

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E
ENGENHARIA DE MATERIAIS

Vanessa Pilati Peixoto

**FORMAÇÃO DE BOLHAS NO ESCOAMENTO DE FLUIDOS
EM MICROMODELOS DE MEIOS POROSOS**

Dissertação submetida ao
Programa de Pós-Graduação em
Ciência e Engenharia de Materiais
da Universidade Federal de Santa
Catarina para obtenção do Grau de
Mestre em Ciência e Engenharia
de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Celso Peres
Fernandes

Co-orientador: Prof. Dr. José
Antônio Bellini da Cunha Neto.

Florianópolis,
Fevereiro de 2011.

Catálogo na fonte pela Biblioteca Universitária
da
Universidade Federal de Santa Catarina

P397F Peixoto, Vanessa Pilati

Formação de bolhas no escoamento de fluidos em micromodelos de meios porosos [dissertação] / Vanessa Pilati Peixoto ; orientador, Celso Peres Fernandes. - Florianópolis, SC, 2011. 75 p.: il., grafs., tabs.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais.

Inclui referências

1. Engenharia de materiais. 2. SNAP. 3. Micromodelos. 4. Bolhas. I. Fernandes, Celso Peres. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais. III. Título.

CDU 620.1

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de
Materiais

**Formação de Bolhas no Escoamento de Fluidos em
Micromodelos de Meios Porosos**

VANESSA PILATI PEIXOTO

Esta Dissertação foi julgada adequada para a obtenção de título
de MESTRE EM ENGENHARIA
ESPECIALIDADE CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS
Sendo aprovada em sua forma final.

Prof. Celso Peres Fernandes, Dr. Eng. – Orientador

Prof. José Antônio Bellini da Cunha Neto, Dr. – Coorientador

Prof. Carlos Augusto Silva de Oliveira, DSc. – Coordenador do
Curso

BANCA EXAMINADORA

Prof. João Cardoso de Lima, Dr.– Presidente

Prof. Carlos Roberto Appoloni, Dr.– Membro Externo

Prof. Fabiano Gilberto Wolf, Dr. Eng. – Membro

“O que sabemos é uma gota, o que ignoramos é um oceano.”

Isaac Newton

Ao Henrique, pelo apoio sempre presente.

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Celso Peres Fernandes pela orientação, ensinamentos, idéias e apoio.

Ao Professor José Antônio Bellini da Cunha Neto, pela co-orientação e seus conselhos.

Aos professores Fabiano Gilberto Wolf, João Cardoso de Lima e Carlos Roberto Appoloni, membros da banca examinadora.

Ao curso de Pós Graduação em Ciência e Engenharia dos Materiais e aos professores que cruzaram o meu caminho com seus ensinamentos.

Ao Henrique, pela cumplicidade, carinho e apoio, que foram imprescindíveis para a realização deste trabalho.

À minha família, meu porto seguro.

Ao Giuseppe, Pedro e demais bolsistas de IC do LMPT, pela ajuda em algumas medidas e construção do micromodelo.

Aos amigos do LMPT, pela troca de idéias e momentos de descontração.

Ao CERMAT-EMC, pela disponibilidade para realização de medidas no viscosímetro.

Ao CENPES/Petrobras e à CAPES, pelo auxílio financeiro e colaboração com materiais para desenvolvimento desse projeto.

SUMÁRIO

Capítulo 1. Introdução.....	1
1.1. Exploração do Petróleo.....	2
1.2. Justificativa.....	3
1.3. Objetivos.....	5
1.4. Escopo da Dissertação.....	6
Capítulo 2. Conceitos Fundamentais.....	8
2.1. Tensão Superficial e Interfacial.....	8
2.2. Molhabilidade e Ângulo de Contato.....	9
2.3. Viscosidade – Lei de Newton.....	11
2.4. Gravidade e Capilaridade.....	12
2.5. Número Capilar.....	13
2.6. Snap-off.....	13
2.7. Estado da Arte.....	15
2.7.1. Número Capilar.....	20
2.7.2. Razão de Viscosidades.....	21
2.7.3. Razão de Diâmetros Poro-Garganta.....	25
2.7.4. Outras Considerações.....	25
Capítulo 3. Abordagem Experimental.....	28
3.1. Caracterização dos Fluidos.....	28
3.1.1. Viscosidade Dinâmica.....	28
3.1.2. Tensão Interfacial e Superficial.....	31
3.1.3. Ângulo de Contato - Molhabilidade.....	32
3.1.4. Densidades.....	35
3.2. Construção do Micromodelo.....	36
3.3. Bancada Experimental.....	43
3.4. Procedimento Experimental.....	44
3.4.1. Deslocamento de Óleo com Ar.....	44
3.4.2. Deslocamento de Óleo com Água Deionizada....	48
Capítulo 4. Resultados e Discussões.....	49
4.1. PARTE I: Deslocamento de Óleo com Ar.....	49

4.1.1.	Comprimento da Bolha Antes do Rompimento ...	55
4.1.2.	Tempo Para a Formação da Primeira Bolha.....	58
4.1.3.	Tempo Para Rupturas Sucessivas	62
4.1.4.	Frequência de Rupturas	64
4.2.	PARTE II: Deslocamento de Óleo com Água Deionizada...	67
Capítulo 5.	Conclusões	70

RESUMO

Devido à importância energética do petróleo no mundo, um grande número de estudos sobre o escoamento bifásico em meios porosos têm sido desenvolvidos. Contudo, ainda não há compreensão plena dos mecanismos associados a este tipo de escoamento, como por exemplo, a formação de emulsões e espumas em reservatórios de petróleo, que causam inconvenientes operacionais dentro da indústria petrolífera e apresentam um desafio tecnológico.

Neste trabalho de dissertação foi analisado um dos principais mecanismos de quebra de gotas e bolhas dentro de um meio poroso, que ocorre quando um fluido não molhante atravessa uma garganta de poro inicialmente preenchida por um fluido molhante, mecanismo conhecido na literatura como *snap-off*.

Experimentos de drenagem (óleo/ar e óleo/água) foram conduzidos em um micromodelo, estrutura artificial que busca certa representação do meio poroso e proporciona uma adequada visualização do comportamento da interface ao longo do escoamento. Uma vez que o *snap-off* ocorre em escala de poro, foi fabricado um micromodelo em acrílico constituído de um canal de seção reta triangular com garganta, representando uma garganta de poro. Nos experimentos foram utilizados quatro óleos minerais, de diferentes propriedades e variou-se a vazão volumétrica a fim de obter diferentes números capilares na garganta.

Foram investigadas as influências de propriedades relacionadas aos fluidos e ao escoamento no mecanismo do *snap-off*, como viscosidade dinâmica, tensão interfacial e número capilar. Pôde-se avaliar a influência destes parâmetros no tamanho das bolhas formadas, bem como no tempo para a quebra destas e na frequência associada. Estes resultados permitem conhecer as características das bolhas formadas em função dos parâmetros operacionais ao longo da extração do petróleo.

Palavras-chave: Snap-off, Micromodelos, Bolhas

ABSTRACT

Because of petroleum's energetic importance in the world, a great deal of studies regarding two-phase flow in porous media has been developed. However, there is not a whole comprehension of the mechanisms associated to this kind of flow, like the emulsion/foam formation in petroleum reservoirs, which might cause operational problems in the petroleum industry, and currently are considered as a technological challenge.

The present dissertation is focused on one of the main mechanisms of drop/bubble break in porous media, which occurs when a non-wetting fluid flows through a pore-throat filled with a strongly wetting fluid. This mechanism is known as *snap-off*.

Drainage experiments (oil/air and oil/water) have been conducted in a micromodel, which is an artificial structure that simulates some of the complexities of a real porous media, and provides adequate visualization of interfacial behavior throughout the flow. Several micromodels were fabricated in acrylic glass, consisting of a triangular channel with single constriction, representing a pore-neck at pore level. In the experiments were used 4 mineral oils with different properties. The flow rate was varied with the objective of obtaining different capillary numbers in the constriction.

Fluid and flow property-related influences in *snap-off* mechanism were investigated, such as dynamic viscosity, interfacial tension and capillary number. It was possible to evaluate the influence of such parameters in bubble sizes, as well as snap-off times and associated frequency. These results extends the knowledge of bubble generated characteristics as a function of operational parameters during petroleum extraction.

Keywords: Snap-off, Micromodels, Bubbles.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1. Consumo de petróleo (em barris) por dia no Brasil, dados de 2004 a 2009. Fonte: BRASIL. Ministério de Minas e Energia, <i>Anuário Estatístico Brasileiro do Petróleo, Gás natural e Biocombustíveis</i> , 2010	1
FIGURA 2. Imagem microtomográfica arenito (adaptada de MOREIRA, 2006).....	2
FIGURA 3. Ilustração de um meio poroso, que em escala de poro pode ser representado por um canal com garganta. Imagem adaptada de GAUGLITZ <i>et al.</i> (1988).....	5
FIGURA 4. Ligações da molécula no interior do líquido e na superfície líquido-gás. Fonte: DE GENNES <i>et al.</i> (2004)	8
FIGURA 5. Ângulo de contato θ , resultado das tensões nas interfaces A/B, sólido/B e sólido/A	9
FIGURA 6. Efeito da rugosidade na molhabilidade de um substrato sólido. Fonte: DE GENNES <i>et al.</i> (2004)	10
FIGURA 7. Ilustração da dinâmica do <i>snap-off</i>	14
FIGURA 8. Frequência de aplicação de vários tipos de micromodelos, dos anos 50 até os anos 80. Fonte: BUCKLEY (1991)	16
FIGURA 9. Geometria do canal utilizado por Roof. Fonte: ROOF (1970)	17
FIGURA 10. (a) Ilustração da sessão reta de um canal (poro) de um meio poroso real; (b) Modelos de canais (poros) que melhor representam o meio poroso real. Fonte: CHAMBERS & RADKE (1991)	18
FIGURA 11. Imagem (MEV) do micromodelo em silicone utilizado em KOVSCEK <i>et al.</i> (2007).....	19
FIGURA 12. Largura da frente de fluido não-molhante que avança em uma drenagem, em função do número capilar. Fonte: AMYOT (2004)	20
FIGURA 13. Mapeamento das condições operacionais (número capilar e razão de viscosidades) onde ocorreu o <i>snap-off</i> no experimento de formação de emulsões. Fonte: PEÑA <i>et al.</i> (2009)	22
FIGURA 14. Tempo adimensional ($T/T^*=T\gamma/\mu l_{garg}$) para o <i>snap-off</i> em função do número capilar. Fonte: AMYOT (2004).....	24

FIGURA 15. Tamanho das bolhas de ar formadas para os três óleos (diferentes viscosidades dinâmicas) utilizados por AMYOT (2004)..	25
FIGURA 16. (a) Tempo para o <i>snap-off</i> a $Ca=10^{-3}$, com temperatura fixa em 22°C; (b) Tempo para o <i>snap-off</i> a $Ca=2 \cdot 10^{-4}$ (mostrando flutuações), com temperaturas variando em 21 a 23°C. Fonte: AMYOT, 2004.	26
FIGURA 17. Comportamento da viscosidade dinâmica em função da temperatura para os diferentes óleos minerais...	29
FIGURA 18. Tensiômetro Sigma700, KSV. À direita: anel utilizado para medir a tensão na superfície...	31
FIGURA 19. Goniômetro CA 20, Dataphysics.....	33
FIGURA 20. (a) Gota de vaselina líquida espalhada em uma superfície de acrílico usinado, com ângulo medido de 4,5°; (b) Gota de água deionizada espalhada em uma superfície de acrílico usinado, com ângulo de 82,7°.....	33
FIGURA 21. Gota de água deionizada em uma superfície de acrílico, rodeada por EMCPlus 70. Ângulo de contato medido de 134,7°.....	34
FIGURA 22. Ilustração da geometria escolhida para o micromodelo.....	37
FIGURA 23. Esquema (fora de escala) das dimensões do canal do micromodelo.....	38
FIGURA 24. Microfresadora ICP4030, Isel Automation acoplada a um microcomputador que a controla através do software Kynon (Plataforma Galaad).....	39
FIGURA 25. Dimensões reais do micromodelo.....	41
FIGURA 26. Parâmetros dimensionais da sessão reta do canal....	42
FIGURA 27. Bancada experimental montada para os experimentos realizados.....	44
FIGURA 28. Números capilares obtidos na garganta do canal a partir de diferentes vazões volumétricas para cada óleo.....	45
FIGURA 29. Diferentes vazões volumétricas e os números capilares atingidos na região da garganta do canal.....	48
FIGURA 30. Número capilar na garganta em função da vazão volumétrica imposta.....	50
FIGURA 31. Dimensões do canal do micromodelo.....	51
FIGURA 32. Número de Reynolds (Re) em função do número capilar.....	51

FIGURA 33. Configuração da fase completamente molhante durante a entrada da fase não-molhante no canal, durante um processo de drenagem	52
FIGURA 34. Alguns quadros do experimento isoparafina/ar com vazão de 3ml/min, registrados a 200 quadros por segundo.....	54
FIGURA 35. Medida do comprimento da primeira bolha antes de ocorrer o <i>snap-off</i> (experimento ar/isoparafina a 3ml/min, atingindo um número capilar de $1,8 \times 10^{-3}$ na região da garganta)	55
FIGURA 36. Comprimento da bolha antes de romper em função do número capilar (escala logarítmica) na garganta	56
FIGURA 37. Desvio padrão obtido das medidas realizadas na FIGURA 36	56
FIGURA 38. Comprimento da bolha avançada antes de romper (múltiplos de $l_1 = 0,5\text{cm}$), em função do número capilar na garganta.....	58
FIGURA 39. Tempo para a formação da primeira bolha de cada experimento em função do número capilar.....	59
FIGURA 40. Tempo para a formação da primeira bolha em função da vazão volumétrica utilizada	60
FIGURA 41. Tempo para a primeira ruptura (adimensional) em função do número capilar.....	61
FIGURA 42. Tempo rupturas sucessivas. Experimento envolvendo isoparafina/ar a uma vazão volumétrica de 10ml/min ($Ca=6,2 \times 10^{-3}$)	62
FIGURA 43. Tempo para rupturas sucessivas. Experimento isoparafina/ar a uma vazão volumétrica de 1,0ml/min ($Ca=1,2 \times 10^{-2}$)	63
FIGURA 44. Tempo para rupturas sucessivas. Experimento EMCAplus/ar a uma vazão volumétrica de 0,01ml/min ($Ca=1,2 \times 10^{-4}$).	63
FIGURA 45. Frequência de rupturas sucessivas em função do número capilar para os diferentes óleos minerais utilizados.....	65
FIGURA 46. Frequência de rupturas sucessivas em função do número capilar para os diferentes óleos minerais utilizados (em escala linear).	65
FIGURA 47. Frequência de ruptura em função da vazão volumétrica utilizada para os experimentos com os diferentes óleos minerais	66

FIGURA 48. Número capilar na garganta em função da vazão volumétrica imposta	67
FIGURA 49. Experimento EMCAplus/água a 0,01ml/min ($Ca=8,5 \times 10^{-5}$)	68
FIGURA 50. Mapeamento de ocorrência do snap-off para diferentes razões de viscosidade e números capilares	69

LISTA DE TABELAS

TABELA 1. Viscosidade dinâmica dos óleos minerais para diferentes temperaturas	29
TABELA 2. Viscosidade dinâmica dos fluidos utilizados a 20°C.....	31
TABELA 3. Medidas de tensão interfacial e superficial.....	32
TABELA 4. Ângulo de contato medido de uma gota de água deionizada em uma superfície de acrílico e rodeada pelo óleo avaliado	35
TABELA 5. Densidades dos fluidos a 20°C e 1atm	36
TABELA 6. Largura capilar (κ^{-1}) envolvida para cada par de fluidos usados nos experimentos	37
TABELA 7. Números de Bond (Bo) na entrada e saída do canal ...	38

Capítulo 1. Introdução

Dentre as fontes energéticas, o petróleo continua se destacando como uma das mais participativas no mundo. No Brasil, o consumo de petróleo e seus derivados é crescente, como demonstra um estudo estatístico da Agência Nacional do Petróleo (FIGURA 1).

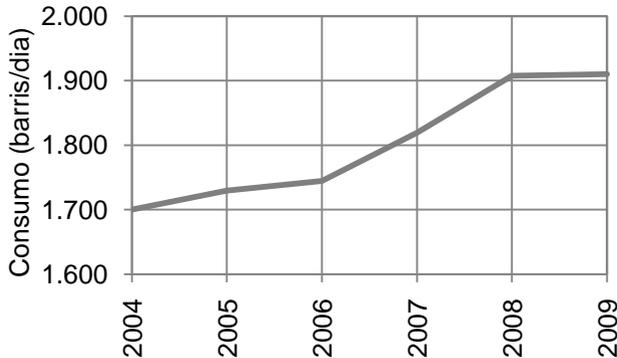


FIGURA 1. Consumo de petróleo (em barris) por dia no Brasil, dados de 2004 a 2009. Fonte: BRASIL. Ministério de Minas e Energia, *Anuário Estatístico Brasileiro do Petróleo, Gás natural e Biocombustíveis, 2010*.

O petróleo consiste em uma mistura de hidrocarbonetos, com origem a partir de matéria orgânica depositada junto com sedimentos, que passaram por condições termoquímicas apropriadas para sua formação ao longo dos anos (THOMAS, 2001). O petróleo é encontrado nos poros das rochas chamadas de reservatório, sendo aprisionado nestas através de barreiras, chamadas de rochas selantes ou capeadoras, que são rochas de baixa permeabilidade (SCHMITT, 2009).

Uma rocha-reservatório pode ser de qualquer origem ou natureza (THOMAS, 2001), possuindo como característica essencial a presença de espaços vazios, permitindo o acúmulo do petróleo. Estes espaços vazios são chamados de poros e fazem parte do volume total de um reservatório. A porosidade de um reservatório, que pode ser definida pela fração de volume vazio em relação ao volume total da rocha, é, portanto, uma característica essencial para sua função, podendo variar de reservatório para reservatório (MOREIRA, 2006 e NUÑEZ, 2007).

A estrutura porosa de uma rocha-reservatório é bastante complexa, com formas e tamanhos de poro variáveis ao longo de seu perfil. Além disso, os poros de um reservatório podem estar interconectados ou não. Aos poros que estão interconectados associa-se o termo de porosidade aberta ou efetiva, sendo esta propriedade importante para o interesse de extração de petróleo, pois é a partir destes poros interconectados que o petróleo poderá escoar. À porosidade total, que também leva em conta os poros fechados, chama-se de porosidade absoluta (THOMAS, 2001 e NUÑEZ, 2007).

Outra característica da complexidade da estrutura porosa é a presença de “poros-garganta”, que são constrições ou afunilamentos ao longo desta estrutura, como ilustrado na FIGURA 2.

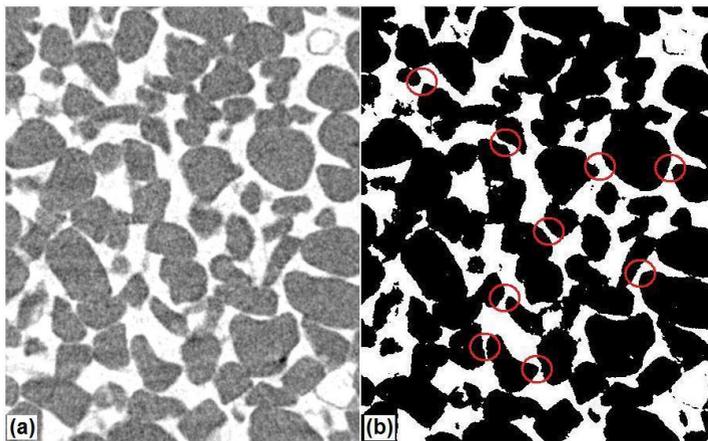


FIGURA 2. Imagem microtomográfica de um arenito (a) Resolução de 3,8µm; (b) Mesma imagem porém binarizada com indicativo de garganta nos poros (fase branca é a fase poro) (adaptada de MOREIRA, 2006).

1.1. Exploração do petróleo

A exploração convencional de um reservatório de petróleo comumente é feita por meio de três processos distintos: *recuperação primária*, *recuperação secundária* e *recuperação avançada* (THOMAS, 2001; NUÑEZ, 2007 e PEÑA, 2007).

Inicialmente, parte do reservatório é naturalmente produzido devido à própria pressão interna do reservatório, causada pela expansão dos fluidos e da rocha, além da

contração do volume poroso do reservatório. Este gradiente de pressão conduz parte do petróleo até a superfície e a esse processo chama-se *recuperação primária*.

Em seguida, quando a pressão interna do reservatório cai, ocorre um declínio na taxa de recuperação. Assim, torna-se necessário o processo de *recuperação secundária*, onde normalmente é feita a injeção de fluidos para a retirada do óleo, como gás ou mais usualmente água. O objetivo é o de manter ou aumentar a pressão necessária para deslocar o óleo contido nos poros do reservatório.

Existem ainda métodos de *recuperação avançada*, que visam aumentar a eficiência dos poços. São diversos os métodos: imiscíveis (injeção de água e/ou gás), miscíveis (injeção de CO₂, gás natural ou nitrogênio), químicos (injeção de solução polimérica, solução alcalina, tensoativos, espumas ou emulsões), térmicos (injeção cíclica de vapor, combustão in situ ou injeção de água quente), ou ainda métodos microbiológicos (NUÑEZ, 2007).

Com o passar dos anos os reservatórios acumulam a água injetada, tornando-se “maduros” (PEÑA, 2007). Devido à grande demanda do petróleo no setor energético, faz-se necessária uma maior exploração dos reservatórios, mesmo nos poços maduros, até que se tornem economicamente inviáveis.

Ao longo da exploração, além do óleo, parte do fluido injetado pode começar a ser produzido. Por se tratar de um escoamento bifásico, o petróleo e o fluido injetado não se misturam, de maneira que o óleo produzido começa a apresentar dispersões do fluido injetado (THOMAS, 2001). Estas dispersões são muito comuns e aparecem normalmente na forma de emulsões óleo em água ou mais freqüentemente água em óleo (CUTHIELL, 1995; PEÑA, 2007 e PEÑA *et al.*, 2009).

