

Priscilla Ribeiro Vargas

**Deslocamento de líquidos em célula
de Hele-Shaw considerando efeitos
não newtonianos**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
Programa de Pós-graduação em Engenharia
Mecânica**

Rio de Janeiro
Setembro de 2010

Priscilla Ribeiro Varges

**Deslocamento de líquidos em célula de
Hele-Shaw considerando efeitos não
newtonianos**

Dissertação de Mestrado

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

Orientador: Prof. Paulo Roberto de Souza Mendes

Rio de Janeiro
Setembro de 2010

Priscilla Ribeiro Vargas

**Deslocamento de líquidos em célula de
Hele-Shaw considerando efeitos não
newtonianos**

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

Prof. Paulo Roberto de Souza Mendes

Orientador

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

Prof. André Leibsohn Martins

CENPES/PETROBRAS

Prof. Luis Fernando Azulguir Azevedo

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

Prof. Prof. José Eugênio Leal

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 17 de Setembro de 2010

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

Priscilla Ribeiro Vargas

Graduou-se em Engenharia Mecânica e Engenharia de Produção-Mecânica na Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro em 2007.

Ficha Catalográfica

Vargas, Priscilla Ribeiro

Deslocamento de líquidos em célula de Hele-Shaw considerando efeitos não newtonianos / Priscilla Ribeiro Vargas; orientador: Paulo Roberto de Souza Mendes. – 2010.

114 f.: il. (color); 30 cm

Dissertação (mestrado) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Mecânica, 2010.

Inclui bibliografia

1. Engenharia Mecânica – Teses. 2. Célula de Hele-Shaw. 3. Instabilidade de Saffman-Taylor. 4. Estabilidade de interface. I. Vargas, Priscilla Ribeiro. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Mecânica. III. Título.

CDD: 621

Aos meus pais

Agradecimentos

Ao meu orientador Paulo Roberto de Souza Mendes pelo apoio, pelos ensinamentos e incentivo para a realização deste trabalho.

A Petrobras, FAPERJ, CNPq, FINEP e à PUC-Rio, pelos auxílios concedidos, sem os quais este trabalho não poderia ter sido realizado. Gostaria de agradecer especialmente ao André Leibsohn pela parceria e confiança.

A todos os professores que fizeram parte de minha formação acadêmica, em especial Mônica Naccache, Márcio Carvalho e Luis Fernando Azevedo. Aos membros do Departamento de Engenharia Mecânica, obrigada pela colaboração.

Também gostaria de agradecer a toda família do Grupo de Reologia da PUC-Rio. Sem a compreensão, apoio e amizade de vocês, esse projeto não seria possível. Flávio, obrigada pela parceria e pelas discussões valiosas. André, obrigada pela parceria no âmbito numérico. Carina, obrigada pelo apoio administrativo a esse projeto. Bruna, Gisllane, Camila, Walter e Bruno, obrigada pelo apoio técnico.

Aos alunos de iniciação científica que sempre estiveram ao meu lado de bom humor e oferecendo ajuda. Gostaria de agradecer especialmente a minha dupla, Patrícia Emídio. Obrigada pelo comprometimento e disposição.

Aos estagiários, Paula Mey e Washington. Obrigada pela dedicação e cooperação ao longo desses anos.

Aos meus amigos da PUC-Rio, que me fizeram amar esse lugar. Ranena, Fred e Flavio, obrigada pela troca de experiências. Aos amigos que estiveram ao meu lado durante esse percurso, agradeço principalmente a minha melhor amiga Paula Farias.

Ao meu marido, Sergio Ribeiro, que foi fundamental para a execução deste trabalho. Obrigada pela parceria no tratamento de imagens e pelas aulas de Matlab. Obrigada pelo carinho, amor e companheirismo. Agradeço pela compreensão durante os fins de semana e feriados que foram dedicados a esta dissertação.

A minha família, obrigada pelo carinho. Aos meus irmãos, obrigada pelo amor e amizade. Gostaria de agradecer especialmente aos meus pais que sempre investiram em minha educação. Obrigada pelo amor incondicional e por me ajudarem a superar os obstáculos da vida. Vocês tem minha eterna gratidão, respeito e admiração.

