



Flavio Lage Bormann

**Análise do processo de quebra de gota
de emulsões no escoamento através de
um capilar com garganta**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título 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, 24 de setembro de 2010



Flavio Lage Bormann

**Análise do processo de quebra de gota
de emulsões no escoamento através de
um capilar com garganta**

Dissertação de Mestrado

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

Prof. Márcio da Silveira Carvalho.

Orientador

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

Prof. Luis Fernando Alzuguir Azevedo.

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

Prof^a. Mônica Feijó Naccache

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

Prof. José Eugenio Leal

Coordenador Setorial do Centro

Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 24 de setembro de 2010

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

Flavio Lage Bormann

Graduou-se em engenharia mecânica pela PUC-Rio em 2007. Atualmente atua na área de gerenciamento de projetos, contratos e obras de usinas termoeletricas.

Ficha Catalográfica

Bormann, Flavio Lage

Análise do processo de quebra de gota de emulsões no escoamento através de um capilar com garganta / Flavio Lage Bormann; orientador: Márcio da Silveira Carvalho. – 2010.

81 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. Quebra de gota. 3. Emulsão. 4. Pressão capilar. 5. Teoria da lubrificação. 6. Modelagem numérica. I. Carvalho, Márcio da Silveira. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Mecânica. III. Título.

CDD: 621

Este trabalho é dedicado a Paula Farias por sua dedicação e empenho, principalmente nos momentos difíceis da vida. Obrigado de coração. Dedico a minha família, mas principalmente a memória de meu pai, Erialdo Bormann, pelos valores e postura exemplares. E a minha mãe pela perseverança em continuar praticamente sozinha a minha educação. *“Meu agradecimento vem em forma de resultados.”*

Agradecimentos

Agradeço especialmente a minha namorada Paula pela dedicação e companheirismo indispensáveis em todas as fases deste trabalho. Sem você seria muito mais difícil.

Ao professor Márcio Carvalho pela parceria e orientação fundamentais para a conclusão desta dissertação. Em especial a paciência e tranquilidade para entender as dificuldades envolvidas nessa caminhada. À PUC-Rio pela infraestrutura, sem os quais este trabalho não poderia ter sido concretizado.

A minha família, com especial atenção a minha mãe, tia e avó que ficaram sempre de camarote nesta torcida.

Lembro aqui, com carinho da quase co-orientação e grande apoio dos amigos Sergio Ribeiro, Priscilla Ribeiro, Frederico Gomes e Ranena Flores, que não pouparam energia para me ajudar a superar esse desafio.

Resumo

Bormann, Flavio Lage; Carvalho, Márcio da Silveira. **Análise do processo de quebra de gotas de emulsões no escoamento através de um capilar com garganta.** Rio de Janeiro, 2010. 81p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A formação de emulsões está presente em diversas atividades industriais, incluindo o setor petrolífero. A análise de quebra de gota em capilares com garganta remete ao estudo da formação de emulsões e suas características em meios porosos. Esta dissertação apresenta um modelo numérico baseado nas equações de conservação, e na teoria da lubrificação. O modelo foi desenvolvido considerando as duas fases como fluidos Newtonianos, e o sistema de equações diferenciais resultante foi resolvido pelo método de diferenças finitas centrais, implementado em ambiente MATLAB®. Determina-se o campo de pressão dos fluidos, bem como sua interface ao longo do tempo. A análise da influência de parâmetros, tanto da geometria do capilar quanto das propriedades dos fluidos, indicou comportamentos adequados em comparação com os dados disponíveis na literatura. Observou-se que a viscosidade do fluido da fase contínua possui maior influência no tempo de formação de gota, do que a viscosidade do fluido da fase dispersa. O tempo de quebra de gota da fase dispersa varia linearmente com a viscosidade da fase contínua. Observa-se que o raio da garganta do capilar influencia diretamente no tempo de quebra de gota, onde para raios menores, o tempo de formação de gota será menor do que para um raio de garganta maior, devido a um gradiente de pressão capilar mais elevado.

Palavras - chave

Quebra de gota; Emulsão; Pressão capilar; Teoria da lubrificação; Modelagem numérica.