1.2. Justificativa

Emulsões são sistemas heterogêneos, compostos por dois fluidos imiscíveis, onde um encontra-se disperso sob a forma de gotas ou gotículas. O fluido que contém as gotas é normalmente chamado de fase contínua, enquanto o fluido que forma as gotas de fase dispersa. Quando a fase dispersa é composta por um gás é comum chamar de espumas ao invés de emulsões (NUÑEZ, 2007 e PEÑA, 2007).

Emulsões e espumas estão presentes desde a indústria alimentícia à indústria de fármacos. Na indústria petrolífera, a presença de emulsões associadas ao petróleo pode provocar alguns problemas, como por exemplo: corrosão nos equipamentos, perda nas linhas de produção, necessidade de etapas de desemulsificação, maior consumo de energia, aumento no tempo e custo de manutenção, muitas vezes diminuindo a viabilidade de exploração do reservatório (PEÑA *et al.*, 2009). Por outro lado, a formação e propagação de espumas em reservatórios de petróleo podem ser positivas, associadas a processos de recuperação avançada de petróleo (CHAMBERS & RADKE, 1991; GAUGLITZ *et al.*, 2002 e CHEN *et al.*, 2005).

A formação de dispersões durante a produção do petróleo pode ocorrer espontaneamente durante o escoamento bifásico através de um sistema complexo de gargantas e poros interconectados dentro do reservatório, no fundo do poço ou ainda no escoamento através de tubos e válvulas nas instalações até a superfície. Grande parte do óleo produzido é na forma de emulsões, especialmente no caso de óleos pesados, onde a viscosidade do óleo é alta (sendo superior a 1000 cP) (PEÑA, 2007).

Um mecanismo importante de formação de gotas e bolhas, associadas à formação de emulsões e espumas ao longo do reservatório consiste na quebra de continuidade da fase não-molhante quando esta atravessa uma constricção ou garganta no espaço poroso preenchido por uma fase molhante, mecanismo conhecido como *snap-off* (NUÑEZ, 2007; PEÑA, 2007 e PEÑA *et al.*, 2009), que é o tema alvo dessa dissertação. O mecanismo do *snap-off* será melhor descrito no capítulo 2.

A fração de dispersões produzidas junto com o óleo depende de diversos fatores que envolvem desde a natureza do reservatório, até as características de operação ao longo da extração e a “maturidade” de um reservatório. As espumas e emulsões formadas podem apresentar maior ou menor estabilidade em função da presença de agentes emulsificantes do próprio óleo, que impedem a coalescência das bolhas e gotas que as compõem (PEÑA, 2007).

Uma vez que a exploração de um reservatório envolve altos custos e riscos, o desenvolvimento de estudos que possam agregar conhecimento de propriedades físicas da rocha bem como do comportamento de fluidos dentro da mesma são de

grande valia por estarem diretamente ligados à produtividade e eficiência dos reservatórios.

Há dificuldades no entendimento do escoamento multifásico em meios porosos, especialmente no comportamento da interface ao longo do mesmo. Essa dificuldade encontra-se basicamente na impossibilidade de visualizar o que ocorre dentro da rocha durante a extração de petróleo. Baseados nisto, iniciaram-se trabalhos experimentais conduzidos em micromodelos, que são estruturas artificiais desenvolvidas para representar certas complexidades da estrutura porosa em determinada escala, e que proporcionam visualização dos processos de deslocamento, o que não é possível dentro de uma rocha real (BUCKLEY, 1991).

A principal vantagem de se trabalhar com micromodelos é que estes permitem a visualização de interações fluido-fluido e fluido-sólido, permitindo estudos que envolvem o comportamento interfacial ao longo do escoamento bifásico.

Uma vez que o mecanismo de snap-off, (como será descrito no próximo capítulo) ocorre na escala do poro, pode-se modelar um meio poroso através de um canal com uma constricção ou garganta, como ilustrado na FIGURA 3.

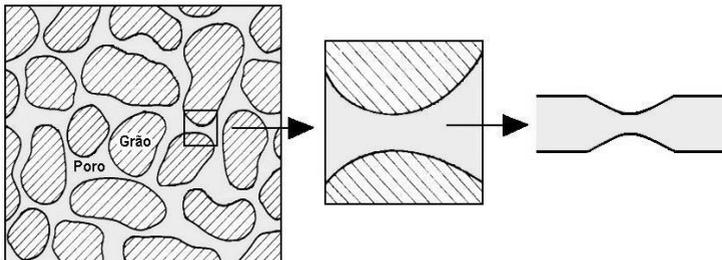


FIGURA 3. Ilustração de um meio poroso, que em escala de poro pode ser representado por um canal com garganta. Imagem adaptada de GAUGLITZ *et al.* (1988).

1.3. Objetivos

Neste trabalho de dissertação teve-se como principal objetivo estudar experimentalmente através de micromodelos o mecanismo de quebra de gotas pelo escoamento bifásico em gargantas de poros pelo mecanismo do *snap-off*.

Assim, um micromodelo foi fabricado em acrílico pelo método de microfresagem, onde foram realizados experimentos de escoamento bifásico.

Foram analisadas as influências de propriedades dos fluidos, como viscosidade, densidade e tensão interfacial. Foi também analisada a influência da molhabilidade, que está associada não somente aos fluidos, mas também ao substrato sólido, ou seja, o material do qual foi feito o micromodelo. Foram também avaliadas as condições de operação, levando-se em conta a influência do número capilar, além de caracterizar o tipo de bolha formada em função destes aspectos citados anteriormente.

A quantificação experimental e o entendimento do mecanismo de *snap-off*, bem como as características das bolhas formadas, possuem como objetivo, ainda que de maneira mais fundamental, aumentar o controle dos parâmetros operacionais ao longo da extração de petróleo, de maneira a minimizar os efeitos indesejáveis ao longo desse processo, que como mencionado anteriormente, agregam maiores custos de produção. No caso da formação de espumas por sua vez, um melhor conhecimento nas características das bolhas formadas pode contribuir no desenvolvimento de técnicas de recuperação avançada de petróleo.

1.4. **Escopo da dissertação**

Esta dissertação está dividida em 6 capítulos, sendo que neste primeiro foi feita uma breve introdução do tema relacionado ao trabalho, bem como uma apresentação da motivação (justificativa) para este estudo e objetivos do mesmo.

Em seguida, no capítulo 2, será feita uma descrição dos conceitos fundamentais importantes para o entendimento do trabalho realizado, além de um levantamento do que já foi estudado e apresentado previamente por outros autores em uma revisão bibliográfica.

O capítulo 3 será dividido em duas partes. Na primeira serão apresentadas as características físicas dos fluidos utilizados nos experimentos. Em seguida será realizada uma breve apresentação do processo de fabricação do micromodelo utilizado nos experimentos, seguida da apresentação da bancada experimental. Na segunda parte serão apresentadas as etapas que foram conduzidas durante os experimentos.

No quarto capítulo será feita uma apresentação dos resultados obtidos dos experimentos realizados, bem como discussão destes. Por fim, no capítulo 5 serão levantadas as conclusões tiradas deste trabalho como um todo.

Capítulo 2. Conceitos Fundamentais

Neste capítulo serão apresentados alguns conceitos fundamentais e propriedades básicas para o entendimento dos experimentos realizados. Em seguida, será apresentada uma revisão bibliográfica relacionando os temas aqui abordados e o que já foi trabalhado na literatura.

2.1. Tensão Superficial e Interfacial

Quando dois fluidos imiscíveis estão em contato entre si, uma camada ou zona de transição de espessura infinitesimal é formada, sendo comumente chamada de superfície (para o caso de um líquido e um gás) ou interface (para o caso de dois líquidos envolvidos).

As moléculas que compõem um líquido são mantidas ligadas através de interações intermoleculares de natureza eletrostática. No entanto, as moléculas que se encontram em uma interface ou superfície, perderão metade de suas ligações em relação àquelas que estão ligadas a todas as suas vizinhas (FIGURA 4). Dessa forma, haverá uma tendência natural de reduzir a exposição de moléculas na superfície ou interface, mesmo que isso signifique alterar a forma do volume da massa líquida. A esta tendência associa-se, de maneira fenomenológica, a definição de tensão superficial ou interfacial (DE GENNES *et al.*, 2004).

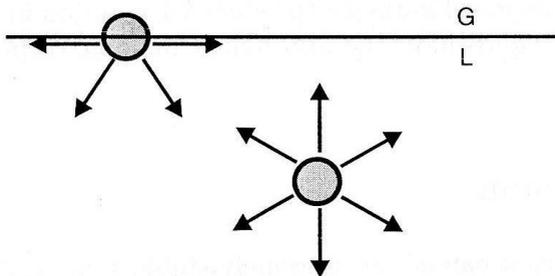


FIGURA 4. Ligações da molécula no interior do líquido e na superfície líquido-gás. Fonte: DE GENNES *et al.*(2004).

Apesar de sua origem ser em nível molecular e microscópico, a tensão interfacial é um parâmetro macroscópico e está presente em diversas aplicações e eventos do cotidiano.

Exemplos muito comuns são: a tendência de uma bolha de sabão manter-se esférica e a tendência de um cabelo crespo ficar mais liso quando molhado. As forças intermoleculares tendem a aglomerar as moléculas na superfície.

A tensão interfacial ou superficial é comumente medida no SI (sistema internacional de unidades) em N/m (Newton por metro).

2.2. Molhabilidade e Ângulo de Contato

Quando dois ou mais fluidos estão em contato com uma superfície sólida, pode haver uma maior tendência natural de um deles se espalhar sobre esta superfície. Assim, define-se a molhabilidade como uma medida da tendência preferencial de um ou mais fluidos se espalhar ou aderir a uma superfície sólida (DE GENNES *et al.*, 2004; TIAB & DONALDSON, 2004).

Seja uma gota de um fluido A, em contato com uma superfície sólida e envolta por um fluido B, a molhabilidade é resultado das tensões presentes nas interfaces envolvidas em equilíbrio, como demonstra a FIGURA 5.

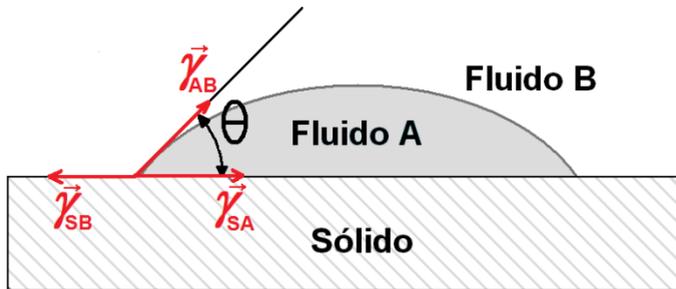


FIGURA 5. Ângulo de contato θ , resultado das tensões nas interfaces A/B, sólido/B e sólido/A.

Pode-se definir um coeficiente de espalhamento (S) que relaciona essas tensões ao tipo de molhamento, dada pela equação 1:

$$S = \gamma_{SB} - (\gamma_{AB} \cos \theta + \gamma_{SA}). \quad (1)$$

Quando $S \geq 0$ há o caso de molhamento total, onde o fluido A formará um filme espalhado sobre a superfície sólida. Neste caso o ângulo de contato θ é 0° .

Para $S < 0$, há o molhamento parcial, ou seja, o fluido A pode se espalhar pela superfície ou não, formando um ângulo de contato que, quando menor que 90° , haverá uma maior tendência do fluido A se espalhar pelo sólido em relação ao fluido B e, portanto, o fluido A será chamado de molhante. Quando o contrário ocorre, ou seja, θ é maior que 90° , a tendência do fluido B se espalhar pelo sólido em relação ao fluido A é maior, assim, fala-se que A é não-molhante e B é o molhante. Apesar de comumente haver a classificação de molhante e não-molhante, é importante enfatizar que mesmo que um fluido tenha uma maior tendência em relação ao outro de se espalhar pela superfície sólida, ainda neste caso os dois fluidos molham a superfície (DE GENNES *et al.*, 2004).

Um aspecto que influencia a molhabilidade é a rugosidade da superfície sólida. Seja um sistema composto por ar, água e um determinado sólido. Quando a superfície sólida é hidrofílica, ou seja, possui afinidade com a água, para uma superfície rugosa de mesma natureza química, essa se torna ainda mais hidrofílica. Por outro lado, se a superfície sólida for hidrofóbica, ela pode-se tornar ainda mais hidrofóbica com o aumento da rugosidade, como pode ser visualizado na FIGURA 6 (DE GENNES *et al.*, 2004).

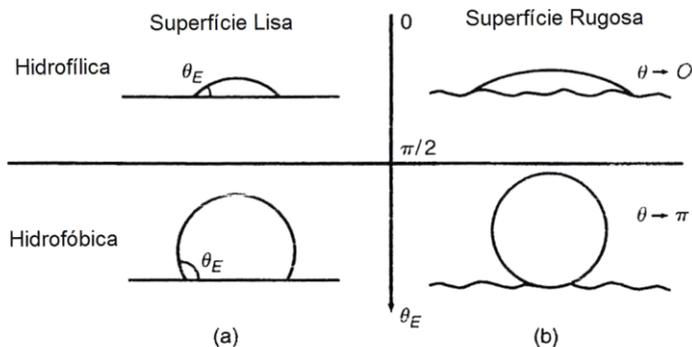


FIGURA 6 – Efeito da rugosidade na molhabilidade de um substrato sólido. (a) Superfície lisa hidrofílica (cima) ou hidrofóbica (baixo); (b) superfície rugosa sendo ainda mais hidrofílica (cima) ou ainda mais hidrofóbica (baixo). Fonte: DE GENNES *et al.* (2004).

2.3. Viscosidade – Lei de Newton

Uma propriedade física importante no escoamento de fluidos é a viscosidade. Intuitivamente, pode-se pensar na viscosidade como o atrito interno do fluido ao movimento, ou seja, a resistência interna ao movimento de partes diferentes deste fluido.

Para um grupo de fluidos, essa grandeza pode ser definida matematicamente pela Lei de Newton da viscosidade. Seja um escoamento isotérmico seguindo um regime laminar (a baixos números de Reynolds), a tensão de cisalhamento τ em uma interface tangente à direção do escoamento é proporcional à taxa de deformação ou de cisalhamento $\dot{\delta}$ (SHAMES, 1973). Ao coeficiente de proporcionalidade dá-se o nome coeficiente de viscosidade ou viscosidade dinâmica (μ), como mostra a equação abaixo:

$$\tau = \mu \dot{\delta}. \quad (2)$$

Fluidos que respeitam essa proporcionalidade descrita pela Lei de Newton são conhecidos como fluidos newtonianos. Neste trabalho, todos os fluidos utilizados possuem esse comportamento linear. Fluidos que não seguem esta relação são conhecidos como não-newtonianos e não serão abordados neste trabalho.

A viscosidade dinâmica de um fluido é fortemente influenciada pela temperatura. Em líquidos e gases, alterações na temperatura podem causar influências opostas. Para um gás de baixa densidade, por exemplo, com a diminuição da temperatura haverá uma diminuição da viscosidade dinâmica. Para um líquido ocorre o contrário, com a diminuição da temperatura, há um aumento na viscosidade dinâmica. Já para um gás de alta densidade, com o aumento da temperatura, haverá a diminuição da viscosidade dinâmica, comportamento semelhante ao de um líquido (BEAR, 1972).

Quando existem dois fluidos envolvidos, pode-se definir a razão de viscosidade (μ^*) como um número adimensional que representa a razão entre as viscosidades dinâmicas do fluido não-molhante e do fluido molhante, através da relação abaixo:

$$\mu^* = \mu_{\text{não-molhante}} / \mu_{\text{molhante}}. \quad (3)$$

No SI, a viscosidade dinâmica costuma ser apresentada em Pa.s (pascal vezes segundo). Por outro lado, é comum representar a viscosidade dinâmica por cP (centiPoise), unidade no CGS, sendo que 1cP representa 1mPa.s.

2.4. Gravidade e Capilaridade

A forma adotada pela interface de uma gota de líquido imersa em um meio segue do efeito da tensão interfacial entre estes, o que fará com que a interface adote uma forma favoravelmente esférica. Quando há a ação gravitacional ou de algum outro campo de forças que seja capaz de interagir com esse líquido, pode haver a distorção na forma desta bolha. Assim, pode-se definir o número de Bond (B_o) como um número adimensional que relaciona as forças de tensão interfacial e as forças associadas à presença de um campo (GAUGLITZ *et al.*, 1988).

$$B_o = (\rho\alpha L^2)/\gamma, \quad (4)$$

onde α é aceleração associada ao campo de forças, L é o comprimento característico (na direção do campo), ρ é a diferença de densidade entre os dois fluidos e γ a tensão interfacial.

No caso onde se quer avaliar a influência da gravidade, α torna-se g (aceleração gravitacional).

Nota-se que no limite no qual as forças de tensão interfacial (denominador da equação) são infinitamente maiores do que as forças gravitacionais ou de campo, o número de Bond tende a zero. Assim, conclui-se que para baixos valores de B_o a influência da gravidade ou do campo envolvido pode ser desprezada. Como será visto no capítulo seguinte, os experimentos realizados neste trabalho envolveram baixos números de Bond de maneira que a influência gravitacional pudesse ser negligenciada ao longo dos mesmos (PEÑA, 2007).

Ainda sobre a ação da gravidade, existe um determinado comprimento que define o que pode ser considerado um capilar, ou seja, condição na qual apenas as forças de tensão interfacial tornam-se influentes (DE GENNES *et al.*, 2004). Esse

comprimento é conhecido como largura capilar (κ^{-1}) e é definido pela equação 5:

$$\kappa^{-1} = \sqrt{\gamma/\rho g}, \quad (5)$$

onde γ é a tensão interfacial ou superficial, ρ a diferença de densidade entre os dois fluidos e g a gravidade.

A largura capilar geralmente é da ordem de alguns mm. Abaixo desse comprimento, a ação da gravidade pode ser desprezada, enquanto acima desse comprimento a gravidade torna-se importante.

Cabe destacar que as equações (4) e (5) relacionam as mesmas grandezas e ambas podem ser utilizadas para avaliar a influência da gravidade nos experimentos.

2.5. Número Capilar

Quando há o escoamento bifásico em um capilar, as forças viscosas e interfaciais atuam de maneira competitiva. Assim, é importante definir o número capilar, Ca , como um número adimensional que relaciona essas duas forças através da relação abaixo (CHAMBERS & RADKE, 1991):

$$Ca = V\mu/\gamma, \quad (6)$$

onde V é a velocidade característica do escoamento, μ é a viscosidade dinâmica da fase molhante e γ a tensão superficial ou interfacial entre os fluidos.

No próximo capítulo será apresentada outra expressão que será utilizada para calcular o número capilar, cuja origem foi esta equação.

2.6. Snap-off

Dispersões são sistemas compostos por pelo menos duas fases imiscíveis, sendo que uma das fases encontra-se dispersa na outra. Quando a fase dispersa é composta por bolhas de gás, comumente chama-se de espuma e quando a fase dispersa é formada por gotas de um líquido, chama-se emulsão. Um dos principais mecanismos para a quebra de bolhas e gotas e conseqüentemente a formação de emulsões e espumas em meios porosos é o *snap-off*.

Durante um processo de drenagem em um canal constrito, que representa um poro com garganta (FIGURA 7), enquanto ocorre invasão de um fluido não-molhante, um filme da fase molhante escoou adjacente às paredes do canal (FIGURA 7a). Quando a fase não-molhante atinge a garganta (FIGURA 7b), uma diferença de pressão da fase molhante conduz um escoamento desta em direção à constrição, formando um colar que cresce (FIGURA 7c), gerando uma instabilidade que irá promover a quebra de continuidade da fase não-molhante (FIGURA 7d). Este mecanismo chama-se *snap-off*.

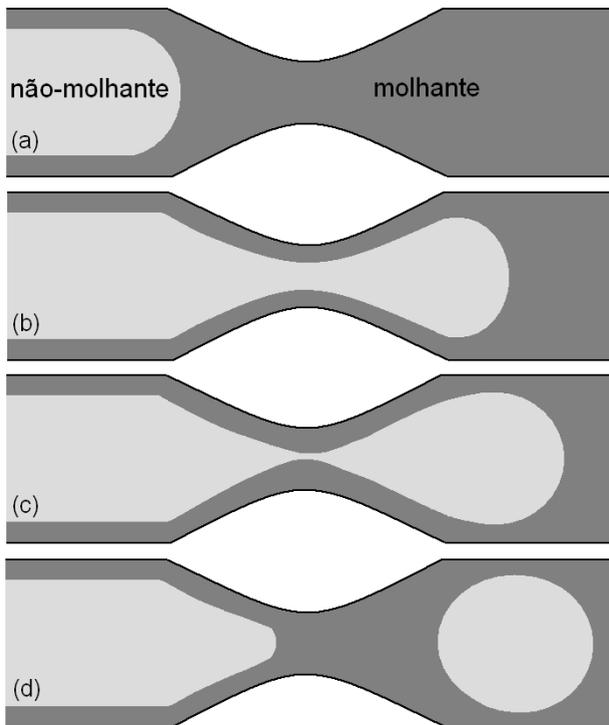


FIGURA 7. Ilustração da dinâmica do *snap-off*. (a) Entrada do fluido não-molhante e formação de um filme de fase molhante nas paredes do canal; (b) Fluido não-molhante atravessa a constrição e formação de um colar de fase molhante nesta região; (c) Aumento do colar de fase molhante na garganta; (d) Quebra de continuidade da fase não-molhante (*snap-off*).

Devido à curvatura da interface da gota na constrição, a pressão da fase molhante é mais baixa nessa região do que longe dela. É essa diferença de pressão que provoca um escoamento da fase molhante em direção à constrição e que gera a instabilidade.