Resumo

Varges, Priscilla Ribeiro; Souza Mendes, Paulo Roberto de. **Deslocamento de líquidos em célula de Hele-Shaw considerando efeitos não newtonianos**. Rio de Janeiro, 2010. 114p. Dissertação de Mestrado — Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Estudou-se neste trabalho o deslocamento de fluidos em meios porosos utilizando células de Hele-Shaw. Especificamente, investigou-se experimentalmente o deslocamento de um fluido não newtoniano por um newtoniano em uma célula retangular de Hele-Shaw. A instabilidade de Saffman-Taylor ou *viscous fingering* é um fenômeno observado quando um fluido de menor viscosidade desloca um de maior viscosidade, e a célula de Hele-Shaw é uma ferramenta conveniente para a sua observação. Esse fenômeno é muito importante em diversas aplicações, como por exemplo: recuperação secundária e terciária de petróleo, invasão de fluidos de perfuração em meios porosos, fraturamento hidráulico, processamento de polímeros, hidrologia e filtração. É vasta a literatura relativa ao estudo de fluidos newtonianos e não newtonianos deslocados por ar em células de Hele-Shaw. Entretanto, existem poucos trabalhos envolvendo deslocamentos de líquidos com viscosidades comparáveis, ou seja, razão de viscosidade diferente de zero. Apresentou-se o detalhamento do projeto de construção de uma célula de Hele-Shaw aplicável ao deslocamento de um líquido por outro líquido. A evolução da forma da interface foi analisada, através de uma câmera fotográfica, em função dos parâmetros geométricos, dinâmicos e reológicos. A partir da vetorização da forma da interface, determinou-se a eficiência do deslocamento. Sendo assim, foi definido o espectro de situações em que há formação de *fingers* e *plugs* relativos ao deslocamento de goma xantana por um óleo mineral. Não há na literatura uma convenção universal para apresentação dos resultados, logo uma contribuição original refere-se à adimensionalização proposta onde os principais parâmetros governantes são a velocidade adimensional, o número de capilaridade reológico e o índice de comportamento da goma xantana. Observou-se que para um valor constante do índice de comportamento e para um valor do número de capilaridade reológico da ordem de 10^{-1} , a eficiência de deslocamento aumenta com a velocidade adimensional, porque a razão de viscosidade diminui.

Palavras-chave

Célula de Hele-Shaw; Instabilidade de Saffman-Taylor; Estabilidade de interface;

Abstract

Varges, Priscilla Ribeiro; Souza Mendes, Paulo Roberto de (Adviser). **Liquid-liquid displacement flows in a Hele-Shaw cell including non-Newtonian effects**. Rio de Janeiro, 2010. 114p. MSc Dissertation — Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

This work studied the displacement of fluids in porous media using a Hele-Shaw cell. Specifically, was investigated experimentally the displacement of a non-Newtonian fluid by a Newtonian in a rectangular Hele-Shaw cell. The Saffman-Taylor or viscous fingering instability occurs when one fluid pushes a more viscous one, and a Hele-Shaw is a convenient tool to the phenomenon observation. Applications include displacement of heavy crude oil in reservoirs, drilling fluid invasion through porous media, fracture conductivity, polymer processing, hydrology and filtration. The Saffman-Taylor instability has been extensively studied for Newtonian and non-Newtonian liquids displaced by air in a Hele-Shaw cell. However displacement flows involving two liquids of comparable viscosity (nonzero viscosity ratio) have received very little attention. It was presented the details of construction of a Hele-Shaw applicable to a liquid-liquid displacement. The evolution of the shape of the interface was analyzed through a digital camera, as a function of the geometric, dynamic and rheological parameters. From tracing the shape of the interface, was determined the displacement efficiency. Thus, it was defined the spectrum of situations in which there is formation of fingers and plugs relating to displacement of xanthan gum by a mineral oil. There is no universal convention in the literature for presenting the results so a original contribution concerns the proposed dimensionless parameters. The main parameters that govern this flow are the dimensionless flow rate, the rheological capillary number and the behavior index of xanthan gum. It was observed that for a constant value of the behavior index and for a rheological capillary number of magnitude of 10^{-1} , the displacement efficiency increases with the dimensionless flow rate, because the viscosity ratio decreases.