Abstract

Bormann, Flavio Lage; Carvalho, Márcio da Silveira (Advisor). **Snap off of emulsion drops in the flow through a constricted capillary**. Rio de Janeiro, 2010. 81p. MSc. Dissertation – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The snap off of emulsion drops appears in several industrial activities, including the oil industry. The analysis snap off in a constricted capillary is related to the study of emulsion formation and its characteristics in a porous media. This thesis presents a numerical model based on the conservation equations and lubrication theory developed for Newtonians fluids. The resulting system of differential equations was solved by finite difference and the code implemented in MATLAB®. The analysis of the effect of different parameters, such as the geometry of the capillary and the liquid proprieties, indicated appropriate behaviors in comparison to data in the literature. It was observed that the viscosity of the continuous phase fluid has a stronger influence in the snap off time than the viscosity of the dispersed phase fluid. The snap off time rises with the viscosity of the continuous phase fluid. It was observed that the variation of the radius of the neck directly influences the snap off time, where smaller throat radius leads to shorter snap-off time, due to stronger capillary pressure gradient.

Keywords

Snap off; Emulsion; Capillary pressure; Lubrification theory; Numerical modeling.

Sumário

1	Introdução	13
1.1.	Motivação	13
1.2.	Descrição do Problema	18
1.3.	Objetivo	19
2	Revisão Bibliográfica	20
3	Formulação Matemática	29
3.1.	Equações de Conservação e Teoria da Lubrificação	29
3.2.	Equações de Evolução da Interface e Pressão Capilar	32
3.3.	Solução do Sistema de Equações pelo Método das Diferenças Finitas	38
3.4.	Solução do Sistema Não-Linear pelo Método de Newton	41
4	Resultados e Caso Base	42
4.1.	Análise de Comportamento do Modelo	42
4.2.	Análise de Independência com o Tamanho da Malha	46
4.3.	Análise de Independência com o Passo de Tempo	48
5	Análise Paramétrica	50
5.1.	Caso Base	52
5.2.	Efeito da Variação da Viscosidade das Fases de Fluido Contínua e Dispersa	54
5.3.	Efeito da Variação do Raio da Garganta	58
5.4.	Efeito da Variação da Espessura de Filme da Fase Contínua	61
6	Comentários Finais e Sugestões de Trabalhos Futuros	64
7	Bibliografia	66
	Apêndice	69
A.	Códigos em MATLAB®	69

Lista de figuras

Figura 1.1: Pontos críticos para a formação de emulsão na área de exploração de petróleo. Pena (2007).	13
Figura 1.2: Esquema em escala microscópica de injeção secundária em meio poroso. Rossen (1999).	14
Figura 1.3: Emulsão de água em óleo (W/O). No detalhe, a fase contínua (água), a fase dispersa (óleo) na região da restrição (garganta). Pena (2007).	15
Figura 1.4: Mosaico ilustrativo de sequência de eventos para quebra de gota em um capilar com garganta. Pena (2007).	16
Figura 1.5: Reversão do fluxo da fase contínua (2), por consequência do aumento da pressão capilar a jusante da garganta. escoamento do sistema está orientado no sentido oposto ao fluxo da fase contínua. Pena (2007).	16
Figura 1.6: Parametrização do sistema. Pena (2007).	18
Figura 2.1: Sequência de formação de bolha em um escoamento bifásico em meio poroso. Rossen (2009).	20
Figura 2.2: Possibilidades de formação de bolhas em uma cavidade, ou poro. Rossen (1999).	21
Figura 2.3: Processo de quebra de gota pela variação de pressão capilar. Rossen (2009).	22
Figura 2.4: Processo de formação da lamela, e seu escoamento para a garganta. Roosen (2009).	23
Figura 2.5: Capilar utilizado por Jost (2007) e Pena (2007), e aplicado neste trabalho. Pena (2007).	25
Figura 2.6: Quebra de gotas em elemento de tubulação, como junções tipo "T". Pena (2007).	26
Figura 2.7: Curva limite para a formação de gota em função da razão de viscosidade, k e da capilaridade, Ca . Pena (2007).	27
Figura 2.8: Parametrização utilizada no modelo deste trabalho. Pena (2007).	28
Figura 3.1: Distribuições esquemática de nós.	38
Figura 4.1: Parametrização utilizada no modelo deste trabalho. Pena (2007).	42
Figura 4.2: Monitoramento da posição do raio da interface no ponto central da garganta.	43
Figura 4.3: Instantes de tempo indicando o movimento da interface para o Caso Base.	44