2.7. Estado da Arte

Segundo KOKAL (2005), PEÑA (2007) e PEÑA *et al.* (2009), durante a exploração de petróleo a presença de emulsões indesejadas pode originar alguns inconvenientes, como perdas nas linhas de produção, necessidade de mecanismos de separação e, conseqüentemente, um aumento nos custos de exploração do reservatório. SOO & RADKE (1984) verificaram reduções na permeabilidade do meio poroso quando as emulsões formadas possuíam diâmetros próximos ao da constrição do poro.

Por outro lado, a formação de espumas em meios porosos também é amplamente estudada para o desenvolvimento de técnicas avançadas de recuperação de petróleo (CHAMBERS & RADKE, 1991; GAUGLITZ *et al.*, 2002 e CHEN *et al.*, 2005).

Segundo CUTHIELL *et al.* (1995), emulsões e espumas podem ser formadas no escoamento bifásico no próprio reservatório, no fundo do poço ou ainda nas instalações (válvulas e bombas) que o conduzem até a superfície. Pelo menos uma parte das emulsões e espumas são formadas *in situ*, ou seja, dentro dos poros do próprio reservatório. Cuthiell e seus colaboradores realizaram experimentos em amostras do próprio reservatório, onde observaram emulsificação em números capilares entre 10^{-4} e 10^{-3} , valores encontrados em regiões perto do poço durante processos de recuperação de petróleo. Os autores observaram ainda que com o aumento da velocidade de escoamento dentro do meio poroso, a natureza do escoamento se transformava de escoamento de duas fases para escoamento emulsionado.

Muitos estudos que envolvem o escoamento bifásico são conduzidos nos chamados micromodelos, estruturas artificiais e transparentes, que simulam certas complexidades do meio poroso natural e possibilitam a visualização do escoamento ao longo desta estrutura.

O primeiro micromodelo surgiu com o trabalho de CHATENEVER & CALHOUN (1952, *apud* BUCKLEY, 1991), que

desenvolveram uma camada de esferas de vidro e lucite distribuídas em uma espécie de sanduíche (*bead packs*) através de duas placas planas e visualizaram o escoamento imiscível de óleo e água salina em microescala. Desde então o número de trabalhos que utilizam micromodelos aumentou. BUCKLEY (1991) apresentou um gráfico que mostra a frequência de aplicação de vários tipos de micromodelos até os anos 80 (FIGURA 8).

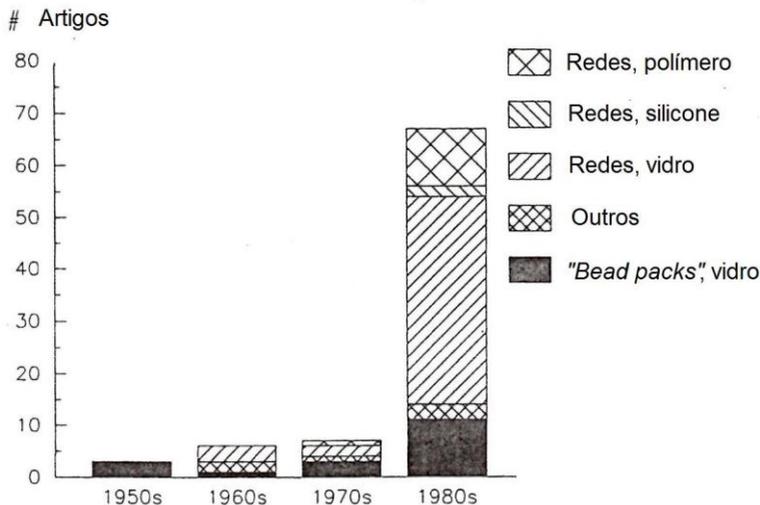


FIGURA 8 – Frequência de aplicação de vários tipos de micromodelos, dos anos 50 até os anos 80. Fonte: BUCKLEY (1991).

O sucesso dos micromodelos deve-se ao fato destes proporcionarem a visualização de interfaces ao longo do escoamento, e dessa forma, possibilitar um melhor entendimento das interações fluido-fluido e fluido-sólido. Quanto ao material, busca-se sempre àquele que possibilite a visualização do escoamento, podendo ser vidro, silicone, acrílico e outros polímeros (BUCKLEY, 1991).

Os micromodelos mais simples são os que representam o meio poroso na escala do poro, ou seja, sendo normalmente compostos por canais. O meio poroso possui certas tortuosidades de maneira que ao longo dessa estrutura porosa ocorrem alterações na área da seção reta desses canais porosos. Assim, micromodelos que buscam essa representação podem ser compostos de canais com gargantas (constrições).

ROOF (1970) utilizou um capilar de vidro de seção reta circular, com uma constrição toroidal, como pode ser visualizado na FIGURA 9, para estudar o mecanismo que chamou de *snap-off*: quando o óleo (fluido não-molhante) avança em direção a uma constrição preenchida por água (fluido molhante) as forças interfaciais são tais que pode ocorrer a quebra da continuidade da fase não-molhante (óleo). Roof estudou principalmente aspectos relacionados à geometria desse mecanismo, como será visto adiante.

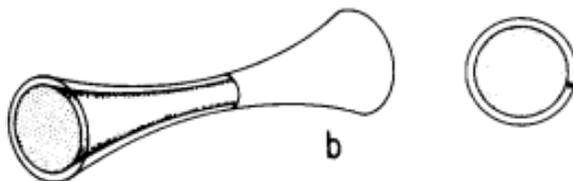


FIGURA 9 – Geometria do canal utilizado por Roof. Fonte: ROOF (1970).

Outros autores utilizaram capilares semelhantes para estudar outros aspectos desse mecanismo. PEÑA (2007) e PEÑA *et al.* (2009) utilizaram um capilar com o mesmo tipo de geometria para estudar aspectos como o número capilar e razão de viscosidades na formação de emulsões durante a extração do petróleo devido ao *snap-off* de Roof.

Para que o *snap-off* ocorra em canais circulares, é necessário que um filme de fase molhante escoe adjacente às paredes do canal em direção à constrição (KOKAL, 2005; PEÑA, 2007 e PEÑA *et al.*, 2009). No entanto, CHAMBERS & RADKE (1991) sugerem que capilares constritos e não-circulares sejam mais representativos do meio poroso real, pois estes possibilitam o escoamento da fase molhante através dos cantos do canal, como pode ser visualizado na FIGURA 10, e não apenas através do filme que se encontra nas paredes (como ocorre com os capilares cilíndricos). De fato, no meio poroso real pode haver rugosidade, de maneira que os canais porosos reais possuam “cantos”, por onde predomina o escoamento da fase molhante (FIGURA 10a), isso favorece a ocorrência do *snap-off* diminuindo o tempo para a ruptura. Assim, segundo estes autores, canais com seção reta quadrada ou triangular seriam mais representativos do meio poroso real (FIGURA 10b).

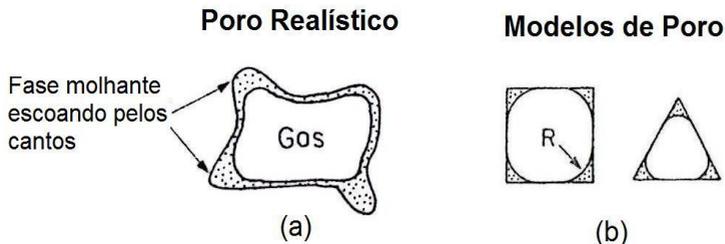


FIGURA 10 – (a) Ilustração da sessão reta de um canal (poro) de um meio poroso real; (b) Modelos de canais (poros) que melhor representam o meio poroso real. Fonte: CHAMBERS & RADKE (1991).

AMYOT (2004) e AMYOT & PLOURABOUÉ (2007) quantificaram o *snap-off* repetitivo na drenagem ar-óleo em um canal triangular achatado, criado através de usinagem em resina. No próximo capítulo será visto que essa geometria serviu de inspiração para a fabricação do micromodelo que foi utilizado nos experimentos dessa dissertação.

Apesar da facilidade de visualização do comportamento da interface e, dessa maneira, proporcionar um maior entendimento do que ocorre dentro do meio poroso, é importante salientar as limitações de representatividade dos micromodelos. ROSSEN (2003) argumentou estas limitações na utilização de canais com uma única constrição no estudo da formação de espumas em meios porosos através de dois motivos. Primeiro, segundo Rossen, tubos de uma única constrição retornam ao estado inicial após cada *snap-off*, onde o poro após a constrição possui volume que pode ser considerado infinito. Em um trabalho anterior, ROSSEN (2000) mostra que no caso de um canal constituído de duas constrições, o volume após a primeira constrição é considerado finito. Neste caso, o *snap-off* cessa quando o poro após a constrição está preenchido por bolhas. Ainda em ROSSEN (2003), o autor argumenta um segundo motivo pelo qual há a limitação de representatividade dos canais em experimentos que estudam a formação de espumas em meios porosos. Essa limitação deve-se ao fato de que os canais dos micromodelos não carregam a informação de conectividade dos poros, de maneira que os fluidos imiscíveis sejam obrigados a escoar pelo mesmo canal. No meio poroso real, as duas fases

podem escoar em uma variedade de poros de diferentes tamanhos, escoando a diferentes velocidades.

Por sua vez, após o trabalho de ROSSEN (2003), KOVSCEK *et al.* (2007) utilizaram um micromodelo composto por uma rede que apresenta um padrão em silicone baseado em uma imagem de seção reta de uma rocha, micromodelo fabricado por HORN BROOK *et al.* (1991), que pode ser visualizado na FIGURA 11.

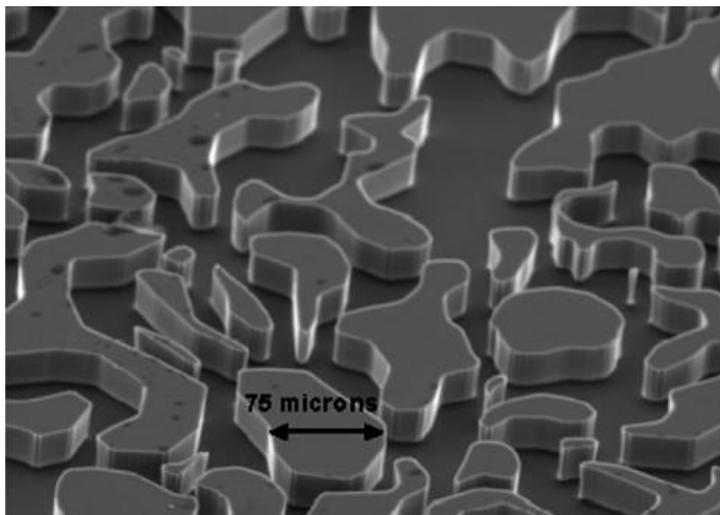


FIGURA 11. Imagem (MEV) do micromodelo em silicone utilizado em KOVSCEK *et al.* (2007).

KOVSCSEK *et al.* (2007) utilizaram este micromodelo para avaliar a relevância do mecanismo do *snap-off* na quebra de bolhas no escoamento simultâneo de água e ar em um meio poroso homogêneo. Em seus experimentos encontraram fortes evidências de que o *snap-off* de Roof seja o mecanismo dominante na formação de espumas em meios porosos e que apesar das limitações, os experimentos desenvolvidos em canais com um única constricção são bem fundados.

O mecanismo do *snap-off* é influenciado por alguns parâmetros relacionados ao fluido e ao escoamento, como número capilar, viscosidade dinâmica dos fluidos envolvidos, geometria do canal, molhabilidade do canal, a presença de agentes tensoativos, entre outros.

2.7.1. Número Capilar

Como visto anteriormente, o número capilar relaciona as forças viscosas e interfaciais de acordo com a equação 6. Observa-se que o número capilar está diretamente ligado à velocidade característica do escoamento, de maneira que para velocidades maiores haverá maiores números capilares.

AMYOT (2004) realizou experimentos envolvendo a drenagem de óleo com injeção de ar em um micromodelo de um canal triangular com seção reta constante. Assim, o autor mediu a largura da frente da fase não-molhante (D_o) avançando no canal em função do número capilar. Segundo seus resultados, com a diminuição do número capilar houve um aumento na largura da frente da fase não-molhante (FIGURA 12) e, conseqüentemente, uma diminuição na espessura do filme da fase molhante. No caso contrário, para números capilares maiores, a espessura do filme da fase molhante era maior.

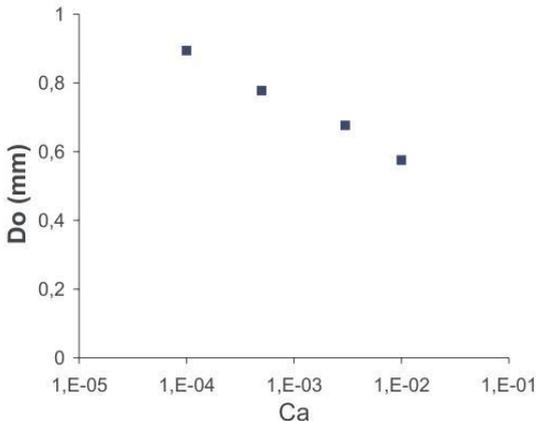


FIGURA 12. Largura da frente de fluido não-molhante que avança em uma drenagem, em função do número capilar. Fonte: AMYOT (2004).

No mecanismo de *snap-off*, a espessura do filme da fase molhante é importante, pois é através deste filme, onde ocorre o escoamento do fluido molhante em direção à garganta, que se promoverá a instabilidade e conseqüente ruptura da fase não-molhante. Este filme é mais espesso quando o número capilar é maior, entretanto, a velocidade de escoamento da fase não-molhante também será maior. TSAI & MIKSIS (1993) mostraram

através de simulação numérica que existe um intervalo de números capilares onde o *snap-off* pode ocorrer. Para números capilares acima deste intervalo, apesar do filme da fase molhante ser mais espesso, a fase não-molhante passaria tão rápido pela constrição que não haveria tempo para o colar da fase molhante se desenvolver e gerar a instabilidade. Por outro lado, números capilares abaixo desse intervalo levariam a tempos para a ruptura extremamente longos, uma vez que o filme de fase molhante seria delgado. Os autores sugerem ainda a dependência da razão de viscosidades, onde a existência deste intervalo apareceria apenas para baixas razões de viscosidade (equação 3).

2.7.2. Razão de Viscosidades

PEÑA (2007) e PEÑA *et al.* (2009) estudaram a formação de emulsões na produção de petróleo conduzindo experimentos em capilares cilíndricos de vidro com constrição. Os autores utilizaram diferentes fluidos de maneira a obter diferentes razões de viscosidades e avaliar a influência deste parâmetro em conjunto com o número capilar na ocorrência do *snap-off*. Seus resultados, que podem ser visualizados na FIGURA 13, concordam com TSAI & MIKSYS (1993), mostrando que existe uma faixa de números capilares onde ocorre o *snap-off*, e que esta faixa depende da razão de viscosidades entre os fluidos.

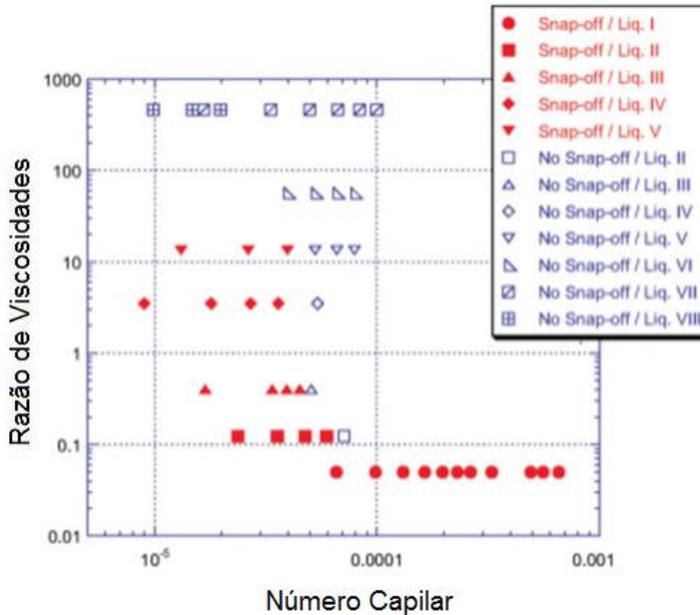


FIGURA 13. Mapeamento das condições operacionais (número capilar e razão de viscosidades) onde ocorreu o *snap-off* no experimento de formação de emulsões. Fonte: PEÑA *et al.* (2009)

Para a menor razão de viscosidades utilizada pelos autores ocorreu a quebra em toda a faixa de números capilares testados (FIGURA 13). Dessa forma, estes autores sugerem que para razões de viscosidades muito baixas ($\mu^* \rightarrow 0$), onde a viscosidade do fluido molhante é muito maior que a do não-molhante a quebra ocorre toda a vez que o sistema escoava através de um capilar com garganta. Essa aproximação é válida no caso da quebra de bolhas de ar associado à formação de espumas, estando de acordo com o trabalho de outros autores (GAUGLITZ *et al.*, 1988; ROSSEN, 2003; AMYOT, 2004 e AMYOT & PLOURABOUÉ, 2007) que utilizaram ar como fase não-molhante e registraram o *snap-off* para todos os números capilares.

GAUGLITZ *et al.* (1988), com a utilização de diferentes capilares cilíndricos, estudaram o tempo para que o *snap-off* ocorresse. Como resultados, os autores obtiveram que o tempo para o *snap-off* cai com o aumento do número capilar. Isso

ocorre pois com o aumento do número capilar, a espessura do filme da fase molhante também aumenta, de maneira que a resistência para o escoamento da fase molhante em direção à garganta diminui. Por outro lado, PEÑA *et al.* (2009) mencionam que em escoamentos com altos números capilares ($Ca \rightarrow \infty$), segundo a equação 6, as forças de tensão interfacial seriam muito pequenas comparadas às forças viscosas ($\gamma/\mu v \rightarrow 0$) e, assim, a força motora para o *snap-off* desapareceria e o *snap-off* não ocorreria. Conseqüentemente, os autores sugerem que mesmo para o caso de espumas ($\mu^* \rightarrow 0$), deve haver um número capilar máximo, acima do qual o *snap-off* não ocorre.

Em outro estudo através de capilares de seção reta quadrada, GAUGLITZ *et al.* (1987) observaram que o tempo para o *snap-off* depende fracamente do número capilar e que as bolhas formadas crescem quase linearmente com o aumento do número capilar.

AMYOT (2004) também estudou o tempo para o *snap-off* e o tamanho das bolhas formadas em função do número capilar. Em seu micromodelo de seção reta triangular, Amyot obteve que o tempo para o *snap-off* decaía com o número capilar. Adimensionalizando o tempo (que havia sido medido em segundos), os três óleos minerais utilizados por ele apresentaram o mesmo comportamento, que depende apenas da geometria do canal e do número capilar. Este resultado pode ser visualizado na FIGURA 14.

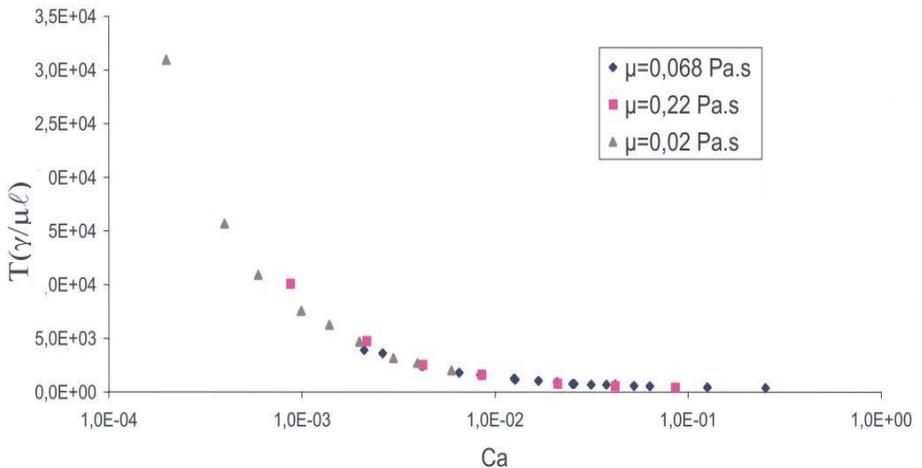


FIGURA 14. Tempo adimensional ($T/T^*=T\gamma/\mu\ell$) para o *snap-off* em função do número capilar. Fonte: AMYOT (2004).

Quanto ao comprimento das bolhas formadas, Amyot obteve que no intervalo de número capilar de 5×10^{-4} a 5×10^{-3} o comprimento das bolhas não sofreu alteração. Porém, com números capilares acima deste intervalo o tamanho das bolhas formadas cresceu, como pode ser visto na FIGURA 15. Para os diferentes óleos minerais utilizados por Amyot, obtiveram-se resultados semelhantes, que ficaram superpostos em uma única curva. Isso sugere que o tamanho das bolhas formadas seja independente da natureza dos fluidos envolvidos, sendo dependente apenas do número capilar e possivelmente da geometria do canal.

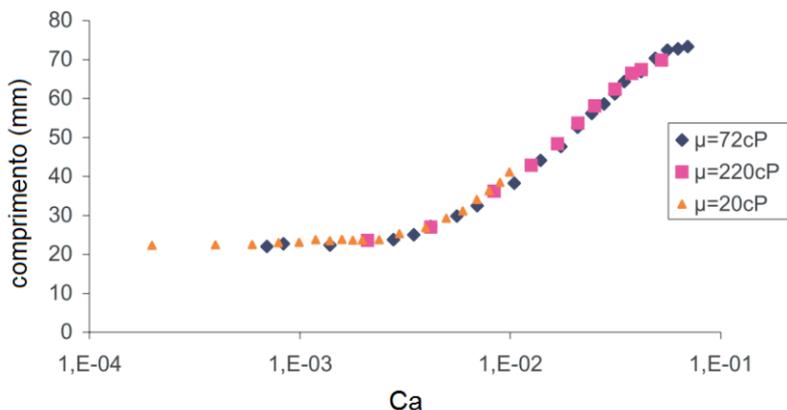


FIGURA 15. Tamanho das bolhas de ar formadas para os três óleos (diferentes viscosidades dinâmicas) utilizados por AMYOT (2004).

