

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

Ciências e Engenharia de Petróleo

**GERAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO REOLÓGICA DE EMULSÕES DE ÁGUA EM
ÓLEO PESADO PARA APLICAÇÕES EM PROJETOS DE SEPARADORES
GRAVITACIONAIS**

Campinas

10-2004

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS**

Geração e Caracterização Reológica de Emulsões de Água em Óleo Pesado para Aplicações em Projeto de Separadores Gravitacionais

**Autor: Rosivânia da Paixão Silva
Orientador: Antonio Carlos Bannwart**

10/2004

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

Geração e Caracterização Reológica de Emulsões de Água em Óleo Pesado para Aplicações em Projeto de Separadores Gravitacionais

Autor: **Rosivânia da Paixão Silva**

Orientador: **Antonio Carlos Bannwart**

Curso: Ciências e Engenharia de Petróleo

Dissertação de mestrado apresentada à Subcomissão de Pós-Graduação Interdisciplinar de Ciências e Engenharia de Petróleo (FEM e IG), como requisito para a obtenção do título de Mestre em Ciências e Engenharia de Petróleo.

Campinas, 2004
SP - Brasil

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Geração e Caracterização Reológica de Emulsões de Água em Óleo Pesado para Aplicações em Projeto de Separadores Gravitacionais

Autor: **Rosivânia da Paixão Silva**

Orientador: **Antonio Carlos Bannwart**

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Antonio Carlos Bannwart, Presidente
UNICAMP

Prof. Dr. Geraldo Afonso Spinelli Martins Ribeiro
CENPES/PETROBRAS

Prof. Dr. Paulo Roberto Ribeiro
UNCAMP

Campinas, 08 de outubro de 2004

UNIDADE	BC
Nº CHAMADA	UNICAMP
	Si 38g
V	E
TOMBO BC/	63063
PROC.	6.P.00086-05
C	☐
D	☒
PREÇO	11,00
DATA	14/04/05
Nº CPD	

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

Si38g

Silva, Rosivânia da Paixão

Geração e caracterização reológica de emulsões de água em óleo pesado para aplicações em projeto de separadores gravitacionais / Rosivânia da Paixão Silva. --Campinas, SP: [s.n.], 2004.

Orientador: Antonio Carlos Bannwart.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica e Instituto de Geociências.

1. Petróleo - Engenharia. 2. Indústria petrolífera. 3. Misturas de emulsão asfáltica. 4. Escoamento multifásico. I. Bannwart, Antonio Carlos. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. III. Instituto de Geociências. IV. Título.

Dedicatória:

Dedico este trabalho inteiramente a meus pais, Vieira e Rivanda, por eles serem mais do que pais, meus melhores amigos.

Agradecimentos

Aos meus pais por todo o apoio moral e financeiro e pelo importante incentivo nessa difícil etapa, além do carinho, da educação e do amor dispensado ao longo da minha vida.

Ao meu irmão Ronald pela participação crucial da resolução de dúvidas geradas ao longo do mestrado, além de exercer muito bem o papel de conselheiro e amigo.

A minha irmã Ronice por ser meu guia fora de casa, por me dar dicas importantes da vida e do estudo e por ser uma super amiga.

A minha irmã gêmea Rosiany pelo companheirismo e pelo apoio moral e técnico essenciais para o término dessa etapa, além de ser uma amigona.

Ao meu noivo e melhor amigo Adeilton pelo incentivo e confiança a mim dispensado.

Ao Professor Antonio Carlos Bannwart pela orientação e incentivo essenciais para a realização deste trabalho.

Aos amigos Fátima, Gerson e Fabiana que me acolheram em sua família e amenizaram a minha estadia nesta cidade.

A todos os meus amigos de mestrado, principalmente Carolina, Jansen, Victor, Fernando e Rafael pelo companheirismo e amizade durante este período.

A minhas amigas e companheiras de moradia Mirnis e Débora por tudo que passamos juntas. E também as amigas Clarissa, Estela, Evilene e Helane por me ajudarem a terminar o curso com empenho e animação.

Aos professores Paulo Ribeiro, Eugênio Rosa do DE, Margarida do IMECC e ao Carlos Henrique do CENPES pelas sugestões e contribuições oferecidas durante a execução deste trabalho.

Aos técnicos, funcionários e estagiários do DEP: Alice, Leandro, Daniel, Giselle, Carina, Dêlcio, Igor, em especial o Pompeo pela orientação, grande ajuda laboratorial e sua amizade.

Aos técnicos do DEMA Sérgio e Claudinete, e ao doutorando da Engenharia Química Ronaldo pelas dicas e suporte, além da amizade.

Aos professores, funcionários e estagiários do departamento de Engenharia de Petróleo e do CEPETRO, pela dedicação e auxílio prestado.

Ao suporte financeiro CEPETRO/UNICAMP e CAPES.

Ao departamento de Engenharia de Petróleo (DEP/FEM/UNICAMP) pela infraestrutura laboratorial e computacional disponibilizada para o trabalho.

A glória da amizade não é a mão estendida, nem o sorriso carinhoso, nem mesmo a delícia da companhia. É a inspiração espiritual que vem quando você descobre que alguém acredita e confia em você.

Ralph Waldo Emerson

Resumo

SILVA, Rosivânia da Paixão. *Geração e Caracterização Reológica de Emulsões de Água em Óleo Pesado para Aplicação em Projeto de Separadores Gravitacionais*. Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2004. 107 p. Dissertação (Mestrado).

O processamento primário dos fluidos na produção do petróleo consiste na separação entre o óleo, gás, água e as impurezas em suspensão, no condicionamento dos hidrocarbonetos para que possam ser transferidos para as refinarias, e no tratamento da água para reutilização ou descarte apropriado. Com a crescente importância de campos de óleos pesados, cuja densidade é mais próxima da água e a viscosidade é da ordem de centenas de vezes a da água, a produção deste óleo e o processamento primário dos fluidos produzidos com as tecnologias usuais tornam-se pouco atraente e muitas vezes inviável. Este trabalho investiga o comportamento da dispersão de água em óleo pesado que pode se transformar em emulsão. Portanto, o estudo sobre o conceito e a classificação das emulsões de água em óleo e de óleo em água e a revisão das principais técnicas para sua geração e separação, visam definir estratégias para a separação eficaz desses fluidos. A partir disso, investiga-se os critérios de projeto de vasos separadores gravitacionais trifásicos, tais como o tempo de retenção, tamanho e velocidade terminal das partículas, enfatizando-se os aspectos físicos da separação. Utilizou-se o software *Mathematica*[®] para a modelagem das equações que governam o dimensionamento de vasos separadores horizontais, permitindo-se observar a influência de diversas variáveis nas dimensões do vaso separador.

Palavras Chave

- Óleo pesado, emulsão de água em óleo, separador trifásico, tempo de retenção, projeto.

Abstract

SILVA, Rosivânia da Paixão. *Creation and Rheological Characterization of Emulsions of Water in Heavy Oil Applied to the Design of Gravitational Separators*. Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2004. 107 p. Dissertação (Mestrado).

The primary processing of the produced fluids from an oil field consists in the separation of oil, gas, water and solids suspensions, in the conditioning of the hydrocarbons for transporting to the refinery, and in the water treatment for reuse or proper disposal. For heavy oils, whose densities are almost the same as water and viscosities about two hundred times higher than water, the production and primary processing with the usual technologies is not attractive and many times unfeasible. This work investigates the behavior of the water dispersion in a heavy oil, that can become an emulsion. The scope of the study of water-in-oil and oil-in-water emulsions and the review of the principal techniques for its generation, leads to strategies to efficiently separate these liquids. Considering the presence of a free gas phase, design criteria for three-phase separator, such as retention time, size and terminal velocity of the particles, emphasizing the physical aspects of separation, are investigated. *Mathematica*® software was used for solving the equations that rule the design of horizontal separators vases, allowing observation of the influence of several parameters on the separator dimensions.

Key Words

-Heavy oil, water-in-oil emulsion, three-phase separator, retention time, design

Índice

Lista de Figuras	xiii
Lista de Tabelas	xvi
Nomenclatura	xvii
1. Introdução	1
2. Revisão Bibliográfica	5
2.1 Emulsão	5
2.2 Reologia das Emulsões	9
2.3 Separação de Emulsões	21
3. Programa Experimental	24
3.1 Arranjo Experimental	24
3.2 Materiais Utilizados	26
3.3 Aparelhos Utilizados	27
3.4 Procedimento Experimental	33
3.5 Descrição do Procedimento	34
4. Resultados e Discussões do Programa Experimental	36
4.1 Geração de Emulsão	36
4.2 Curvas Reológicas	36
4.3 Textura da Emulsão	41
4.4 Tamanho de Partículas	43
4.5 Comparação entre os modelos de viscosidades de emulsões com medidas	51

5. Aplicação ao Projeto de Separadores Trifásicos de Óleo Pesado	55
5.1 Definições dos Principais Parâmetros	57
5.2 Procedimento Adotado	60
5.3 Resultados e Discussões da Aplicação ao Projeto de Separadores Trifásicos de Óleo Pesado	67
6. Conclusões e Sugestões	78
6.1 Conclusões	78
6.2 Sugestões	80
Referências Bibliográficas	81
Anexos	
1. Dados Experimentais Coletados pelo Reômetro	85
2. Dados Experimentais das Viscosidades das Emulsões	105
3. Dados Experimentais dos Diâmetros de Partículas	106
4. Dados Experimentais de Temperatura das Emulsões	107
5. Erro referente à constante k para o cálculo do diâmetro de partícula	109
6. Projeto de Separadores Trifásicos para Óleos Pesados	110

Lista de Figuras

Figura 2.1 Fotografias de Emulsões. Arnold (1986)	7
Figura 2.2 Escoamento de um fluido entre duas placas paralelas	10
Figura 2.3 Curvas de fluxo de alguns tipos de fluidos: (A) Newtoniano; (B) binghamiano ou plástico ideal; (C) pseudoplástico; (D) dilatante; e (E) pseudoplástico com limite de escoamento. Machado (2002)	12
Figura 2.4 Curvas de fluxo de alguns tipos de Ostwald ou de Potência: I, II, III fluidos pseudoplásticos; <i>a, b, c</i> fluidos dilatantes. Machado (2002)	15
Figura 2.5 Curvas de escoamento para fluidos com comportamento dependente do tempo. Skelland (1967)	16
Figura 2.6 Esquema de um Vaso Separador Trifásico Horizontal Gravitacional	22
Figura 2.7 Foto de um Vaso Separador Trifásico Horizontal Gravitacional	23
Figura 3.1 Panorama das Amostras	25
Figura 3.2 Panorama das Medidas	26
Figura 3.3 Fotografia do Gerador de Emulsão IKA® ULTRA TURRAX T18	28
Figura 3.4 Função básica do gerador de emulsão	29
Figura 3.5 Fotografia do Reômetro Rotativo Haake	30
Figura 3.6 Fotografia dos Cilindros Coaxiais (Cilindro Externo e Cilindro Interno com haste)	31
Figura 3.7 Fotografia do Sistema de Aquecimento do Reômetro	31
Figura 3.8 Fotografia do Microscópio Neophot 32	32
Figura 3.9 Fluxograma Experimental	34
Figura 4.1 Curvas reológicas do óleo puro em função da temperatura	37
Figura 4.2 Curvas reológicas da emulsão E1 em função da temperatura	37
Figura 4.3 Curvas reológicas da emulsão E2 em função da temperatura	38
Figura 4.4 Curvas reológicas da emulsão E3 em função da temperatura	38

Figura 4.5	Curvas reológicas da emulsão E4 em função da temperatura	39
Figura 4.6	Curvas reológicas da emulsão E5 em função da temperatura	39
Figura 4.7	Gráficos das emulsões a diferentes concentrações	40
Figura 4.8	Fotografia de uma partícula de água emulsionada no óleo	41
Figura 4.9	Fotografia de uma bolha de ar emulsionada no óleo	42
Figura 4.10	Fotografia de uma partícula de água emulsionada no óleo	42
Figura 4.11	Fotografia de partículas de água emulsionada no óleo	43
Figura 4.12	Volume de controle para o balanço de energia no gerador de emulsão	47
Figura 4.13	Gráfico da viscosidade do óleo	49
Figura 4.14	Comparação entre os modelos de viscosidades de E1	52
Figura 4.15	Comparação entre os modelos de viscosidades de E2	52
Figura 4.16	Comparação entre os modelos de viscosidades de E3	53
Figura 4.17	Comparação entre os modelos de viscosidades de E4	53
Figura 4.18	Comparação entre os modelos de viscosidades de E5	54
Figura 5.1	Estruturação do projeto	56
Figura 5.2	Fluxograma de processos de execução	57
Figura 5.3	Forças que atuam numa partícula	58
Figura 5.4	Deslocamento de uma partícula na fase contínua	58
Figura 5.5	Deslocamento de uma partícula em uma única fase	59
Figura 5.6	Geometria adotada para o vaso separador	60
Figura 5.7	Tubulação anterior ao separador	61
Figura 5.8	Volume de Controle numa fase contínua	64
Figura 5.9	Curvas com diferentes diâmetros a 10% de água	67
Figura 5.10	Curvas com diferentes diâmetros a 30% de água	67
Figura 5.11	Curvas Comparativas	68
Figura 5.12	Curva da fração volumétrica com diâmetro de partícula de 500 μm	69
Figura 5.13	Curva da fração volumétrica com diâmetro de partícula de 1000 μm	69
Figura 5.14	Curva da fração volumétrica com diâmetro de partícula de 2000 μm	69
Figura 5.15	Curva da fração volumétrica com diâmetro de partícula de 5000 μm	70
Figura 5.16	Conjunto de curvas da fração volumétrica	70

Figura 5.17 Desenvolvimento da fração volumétrica da água emulsionada no óleo com viscosidade de 0,1 Pa.s	71
Figura 5.18 Desenvolvimento da fração volumétrica da água emulsionada no óleo com viscosidade de 1 Pa.s	71
Figura 5.19 Comparação entre o desenvolvimento da fração volumétrica da água emulsionada no óleo com viscosidades diferentes	72
Figura 5.20 Desenvolvimento da fração volumétrica da água emulsionada no óleo com densidade de 950kg/m ³	72
Figura 5.21 Desenvolvimento da fração volumétrica da água emulsionada no óleo com densidade de 900kg/m ³	73
Figura 5.22 Comparação entre o desenvolvimento da fração volumétrica da água emulsionada no óleo com densidades diferentes	73
Figura 5.23 Curvas com diferentes diâmetros a 10% de água	74
Figura 5.24 Curvas com diferentes diâmetros a 30% de água	74
Figura 5.25 Comparação entre as curvas com diferentes frações	75
Figura 5.26 Desenvolvimento do tempo de retenção no óleo com densidade de 950kg/m ³	76
Figura 5.27 Desenvolvimento do tempo de retenção no óleo com densidade de 900kg/m ³	76
Figura 5.28 Comparação entre o desenvolvimento do tempo de retenção no óleo com densidades diferentes	76

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 Métodos para identificar o tipo de emulsão. Machado (2002)	6
Tabela 2.2 Coeficientes e taxas de deformação provenientes do ajustamento da viscosidade das emulsões na equação (2.14). Ronningsen (1995)	20
Tabela 3.1 Composição química do óleo estudado	27
Tabela 4.1 Unidades e Dimensões das Variáveis	44
Tabela 4.2 Viscosidade da fase contínua a diferentes temperaturas	49
Tabela 4.3 Dados calculados para cada emulsão ao fim de 10 minutos de agitação	50
Tabela 4.4 Comparação entre viscosidades das emulsões coletados e modelos de viscosidades para emulsões	51

Nomenclatura

Letras Latinas

A	Área	m^2
C_D	Coeficiente de Arrasto	-
c_h	Custo do Cabeçote relativo ao Custo da Calandra	-
C_{total}	Custo Total	\$
D	Diâmetro do Separador	m
d	Densidade Relativa	-
$d_{máx}$	Diâmetro Máximo da Partícula	m
E	Energia	J
F	Força	N
F_A	Força de Atrito	$kg.m/s^2$
g	Aceleração da Gravidade	m/s^2
k	Constante de Ajuste	-
K	Índice de Consistência	$Pa.s^n$
K_0	Fator que considera a presença de surfactantes adsorvidos	-
K_d	Concentração da Fase Dispersa	-
L	Comprimento do Separador	m
n	Índice de Comportamento	-
P	Peso	N
q	Vazão Volumétrica	m^3/s
Re	Número de Reynolds	-
t_{ro}	Tempo de Retenção da Água no Óleo	s
v	Velocidade	m/s

Vol	Volume	m^3
V_t	Velocidade Terminal	m/s
y	Coordenada Espacial	m

Letras Gregas

α	Fração Volumétrica	-
Δ	Diferença	-
δ	Espessura	m
$\dot{\gamma}$	Taxa de Deformação	$1/\text{s}$
μ	Viscosidade Absoluta	Pa.s
μ_A	Viscosidade Aparente	Pa.s
μ_{Π}	Viscosidade Plástica	Pa.s
ν	Viscosidade Cinemática	m^2/s
ρ	Densidade	kg/m^3
σ	Tensão Interfacial	N/m
τ	Tensão de Cisalhamento	N/m
τ_{Λ}	Limite de Escoamento	N/m
τ_o	Limite de Escoamento real	N/m

Subscritos

[] _c	Fase Contínua
[] _d	Fase Dispersa
[] _{dm}	Valor Máximo Correspondente à Quantidade Máxima de Água Misturada ao Óleo
[] _e	Emulsão
[] _G	Fase Gás
[] _o	Fase Óleo
[] _{OG}	Partículas de Óleo na Fase Gás
[] _{ow}	Partículas de Óleo na Fase Água
[] _p	Parede

[] _{part}	Partícula
[] _s	Aço
[] _{total}	Total
[] _v	Vidro
[] _w	Fase Água
[] _{wo}	Partículas de Água na Fase Óleo

Siglas

A/O	Emulsão de Água em Óleo
ANP	Agência Nacional de Petróleo
API	American Petroleum Institute
BSW	Basic Settlings and Water
CENPES	Centro de Pesquisa da Petrobras
DEMA	Departamento de Engenharia de Materiais
DEP	Departamento de Engenharia de Petróleo
DOU	Diário Oficial da União
E1	Emulsão com 10%H ₂ O + 90%óleo
E2	Emulsão com 20%H ₂ O + 80%óleo
E3	Emulsão com 30%H ₂ O + 70%óleo
E4	Emulsão com 40%H ₂ O + 60%óleo
E5	Emulsão com 50%H ₂ O + 50%óleo
FAL	Óleo da Fazenda Alegre
FALP	Óleo Puro da Fazenda Alegre
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial
O/A	Emulsão de Óleo em Água
UN-SEAL	Unidade Sergipe - Alagoas

Capítulo 1

Introdução

Os chamados “óleos pesados” são óleos crus que têm um baixo grau API¹, sendo, portanto, de alta viscosidade e alta densidade. O grau API é um padrão para expressar o peso específico do óleo em relação à água: quanto mais elevada a densidade do óleo, mais baixo será o seu grau API. Geralmente, o considerado óleo pesado tem menos que 19°API, uma densidade maior que 0,90 g/mL e uma viscosidade maior que 20 cP (Salager, 1986). Óleos pesados são muito viscosos e têm uma elevada quantidade de carbono em relação ao hidrogênio. Também têm como característica índices elevados de resíduos de carbono, asfalteno, enxofre, nitrogênio, metais pesados, compostos aromáticos e parafina. O óleo pesado tem um ponto de ebulição bem maior que o óleo leve.

A incidência desses óleos pesados nos campos brasileiros e mundiais está aumentando e aponta para a necessidade de investimentos cada vez maiores na exploração das jazidas e no desenvolvimento de novas tecnologias. Porém, pelo fato do óleo pesado conter mais óleo combustível, asfalto e parafina que os óleos leves, sua importância no mercado não é tão valorizada. A extração do óleo pesado é mais cara e complexa que a do óleo leve, por isso, em muitos casos, o reservatório é considerado comercialmente inviável. Esse é o grande desafio no momento: garantir a viabilidade comercial desses reservatórios. Em condições *offshore*, quanto maior a lâmina de água maiores os riscos, os custos e as dificuldades da operação e, se o óleo

¹ ° API = $\frac{141,5}{d(60^\circ \text{F})} - 131,5$

encontrado for pesado, os desafios são ainda maiores e o valor do produto no mercado pode tornar sua produção não compensadora.

Um dos principais problemas para a exploração e produção de óleo pesado se relaciona com a imiscibilidade e a diferença de viscosidade entre os fluidos existentes na jazida. O fato de o óleo ser, de um modo geral, mais viscoso que a água, faz com que, no escoamento simultâneo destes dois fluidos, a água tenda a se deslocar numa velocidade mais elevada em relação ao óleo no seu trajeto em direção aos poços produtores. Como consequência, e a depender do contraste de viscosidade entre os dois fluidos, não é raro ocorrer a irrupção prematura e crescente da água nos poços produtores, comprometendo a vazão de óleo produzido e com ela a recuperação final. Em outras palavras, ficam comprometidas as reservas daquela jazida.

Surgiram, com base nessas observações, várias propostas que visam contornar esse problema, atenuando os seus efeitos sobre a recuperação. Uma das novas tecnologias em estudo pela Unicamp, em parceria com a Petrobrás, é o método de escoamento *core flow*, que tem como objetivo reduzir a resistência do óleo pesado no trajeto do fundo do poço até a plataforma (Bannwart *et alii*, 2002). O processo consiste em uma certa quantidade de água que é injetada no espaço anular junto às paredes do tubo de produção. Este espaço envolve o óleo, que se desloca ao longo do núcleo da tubulação, sem contato com as paredes e, conseqüentemente, sem fricção. Tal sistema reduz, drasticamente, a energia de bombeamento e a pressão interna nas linhas, aumentando a durabilidade das linhas e reduzindo os riscos de acidentes. Porém, como o óleo pesado tem densidade muito próxima à da água, a tendência de formação de emulsão é muito alta, dificultando a separação gravitacional entre estas duas fases. Além disso, a alta viscosidade do óleo dificulta a segregação de partículas de água nele dispersas.

O maior objetivo deste trabalho é estudar a separação trifásica de óleos pesados ainda na estação de produção. Faz-se, inicialmente, uma revisão da literatura sobre formação de emulsões do tipo água em óleo e óleo em água. Realizando experimentos com emulsões geradas em laboratório e comparando com modelos reológicos encontrados na literatura, determina-se o modelo que melhor representa a emulsão estudada. E, assim, pretende-se definir estratégias para a

separação eficaz desses fluidos e critérios de projeto de vasos separadores trifásicos, implementando-os em programa de computador, a fim de compará-los a partir dos dados de entrada e dos experimentos. Um aspecto essencial para a viabilidade de aplicação desse método em campo é a exigência da maioria das refinarias quanto à quantidade de água dispersa no óleo. O teor de água no óleo chamada de BSW deve estar abaixo de 1% em volume para ser aceito pela refinaria. Este requisito poderá requerer a utilização de equipamentos adicionais de tratamento.

Os vasos separados são fabricados nas formas vertical e horizontal. Quando o processo de separação se dá entre óleo pesado, água e gás, algumas dificuldades surgem durante o processo, como a formação de emulsão devido à pequena diferença entre as densidades da água e do óleo e ao fato de o óleo pesado possuir uma alta viscosidade, dificultando o processo de coalescência das partículas dispersas, ou seja, a aglomeração de pequenas partículas para que haja a decantação. Devido a sua maior aplicabilidade, estudamos os vasos separadores horizontais por apresentarem uma maior área superficial de interface, permitindo uma melhor separação líquido/gás e um maior tempo de residência para a quebra de emulsões.

Os tópicos do trabalho são descritos nos seguintes capítulos:

- Capítulo 2 – É a revisão bibliográfica sobre trabalhos realizados sobre emulsão, com suas classificações, reologia e comportamento, e sobre vasos separadores.
- Capítulo 3 – Descreve o estudo experimental realizado, descrevendo-se os aparatos utilizados e os experimentos realizados.
- Capítulo 4 – São apresentados os resultados e discussões em forma de gráficos e comparações com modelos teóricos.
- Capítulo 5 – É voltado à aplicação de um projeto de vasos separadores trifásicos para óleo pesado e seus resultados.

- Capítulo 6 – Apresentam-se as conclusões do trabalho e sugestões para sua continuidade.

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica

2.1 Emulsão

Emulsão é um sistema disperso, formado por dois líquidos imiscíveis, um agente emulsificante e agitação suficiente para transformar o sistema numa fase contínua. Nesse estudo de caso os dois líquidos imiscíveis são o óleo pesado e a água, o agente emulsificante é um dos componentes naturais do óleo, tais como parafinas e asfaltenos, e a agitação se dá por consequência do bombeamento, transporte e expansão dos fluidos produzidos. Pelo estudo feito por Salager (1986), quando o óleo é a fase dispersa, a emulsão é chamada de “Emulsão Óleo em Água” (O/A), e, quando o meio disperso é aquoso, a emulsão é chamada de “Emulsão de Água em Óleo” (A/O).