Keywords

Hele-Shaw cell; Saffman-Taylor instability; Viscous fingering;

Sumário

1	Introdução	16
1.1	Motivação	16
1.2	Revisão bibliográfica	18
1.3	Objetivos	31
2	Metodologia Experimental	32
2.1	Fluidos	32
2.2	Bancada experimental	32
2.3	Procedimento experimental	43
3	Tratamento dos dados	44
3.1	Tratamento de imagens	44
3.2	Adimensionalização	50
4	Resultados	57
4.1	Validação da bancada experimental	57
4.2	Caracterização reológica	60
4.3	Adimensionalização	68
4.4	Experimentos de visualização	69
5	Conclusões	90
5.1	Conclusões	90
5.2	Recomendações para trabalhos futuros	91
	Referências Bibliográficas	93
A	Escoamentos bidimensionais em meios porosos: célula de Hele-Shaw	99
B	Goma Xantana	101
C	Desenvolvimento da bancada experimental	104
D	Calibração das bombas	110
D.1	Bomba Cole-Parmer modelo KH 07553-80 com mangueira L/S	110
D.2	Bomba marca Netzsch modelo Nemo NM015BY02S12B	111
E	Adimensionalização do problema para fluidos viscoplásticos	113

Lista de figuras

1.1	Recuperação secundária de petróleo e a formação de <i>viscous fingering</i>	17
1.2	Diagrama esquemático de uma célula retangular de Hele-Shaw	18
1.3	(A) Escoamento com a presença de <i>viscous fingering</i> ; (B) Escoamento com deslocamento do tipo pistão.	20
2.1	Foto da bancada experimental	33
2.2	Foto da célula de Hele-Shaw	33
2.3	Desenho esquemático da bancada experimental	34
2.4	Dimensões da célula de Hele-Shaw	35
2.5	Célula de Hele-Shaw	36
2.6	Visão superior da placa de vidro inferior	37
2.7	Efeito "sanduiche"	37
2.8	Vista explodida da fixação das placas de vidro	38
2.9	Peça colada sobre o vidro para permitir a injeção de fluidos	38
2.10	Definição da área de corte das imagens em relação a célula de Hele-Shaw	40
2.11	Garrafa de transferência	41
2.12	Sistema de controle de temperatura do fluido newtoniano	42
3.1	Célula de Hele-Shaw preenchida com o fluido deslocado	44
3.2	Representação do escoamento através de uma sequência de fotografias	45
3.3	Definição da área de corte das imagens	45
3.4	Transição entre representações de imagens	46
3.5	Processo de subtração das luzes e sombras	47
3.6	Exemplo de histograma e seleção do ponto de corte	47
3.7	Resultado da definição do ponto de corte	48
3.8	Resultado do filtro <i>Salt and Pepper</i>	48
3.9	Vetorização da interface	49
3.10	Imagem tratada	49
3.11	Geometria do Volume de Controle	50
3.12	Forças atuando sobre o Volume de Controle	51
3.13	Modelo adimensional	54
3.14	Identificação dos padrões de escoamento: <i>finger</i> ou <i>plug</i>	56
4.1	Padrão de formação do escoamento para $\mu^* = 4,750$ – Glicerina 77% deslocando óleo mineral a 25°Ce 336,52g/min	58
4.2	Padrão de formação do escoamento para $\mu^* = 5,332$ – Glicerina 80% deslocando óleo mineral a 25°Ce 455,83g/min	58
4.3	Padrão de formação do escoamento para $\mu^* = 1,687$ – Glicerina 86% deslocando óleo mineral a 25°Ce 396,69g/min	58
4.4	Padrão de formação do escoamento para $\mu^* = 0,211$ – Óleo mineral deslocando glicerina 77% a 25°Ce 40,90g/min	59
4.5	Padrão de formação do escoamento para $\mu^* = 0,188$ – Óleo mineral deslocando glicerina 80% a 25°Ce 40,90g/min	59

