in the valve, flow rate, and rate energy dissipation of the flow. The dispersed phase mean diameter falls and the specific surface area rises with the pressure drop in the valve until reaching an asymptotic value.

Keywords

Emulsion; Valves; Two Phase Flow.

Sumário

1 Introdução	19
1.1. Motivação	21
1.2. Objetivos	23
1.3. Escopo	23
2 Conceitos Fundamentais	24
2.1. Emulsões	24
2.1.1. Tipos de Emulsões	25
2.2. Fatores que afetam o tamanho de gota das emulsões	28
2.2.1. Tensão superficial e tensão interfacial	30
2.2.2. Taxa de cisalhamento	31
2.3. Estabilidade de emulsões	32
2.3.1. Surfactantes	32
2.4. Coalescência	36
2.5. Flocculação	36
2.6. Mecanismos de quebra de gota em uma emulsão	36
2.6.1. Mecanismo de <i>Snap-off</i>	37
2.6.2. Mecanismo de quebra de gota por cisalhamento	37
2.6.3. Mecanismo de quebra de gota por estiramento	38
2.6.4. Mecanismo de formação de canais na parte posterior da gota	39
2.7. Distribuição de tamanho de gota	39
3 Formação de emulsões em capilares retos	41
3.1. Introdução	41
3.2. Abordagem experimental	41
3.2.1. Formulação e preparação das fases da emulsão	42
3.2.2. Procedimento experimental para o processo de emulsificação	50
3.2.3. Caracterização da distribuição de tamanho de gota das emulsões	54
3.2.4. Dificuldades encontradas na abordagem experimental	57

3.3. Resultados experimentais	58
3.4. Comentários finais	68
4 Quebra de gota em emulsões óleo-em-água no escoamento através de uma válvula agulha	70
4.1. Introdução	70
4.2. Abordagem experimental	71
4.2.1. Preparação da fase contínua	71
4.2.2. Preparação da fase dispersa	73
4.2.3. Formulação da emulsão antes da passagem pela válvula agulha	73
4.2.4. Escoamento de emulsões através da válvula agulha	74
4.2.5. Caracterização da distribuição de tamanho de gota das emulsões	83
4.2.6. Dificuldades encontradas na abordagem experimental	83
4.3. Resultados experimentais	84
4.3.1. Resultados experimentais obtidos com o Método 1	84
4.3.2. Resultados experimentais obtidos com o Método 2	90
4.4. Comentários finais	98
5 Comentários finais.	99
6 Referências bibliográficas	101

Lista de figuras

Figura 1.1 Mecanismos de produção responsáveis pelo aumento da fração volumétrica de água durante a recuperação de petróleo. (A) Influxo de água - <i>Conning</i> . (B) Injeção de água.	20
Figura 1.2 Esquema simplificado de um sistema de produção.	22
Figura 2.1 Exemplo de emulsão [13].	24
Figura 2.2 Exemplo de emulsão água-em-óleo-em-água [21].	26
Figura 2.3 Aumento da superfície específica devido à quebra de gota.	28
Figura 2.4 Escoamento de emulsão em uma tubulação.	31
Figura 2.5 (A) Esquema simplificado de uma molécula de surfactante. (B) Estrutura molecular do surfactante dodecil sulfato de sódio ($C_{12}H_{25}SO_4Na^+$) [13].	33
Figura 2.6 Orientação das moléculas de surfactante [13].	34
Figura 2.7 Efeito da concentração de surfactante - Formação de micelas [28].	35
Figura 2.8 Tensão superficial e excesso de superfície do surfactante Dodecil Sulfato de Sódio em função de sua concentração [27].	35
Figura 2.9 Mecanismo de <i>Snap-off</i> em um capilar constrito para um sistema que contém água como fase contínua. Os sub índices “w” correspondem à fase molhante e “nw” à fase não molhante [18].	37
Figura 2.10 Mecanismo quebra de gota por cisalhamento.	38
Figura 2.11 Mecanismo de <i>tip streaming</i> .	38
Figura 2.12 Mecanismo de quebra de gota por estiramento.	39
Figura 2.13 Mecanismo de formação de canais na parte posterior da gota.	39
Figura 3.1 Processo de homogeneização da fase contínua.	43
Figura 3.2 Processo de filtração da fase contínua.	44
Figura 3.3 Picnômetro e balança utilizados na determinação da massa específica da fase contínua.	45
Figura 3.4 Tensiômetro Lauda VO 2001.	45
Figura 3.5 Medição da tensão superficial da fase contínua no tensiômetro Lauda VO 2001.	46
Figura 3.6 Viscosímetro de Canon-Fenske.	47