O tipo de emulsão é de fácil identificação, através de métodos físicos e físico-químicos, como mostra a Tabela 2.1 apresentada por Machado (2002).

A água é misturada ao petróleo de duas maneiras: na primeira, a água é proveniente da mesma jazida (água conata - água presente originalmente nos poros das rochas); e na segunda, a água é oriunda dos diferentes processos de recuperação de petróleo.

A presença de água no petróleo é indesejável por dois motivos: primeiro, porque é uma impureza sem valor e, segundo, porque a água contém sais inorgânicos, tais como: cloretos,

sulfatos, carbonatos de sódio, cálcio e magnésio, os quais provocam corrosões tanto nas instalações quanto no transporte para a refinaria.

Tabela 2.1 Métodos para identificar o tipo de emulsão. Machado (2002)

Método	Emulsão O/A	Emulsão A/O
Visual	Textura cremosa	Textura gordurosa
Corantes	Corantes inorgânicos tingem a emulsão	Corantes orgânicos tingem a emulsão
Condutividade	Condutividade elétrica bem mais elevada	Condutividade elétrica a depender do potencial elétrico aplicado
Miscibilidade	A emulsão se mistura facilmente com um líquido miscível no meio de dispersão (dispersante)	

Água e petróleo não estão, em geral, emulsionados em condições de reservatório, a formação da emulsão é consequência do bombeamento, transporte e expansão dos fluidos produzidos. Ao transferir esses fluidos para um tanque de separação gravitacional, observa-se a separação de três zonas: abaixo: água livre; acima: óleo; entre as anteriores: uma dispersão de água em óleo ou de óleo em água, com uma fina espessura e estável, essa razão água-óleo é chamada de BSW que deve estar abaixo de 1% para que seja aceito pela refinaria. A separação dessa dispersão se dá em dois tipos de operações: a dessalgação e a desidratação. A dessalgação é realizada em refinarias e consiste em lavar o óleo com água para remover grande parte do sal residual. A desidratação é realizada no campo e consiste em separar a água livre e reduzir a água dispersa, contida no óleo, a um valor aceitável.

A água livre se separa sem dificuldade, embora o tratamento de água para níveis adequados ao descarte seja ainda crítico, o problema é a água emulsionada na fase óleo. Tal separação envolve duas etapas: a primeira consiste em produzir uma aproximação das gotas de água para a formação da nata (coalescência) e/ou aglomeração (floculação); e, a segunda, consiste em promover a decantação das gotas. A colisão entre as gotículas na fase dispersa pode facilitar a floculação que, por sua vez, pode levar à coalescência e à formação de gotículas maiores, que por

diferença de densidade entre as fases resulta numa sedimentação e “quebra” completa da emulsão. Porém, há uma grande dificuldade para a aproximação das gotículas, por dois motivos: a existência de uma repulsão elétrica entre elas e a existência de uma barreira estérica, ou película interfacial, que impede as gotas de entrarem em contato. Então, para que haja a coalescência essas partículas devem colidir com uma força suficiente para superar estas barreiras.

A presença de emulsificantes naturais, ou agentes emulsificantes, no petróleo (asfaltenos, resinas, ácidos naftênicos, dentre outras espécies químicas), forma a película que dificulta o contato entre as gotículas, estabilizando a emulsão. Esses agentes emulsificantes apresentam-se na forma de partículas sólidas que tendem a ser insolúveis em ambas as fases líquidas, porém, algum elemento desse agente tem uma preferência para o óleo e outro elemento prefere a água. Esses emulsificantes, segundo Talhavini, formam um filme adsorvido em torno das gotículas dispersas, o que ajuda a impedir a floculação e a coalescência. Eles agem também diminuindo a tensão interfacial da partícula de água, causando formação de partículas menores.

Segundo Arnold *et al* (1986), o comportamento de uma emulsão A/O realiza-se como é demonstrado na Figura 2.1, que mostra fotografias de emulsões.

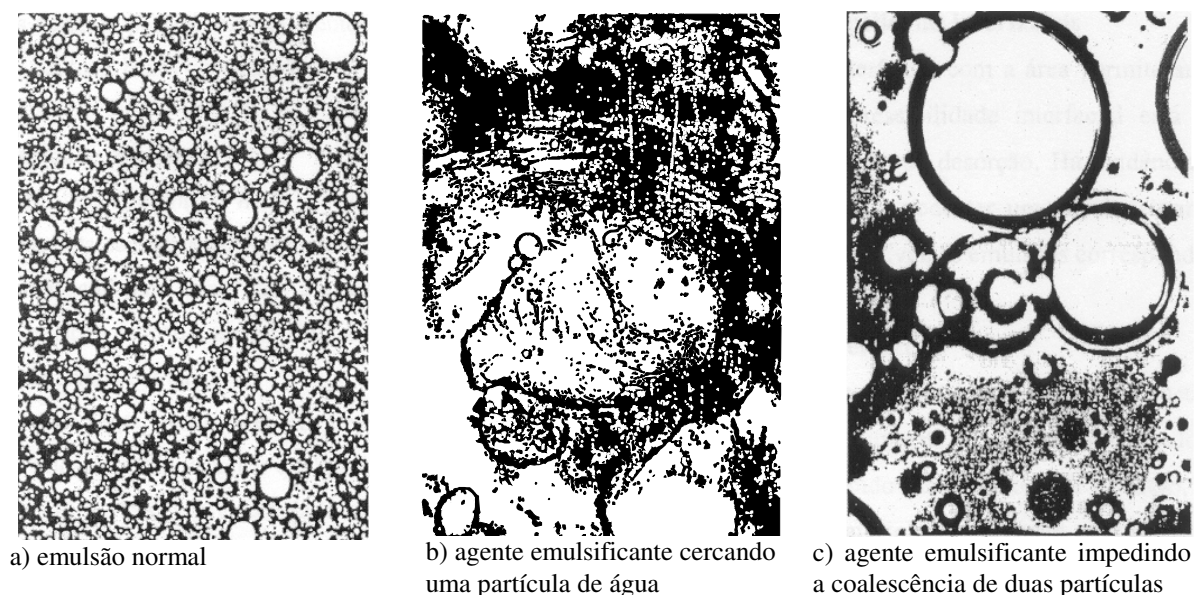


Figura 2.1 Fotografias de Emulsões. Arnold (1986)

A propriedade física mais importante de uma emulsão é a sua estabilidade. Entende-se por estabilidade de uma emulsão a capacidade da mesma em manter sua homogeneidade durante um certo período de tempo. Conforme Rosa (2003), as emulsões estabilizadas fisicamente são formadas sem adição de substâncias surfactantes, ou seja, aquelas em que a estabilidade é mantida por cargas elétricas inerentes ao sistema ou a outras forças. Algumas emulsões estáveis podem levar semanas ou meses para se separarem sem tratamento químico ou até mesmo nunca se separarem. Outras emulsões instáveis podem se separar em suas fases originais dentro de poucos minutos. A instabilidade da emulsão ou a razão pela qual as partículas dispersas coalescem e quebram a emulsão, segundo estudos realizados por Manning *et al* (1995), depende de alguns parâmetros, os principais são:

- **Tensão Interfacial** – quando as partículas colidem rompem a película formada pelo filme interfacial e há a coalescência, porém quando um agente emulsificante está adsorvido em torno da partícula impede a coalescência e diminui a tensão interfacial causando a formação de partículas menores estabilizando a emulsão;
- **Envelhecimento da emulsão** – à medida que o filme interfacial que reveste a partícula emulsionada envelhece a adsorção de agentes emulsionantes se completa e a resistência da película interfacial aumenta, até conseguir seu valor estável. Disto resulta que quanto mais velha uma emulsão, mais estável fica. Por isso, o tratamento para romper uma emulsão deve ser efetuado o mais cedo possível, inclusive de forma preventiva;
- **Viscosidade da Fase Contínua** – se esta viscosidade for muito alta o coeficiente de difusão e a frequência de colisão baixa, deixando a emulsão muito mais estável;
- **Temperatura** – a adição de calor reduz a viscosidade do óleo (fase contínua) que permite coalescência mais rápida, tende também a reduzir a resistência das películas interfaciais e a desestabilizá-las. Também tem o efeito de dissolver os cristais pequenos de parafina e asfaltenos neutralizando o efeito deles, assim como o potencial dos emulsificadores. Mas, adicionar calor na corrente resulta em um “encolhimento” do óleo, ou perda de volume,

pois os componentes mais leves são evaporados tornando o óleo mais pesado e diminuindo o seu valor comercial.

Alguns tipo de emulsão podem “inverter” para produzir a emulsão oposta, esse processo é denominado “inversão de fase” e a temperatura na qual ele ocorre é chamada “temperatura de inversão de fase”. As emulsões podem ser revertidas de óleo/água para água/óleo e vice-versa pela variação de algumas condições, tais como: temperatura do sistema, natureza do emulsificante ou sua adição, porcentagem de volume de fase dispersa, a fase em que o emulsificante está dissolvido e outros.

Em relação ao escoamento de uma emulsão, estudos desenvolvidos por Oliveira *et al* (1998), demonstram que o emprego da técnica de inversão de emulsão (A/O para O/A) tem um enorme potencial para melhorar o escoamento de óleos pesados, reduzindo a viscosidade do fluido a ser movimentado e reduzindo, também, a cinética do processo de deposição orgânica em linhas, no caso de óleo que tem uma predominância de parafina, além de facilitar a produção.

2.2 Reologia das Emulsões

Reologia é a ciência que estuda a *deformação* e o *escoamento* de materiais, em termos da elasticidade e da viscosidade do material. A *deformação* de um corpo é a alteração de sua forma e/ou de seu tamanho pela ação de um sistema de forças externas. E o *escoamento* de um corpo se caracteriza pela variação contínua do grau de deformação com o tempo. Assim, segundo Amui (1979), a reologia busca prever o sistema de forças que correspondem a uma dada deformação ou escoamento de um corpo, ou inversamente, prever a deformação ou escoamento resultante da aplicação de um sistema de forças ao corpo.

De acordo com Machado (2002), a deformação de um corpo é dividida em dois tipos:

- Deformação espontânea e reversível, conhecida como Elasticidade;
- Deformação irreversível, conhecida como Escoamento.

O corpo perfeitamente elástico recupera sua configuração indeformada quando cessa o campo de forças externas, portanto, a elasticidade corresponde à energia mecanicamente recuperável, enquanto que o escoamento tem a sua energia mecânica convertida em calor correspondente à viscosidade. A viscosidade é a resistência friccional ou resistência viscosa de um fluido contra qualquer mudança posicional do seu elemento volumétrico.

Para este trabalho foi estudada somente a deformação irreversível evidenciando a viscosidade do fluido e as correlações envolvidas por se tratar de um fluido, no caso, uma emulsão água/óleo.

Foi Isaac Newton quem introduziu o conceito de viscosidade, em 1687, dando uma atenção maior para líquidos, apresentando hipóteses associadas ao escoamento simples de fluidos entre duas placas paralelas, como mostra a Figura 2.2.

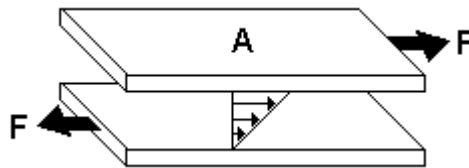


Figura 2.2 Escoamento de um fluido entre duas placas paralelas

Para Barnes *et alii* (1989), viscosidade é o sinônimo de atrito interno e é a medida da resistência ao escoamento. A força aplicada na placa por unidade de área (F/A) necessária para produzir uma deformação contínua do fluido é chamada de Tensão de Cisalhamento (τ), como na expressão mostrada na equação (2.1).

$$\tau = \frac{F}{A} \quad (2.1)$$

Onde A é a área do elemento fluido em contato com a placa, superfície exposta ao cisalhamento. A taxa de deformação ($\dot{\gamma}$) pode ser definida através de uma expressão matemática

que relacione a diferença entre as velocidades de duas partículas com a distância entre elas, mostrada na equação (2.2).

$$\dot{\gamma} = \frac{\Delta v}{\Delta y} \quad (2.2)$$

Onde Δv é a diferença de velocidade entre duas camadas de fluido adjacentes e Δy é a distância entre elas. A taxa de deformação é proporcional à tensão de cisalhamento aplicado ao fluido. Essa constante de proporcionalidade é chamada de Coeficiente de Viscosidade, ou Viscosidade Dinâmica (μ), conforme a expressão mostrada na equação (2.3).

$$\tau = \mu \left(\frac{\Delta v}{\Delta y} \right) = \mu \dot{\gamma} \quad (2.3)$$

De acordo com Fox *et al* (1998), os fluidos podem ser classificados, de modo geral, de acordo com a relação entre a tensão de cisalhamento e a taxa de deformação. Os fluidos nos quais a tensão de cisalhamento é diretamente proporcional à taxa de deformação são chamados *Newtonianos*. Os fluidos *não-Newtonianos* são todos os fluidos nos quais a tensão de cisalhamento não é diretamente proporcional à taxa de deformação. Ou seja, quando a viscosidade de um fluido depende apenas da pressão e da temperatura são ditos *fluidos Newtonianos*, caso contrário, se a viscosidade varia também com a taxa de deformação, então temos os *fluidos não-Newtonianos*. Os *fluidos não-Newtonianos* podem considerar ou não o efeito do tempo sobre a relação tensão de cisalhamento – taxa de deformação.

2.2.1 Comportamento Reológico dos Fluidos Independente do Tempo

O comportamento reológico dos líquidos considerados puramente viscosos, segundo Machado (2002), pode ser definido pela relação entre a tensão cisalhante e a taxa de deformação, podendo ser representado, graficamente, pela Curva de Fluxo, mostrado na Figura 2.3. Essas curvas envolvem uma determinada temperatura e pressão.

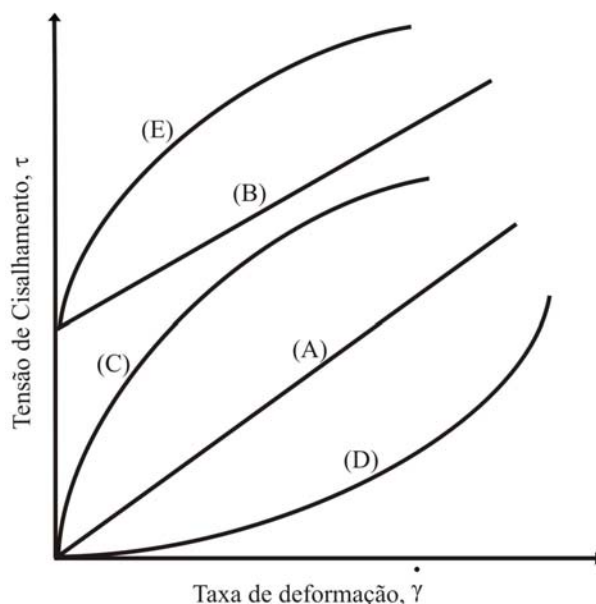


Figura 2.3 Curvas de fluxo de alguns tipos de fluidos: (A) Newtoniano; (B) binghamiano ou plástico ideal; (C) pseudoplástico; (D) dilatante; e (E) pseudoplástico com limite de escoamento.

Machado (2002)

Essas curvas podem ser definidas e classificadas para fluido Newtoniano e não-Newtoniano.

- **Fluido Newtoniano** – é o comportamento dos fluidos simples, cujo estudo foi conduzido por Newton que considerou a curva equivalente à equação (2.3), a qual seria uma linha reta com início na origem dos eixos. Portanto, considera-se fluido Newtoniano aquele que sua viscosidade só é influenciada pela temperatura e pressão. Uma única determinação experimental é

suficiente para definir o único parâmetro reológico do fluido Newtoniano. A sua viscosidade é única e absoluta, pois a razão entre a tensão cisalhante e a taxa de deformação é constante. São exemplos de fluidos Newtonianos o ar, a água, os óleos finos e seus derivados, o mel, a glicerina, etc.

- **Fluido Não-Newtoniano** – Considera-se fluido não-Newtoniano todo o fluido cuja relação entre tensão cisalhante e taxa de deformação não é constante e a viscosidade desses fluidos não é única, variando com a magnitude da taxa de deformação. Esses tipos de fluidos são regidos pela relação demonstrada na equação (2.4). Onde μ_a é chamada de viscosidade aparente, isto é, a viscosidade que o fluido teria se fosse Newtoniano, válida somente para uma determinada taxa de deformação. As emulsões concentradas de óleo em água e água em óleo, os petróleos e derivados muito viscosos são exemplos de fluidos não-Newtonianos.

$$\mu_a = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (2.4)$$

A classificação desses fluidos é dada conforme o aspecto da curva de fluxo e da correlação com alguma equação ou modelo matemático.

→ **Modelo de Bingham** – considerado como um plástico ideal requer a aplicação de uma tensão mínima para que haja uma deformação cisalhante. A expressão que define a viscosidade aparente do fluido de Bingham é dada pela equação (2.5). Onde μ_p , viscosidade plástica, e τ_L , limite de escoamento, são os parâmetros reológicos deste tipo de fluido.

$$\mu_a = \mu_p + \frac{\tau_L}{\dot{\gamma}} \quad (2.5)$$

→ **Modelo de Ostwald de Waale (Pseudoplástico/Dilatantes)** – conhecido também como fluido de potência, esse modelo tem como parâmetros reológicos o índice de consistência, K , e o índice de comportamento, n , definidos na expressão mostrada na equação (2.6) da viscosidade aparente. O índice de comportamento é o delineado entre os fluidos pseudoplásticos e dilatantes. Os fluidos para os quais n assume valores entre um e zero correspondem ao fluido pseudoplástico. Já os fluidos para os quais n assume valores maiores do que um, comportam-se como fluidos dilatantes. No caso de n igual a unidade tem-se o caso trivial do fluido Newtoniano. Já o valor do índice de consistência, K , indica o grau de resistência do fluido durante o escoamento. As emulsões e as soluções de polímeros são exemplos da indústria de petróleo de fluidos pseudoplástico, enquanto que algumas pastas de cimento e dispersões de polímeros ou resinas apresentam comportamento dilatante.

$$\mu_a = K \left(\dot{\gamma} \right)^{n-1} \quad (2.6)$$

Outra maneira de interpretar o comportamento do fluido pseudoplástico ou dilatante é de acordo com a taxa de deformação. Os fluidos pseudoplásticos apresentam um decréscimo acentuado de viscosidade quando a taxa de deformação é aumentada, como mostra a Figura 2.4, com as curvas I, II, III que correspondem ao caso em que n assume valores menores do que 1 e maiores que zero. Já os fluidos dilatantes, ao contrário dos fluidos pseudoplásticos, apresentam comportamento de viscosidade crescente com o acréscimo da taxa de deformação, correspondente às curvas a , b e c na Figura 2.4 no caso em que os valores de n são maiores do que um.

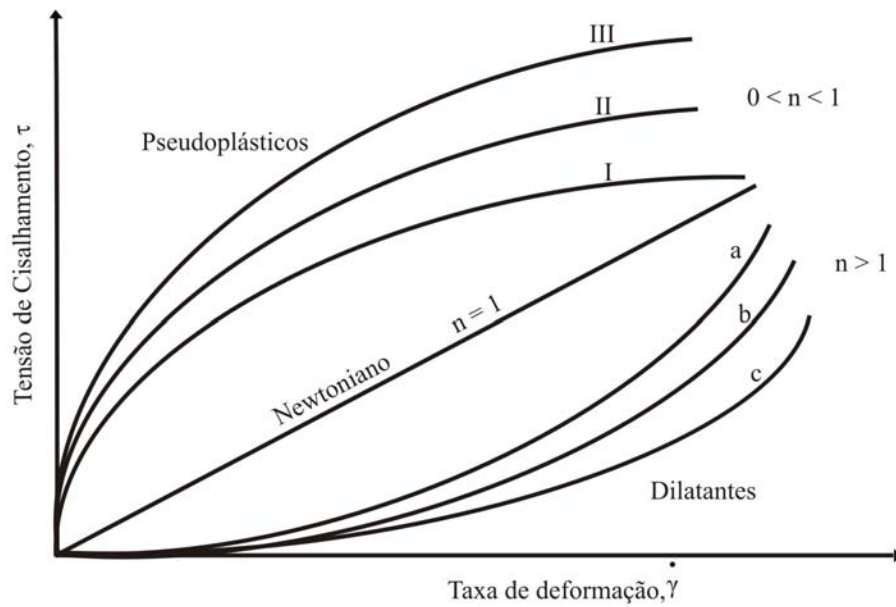


Figura 2.4 Curvas de fluxo de alguns tipos de Ostwald ou de Potência: I, II, III fluidos pseudoplásticos; a, b, c fluidos dilatantes. Machado (2002)

→ **Modelo de Herschell-Buckley** – Também conhecido como fluido de potência modificado é uma extensão do fluido de Ostwald, onde adiciona o parâmetro chamado limite de escoamento real, τ_0 , na expressão da tensão de cisalhamento quando a tensão de cisalhamento é maior que o limite de escoamento real, caso contrário a taxa de deformação é zero como é demonstrado na equação (2.7). O limite de escoamento real é a força externa aplicada a um determinado sistema, que ultrapassa a força da estrutura desse sistema, provocando uma mudança de posição irreversível num elemento de volume. Esse modelo engloba três parâmetros reológicos, portanto, é considerado mais completo comparado com os anteriores. Na indústria de petróleo, os fluidos de perfuração, graxas e pastas de cimento são exemplos típicos que exibem limite de escoamento real.

$$\begin{aligned} \mu_a &= K \left(\dot{\gamma} \right)^{n-1} + \frac{\tau_0}{\dot{\gamma}} & \text{para} & \quad \tau > \tau_0 \\ \gamma &= 0 & \text{para} & \quad \tau \leq \tau_0 \end{aligned} \quad (2.7)$$

2.2.2 Comportamento Reológico dos Fluidos Dependente do Tempo

Os fluidos não-Newtonianos que apresentam uma dependência da tensão de cisalhamento com o tempo para uma taxa de deformação constante como uma propriedade reológica, são subdivididos em tixotrópicos e reopéticos. Segundo Navarro (1997), a tixotropia é um fenômeno caracterizado pela diminuição da viscosidade aparente do líquido com o tempo de duração do cisalhamento. A reopetia, contrário à tixotropia, é caracterizada pelo aumento da viscosidade aparente do líquido com o tempo de duração do cisalhamento. Skelland (1967) mostrou os dois fenômenos num só gráfico variando tensão de cisalhamento e taxa de deformação, como mostra a Figura 2.5.

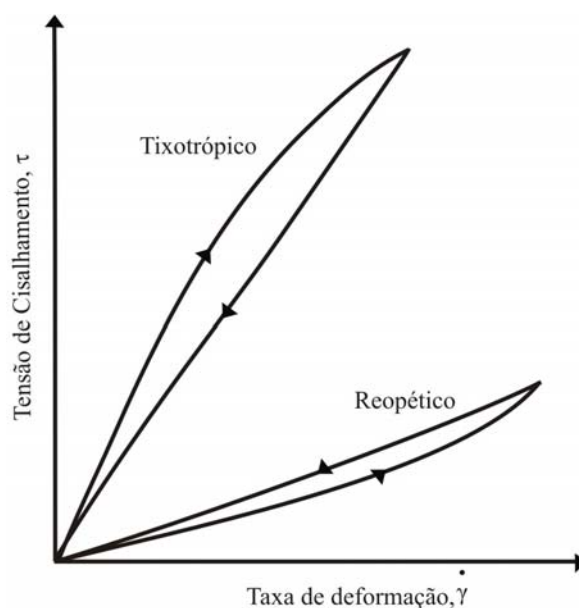


Figura 2.5 Curvas de escoamento para fluidos com comportamento dependente do tempo.

Skelland (1967)

Gonçalves *et al* (2003) utilizaram desses comportamentos para compreender a formação e reologia de emulsões, apresentando modelos reológicos alternativos aplicáveis a emulsões, bem como as metodologias de determinação de seus parâmetros em laboratório e revisões dos procedimentos de simulação do escoamento multifásico óleo-água-gás.

2.2.3 Modelos para o Cálculo das Viscosidades de Emulsões

Pesquisando a viscosidade, Johnsen *et al* (2003) comentam que a viscosidade da emulsão água-óleo pode tornar-se muito mais alta que a viscosidade do óleo puro devido à formação de uma emulsão estável. No trabalho também foram relacionados modelos e correlações para a viscosidade das emulsões governadas pelos seguintes parâmetros:

- Fração Volumétrica da fase dispersa, viscosidade da fase contínua e a temperatura;
- Taxa de Deformação, se o fluido tiver comportamento não-Newtoniano;
- Tamanho da partícula que, de acordo com Pal (1996), influencia na viscosidade da emulsão. Quanto menor o tamanho da partícula maior a viscosidade da emulsão;
- Viscosidade da fase dispersa, apesar de ter uma influência muito pequena na viscosidade total;
- Natureza e concentração dos agentes emulsificantes e a presença de partículas sólidas na fase líquida têm influência na estabilidade da emulsão.