Figura 4.4: Instantes de tempo indicando a variação da distribuição de pressão nos fluidos de fase dispersa e contínua.	45
Figura 4.5: Variação da posição da interface no ponto central da garganta ao longo do tempo. Modelos com 401 e 801 nós.	46
Figura 4.6: Variação da interface dos fluidos no ponto central da garganta. Modelo com passos de tempo diferentes.	48
Figura 5.1: Deslocamento da interface no ponto central da garganta ao longo do tempo. Caso base.	52
Figura 5.2: Posição da interface dos fluidos em na simetria do poro ao longo do tempo. Franjas de tempo para o Caso base.	53
Figura 5.3: Distribuição de pressão capilar ao longo da extensão do poro. Caso base.	53
Figura 5.4: Deslocamento do ponto central da garganta ao longo do tempo. Variação da viscosidade da fase dispersa.	55
Figura 5.5: Influência da viscosidade da fase contínua no tempo de quebra de gota. Jost (2007).	56
Figura 5.6: Posição da interface dos fluidos ao longo da extensão do poro. Variação da viscosidade da fase contínua.	57
Figura 5.7: Distribuição de pressão adimensional ao longo da extensão do poro. Variação da viscosidade da fase contínua.	57
Figura 5.8: Deslocamento da interface no ponto central da garganta ao longo do tempo. Variação do raio da garganta.	58
Figura 5.9: Pressão capilar inicial em função do raio da garganta.	59
Figura 5.10: Tempo de quebra de gota em função do raio da garganta do capilar.	59
Figura 5.11: Dados de Jost (2007). Tempo de quebra de gota em função do raio da garganta do capilar.	60
Figura 5.12: Deslocamento da interface no ponto central da garganta ao longo do tempo. Variação da espessura de filme.	61
Figura 5.13: Pressão capilar inicial em função da espessura de filme do fluido da fase contínua.	62
Figura 5.14: Tempo de quebra de gota em função da espessura do filme.	63
Figura 5.15: Resultados de Jost (2007). Tempo de quebra de gota em função da espessura do filme de fluido da fase contínua.	63

Lista de Variáveis

Letras Latinas

L	comprimento das seções do poro mais a seção da garganta (m),
T	comprimento da seção da garganta (m),
R_{int}	raio da interface entre os fluidos da fase dispersa e contínua (m),
R	raio do poro (m),
r	parâmetro de coordenada radial (m),
z	parâmetro de coordenada de comprimento (m),
N	número de nós (-),
h	raio da interface, em momento anterior a Equação 27 (m),
P_c	Pressão capilar (Pa),
P_1	Pressão da fase dispersa (Pa),
P_2	Pressão da fase contínua (Pa),
u	velocidade na direção da coordenada cilíndrica “z” (m/s),
v	velocidade na direção da coordenada cilíndrica “r” (m/s),
w	velocidade na direção da coordenada angular “ θ ” (rad/s),
u_1	velocidade da fase dispersa (m),
u_2	velocidade da fase contínua (m),
q_1	vazão da fase dispersa (m ³ /s),
q_2	vazão da fase contínua (m ³ /s),
C_1	constante de integração (-),
C_2	constante de integração (-),
C_3	constante de integração (-),
C_4	constante de integração (-),

Letras Gregas

σ	Tensão interfacial (N/m),
θ	parâmetro de coordenada angular (rad),
μ_1	viscosidade da fase dispersa (Pa.s),
μ_2	viscosidade da fase contínua (Pa.s),

Letras Subscritas

i	posição do número de nós (-),
j	contador de passo de tempo (-),
int	interface entre as fases de fluidos (-),
C	indicador de elemento capilar (-),

Numerais Subscritos

1	indicador de fase dispersa (-),
2	indicador de fase contínua (-),