

**Teresa Juliet Peña Bastidas**

**Geração de emulsões durante  
a produção de petróleo**

**TESE DE DOUTORADO**

**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA  
MECÂNICA**

**Programa de Pós-graduação em  
Engenharia Mecânica**

Rio de Janeiro  
Julho de 2007

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA  
DO RIO DE JANEIRO



**Teresa Juliet Peña Bastidas**

**Geração de emulsões durante a produção  
de petróleo**

**Tese de Doutorado**

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica da PUC-Rio como parte dos requisitos parciais para obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica

Orientador: Prof. Márcio da Silveira Carvalho  
Co-Orientador: Prof. Vladimir Alvarado

Rio de Janeiro  
Julho de 2007



**Teresa Juliet Peña Bastidas**

**Geração de emulsões durante a produção  
de petróleo**

Tese apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor 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. Vladimir Alvarado**

Co-Orientador  
Department of Chemical/Petroleum Engineering—  
University of Wyoming

**Prof. Paulo Roberto de Souza Mendes**

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

**Prof. Mônica Feijó Naccache**

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

**Prof. Roney Thompson**

Departamento de Engenharia Mecânica – UFF-Rio

**Prof. Sidney Stuckenbruck**

Olympus Software Científico e Engenharia

**Prof. José Eugenio Leal**

Coordenador Setorial do Centro Técnico  
Científico–Puc-Rio

Rio de Janeiro, 25 de Julho de 2007

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

### **Teresa Juliet Peña Bastidas**

Graduou-se em Engenharia Química na Universidade Nacional Experimental Politécnica “Antonio José de Sucre” (UNEXPO.-Barquisimeto, Venezuela). Fez estudos de pós-graduação na Universidad Simón Bolívar (U.S.B.-Caracas, Venezuela), na área de Engenharia de Reservatórios, no Desenvolvimento de um Modelo de Caracterização Físico-Química de Óleos Pesados

#### Ficha Catalográfica

Peña Bastidas, Teresa Juliet

Geração de emulsões durante a produção de petróleo/ Teresa Juliet Peña Bastidas; orientador: Márcio da Silveira Carvalho; co-orientador: Vladimir Alvarado. - 2007.

100 f: il. ; 30 cm

Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

Inclui bibliografia.

1- Engenharia mecânica – Teses. 2-Produção de emulsões. 3-Quebra de gotas. 4-Escoamento em capilares. 5- Produção de petróleo. 6-Inversão de emulsões.. I. Carvalho, Márcio Da Silveira. II. Alvarado, Vladimir. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Mecânica. IV. Título.

CDD: 621

## Agradecimentos

À Pontifícia Universidade Católica de Rio, e ao Departamento de Engenharia Mecânica, pela possibilidade de realizar este trabalho.

Ao CNPq e a PETROBRAS, pelo auxílio financeiro concedido, indispensável na realização do trabalho.

Aos meus orientadores professores Márcio da Silveira Carvalho e Vladimir Alvarado Basante, pela oportunidade e pela confiança a mim prestada, pelo apoio e por todo o aprendizado que com eles ganhei. Muito obrigada.

Ao pessoal do Laboratório de Processamento de Imagens da PUC-Rio, Professor Sidnei Paciornik e ao pesquisador Marcos Henrique de Pinho Mauricio, pelo suporte no processamento de imagens, nos testes preliminares deste estudo.

Ao Professor Paulo Roberto da Souza Mendes, por seus aportes ao trabalho.

À banca examinadora, pelas observações que enriqueceram o texto deste trabalho.

Ao meu marido Sygfredo, por tudo o que você é. Pelo apoio e pelo amor, que foram imprescindíveis para terminar este projeto, e que são imprescindíveis na minha vida.

A minha filha Natalia, pela alegria e pelo amor, que me fazia tudo mais fácil, e pelo tempo de compartilhamento que roubei de você. Por ser uma maravilhosa fonte de inspiração na minha vida.

A minha mãe, por ser a minha mãe, e aos meus irmãos, por serem meus amigos e companheiros, mesmo na distância física.

Ao pessoal do Laboratório de Termociências, Flávio, Renata, Eduardo Dutra, Deivid, Bruno, Julio, Tatiana, Leo, Tatiana, Frank e Epifanio, por todos os “pequenos” auxílios, que em soma são grandes, pela amizade e pela ajuda que me brindaram durante a realização da tese.

Aos amigos da PUC, por fazer desta uma experiência enriquecedora.

## Resumo

Peña Bastidas, Teresa Juliet; Carvalho, Márcio Da Silveira; Alvarado, Vladimir. **Geração de emulsões durante a produção de petróleo**. Rio de Janeiro, 2007. 100p. Tese de Doutorado — Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A presença de emulsões durante a produção de óleo causa vários problemas e traz desafios tecnológicos a serem vencidos, já que afeta a produtividade dos poços, a elevação artificial, o tempo de vida dos equipamentos e o processo de separação do óleo produzido.