2.7.3. Razão de diâmetros poro-garganta

Além do número capilar e da razão de viscosidades, a geometria do canal apresenta grande influência sobre o mecanismo. Segundo OLBRICHT (1996), para valores de número capilar muito baixos ($Ca \rightarrow 0$), o tempo para a formação do *snap-off* depende da razão entre os diâmetros do poro e da garganta.

ROOF (1970) também investigou o efeito da geometria do canal sobre o *snap-off*. Seus resultados mostraram que para uma dada geometria, existe uma distância mínima da frente de óleo (óleo como não-molhante e água como molhante) que sobressai da garganta para que ocorra a ruptura desta. Em seus experimentos, esse valor foi de sete vezes o raio da garganta. Além disso, Roof sugere um critério onde só ocorrerá o *snap-off* quando existir uma razão entre diâmetro do tubo e da constricção de no mínimo 2:1, atualmente conhecido como “*Critério de Roof*”.

2.7.4. Outras considerações

CUTHIELL *et al.* (1995) observaram a influência da molhabilidade do reservatório no número capilar típico onde ocorre emulsificação. Seus resultados demonstram que, para meios de mesma permeabilidade, a emulsificação ocorre a números capilares significativamente menores em meios que são molhados por óleo do que àqueles molhados por água.

AMYOT (2004) mostrou ainda a influência de alterações de temperatura na dinâmica do *snap-off* e enfatizou a importância de que os experimentos sejam conduzidos em uma sala climatizada à temperatura constante, uma vez que alterações de temperatura influenciam consideravelmente o tempo de formação do *snap-off* (FIGURA 16).

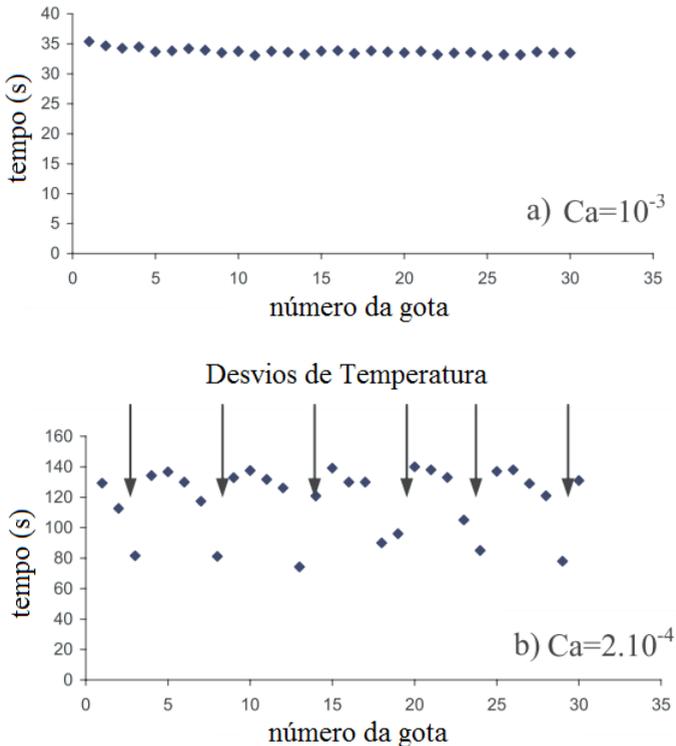


FIGURA 16. (a) Tempo para o *snap-off* a $Ca=10^{-3}$, com temperatura fixa em 22°C ; (b) Tempo para o *snap-off* a $Ca=2 \times 10^{-4}$ (mostrando flutuações), com temperaturas variando em 21 a 23°C . Fonte: AMYOT, 2004.

Surfactantes são substâncias que agem através da diminuição da tensão interfacial entre duas fases distintas, tendendo a se localizar na interface (PEÑA, 2007). TSAI & MIKISIS (1997) estudaram numericamente o efeito de surfactantes no *snap-off*, onde encontraram que a presença de surfactantes tende a diminuir o tempo para *snap-off* e o tamanho

das bolhas e gotas formadas. Quando não há a presença de surfactantes as bolhas e gotas formadas coalescem com maior facilidade e não há, portanto, a formação de espumas e emulsões. Em um reservatório, muitas vezes as emulsões e espumas formadas são estabilizadas por agentes surfactantes presentes no próprio óleo (PEÑA, 2007).

Capítulo 3. Abordagem Experimental

Neste capítulo inicialmente será feita uma caracterização das propriedades dos fluidos utilizados. Em seguida será apresentado o processo de fabricação do micromodelo que foi utilizado nos experimentos, seguido de uma apresentação da bancada experimental. Por fim, será feita uma descrição de como os experimentos foram realizados, passo-a-passo.

3.1. Caracterização dos Fluidos

Para os experimentos foram utilizados quatro óleos minerais diferentes: Nujol, EMCAplus 70, Isoparafina 17/21 (UNIPAR) e vaselina líquida, além de ar e água deionizada. Os óleos EMCAplus70 e Isoparafina 17/21 foram fornecidos pelo Centro de Pesquisas e Desenvolvimento Leopoldo Américo Miguez de Mello (CENPES/PETROBRAS).

Parte das propriedades dos fluidos foram medidas no Laboratório de Meios Porosos e Propriedades Termofísicas (LMPT), enquanto outra parte foi medida no Núcleo de Pesquisa em Materiais Cerâmicos e Vidros (CERMAT), ambos do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina.

3.1.1. Viscosidade Dinâmica

As medidas de viscosidade dinâmica dos fluidos (μ) utilizados foram feitas no CERMAT com a utilização de um viscosímetro rotacional de cilindros concêntricos (VT550, Haake) para uma faixa de temperaturas variando entre 18 e 30°C. Isso foi feito com o objetivo de avaliar o comportamento da viscosidade dinâmica em função da temperatura. Os ensaios foram feitos inicialmente com a temperatura mais baixa (de 18°C), aumentando até chegar à temperatura mais alta (30°C).

Todos os óleos minerais apresentaram um comportamento linear da tensão de cisalhamento em função da taxa de cisalhamento para cada medida de mesma temperatura, seguindo a Lei de Newton para a viscosidade. Assim, a viscosidade dinâmica para determinada temperatura foi obtida através do coeficiente angular de uma reta ajustada em 200 pontos medidos. Dessa forma, todos os óleos minerais utilizados neste trabalho são considerados fluidos Newtonianos. Os

resultados das medidas e os desvios padrões experimentais podem ser visualizados na TABELA 1 e FIGURA 17.

TABELA 1. Viscosidade dinâmica dos óleos minerais para diferentes temperaturas.

T (°C)	Vaselina		Nujol		Isoparafina		EMCAplus	
	μ (cP)	Desv. Pad.	μ (cP)	Desv. Pad.	μ (cP)	Desv. Pad.	μ (cP)	Desv. Pad.
18	31,93	$\pm 4,28$	182,44	$\pm 11,09$	1,19	$\pm 0,45$	28,01	$\pm 3,74$
20	29,01	$\pm 4,22$	160,76	$\pm 10,46$	1,12	$\pm 0,61$	26,46	$\pm 3,45$
22			140,09	$\pm 10,83$	1,10	$\pm 0,78$	24,09	$\pm 2,73$
25	23,56	$\pm 2,65$	118,84	$\pm 8,70$	1,09	$\pm 0,71$	21,20	$\pm 2,93$
30	19,40	$\pm 2,32$	91,70	$\pm 6,23$	0,95	$\pm 0,61$	13,37	$\pm 2,43$

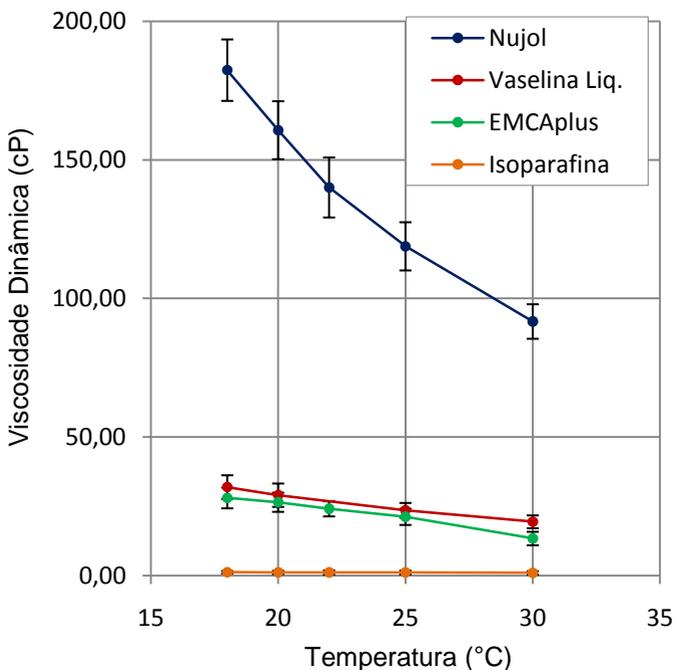


FIGURA 17. Comportamento da viscosidade dinâmica em função da temperatura para os diferentes óleos minerais.

Observa-se que a viscosidade dinâmica é uma propriedade fortemente dependente da temperatura. O Nujol, que é o óleo mineral mais viscoso, é também o mais influenciado em uma mudança de temperatura. No entanto, ainda que menores, os demais óleos minerais também sofrem alterações em viscosidade com a temperatura.

Para o nujol, aumentando a temperatura de 18 a 30 °C, observa-se o maior decréscimo de viscosidade dentre os fluidos analisados, variando de 182,44 cP a 91,70 cP – diminuição de 49,74% do valor inicial.

Em questão de diminuição percentual é o EMCAplus que mais sofre alterações com a temperatura, onde de 18 a 30 °C, a viscosidade dinâmica cai de 28,01 cP para 13,37 cP, apresentando uma diminuição de 52,27% do valor inicial.

A vaselina líquida foi terceira que mais apresentou alterações na viscosidade dinâmica com o aumento da temperatura. Inicialmente, a 18 °C esta possuía uma viscosidade de 31,93 cP, enquanto que a 30 °C esta viscosidade baixou para 19,40 cP, o que representa uma diminuição de 39,24% do valor inicial.

Dentre os óleos minerais utilizados, a isoparafina, que é a menos viscosa, foi a que apresentou menores alterações em viscosidade com a temperatura, variando de 1,19 cP a 0,95 cP, com uma diminuição do valor inicial de 20,17%.

Através destas medidas, nota-se a importância de que os experimentos sejam conduzidos em uma sala com temperatura controlada, dado que a viscosidade é um parâmetro importante para o mecanismo de *snap-off*. Assim, os experimentos foram conduzidos em uma sala climatizada com temperatura a 20 °C (podendo variar em $\pm 2^\circ\text{C}$), controlados por um aparelho de ar-condicionado. Todas as propriedades dos fluidos que serão descritas a seguir foram medidas a 20 °C. Na TABELA 2 constam os valores de viscosidade em conjunto com a viscosidade da água deionizada e do ar, ambas a 20 °C, que são tabeladas.

TABELA 2. Viscosidade dinâmica dos fluidos utilizados a 20 °C .

Fluido	μ (cP) a 20 °C	Desv. Pad.
Nujol	160,76	$\pm 10,46$
Vaselina Liq.	29,01	$\pm 4,22$
EMCAplus	26,46	$\pm 3,45$
Isoparafina	1,12	$\pm 0,61$
Água Deionizada	1,00 (*)	-
Ar	0,02 (**)	-

Fontes: * LEMNON *et al.* (2010) e ** *Air Properties* (2010).

3.1.2. Tensão interfacial e superficial

Foram realizadas medidas de tensão superficial para cada óleo (com ar) e de tensão interfacial, com água deionizada. As medidas foram feitas a 20 °C em um tensiômetro Sigma 700, KSV do LMPT (FIGURA 18).

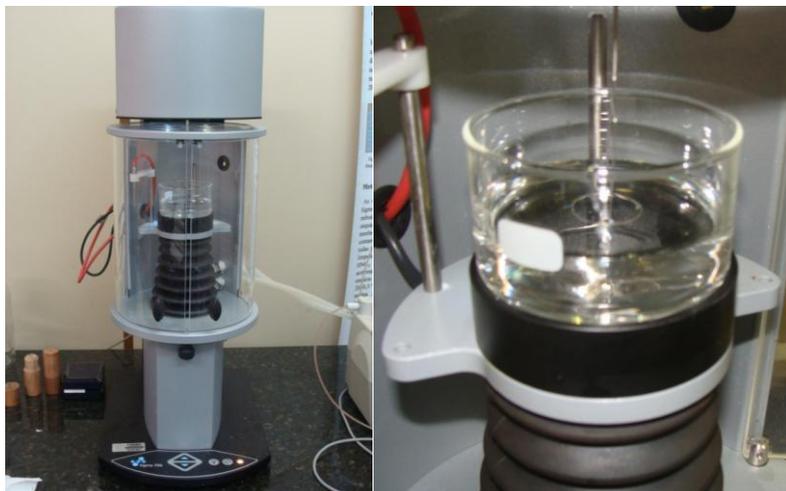


FIGURA 18. Tensiômetro Sigma 700, KSV. À direita: anel utilizado para medir a tensão na superfície.

TABELA 3. Medidas de tensão interfacial e superficial.

Óleo	Tensão Superficial		Tensão Interfacial	
	Óleo/Ar (mN/m)	Desv. Pad.	Óleo/Água (mN/m)	Desv. Pad.
Vaselina	29,71	± 0,07	51,19	± 0,31
Nujol	31,40	± 0,11	54,76	± 0,12
Isoparafina	23,90	± 0,04	40,36	± 0,26
EMCAplus	29,98	± 0,11	42,85	± 0,35

O tensiômetro realiza estas medidas pelo método do anel, que consiste basicamente em submergir um anel no líquido abaixo da superfície ou interface e elevar o mesmo até atravessá-la. É feita a medida da força máxima necessária para que o anel, com determinado diâmetro, consiga se desligar ou se separar da superfície ou interface. Os resultados das medidas de tensão interfacial e superficial podem ser vistos na TABELA 3, de onde foram realizadas 5 medidas e apresenta-se a média obtida, bem como os desvios padrões calculados.

3.1.3. Ângulo de Contato - Molhabilidade

Para medir o ângulo de contato e verificar a molhabilidade dos óleos minerais no acrílico, foi utilizado um goniômetro OCA 20, Dataphysics do LMPT (FIGURA 19). O objetivo destas medidas é analisar se os óleos são molhantes ou completamente molhantes nos sistemas óleo-ar-acrílico e óleo-água-acrílico utilizados nos experimentos.

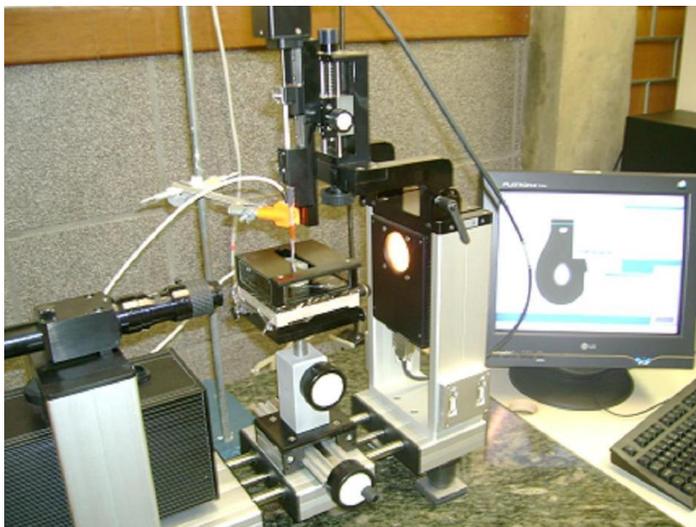


FIGURA 19. Goniômetro OCA 20, Dataphysics.

Inicialmente para avaliar a molhabilidade do óleo no sistema óleo-ar-acrílico foram medidos os ângulos de contato através da análise do perfil de uma gota de óleo (FIGURA 20a) depositada na superfície de acrílico usinado e rodeada por ar. Para este caso, os ângulos de contato dos quatro óleos foram todos inferiores a 15° e, portanto, estes óleos minerais utilizados foram considerados fortemente molhantes.

Observa-se na FIGURA 20(a) que a vaselina líquida é altamente molhante no sistema vaselina-ar-acrílico, de maneira que ela se espalha formando um pequeno filme. Um perfil semelhante ocorre para os demais óleos minerais.

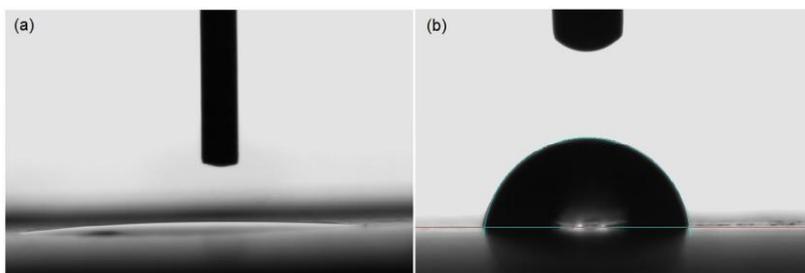


FIGURA 20. (a) Gota de vaselina líquida espalhada em uma superfície de acrílico usinado, com ângulo medido de $4,5^\circ$; (b) Gota de água

deionizada espalhada em uma superfície de acrílico usinado, com ângulo de $82,7^\circ$.

Foi medido também o ângulo de contato de uma gota de água deionizada em contato com o acrílico usinado e rodeada por ar, cujo valor medido foi de $82,7^\circ$ (FIGURA 20b). Como o ângulo é inferior a 90° , neste sistema água-ar-acrílico a água é considerada molhante. Este critério foi mencionado anteriormente no capítulo 2.

Em seguida, a fim de avaliar a molhabilidade em sistemas óleo-água-acrílico, foi medido o ângulo de contato de uma gota de água deionizada espalhada pela mesma superfície de acrílico usinado e rodeada pelo óleo avaliado, como pode ser visualizado na FIGURA 21. Os valores obtidos encontram-se na TABELA 4.

Segundo ANDERSON (2006) há uma relação entre este ângulo de contato e a molhabilidade do sólido. Segundo este autor, quando o ângulo medido é de 0 a aproximadamente 60° - 75° o sólido é molhado pela água deionizada. Quando o ângulo de contato é de 60° - 75° a 105° - 120° tanto a água deionizada quanto o óleo molham o sólido, chamando de molhabilidade neutra. Por fim, quando o ângulo varia entre 105° - 120° a 180° é o óleo que molha o sólido.

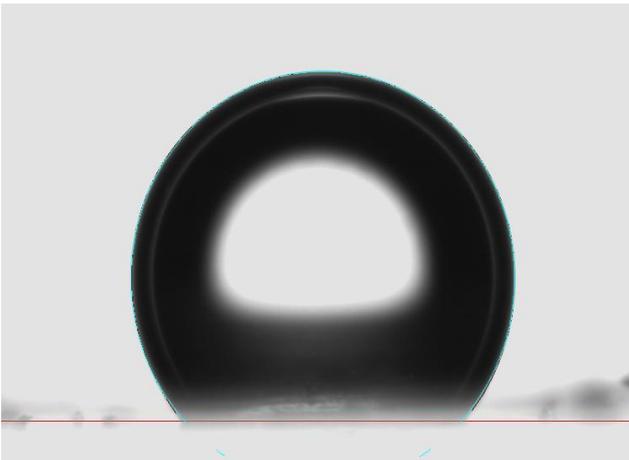


FIGURA 21. Gota de água deionizada em uma superfície de acrílico, rodeada por EMCPlus 70. Ângulo de contato medido de $134,7^\circ$.

Analisando a TABELA 4 conclui-se que estes óleos são molhantes em um sistema óleo-água-acrílico. No entanto, ao contrário dos sistemas óleo-ar-acrílico aqui mencionados, estes não podem ser considerados fortemente (quase completamente) molhantes. De fato, no próximo capítulo será visto uma consequência disso nos experimentos realizados.

TABELA 4. Ângulo de contato medido de uma gota de água deionizada em uma superfície de acrílico e rodeada pelo óleo avaliado

Gota	Meio	Ângulo de Contato (°)
Água	EMCAplus70	134,7
Água	Isoparafina	149,8
Água	Vaselina Líq.	162,6
Água	Nujol	160,0

3.1.4. Densidades

Por fim, foi medida a densidade da vaselina líquida a 20°C. Isso foi feito através da utilização de uma microseringa de precisão, injetando um volume fixo de fluido e medindo a massa em uma balança de precisão. As densidades dos demais óleos, que são todos comerciais, foram disponibilizadas pelo CENPES da PETROBRAS. Por fim, as densidades do ar e da água deionizada foram obtidas através de valores tabelados na literatura. Todos os valores constam na TABELA 5.

TABELA 5. Densidades dos fluidos a 20 °C e 1 atm.

Fluido	Densidade (g/cm ³)
Vaselina Líq.	0,8328
Nujol	0,8687
Isoparafina	0,7532
EMCAplus	0,8458
Água(*)	0,9982
Ar (**, ***)	0,0012

Fontes: * LEMON *et al.* (2010), ** *Air Properties* (2010) e *** LMNO Engineering, Research, and Software (2010).

3.2. Construção do micromodelo

Para estudar o mecanismo de quebra de gotas no escoamento bifásico em meios porosos procurou-se representar um meio poroso na escala do poro através de um canal com uma garganta.

Uma vez que os poros de um reservatório não são compostos por tubos de seção reta circular e sim por canais interconectados com tortuosidades que resultam em gargantas e cantos ao longo da estrutura porosa, optou-se então por utilizar uma geometria semelhante à utilizada por AMYOT (2004), constituída por um canal de seção reta triangular variável em área, com uma constrição no centro, como ilustrado na FIGURA 22.

