



Ana Cecilia Miranda Rodriguez

**Formação de Emulsões no Escoamento
Multifásico de Óleo e Água em Meios Porosos**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica da PUC-Rio

Orientador: Prof. Márcio da Silveira Carvalho

Rio de Janeiro
Março de 2010



Ana Cecilia Miranda Rodriguez

**Formação de Emulsões no Escoamento
Multifásico de Óleo e Água em Meios Porosos**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica do Centro Técnico Científico da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. Márcio da Silveira Carvalho

Orientador

Departamento de Engenharia Mecânica — PUC-Rio

Prof. Geraldo Afonso Spinelli Martins Ribeiro

Petrobras

Prof. Luis Fernando Alzguir Azevedo

Departamento de Engenharia Mecânica — PUC-Rio

Prof. José Eugenio Leal

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico — PUC-Rio

Rio de Janeiro, 19 de Março de 2010

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

Ana Cecilia Miranda Rodriguez

Graduou-se em Engenharia Mecânica na *Universidad de los Andes* - (Bogotá, Colômbia) em 2008.

Ficha Catalográfica

Miranda, Ana Cecilia Rodriguez

Formação de Emulsões no escoamento Multifásico de Óleo e Água em Meios Porosos / Ana Cecilia Miranda Rodriguez; orientador: Márcio da Silveira Carvalho. — Rio de Janeiro : PUC–Rio, Departamento de Engenharia Mecânica, 2010.

v., 67 f: il. (color) ; 30 cm

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

Inclui referências bibliográficas.

1. Engenharia Mecânica – Tese. 2. Formação de emulsões;. 3. escoamento em meio poroso;. 4. emulsões múltiplas;. 5. inversão de fase;. 6. morfologia de emulsões;. 7. diâmetro médio de massa. I. Carvalho, Márcio. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Mecânica. III. Título.

CDD:621

Agradecimentos

Aos meus pais.

À ANP pelo auxílio financeiro concedido, indispensável na realização deste trabalho.

Ao meu orientador, professor Márcio da Silveira Carvalho, pela oportunidade de trabalhar no seu grupo de investigação, pelo apoio constante, os conselhos e todo o conhecimento que compartilhou comigo.

Aos membros da banca examinadora, que aceitaram revisar o trabalho e contribuíram com valiosas observações.

À Ranena que me ajudou a resolver oportunamente inúmeros problemas no laboratório.

Resumo

Miranda, Ana Cecilia Rodriguez; Carvalho, Márcio. **Formação de Emulsões no Escoamento Multifásico de Óleo e Água em Meios Porosos**. Rio de Janeiro, 2010. 67p. Dissertação de Mestrado — Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O petróleo raramente é produzido puro, na maioria das vezes ele é produzido junto com água, podendo assumir a forma de emulsão. A formação de emulsões durante a produção de petróleo é altamente problemática para o escoamento e processamento do óleo, causando problemas de garantia de escoamento e aumentando o custo de separação das fases. Esse processo de emulsificação começa no interior do reservatório, no escoamento de água e óleo pelo meio poroso e continua no escoamento bifásico no poço, no fluxo turbulento nas bombas, válvulas e nas instalações de superfície.

Existe incerteza em relação às condições que favorecem a emulsificação dentro dos reservatórios. Este trabalho é focado na formação de emulsões no fluxo multifásico de óleo e água em meios porosos. Um estudo experimental foi desenvolvido para analisar o efeito das variáveis do processo e das características do meio poroso e dos fluidos, na morfologia das emulsões formadas. Água e óleo foram injetados como fases separadas num meio poroso formado por micro-esferas de vidro. Os fluidos produzidos foram coletados e analisados para determinar o tipo de emulsão produzida e suas características morfológicas.

Os resultados dos experimentos mostraram que a morfologia das emulsões depende principalmente das condições operacionais nas quais os fluidos são produzidos. O tamanho das gotas da fase dispersa diminui com o aumento da vazão total e aumenta com o incremento da razão de vazão água-óleo. Constatou-se também que as características do meio poroso são determinantes nas características físicas das emulsões. Um meio poroso de maior permeabilidade levou à produção de emulsões com distribuições de tamanho de gota mais dispersas e maior diâmetro médio de massa. Nesse meio poroso observou-se também em algumas condições, produção simultânea de emulsões a/o e o/a, enquanto num meio poroso de menor permeabilidade ocorreu inversão total das fases. Depois da inversão foi comum a presença de emulsões múltiplas.