4.6	Identificação do efeito de entrada	60
4.7	Testes oscilatórios: <i>strain sweep</i> e <i>frequency sweep</i>	61
4.8	Teste <i>Step change</i>	62
4.9	Análise de tixotropia para $\dot{\gamma} = 0.01$ 1/s	62
4.10	Análise de tixotropia para $\dot{\gamma} = 0.1$ 1/s	63
4.11	Análise de tixotropia para $\dot{\gamma} = 1$ 1/s	63
4.12	Determinação do regime permanente para $\dot{\gamma} = 0.01$ 1/s	63
4.13	Determinação do regime permanente para $\dot{\gamma} = 0.1$ 1/s	64
4.14	Determinação do regime permanente para $\dot{\gamma} = 1$ 1/s	64
4.15	Reologia da Goma Xantana 0.86%	65
4.16	Reologia do óleo mineral	67
4.17	Rampa de temperatura do óleo mineral	67
4.18	Adimensionalização proposta	69
4.19	Adimensionalização dos casos investigados neste trabalho	70
4.20	Número de Reynolds em função da velocidade adimensional	70
4.21	Padrão de formação do escoamento para $\bar{u}^* = 0,050$ ($\eta^* = 15,094$) Goma xantana 0.86% deslocada por óleo mineral a 25°Ce 0,986g/min	71
4.22	Padrão de formação do escoamento para $\bar{u}^* = 0,416$ ($\eta^* = 2,208$) Goma xantana 0.86% deslocada por óleo mineral a 25°Ce 8,279g/min	71
4.23	Padrão de formação do escoamento para $\bar{u}^* = 0,780$ ($\eta^* = 1,252$) Goma xantana 0.86% deslocada por óleo mineral a 25°Ce 15,518g/min	72
4.24	Padrão de formação do escoamento para $\bar{u}^* = 1,133$ ($\eta^* = 0,893$) Goma xantana 0.86% deslocada por óleo mineral a 25°Ce 22,549g/min	72
4.25	Padrão de formação do escoamento para $\bar{u}^* = 1,469$ ($\eta^* = 0,706$) Goma xantana 0.86% deslocada por óleo mineral a 25°Ce 22,236g/min	72
4.26	Padrão de formação do escoamento para $\bar{u}^* = 1,588$ ($\eta^* = 0,659$) Goma xantana 0.86% deslocada por óleo mineral a 25°Ce 31,590g/min	73
4.27	Padrão de formação do escoamento para $\bar{u}^* = 1,783$ ($\eta^* = 0,593$) Goma xantana 0.86% deslocada por óleo mineral a 25°Ce 35,469g/min	73
4.28	Padrão de formação do escoamento para $\bar{u}^* = 2,069$ ($\eta^* = 0,519$) Goma xantana 0.86% deslocada por óleo mineral a 25°Ce 41,161g/min	73
4.29	Padrão de formação do escoamento para $\bar{u}^* = 2,266$ ($\eta^* = 0,478$) Goma xantana 0.86% deslocada por óleo mineral a 20°Ce 31,405g/min	74
4.30	Padrão de formação do escoamento para $\bar{u}^* = 2,324$ ($\eta^* = 0,467$) Goma xantana 0.86% deslocada por óleo mineral a 25°Ce 46,247g/min	74
4.31	Padrão de formação do escoamento para $\bar{u}^* = 2,547$ ($\eta^* = 0,430$) Goma xantana 0.86% deslocada por óleo mineral a 25°Ce 50,686g/min	74

