

**Sygifredo Cobos Urdaneta**

**Escoamento de Emulsões  
Óleo-Água através de  
Capilares com Garganta**

**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



PUC  
RIO

**Sygifredo Cobos Urdaneta**

**Escoamento de Emulsões Óleo-Água  
através de Capilares com Garganta**

**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



**Sygifredo Cobos Urdaneta**

**Escoamento de Emulsões Óleo-Água  
através de Capilares com Garganta**

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

Departamento de Engenharia Mecânica — PUC-Rio

**Prof. Luis Fernando A. Azevedo**

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

**Prof. Marcos Sebastião de Paula Gomes**

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

**Dr. Márcio Arab Murad**

Laboratório Nacional de Computação Científica

**Dr. Geraldo Spinelli Ribeiro**

E&P-ENGP/TPP/EE - Petrobras

**Prof. José Eugenio Leal**

Coordenador Setorial do Centro Técnico  
Científico-PUC-Rio

Rio de Janeiro, 27 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.

### **Sygifredo Cobos Urdaneta**

Graduou-se em Engenharia Química na Universidad de los Andes (Mérida, Venezuela). Fez o Mestrado na Universidad Simón Bolívar (Caracas, Venezuela) em Engenharia de Reservatórios

#### Ficha Catalográfica

Cobos, Sygifredo

Escoamento de Emulsões Óleo-Água através de Capilares com Garganta/ Sygifredo Cobos Urdaneta; orientador: Márcio da Silveira Carvalho; co-orientador: Vladimir Alvarado. — Rio de Janeiro : PUC, Departamento de Engenharia Mecânica, 2007.

[21], 121 f. : il. ; 30 cm

Tese (doutorado) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Mecânica.

Inclui referências bibliográficas.

1. Engenharia mecânica – Teses. 2. Escoamento de emulsões. 3. Deslocamento imiscível em capilares. 4. Escoamento em meios porosos. 5. Recuperação avançada de petróleo. 6. Superfícies livres I. Márcio da Silveira Carvalho. II. Vladimir Alvarado. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Mecânica. IV. Título.

CDD: 621

## Agradecimentos

Devo agradecer ao Departamento de Engenharia da PUC-Rio por se constituir na minha casa de estudos, pesquisa e formação durante estes 4 anos.

É fundamental expressar a minha gratidão pelo constante e valioso apoio que eu recebi nestes 4 anos durante a realização da Tese por parte dos professores Márcio da Silveira Carvalho e Vladimir Alvarado Basante.

Agradeço as correções e sugestões feitas pela banca examinadora, as quais contribuíram a enriquecer a redação do texto da Tese.

Quero agradecer ao Programa de Recursos Humanos da ANP por me brindar a oportunidade de realizar o presente trabalho contando com o seu apoio acadêmico e financeiro, e de forma particular ao Prof. Arthur Braga e à Sra. Grace Mary pelo constante apoio ao longo destes 4 anos. Assim também agradeço aos professores do Departamento de Engenharia Mecânica pelo ensino que eu recebi assim como a troca de informações que contribuíram de forma importante para a minha formação.

Durante a realização deste trabalho, contei com a colaboração de profissionais envolvendo diversas áreas. Agradeço assim ao Marcos Henrique pelo treinamento inicial que eu recebi da sua parte na área de caracterização de imagens. Devo agradecer o apoio do Engenheiro Eduardo Dutra e do grupo de trabalho do Professor Paulo Roberto de Souza Mendes assim como o Engenheiro Flavio Marquesini. Em geral o grupo de trabalho do Laboratório de Termociências sempre esteve disponível para prestar a sua colaboração e facilitar o uso de instrumentos.

Agradeço ao Sr. Joel Oldrich Romero pelo apoio que eu recebi na fase inicial da implementação numérica deste trabalho e pela amizade e bons momentos que compartilhamos durante a minha estadia nesta Universidade, assim como ao Sr. Taygoara Felamingo de Oliveira pela sua sincera amizade e os bons momentos compartilhados durante a minha estadia no Brasil. Sou grato de forma geral a todos os colegas de trabalho com os quais passei bons momentos e fizeram da minha estadia um caminho muito mais ameno.