Todas as expressões que permitem o cálculo da viscosidade das emulsões (μ_e) envolvem a viscosidade da fase contínua (μ_c), a fração volumétrica da fase dispersa (α_d), a viscosidade da fase dispersa (μ_d) e parâmetros de ajuste.

O modelo proposto por Pal *et al* (1985,1989), equação (2.8), é utilizado para o cálculo das viscosidades podendo ser de emulsões com o comportamento Newtoniano e não-Newtoniano.

$$\frac{\mu_e}{\mu_c} = \left(1 + \frac{\alpha_d / K_d}{1,1884 - \alpha_d / K_d} \right)^{2,5} \quad (2.8)$$

Onde K_d é a concentração da fase dispersa na qual a viscosidade relativa é igual a 100, usado como parâmetro de ajustamento. Esse modelo requer um valor experimental numa dada fração volumétrica da fase dispersa e é somente aplicado a condições correspondentes de tensão, temperatura, pressão, etc.

Taylor (1932) descreve a equação (2.9) válida para emulsões muito diluídas onde a interação entre as partículas dispersas não ocorre.

$$\frac{\mu_e}{\mu_c} = 1 + \frac{5\mu_d + 2\mu_c}{2(\mu_d + \mu_c)} \alpha_d \quad (2.9)$$

Partindo da equação de Taylor, Pal (2000) chegou a uma expressão da viscosidade relativa da emulsão aproximando as partículas dispersas como esféricas, como mostra a equação (2.10).

$$\frac{\mu_e}{\mu_c} \left[\frac{2\mu_e + 5\mu_d}{2\mu_c + 5\mu_d} \right]^{3/2} = (1 - K_0 \alpha_d)^{-5/2} \quad (2.10)$$

Onde K_0 é um fator que leva em conta a presença de surfactantes adsorvido na superfície das partículas. Se não há disponibilidade de dados experimentais é recomendado usar o valor de K_0 como sendo 1,35.

O modelo de Richardson (1933) propõe uma equação da viscosidade relativa em função da fração volumétrica da fase dispersa (α_d) por ter observado, experimentalmente, um aumento na viscosidade, como mostra a equação (2.11).

$$\frac{\mu_e}{\mu_c} = e^{k\alpha_d} \quad (2.11)$$

Onde k é uma constante. Essa dependência da viscosidade relativa com a fração volumétrica da fase dispersa foi estudada para numerosos sistemas de emulsão, inclusive emulsões água em óleo.

Brought *et al* (1938) incorporou o parâmetro A no modelo de Richardson, como mostra a equação (2.12), por ter uma aplicação em maior número de sistemas de emulsões, inclusive emulsão água em óleo.

$$\frac{\mu_e}{\mu_c} = Ae^{k\alpha_d} \quad (2.12)$$

Ronningsen (1995), observou que a equação linearezada de Brought *et al*, equação (2.13), descrevia a viscosidade das emulsões de água em óleo em muitos óleos do Mar do Norte.

$$\ln\left(\frac{\mu_e}{\mu_c}\right) = a + k\alpha_d \quad (2.13)$$

Onde a constante a e o fator k variam linearmente com a temperatura quando as emulsões do tipo A/O apresentam frações volumétricas da fase dispersa superior a 50%. Foram realizados experimentos em oito óleos diferentes, cobrindo uma larga faixa de tipos de óleo incluindo óleos relativamente pesados. As medidas de viscosidades foram conduzidas em diferentes taxas de deformação, temperaturas e frações de água, sendo, na maioria das vezes, um diâmetro de 5-20 μ m de partícula de água. Com os experimentos, a constante a e o fator k tiveram uma melhor aproximação expressados como funções lineares da temperatura, como mostra a equação (2.14), com a taxa de deformação dependentes dos coeficientes k_1 a k_4 .

$$a = k_1 + k_2 T$$

$$k = k_3 + k_4 T$$

$$\ln\left(\frac{\mu_e}{\mu_c}\right) = k_1 + k_2 T + k_3 \alpha_d + k_4 T \alpha_d \quad (2.14)$$

Partindo dessa equação, foram consideradas quatro diferentes derivações da taxa de deformação na faixa de 30-500 s⁻¹. Para cada taxa de deformação são dados os coeficientes na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 Coeficientes e taxas de deformação provenientes do ajustamento da viscosidade das emulsões na equação (2.14). Ronningsen (1995)

Coeficientes	Taxa de Deformação			
	30 s ⁻¹	100 s ⁻¹	300 s ⁻¹	500 s ⁻¹
k₁	0,0133400	0,0412000	-0,0127550	-0,066710
k₂	-0,0038010	-0,0026050	-0,0016900	-0,000775
k₃	0,0433800	0,0384100	0,0366250	0,034840
k₄	0,0002628	0,0002497	0,0001499	0,000050

Esta correlação inclui óleos relativamente pesados, óleos biodegradados (21° API), óleos cerosos e óleos levemente parafínicos (30-35° API), portanto pode ocorrer falhas significativas para fluidos muito diferentes dos usados para a correlação, como por exemplo, óleos muito pesados.

Mooney (1951) derivou a equação (2.15) para viscosidades de emulsões de esferas monodispersas (uma faixa estreita de diâmetro das esferas) e testou para dois tipos de dados experimentais. O mais satisfatório foi para frações volumétricas (α_d) até 0,5.

$$\ln\left(\frac{\mu_e}{\mu_c}\right) = \frac{2,5\alpha_d}{1 - \lambda\alpha_d} \quad (2.15)$$

Onde λ é uma constante, que para esse modelo, requer um valor experimental numa dada fração volumétrica da fase dispersa e é somente aplicado a condições correspondentes de tensão, temperatura, pressão, etc.

E, por fim, Ishii *et al* (1979) propuseram a equação (2.16) para a viscosidade relativa da emulsão baseada na dispersão máxima que a água pode atingir no óleo.

$$\frac{\mu_e}{\mu_c} = \left(1 - \frac{\alpha_d}{\alpha_{dm}}\right)^{-2,5\alpha_{dm}(\mu_d + 0,4\mu_c)/(\mu_d + \mu_c)} \quad (2.16)$$

Onde o índice m significa o valor máximo de α correspondente à quantidade máxima de água que pode ser misturada ao óleo. O α_{dm} pode assumir os valores 0,62 ou 1,0 para partículas sólidas ou para partículas fluidas (gás ou líquido) respectivamente como descrevem Bergles *et alii* (1981).

2.3 Separação de Emulsões

Economicamente, a separação das fases água/óleo/gás torna-se necessária, pois o gás tem um certo interesse para a indústria, enquanto que a água é uma impureza sem valor, além de conter sais inorgânicos que provocam corrosão tanto nas instalações quanto no transporte até a refinaria, também afeta no dimensionamento do sistema de bombeio e transferência. Para a separação destas fases são utilizados *Vasos Separadores* que, além de separar, direcionam cada fase, independentemente, para um devido fim.

Em relação à separação de gás, não há grandes dificuldades, pois o gás apresenta-se com uma densidade bem diferente das outras fases, portanto necessita de um pequeno tempo de retenção e o emprego de um dispositivo apropriado para a separação inicial, o que torna relativamente fácil a separação gás/líquido. Isso não acontece com a separação óleo/água, ou vice-versa, apesar de água e óleo serem dois líquidos imiscíveis, já que devido ao bombeamento, transporte e expansão dos fluidos produzidos água e óleo se misturam formando assim a emulsão, o que já foi visto.

2.3.1 Classificação de Vasos Separadores

Os vasos separadores podem ser bifásicos ou trifásicos, vertical ou horizontal, atuando em série ou em paralelo. No vaso separador bifásico ocorre a separação de gás/líquido ou de líquidos imiscíveis, enquanto que no trifásico ocorre a separação entre gás/óleo/água. Com relação à direção, os vasos separadores horizontais são normalmente mais eficientes por oferecerem maior número de estágios, maior tempo de retenção e maior área superficial de interface permitindo uma melhor separação entre as fases. Entretanto, têm como desvantagens o manuseio de sólidos produzidos e ocupação de um espaço muito grande. Descrevendo o funcionamento do vaso separador horizontal trifásico, de acordo com a Figura 2.6, vemos que o fluido entra no separador e golpeia (bate) o anteparo causando uma mudança brusca de velocidade e de direção de fluxo, permitindo ao gás desprender-se da fase líquida devido à inércia que esta fase possui.

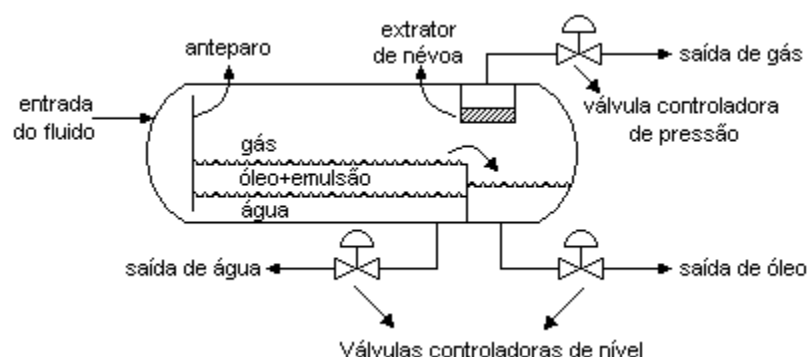


Figura 2.6 Esquema de um Vaso Separador Trifásico Horizontal Gravitacional

A seção coletora de líquido do vaso deve fornecer tempo suficiente para que o óleo e a emulsão formem uma camada. Enquanto a água livre se deposita no fundo, o transbordamento no segundo anteparo mantém o nível do óleo. Por fora do vaso separador há um indicador de nível o qual, dependendo da altura da interface óleo/água, envia um sinal à válvula controladora de nível de água permitindo que a quantia correta de água deixe o recipiente de forma que a interface óleo/água seja mantida na altura projetada. O nível do óleo, depois do segundo anteparo, também é controlado por uma válvula controladora de nível. Já o gás, flui horizontalmente e passa por um extrator de névoa, sendo controlado por uma válvula controladora de pressão para manter a pressão do vaso constante. Em relação ao nível da interface de gás/óleo, pode variar de 50% a

70% do diâmetro do vaso, dependendo da importância relativa de separação do líquido/gás, porém a configuração mais comum está no líquido a 50%.

O uso desse vaso separador por óleos leves é perfeitamente aceitável, no entanto, a eficiência cai drasticamente quando é utilizado para óleos pesados. A Figura 2.7 mostra um vaso separador para óleos leves, utilizado na estação de produção da UN-SEAL da Petrobrás.



Figura 2.7 Foto de um Vaso Separador Trifásico Horizontal Gravitacional

Capítulo 3

Programa Experimental

Neste capítulo são descritos as etapas experimentais, as técnicas e os procedimentos utilizados na execução dos ensaios. Esse estudo experimental foi realizado nas instalações do Laboratório de Reologia e Fluidos de Perfuração/DEP e do Laboratório de Microscopia Ótica/DEMA, ambos situados na Faculdade de Engenharia Mecânica da UNICAMP.

No campo utilizam-se tratamentos químico e térmico que influenciam no tamanho do vaso separador. Porém, nesse estudo, não foi utilizado nenhum desses tratamentos para que houvesse um melhor entendimento sobre o fenômeno.

3.1 Arranjo Experimental

O projeto em questão está baseado em dois panoramas: panorama das amostras e panorama das medidas. Esses panoramas ilustram, sucintamente, o quadro das amostras analisadas e das medidas realizadas no programa utilizado para este trabalho.

3.1.1 Panorama das Amostras

Para a realização do experimento são utilizadas cinco amostras denominadas E1, E2, E3, E4 e E5. São amostras de emulsões de água em óleo nas quais a diferença entre elas é a proporção de água e de óleo, como mostra a Figura 3.1.

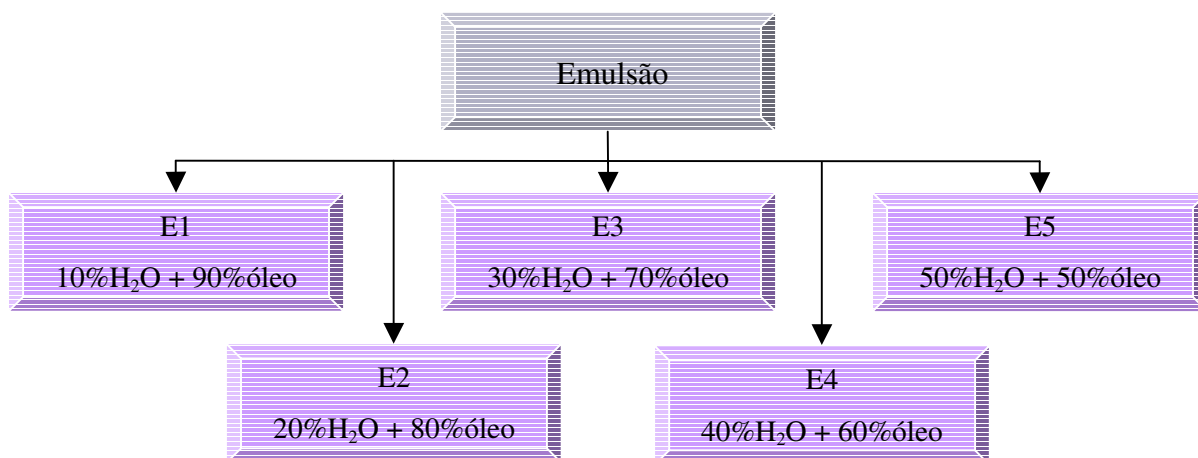


Figura 3.1 Panorama das Amostras

As proporções de óleo e água foram escolhidas de modo que se abrangesse toda a faixa de água que pode ser emulsionada em uma fase contínua de óleo.

3.1.2 Panorama das Medidas

O panorama das medidas mostra os tempos de agitação em que cada amostra é submetida para a geração de emulsão, de acordo com a Figura 3.2. Esse panorama mostra também as temperaturas às quais cada amostra em cada tempo de agitação foi submetida para a geração da curva reológica.

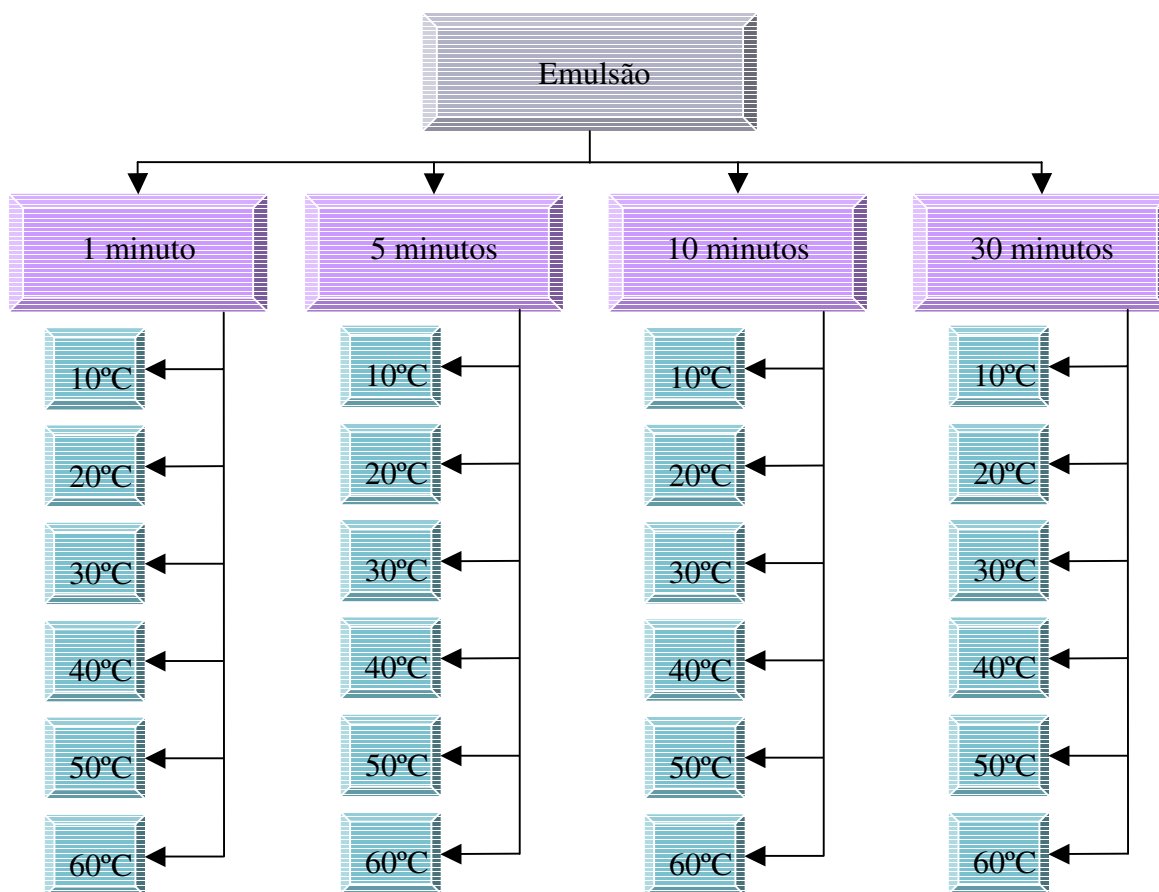


Figura 3.2 Panorama das Medidas

Os tempos de agitação e as temperaturas utilizadas foram escolhidos de modo que representassem uma emulsão real no campo de produção.

3.2 Materiais Utilizados

Os materiais utilizados são: a água e o óleo. A água adicionada à emulsão é uma água tratada normalmente. O óleo estudado é proveniente do Campo de Fazenda Alegre (FAL) com densidade de 0,966 à 20°C. A amostra foi fornecida pelo CENPES/PETROBRAS.

A composição química do óleo foi obtida através das análises de SARA e percentual de água pelo método Karl Fischer, feita pelo CENPES/PETROBRAS, apresentada na Tabela 3.1. De acordo com Thomas (2001), o óleo descrito nesta tabela pode ser classificado como aromático-asfáltico, uma vez que apresenta mais de 30 % de asfaltenos e resinas.

Tabela 3.1 Composição química do óleo estudado

SARA [% (p/p)]				% de Água (Karl Fischer)
Saturados	Aromáticos	Resina	Asfaltenos	
21 %	45 %	13 %	21 %	0,09%

3.3 Aparelhos Utilizados

Para a realização dos experimentos foram utilizados um gerador de emulsão, um reômetro rotativo e um microscópio óptico. Foi utilizado o manual de cada aparelho para sua descrição e sua representação esquematizada.

3.3.1 Gerador de Emulsão

Na geração de emulsão utiliza-se o aparelho IKA[®] ULTRA TURRAX T18 (Figura 3.3), aparelho de dispersão e emulsão de alta velocidade com a qual podem ser trabalhadas substâncias fluidas, localizado no laboratório de Reologia e Fluidos de Perfuração do Departamento de Engenharia de Petróleo da Faculdade de Engenharia Mecânica da UNICAMP. As emulsões geradas são submetidas ao gerador com velocidade constante de 16.000 rpm, essa velocidade foi escolhida por ser a velocidade média que o aparelho atinge.

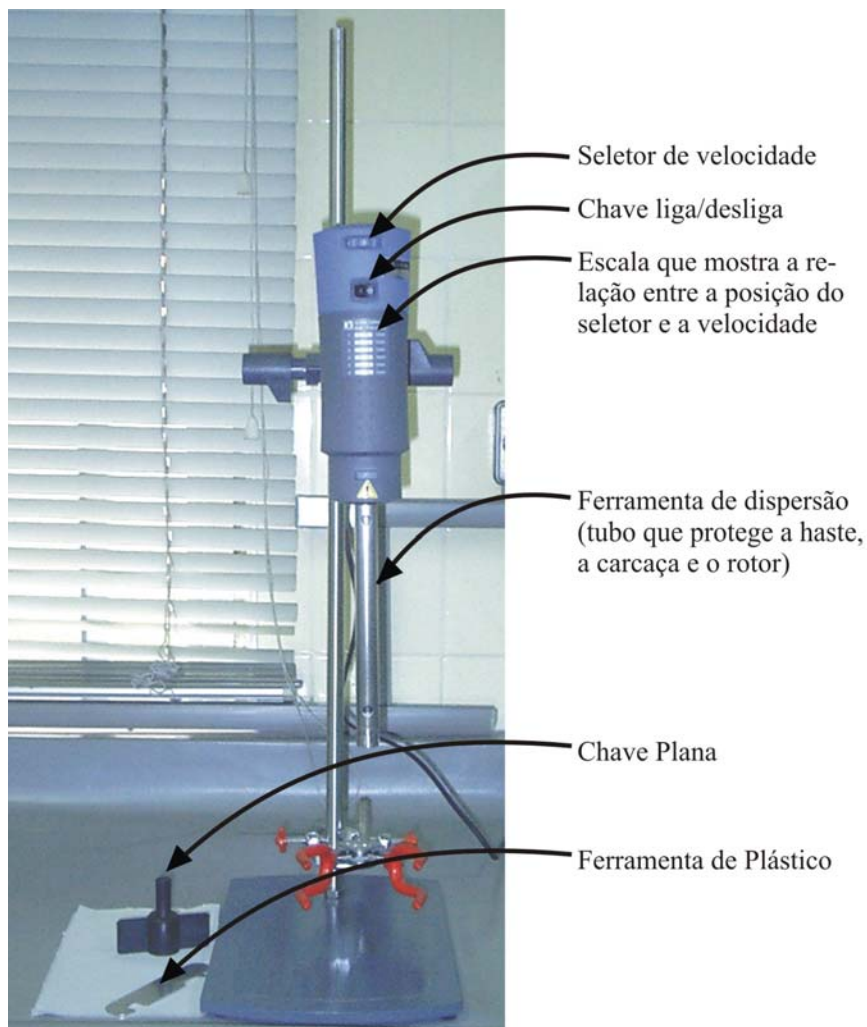


Figura 3.3 Fotografia do Gerador de Emulsão IKA® ULTRA TURRAX T18

Para a utilização desse aparelho é necessário que o recipiente (*Becker*) com a amostra esteja fixo com um braço de fixação (garra) para não deslizar e que a distância entre a *ferramenta de dispersão* e o fundo do recipiente não deve ser inferior a 10 mm. O volume da amostra deve cobrir o mínimo de 55 mm da *ferramenta de dispersão* o que é suficiente para o preenchimento dos apoios (onde fica o *rotor*). O motor é ligado com a *chave liga/desliga*. No *seletor de velocidade* é feita a regulagem contínua da velocidade a partir de 6.000 rpm. A *escala* mostra a relação entre a posição do seletor e a velocidade. A *ferramenta de dispersão* é constituída por um tubo, haste, carcaça, apoio de *Teflon* e rotor.

A função básica desse aparelho, como mostrado na Figura 3.4, é a aspiração no meio da amostra pelo *rotor* e empurrado lateralmente através das fendas da *carcaça*. A *carcaça* e as irradiações de líquido ao sair atuam como interruptores de corrente que praticamente evitam a rotação do líquido, fenômeno conhecido quando líquidos são agitados.

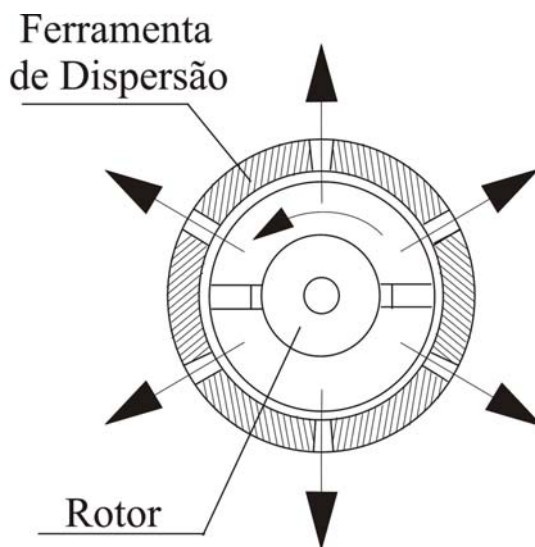


Figura 3.4 Função básica do gerador de emulsão

As ferramentas *chave plana* e *ferramenta de plástico* são utilizados na montagem/desmontagem da *ferramenta de dispersão* para o parafusamento/desparafusamento da *haste*, *carcaça*, *apoio de Teflon* e *rotor*.

3.3.2 Reômetro Rotativo

Para obter as curvas reológicas das emulsões geradas utiliza-se o Reômetro Rotativo Haake Modelo CV20 (Figura 3.5), que tem como função gerar curvas reológicas em temperaturas fixas e medir a viscosidade de cada emulsão, localizado no laboratório de Reologia e Fluidos de Perfuração do Departamento de Engenharia de Petróleo da Faculdade de Engenharia Mecânica da UNICAMP.