Palavras-chave

Formação de emulsões; escoamento em meio poroso; emulsões múltiplas; inversão de fase; morfologia de emulsões; diâmetro médio de massa

Abstract

Miranda, Ana Cecilia Rodriguez; Carvalho, Márcio (Advisor). **Emulsion formation in multi phase flow of oil and water in porous media**. Rio de Janeiro, 2010. 67p. MSc Dissertation — Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Crude oil is rarely produced alone. Usually it is produced together with water in the form of emulsion. Emulsion formation during oil production is extremely problematic in terms of flow characteristics and further processing of the produced fluids. It can cause flow assurance problems and increase the cost of phase separation. The emulsification process starts inside the reservoir with the flow of oil and water through the porous media and continues in the multi phase flow inside the well, the turbulent flow through valves, pumps and in surface facilities.

There are still uncertainties related to the conditions that promote emulsification inside the reservoirs. This dissertation is focused in the emulsion formation in multi phase flow of oil and water in porous media. An experimental study was carried out to analyze the effects of process variables and properties of the fluids and porous media in the morphology of the emulsions formed. Water and oil were injected as separate phases into a porous media formed of glass micro-spheres. The produced fluids were collected and analyzed to determine the type of emulsion and its morphological characteristics.

The results of the experiments indicate that the morphology of the emulsions depends strongly on the operational conditions in which the fluids are produced. Emulsion drop sizes decrease at higher total flow rates and increase as the water-oil ratio falls. It was also established that the characteristics of the porous media have a strong effect on the morphology of emulsions. The use of a porous media with higher permeability resulted in the production of emulsions with broader droplet size distributions and larger mass median diameters. Simultaneous production of w/o and o/w emulsions was observed in that porous media, while only total phase inversion was observed in a less permeable porous media. Multiple emulsions were common after total phase inversion.

Keywords

Emulsion formation; flow in porous media; emulsion morphology; multiple emulsions; phase inversion; mass median diameter

Sumário

Sumário das notações	11
1 Introdução	12
1.1 A produção de petróleo	13
1.2 Motivação	16
1.3 Objetivos	18
1.4 Escopo	18
2 Emulsões na produção de petróleo	20
2.1 Estabilidade das emulsões	20
2.2 Viscosidade e reologia das emulsões	23
2.3 Demulsificação	24
2.4 Formação de emulsões em meios porosos	26
3 Procedimento experimental	30
3.1 Descrição da bancada experimental	30
3.2 Materiais e equipamentos	31
3.2.1 Sistema de injeção e conexões	31
3.2.2 Reservatório	32
3.2.3 Fluidos de injeção e surfactantes	34
3.2.4 Equipamentos utilizados para análise das amostras de emulsão	37
3.2.5 Outros equipamentos	38
3.3 Procedimento experimental	38
3.3.1 Análise das emulsões	40
3.3.2 Determinação da distribuição de tamanho de gota	42
4 Resultados	44
4.1 Efeito do meio poroso	50
4.2 Efeito da vazão total	53
4.3 Efeito do tipo de surfactante	55
4.4 Efeito da viscosidade do óleo	56
5 Conclusões e recomendações	61
5.1 Conclusões	61
5.2 Sugestões para trabalhos futuros	62
Referências Bibliográficas	63
A Planos do reservatório	66

Lista de figuras

1.1	Demanda mundial de energia por tipo de combustível, 1980 - 2030 Fonte: EIA (2009) [1].	13
1.2	Estrutura esquemática de um reservatório de petróleo[2]	14
1.3	Produção de água por coning [3]	16
1.4	Representação esquemática da formação de emulsões no reservatório de petróleo	18
2.1	Emulsão água em óleo	20
2.2	Emulsão óleo em água	20
2.3	Emulsão múltipla a/o/a	20
2.4	Estrutura dos surfactantes e formação de micelas	21
2.5	Viscosidade de emulsões de petróleo árabe a 125°F com diferentes cortes de água [4]	23
2.6	Viscosidades de emulsões para diferentes distribuições de tamanho de gota [5]	24
2.7	Drenagem gravitacional assistido por vapor Fonte: Slb Glossary [6].	28
3.1	Representação esquemática da bancada experimental	30
3.2	Fotografia da bancada experimental	31
3.3	Fotografia do sistema de injeção	32
3.4	Fotografia do reservatório desmontado	33
3.5	Sistema de contenção das esferas a) camadas do filtro b) micro-fotografia da primeira e última camada do filtro	33
3.6	Vazão de óleo Esso Nuto H 100 em função da queda de pressão através dos meios porosos	34
3.7	Micrografia de um meio poroso Tipo I. [7]	35
3.8	Formula química dos surfactantes da linha Ultralex NP	36
3.9	Agitador magnético	37
3.10	Conexões na entrada do reservatório	39
3.11	Amostra contendo vários tipos de fluidos	40
3.12	Coleta de amostra sobre lâmina de vidro	41
3.13	visualização no microscópio	41
3.14	Software para medição de diâmetros	42
3.15	Reporte do <i>Mastersizer</i> para uma amostra de emulsão	43
4.1	Pipetas graduadas contendo as emulsões produzidas no experimento 1 em diferentes razões de vazão água-óleo a) $Q_a/Q_o=0,12$ b) $Q_a/Q_o=0,38$ c) $Q_a/Q_o=1$	45
4.2	Emulsão a/o e a/o/a	46
4.3	emulsão o/a/o	46
4.4	$d_{0.5}$ das emulsões produzidas na primeira parte do experimento 1	46
4.5	Diâmetros característicos das emulsões produzidas no experimento 1 a) a/o $Q_a/Q_o=0,06$ b) a/o $Q_a/Q_o=0,64$ c) o/a $Q_a/Q_o=0,29$	47
4.6	Diâmetros característicos das emulsões do experimento 1	48