Quero agradecer profundamente a minha esposa, Teresa Juliet, por seu constante amor e sua infinita paciência, e por todas as coisas boas que ela sempre faz para manter a alegria do nosso lar.

## Resumo

Cobos, Sygifredo; Da Silveira, Márcio; Vladimir Alvarado. **Escoamento de Emulsões Óleo-Água através de Capilares com Garganta**. Rio de Janeiro, 2007. 121p. Tese de Doutorado — Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O escoamento de emulsões é encontrado em diversos processos de recuperação e produção de petróleo. O escoamento de emulsões em meios porosos depende de diversos parâmetros como a relação do tamanho das gotas ao tamanho dos poros, a razão de viscosidades, a vazão volumétrica e o efeito destes parâmetros ainda não é bem compreendido. Uma análise detalhada na escala microscópica dos fenômenos envolvidos se faz essencial para a melhora do entendimento completo do escoamento de emulsões em um reservatório. Isto permitiria o desenvolvimento de melhores modelos de simulação para o escoamento multifásico em meios porosos. Neste trabalho, o escoamento de emulsões óleo-água através de um capilar com garganta foi estudado através de experimentos e teoria. A análise experimental consistiu da visualização sob um microscópio do escoamento e da medição da queda de pressão em função da vazão para diferentes emulsões. A análise teórica englobou o estudo do escoamento em regime permanente de uma gota de óleo imersa em água através de um capilar e o estudo do escoamento transiente da mesma gota através de um capilar com uma garganta. Os resultados mostram que os modelos de escoamento de emulsões em meios porosos não devem ser baseados em propriedades macroscópicas da emulsão quando o tamanho das gotas da fase dispersa for da mesma ordem de grandeza do tamanho dos poros. Neste caso, a queda de pressão é função da tensão interfacial, a razão de viscosidades, a vazão e a razão entre o tamanho das gotas e o diâmetro do poro. Os resultados apresentados neste trabalho podem ser usados no projeto de emulsões apropriadas para controle de mobilidade em operações de recuperação avançada através de injeção de emulsões.

**Palavras chaves:** escoamento de emulsões, deslocamento imiscível em capilares, escoamento em meios porosos, recuperação avançada de petróleo, superfícies livres.

## Abstract

Cobos, Sygifredo; Da Silveira, Márcio; Vladimir Alvarado. **Flow of oil-in-water emulsions through constricted capillaries.** Rio de Janeiro, 2007. 121p. PhD. Thesis — Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Flow of emulsions is found in many petroleum recovery and production processes and it is often referred to in the context of tertiary oil recovery. The characteristics of emulsion flow in porous media depend on several parameters such as medium drop size to pore size ratio, viscosity ratio, flow rate and the effect of these parameters is far from being entirely understood. A detailed analysis at a microscopic scale of the flow is essential to improve the understanding of flow of an emulsion in a reservoir. This would lead to the development of better simulation models, henceforth increasing the predictability capability of reservoir simulators for enhanced oil recovery applications. In this work, flow of oil-water emulsions through constricted capillaries, used as model for the geometry inside a porous media, is studied experimentally and theoretically. The experimental approach consisted of measuring pressure drop response as a function of flow rate for different emulsions and visualizing the flow under an optical microscope to understand the phenomena involved. The theoretical approach is divided in two parts. First, the immiscible steady flow of a infinite single drop suspended in an less viscous fluid through a capillary was analyzed by solving the Navier-Stokes equations with the appropriate boundary conditions for free-surface flow. The second part of the theoretical analysis consisted of solving the transient flow of a drop suspended in a less viscous fluid through a capillary with a constriction. It is shown the effect of capillary number and viscosity ratio over the main responses of the flow. The results show that models of emulsion flow in a porous media cannot be based on the macroscopic properties of the emulsion when the drop diameter is of the same order of magnitude as the pore throat diameter. In this case flow rate-pressure drop is a strong function of the interfacial tension, viscosity ratio, flow rate and drop to pore size ratio. The results can be used to design appropriate emulsions to control the water mobility during EOR operations by emulsion injection.