Existe incerteza em relação à origem das emulsões geradas durante a produção de petróleo, podendo resultar do escoamento no meio poroso, do fluxo turbulento no fundo do poço, nas bombas, ou nas instalações de superfície. Este trabalho é focado na geração de emulsões no meio poroso e em alguns aspectos das emulsões produzidas em escoamentos turbulentos.

Emulsões podem ser formadas no escoamento bifásico em um meio poroso através de diversos mecanismos. A quebra de gotas da fase não molhante durante a passagem por uma garganta é um dos mecanismos mais importantes. Este fenômeno foi estudado em detalhe através da visualização do escoamento de grandes gotas de óleo suspensas em água através de uma garganta de poro. Foi obtido o mapeamento numa única curva das condições que levam à quebra de gota dentro de um capilar com garganta. Os resultados obtidos determinam as condições nas quais o processo de emulsificação ocorre em um meio poroso.

O estudo de geração de emulsões no escoamento turbulento foi focado no estudo do tipo de emulsão (distribuição de tamanho de gotas e fase externa) obtida através de mistura de óleo e água em um misturador, em função da concentração e propriedades das fases. Especial atenção é dada às condições necessárias para a inversão da fase externa e formação de água livre. Os resultados obtidos permitem conhecer a influência das propriedades e concentração das fases no tipo de emulsão produzida, além de proporcionar ferramentas que permitem o monitoramento remoto da morfologia das emulsões que escoam em algum ponto específico dos processos de produção, desde o fundo de poço até as instalações de superfície.

## Abstract

Peña Bastidas, Teresa Juliet; Carvalho, Márcio Da Silveira; Alvarado, Vladimir. **Emulsion generation during oil production**. Rio de Janeiro, 2007. 100p. PhD. Thesis — Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Emulsion formation during oil production may take place in the flow inside the reservoir or in the two-phase flow down hole in production wells, and through pipelines and valves in surface facilities. Emulsions can cause a number of operational problems such as tripping of equipment in gas-oil separations plants and high pressure drops in flow lines.

Flow conditions responsible for generation of emulsions present at the surface, going from porous media, turbulence down hole, through pumps, or in surface facilities, are uncertain, and their effects on the drop size, are not well understood. The present work is focused on emulsion generation inside reservoirs and in some aspects of the produced emulsions in turbulent flow. Emulsions can be formed in the two-phase flow inside a porous media by different mechanism. Snap-off of the non-wetting phase drops as there flow through pore throats is one of these mechanisms. This phenomenon is analyzed in this work by visualizing the flow of large oil drops suspended in water through a glass micro-capillary with a constriction. The conditions at which the snap-off occurs were mapped as a function of the operating parameters. The results define the conditions at which emulsification by snap-off occurs inside a porous media.

Study of emulsion formation in a turbulent flow was focused on the characteristics of the produced emulsion (external phase and diameter size distribution) as a function of the phase concentration and properties. Conditions for emulsion inversion were analyzed as a function of the phases properties and concentration. The results can be used to estimate the state of emulsification as a function of process conditions at different locations, from the reservoir to the surface facilities.

## Keywords

emulsion production, drop breakup, flow through capillaries, snap-off, oil production, emulsion inversion

# Conteúdo

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>13</b>
1.1	Formação de emulsões durante a produção de petróleo	13
1.2	Recuperação de óleos pesados e geração de emulsões	16
1.3	Objetivos da Pesquisa	18
1.4	Roteiro da tese	19
<b>2</b>	<b>Quebra de gotas no Escoamento através de um Capilar com Garganta</b>	<b>20</b>
2.1	Estado da arte	20
2.1.1	Introdução	20
2.1.2	Mecanismos de geração de emulsões em capilares	25
2.1.3	Fatores que influenciam a deformação e o rompimento de gotas em capilares e em meios porosos	30
2.2	Objetivos	36
2.3	Procedimento Experimental e Materiais	37
2.3.1	Materiais e caracterização	37
2.3.2	Procedimento experimental	41
2.4	Resultados	46
2.5	Comentários Finais	55
<b>3</b>	<b>Formação de Emulsões Água-Óleo em Condições de Mistura Turbulenta</b>	<b>57</b>
3.1	Estado da arte	57
3.1.1	Introdução	57
3.1.2	Fatores que determinam o tipo e morfologia da emulsão produzida e a sua estabilidade	59
3.1.3	Relação entre a presença de água e emulsões e a formação de hidratos	63
3.1.4	Inversão de emulsões	64
3.1.5	Metodologias para monitorar emulsões produzidas	67
3.1.6	Testes de emulsificação fora de meio poroso: Teste das garrafas	68
3.2	Objetivo	69
3.3	Procedimento Experimental e Materiais	69
3.3.1	Materiais e Caracterização	69
3.3.2	Procedimento Experimental	70
3.4	Resultados	75
3.5	Comentários Finais	87
<b>4</b>	<b>Conclusões e Sugestões</b>	<b>90</b>
4.1	Conclusões.	90
4.2	Sugestões para trabalhos futuros.	93
	<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>94</b>