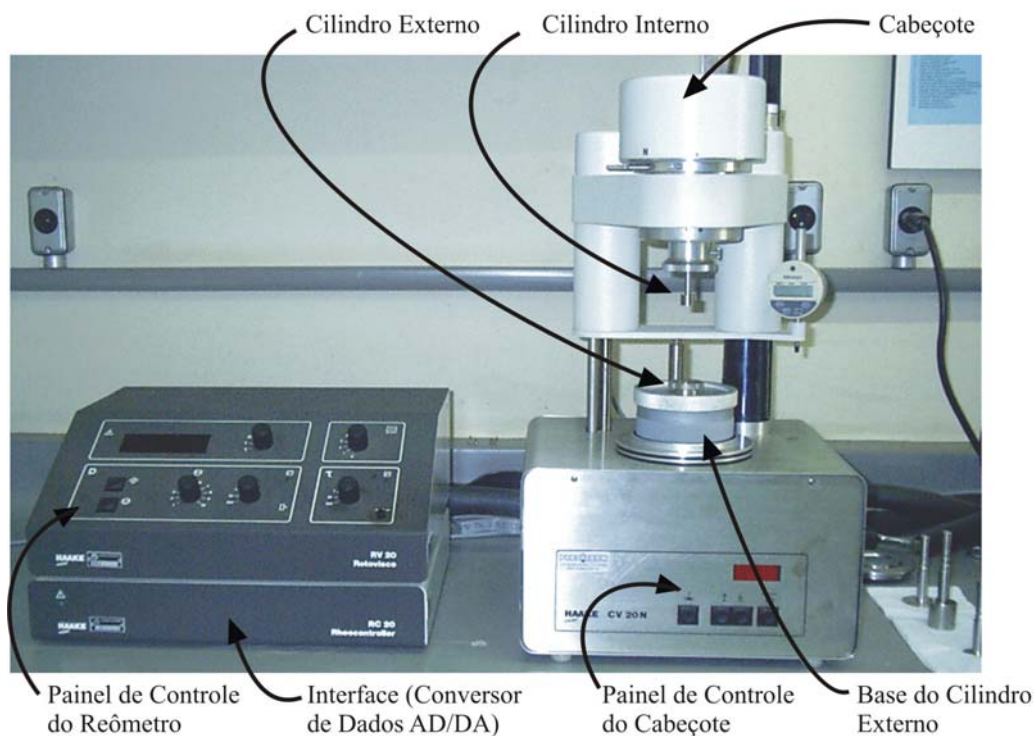


Figura 3.5 Fotografia do Reômetro Rotativo Haake

A amostra é adicionada no *cilindro externo* antes deste ser colocado na *base do cilindro externo*. No *painel de controle do cabeçote* aciona a descida do *cabeçote* até que o *cilindro interno* seja imerso na amostra. No *painel de controle do reômetro* dá-se a partida para o início da rotação dos cilindros. A aquisição de dados é feito por um computador adaptado com a *interface*, o qual converte os dados medidos analogicamente para digital.

Nesse reômetro utilizam-se sistemas de geometria de cilindros coaxiais, de placas paralelas e de cones e placas, podendo diferenciar as espessuras para medir diferentes viscosidades. Para a realização desta pesquisa utiliza-se a geometria de cilindros coaxiais com 15mm de diâmetro do *cilindro externo* (Figura 3.6). Esse modelo foi utilizado por abranger uma faixa de viscosidade coerente com a viscosidade da amostra analisada.



Figura 3.6 Fotografia dos Cilindros Coaxiais (Cilindro Externo e Cilindro Interno com haste)

O reômetro utiliza também um sistema de aquecimento para que haja controle de temperatura, como visto na Figura 3.7. Na cuba é colocada água para que sofra a ação da temperatura e condiciona a temperatura de todo o sistema do reômetro. O *controlador de temperatura e aquecedor*, como o próprio nome diz, controla a temperatura com um visor digital e adiciona calor e o *resfriador* também influencia por imersão de uma *serpentina*.

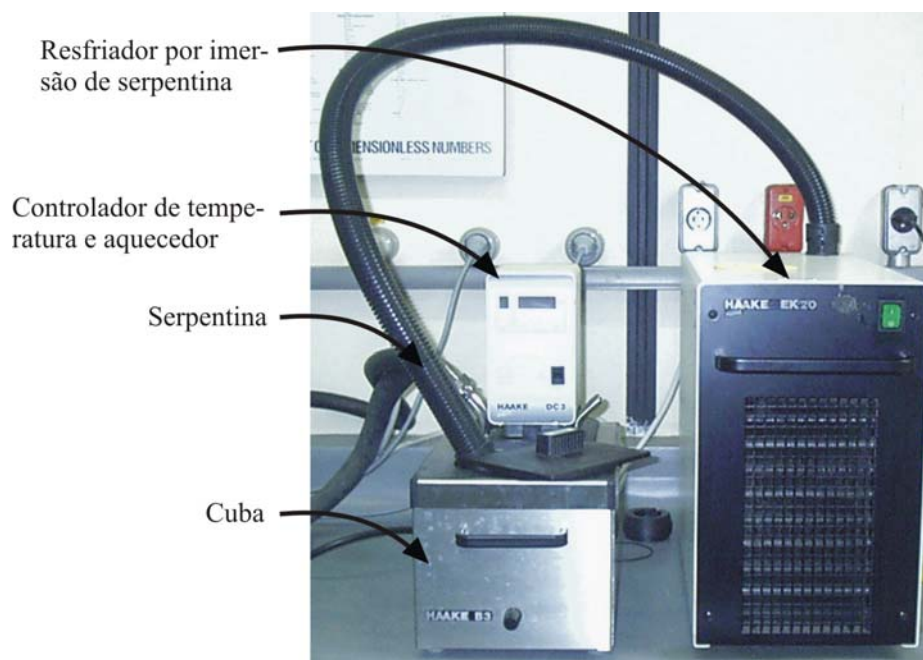


Figura 3.7 Fotografia do Sistema de Aquecimento do Reômetro

3.3.3 Microscópio Óptico

A microscopia é realizada com o objetivo de identificar partículas de água emulsionada no óleo. Para isso usa-se o Microscópio Neophot 32 (Figura 3.8), que tem como função obter uma imagem ampliada do material utilizado, localizado no Laboratório de Microscopia Óptica do Departamento de Materiais da Faculdade de Engenharia Mecânica da UNICAMP. Utiliza-se a menor ampliação conseguida pelo microscópio, que foi de 25 vezes, com a qual obtivemos uma escala de 486 μm .

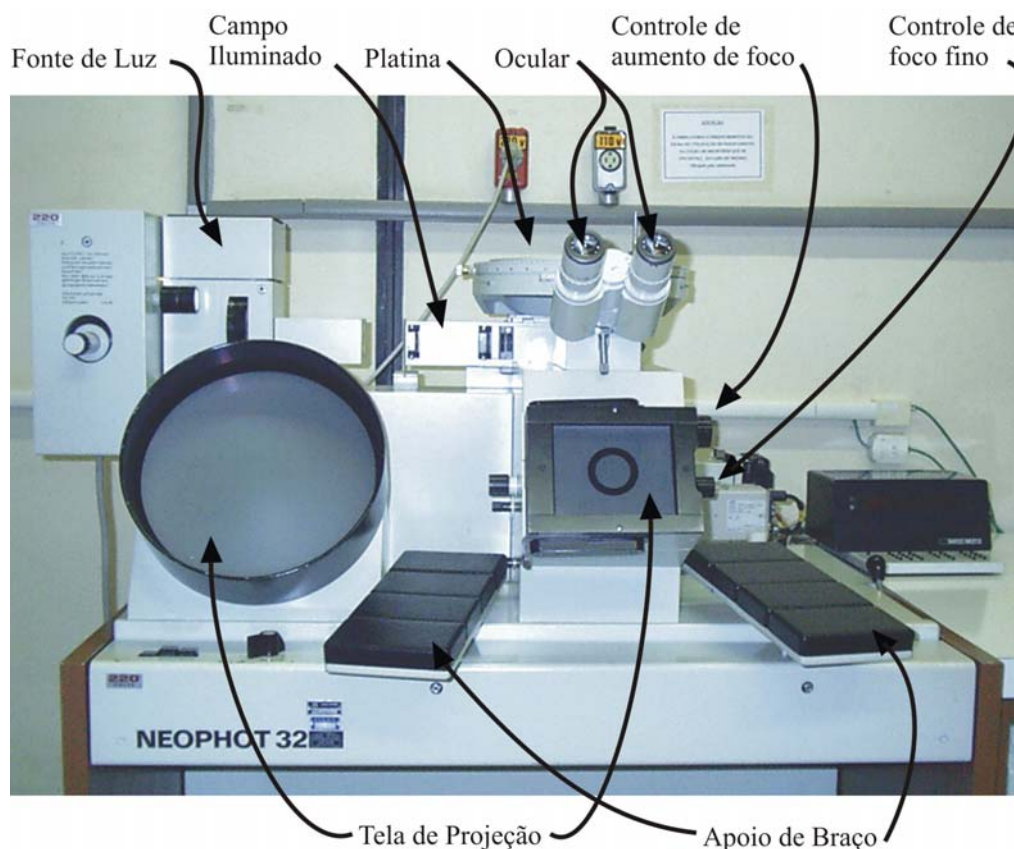


Figura 3.8 Fotografia do Microscópio Neophot 32

A amostra, espalhada numa lâmina e coberta por uma lamínula, é colocada na *platina*. A *fonte de luz* abrange as lâmpadas que iluminam o *campo iluminado* melhorando a visibilidade da amostra pelo *ocular*. Através do *controle de aumento de foco* e *controle de foco fino* há um aperfeiçoamento da imagem da amostra. A aquisição de imagem não mais se dá pela *tela de projeção* e sim pelo computador acoplado ao microscópio.

3.4 Procedimento Experimental

A realização do programa experimental envolve uma série de atividades:

- *a seleção de materiais* – onde houve a aquisição dos equipamentos e preparação do laboratório;
- *a definição da proporção dos materiais* – aplicação do panorama das amostras;
- *o preparo das misturas* – foram colocadas as amostras num *Becker*;
- *a geração de emulsão* – misturou com o agitador a amostra colocada no *Becker*;
- *a obtenção das curvas reológicas e viscosidades* – foi medida a viscosidade e feita as curvas reológicas de cada emulsão;
- *textura da emulsão* – foram tiradas fotografias das partículas de água da emulsão.

Para orientar o processo de elaboração do programa experimental, a Figura 3.9 apresenta um fluxograma que indica a seqüência das atividades a serem realizadas.

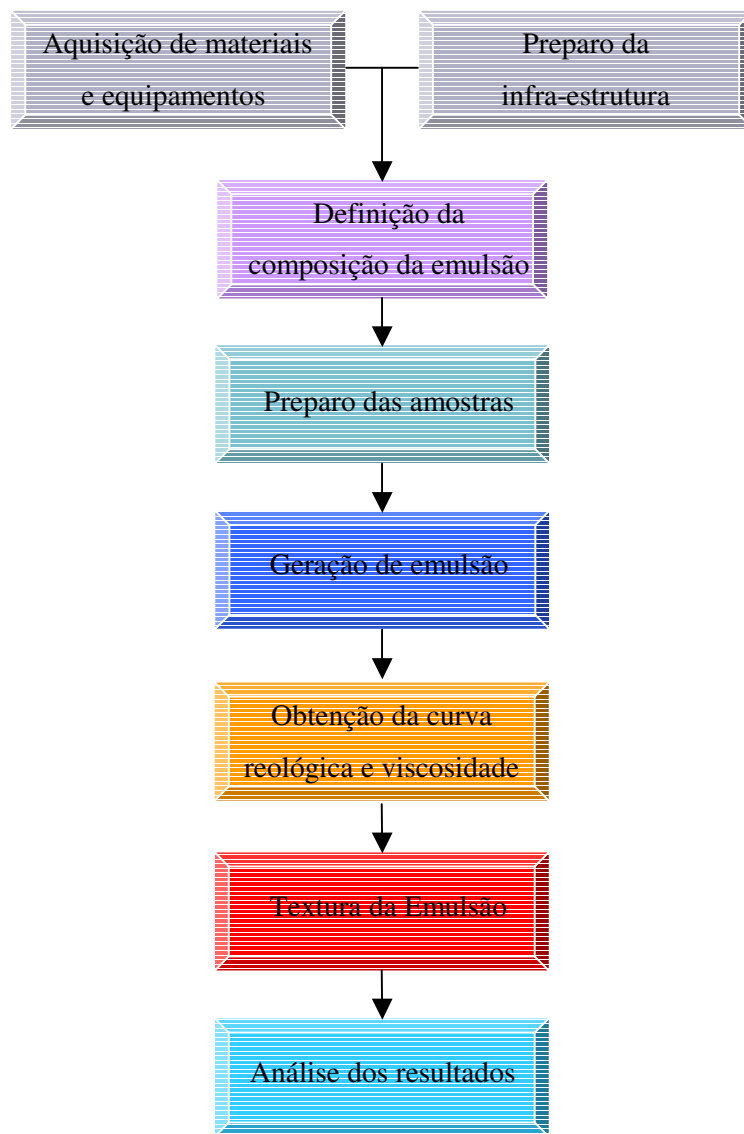


Figura 3.9 Fluxograma Experimental

3.5 Descrição do Procedimento

Foi criada uma metodologia para o procedimento do experimento no laboratório. Esta metodologia consta basicamente de pesagem, mistura e medida.

3.5.1 Quantificação de Volumes

Inicia-se o experimento quantificando os volumes de água e óleo obedecendo as proporções de 10%, 20%, 30%, 40% e 50% de água no volume total. A mistura se dá colocando-se, primeiramente, o volume de óleo no *Becker* e depois adicionando-se a água.

3.5.2 Geração das Emulsões

No gerador de emulsão é colocado o *Becker* que contem o óleo e a água quantificados. O acionamento do gerador de emulsão faz-se em quatro tempos distintos: 1, 5, 10 e 30 minutos, utilizando sua velocidade intermediária que é de 16 000 rpm.

3.5.3 Reologia das Emulsões

Logo após a geração da emulsão é adicionada uma pequena amostra da emulsão no cilindro externo dos cilindros coaxiais do reômetro. Em uma determinada temperatura, aciona-se o reômetro para obter a curva reológica da emulsão e a viscosidade. A cada temperatura fixada, limpa-se os cilindros e adiciona-se uma nova amostra da mesma emulsão. Após a obtenção das viscosidades e das curvas reológicas de uma certa proporção de emulsão em todas as temperaturas, faz-se o mesmo procedimento para as outras proporções.

3.5.4 Textura das Emulsões

Da emulsão restante no *Becker*, tira-se uma pequena amostra com a ajuda de um bastão de vidro e coloca-a sobre uma lâmina de vidro 26x76, espalhando-a com uma lamínula de vidro 24x24. E, por fim, a lâmina é levada ao microscópio, adquirindo assim fotos aumentadas até 25 vezes em toda a sua região. Para esse experimento foram analisadas amostras com 10% e 50% de água emulsionada no óleo a uma agitação de 10 e 30 minutos cada.

Capítulo 4

Resultados e Discussões do Programa Experimental

4.1 Geração de Emulsão

Nesta etapa observou-se que os tempos de 1 e 5 minutos de agitação não foram suficientes para a total mistura da amostra de 50%, pois constatou-se formação de bolsões de água. Nos tempos de 10 e 30 minutos todas as amostras obtiveram emulsão satisfatória.

4.2 Curvas Reológicas

Para cada amostra analisada, o reômetro gerou tabelas de dados contendo tensão de cisalhamento, taxa de deformação e viscosidade. Esses dados foram coletados a uma temperatura constante e num tempo de 4 minutos, resultando numa tabela com 39 pontos coletados para cada concentração a cada determinada temperatura. Essas tabelas estão descritas no Anexo 1.

Para análise do comportamento de cada emulsão de acordo com a temperatura foram gerados gráficos apresentados nas Figura 4.1 a Figura 4.6, sendo que cada figura se refere a uma emulsão com concentrações puro, 10%, 20%, 30%, 40% e 50% de água, respectivamente, variando em função da temperatura. Cada gráfico tem a taxa de deformação e a tensão de cisalhamento na abscissa e na ordenada, respectivamente.