4.7	Diâmetros característicos das emulsões produzidas nos experimentos 1 e 2	49
4.8	Diâmetros característicos das emulsões do experimento 2	50
4.9	Emulsão a/o produzida com $Q_a/Q_o=0,06$ no meio poroso Tipo I	51
4.10	Emulsão a/o produzida com $Q_a/Q_o=0,06$ no meio poroso Tipo II	51
4.11	Emulsões produzidas a 3,6ml/h nos meios porosos Tipo I e Tipo II	51
4.12	Emulsão a/o/a produzida no meio poroso tipo II com $Q_a/Q_o=0,2$	52
4.13	Emulsões produzidas com três vazões totais diferentes	53
4.14	Distribuições de tamanho de gota de emulsões produzidas a 6ml/h a) $Q_a/Q_o=0,25$ b) $Q_a/Q_o=0,43$ c) $Q_a/Q_o=0,82$	54
4.15	Distribuições de tamanho de gota de emulsões produzidas com 10ml/h de vazão total a) $Q_a/Q_o=0,11$ b) $Q_a/Q_o=1$	55
4.16	Emulsões produzidas com surfactantes de diferente HLB	56
4.17	Micrografias e distribuições de tamanho de gota de emulsões a/o produzidas com surfactante Ultranex NP 1000 a) $Q_a/Q_o=0,06$ b) $Q_a/Q_o=0,38$ c) $Q_a/Q_o=1$	57
4.18	Emulsões produzidas com óleos de diferentes viscosidades	58
4.19	Emulsões a/o produzidas com óleo Nuto 100 a) $Q_a/Q_o=0,06$ b) $Q_a/Q_o=0,64$	59
4.20	Emulsão a/o produzidas com óleo Tivela 460 a) $Q_a/Q_o=0,06$ b) $Q_a/Q_o=0,64$	59
A.1	Plano da peça com a cavidade	66
A.2	Plano da peça com a protuberância que compacta as esferas	67

Lista de tabelas

2.1	Aplicações dos surfactantes segundo o HLB	22
3.1	Características dos meios porosos	34
3.2	Propriedades dos óleos	35
3.3	Propriedades dos surfactantes	36
4.1	Experimentos de formação de emulsões em meios porosos	44
4.2	Experimentos de formação de emulsões em meios porosos	45
4.3	Porcentagens de emulsão água em óleo nos experimentos 1 e 2	49
4.4	Tabela comparativa dos resultados experimentais	60

Sumário das notações

Símbolos Romanos

<i>SAGD</i>	drenagem gravitacional por injeção de vapor
<i>WAG</i>	water-alternating-gas
<i>DWS</i>	downhole water separation
<i>Ca</i>	número de capilaridade
<i>a/o</i>	emulsão água em óleo, Emulsão comum
<i>o/a</i>	emulsão óleo em água, Emulsão inversa
<i>CMC</i>	concentração micelar crítica
<i>HLB</i>	balanço hidrofílico lipofílico
<i>Q</i>	vazão total (ml/h)
<i>Qa</i>	vazão de água (ml/h)
<i>Qo</i>	vazão de óleo(ml/h)
<i>k</i>	permeabilidade absoluta (D)
<i>L</i>	comprimento(cm)
<i>A</i>	área transversal(cm^2)
<i>P</i>	pressão(atm)
<i>Qa/Qo</i>	razão de vazão água-óleo
<i>d0.5</i>	diâmetro médio de massa

Símbolos Gregos

μ viscosidade (cP)

Sub-índice

o óleo
a água