## Keywords

emulsions flow, immiscible displacement in capillaries, flow in porous media, enhanced oil recovery, free surfaces

# Conteúdo

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>15</b>
1.1	Produção de óleo	15
1.2	Dispersões	20
1.2.1	Emulsões	21
1.2.2	Escoamento de emulsões em capilares e meios porosos	24
1.2.3	Escoamento de emulsões em meios porosos	25
1.3	Roteiro da Tese	28
<b>2</b>	<b>Abordagem Experimental</b>	<b>30</b>
2.1	Sistema de injeção de líquido.	31
2.2	Sistema de medição da diferença de pressão entre a entrada e saída do capilar.	32
2.3	Sistema de Visualização do escoamento através do capilar	33
2.4	Preparação das emulsões	34
2.4.1	Medição da tensão interfacial dos líquidos usados	36
2.4.2	Formulação das emulsões	37
2.4.3	Agitação dos componentes para a preparação das emulsões	39
2.4.4	Processamento de imagens para a determinação da distribuição de tamanho de gota das emulsões	41
2.4.5	Determinação da distribuição de tamanho de gotas da emulsão	42
2.4.6	Caracterização reológica das emulsões	44
2.4.7	Procedimento Experimental	46
2.5	Dificuldades encontradas no processo experimental	49
<b>3</b>	<b>Resultados Experimentais</b>	<b>51</b>
3.1	Introdução	51
3.2	Efeito do tamanho de gota	51
3.3	Efeito da Concentração	56
3.4	Discussão	56
<b>4</b>	<b>Formulação Matemática e Método de Solução Numérica</b>	<b>59</b>
4.1	Equações de Conservação	59
4.2	Condições de Contorno	61
4.3	Método de solução do problema	66
4.3.1	Formulação do problema de superfície livre	66
4.4	Deslocamento da malha	70
4.4.1	Discretização das equações	71
4.5	Discretização pelo Método de Galerkin/Elementos finitos	71
4.6	Formulação fraca das equações	73
4.7	Método das diferenças finitas	75
4.8	Dedução dos termos da Matriz Massa	77
4.9	Solução do sistema de equações não lineares pelo Método de Newton	78

<b>5</b>	<b>Escoamento permanente de uma gota num capilar reto. Resultados Numéricos.</b>	<b>81</b>
5.1	Introdução	81
5.2	Topologia do Mapeamento	84
5.3	Solução de Problemas Preliminares	85
5.4	Detalhes da solução numérica	87
5.5	Estratégia de solução para a obtenção do caso líquido - líquido	88
5.6	Resultados para Escoamento de uma gota num capilar	90
5.7	Efeito da Razão de Viscosidade	92
5.8	Efeito da Capilaridade	98
5.9	Análise das regiões do escoamento imiscível	102
<b>6</b>	<b>Escoamento transiente de uma gota num capilar com restrição. Resultados Numéricos.</b>	<b>103</b>
6.1	Introdução	103
6.2	Métodologia	104
6.3	Resultados	106
6.4	Efeito do número capilar	109
6.5	Efeito da razão de viscosidades	110
<b>7</b>	<b>Conclusões e Sugestões</b>	<b>113</b>
7.1	Conclusões	113
7.2	Sugestões	116
	<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>117</b>