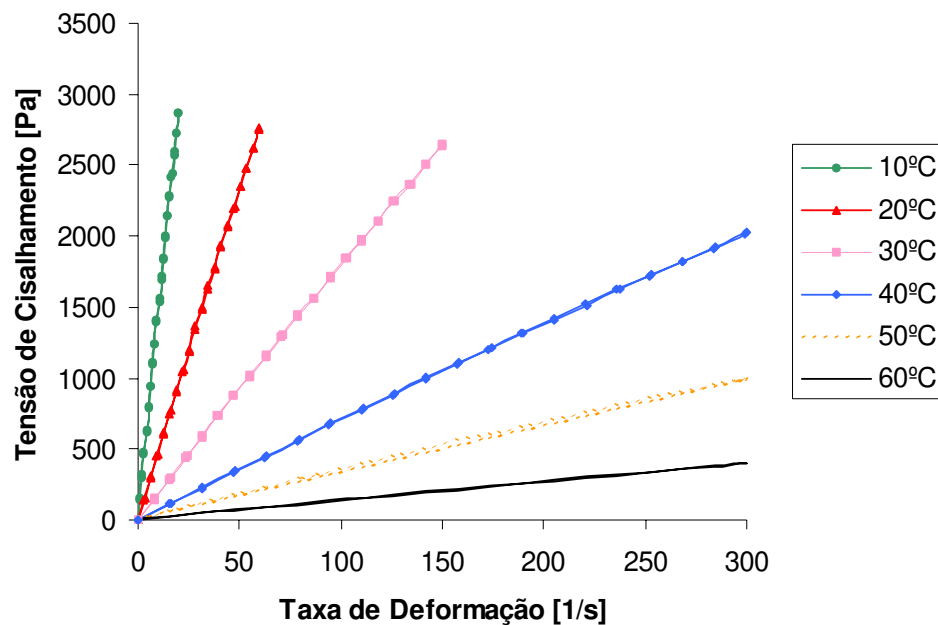


Figura 4.1 Curvas reológicas do óleo puro em função da temperatura

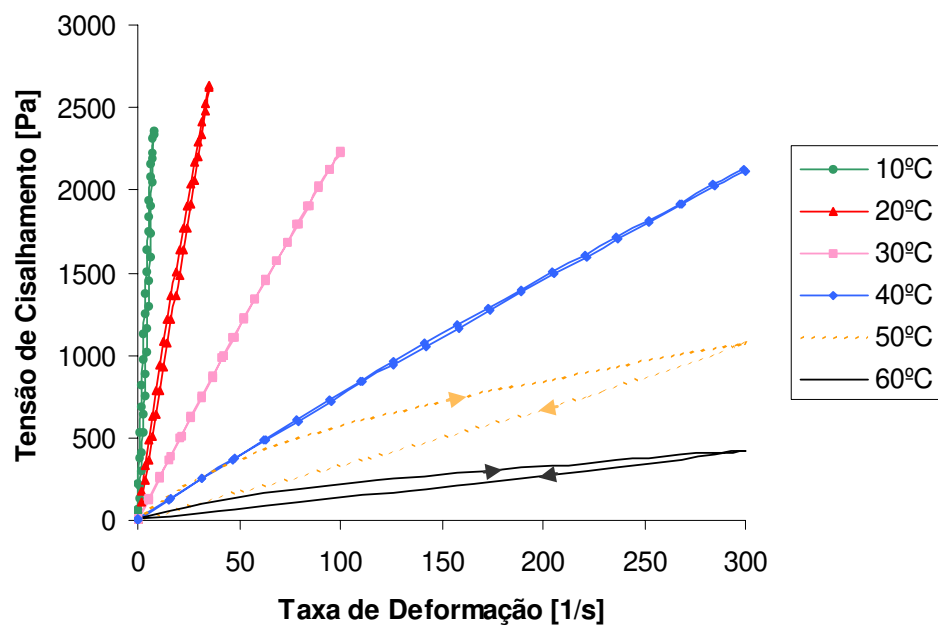


Figura 4.2 Curvas reológicas da emulsão E1 em função da temperatura

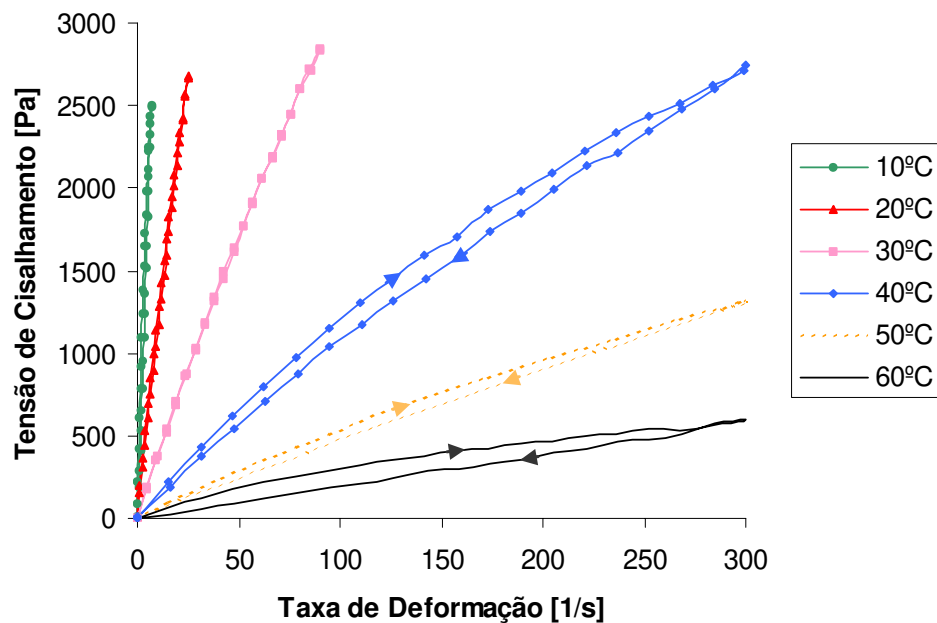


Figura 4.3 Curvas reológicas da emulsão E2 em função da temperatura

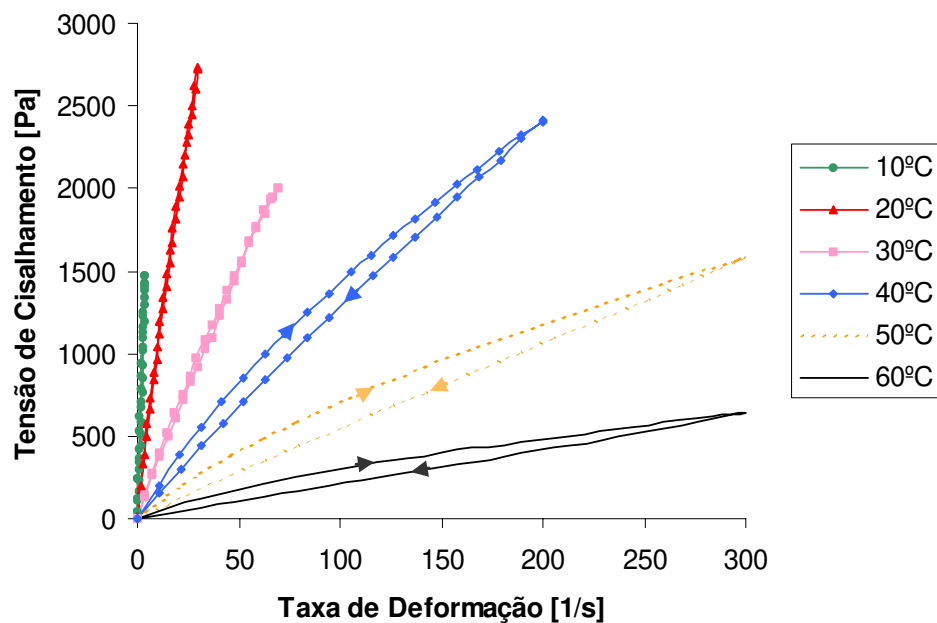


Figura 4.4 Curvas reológicas da emulsão E3 em função da temperatura

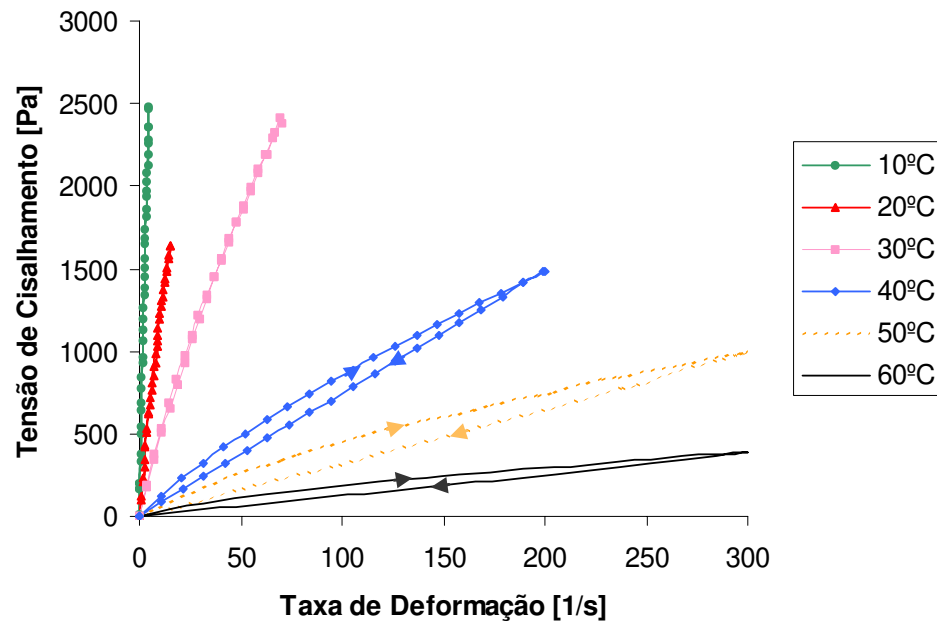


Figura 4.5 Curvas reológicas da emulsão E4 em função da temperatura

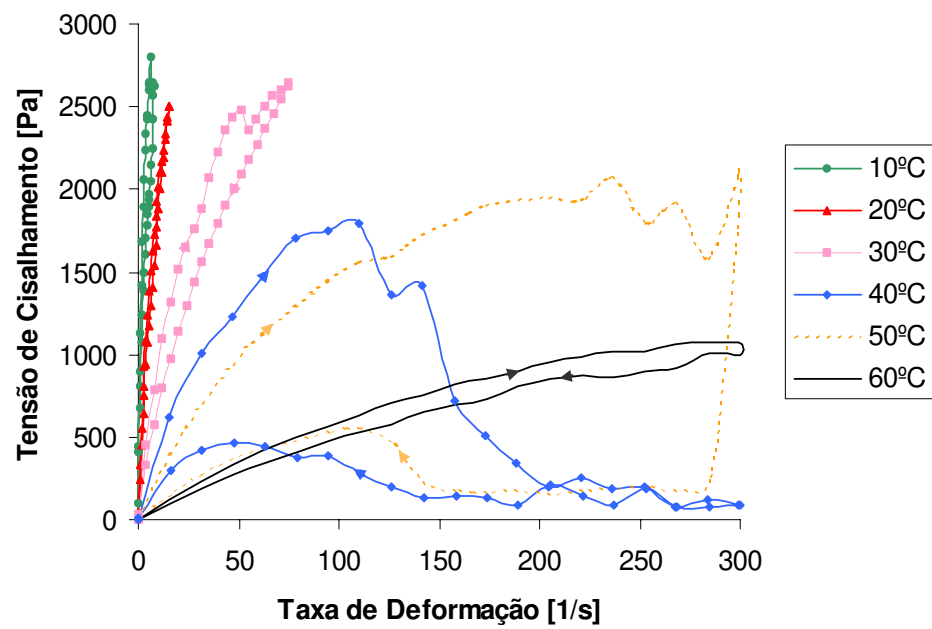


Figura 4.6 Curvas reológicas da emulsão E5 em função da temperatura

Outra análise do comportamento de cada emulsão de acordo com a concentração pode ser feita como apresentado na Figura 4.7. Foi gerada uma tabela de dados (apresentada no Anexo 2) contendo a viscosidade de emulsão de acordo com a temperatura. Esses dados foram coletados pelo reômetro usando o modelo de *Binghamiano* para a obtenção da viscosidade. O gráfico tem a temperatura e a viscosidade na abscissa e na ordenada, respectivamente.

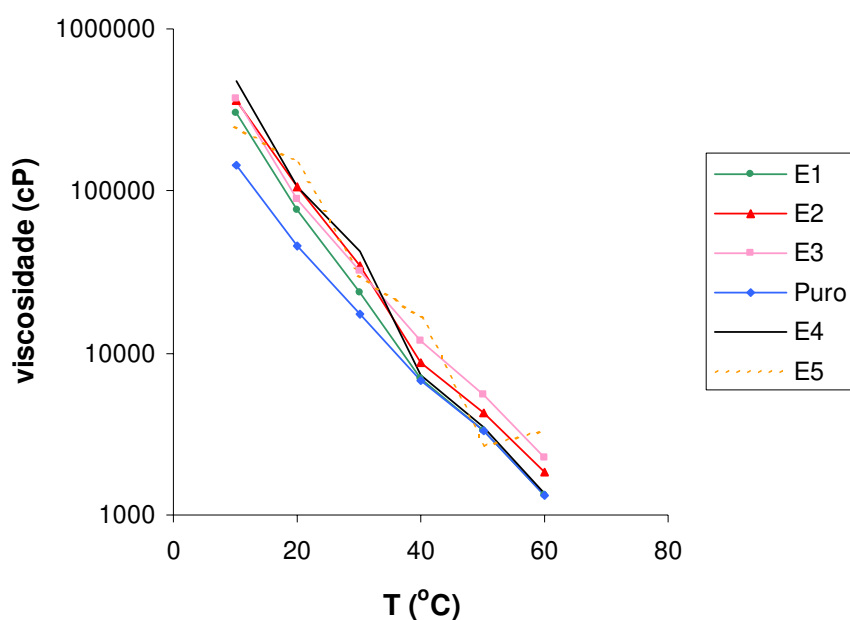


Figura 4.7 Gráficos das emulsões a diferentes concentrações

Pelos gráficos das Figura 4.1 a Figura 4.6 foi possível concluir que as emulsões comportam-se como fluido tixotrópico em temperaturas altas e como fluido Newtoniano a baixas temperaturas. Na Figura 4.7 observa-se que há descontinuidade das curvas, mostrando que houve mudança da estrutura da amostra, podendo ter ocorrido a separação das fases.

4.3 Textura da Emulsão

As amostras analisadas no microscópio foram E1 e E5 no tempo de agitação de 10 e 30 minutos para a formação da emulsão. Na amostra E1 não foi possível a visualização de partículas de água. Em relação a diferentes tempos de agitação, não houve influência para a obtenção dos resultados.

As fotografias aqui apresentadas demonstram dois tipos de resultados que mostram a diferença da bolha de ar com a partícula de água e a emulsão dentro de emulsão.

4.3.1 Diferença Entre a Partícula de Água e uma Bolha de Ar

A partícula de água emulsionada mostrou-se esférica, imóvel, e demonstrou uma grande quantidade de óleo emulsionado dentro dela, como mostra a Figura 4.8. Já uma bolha de gás não apresentou uma forma definida, movimentando-se em direção ao contorno da lamínula, além de não conter nenhuma indicação de mistura com o óleo, como mostra a Figura 4.9.

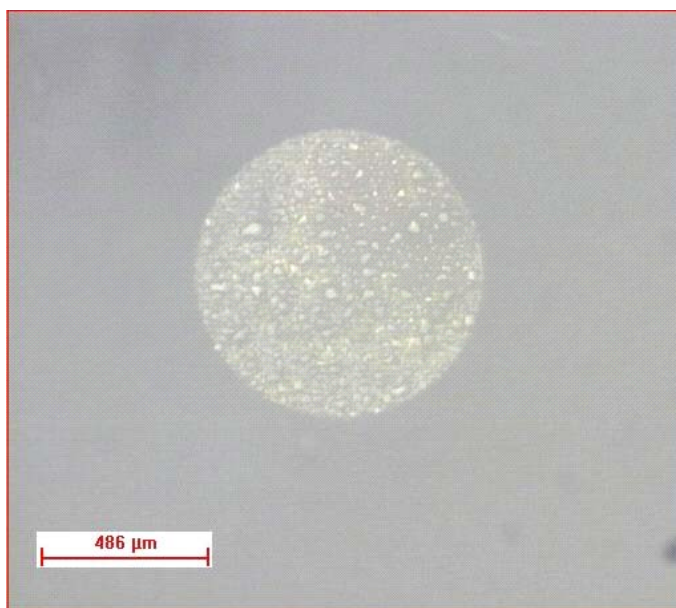


Figura 4.8 Fotografia de uma partícula de água emulsionada no óleo



Figura 4.9 Fotografia de uma bolha de ar emulsionada no óleo

4.3.2 Emulsão Dentro de Emulsão

Foi observado que a partícula de água emulsionada no óleo contém óleo emulsionado dentro dela própria, como mostra a Figura 4.10.



Figura 4.10 Fotografia de uma partícula de água emulsionada no óleo

4.4 Tamanho de Partículas

Realizando a varredura no microscópio com a emulsão E5 percebeu-se que há diferentes tamanhos de partículas numa única amostra, como mostra a Figura 4.11. A variação dos diâmetros estão relacionados numa tabela no Anexo 3.



Figura 4.11 Fotografia de partículas de água emulsionada no óleo

De acordo com Sevik *et al* (1973), o diâmetro máximo ($d_{\max}$) de uma partícula fluida dispersa em uma fase contínua pode ser expresso em função da densidade e viscosidade da fase contínua (ρ_c , μ_c), da tensão interfacial entre as duas fases (σ) e da potência fornecida para gerar a emulsão por unidade de massa ($\dot{w}$), como é mostrado na equação (4.1).

$$d_{\max} = f(\rho_c, \mu_c, \sigma, \dot{w}) \quad (4.1)$$

No presente caso, outras variáveis, como a velocidade angular do aparelho dispersor e as propriedades da fase dispersa (água), poderiam ser acrescentadas à relação acima. Entretanto, como o efeito da rotação se traduz na taxa de energia específica entregue aos fluidos (notar que

$\dot{w}$ pode entendida como o produto do trabalho específico entregue ao fluido pela frequência de rotação do aparelho dispersor), decidiu-se manter a equação (4.1) inalterada e restringir a validade da análise a sistemas óleo-água. No que diz respeito ao efeito da viscosidade da fase contínua (óleo), constatou-se em nossos experimentos, que: a) a alta rotação do aparelho (16000 rpm) criava certa turbulência que promovia a dispersão da água no óleo em alguns minutos; e b) o aquecimento do fluido devido à alta rotação era muito significativo, reduzindo o efeito da viscosidade do óleo e contribuindo para o aumento da turbulência. Sendo difícil avaliar o número de Reynolds do escoamento de óleo ao redor das partículas geradas, decidiu-se tentar dois modelos usando a equação (4.1): um assumindo que esse escoamento fosse completamente turbulento, e outra admitindo que o escoamento fosse laminar.

A análise dimensional da equação (4.1), que envolve 5 variáveis e 3 dimensões físicas, indica a existência de dois grupos adimensionais. A Tabela 4.1, mostra as dimensões e unidades das variáveis para uso na análise dimensional.

Tabela 4.1 Unidades e Dimensões das Variáveis

Variável	$d_{\max}$	ρ_c	μ_c	σ	$\dot{w}$
Unidade (SI)	m	kg/m ³	Pa.s	N/m	$\frac{N.m}{s.kg}$
Dimensão	[L]	[ML ⁻³]	[ML ⁻¹ T ⁻¹]	[MT ⁻²]	[L ² T ⁻³]

Para determinar os grupos adimensionais (π) correspondentes, escolhe-se uma base composta pelas variáveis $d_{\max}$, ρ_c , σ e substituem-se as dimensões de cada variável nas equações (4.2) e (4.4). Os expoentes a , b , c são, em cada expressão, calculados para que o grupo seja adimensional.

$$\pi_1 = \dot{w}.d_{\max}^a.\sigma^b.\rho_c^c \quad (4.2)$$

$$M^0 L^0 T^0 = L^2 T^{-3} (L)^a . (MT^{-2})^b (ML^{-3})^c$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{M: } 0 = b + c \\ \text{L: } 0 = 2 + a - 3c \\ \text{T: } 0 = -3 - 2b \end{array} \right\} \Rightarrow \begin{cases} a = 5/2 \\ b = -3/2 \\ c = 3/2 \end{cases}$$

$$\pi_1 = \dot{w} d_{\max}^{5/2} \left(\frac{\sigma}{\rho_c} \right)^{-3/2} \quad (4.3)$$

$$\pi_2 = \mu_c \cdot d_{\max}^a \cdot \sigma^b \cdot \rho_c^c \quad (4.4)$$

$$\text{M}^0 \text{L}^0 \text{T}^0 = \text{ML}^{-1} \text{T}^{-1} (\text{L})^a \cdot (\text{MT}^{-2})^b (\text{ML}^{-3})^c$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{M: } 0 = 1 + b + c \\ \text{L: } 0 = -1 + a - 3c \\ \text{T: } 0 = -1 - 2b \end{array} \right\} \Rightarrow \begin{cases} a = -1/2 \\ b = -1/2 \\ c = -1/2 \end{cases}$$

$$\pi_2 = \frac{\mu_c}{\sqrt{\sigma \rho_c d_{\max}}} \quad (4.5)$$

Assim, em termos de grupos adimensionais, a relação funcional que corresponde à expressão (4.1) é:

$$\dot{w} d_{\max}^{5/2} \left(\frac{\sigma}{\rho_c} \right)^{-3/2} = f \left(\frac{\mu_c}{\sqrt{\sigma \rho_c d_{\max}}} \right) \quad (4.6)$$

Neste ponto, dois modelos podem ser considerados para descrever o tamanho máximo das partículas:

Modelo I: Escoamento completamente turbulento ao redor da partícula

Neste caso, o efeito da viscosidade desaparece, e a equação (4.5) torna-se uma constante. Então a equação (4.6), expressa em termos do diâmetro máximo resulta na equação (4.7).

$$d_{\max} = k_I \left(\frac{\sigma}{\rho_c} \right)^{3/5} \dot{W}^{-2/5} \quad (4.7)$$

De acordo com Sevik *et al* (1973), a constante k_I é igual a 1,14 para bolhas de ar dispersas em água, situação na qual o escoamento da água ao redor das bolhas pode ser presumido turbulento.

Modelo II: Escoamento laminar ao redor da partícula

Neste caso, pode-se assumir que a potência entregue ao fluido dependa linearmente da viscosidade da fase contínua, tal como ocorre nos escoamentos laminares em dutos. Em conseqüência, a função f é de primeiro grau e a equação (4.6), resolvida para o diâmetro, resulta na equação (4.8).

$$d_{\max} = k_{II} \left(\frac{\sigma v_c}{\rho_c \dot{W}} \right)^{1/3} \quad (4.8)$$

Em comparação com o modelo I, onde a viscosidade não aparece, este modelo indica que, quanto maior a viscosidade da fase contínua, maior o tamanho da partícula. Este resultado é esperado, uma vez que uma alta viscosidade restringe o movimento da partícula e sua fragmentação em partículas menores. A equação (4.8) representa, portanto, uma contribuição nova no estudo de emulsões de água em óleos viscosos.

Nos experimentos realizados, a dispersão da água em óleo pesado foi feita em um *Becker* com a inserção do elemento dispersor rotativo. A potência entregue ao fluido pode ser calculada pelo balanço de energia tendo como volume de controle o *Becker* com a emulsão, a ferramenta de dispersão e as temperaturas envolvidas, como mostra a Figura 4.12. Sejam: $\dot{W}$ a potência entregue pela ferramenta de dispersão, $\dot{Q}$ a taxa de perda de calor, h a altura do nível da emulsão,

D o diâmetro do *Becker*, T a temperatura da emulsão, T_p temperatura no vidro do *Becker*, T_{amb} temperatura ambiente.

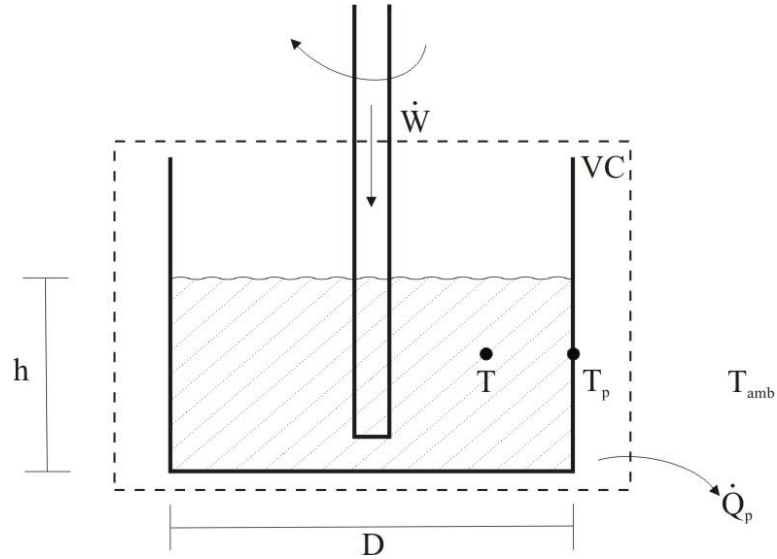


Figura 4.12 Volume de controle para o balanço de energia no gerador de emulsão

O balanço de energia é dado pela equação (4.9).

$$-\dot{Q}_p + \dot{W} = \frac{dE}{dt} \quad (4.9)$$

onde E é a energia armazenada no volume e nas interfaces óleo-água, como mostra a equação (4.10).

$$E = (m_o c_{p_o} + m_a c_{p_a} + m_v c_{p_v}) T + \sigma_{ow} \sum A_i \quad (4.10)$$

A perda de calor ocorre por convecção natural e radiação da superfície externa do *Becker* para o ambiente, podendo-se desprezar a resistência térmica da emulsão para a superfície interna do vidro (convecção). Dessa forma, a temperatura do fluido (T) é considerada igual à temperatura da parede (T_p). Daí tem-se a perda de calor pela equação (4.11).

$$\dot{Q}_p = U_{\text{conv}} A_p (T - T_{\text{amb}}) + \varepsilon_p \sigma A_p (T^4 - T_{\text{amb}}^4) \quad (4.11)$$

Os coeficientes U , ε_p e σ , são respectivamente $5 \text{ [W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C]}$, $0,94$ e $5,669 \times 10^{-8} \text{ [W/m}^2 \text{ K}^4]$, como são apresentados por Holman (1981). A área A_p é a área externa do *Becker* até o nível da emulsão, onde o diâmetro do *Becker* é $0,077 \text{ m}$ e a altura atingida pela emulsão é de $0,044 \text{ m}$. Pela equação (4.12) temos que a área utilizada foi de, aproximadamente, $0,02 \text{ m}^2$.

$$A_p = 2 \left(\frac{\pi D^2}{4} \right) + \pi D h \quad (4.12)$$

Adotou-se um tempo de geração da emulsão de 10 minutos, o qual foi constatado ser amplamente suficiente para manter o mesmo tamanho e distribuição de partículas dispersas. Dessa forma, a energia acumulada nas interfaces óleo-água não mais varia no tempo, e a potência fornecida ao fluido ao fim de 10 minutos de agitação é dada pela equação (4.13).

$$\dot{W}_{t=10\text{min}} = (m_o c_{p_o} + m_a c_{p_a} + m_v c_{p_v}) \frac{dT}{dt} \Big|_{t=10\text{min}} + \dot{Q}_{P_{t=10\text{min}}} \quad (4.13)$$

Para o cálculo da derivada da temperatura ao fim de 10 minutos, foi medida com termômetro a temperatura do fluido a cada minuto de agitação, e pelo gráfico de cada emulsão foram geradas as equações interpolantes $T(t)$ na forma polinomial. Tanto a tabela de dados experimentais quanto o gráfico das emulsões estão dispostos no Anexo 4.

Para o cálculo das viscosidades da fase contínua foram utilizados as viscosidades do óleo coletadas experimentalmente apresentadas na Tabela 4.2 de acordo com a temperatura e a partir dessa tabela foi gerado o Figura 4.13.

Tabela 4.2 Viscosidade da fase contínua a diferentes temperaturas

T (°C)	μ_c Exp. (Pa.s)
10	143,99
20	46,13
30	17,55
40	6,73
50	3,30
60	1,32

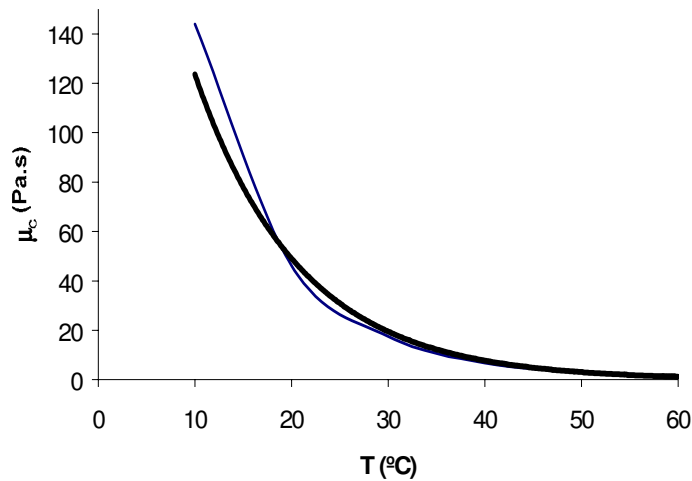


Figura 4.13 Gráfico da viscosidade do óleo

O gráfico da Figura 4.13 contém uma linha de tendência exponencial regida pela equação (4.14) a qual foi obtida com 99,5% de precisão.

$$\mu_c = 311,24e^{-0,0924T} \quad (4.14)$$

Sendo o maior diâmetro de partícula encontrado no microscópio, aproximadamente, 500 μ m, obtido o trabalho aplicado para cada emulsão e tendo os valores da tensão superficial e da densidade da fase contínua, respectivamente, 0,03 N/m e 950 kg/m³, substituindo na equação (4.13) e obtém-se a Tabela 4.3.

Tabela 4.3 Dados calculados para cada emulsão ao fim de 10 minutos de agitação

Emulsão	T _{exp} (°C)	T _{calc} (°C)	dT/dt (°C/min)	m _O (kg)	m _A (kg)	μ _c (Pa.s)	Q̇ _p (W)	Ẁ (W)	k _I	k _{II}
E1	76,0	76,6	3,7360	0,174	0,02	0.2623	13,636	42,41	2,1861	1.4801
E2	73,0	72,3	1,4620	0,155	0,04	0.3918	12,424	24,94	1,7652	1.0835
E3	68,0	67,9	3,3930	0,135	0,06	0.5882	11,227	43,17	2,1955	1.1349
E4	60,5	60,8	4,8378	0,116	0,08	1.1276	9,368	59,06	2,4852	1.0130
E5	44,0	43,3	(-0,3087)	0,097	0,10	5.6722	5,053	1,62	-	-

$$k_{\text{médio}} = \frac{2,1580 + 1,1779}{2} = 1,66795$$

Pode-se, portanto, concluir que o valor médio da constante k em nossos experimentos, para o modelo I é aproximadamente 2,16 e para o modelo II é aproximadamente 1,18, representados nas equações (4.14) e (4.15).

$$\text{Modelo I:} \quad d_{\text{max}} = 2,16 \left(\frac{\sigma}{\rho_c} \right)^{3/5} \dot{w}^{-2/5} \quad (4.14)$$

$$\text{Modelo II:} \quad d_{\text{max}} = 1,18 \left(\frac{\sigma v_c}{\rho_c \dot{w}} \right)^{1/3} \quad (4.15)$$

Uma análise de erros na determinação dessas constantes está apresentada no Anexo 5. Se compararmos a equação (4.14) com o resultado obtido por Sevik *et al* (1973), que obtiveram $k_I = 1,14$ para bolhas de ar dispersas em água, o valor aqui obtido de $k_I = 2,16$ para partículas de água dispersas em óleo indica que essas gotas são relativamente maiores. Isto representa um indício de que a viscosidade do óleo pode realmente estar afetando o tamanho máximo da partícula, já que a tensão interfacial óleo-água é aproximadamente metade da tensão interfacial ar-água. Dessa forma, concluímos que o **modelo II** parece melhor representar os experimentos aqui reportados.

4.5 Comparação entre os Modelos de Viscosidades de Emulsões com as Medidas

As viscosidades das emulsões são apresentadas na Tabela 4.4, tanto coletadas experimentalmente quanto calculadas utilizando quatro modelos de viscosidades para emulsões. Os modelos utilizados para o cálculo das viscosidades foram os propostos por Taylor (1932), Pal (2000), Ronningsen (1995) e Ishii *et al* (1979), respectivamente. Nessa tabela apresenta também os desvios relativos dos valores experimentais com os valores calculados de cada modelo.