## Lista de Figuras

1.1	Injeção e produção de água durante a recuperação secundária.	14
2.1	Classificação das dispersões segundo as dimensões da fase dispersa.	20
2.2	Formação de micelas.	21
2.3	Classificação das emulsões segundo as fases que a compõem.	23
2.4	Estabilização de emulsões de gotas de água pela ação de partículas de asfaltenos na superfície da gota.	25
2.5	Mecanismo “Snap-off” num meio poroso para um sistema tendo água como fase contínua. Os sub índices “w” correspondem à fase molhante, e “nw” à fase não molhante.	27
2.6	Descrição da interrupção do mecanismo “Roof’s snapoff” no meio poroso, segundo Rossen, por preenchimento do poro contíguo à garganta.	28
2.7	Descrição do mecanismo “tipstreaming”.	29
2.8	Descrição do mecanismo “tipdropping”.	29
2.9	Descrição do mecanismo fratura.	30
2.10	Descrição do mecanismo por invasão da fase contínua na parte posterior da gota.	30
2.11	Movimento de uma gota através de uma garganta, com a deposição de filme de líquido.	32
2.12	Ângulo de contato $\theta$ .	33
2.13	Dimensões de garganta de poro, a partir de uma fotografia num testemunho de rocha.	38
2.14	Tensiômetro de anel.	39
2.15	Viscosímetro Cannon-Fenske.	41
2.16	Capilares constritos usados no estudo. (a) 20/200 (razão de diâmetro constrição/seção reta); (b) 50/200 e (c) 50/100.	42
2.17	Diagrama esquemático do dispositivo experimental para as provas em capilar com constrição.	44
2.18	Dispositivo experimental para as provas em capilar com constrição.	44
2.19	Detalhe do dispositivo experimental para as provas em capilar com constrição.	45
2.20	“Snap-off” típico de do escoamento de uma gota de óleo através de um capilar com garganta. Sistema IVb. $\kappa = 3.5$ .	47
2.21	Regiões Mapeadas par ao “snap-off”. Razão de viscosidades vs Ca. Capilar <i>b</i> ( $2R_c/2R_T = 50/200$ ); sistemas I-VIII.	49
2.22	Regiões Mapeadas par ao “snap-off”. Razão de viscosidades vs Ca. Capilares <i>a</i> ( $2R_c/2R_T = 20/200$ ) e <i>c</i> ( $2R_c/2R_T = 50/100$ ); sistemas IV, V, VI e VII.	50
2.23	Regiões mapeadas para o “snap-off”. Diferença de pressão capilar adimensionalizada vs Ca.	51

2.24	“Snap-off” através de uma constrição abrupta. $Q=0.02$ ml/h. Sistema IVb. Os diâmetros médios das gotas produzidas ( $d_p$ ) são: (a) $d_p=11.57 \mu\text{m}$ ; (b) $d_p=13.33 \mu\text{m}$ ; (c) $d_p=20 \mu\text{m}$ e (d) $d_p=32 \mu\text{m}$ .	54
2.25	Tempo de quebra adimensionalizado, $tq^*$ , vs $Ca$ .	55
3.1	Diagrama bidimensional formulação-composição.	66
3.2	Efeito de varias variáveis sobre a localização da linha de inversão num mapa formulação-composição.	67
3.3	Tensão superficial medida para varias soluções de SDS, pelo método do anel.	71
3.4	Agitador Ika-ULTRA TURRAX T 25 basic.	72
3.5	Funcionamento do rotor-extrator.	72
3.6	Reometro Ares, e a geometria “ Grooved”.	74
3.7	Instabilidade de uma emulsão múltipla como consequência de ter sido submetida a mudanças na temperatura.	76
3.8	Dependência da inversão da emulsão com a concentração de surfactante.	77
3.9	Dependência da inversão da emulsão com a composição das fases.	78
3.10	Inversão das emulsões. Dependência com a concentração de surfactante, a fração volumétrica de água, viscosidade e tensão interfacial.	79
3.11	Comportamento de fases. Sistema XII.	80
3.12	Inversão da emulsão. Seguimento mediante microscopia. Sistema XII. Objetiva 20x.	81
3.13	Efeito da densidade na estabilidade das emulsões. Geração de água livre. Sistemas IX, VII e XIII.	81
3.14	Efeito da concentração de surfactante na estabilidade das emulsões. Geração de água livre. Sistemas VII, X, XI e XII.	82
3.15	Viscosidade ( $a$ ) e Tensões ( $b$ ) vs Taxa de cisalhamento do sistema IX. $\mu_o=140$ mP.s. As porcentagens indicadas estão referidas a $Va/Vt$ . Região de inversão da emulsão: 8-10 % de água.	83
3.16	Viscosidade ( $a$ ) e Tensão ( $b$ ) vs Taxa de cisalhamento do sistema VII. $\mu_o=460$ mP.s. As porcentagens indicadas estão referidas a $Va/Vt$ . Região de inversão da emulsão: 6-8% de água.	85
3.17	Viscosidade ( $a$ ) e Tensões ( $b$ ) vs Taxa de cisalhamento do sistema XIII. $\mu_o=940$ mP.s. As porcentagens indicadas estão referidas a $Va/Vt$ . Região de inversão da emulsão: 10-15 % de água.	86
3.18	Diâmetros da maior gota estável e viscosidade da emulsão como função da fração volumétrica de água. Taxa de cisalhamento: $100 \text{ s}^{-1}$ . Sistema XIII. Região de inversão da emulsão: 10-15 % de água.	87
3.19	Diâmetros da maior gota estável e viscosidade da emulsão como função da fração volumétrica de água. Taxa de cisalhamento: $100 \text{ s}^{-1}$ . Sistema IX. Região de inversão da emulsão: 8-10 % de água.	87