As dimensões do canal foram definidas de maneira a atingir uma razão entre dimensões da entrada do canal e da garganta de 4:1, ou seja, de maneira que a garganta fosse 4 vezes menor do que a entrada e saída do canal. Além disso, pensou-se em utilizar dimensões onde pudessem ser negligenciados quaisquer efeitos gravitacionais durante o experimento. Para isto, calculou-se a largura capilar para cada par de fluidos utilizados no experimento (TABELA 6). Em canais com dimensões envolvidas abaixo da largura capilar, estes podem ser considerados capilares. De fato, pode ser visualizado na FIGURA 23, que o canal não excede 1 mm em profundidade (eixo que coincide com a direção do campo gravitacional, desde que o micromodelo esteja bem nivelado). Dessa forma, para este tipo de experimento a gravidade pode ser negligenciada.

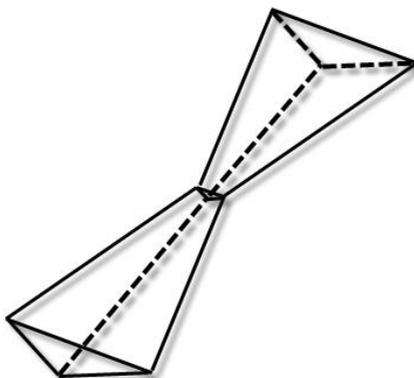


FIGURA 22. Ilustração da geometria escolhida para o micromodelo.

TABELA 6. Largura capilar (κ^{-1}) envolvida para cada par de fluidos usados nos experimentos.

Molhante	Não Molhante	Largura Capilar (mm)
Nujol	Ar	1,8812
Unipar	Ar	1,8100
EMCA	Ar	1,9137
Vaselina	Ar	1,9184
Nujol	Água	2,4630
Unipar	Água	2,3430
EMCA	Água	2,2312
Vaselina	Água	2,5177

Outra maneira de avaliar a influência da gravidade nos experimentos é através do número de Bond (TABELA 7). Como os valores obtidos nos experimentos foram pequenos ($Bo < 1$) tanto na entrada do canal quanto na região da garganta, pode ser desprezada qualquer influência da gravidade durante os mesmos. No entanto, para que essa condição pudesse ser aplicada nos experimentos, foi necessário nivelar o micromodelo na horizontal.

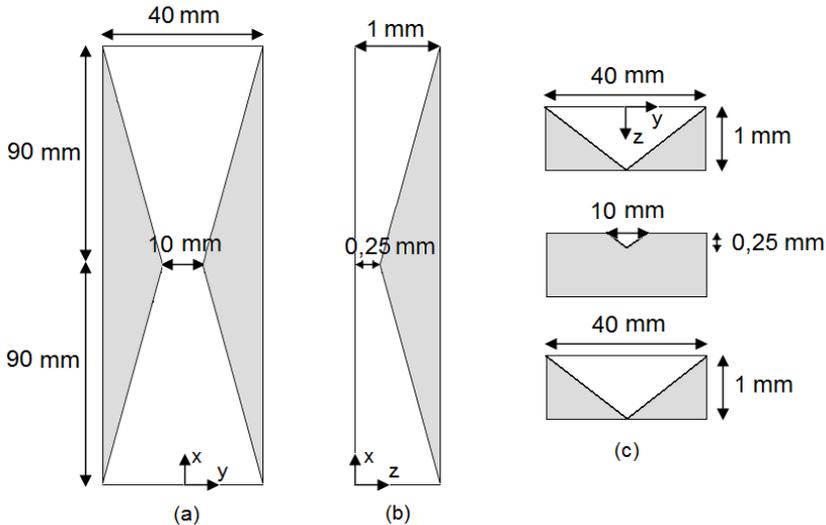


FIGURA 23. Esquema (fora de escala) das dimensões do canal do micromodelo: (a) larguras na superfície (plano XY); (b) profundidades em Z, na entrada e na garganta do canal e (c) seção reta do canal na entrada, garganta e saída do mesmo (plano YZ).

TABELA 7. Números de Bond (Bo) na entrada e garganta do canal.

Molhante	Não-Molhante	Bo (entrada)	Bo (garganta)
Nujol	Ar	0,255	0,016
Vaselina	Ar	0,245	0,015
EMCA	Ar	0,246	0,015
Unipar	Ar	0,275	0,017
Unipar	Agua	0,054	0,003
EMCA	Agua	0,033	0,002
Vaselina	Agua	0,028	0,002
Nujol	Agua	0,022	0,001

O canal foi criado através de usinagem por uma microfresadora ICP4030, Isel Automation (FIGURA 24) em uma chapa de acrílico. A usinagem foi idealizada através de programação CNC (Comandos Numéricos Computadorizados),

buscando-se minimizar a possibilidade de danificar a fresa utilizada e ainda assim otimizar o tempo levado para a usinagem. Para tal, foi elaborado um código em C++ de maneira que seu programa executável originasse uma lista de comandos do tipo "Move to" que pôde ser lido pelo software Kynon (plataforma GALAAD) e executado pela microfresadora.

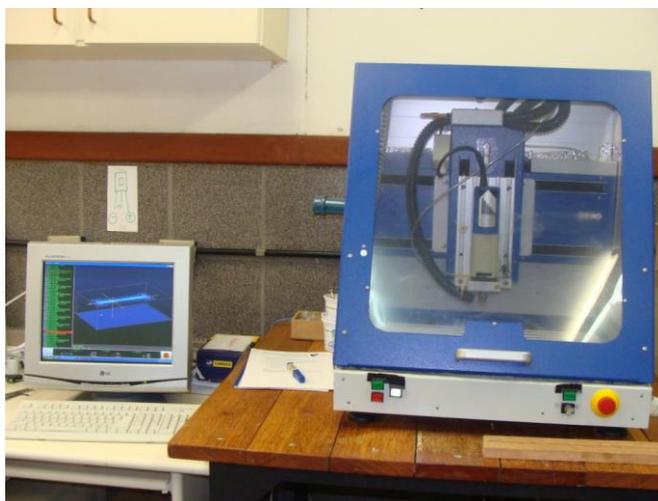


FIGURA 24. Microfresadora ICP4030, Isel Automation acoplada a um microcomputador que a controla através do software Kynon (Plataforma Galaad).

O material escolhido para criar o canal foi o acrílico (em forma de chapa) por ser um material de usinagem relativamente fácil e principalmente pelo fato deste ser transparente, proporcionando uma adequada visualização do comportamento da interface ao longo do experimento.

A microfresadora utilizada trabalha em 3 eixos (XYZ), permitindo o movimento no plano horizontal (XY) e permitindo ainda afundar em profundidade (Z). A usinagem foi feita sempre através de camadas, afundando passos determinados, retirando camada por camada, de maneira a evitar a danificação da fresa utilizada. Foram três programas de usinagem, sendo cronologicamente: (i) regularização da superfície, (ii) desbaste do canal e (iii) acabamento do canal.

Assim, a usinagem começou com um programa de regularização da superfície, com o objetivo de criar uma

superfície totalmente plana e exatamente no eixo horizontal XY da máquina. Isso foi necessário pois notou-se que a chapa acrílica utilizada para a criação do micromodelo, que possuía 10 mm de espessura em suas especificações, variava até cerca de 1 mm em espessura ao longo da mesma. Assim, uma fresa de 3 mm de diâmetro afundou 4 camadas de 0,2 mm de profundidade cada, a fim de que a última camada usinada nessa parte fosse totalmente regular, e estivesse apta para iniciar a usinagem do canal. A esta última camada usinada chamou-se de superfície inicial, com Z igual a 0 mm.

Iniciou-se então a usinagem do canal com um programa de desbaste, cujo objetivo era retirar o excesso de material com uma fresa de 3 mm de diâmetro, otimizando o tempo total de usinagem, uma vez que por se tratar de uma fresa mais grosseira a velocidade de avanço no material poderia ser maior. Foram retiradas sete camadas de 0,1 mm de profundidade na entrada do canal, atentando para que a fresa não avançasse até a profundidade total do canal (1 mm na entrada do canal) de maneira a não danificar as dimensões desejadas do canal resultante tanto na entrada do mesmo quanto na região da garganta.

Em seguida foi feito o acabamento lateral e do fundo do canal com uma fresa menor (0,5 mm de diâmetro), retirando o restante do material, e afundando camadas de 0,05 mm de profundidade na entrada do canal, o que originou 20 camadas contando com a superfície. Dessa forma, como resultado final da usinagem, obteve-se um canal de seção reta não exatamente triangular, mas um canal com paredes serrilhadas, constituídas de degraus, sendo que cada degrau possuía 0,05 mm de altura na parte mais profunda do canal (entrada do canal) e 0,0125 mm na região da garganta. A FIGURA 25 ilustra este resultado.

Para que o fundo do canal não fosse uma fenda com largura do diâmetro da fresa, avançou-se apenas até a penúltima camada (19ª camada), originando um canal com 0,95 mm de profundidade na entrada e saída e 0,2375 mm de profundidade na garganta. Como resultado da usinagem, preservou-se a razão de tamanhos de 4:1, ou seja, a área da seção reta na entrada e saída do canal continuam 4 vezes maiores do que a área da seção reta na garganta, como pode ser visto na FIGURA 25c. As dimensões resultantes foram confirmadas com o auxílio de um micrômetro.

Os parâmetros de usinagem utilizados para usinar o micromodelo foram os sugeridos pelo manual do equipamento e pelo fabricante da fresa. Além disso, durante a usinagem fez-se com que a fresa estivesse sempre imersa em um óleo refrigerante, com o objetivo de que a fresa não esquentasse muito durante a usinagem, o que danificaria a mesma, além de comprometer o acabamento do canal pelo derretimento do acrílico.

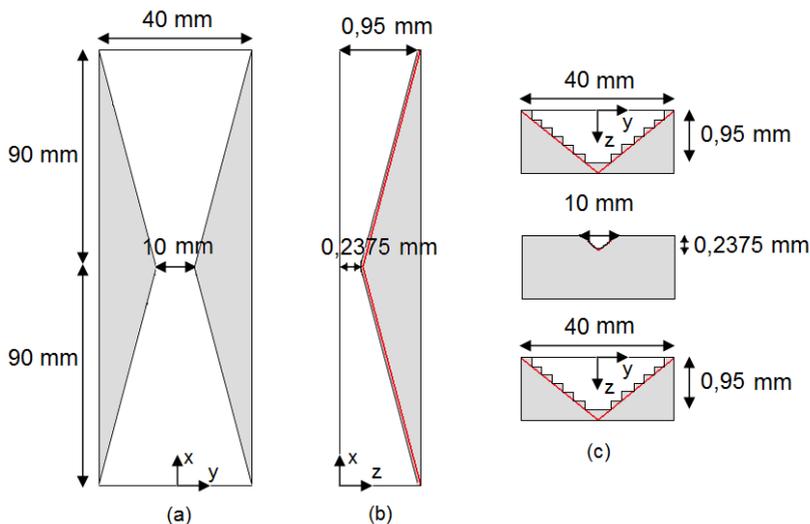


FIGURA 25. Dimensões reais do micromodelo. Em (b) e (c) notam-se pequenas diferenças nas dimensões idealizadas na FIGURA 23, sendo estas na profundidade na entrada e garganta do canal, além do resultado de uma superfície serrilhada.

Com a finalização da usinagem do canal, foi feita uma limpeza do micromodelo para que fosse possível colar outra placa de acrílico acima da placa usinada, de maneira a selar o canal. Para isso foi utilizado clorofórmio, substância que reage com o acrílico possibilitando a união das duas placas. Além disso, foram feitos furos na entrada e saída do canal, onde durante os experimentos seriam conectadas mangueiras para a entrada e saída dos fluidos.

É possível definir uma expressão para o número capilar, Ca , em função da geometria do canal. Para isso, partiu-se da

equação da definição do número capilar (equação 6), chegando-se à equação 7 (AMYOT, 2004):

$$Ca = Q\mu/hl\gamma, \quad (7)$$

onde Q é a vazão volumétrica, μ é a viscosidade dinâmica do fluido molhante, h é a profundidade do canal, l é a metade da largura do canal (na superfície) (FIGURA 26) e γ é a tensão superficial ou interfacial.

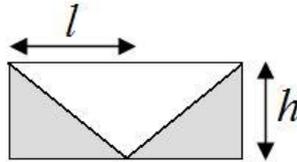


FIGURA 26. Parâmetros dimensionais da sessão reta do canal.

Vale mencionar que houve uma grande dificuldade na usinagem do micromodelo. A usinagem foi realizada através de uma microfresadora que apresentava alguns problemas técnicos. Estes problemas ocasionavam sérias dificuldades na obtenção de precisão no eixo Z (de profundidade) de maneira que em diversos momentos, a fresa afundava mais do que deveria. Foram também encontrados problemas na usinagem do acrílico, que apesar de ser um material transparente não proporcionou acabamentos satisfatórios, pois aquecia facilmente e fundia. Nos casos onde a fresa afundava demais, havia um superaquecimento local, que fazia fundir o acrílico localmente e comprometer o acabamento. Na tentativa de contornar este problema, durante a usinagem, a fresa estava sempre imersa em um óleo que servia para refrigerar a ferramenta, no entanto, nem sempre a refrigeração era bem sucedida. Além disso, devido às diferentes direções percorridas pela fresa, no mesmo micromodelo obtiveram-se diferentes acabamentos, o que consequentemente ocasionou diferenças de molhabilidade ao longo do canal.

Outra questão que agregou dificuldade na fabricação de micromodelos foi o tempo de usinagem dos mesmos. Com o objetivo de não danificar a fresa (que possuía um diâmetro de 0,5mm) e de não aquecer o acrílico, foram utilizadas velocidades

de avanço (sugeridas pelo manual do próprio equipamento) tais que resultaram em longos tempos para a fabricação de um único micromodelo (~2 dias de usinagem).

Todas essas dificuldades em conjunto apresentaram um grande desafio durante a usinagem do micromodelo, onde diversas peças foram descartadas (para uma peça satisfatória, foram descartadas mais de dez), uma vez que o canal resultante da usinagem ou era fundo demais, ou demasiadamente raso, ou apresentava péssimos acabamentos, ou ainda diferentes acabamentos ao longo do canal.

3.3. Bancada Experimental

A bancada experimental foi montada em uma sala com temperatura controlável com a utilização de um aparelho de ar-condicionado no Laboratório de Meios Porosos e Propriedades Termofísicas (LMPT). Durante os experimentos controlou-se a temperatura em 20°C, com variações de até $\pm 2^\circ\text{C}$.

A bancada era constituída basicamente de um micromodelo (descrito anteriormente), além de um sistema de injeção de fluidos e um sistema de iluminação acoplado a um sistema de aquisição de imagens, como pode ser visto na FIGURA 27.

O sistema de injeção de fluidos era composto por uma bomba injetora a vazão volumétrica constante (PHD 22/2000, Harvard Apparatus) e uma seringa (contendo o fluido a ser injetado) conectada à entrada do canal através de uma mangueira. Na saída do canal estava conectada outra mangueira, de maneira que pudesse conduzir o fluido deslocado a um recipiente coletor.

Para registrar os experimentos realizados foi utilizado um sistema de iluminação e aquisição de imagens, composto por um painel de *leds* acoplado a uma câmera de alta velocidade (Nanosense MKIII, Dantec Dynamics) e um microcomputador.



FIGURA 27. Bancada experimental montada para os experimentos realizados.

3.4. Procedimento Experimental

Os experimentos consistiram basicamente na drenagem do óleo do canal, dividida em duas partes distintas. Na primeira parte, a drenagem seria feita pela injeção de ar enquanto na segunda, pela injeção de água deionizada.

3.4.1. Deslocamento de óleo com ar

Nesta parte foi feita a drenagem do óleo do canal pela injeção de ar. Isso foi feito para os óleos Nujol, EMCPlus 70, Isoparafina (Unipar) e Vaselina Líquida.

Para cada óleo foram realizados entre 8 a 10 experimentos, com vazões variáveis, de maneira a obter uma faixa de números capilares, obtidos pela equação (7) como mostra o gráfico da FIGURA 28.

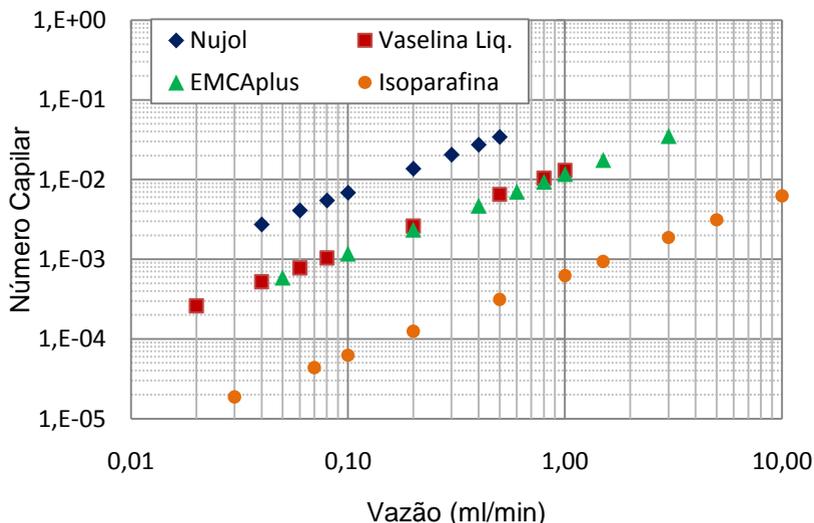


FIGURA 28. Números capilares obtidos na garganta do canal a partir de diferentes vazões volumétricas para cada óleo.

As vazões variaram de 0,02 ml/min a 10 ml/min, compreendendo números capilares na garganta que variavam de 10^{-5} a quase 10^{-1} , condições que podem ser encontradas durante a extração de petróleo. Os experimentos duraram desde poucos segundos a algumas horas, de acordo com a vazão utilizada.

O procedimento tomado consistiu nas seguintes etapas, apresentadas em ordem cronológica:

- 1) *Limpeza do micromodelo* – Antes de iniciar cada experimento (onde havia a troca de fluido molhante) foi realizada a limpeza no canal do micromodelo com o auxílio de uma bomba a vácuo, detergente, água deionizada e álcool etílico. Isso foi feito de maneira a minimizar a presença de qualquer substância remanescente que pudesse prejudicar o experimento a ser realizado em seguida;
- 2) *Verificação de conexões e vazamentos* – Os furos realizados no micromodelo possuíam mesmo diâmetro da mangueira a ser utilizada, de maneira a minimizar qualquer vazamento. No entanto, era feita ainda a vedação das conexões entre os furos de entrada e saída

do canal e as mangueiras através de cola de silicone atentando para a prevenção de vazamentos;

- 3) *Limpeza de toda a vidraria utilizada* – Toda a vidraria utilizada nos experimentos foi lavada e secada seguindo um protocolo de limpeza do LMPT.
- 4) *Injeção do fluido molhante (embebição)* – Com as vedações e vidrarias secas, foi feita a injeção do fluido molhante (um dos óleos) com utilização de uma seringa de vidro de 20mL. Isso foi feito não menos que três vezes, de maneira a conseguir que o canal estivesse inteiramente cheio de óleo, sem nenhuma bolha de ar ou de qualquer outro fluido remanescente da limpeza;
- 5) *Determinação da vazão volumétrica de drenagem* – Feita a embebição do canal, conectou-se na entrada do canal outra seringa, cheia de ar e fixou-se a mesma na bomba injetora. Foi então determinada (na bomba injetora) a vazão volumétrica na qual o ar iria ser injetado, valor que foi previamente definido (FIGURA 28);
- 6) *Nivelção do micromodelo na horizontal* – Antes de iniciar a drenagem foi importante nivelar o micromodelo na horizontal para evitar possíveis efeitos gravitacionais (como mencionado anteriormente). Isso foi feito através da utilização de um nível de bolha;
- 7) *Determinação da taxa de aquisição de imagens* – Ainda antes de iniciar os experimentos foi definida uma taxa de aquisição, que representa o número de quadros tomados por segundo (qps) durante a filmagem. Devido ao limite de memória de armazenagem da máquina e desejando gravar um filme que registrasse não apenas uma, mas várias rupturas, foi necessário definir uma frequência “ideal” de aquisição para cada experimento. A taxa de aquisição foi determinada em função da vazão utilizada, uma vez que vazões mais altas envolvem experimentos de duração mais curta e, portanto, poderiam ser tomados mais quadros por segundo (até 200 qps). Experimentos de baixa vazão por outro lado, envolvem durações mais longas, podendo durar algumas horas, assim, optou-se neste caso por taxas de aquisição menores (15 qps). Isso foi feito através do ajuste no software que controla a câmera (MotionPro X® - RedLake Alliance). Assim, foram

utilizadas vazões que compreendiam desde 0,01 ml/min até 10ml/min, com freqüências de 15 a 200 quadros por segundo respectivamente;

- 8) *Ajustes na câmera* – Foram feitos ainda outros ajustes na câmera, como ajuste no foco, na região a ser filmada, na abertura do obturador da câmera e também no tempo de exposição de cada quadro. A região a ser filmada era a região da garganta do canal, de maneira que pudesse ser visualizado o comportamento da interface quando ela atingisse essa região. Além disso, determinou-se um tempo de exposição para cada quadro, ou seja, o tempo em que cada pixel do CCD ficaria exposto. Esse parâmetro, juntamente com a abertura do obturador da câmera, controla a luminosidade que entra e, portanto, regula o nível de intensidade registrada em cada pixel. O valor utilizado para todos os experimentos foi de 108 μ s. Valores muito grandes deixariam a imagem de cada quadro muito clara, sem contar que para altas vazões a imagem da interface poderia ficar levemente borrada;
- 9) *Injeção do fluido não-molhante (drenagem)* – Aqui se inicia o experimento. Dependendo da vazão utilizada esta etapa pode levar desde alguns segundos a algumas horas. A filmagem dos experimentos iniciava quando a interface atingia cerca de 2 cm antes da região da garganta;
- 10) *Filmagem e armazenamento dos dados* – Ao final de cada experimento os dados obtidos eram transferidos da câmera para o computador. Eram registrados vídeos e as próprias imagens dos quadros, para que em seguida pudessem ser feitas medidas;
- 11) *Aquisição da imagem de uma escala* – Por fim, após os dados terem sido transferidos para o computador, sem mexer na posição do micromodelo, era feita a imagem de uma escala em cima do mesmo. Essa escala auxiliaria em seguida, na medida de distâncias envolvidas.