Tabela 4.4 Comparação entre viscosidades medidas e modelos de viscosidades para emulsões

α_{cl} (%)	T (°C)	μ_e (Exp.) (Pa.s)	Taylor		Pal		Ronningsen 300 s-1		Ishii e Zuber	
			μ_e	Desvio (%)	μ_e	Desvio (%)	μ_e	Desvio (%)	μ_e	Desvio (%)
10	10	298,23	158,54	-47	166,70	-44	140,32	-53	160,16	-46
	20	75,54	50,89	-33	53,56	-29	44,20	-41	51,43	-32
	30	22,31	19,44	-13	20,51	-8	16,54	-26	19,66	-12
	40	7,05	7,54	7	7,99	13	6,24	-11	7,64	8
	50	3,36	3,75	11	4,00	19	3,01	-11	3,81	13
	60	1,32	1,53	16	1,66	26	1,18	-11	1,57	19
20	10	364,13	173,09	-52	197,80	-46	140,85	-61	180,40	-50
	20	106,32	55,65	-48	63,73	-40	44,38	-58	58,07	-45
	30	31,41	21,34	-32	24,57	-22	16,61	-47	22,33	-29
	40	8,91	8,34	-6	9,72	9	6,27	-30	8,79	-1
	50	4,32	4,19	-3	4,97	15	3,02	-30	4,46	3
	60	1,89	1,75	-7	2,15	14	1,19	-37	1,90	1
30	10	373,51	187,63	-50	243,02	-35	141,39	-62	206,46	-45
	20	89,41	60,41	-32	78,53	-12	44,56	-50	66,65	-25
	30	28,69	23,24	-19	30,47	6	16,67	-42	25,80	-10
	40	11,81	9,14	-23	12,23	4	6,29	-47	10,31	-13
	50	5,13	4,64	-10	6,38	24	3,04	-41	5,34	4
	60	2,07	1,97	-5	2,88	39	1,19	-43	2,37	14
40	10	489,19	202,18	-59	314,77	-36	141,93	-71	241,25	-51
	20	108,56	65,17	-40	102,01	-6	44,73	-59	78,14	-28
	30	33,48	25,13	-25	39,84	19	16,74	-50	30,48	-9
	40	7,30	9,95	36	16,23	122	6,32	-13	12,39	70
	50	3,23	5,08	57	8,64	167	3,05	-6	6,58	103
	60	1,25	2,19	75	4,07	226	1,20	-4	3,06	145
50	10	280,00	216,73	-23	446,15	59	142,47	-49	290,05	4
	20	155,98	69,93	-55	145,00	-7	44,91	-71	94,31	-40
	30	31,56	27,03	-14	57,00	81	16,81	-47	37,12	18
	40	2,44	10,75	341	23,57	866	6,35	160	15,40	531
	50	3,22	5,53	72	12,80	297	3,06	-5	8,41	161
	60	3,36	2,40	-28	6,28	87	1,20	-64	4,13	23

Para análise de cada modelo de viscosidade foram gerados gráficos, apresentados nas Figura 4.14 a Figura 4.18, sendo que cada figura se refere a uma emulsão com 10%, 20%, 30%, 40% e 50% de água, respectivamente, variando a viscosidade da emulsão em função da temperatura.

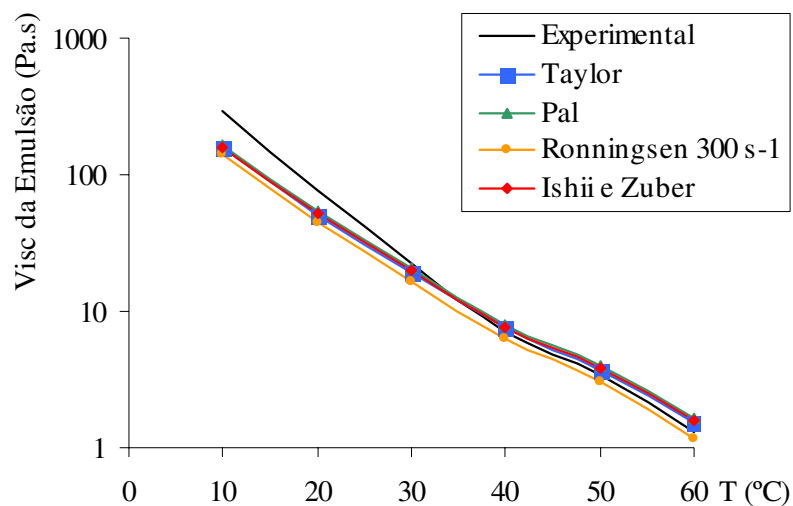


Figura 4.14 Comparação entre os modelos de viscosidades de E1

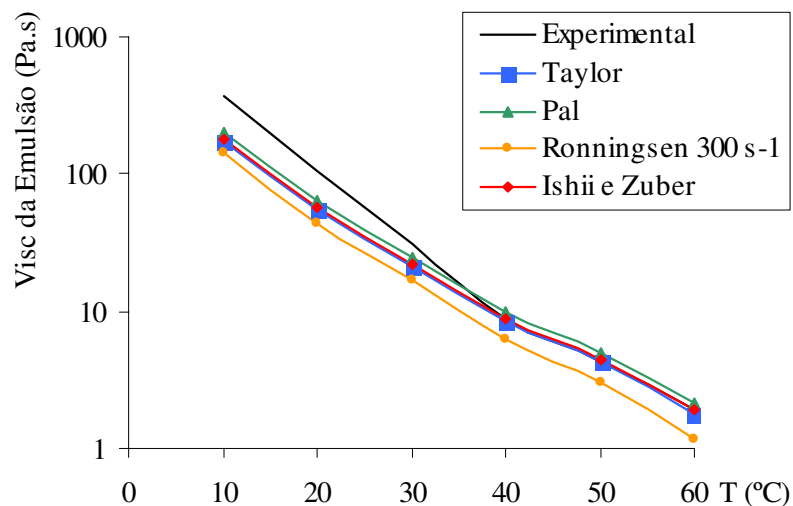


Figura 4.15 Comparação entre os modelos de viscosidades de E2

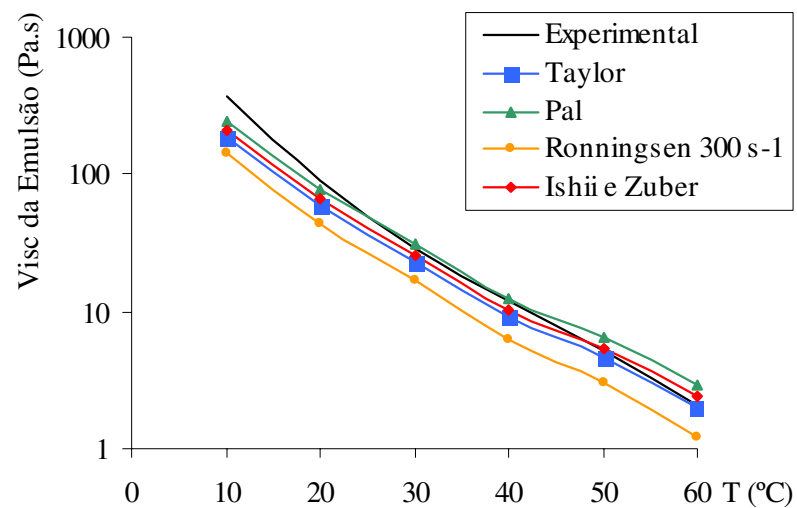


Figura 4.16 Comparação entre os modelos de viscosidades de E3

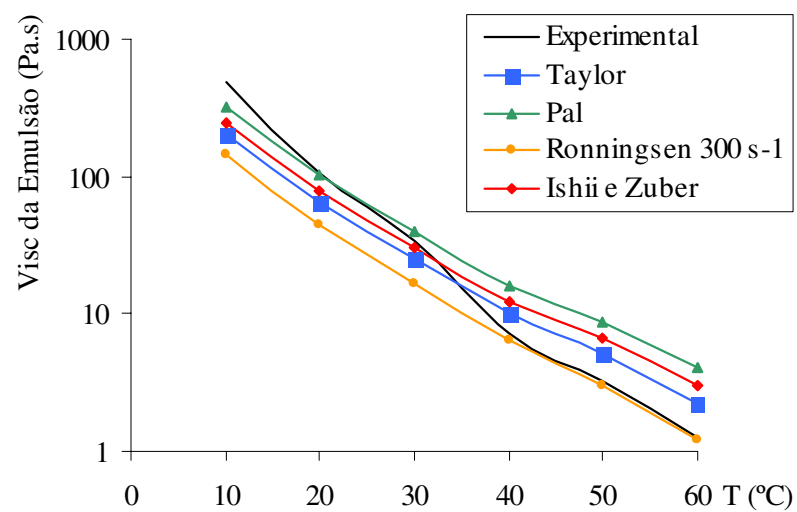


Figura 4.17 Comparação entre os modelos de viscosidades de E4

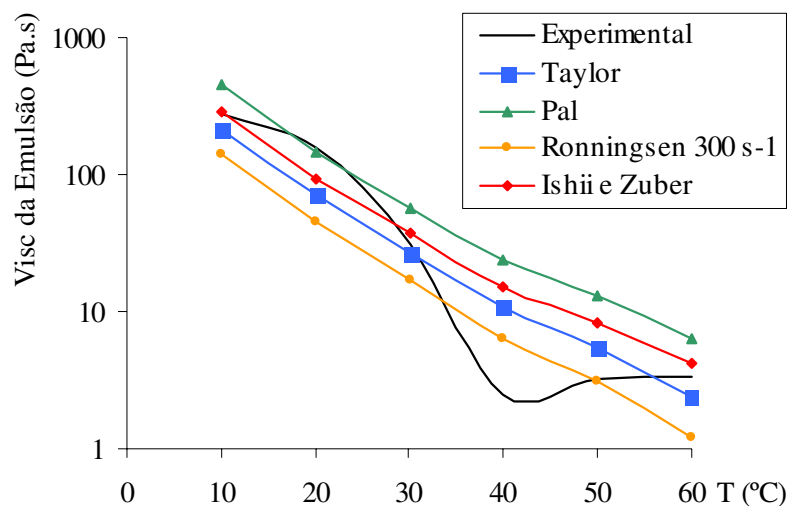


Figura 4.18 Comparação entre os modelos de viscosidades de E5

Pelos gráficos das Figura 4.14 a Figura 4.18 foi possível concluir que a correlação de Pal (2000) se adapta melhor às emulsões em baixas temperaturas, em contraste com a correlação de Ronningsen (1995), a qual se adapta melhor a emulsões com temperaturas mais altas. Já as correlações de Taylor (1932) e Ishii *et al* (1979) comportam-se medianamente a qualquer temperatura. Sabendo-se que a correlação de Taylor é uma simplificação da correlação Ishii - isto é, a correlação de Ishii tende para a de Taylor quando a concentração da fase dispersa é pequena - então podemos concluir que a correlação de Ishii mostrou-se a mais adequada para o cálculo da viscosidade de emulsões com óleo pesado, para toda a faixa de concentrações e temperaturas investigadas neste trabalho.

Capítulo 5

Aplicação ao Projeto de Separadores Trifásicos de Óleo Pesado

Neste capítulo será apresentado um procedimento matemático, descrito como uma elaboração de um programa computacional para o dimensionamento de separadores horizontais, que permite observar a influência de diversas variáveis, como viscosidade e densidade do óleo nas dimensões de um separador cuja força motriz de separação é a gravidade. Não foram levadas em consideração nem a temperatura nem a pressão dentro do vaso separador, sendo esses fatores importantes para a prática em campo, porém, este procedimento evidencia o comportamento da emulsão sobre as dimensões do vaso separador.

Esse programa foi desenvolvido usando o aplicativo MATHEMATICA[®], uma ferramenta computacional utilizada para execuções de equações matemáticas. Tal ferramenta foi utilizada devido à sua capacidade para resoluções de problemas com alto grau de dificuldades das equações a oferecida. O projeto desenvolvido é apresentado no Anexo 6.

A estruturação desse projeto é mostrada na Figura 5.1, que indica as etapas necessárias para o desenvolvimento geral da execução do programa. Essa figura descreve cada item e suas subdivisões os quais serão detalhadamente explicados adiante.

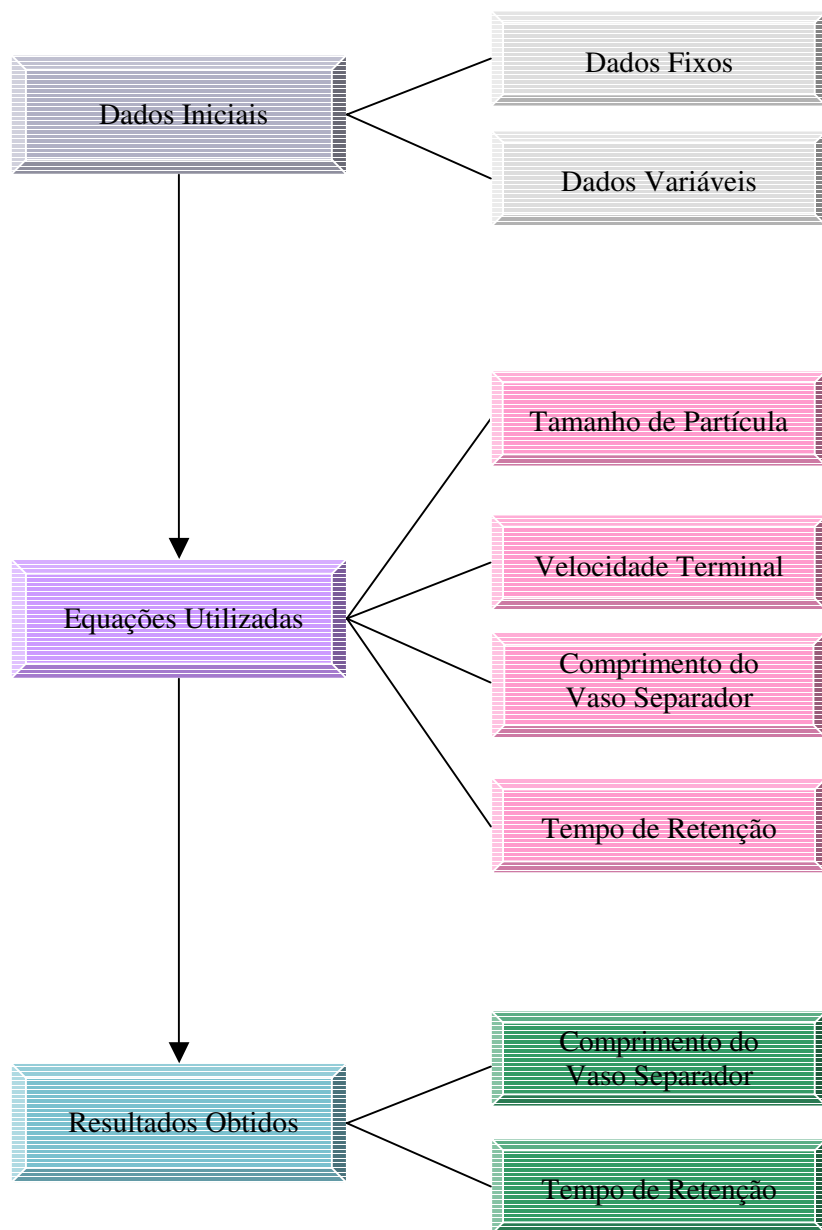


Figura 5.1 Estruturação do projeto

Para melhor entendimento da metodologia aplicada nesse programa, a Figura 5.2 mostra um fluxograma de processos da execução que indica as etapas seguidas para a elaboração do projeto.

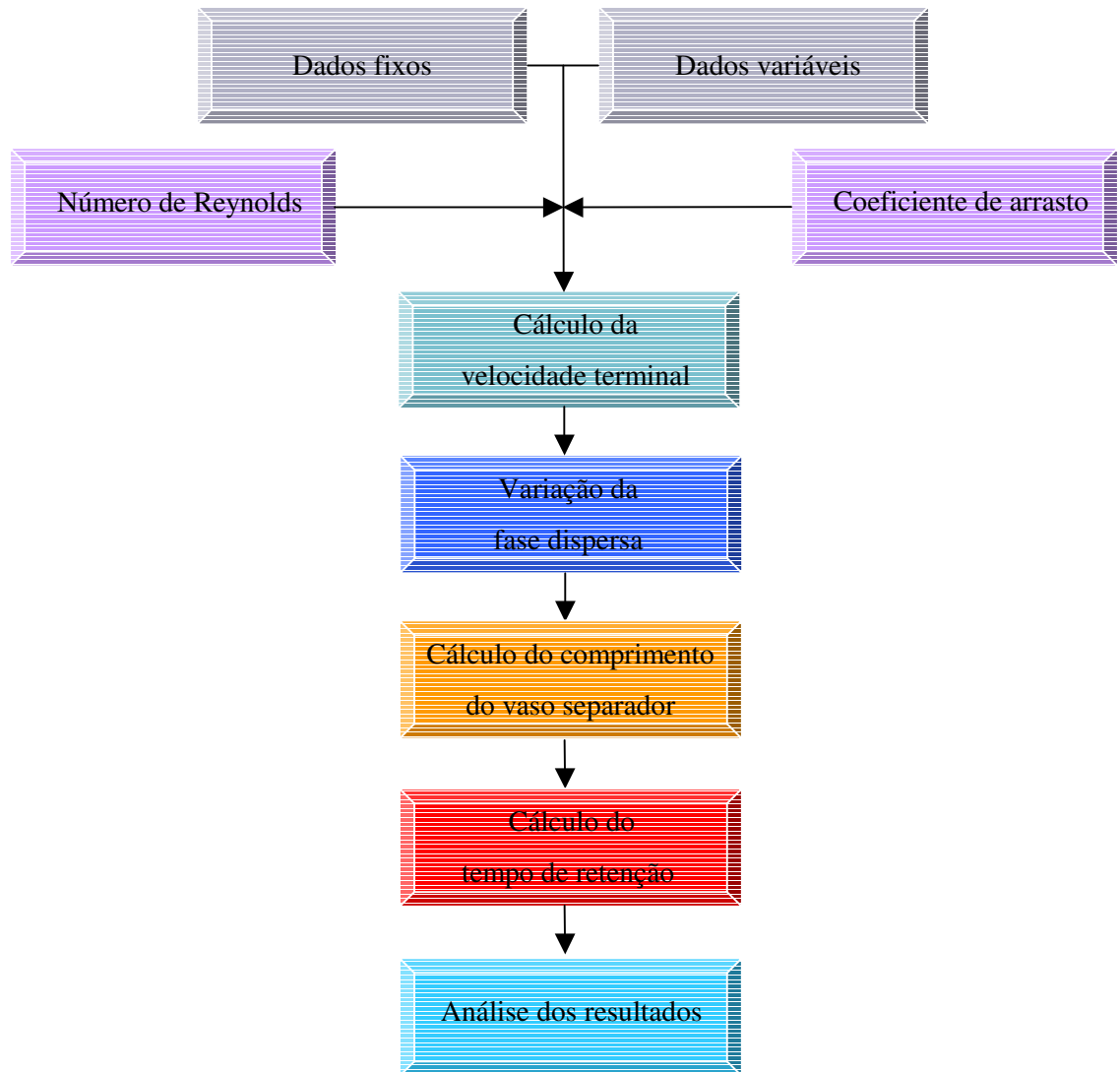


Figura 5.2 Fluxograma de processos de execução

5.1 Definições dos Principais Parâmetros

Para o dimensionamento de um vaso separador horizontal trifásico são usualmente seguidos alguns critérios os quais têm como principais parâmetros a Velocidade Terminal, o Tempo de Retenção e o Tamanho de Partícula.

5.1.1 Velocidade Terminal

O movimento da partícula dispersa na fase contínua é causado pela diferença de densidade entre as duas fases, a contínua e a dispersa. Quando, durante o movimento, a aceleração da partícula passa a ser zero, isto é, a partícula passa a se mover com velocidade constante, diz-se que a partícula atingiu a sua velocidade terminal. A Figura 5.3 mostra as forças que atuam sobre uma partícula enquanto ela se move.

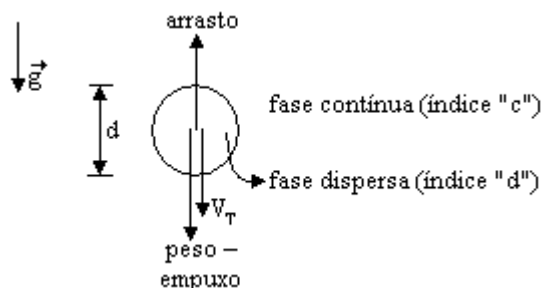


Figura 5.3 Forças que atuam numa partícula

A partícula dispersa tem um movimento descendente, no caso de partículas de óleo dispersas na camada de gás ou partículas de água dispersas na camada de óleo, ou um movimento ascendente, no caso de partículas de óleo na camada de água, como mostra a Figura 5.4.

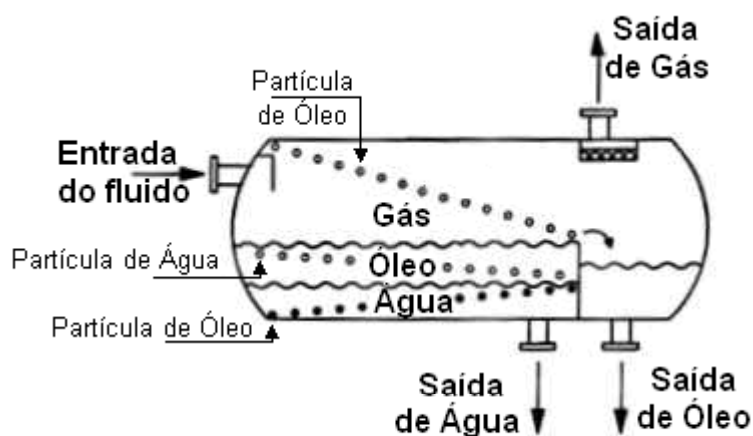


Figura 5.4 Deslocamento de uma partícula na fase contínua

5.1.2 Tempo de Retenção

O tempo de retenção é o tempo necessário para que uma partícula dispersa atravessa toda a camada da fase contínua até atingir a fase contínua correspondente, como descreve a Figura 5.5.

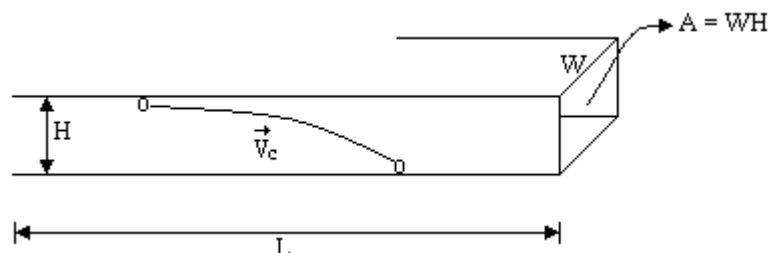


Figura 5.5 Deslocamento de uma partícula em uma única fase

Segundo Schulumber, o tempo de retenção normalmente varia entre 30 segundos e 3 minutos. Se uma emulsão está presente, o tempo de retenção pode ser aumentado por quatro vezes seus valores normais. (Informação obtida no site <http://www.glossary.oilfield.slb.com/Display.cfm?Term=retention%20time>)

5.1.3 Tamanho de Partícula

O tamanho de partícula é o tamanho referente à uma gotícula de água emulsionada no óleo. De acordo com Manning *et al* (1995), é extremamente raro a obtenção de dados laboratoriais da coalescência das partículas de água para um determinado sistema, mas é esperado que o tamanho da partícula diminua com o aumento da viscosidade do óleo, pois este inibe o movimento das partículas e diminui a força de colisão. Em relação à estabilidade da emulsão, quanto menor o tamanho da partícula mais estável é a emulsão porque a partícula maior tende a sedimentar mais rapidamente.

5.2 Procedimento Adotado

O desenvolvimento deste trabalho tem ligação direta com a geometria, demonstrada na Figura 5.6, de um vaso separador horizontal trifásico que tem como principal força de separação a gravidade.

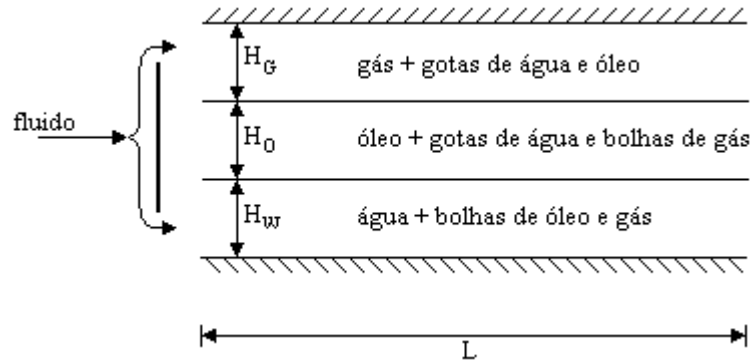


Figura 5.6 Geometria adotada para o vaso separador

5.2.1 Dados Iniciais

Os dados iniciais para a execução do projeto são subdivididos em: Dados Fixos e Dados Variáveis.