## Lista de Figuras

1.1	Estrutura esquemática de um reservatório de petróleo.	16
1.2	Diferentes processos de recuperação de petróleo.	17
1.3	Classificação das dispersões segundo as dimensões da fase dispersa	21
1.4	Representação esquemática de uma gota de óleo coberta por moléculas de surfactante.	22
1.5	Tipos de emulsão	22
1.6	Tipos de escoamento exibidos por fluidos	23
2.1	Diagrama esquemático da bancada experimental	31
2.2	Bomba de seringa usada para a injeção de emulsões.	32
2.3	Seção interna do capilar	32
2.4	Esquema Ilustrativo da Bancada Experimental	34
2.5	Aparato dispersor Ultraturrax T-25 usado para a preparação das emulsões.	35
2.6	Esquema ilustrativo do mecanismo de rompimento de gotas do dispersor Rotor-Estator	36
2.7	Tensiometro de anel.	37
2.8	Distribuição normalizada de tamanho de gotas para os sistemas 2S e 2L	43
2.9	Distribuição normalizada de tamanho de gotas dos sistemas 3S e 3L.	44
2.10	Distribuição normalizada de tamanho de gotas dos sistema 5S.	44
2.11	Microestrutura da emulsão 3L.	45
2.12	Reômetro Rotacional Ares utilizado na caracterização reológica das emulsões.	46
2.13	Geometria do tipo Couette com rugosidade, usada com o reômetro rotacional Ares para as medições reológicas.	47
2.14	Viscosidade em função da taxa de cisalhamento para os sistemas 2S e 2L	47
2.15	Viscosidade em função da taxa de cisalhamento para os sistemas 3L, 3S e 5S	48
3.1	Comparação da queda de pressão entre os sistemas 2S e 2L.	53
3.2	Seqüência de imagens para o escoamento do sistema 2L através do capilar com constrição e os instantes indicados na Fig. 3.3.	53
3.3	Evolução da pressão de entrada em função do tempo para o sistema 2L usando uma vazão: $0.04 \text{ cm}^3/\text{hr}$ . As imagens do escoamento perto da constrição são mostradas na Fig. 3.2.	54
3.4	Comparação da queda de pressão entre os sistemas 3S e 3L.	54
3.5	Comparação dos pontos mínimos e máximos da queda de pressão para os sistemas 3S e 3L.	55
3.6	Dados de queda de pressão em função da vazão para o sistema 5S. Efeito da concentração da emulsão.	55
3.7	Mecanismo de aumento e diminuição da pressão.	57

4.1	Modelo do problema a resolver.	60
4.2	Contornos do problema do escoamento imiscível num capilar reto.	62
4.3	Representação dos raios principais de curvatura, $R_1 e R_2$	65
4.4	Mapeamento do domínio físico curvilíneo $\mathbf{x}(x,r)$ em um domínio numérico retangular $\xi(\xi, \eta)$	67
5.1	Mapeamento entre o domínio físico e o domínio de referência.	85
5.2	Primeiro passo preliminar para a solução do problema.	85
5.3	Segundo passo para a solução do problema do escoamento de uma gota num capilar reto.	86
5.4	Diagrama esquemático com as condições de contorno do problema do escoamento de uma gota infinita num capilar reto.	87
5.5	Teste de malha. Primeira malha analisada.	88
5.6	Malha definitiva usada para a resolução dos casos em regime permanente.	88
5.7	Comparação dos valores de $m$ calculados usando as malhas testadas e valores experimentais de Taylor.	89
5.8	Comparação do caso experimental de Taylor com a solução numérica do presente trabalho, para o caso de razão de viscosidade $10^{-4}$ .	90
5.9	Espessura da capa de líquido remanescente em função do número de capilaridade.	93
5.10	Perfis da interface para $Ca = 0.01$ e distintas razões de viscosidade $\lambda$ .	93
5.11	Perfis da interface para $Ca = 0.1$ e distintas razões de viscosidade $\lambda$ .	94
5.12	Pressão em função da posição ao longo do eixo de simetria para $\lambda = 2, 8$ e $50$ e $Ca = 0.005$ .	94
5.13	Linhas de corrente para $Ca = 0.005$ e razões de viscosidade $\lambda = 2, 8$ e $50$ .	95
5.14	Malhas em escala usadas para os casos com $Ca = 0.005$ e razões de viscosidade $\lambda = 2, 8$ e $50$ .	96
5.15	Queda de pressão adimensional em função do número $Ca$ para $\lambda = 2$ e $50$ . Linhas assintóticas com valores de $m$ de $42.4$ e $60.3$ respectivamente.	97
5.16	Linhas de corrente para $\lambda = 2$ e números capilares $Ca$ $0.1, 0.01,$ e $0.0017$ .	98
5.17	Malhas em escala usadas para os casos com $\lambda = 2$ e números capilares $Ca$ de $0.1, 0.01,$ e $0.0017$ .	99
5.18	Perfis da interface para diferentes números capilares e $\lambda = 2$ .	100
5.19	Pressão como função da posição para $\lambda = 2$ e $Ca = 0.1, 0.01$ e $0.0017$ .	100
5.20	Regiões de escoamento desenvolvido e não desenvolvido.	101
6.1	Diagrama esquemático para a solução do escoamento de uma gota infinita através de uma constrição.	105
6.2	Malha representativa do problema resolvido.	106
6.3	Evolução do perfil da gota passando através da constrição para $Ca=0.01$ e $\lambda=1$ .	107