- 4.32 Padrão de formação do escoamento para $\bar{u}^* = 2,737$ ($\eta^* = 0,403$) Goma xantana 0.86% deslocada por óleo mineral a 25°Ce 54,457g/min 75
- 4.33 Padrão de formação do escoamento para $\bar{u}^* = 3,017$ ($\eta^* = 0,369$) Goma xantana 0.86% deslocada por óleo mineral a 25°Ce 60,039g/min 75
- 4.34 Padrão de formação do escoamento para $\bar{u}^* = 3,181$ ($\eta^* = 0,352$) Goma xantana 0.86% deslocada por óleo mineral a 25°Ce 63,302g/min 75
- 4.35 Padrão de formação do escoamento para $\bar{u}^* = 3,263$ ($\eta^* = 0,344$) Goma xantana 0.86% deslocada por óleo mineral a 25°Ce 64,922g/min 76
- 4.36 Padrão de formação do escoamento para $\bar{u}^* = 3,314$ ($\eta^* = 0,339$) Goma xantana 0.86% deslocada por óleo mineral a 25°Ce 65,941g/min 76
- 4.37 Padrão de formação do escoamento para $\bar{u}^* = 3,389$ ($\eta^* = 0,332$) Goma xantana 0.86% deslocada por óleo mineral a 25°Ce 67,426g/min 76
- 4.38 Padrão de formação do escoamento para $\bar{u}^* = 3,406$ ($\eta^* = 0,331$) Goma xantana 0.86% deslocada por óleo mineral a 25°Ce 67,769g/min 77
- 4.39 Padrão de formação do escoamento para $\bar{u}^* = 4,703$ ($\eta^* = 0,247$) Goma xantana 0.86% deslocada por óleo mineral a 20°Ce 65,188g/min 77
- 4.40 Padrão de formação do escoamento para $\bar{u}^* = 5,083$ ($\eta^* = 0,230$) Goma xantana 0.86% deslocada por óleo mineral a 25°Ce 101,135g/min 77
- 4.41 Padrão de formação do escoamento para $\bar{u}^* = 6,670$ ($\eta^* = 0,180$) Goma xantana 0.86% deslocada por óleo mineral a 25°Ce 132,717g/min 78
- 4.42 Padrão de formação do escoamento para $\bar{u}^* = 6,944$ ($\eta^* = 0,174$) Goma xantana 0.86% deslocada por óleo mineral a 20°Ce 96,239g/min 78
- 4.43 Padrão de formação do escoamento para $\bar{u}^* = 8,151$ ($\eta^* = 0,150$) Goma xantana 0.86% deslocada por óleo mineral a 25°Ce 132,717g/min 78
- 4.44 Padrão de formação do escoamento para $\bar{u}^* = 8,987$ ($\eta^* = 0,138$) Goma xantana 0.86% deslocada por óleo mineral a 20°Ce 124,559g/min 79
- 4.45 Padrão de formação do escoamento para $\bar{u}^* = 9,524$ ($\eta^* = 0,131$) Goma xantana 0.86% deslocada por óleo mineral a 25°Ce 189,503g/min 79
- 4.46 Padrão de formação do escoamento para $\bar{u}^* = 10,791$ ($\eta^* = 0,117$) Goma xantana 0.86% deslocada por óleo mineral a 25°Ce 214,705g/min 79
- 4.47 Padrão de formação do escoamento para $\bar{u}^* = 10,833$ ($\eta^* = 0,116$) Goma xantana 0.86% deslocada por óleo mineral a 20°Ce 150,145g/min 80