As etapas 4 a 10 foram realizadas para cada diferente vazão utilizada, assim, para o mesmo fluido molhante utilizado, estas se repetiram. As etapas 1 a 3 foram realizadas apenas no início, ou quando havia mudança de óleo mineral.

3.4.2. Deslocamento de óleo com água deionizada

Assim como na primeira parte, nesta segunda parte foram feitos experimentos de drenagem do óleo no canal, porém, através da injeção de água deionizada. Foram também utilizados os óleos Nujol, EMCAplus 70, Isoparafina (Unipar) e vaselina líquida.

Para cada óleo mineral foram realizados experimentos a diferentes vazões volumétricas, a fim de obter uma faixa ampla de número capilares na garganta, como pode ser visto na FIGURA 29.

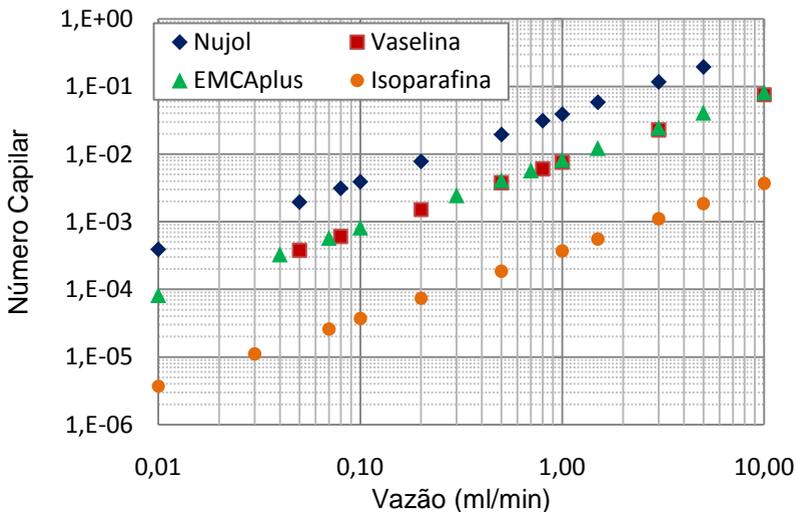


FIGURA 29. Diferentes vazões volumétricas e os números capilares atingidos na região da garganta do canal.

Foram utilizadas vazões volumétricas compreendendo de 0,01 ml/min a 10 ml/min, o que correspondiam números capilares na garganta de aproximadamente 10^{-6} a quase 1.

Os procedimentos realizados foram os mesmos da parte de drenagem com ar, no entanto, ao invés da injeção de ar, foi feita a injeção de água deionizada.

Capítulo 4. Resultados e Discussões

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos dos experimentos, bem como uma discussão acerca destes.

Inicialmente serão apresentados e discutidos os experimentos de deslocamento de óleo com injeção de ar (PARTE I), onde se pretendia avaliar as características das bolhas formadas pelo mecanismo do *snap-off* de Roof, em analogia à formação de bolhas e conseqüentemente de espumas. Em seguida, serão apresentados os resultados dos experimentos de deslocamento de óleo com água deionizada (PARTE II) para avaliar quando haveria formação de gotas pelo mecanismo do *snap-off*.

4.1. PARTE I: Deslocamento de óleo com ar

Os experimentos que envolviam o deslocamento de óleo com a injeção ar consistiram em experimentos de drenagem, onde a fase molhante era composta pelo óleo mineral utilizado (fluido deslocado) e a fase não-molhante era o ar (fluido deslocante).

Os experimentos de drenagem no micromodelo foram realizados a diferentes vazões volumétricas, sendo este um parâmetro de entrada ajustado na bomba injetora. Assim, obtiveram-se diferentes números capilares na garganta, como pôde ser visto na FIGURA 28 do capítulo anterior e pode ser observado no gráfico da FIGURA 30.

A partir dos desvios-padrão obtidos das medidas de viscosidade dinâmica e tensão superficial, e com a utilização da teoria de propagação de erros ou desvios, foi possível estimar as incertezas associadas ao número capilar, que podem ser vistas no gráfico da FIGURA 30.

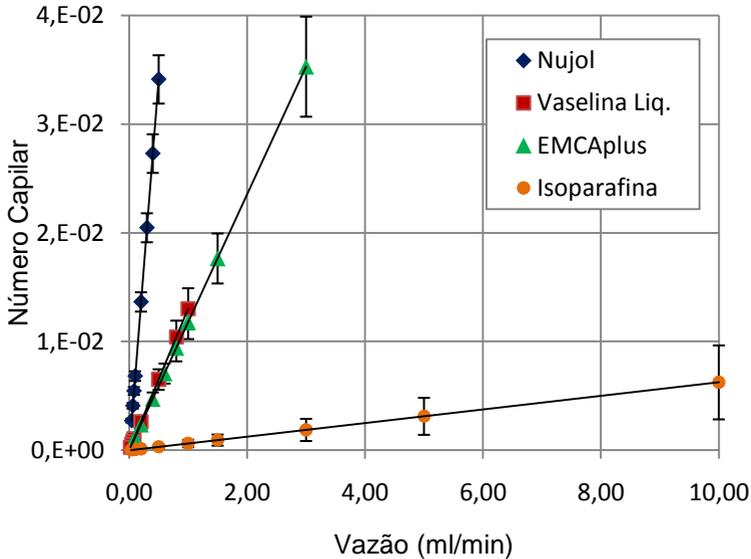


FIGURA 30. Número capilar na garganta em função da vazão volumétrica imposta.

O número capilar foi calculado através da equação 7. Analisando esta equação e o gráfico da FIGURA 30 observa-se que o número capilar é proporcional à vazão volumétrica, onde a constante de proporcionalidade está ligada às dimensões do canal e às propriedades dos fluidos envolvidos. Uma vez que apenas as propriedades dos fluidos mudarão, as diferenças de inclinação dessas retas referem-se às essas propriedades.

Foi possível calcular o número de Reynolds, Re , para cada vazão volumétrica utilizada com a utilização da equação 8, apresentada por AMYOT (2004), e AMYOT & PLOURABOUÉ (2007), que utilizaram micromodelo de mesma geometria:

$$Re = \left(\frac{l_2 - l_1}{L} \right) h_0 \rho \left(\frac{Q}{l_1 h_0} \right) / \mu, \quad (8)$$

onde: l_2 , l_1 , L , h_0 , Q , μ e ρ representam a metade da largura na entrada do canal, metade da largura na garganta, comprimento até a garganta, profundidade na garganta, vazão imposta pela bomba injetora, viscosidade dinâmica da fase molhante e densidade da fase molhante (FIGURA 31).

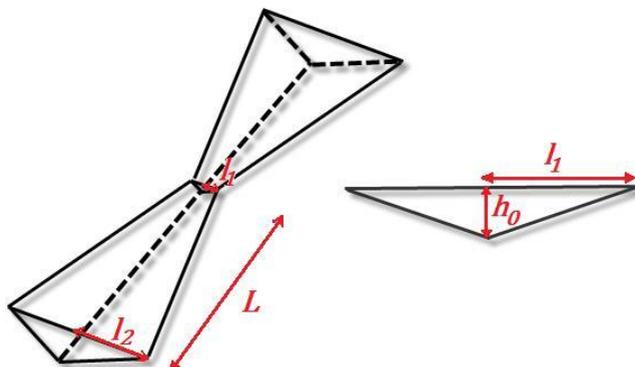


FIGURA 31 – Dimensões do canal do micromodelo.

No gráfico da FIGURA 32 é possível observar os resultados obtidos em função do número capilar atingido na garganta durante os experimentos. Devido aos baixos valores obtidos, quaisquer efeitos inerciais podem ser desprezados, tratando-se de um escoamento em regime laminar.

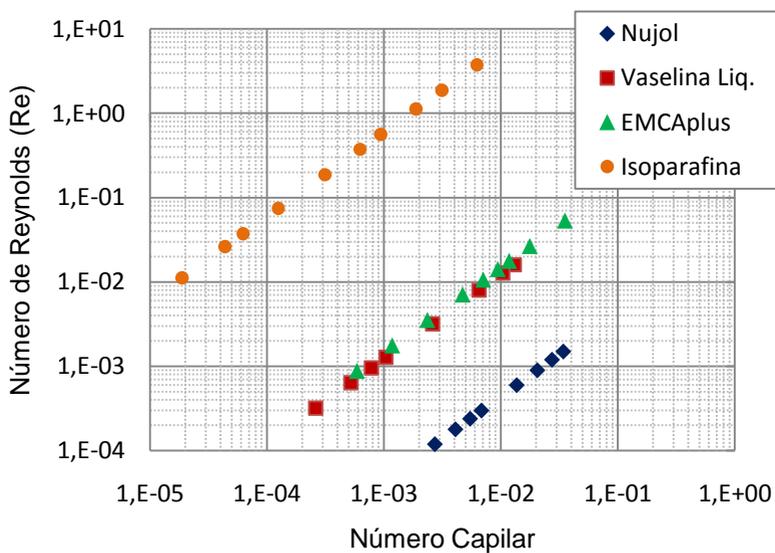


FIGURA 32. Número de Reynolds (Re) em função do número capilar (gráfico log-log).

Pelo critério de Roof (ROOF, 1970), só ocorreria *snap-off* quando a razão de diâmetros do tubo e constricção for de no mínimo 2:1. No micromodelo desenvolvido neste trabalho obteve-se uma razão de largura de 4:1, onde $l_2=4l_1$. Assim, pode-se dizer que o critério de Roof foi cumprido.

Durante os experimentos, quando a fase não-molhante começava a avançar pelo canal, um filme da fase molhante permanecia nas paredes do canal. Devido à geometria do canal ser um canal triangular achatado (FIGURA 33), além do filme que permanecia nas paredes, o fluido molhante permanecia também nos cantos do canal.

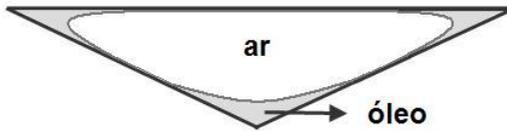


FIGURA 33. Configuração da fase completamente molhante durante a entrada da fase não-molhante no canal, durante um processo de drenagem.

Em todos os experimentos desta parte foi registrada a quebra repetitiva de bolhas pelo mecanismo do *snap-off*. Quando a frente de fase não-molhante alcançava a garganta, a mesma aumentava sua velocidade de avanço. O fluido não-molhante dirigia-se então à garganta escoando através dos cantos do canal e do filme desta fase, causando uma instabilidade nessa região. Depois de alguns instantes ocorria o desligamento da fase não-molhante, formando uma bolha, e, em seguida, o processo se repetia.

Antes de atingir a garganta, a fase não-molhante avançava de maneira relativamente lenta, de acordo com a vazão volumétrica imposta. Logo após o *snap-off*, no entanto, a bolha formada alterava rapidamente sua geometria, buscando uma forma esferoidal, efeito devido à tensão superficial.

Todos os experimentos foram filmados por uma câmera de alta velocidade. Os dados foram armazenados em forma de vídeo, além de imagens dos quadros que o compunham. Na FIGURA 34 pode-se observar como foi o processo de formação de bolhas durante o experimento.

Não foi realizada nenhuma mistura de agente surfactante com os fluidos utilizados, de maneira que as bolhas formadas,

quando se encontravam, coalesciam após alguns instantes formando uma bolha maior. Não houve portanto a formação de espumas neste caso, mas foi possível analisar as características das bolhas formadas. O processo de coalescência não foi analisado.

A partir da análise dos quadros obtidos dos experimentos foi possível quantificar algumas características das bolhas formadas em função das condições do experimento, isto é, em função dos fluidos envolvidos e do número capilar. Foram medidos:

- (i) comprimento ou distância avançada pela frente de fase não-molhante antes de romper;
- (ii) tempo para a primeira ruptura;
- (iii) tempo entre rupturas sucessivas;
- (iv) frequência de ruptura.

As medidas foram feitas usando o software IMAGO - Laboratório de Meios Porosos e Propriedades Termofísicas (LMPT) & Engineering Simulation Scientific Software (ESSS), onde, com o uso de uma imagem com uma escala, foi possível obter o tamanho real das bolhas.

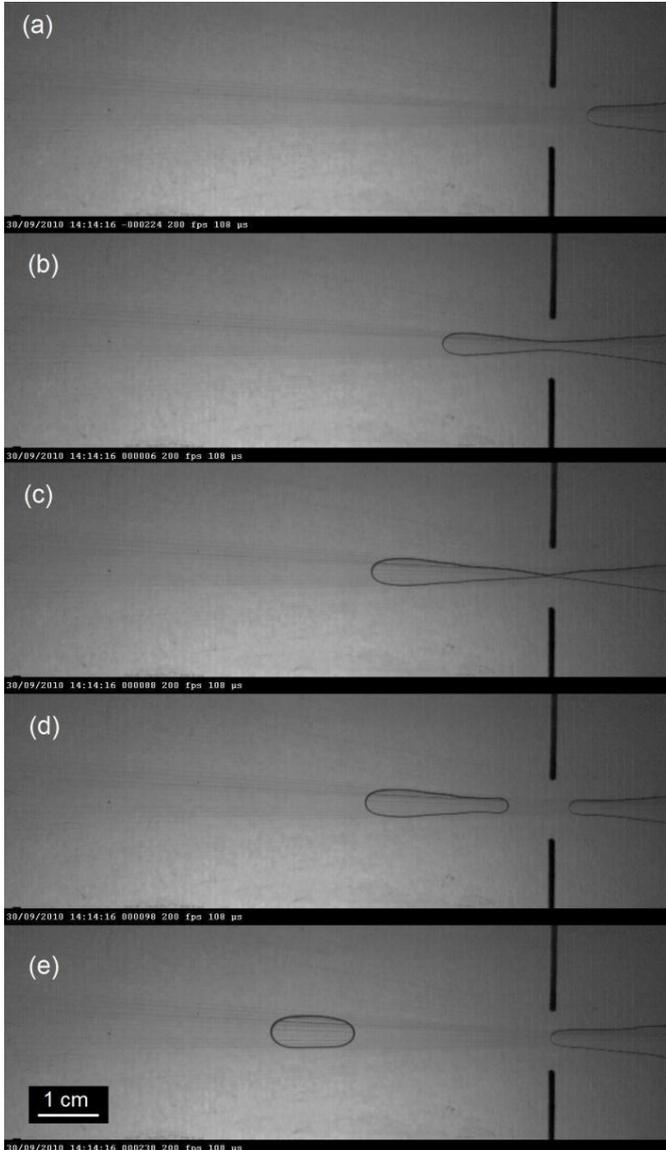


FIGURA 34. Alguns quadros do experimento isoparafina/ar com vazão de 3 ml/min, registrados a 200 quadros por segundo (qps). (a) Interface avançando em direção à garganta (quadro: -224); (b) Interface instantes após ultrapassar a garganta (quadro: 006) (c) Interface avançando ainda mais (quadro: 088) – aqui observa-se que o colar da fase molhante na garganta já aumentou em relação ao quadro 006; (d)

Alguns instantes pós a ruptura da fase-não molhante (quadro: 98); (e) Bolha formada, adotando um formato esferoidal (quadro: 238).

4.1.1. Comprimento da bolha antes do rompimento

Com a utilização da figura de uma escala para cada filmagem foi possível obter a resolução da imagem, ou seja, o tamanho que cada pixel representa. Assim, com a resolução das imagens, foi possível realizar medidas de distâncias com uma ferramenta de escala do software IMAGO.

Em cada experimento foi medido o quanto a frente de fase não-molhante avançou da garganta para ocorrer o *snap-off*. Essa medida foi realizada para a primeira ruptura de cada experimento. Para isso, tomou-se o último quadro antes de ocorrer o *snap-off*, ou seja, o último quadro onde a frente de fase não-molhante ainda estava considerada conexa. A FIGURA 35 mostra como essa medida foi feita.

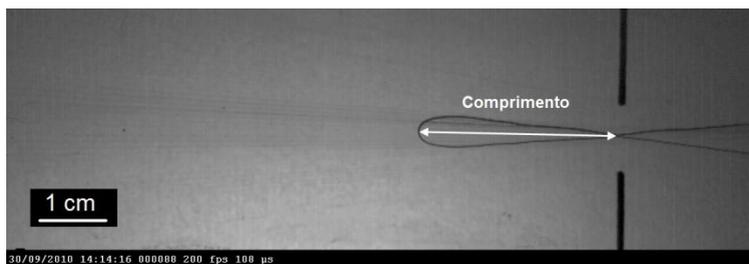


FIGURA 35. Medida do comprimento (A) da primeira bolha antes de ocorrer o *snap-off* (experimento ar/isoparafina a 3 ml/min, atingindo um número capilar de $1,8 \times 10^{-3}$ na região da garganta).

Foram realizadas 10 medidas de comprimento (A) para a primeira bolha de cada experimento, de onde se calculou a média e o desvio padrão. A FIGURA 36 apresenta os resultados obtidos para os experimentos com os diferentes óleos em função do número capilar calculado na garganta (com barras de incertezas, propagadas das medições de viscosidade dinâmica e tensão interfacial). Além disso, pode-se observar o desvio padrão desses resultados na FIGURA 37, que se encontram em gráficos separados devido à diferença de escala ser grande.

Observa-se na FIGURA 36 que apesar das flutuações observadas, há um comportamento comum para todos os fluidos, que parecem localizar-se na mesma curva. Isso sugere que para

estes fluidos, o tamanho da bolha formada depende apenas do número capilar. Em outras palavras pode-se dizer que para um mesmo número capilar, independentemente do fluido utilizado e de suas propriedades intrínsecas, haverá um mesmo tamanho para a bolha formada.

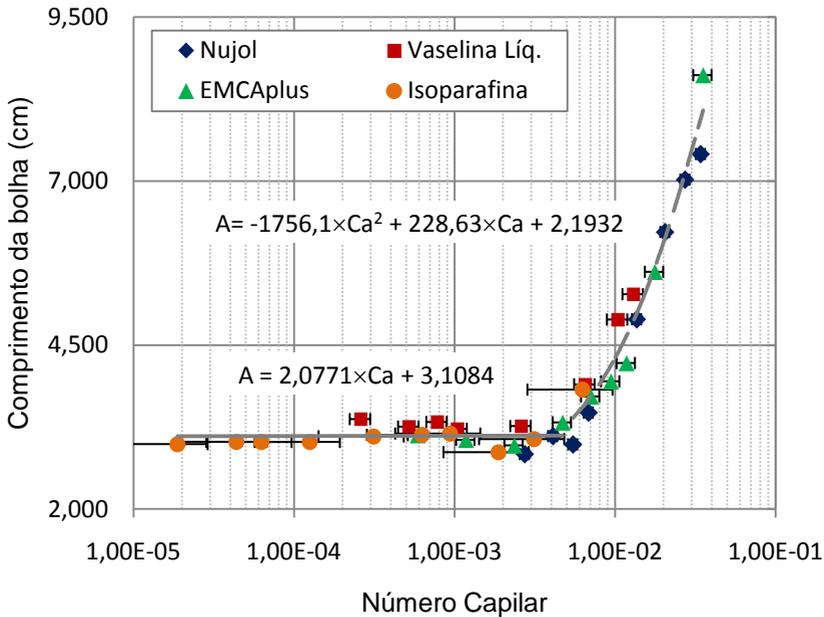


FIGURA 36. Comprimento da bolha (A) antes de romper em função do número capilar (escala logarítmica) na garganta.

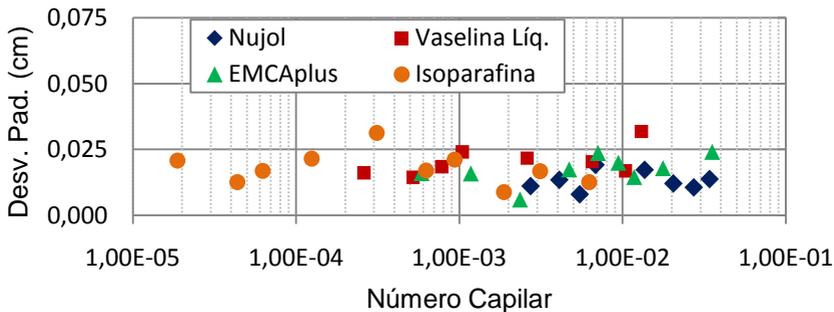


FIGURA 37. Desvio padrão obtido das medidas realizadas na FIGURA 36.

Observa-se que para os menores números capilares (até $\sim 5 \times 10^{-3}$) a distância avançada pela frente de fase não-molhante manteve-se constante em aproximadamente 3 cm enquanto para números capilares que excediam este valor, o comprimento avançado foi crescente linearmente com aumento do número capilar. Assim, segundo estes resultados o tamanho da bolha formada parece não depender da vazão de entrada da fase não-molhante para números capilares inferiores a esse valor.

AMYOT (2004) obteve um resultado semelhante (FIGURA 15), com comportamento em um intervalo semelhante de números capilares. AMYOT & PLOURABOUÉ (2007) associaram este resultado a uma mudança de regime de predominantemente capilar (abaixo deste limite) para um regime predominantemente viscoso (acima deste limite).

GAUGLITZ *et al.* (1987) também estudaram o tamanho das bolhas formadas a baixos números capilares, onde observaram apenas o comportamento linearmente crescente. No entanto, o canal utilizado por eles consistia em um capilar de seção reta quadrada com dimensões variando de 1 mm a 0,4 mm, dimensões próximas às utilizadas neste trabalho. O efeito aqui observado (FIGURA 36) e também observado por AMYOT (2004) e AMYOT & PLOURABOUÉ (2007), pode estar associado à geometria do canal utilizada.

Ainda observando a FIGURA 36, nota-se que o valor mínimo avançado pela bolha para romper foi de aproximadamente 3 cm, o que representa 3 vezes a largura na garganta (onde $2l_1=1\text{cm}$ na FIGURA 31). Na FIGURA 38 pode-se visualizar o comprimento da bolha avançada em múltiplos de l_1 .