6.4	Malhas obtidas no escoamento transiente da gota através da constrição para $Ca=0.01$ e $\lambda=1$ .	108
6.5	Evolução da razão entre a queda de pressão e a vazão em função da posição da gota para $Ca=0.01$ e $\lambda=1$ .	109
6.6	Evolução da razão entre a queda de pressão e a vazão em função da posição da gota para $\lambda = 2$ $Ca = 0.01, 0.02, 0.05, 0.08$ .	110
6.7	Comparação dos valores de $\frac{\Delta PR^3}{\mu Q}$ extra para o escoamento da gota através da constrição para $\lambda = 2$ em função do número de $Ca$	110
6.8	Evolução da razão entre a queda de pressão e a vazão em função da posição da gota para $Ca = 0.01$ $\lambda = 1, 2, 4$ e $8$ .	111
6.9	Comparação dos valores de $\frac{\Delta PR^3}{\mu_2 Q}$ extra para o escoamento da gota através da constrição para $Ca = 0.01$ e $\lambda = 1, 2, 4, 8$ .	112

## Lista de Tabelas

2.1	Emulsões usadas para as provas do escoamento no capilar	41
5.1	Resultados numéricos do presente trabalho para $h/R$ , comparados com os valores experimentais de Goldsmith e Mason	91

## Lista de Símbolos

### Nomenclatura

<b>I</b>	tensor unitário
$x$	coordenada axial
$r$	coordenada radial
$h$	espessura da capa remanescente entre a gota e o capilar
$R_m$	Raio meio de curvatura entre as fases fluidas
<b>n</b>	vetor normal à superfície
<b>t</b>	vetor tangente à superfície
$\Delta t$	passo de tempo
$P$	pressão
<b>T</b>	tensor tensão
$R_o$	raio interno do capilar
$Ca$	Número de Capilaridade ( $Ca = \frac{\mu U}{\sigma}$ )
$Re$	Número de Reynolds ( $Re = \frac{\rho V D}{\mu}$ )
$\Delta P$	Queda de pressão adimensional ( $\Delta P^* = \frac{\Delta P R}{\mu V}$ )
$P$	Pressão adimensional ( $P^* = \frac{P R}{\mu V}$ )
$U$	Velocidade
$W$	Vetor resíduo ponderado
$ J $	determinante do Jacobiano de transformação de coordenadas
$U_i$	componente axial da velocidade no nó de índice $i$
$V_i$	componente radial da velocidade no nó de índice $i$
$P_i$	pressão no nó de índice $i$
$X_i$	coordenada axial na malha física do nó $i$
$R_i$	coordenada radial na malha física do nó $i$
<b>R</b>	vetor dos resíduos
<b>C</b>	vetor solução do sistema de equações
$g$	componente radial ou vertical da gravidade
$CMC$	concentração micelar crítica
$HLB$	balance hidrofílico lipofílico
$EOR$	recuperação avançada de petróleo (“enhanced oil recovery”)
$O/W$	emulsão óleo em água
<b>M</b>	matriz massa
$D\xi$	coeficiente de difusão da coordenada $\xi$
$D\eta$	coeficiente de difusão da coordenada $\eta$

## Símbolos Gregos

$\rho$	massa específica do fluido
$\mu$	Viscosidade
$\mu_1$	Viscosidade da fase dispersa
$\mu_2$	Viscosidade da fase contínua
$\sigma$	Tensão Interfacial
$\lambda$	Razão de viscosidades gota/fase contínua
$\xi$	coordenada na direção horizontal do domínio de referência
$\eta$	coordenada na direção vertical do domínio de referência
$\Gamma$	simboliza o contorno do domínio físico
$\Omega$	simboliza o interior do domínio físico
$\phi_i$	funções peso para as equações de velocidade e de malha
$\chi_i$	funções peso para a equação de continuidade