- Dados Fixos – são dados que não variam ao longo do projeto:
 - Densidade do Gás (ρ_G) em kg/m^3
 - Densidade da Água (ρ_W) em kg/m^3
 - Viscosidade do Gás (μ_G) em Pa.s
 - Viscosidade da Água (μ_W) em Pa.s
 - Tensão Superficial do Óleo no Gás (σ_{OG}) em N/m
 - Tensão Superficial da Água no Óleo (σ_{WO}) em N/m
 - Tensão Superficial do Óleo na Água (σ_{OW}) em N/m

- Dados Variáveis – são os que variam ao longo do projeto:

- Vazão Volumétrica do Gás (q_G) em m^3/s
- Vazão Volumétrica do Óleo (q_O) em m^3/s
- Vazão Volumétrica da Água (q_w) em m^3/s
- Viscosidade do Óleo (μ_O) em Pa.s
- Tempo de Retenção da Água no Óleo (t_{r_o}) em s
- Densidade do Óleo (ρ_O) em kg/m^3

5.2.2 Cálculo do Tamanho de Partícula

Como já foi dito, a água e o óleo chegam no separador já emulsionados por consequência do bombeamento, transporte e expansão dos fluidos. Portanto, na tubulação que antecede o separador, a emulsão já está formada. Supondo um tubo com dimensões dadas, como mostrado na Figura 5.7, podemos aplicar a equação deduzida anteriormente, equação (4.9), para calcular o diâmetro das partículas formadas.

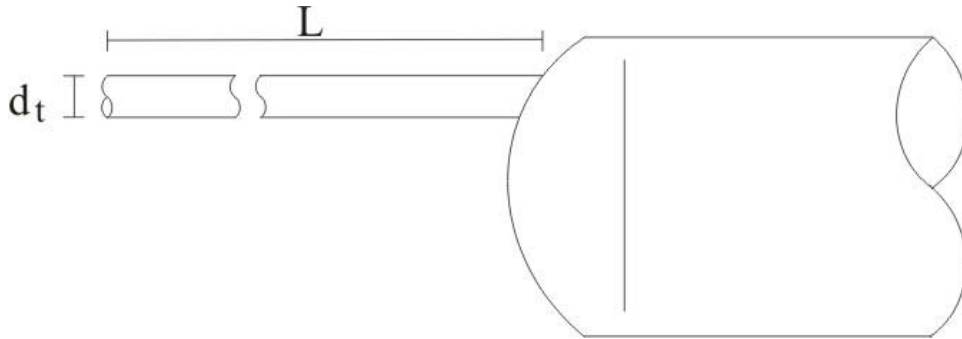


Figura 5.7 Tubulação anterior ao separador

$$d_{\max} = 1,18 \left(\frac{\sigma v_c}{\rho_c \dot{w}} \right)^{1/3} \quad (4.9)$$

Para o cálculo da potência por unidade de massa ($\dot{w}$) utiliza-se a equação (5.3)

$$\dot{w} = \frac{\Delta P \cdot Q}{m} = \frac{\Delta P \cdot Q}{\rho_m \cdot L \cdot A}$$

$$\text{sendo : } J = \frac{Q}{A}$$

$$\text{sabendo que : } \frac{\Delta P}{L} = \frac{f \rho_m J^2}{2 d_t}$$

então :

$$\dot{w} = \frac{f J^3}{2 d_t} \quad (5.3)$$

Admitindo um tubo de diâmetro (d_t) 10 cm e um fator de atrito (f) igual a 0,02, podem ser estimados os diâmetros de partículas de água em um óleo pesado de viscosidade 1000 cP e densidade 950 kg/m³, supondo dois tipos de fluidos: uma mistura bifásica água-óleo chegando ao separador com uma velocidade superficial (J) de 2 m/s, onde o diâmetro de partícula atingiria, aproximadamente, 4000 μm ; e uma mistura trifásica óleo-água-gás com uma razão gás-óleo igual a 20, onde o diâmetro de partícula é, aproximadamente, 400 μm .

Para uma análise mais completa, adotamos quatro diâmetros de partículas que abrangem uma grande parte das emulsões, são elas: 500, 1000, 2000 e 5000 μm .

5.2.3 Cálculo da Velocidade Terminal

Para o cálculo da velocidade terminal de uma partícula, considerou-se uma partícula esférica escoando através de uma emulsão, e partiu-se da expressão da força de arrasto (F_A), equação (5.4), usando o coeficiente de arrasto de uma esfera (C_D), equação (5.5), e o número de Reynolds (Re) da emulsão, equação (5.6):

$$F_A = \frac{1}{2} C_D \rho_e V_t^2 A_{\text{part}} = \frac{1}{2} C_D [(1 - \alpha_d) \rho_c + \alpha_d \rho_d] V_t^2 \frac{\pi d_{\text{part}}^2}{4} \quad (5.4)$$

$$C_D = \frac{24}{Re} + \frac{6}{1 + \sqrt{Re}} + 0,4 \quad (5.5)$$

$$Re = \frac{\rho_c V_t d_{part}}{\mu_e} = \frac{[(1 - \alpha_d)\rho_c + \alpha_d \rho_d] V_t d_{part}}{\mu_c (1 - \alpha_d)^{-2,5 \frac{\mu_d + 0,4\mu_c}{\mu_d + \mu_c}}} \quad (5.6)$$

Como a partícula só atinge a velocidade terminal quando a força de arrasto, equação (5.4), se iguala com o peso da partícula menos o empuxo devido à emulsão, equação (5.7), obtém-se a expressão da velocidade terminal, equação (5.8), e seu sentido é dado pela diferença de densidade entre as fases contínua e dispersa.

$$P - E = \{\rho_d - [(1 - \alpha_d)\rho_c + \alpha_d \rho_d]\} g \frac{\pi d_{part}^3}{6} \quad (5.7)$$

$$V_t = \sqrt{\frac{4}{3} \frac{[\rho_d - [(1 - \alpha_d)\rho_c + \alpha_d \rho_d]] g d_{part}}{[(1 - \alpha_d)\rho_c + \alpha_d \rho_d] C_D}} \quad (5.8)$$

Para chegar ao valor da velocidade terminal foi necessário adotar um processo iterativo envolvendo as equações do número de Reynolds, do coeficiente de arrasto e da velocidade terminal.

5.2.4 Variação da Fração Volumétrica da Fase Dispersa ao Longo do Separador

A fração volumétrica da fase dispersa, representada aqui por: α_d , é a concentração de partículas de água que estão dispersas na fase contínua da camada de óleo pesado. A Portaria Conjunta ANP-INMETRO, nº 01, de 19 de junho de 2000, publicado no DOU, de 20 de junho de 2000, item 5.7, diz: “O petróleo medido nos pontos de medição, excetuando-se as medições para apropriação, deve ser estabilizado e não conter mais de 1% de água e sedimentos.” Portanto, o óleo que chega às refinarias tem uma quantidade máxima exigida de partículas de água dispersa na

camada de óleo. Essa razão água-óleo é chamada de BSW e deve estar abaixo de 1% para ser transferido a uma refinaria. Então, ao passar por um vaso separador o óleo entra com uma certa concentração de água e deve sair com uma concentração muito menor. Essa variação de frações de água na fase dispersa ao longo do vaso separador horizontal é chamada Fração Volumétrica da água que é dada pelo balanço de massa da fase dispersa com base num volume de controle na própria fase e pelas forças exercidas sobre o volume, como mostra a Figura 5.8.

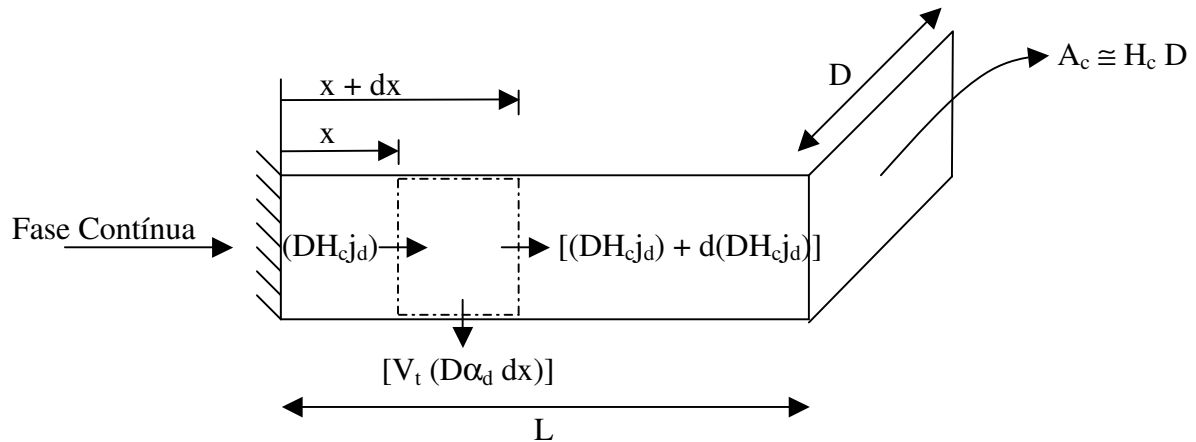


Figura 5.8 Volume de Controle numa fase contínua

Daí obtém-se a equação (5.9):

$$\frac{q_c}{(1 - \alpha_d)^2} \frac{d\alpha_d}{dx} + V_t D \alpha_d = 0 \quad (5.9)$$

5.2.5 Cálculo do Comprimento do Vaso Separador

Para obter a razão entre o comprimento e o diâmetro do separador que minimize o custo total na produção do separador para um determinado volume, foi utilizado um procedimento baseado na otimização da área do separador, isto é, tentamos obter a menor área para um

determinado separador. Considerando um vaso separador cilíndrico, seu volume é dado pela equação (5.10).

$$\text{Vol}_{\text{total}} = \frac{\pi D^2}{4} * L \quad (5.10)$$

Sendo D o diâmetro e L o comprimento do separador, o custo total (C_{total}) de construção do separador é dado pela equação (5.11), considerando a área da calandra cilíndrica e dois cabeçotes curvos, cada um feito a partir de uma chapa de aço quadrada de dimensões D x D.

$$C_{\text{total}} = c \delta \rho_s (\pi D L + c_h \cdot 2D^2) \quad (5.11)$$

Onde c é o custo da calandra por unidade de massa; c_h é o custo do cabeçote relativo ao custo da calandra; δ é a espessura da chapa; e ρ_s é a densidade do aço. Das equações (5.10) e (5.11) obtêm-se uma relação entre o custo total do separador e o seu volume, equação (5.12).

$$C_{\text{total}} = c \delta \rho_s \left(\frac{4 \text{Vol}_{\text{total}}}{D} + 2c_h D^2 \right) \quad (5.12)$$

Para se obter o custo mínimo para um dado volume, deve-se derivar a equação (5.12) em relação ao diâmetro e igualar a zero a equação obtida.

$$\frac{dC_{\text{total}}}{dD} = \frac{-4 \cdot \text{Vol}_{\text{total}}}{D^2} + 4c_h \cdot D = 0$$

$$D = \sqrt[3]{\frac{\text{Vol}_{\text{total}}}{c_h}} \quad (5.13)$$

De acordo com Manning *et al* (1995), consideramos que o custo dos cabeçotes do separador por unidade de massa é de 50 a 200% superior ao da calandra, isto é, $1,5 < c_h < 3$, e usando a

equação (5.9), obtém-se uma razão ideal entre comprimento e diâmetro na faixa $2 \leq L/D \leq 4$. O valor $L/D = 3$ será adotado nos cálculos que seguem. Daí tem-se a equação (5.14) para o cálculo total do volume do separador, partindo da equação (5.10).

$$\text{Vol}_{\text{total}} = \frac{\pi D_{\text{sep}}^2}{4} * L_{\text{sep}} \quad (5.10)$$

$$\text{Vol}_{\text{total}} = \frac{\pi D_{\text{sep}}^2}{4} * L_{\text{sep}} \left(* \frac{L_{\text{sep}}^2}{L_{\text{sep}}^2} \right)$$

$$\text{Vol}_{\text{total}} = \frac{\pi}{4} \left(\frac{D_{\text{sep}}^2}{L_{\text{sep}}^2} \right) * L_{\text{sep}}^3$$

$$\text{Vol}_{\text{total}} = \frac{\pi}{4} \left(\frac{1}{3} \right)^2 * L_{\text{sep}}^3$$

$$\text{Vol}_{\text{total}} = \frac{\pi}{36} * L_{\text{sep}}^3 \quad (5.14)$$

5.2.6 Cálculo do Tempo de Retenção

Sabendo que a região que necessita de um tempo maior para a sua separação é aquela onde a fase dispersa são as partículas de água, e a fase contínua é o óleo, focamos o cálculo para o tempo de retenção na fase contínua do óleo. Assumindo que um terço do vaso separador trifásico seja ocupado pelo óleo, utiliza-se a equação (5.15) para o cálculo desse volume.

$$\text{Vol}_o = \frac{\text{Vol}_{\text{Total}}}{3} \quad (5.15)$$

O tempo de retenção que o óleo necessita para que haja coalescência das partículas de água e o óleo saia do vaso separador, de acordo com a Portaria da ANP, é regido pela equação (5.16).

$$t_{r_o} = \frac{\text{Vol}_o}{q_o} \quad (5.16)$$

5.3 Resultados e Discussões da Aplicação ao Projeto de Separadores Trifásicos de Óleo Pesado

5.3.1 Comprimento do separador de acordo com o diâmetro da partícula e fração volumétrica da fase dispersa

Para análise do comportamento do comprimento do separador, de acordo com o diâmetro e as frações volumétricas da fase dispersa, foram gerados os gráficos apresentados na Figura 5.9 a Figura 5.11, sendo que as duas primeiras referem-se a frações volumétricas distintas de 10% e 30%, respectivamente, e a última é uma síntese entre as duas primeiras. Cada gráfico tem o comprimento do separador e a viscosidade do óleo na abscissa e na ordenada, respectivamente.

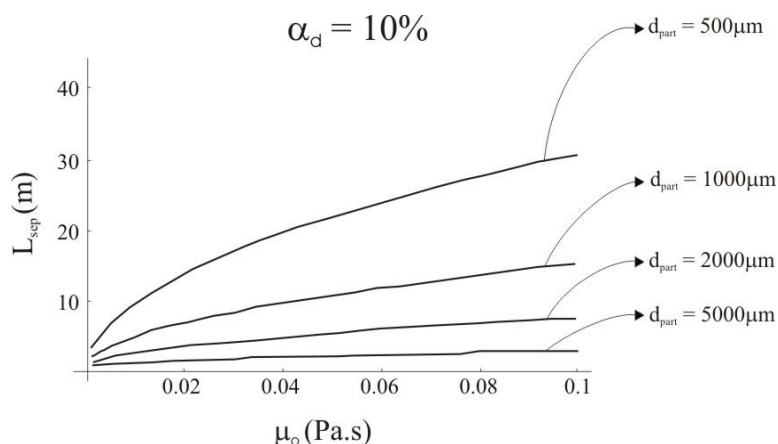


Figura 5.9 Curvas com diferentes diâmetros a 10% de água

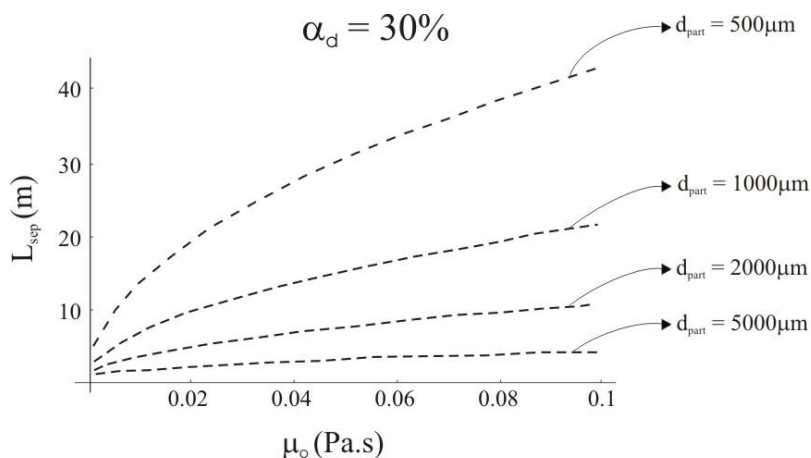


Figura 5.10 Curvas com diferentes diâmetros a 30% de água

De acordo com esses gráficos, nota-se que o diâmetro da partícula influencia consideravelmente o tamanho do vaso separador. À medida que o diâmetro da partícula diminui, eleva-se o tamanho do vaso separador.

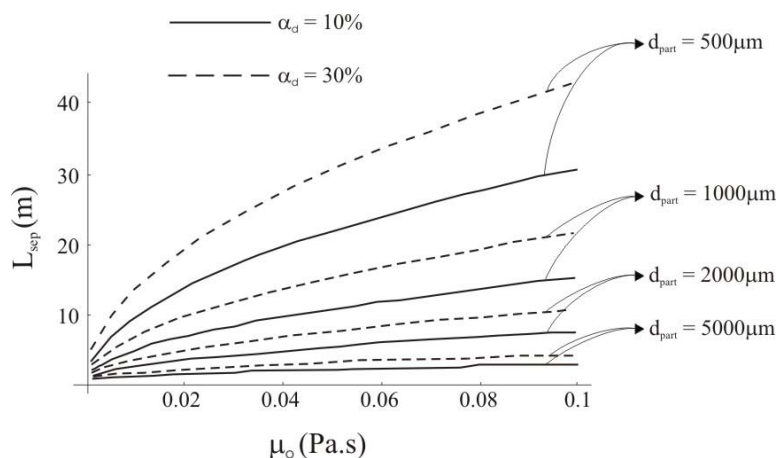


Figura 5.11 Curvas Comparativas

Por esse último gráfico, é possível concluir que, independente do diâmetro da partícula, à medida que a dispersão de água aumenta na fase contínua, no caso o óleo, o comprimento do vaso separador tende a aumentar.

5.3.2 Variação da fração volumétrica de acordo com o diâmetro da partícula

Analizado-se o comportamento da coalescência das partículas de água ao longo do vaso separador, supondo que entre no vaso separador 50% da vazão líquida de água e saia do separador com 1% da água emulsionada (obedecendo a Portaria da ANP) obtém-se os gráficos apresentados nas Figura 5.12 a Figura 5.15, que são gráficos de partículas com tamanhos diferentes, e o gráfico apresentado na Figura 5.16 que é a junção dos gráficos anteriores. Cada gráfico tem o comprimento do separador e a fração volumétrica da água na abscissa e na ordenada, respectivamente.

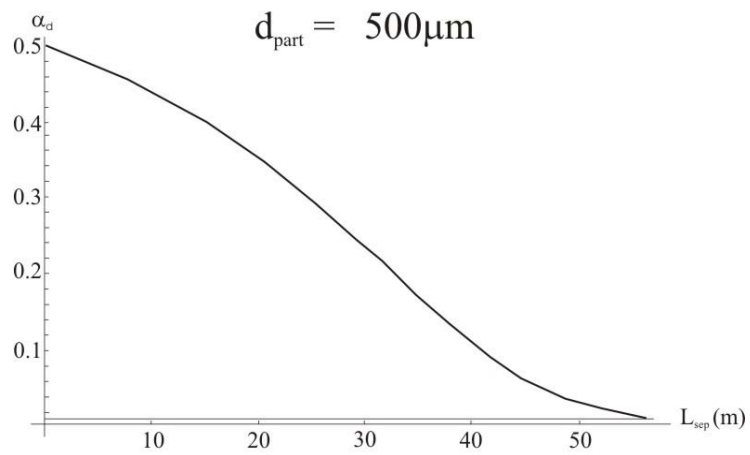


Figura 5.12 Curva da fração volumétrica com diâmetro de partícula de 500 μm

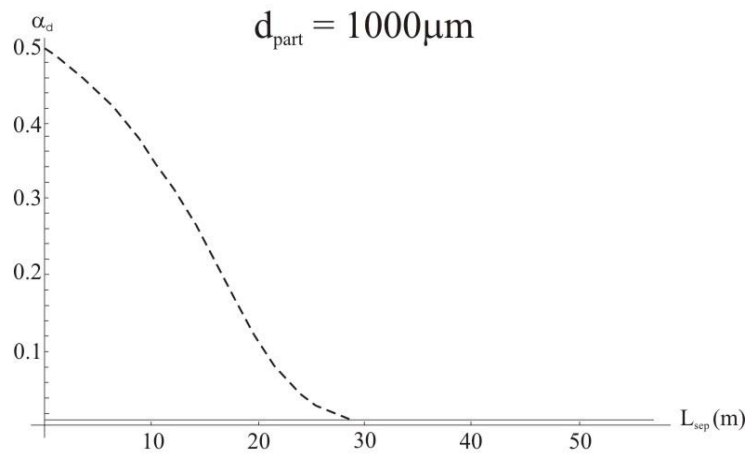


Figura 5.13 Curva da fração volumétrica com diâmetro de partícula de 1000 μm

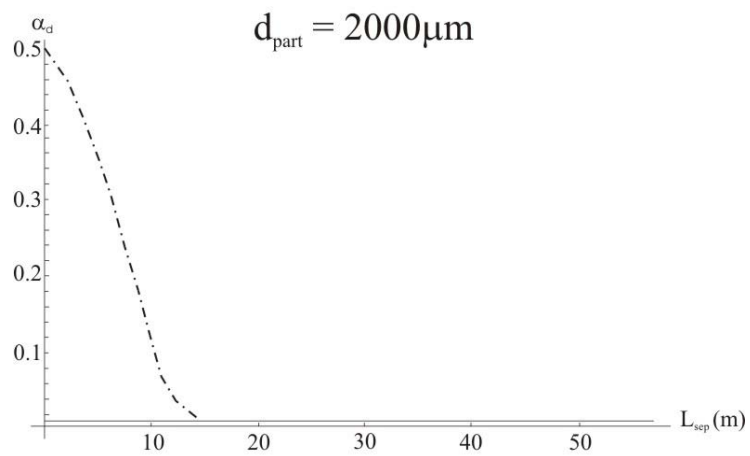


Figura 5.14 Curva da fração volumétrica com diâmetro de partícula de 2000 μm

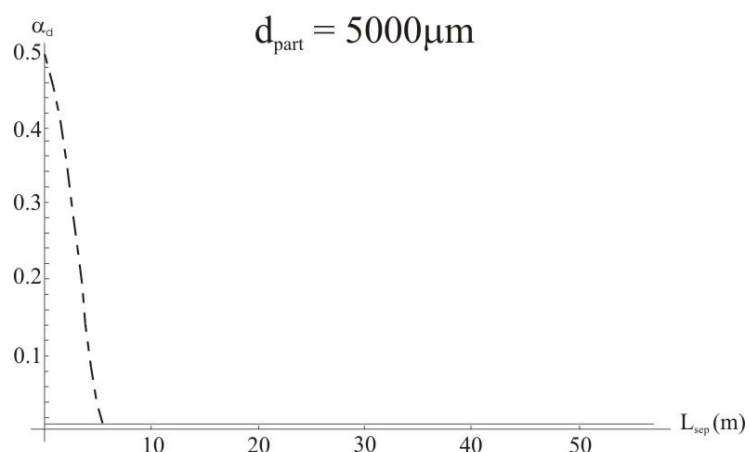


Figura 5.15 Curva da fração volumétrica com diâmetro de partícula de 5000 μm

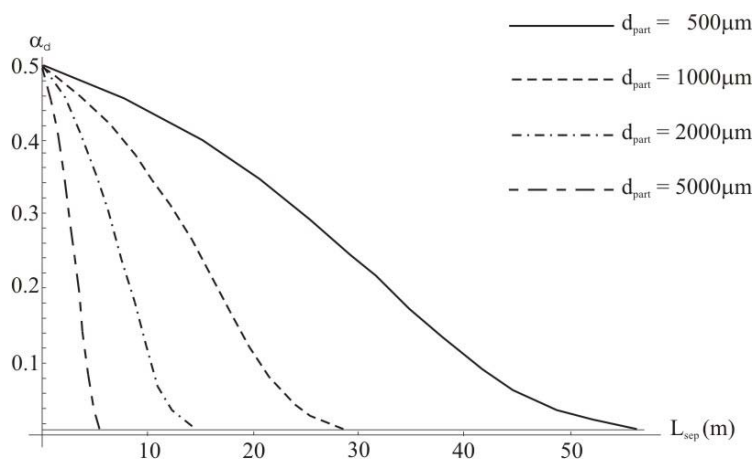


Figura 5.16 Conjunto de curvas da fração volumétrica

De acordo com esses gráficos, nota-se que à medida que o diâmetro da partícula aumenta, o tamanho do vaso separador diminui de comprimento consideravelmente. E no último gráfico, observa-se a grande influência do tamanho da partícula no tamanho do separador. Isto se deve ao aumento da viscosidade e densidade da emulsão, ambos dificultando a segregação das partículas de água.