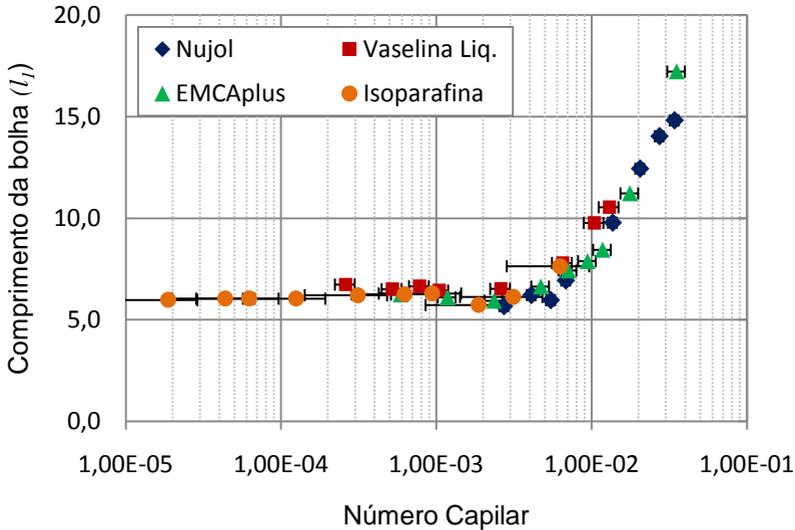


FIGURA 38. Comprimento da bolha avançada antes de romper (múltiplos de $l_1 = 0,5\text{cm}$), em função do número capilar na garganta.

Segundo ROOF (1970), para o seu micromodelo de geometria cilíndrica, a frente de fase não-molhante avançava no mínimo sete vezes o valor do raio (ou 3,5 vezes o valor do diâmetro) da garganta para que ocorresse o *snap-off*.

4.1.2. Tempo para a formação da primeira bolha

Durante as filmagens, cada quadro foi gravado com um número identificador sequencial. Sabendo a taxa de aquisição (quadros por segundo = qps), pôde-se obter o tempo entre dois determinados quadros. Assim, selecionou-se o quadro onde a frente de fase não-molhante atingia a garganta e o quadro na iminência de ocorrer ruptura (último quadro onde a fase não-molhante era considerada contínua). O tempo (em segundos) é obtido então através do número de quadros para que a fase não-molhante avançasse essa distância sobre o número de quadros adquiridos por segundo (qps) da filmagem.

Foram medidos os tempos para a formação da primeira bolha (tempo para a primeira ruptura), de cada experimento em função do número capilar para cada fluido, como podem ser vistos na FIGURA 39.

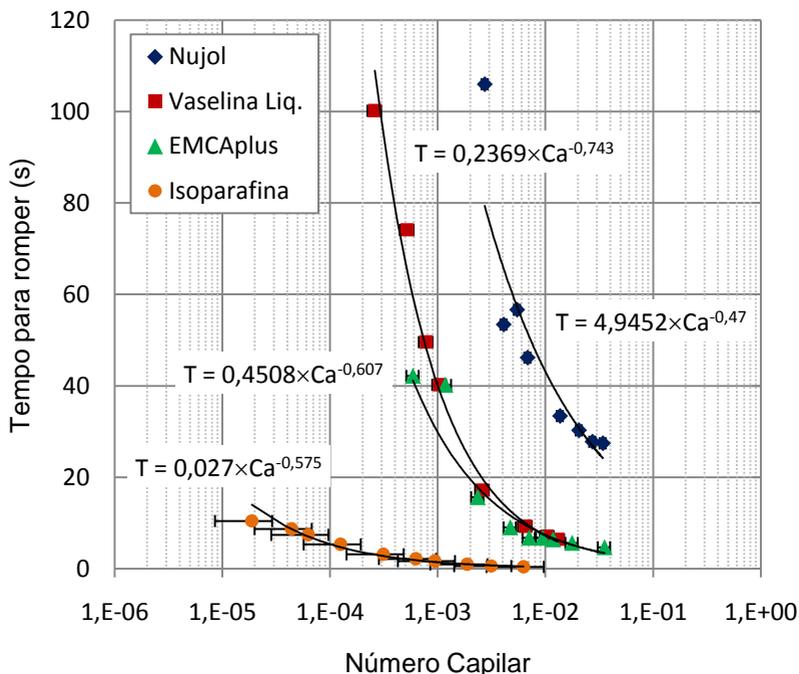


FIGURA 39. Tempo para a formação da primeira bolha de cada experimento em função do número capilar.

Observa-se na FIGURA 39 que o tempo para a ruptura é dependente do número capilar, onde, analisando cada fluido particularmente, o tempo é maior para números capilares menores e diminui a medida que o número capilar aumenta. Além disso, nota-se a dependência das propriedades intrínsecas dos fluidos no tempo para a formação da bolha. Para um número capilar de aproximadamente $Ca=8 \times 10^{-3}$, por exemplo, nota-se que o fluido mais viscoso, o nujol ($\mu=160,76$ cP) é o que demora um maior tempo para romper, enquanto a isoparafina, que é o fluido menos viscoso ($\mu=1,12$ cP) é o que demora um menor tempo para romper.

O número capilar depende não somente das propriedades dos fluidos e da geometria do canal, mas também da vazão utilizada, de maneira que para vazões volumétricas de mesmo valor obtêm-se diferentes números capilares para diferentes fluidos e vice-versa. De fato, para uma vazão volumétrica de 0,1

ml/min obtêm-se números capilares de $7,1 \times 10^{-3}$ para o nujol, enquanto que para a isoparafina esse valor é de $5,9 \times 10^{-5}$ (FIGURA 28).

Pode-se dizer que fluidos de propriedades físicas distintas, envolvem diferentes reações ao escoamento. Pelo gráfico da FIGURA 40 é possível analisar com maior clareza o efeito da viscosidade no tempo para ruptura.

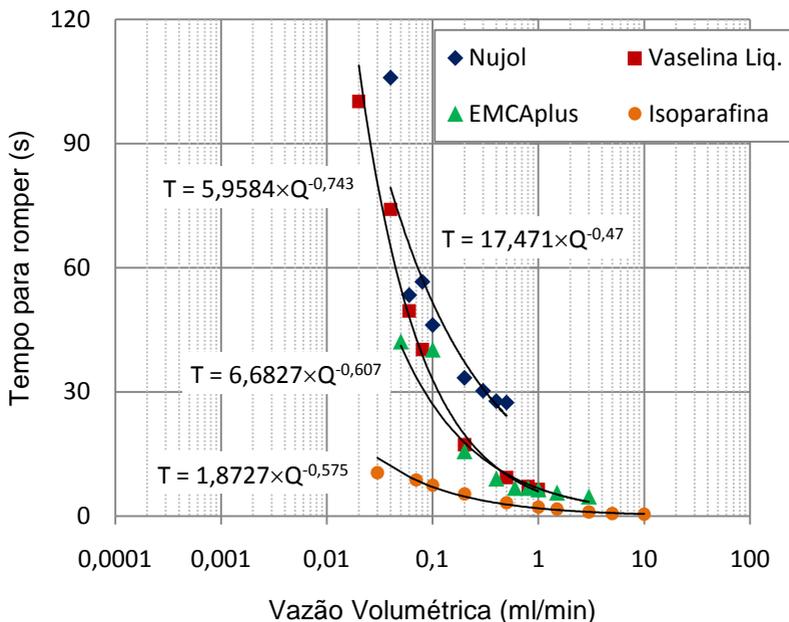


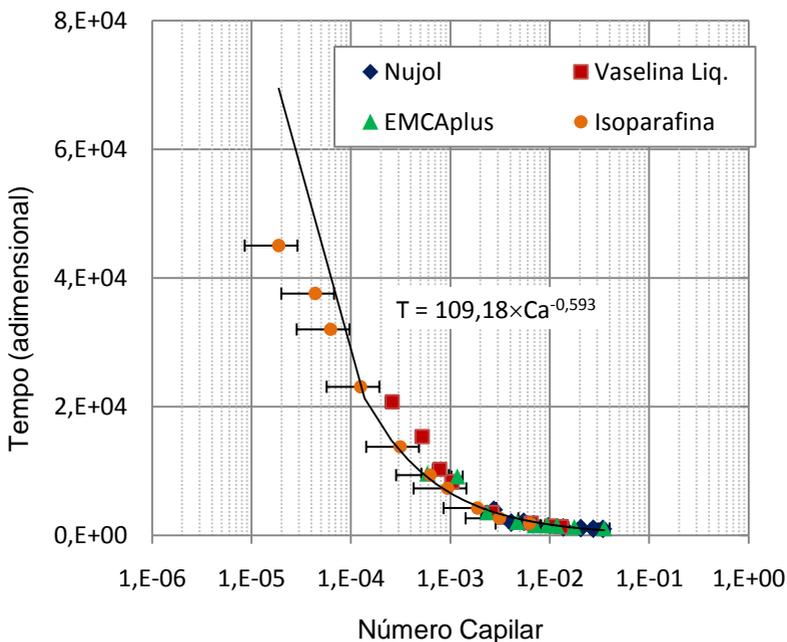
FIGURA 40. Tempo para a formação da primeira bolha em função da vazão volumétrica utilizada.

Intuitivamente, para maiores vazões volumétricas, o tempo para romper é menor, pois a frente de fase não-molhante avançaria mais rapidamente pela garganta. No entanto, o *snap-off* ocorre devido à instabilidade causada pela fase molhante que escoava nas paredes e cantos do canal em direção à garganta, assim, para uma mesma vazão volumétrica de avanço da fase não-molhante, quanto maior for a viscosidade dinâmica do óleo que constitui a fase molhante maior será o tempo para a ruptura. Isso pode ser visualizado na FIGURA 40, comparando

especialmente os experimentos com nujol e isoparafina que representam os limites de viscosidade aqui utilizados.

Vale salientar ainda que além da viscosidade, a tensão superficial também pode contribuir no tempo para a ruptura. No entanto, como os óleos utilizados apresentavam tensões superficiais semelhantes (TABELA 3) com exceção da isoparafina, não se pode afirmar acerca desta influência com base nos resultados deste trabalho.

Através da transformação $T \rightarrow T^* = T \times \gamma / \mu l_1$ (AMYOT, 2004) é possível tornar o tempo adimensional e independente das características intrínsecas dos fluidos. Assim, pôde-se avaliar o comportamento dessa variável em função do número capilar, onde os resultados dos experimentos com os diferentes fluidos mostraram um comportamento semelhante, superpostos na mesma curva, como mostra a FIGURA 41.



No gráfico da FIGURA 41 observa-se claramente o que já foi mencionado anteriormente: para baixos números capilares o tempo para a ruptura é maior, enquanto para números capilares maiores, o tempo é menor.

Os resultados aqui apresentados estão de acordo com os de AMYOT (2004).

4.1.3. Tempo para rupturas sucessivas

Com base na mesma idéia usada para calcular o tempo para primeira ruptura, foi medido também o tempo entre rupturas sucessivas. Isso foi feito tomando o inicialmente o quadro antes de uma ruptura, o quadro antes da ruptura seguinte e calculando o número de quadros entre estes dois. Assim, dividindo pelo número de quadros por segundo obteve-se o tempo entre estas rupturas. Isso foi feito para todas as rupturas que ocorriam durante o experimento.

Os resultados dos experimentos apresentaram comportamentos semelhantes ao da FIGURA 42, que mostrou que apesar de algumas flutuações, o tempo entre rupturas sucessivas é constante.

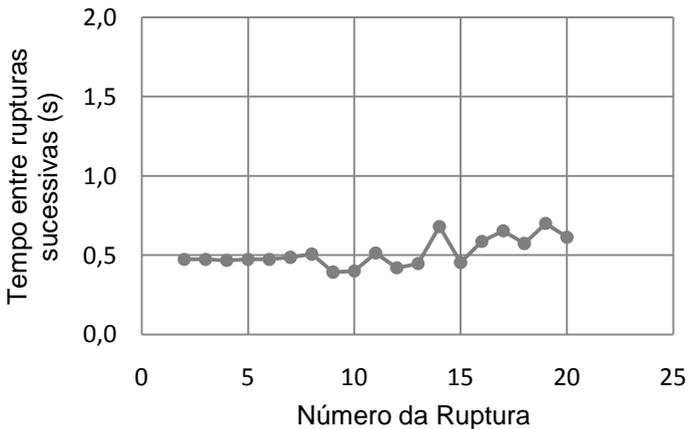


FIGURA 42. Tempo entre rupturas sucessivas. Experimento envolvendo isoparafina/ar a uma vazão volumétrica de 10 ml/min ($Ca=6,2 \times 10^{-3}$).

Em alguns poucos casos foram registrados comportamentos que diferem do observado na FIGURA 42, como podem ser visualizados na FIGURA 43 e FIGURA 44.

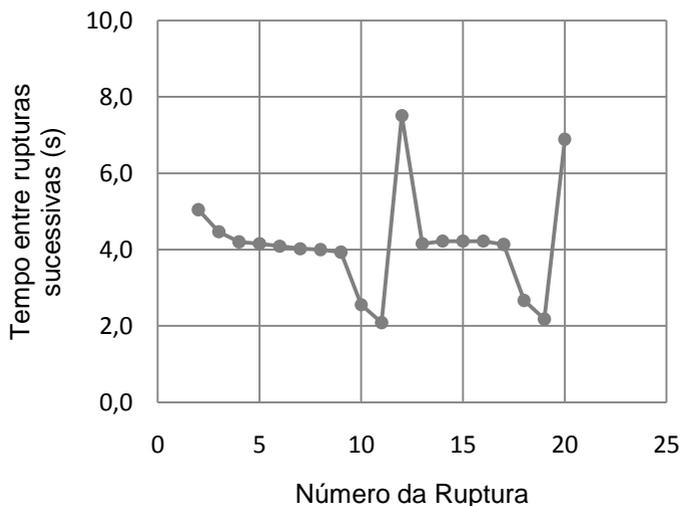


FIGURA 43. Tempo entre rupturas sucessivas. Experimento isoparafina/ar a uma vazão volumétrica de 1,0 ml/min ($Ca=6,2 \times 10^{-4}$).

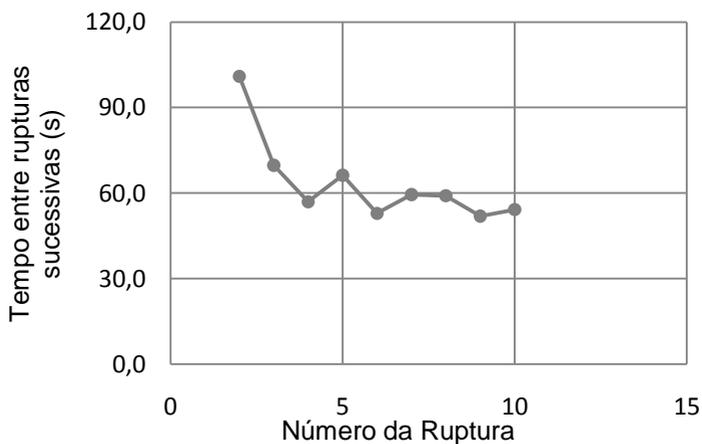


FIGURA 44. Tempo entre rupturas sucessivas. Experimento EMCAplus/ar a uma vazão volumétrica de 0,01 ml/min ($Ca=1,2 \times 10^{-4}$).

Pode-se observar nestas duas figuras comportamentos que de maneira geral podem estar associados a outros fenômenos que não serão tratados nesta dissertação. Na FIGURA 43, a vazão utilizada foi de 1,0 ml/min, o que resultou em um experimento relativamente rápido, com tempo para rupturas sucessivas de aproximadamente 4 s. Aqui pode-se sugerir que tenha ocorrido coalescência das bolhas, causando ondas de pressão, de maneira a interferir na dinâmica do snap-off em determinados momentos.

Já na FIGURA 44, a vazão utilizada foi de 0,01 ml/min, sendo portanto um experimento demorado, onde houve uma redução no tempo para ruptura de 100 s para aproximadamente 60 s com flutuações. Pode-se dizer que experimentos mais longos sejam mais susceptíveis a mudanças de temperatura na sala onde os mesmos eram conduzidos. Assim, como a viscosidade dinâmica do fluido molhante está ligada ao tempo para ruptura e que esta propriedade é altamente influenciada por alterações de temperatura, pode-se sugerir que neste experimento mais longo o comportamento observado pode estar ligado a uma possível mudança de temperatura, onde, no início a temperatura deveria ser mais baixa, com uma maior viscosidade do óleo e conseqüentemente, um maior tempo para o *snap-off*. No entanto, para afirmar isso com clareza é necessário realizar um monitoramento rigoroso de temperatura ao longo do tempo, como realizado por AMYOT (2004) (FIGURA 16).

O experimento da FIGURA 44, que apresentou discrepância no início e ao longo do mesmo, foi eliminado, pois estes resultados podem sugerir que o tempo para a primeira ruptura estivesse discrepante também. Nos demais experimentos, quando houve flutuações abruptas, como o caso do experimento visualizado na FIGURA 43, estes desvios foram considerados pontos discrepantes, que foram removidos do experimento.

4.1.4. Frequência de rupturas

Removendo os dados discrepantes no tempo para ruptura foi possível calcular um tempo médio entre rupturas sucessivas. Com a utilização desse tempo médio calculou-se a respectiva frequência para cada experimento a diferentes vazões volumétricas e para cada óleo mineral utilizado, como pode ser visualizado na FIGURA 45 e FIGURA 46.

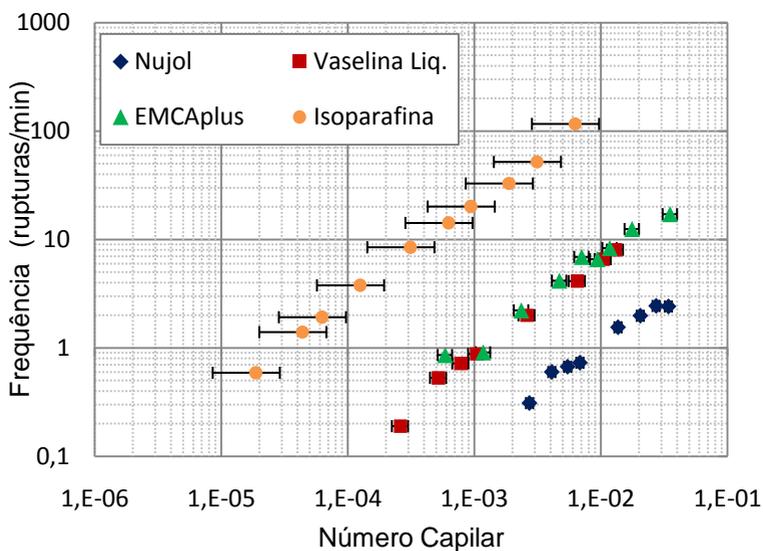


FIGURA 45. Frequência de rupturas sucessivas em função do número capilar para os diferentes óleos minerais utilizados.

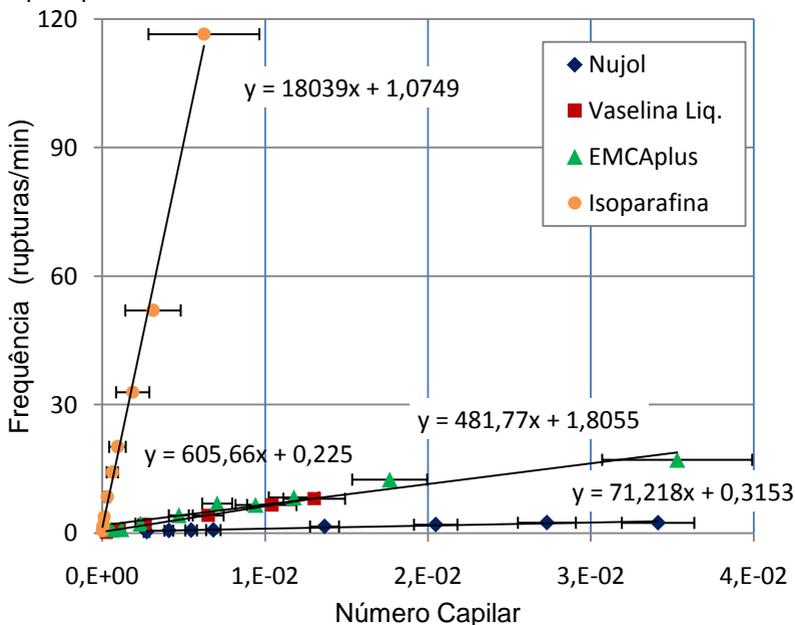


FIGURA 46. Frequência de rupturas sucessivas em função do número capilar para os diferentes óleos minerais utilizados (em escala linear).

Analisando a FIGURA 46 nota-se um comportamento aparentemente linear para ambos os óleos minerais utilizados, que apresentaram diferentes inclinações devido às características intrínsecas dos fluidos e da vazão utilizada. Pela FIGURA 45 observa-se que para um mesmo número capilar, a isoparafina, que é o fluido menos viscoso apresenta uma maior frequência de ruptura do que o nujol, que é o óleo mineral mais viscoso.

Intuitivamente, pode-se pensar que quanto maior for a vazão utilizada, menor será o tempo para que ocorra a ruptura, e conseqüentemente, maior será a frequência de ruptura. De fato, isso pode ser claramente observado na FIGURA 47.