Figura 3.7 Viscosímetro de Canon-Fenske junto à bomba de vácuo.	48
Figura 3.8 Processo de filtração do óleo Tivela S 460.	49
Figura 3.9 Bomba de seringa Cole - Parmer®.	50
Figura 3.10 Capilares.	51
Figura 3.11 Seringas colocadas na bomba antes de iniciar o processo de emulsificação.	52
Figura 3.12 escoamento das fases através dos capilares.	53
Figura 3.13 Ilustração dos componentes do analisador de partículas Mastersizer 2000. [34].	55
Figura 3.14 Princípio de determinação da distribuição do tamanho de partículas por difração a laser [35].	55
Figura 3.15 Ilustração do Hydro 2000MU e o Mastersizer 2000.	56
Figura 3.16 Exemplo de um resultado de distribuição percentual de tamanho de gota fornecido pelo software do Mastersizer.	57
Figura 3.17 Distribuição de tamanho de gota para a condição experimental #8 da tabela 3.7 para os tempos de experimento de 1800 s (a), 5400 s (b), 7200 s (c), 9000 s (d).	59
Figura 3.18 Efeito do tempo de experimento no $d(0,5)$ para uma vazão de $1,67 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ no capilar 20.	61
Figura 3.19 Efeito do tempo de experimento no $d(0,5)$ para uma vazão de $2,00 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ no capilar 16.	61
Figura 3.20 Efeito da vazão no $d(0,5)$ para um tempo de experimento de 9000 s e as fases escoando através do capilar 18.	62
Figura 3.21 Diâmetro médio de gota da fase dispersa $d(0,5)$ em função da taxa de cisalhamento.	64
Figura 3.22 Superfície específica da fase dispersa (A_T / V_T) em função da taxa de cisalhamento.	65
Figura 3.23 Diâmetro médio de gota da fase dispersa $d(0,5)$ em função do trabalho dissipado no escoamento (W_e).	66
Figura 3.24 Área superficial específica da fase dispersa (A_T / V_T) em função do trabalho dissipado no escoamento (W_e).	67
Figura 3.25 Superfície específica em função do tempo de experimento para o capilar 20 e as vazões de $1,33 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$;	

1,67 x 10 ⁻⁷ m ³ /s e 2,00 x 10 ⁻⁷ m ³ /s.	68
Figura 4.1 Preparação da fase contínua.	72
Figura 4.2 Esquema simplificado da bancada experimental.	74
Figura 4.3 Distribuição de tamanho de gota antes e depois da válvula de agulha para a emulsão formada com o óleo Tivela S 150 a uma vazão de 1,0 l/min e queda de pressão fixada com água na válvula agulha de 15,0 psi.	85
Figura 4.4 Distribuição de tamanho de gota antes e depois da válvula de agulha para a emulsão formada com o óleo Tivela S 150 a uma vazão de 1,5 l/min e queda de pressão fixada com água na válvula agulha de 20,0 psi.	85
Figura 4.5 Diâmetro médio de gota da fase dispersa coletada antes da válvula agulha em função da taxa de dissipação de energia para o óleo Tivela S 150.	87
Figura 4.6 Diâmetro médio de gota da fase dispersa coletada depois da válvula agulha em função da taxa de dissipação de energia para óleo Tivela S 150.	88
Figura 4.7 Superfície específica em função da taxa de dissipação de energia para óleo Tivela S 150.	89
Figura 4.8 Superfície específica em função da queda de pressão para óleo Tivela S 150.	90
Figura 4.9 Distribuição de diâmetro de gota das emulsões coletadas antes e depois da válvula agulha para emulsão formada com o óleo Tivela S 150 a uma vazão de 1,0 l/min e uma queda de pressão inicial de 4,0 psi.	91
Figura 4.10 Distribuição de diâmetro de gota das emulsões coletadas antes e depois da válvula agulha para emulsão formada com o óleo Tivela S 150 a uma vazão de 1,5 l/min e uma queda de pressão inicial de 10,0 psi.	91
Figura 4.11 Diâmetro de médio de gota d(0,5) antes da válvula agulha em função da vazão.	92
Figura 4.12 Superfície específica em função da queda de pressão na válvula agulha.	93
Figura 4.13 Diâmetro de gota da fase dispersa depois da válvula agulha em	

função da taxa de dissipação de energia.	94
Figura 4.14 Diâmetro de gota da fase dispersa depois da válvula agulha em função da vazão.	95
Figura 4.15 Diâmetro médio de gota da fase dispersa $d(0,5)$ coletada depois da válvula agulha em função da queda de pressão para o óleo Tivela S 150 utilizando o Método 2.	96
Figura 4.16 Diâmetro médio de gota em função da queda de pressão utilizando os Métodos 1 e 2.	97

Lista de tabelas

Tabela 2.1 Macro-emulsões versus micro-emulsões [19].	27
Tabela 2.2 Aumento da área superficial em função do número e diâmetro de gotas.	29
Tabela 2.3 Tensões interfaciais entre a fase contínua e várias substâncias calculadas com a regra de Antonoff e medidas diretamente [25].	31
Tabela 3.1 Componentes e concentração da fase contínua.	42
Tabela 3.2 Propriedades das fases contínua e dispersa das emulsões determinadas experimentalmente a 23 °C.	49
Tabela 3.3 Concentração das fases utilizadas no estudo de formação de emulsões em capilares.	50
Tabela 3.4 Descrição dos capilares utilizados para a formação de emulsões segundo os diâmetros internos.	51
Tabela 3.5 Condições experimentais para a formação de emulsões para todos os tempos de experimento (1800, 3600, 5400, 7200 e 9000 s).	54
Tabela 3.6 Condições experimentais adicionais para a formação de emulsões para o tempo de experimento de 9000 s.	54
Tabela 4.1 Composição da fase contínua.	71
Tabela 4.2 Propriedades da fase contínua utilizada no estudo de quebra de gota através de uma válvula agulha.	72
Tabela 4.3 Propriedades das fases dispersas utilizadas no estudo de quebra de gotas através de uma válvula agulha.	73
Tabela 4.4 Condições experimentais para análise de quebra de gotas da emulsão formada com óleo Tivela S 460 através de uma válvula agulha utilizando o Método 1.	77
Tabela 4.5 Condições experimentais para análise de quebra de gotas da emulsão formada com óleo Esso Nuto através de uma válvula agulha utilizando o Método 1.	78
Tabela 4.6 Condições experimentais para análise de quebra de gotas	

da emulsão formada com óleo Tivela S 150 através de
uma válvula agulha utilizando o Método 1. 79

Tabela 4.7 Condições experimentais para análise de quebra de
gotas da emulsão formada com óleo Tivela S 150
através de uma válvula agulha utilizando o Método 2. 82