3.20 Diâmetros da maior gota estável e viscosidade da emulsão como função da fração volumétrica de água. Taxa de cisalhamento:  $100 \text{ s}^{-1}$ . Sistema VII. Região de inversão da emulsão: 6-8 % de água. 88

## Lista de Tabelas

1.1	Classificação dos óleos segundo a sua densidade API.	16
2.1	Algumas faixas de HLB e as suas aplicações.	22
2.2	Macroemulsões vs Microemulsões.	23
2.3	Propriedades dos líquidos utilizados nos testes em capilares.	41
2.4	Propriedades dos líquidos usados nos experimentos (@ 25°C).	42
2.5	Velocidades e números de capilaridade estudados.	43
2.6	Comparação de um comportamento “tipo gota” (médios e altos valores de $\kappa$ ) a um segundo “tipo bolha” (baixos $\kappa$ ), segundo o incremento na razão de viscosidade e diminuição dos valores de $\Delta P^*$ .	53
3.1	Propriedades dos líquidos utilizados na preparação das emulsões (@ 25° C).	70
3.2	Propriedades dos sistemas óleo-água usados nos experimentos (@ 25°C).	70

## Lista de Símbolos

$\kappa$	Razão de viscosidades gota/fase contínua
$\kappa'$	Razão de viscosidades óleo/água
$\mu$	Viscosidade (mPa.s ou cP)
$\mu_o$	Viscosidade do óleo (mPa.s ou cP)
$\mu_w$	Viscosidade da fase molhante (mPa.s ou cP)
$\mu_{nw}$	Viscosidade da fase não molhante (mPa.s ou cP)
$\sigma$	Tensão Interfacial (mN/m)
$\Delta P$	Diferença de pressão capilar da fase molhante, na constricção do capilar (N/m <sup>2</sup> )
$\Delta P^*$	$\Delta P$ , adimensionalizada
$\lambda$	Razão de diâmetros gota/seção reta do capilar
$\lambda_c$	Razão de diâmetros gota/constricção
$Ca$	Número de Capilaridade
$CMC$	Concentração Micelar Crítica
$Dm$	Diâmetro máximo de gota estável
$P_c$	Pressão capilar (N/m <sup>2</sup> )
$P_{c_c}$	Pressão capilar na constricção (N/m <sup>2</sup> )
$P_{c_e}$	Pressão capilar de entrada na constricção (N/m <sup>2</sup> )
$P_{c_{sn}}$	Pressão capilar na constricção necessária para o “snap-off” acontecer (N/m <sup>2</sup> )
$Q$	Vazão (ml/h)
$R_T$	Raio da seção reta do capilar (mícrons)
$R_c$	Raio da constricção do capilar (mícrons)
$R_3$	Raio de curvatura transversa na constricção (mícrons)
$SDS$	Dodecil Sulfato de Sódio
$tq$	Tempo de quebra da gota (s)
$tq^*$	Tempo de quebra da gota, adimensionalizado
$V$	Velocidade da fase contínua (m/s)
$V_a/Vt$	Fração volumétrica de água
$V_a/Vt)_i$	Fração volumétrica de água requerido para a inversão de emulsões acontecer
$V_a/Vt_L$	Fração volumétrica de água livre (não emulsionada)
$V_w$	Velocidade da fase molhante (m/s)