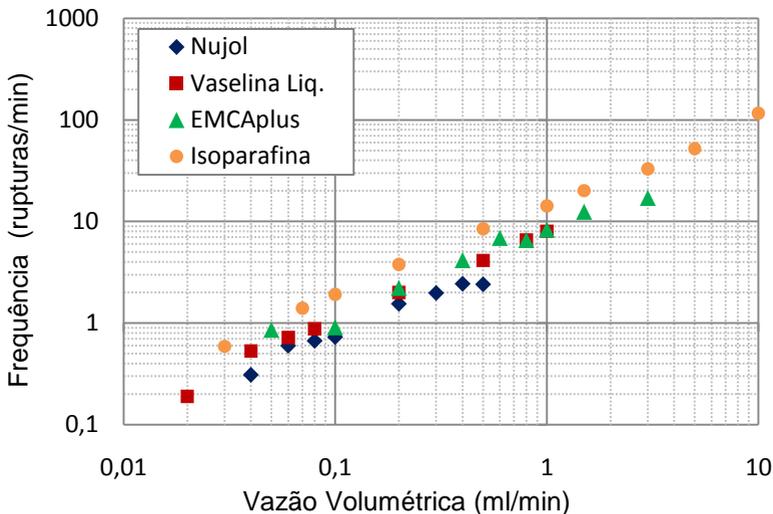


FIGURA 47. Frequência de ruptura em função da vazão volumétrica utilizada para os experimentos com os diferentes óleos minerais.

Na FIGURA 47 observa-se que para uma mesma vazão volumétrica de avanço do fluido não-molhante, por exemplo, 0,1 ml/min, a frequência de rupturas por minuto é maior para o fluido menos viscoso (isoparafina) e menor para o fluido mais viscoso (nujol). EMCAplus e vaselina líquida apresentam comportamentos intermediários a esses casos limites. Aqui observa-se com clareza o que já foi observado anteriormente: o fato de que fluidos menos viscosos apresentam uma menor resistência interna ao escoamento, e portanto, dirigem-se à

região da garganta mais facilmente, e por esse motivo, o tempo para a ruptura é menor, fazendo com que a frequência de rupturas seja maior.

AMYOT & PLOURABOUÉ (2007) encontraram um relação crescente, porém não-linear, na frequência de rupturas em função da vazão de entrada do fluido não-molhante.

4.2. PARTE II: Deslocamento de óleo com água deionizada

Nesta segunda parte foram também realizados experimentos de drenagem. No entanto, isso foi feito através da injeção de água deionizada como não-molhante (fluido deslocante) e novamente os óleos minerais como fluidos molhantes (fluido deslocado).

Assim como na PARTE I, foram realizados experimentos a diferentes vazões volumétricas (com baixos números de Reynolds) a fim de obter diferentes números capilares na garganta, como pôde ser visto na FIGURA 29 do capítulo anterior e pode ser observado na FIGURA 48 em escala linear. Neste gráfico observa-se ainda barras de incerteza no número capilar, que estão associadas às incertezas propagadas da viscosidade dinâmica e tensão interfacial.

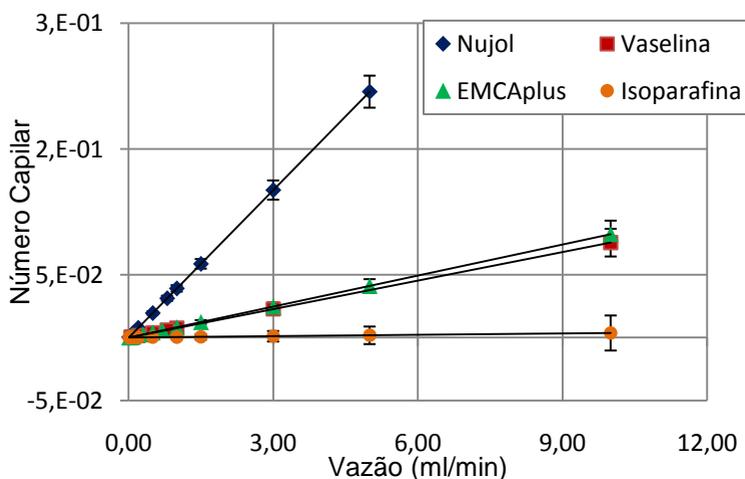


FIGURA 48. Número capilar na garganta em função da vazão volumétrica imposta.

Alguns quadros de um dos experimentos podem ser visualizados na FIGURA 49.

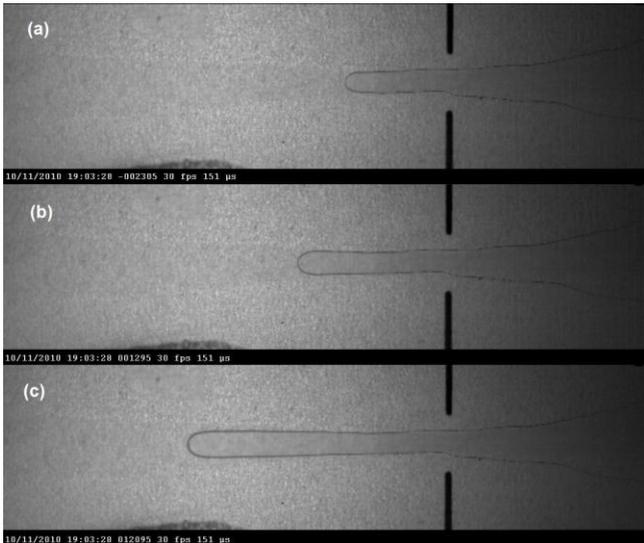


FIGURA 49. Experimento EMCAplus/água a 0,01 ml/min ($Ca=8,5 \times 10^{-5}$), filmado a 30 qps. (a) Alguns instantes após a passagem da frente de fase não-molhante pela garganta (quadro: -2305); (b) 2 minutos após o quadro anterior, onde não há sinal de que o óleo esteja se acumulando na região da garganta (quadro: 1295); (c) 6 minutos após o quadro anterior, e ainda sem sinal de fluido molhante se acumulando na região da garganta (quadro: 12095). A filmagem acabou neste frame, mas após ele o experimento continuou e não ocorreu quebra do não-molhante.

O objetivo principal desta parte do trabalho foi o de mapear para quais valores de razão de viscosidades e números capilares ocorreria o *snap-off*. O mapeamento pode ser visualizado no gráfico da FIGURA 50, onde relaciona tanto os experimentos da PARTE I, quanto os desta PARTE II.

Em nenhum dos experimentos conduzidos nesta parte foi observada a quebra de gotas na passagem da fase não-molhante pela garganta. As justificativas para a não-ocorrência do *snap-off* poderiam ser duas. Em uma delas, seria que as razões de viscosidade e números capilares trabalhados não tenham atingido a região de ruptura. No entanto, observando o gráfico da FIGURA 50 pode-se suspeitar dessa suposição, uma

vez que o experimento nujol/água encontra-se dentro de uma região de ruptura (em relação aos outros experimentos que foram conduzidos com ar).

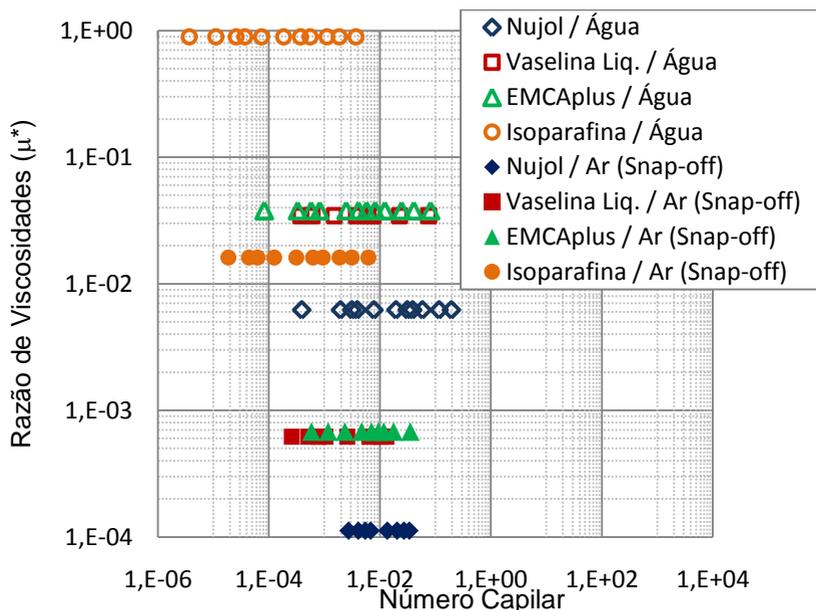


FIGURA 50. Mapeamento de ocorrência do snap-off para diferentes razões de viscosidade e números capilares. Os símbolos abertos ilustram quando não ocorreu ruptura da fase não-molhante, que no caso foram todos os experimentos óleo/água, enquanto os símbolos fechados representam os experimentos onde ocorreu a ruptura, ou seja, todos os experimentos óleo/ar.

A justificativa mais plausível para não ter ocorrido o *snap-off* em nenhum dos casos é feita observando os valores do ângulo de contato da água/óleos/acrílico, que foram apresentados na TABELA 4. O maior ângulo de contato medido foi para o sistema água/vaselina/acrílico, sendo de 162,6°, enquanto os outros ângulos medidos para os outros sistemas foram ainda menores. Isso pode indicar que a fase molhante (óleos minerais) não possa realmente ser considerada totalmente molhante, de maneira que durante a drenagem essa fase não é suficientemente molhante para formar um filme, que será responsável por promover a ruptura da fase não-molhante.

Capítulo 5. Conclusões

Na presente dissertação foram conduzidos experimentos em um micromodelo de meio poroso em escala de poro, constituído de um canal com uma constricção. A geometria escolhida consistiu em um canal triangular com garganta, conforme ilustrado na FIGURA 22. Na literatura é bem consolidada a opinião de que estes tipos de canais sejam mais representativos do meio poroso que os canais cilíndricos, pois permitem o escoamento da fase molhante não apenas pelo filme que se encontra nas paredes, mas também pelos cantos do canal (FIGURA 33), que simulam tortuosidades do meio poroso.

Estudos do mecanismo do snap-off em escala de poro conduzidos através de experimentos em micromodelos de canais com garganta única não são diretamente aplicados ao meio poroso. No entanto, estes estudos experimentais possibilitam o conhecimento e entendimento dos fundamentos físicos associados ao fenômeno.

Nos experimentos realizados nesta dissertação foram utilizados quatro óleos minerais de diferentes propriedades intrínsecas: Nujol, Vaselina Líquida, Isoparafina (UNIPAR) e EMCAplus 70.

Foi feita a drenagem pela injeção de ar (PARTE I), onde se observou a formação de bolhas repetitivas pelo mecanismo do *snap-off* em todas as vazões utilizadas e para todos os óleos minerais. Em seguida (PARTE II) a drenagem foi feita através da injeção de água-deionizada, onde não houve a formação de gotas em nenhuma das vazões utilizadas e para nenhum dos fluidos. Suspeita-se através dos valores dos ângulos de contato medidos, que os óleos minerais não molham suficientemente o acrílico em relação à água, para que possa ser formado um filme dessa fase molhante, que promova o *snap-off*. Em outras palavras, nesses sistemas os óleos minerais não podem ser considerados totalmente molhantes uma vez que a água também molha o acrílico.

Na PARTE I dos experimentos foi possível quantificar as propriedades das bolhas formadas pelo mecanismo do *snap-off* de Roof, que ocorre devido à instabilidade causada pelo fluido molhante na passagem de um fluido não-molhante pela garganta. Assim, pôde-se medir a distância avançada pela fase não-molhante antes de romper em função do número capilar

atingido na garganta, além do tempo para ocorrer a ruptura e frequência associada a rupturas sucessivas.

Sobre a distância avançada pelas bolhas antes de ocorrer ruptura, conclui-se que ela é aparentemente independente do fluido molhante utilizado, dependendo apenas do número capilar atingido na garganta, que está associado à vazão volumétrica de entrada do fluido não-molhante. Observou-se que essa distância avançada cresce com o número capilar. No entanto, para baixos números capilares (inferiores a 5×10^{-3}) pôde-se observar um resultado constante, sendo independente do número capilar. Pode-se concluir que a geometria do canal e a razão de diâmetros poro/garganta é influente no comportamento da distância avançada antes do *snap-off*, uma vez que os resultados foram semelhantes aos obtidos por AMYOT (2004), que utilizou canal de geometria e razão semelhante, e diferentes dos de GAUGLITZ *et al.* (1987), que utilizaram canais de geometria quadrada e de diferentes razões de diâmetro poro/garganta.

Pela análise no tempo para a primeira ruptura pôde-se concluir que o tempo é dependente tanto do número capilar quanto do fluido utilizado. Observou-se que com o aumento do número capilar (ligado ao aumento da vazão volumétrica do não-molhante), o tempo para ocorrer a ruptura é menor. No entanto, observou-se que para um mesmo número capilar ou até uma mesma vazão volumétrica, o nujol (óleo de maior viscosidade dinâmica) foi o que mais demorou a romper, enquanto a isoparafina (óleo menos viscoso) rompeu mais rapidamente. Concluiu-se então, que fluidos mais viscosos “demoram” mais para escoar em direção à garganta e promover a instabilidade que será responsável pelo *snap-off*.

Analisou-se também o tempo entre sucessivas rupturas, de onde se observou um comportamento constante, com exceção de alguns pontos discrepantes abruptos e que, concluiu-se, que estivessem ligados a efeitos adicionais, como por exemplo, a coalescência das bolhas previamente formadas. Em alguns dos experimentos mais longos (a baixas vazões) observou-se um comportamento crescente ou decrescente no tempo entre rupturas sucessivas. Uma vez que o tempo é influenciado pela viscosidade e que por sua vez, alterações de temperatura causem alterações de viscosidade, pôde-se concluir que durante estes experimentos mais longos (que apresentaram esse

comportamento anômalo) possam ter ocorrido algumas variações de temperatura da sala.

Outro aspecto que pôde ser investigado foi a frequência associada a rupturas sucessivas, onde obtiveram-se resultados relacionados ao tempo entre rupturas sucessivas.

Para trabalhos futuros relacionados a este tema a autora sugere:

- Em experimentos que envolvem a formação de gotas através do mecanismo do *snap-off* (assim como a PARTE II da presente dissertação), sugere-se a utilização de um sistema cujo fluido molhante seja totalmente molhante ($\theta \rightarrow 0^\circ$), tornando possível realizar o mapeamento do snap-off como na FIGURA 50;

- Pode-se ainda sugerir a alteração da superfície do substrato do material, a fim de alterar a molhabilidade;

- Sugere-se conduzir experimentos em outras geometrias (inclusive cilíndricas), de dimensões aproximadas, utilizando os mesmos fluidos e o mesmo material do canal, para que os resultados encontrados possam ser diretamente comparados.

- Outro aspecto que pode ser quantificado é a influência da temperatura nos experimentos, monitorando mudanças bruscas de temperatura e observando o comportamento no tempo para snap-off. Assim, pode-se dar uma maior credibilidade a interpretação dos desvios associados a experimentos mais longos.

Para a fabricação de micromodelos através de usinagem pode-se sugerir:

- Usinagem de outro material diferente do acrílico, que possua uma temperatura de fusão maior que o acrílico e que responda melhor à usinagem, sem fundir, proporcionando melhor acabamento do canal;

5. Para um micromodelo de mesma geometria (triangular) pode-se sugerir a utilização de uma microfresadora de 4 eixos, que também permita cortar o material em um eixo inclinado acompanhando a inclinação das paredes do canal. Assim, ao invés do efeito de “escada” que é ilustrado na FIGURA 25(c), serão obtidas paredes lisas como idealizado e ilustrado na FIGURA 23(c).

Referências Bibliográficas

- Air Properties. Disponível em: <http://www.engineeringtoolbox.com/air-properties-d_156.html>. Acesso em: 22 dez. 2010.
- AMYOT, Oliver. *Contribution a l'étude des écoulements diphasiques a travers un contact rugueux*, 2004. Thèse de docteur – Faculté des Sciences Fondamentales et Appliquées – Université de Poitiers, France
- AMYOT, Oliver; PLOURABOUÉ, Francis. *Capillary pinching in a pinched microchannel*. Physics of Fluids. v. 19, p. 033101-033110, 2007.
- ANDERSON, Glen Allen. *Simulation of Chemical Flood Enhanced Oil Recovery Processes Including the Effects of Reservoir Wettability*, 2006. Thesis – The University of Texas at Austin, United States.
- BEAR, Jacob. *Dynamic of Fluids in Porous Media*. New York: American Elsevier, 1972. 764p.
- BRASIL. Ministério de Minas e Energia, *Anuário Estatístico Brasileiro do Petróleo, Gás natural e Biocombustíveis 2010*. Brasil: Agência Nacional do Petróleo, 2010.
- BUCKLEY, Jill S. *Multiphase Displacements in Micromodels*. In: N.R. Morrow (Ed.), *Interfacial Phenomena in Petroleum Recovery*, Marcel Dekker Inc., New York, 1991, p. 157-189.
- CHAMBERS, Kevin T.; RADKE, C. J. *Capillary Phenomena in Foam Flow Through Porous Media*. In: N.R. Morrow (Ed.), *Interfacial Phenomena in Petroleum Recovery*, Marcel Dekker Inc., New York, 1991, p. 191-254.
- CHEN, M.; YORTSOS, Y.C.; ROSSEN, W.R. Insights on foam generation in porous media from pore-network studies. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. v. 256, p. 181-189, 2005.
- CUTHIELL, D. et al. *The in situ formation of heavy oil emulsions*. Society of Petroleum Engineers Journal. v. 30319, p. 675-688, 1995.
- DE GENNES, P.G.; BROCHARD-WYART, F.; QUÉRÉ, D. *Capillarity And Wetting Phenomena: Drops, Bubbles, Pearls, Waves*. Translated by Axel Reisinger. New York: Springer, 2004. 291p.
- GAUGLITZ, P. A.; ST. LAURENT, C. M.; RADKE, C. J. An Experimental Investigation of Gas-Bubble Breakup in a Constricted Square Capillaries. *Journal of Petroleum Technology*. v. 39, n. 9, p. 1137-1146, 1987
- GAUGLITZ, P. A.; ST. LAURENT, C. M.; RADKE, C. J. *Experimental Determination of Gas-Bubble Breakup in a Constricted Cylindrical Capillary*. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. v. 27, n. 7, p. 1282-1291, 1988.
- GAUGLITZ et al. Foam generation in homogeneous porous media. *Chemical Engineering Science*. v.57, p. 4037-4052, 2002.

- HORNBROOK, J.W.; CASTANIER, L.M.; PETTIT, P.A. *Observation of Foam/Oil Interactions in a New, High-Resolution Micromodel*. SPE 22631, in: Proceedings of the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Dallas, October, 1991.
- KOKAL, S. *Crude Oil Emulsions: A State-Of-The-Art Review*. Society of Petroleum Engineers Journal. v. 20, n. 1, p. 5-13, 2005.
- KOVSCCEK, A. R.; TANG, G.-Q.; RADKE, C.J. *Verification of Roof snap off as a foam-generation mechanism in porous media at steady state*. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. v. 302, p. 251-260, 2007.
- LEMNON, E.W.; MCLINDEN, M.O. & FRIEND, D.G. *Thermophysical Properties of Fluid Systems*. in NIST Chemistry WebBook, NIST Standard Reference Database Number 69, Eds. P.J. Linstrom and W.G. Mallard, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg MD, 20899. Disponível em: <<http://webbook.nist.gov>>. Acesso em: 22 dez. 2010.
- LMNO Engineering, Research, and Software, Ltd. *Gas Viscosity Calculator*. Disponível em: <<http://www.lmnoeng.com/Flow/GasViscosity.htm>>. Acesso em: 22 dez. 2010.
- MOREIRA, Anderson C. *Caracterização da Microestrutura de Materiais Porosos por Microtomografia de Raios X e Transmissão de Raios Gama*, 2006. Dissertação de Mestrado – Departamento de Física. Universidade Estadual de Londrina, Londrina.
- NUÑEZ, Victor R. G. *Deslocamento de Óleo em um Meio Poroso Através da Injeção de Emulsões: Análise de Fluxo Linear*, 2007. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Mecânica. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- OLBRICHT, W. L. *Pore-Scale Prototypes of Multiphase Flow in Porous Media*. Annual Review of Fluid Mechanics. v. 28, p. 187-213, 1996
- PEÑA, Teresa J. *Geração de emulsões durante a produção de petróleo*, 2007. Tese de Doutorado – Departamento de Engenharia Mecânica. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- PEÑA, T. J.; CARVALHO, M. S.; ALVARADO, V. *Snap-off of a Liquid Drop Immersed in Another Liquid Flowing Through a Constricted Capillary*. The American Institute of Chemical Engineers Journal. v. 55, n. 8, p. 1993-1999, 2009.
- ROOF, J. G. *Snap-off of Oil Droplets in Water-Wet Pores*. Society of Petroleum Engineers Journal. v. 10, p. 85-90, 1970.
- ROSSEN, William R. *A critical review of Roof snap-off as a mechanism of steady-state foam generation in homogeneous porous media*. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. v. 225, p. 1-24, 2003

- ROSSEN, William R. *Snap-off in constricted tubes and porous media*. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. V. 116, p.101-107, 2000.
- SCHMITT, Mayka. *Caracterização do Sistema Poroso de Rochas-Selantes Combinando-se Adsorção de Nitrogênio e Intrusão de Mercúrio*, 2009. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis
- SHAMES, Irving H. *Mecânica dos Fluidos*. Traduzido por Amorelli M. v. 2, São Paulo: E. Blucher, 1973.
- SOO, H.; RADKE, C.J. The Flow Mechanism of Dilute, Stable Emulsions in Porous Media. *Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals*. v. 23, p. 342-347, 1984.
- THOMAS, J. E. *Fundamentos de Engenharia de Petróleo*. Rio de Janeiro: Interciência: PETROBRÁS, 2001.
- TIAB, Djebbar & DONALDSON, Erle C. *Petrophysics: Theory and Practice of Measuring Reservoir Rock and Fluid Transport Properties*. Secod Edition. Oxford: Elsevier, 2004. 889p.
- TSAI, T.M.; MIKSIS, Michael J. Dynamics of a drop in a constricted capillary tube. *Journal of Fluid Mechanics*. v. 274, p.197-217, 1993
- TSAI, T. M.; MIKSIS, Michael J. The effects of surfactant on the dynamics of bubble snap-off. *Journal of Fluids Mechanics*, v.337, p.381-410, 1997.