- 4.48 Padrão de formação do escoamento para $\bar{u}^* = 11,951$ ($\eta^* = 0,106$) Goma xantana 0.86% deslocada por óleo mineral a 25°Ce 237,781g/min 80
- 4.49 Padrão de formação do escoamento para $\bar{u}^* = 12,482$ ($\eta^* = 0,102$) Goma xantana 0.86% deslocada por óleo mineral a 20°Ce 173,000g/min 80
- 4.50 Padrão de formação do escoamento para $\bar{u}^* = 13,003$ ($\eta^* = 0,099$) Goma xantana 0.86% deslocada por óleo mineral a 25°Ce 258,731g/min 81
- 4.51 Padrão de formação do escoamento para $\bar{u}^* = 13,934$ ($\eta^* = 0,093$) Goma xantana 0.86% deslocada por óleo mineral a 20°Ce 193,123g/min 81
- 4.52 Padrão de formação do escoamento para $\bar{u}^* = 13,949$ ($\eta^* = 0,093$) Goma xantana 0.86% deslocada por óleo mineral a 25°Ce 277,553g/min 81
- 4.53 Padrão de formação do escoamento para $\bar{u}^* = 14,789$ ($\eta^* = 0,088$) Goma xantana 0.86% deslocada por óleo mineral a 25°Ce 294,249g/min 82
- 4.54 Padrão de formação do escoamento para $\bar{u}^* = 15,189$ ($\eta^* = 0,086$) Goma xantana 0.86% deslocada por óleo mineral a 20°Ce 210,513g/min 82
- 4.55 Padrão de formação do escoamento para $\bar{u}^* = 16,146$ ($\eta^* = 0,081$) Goma xantana 0.86% deslocada por óleo mineral a 25°Ce 321,261g/min 82
- 4.56 Padrão de formação do escoamento para $\bar{u}^* = 16,247$ ($\eta^* = 0,081$) Goma xantana 0.86% deslocada por óleo mineral a 20°Ce 225,171g/min 83
- 4.57 Padrão de formação do escoamento para $\bar{u}^* = 17,076$ ($\eta^* = 0,077$) Goma xantana 0.86% deslocada por óleo mineral a 25°Ce 339,767g/min 83
- 4.58 Padrão de formação do escoamento para $\bar{u}^* = 17,107$ ($\eta^* = 0,077$) Goma xantana 0.86% deslocada por óleo mineral a 20°Ce 237,097g/min 83
- 4.59 Padrão de formação do escoamento para $\bar{u}^* = 17,579$ ($\eta^* = 0,075$) Goma xantana 0.86% deslocada por óleo mineral a 25°Ce 349,766g/min 84
- 4.60 Padrão de formação do escoamento para $\bar{u}^* = 17,654$ ($\eta^* = 0,075$) Goma xantana 0.86% deslocada por óleo mineral a 25°Ce 351,258g/min 84
- 4.61 Padrão de formação do escoamento para $\bar{u}^* = 17,770$ ($\eta^* = 0,074$) Goma xantana 0.86% deslocada por óleo mineral a 20°Ce 246,291g/min 84
- 4.62 Padrão de formação do escoamento para $\bar{u}^* = 18,506$ ($\eta^* = 0,072$) Goma xantana 0.86% deslocada por óleo mineral a 20°Ce 256,481g/min 85
- 4.63 Padrão de formação do escoamento para $\bar{u}^* = 42,094$ ($\eta^* = 0,034$) Goma xantana 0.86% deslocada por óleo mineral a 20°Ce 583,400g/min 85

4.64	Eficiência de deslocamento em função da velocidade adimensional	86
4.65	Identificação dos padrões de escoamento	87
4.66	Variação do ângulo do padrão de escoamento em função da velocidade adimensional	88
4.67	Variação do ângulo do padrão de escoamento em função do tempo de escoamento para $\bar{u}^* = 13,949$	88
B.1	Reologia de diferentes concentrações de goma xantana	101
B.2	Organismos microbianos	103
C.1	Primeiro projeto de construção de uma célula de Hele-Shaw	105
C.2	Primeira bancada experimental desenvolvida	105
C.3	Óleo deslocando Carbopol	105
C.4	Segundo projeto de construção de uma célula de Hele-Shaw.	106
C.5	Água deslocando Carbopol 0.10% nas respectivas vazões em [g/min]: 2, 48, 13, 15, 23, 81 e 50, 48	106
C.6	Terceira versão da bancada experimental	107
C.7	Terceiro modelo desenvolvido de uma célula de Hele-Shaw	108
C.8	Mistura dos fluidos	108
C.9	Bancada experimental modificada	109
D.1	Calibração com óleo mineral da bomba Cole-Parmer modelo KH 07553-80 com mangueira L/S 14 a 25°C	110
D.2	Calibração com óleo mineral da bomba Cole-Parmer modelo KH 07553-80 com mangueira L/S 18 a 25°C	111
D.3	Calibração com óleo mineral da bomba Cole-Parmer modelo KH 07553-80 com mangueira L/S 18 a 20°C	111
D.4	Calibração com óleo mineral da bomba Bomba Netzsch modelo Nemo NM015BY02S12B a 20°C	112

Lista de tabelas

2.1	Dimensões características de uma célula de Hele-Shaw	35
2.2	Parâmetros da câmera fotográfica	39
3.1	Resumo da adimensionalização	56
4.1	Características dos fluidos utilizados para validação da bancada experimental	57
4.2	Características da Goma Xantana	65
4.3	Características do óleo mineral	66
4.4	Parâmetros característicos e adimensionais constantes	68

Make everything as simple as possible, but not simpler.

Albert Einstein