5.3.3 Variação da fração volumétrica de acordo com a viscosidade

Com a variação da viscosidade do óleo, observou-se uma visível diminuição do tamanho do separador, como mostram os gráficos das Figura 5.17 a Figura 5.19, sendo a Figura 5.17 curvas do

desenvolvimento da fração volumétrica no óleo com viscosidade de 0,1 Pa.s e a Figura 5.18 com viscosidade de 1 Pa.s. Já a Figura 5.19 faz a comparação entre as anteriores. Cada gráfico tem o comprimento do separador e a fração volumétrica da água na abscissa e na ordenada, respectivamente.

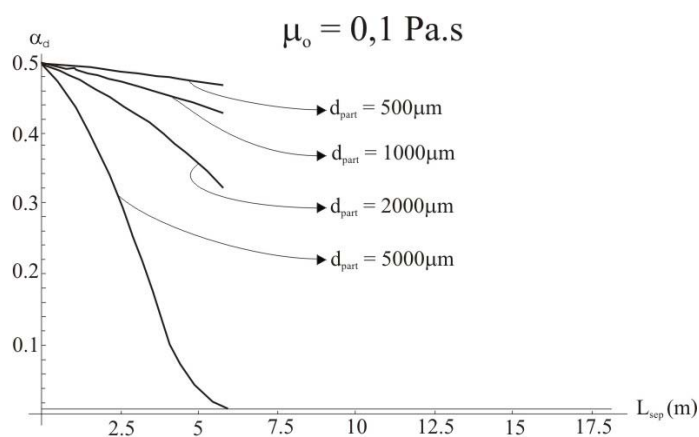


Figura 5.17 Desenvolvimento da fração volumétrica da água emulsãoada no óleo com viscosidade de 0,1 Pa.s

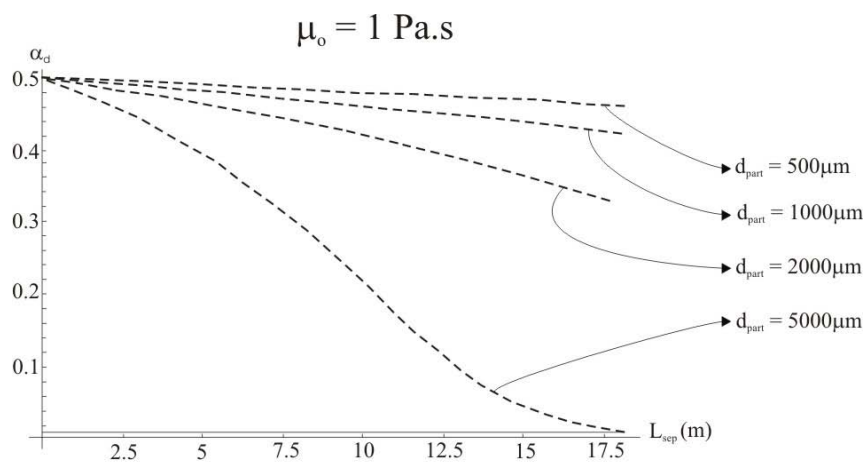


Figura 5.18 Desenvolvimento da fração volumétrica da água emulsãoada no óleo com viscosidade de 1 Pa.s

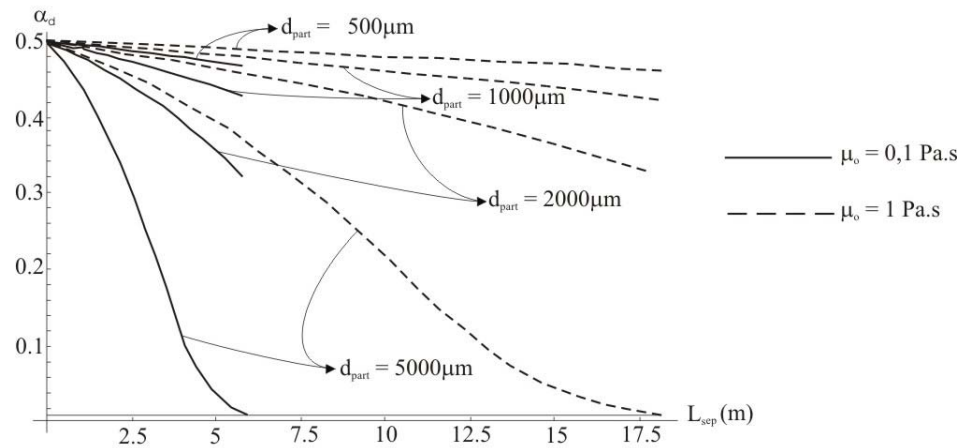


Figura 5.19 Comparação entre o desenvolvimento da fração volumétrica da água emulsificada no óleo com viscosidades diferentes

5.3.4 Variação da fração volumétrica de acordo com a densidade

Com a variação da densidade do óleo, observou-se uma diminuição do tamanho do separador não tão significativa quanto a variação da viscosidade. São mostrados os gráficos nas Figura 5.20 a Figura 5.22. Sendo a Figura 5.20 curvas do desenvolvimento da fração volumétrica no óleo com densidade de 950kg/m^3 e a Figura 5.21 com densidade de 900kg/m^3 . Na Figura 5.22, o gráfico mostra uma comparação entre as anteriores. Cada gráfico tem o comprimento do separador e a fração volumétrica da água na abscissa e na ordenada, respectivamente.

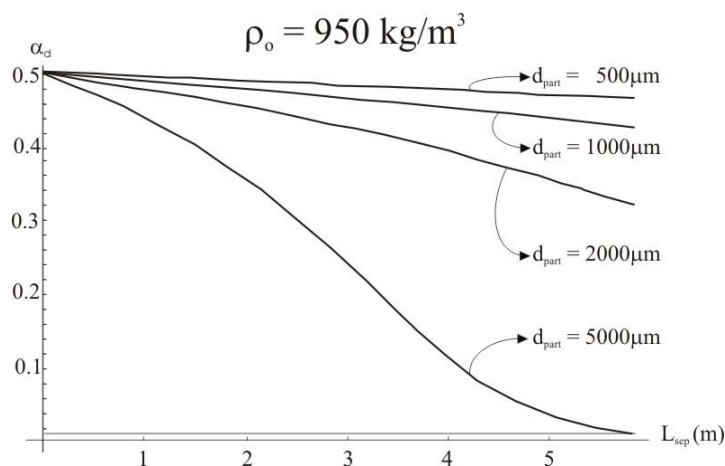


Figura 5.20 Desenvolvimento da fração volumétrica da água no óleo com densidade de 950kg/m^3

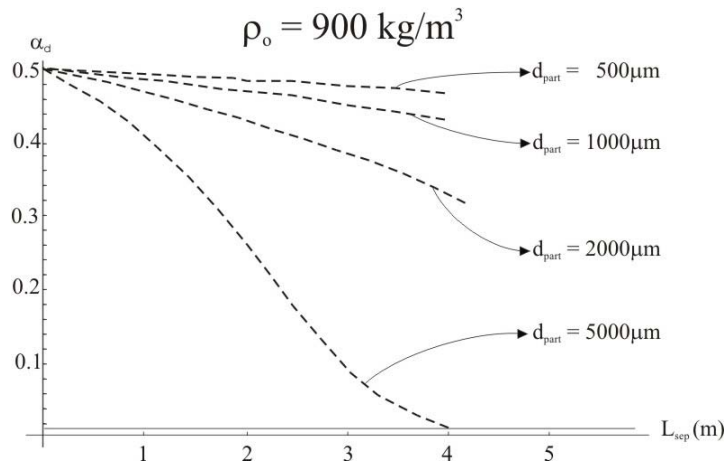


Figura 5.21 Desenvolvimento da fração volumétrica da água no óleo com densidade de 900 kg/m^3

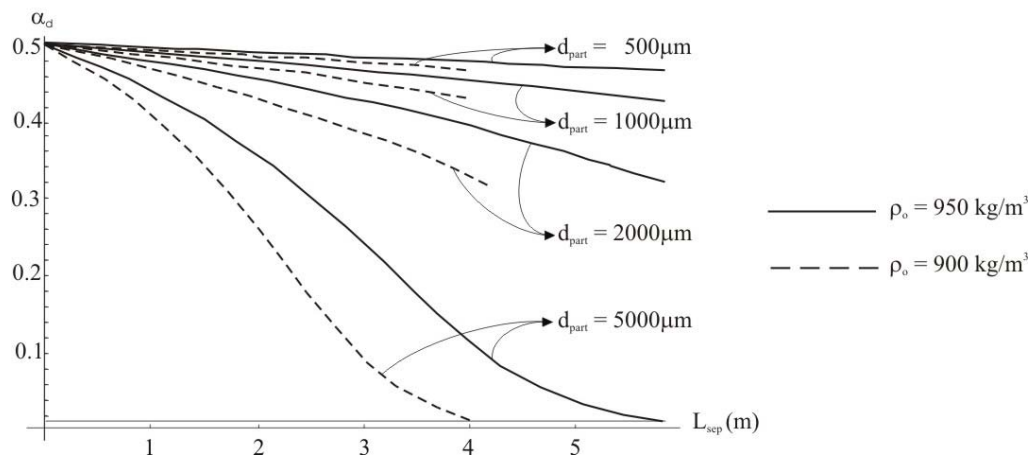


Figura 5.22 Comparação entre o desenvolvimento da fração volumétrica da água no óleo com densidades diferentes

5.3.5 Variação do tempo de retenção de acordo com a fração volumétrica

Para a análise do comportamento do tempo de retenção necessário para a separação entre as fases óleo/água de acordo com a fração volumétrica foram gerados gráficos apresentados nas Figura 5.23 a Figura 5.25, sendo que as duas primeiras referem-se a frações volumétricas distintas de 10% e 30%, respectivamente, e a última é uma síntese entre as duas primeiras. O diâmetro da

partícula de 5000 μm foi plotado, porém não aparece por ter um tempo de retenção das partículas muito pequeno. Cada gráfico tem a viscosidade do óleo e o tempo de retenção na abscissa e na ordenada, respectivamente.

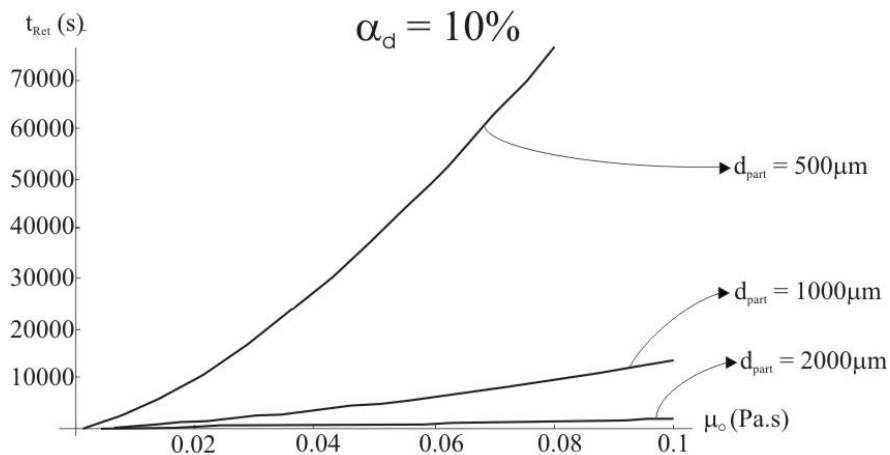


Figura 5.23 Curvas com diferentes diâmetros a 10% de água

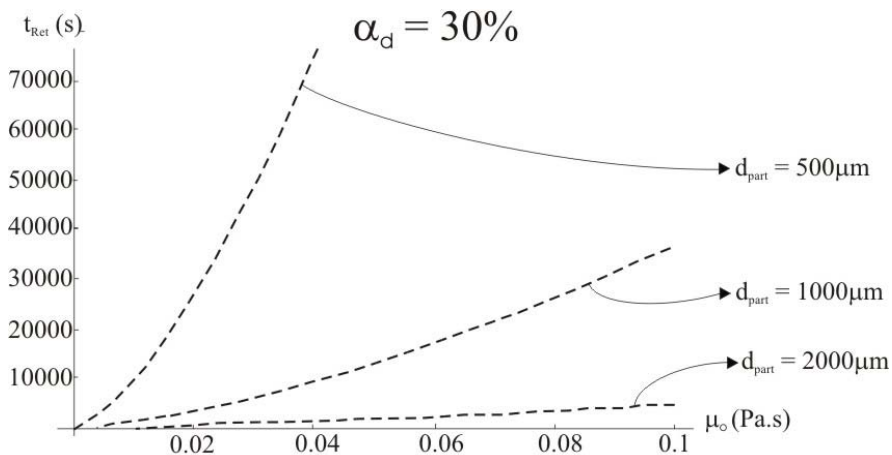


Figura 5.24 Curvas com diferentes diâmetros a 30% de água

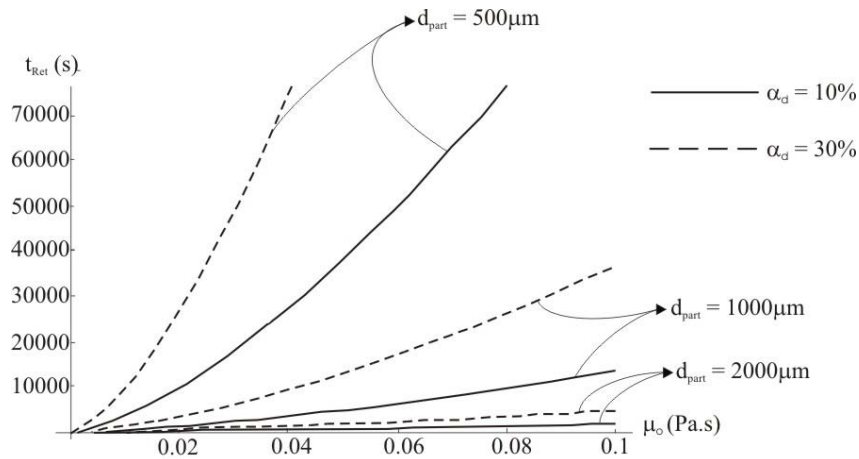


Figura 5.25 Comparação entre as curvas com diferentes frações de água dispersa

De acordo com esses gráficos, nota-se que o diâmetro da partícula influencia consideravelmente no tempo de retenção do separador. À medida que o diâmetro da partícula diminui, eleva-se o tempo de retenção. Na Figura 5.25 conclui-se também que, independente do diâmetro da partícula, à medida que a dispersão de água aumenta na fase contínua, no caso o óleo, o tempo de retenção do vaso separador tende a aumentar.

5.3.6 Variação do tempo de retenção de acordo com a densidade do óleo

Com a variação da densidade do óleo, observou-se uma visível diminuição do tamanho do separador, como mostram os gráficos das

Figura 5.26 a Figura 5.28 sendo a

Figura 5.26 curvas do desenvolvimento do tempo de retenção do óleo com densidade de 950 kg/m^3 e a Figura 5.27, com densidade de 900 kg/m^3 . Já a Figura 5.28 faz a comparação entre as anteriores. Cada gráfico tem a viscosidade do óleo e o tempo de retenção na abscissa e na ordenada, respectivamente.

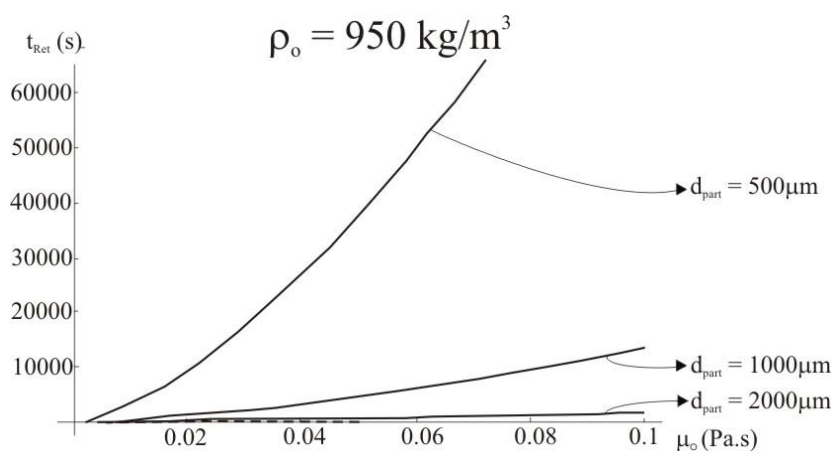


Figura 5.26 Tempo de retenção em função da viscosidade para óleo com densidade de 950 kg/m^3

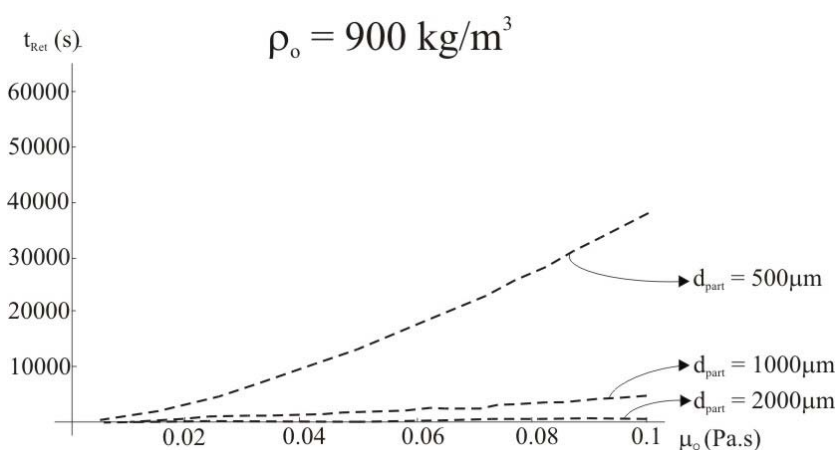


Figura 5.27 Tempo de retenção em função da viscosidade para óleo com densidade de 900 kg/m^3

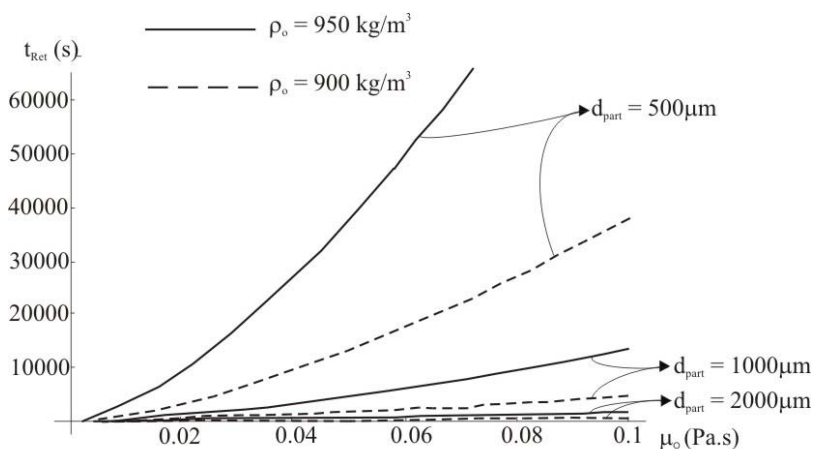


Figura 5.28 Tempo de retenção em função da viscosidade para óleos com densidades diferentes

De acordo com esses gráficos, nota-se a significativa influência do diâmetro da partícula: quando esta aumenta, o tempo de retenção se reduz muito, reduzindo o volume do separador para uma dada vazão de óleo a ser processado. E, na Figura 5.28 observa-se que o tempo de retenção diminui com a diminuição da densidade do óleo, o que se explica pela maior diferença de densidades entre a partícula de água e o óleo, a qual facilita a segregação gravitacional da água.

Por fim, deve-se observar que esses tempos de retenção são muito superiores aos usualmente recomendados como critério de projeto para separadores de emulsões de água em óleo leve. Por exemplo, é comum adotar-se um tempo de retenção de 2 a 30 minutos para projetar um separador onde partículas são de 500 μm . O gráfico da Figura 5.28 mostra que, se a densidade do óleo for 950 kg/m^3 , tal critério só seria satisfeito reduzindo-se a viscosidade do óleo para valores inferiores a cerca de $0,01 \text{ Pa.s}$ (10 cP), o que pode ser obtido através do aquecimento do óleo.

Capítulo 6

Conclusões e Sugestões

6.1 Conclusões

Os óleos pesados possuem agentes emulsificantes naturais, que têm uma participação muito grande para a formação e estabilidade de emulsões de água em óleo, as quais, uma vez formadas, são de difícil separação. Esta última também é bastante influenciada pela temperatura, que atua na redução da viscosidade da fase óleo.

Este trabalho teve por objetivo a investigação literária e experimental da emulsão água em óleo pesado, revisando técnicas para sua geração e separação, pretendendo-se definir estratégias para a separação eficaz desses fluidos e critérios de projeto de vasos separadores trifásicos, implementando-os em programa de computador, a fim de compará-los a partir de dados de entrada e dos experimentos. Para tanto, foram realizados tais experimentos com um óleo de densidade 0,966 à 20°C. Deve-se ressaltar as novidades na metodologia, sobretudo sabendo da ausência de estudos similares para óleos pesados.

A partir dos experimentos realizados, obtivemos as seguintes conclusões:

- as emulsões comportam-se, em relação a sua reologia, como fluido tixotrópico, onde o aumento das histereses a altas concentrações e altas temperaturas e as descontinuidades das curvas indicam a não homogeneidade do fluido podendo ter ocorrido a separação das fases;

- a partícula de água emulsionada mostrou-se esférica, imóvel contrastando com a bolha de gás a qual não apresentou uma forma definida, movimentando-se em direção ao contorno da lamínula;
- foi desenvolvido um novo modelo físico para o cálculo do diâmetro máximo de partículas de água dispersas em óleo pesado ultraviscoso;
- o modelo de viscosidade de emulsão de água em óleo pesado, proposto por Pal (2000) teve o melhor desempenho para baixas temperaturas, enquanto que o modelo de Ronningsen (1995) se adaptou melhor a temperaturas mais altas; a correlação de Ishii *et al* (1979) teve comportamento mediano para toda a faixa de concentrações e temperaturas investigadas neste trabalho.

O programa de dimensionamento foi elaborado para vasos separadores horizontais trifásicos por possibilitar um maior número de estágios, maior tempo de retenção e maior área superficial de interface, o qual permite um maior controle sobre as variáveis do processo de separação e uma melhor separação entre as fases.

Os efeitos de diversas variáveis foram simulados e as conclusões obtidas podem ser assim sintetizadas:

- o tamanho do separador aumenta consideravelmente com a diminuição do diâmetro de partícula e com o aumento da concentração de água emulsionada no óleo;
- há um aumento do tamanho do separador causado também pelo aumento da viscosidade e da densidade da fase contínua, no caso o óleo;

- o tempo de retenção aumenta com a diminuição do diâmetro de partícula, com o aumento da concentração de água emulsionada no óleo e com o aumento da densidade do óleo, independentemente.

6.2 Sugestões

A partir das conclusões acima, as seguintes sugestões podem ser feitas para a continuidade da pesquisa:

- investigar a temperatura ótima para se lograr uma separação eficaz com o mínimo de perda de componentes leves e tamanhos de separador factíveis;
- pesquisar quais agentes emulsificantes podem contribuir para uma separação eficaz entre as fases;
- testar a modelagem desenvolvida para os separadores gravitacionais com dados de campo
- desenvolver novas geometrias para separadores trifásicos, por exemplo, com dispositivo de entrada que já realizem uma pré-separação
- testar a correlação proposta para tamanho de partícula de água dispersa em óleo pesado, usando dados de campo.

Referências Bibliográficas

Apostila Petrobrás escrita por SALAGER, Jean-Louis. Teoria de Emulsões e sua Aplicação na Indústria de Petróleo. CENPES. Rio de Janeiro.1986.

Apostila Petrobrás escrita por MACHADO, José Carlos Vieira. Dispersão, o estado coloidal, emulsões, espumas. Setor de Ensino da Bahia. Salvador.

AMUI, S.. Reologia. Divisão de Ensino – DIVEN PETROBRAS. 1979.

ARNOLD, K.; STEWART, M.. Surface Production Operations. Vol. 1. Houston, Texas. 1986.

ARNOLD, K. E.; KOSZELA, P. J.. Droplet-Sttling vs. Retention-Time Theories for Sizing Oil/Water Separator. SPE Production Engineering. 1990.

BANNWART, A. C.; RODRIGUEZ, O. M. H.; CARVALHO, C.H.. Multiphase Flow Patterns in Heavy Oil Production and Transportation. Revista Petro & Química. N. 240. 2002.

BARNES, H. A.; HUTTON, J. F.; WALTERS, K. An Introduction to Rheology. Elsevier Science Publishers. New York. 1989.

BERGLES, A. E.; COLLIER, J. G.; DELHAYE, J. M.; HEWITT, G. F.; MAYINGER, F. Two-Phase Flow and Heat Transfer in the Power and Process Industries. McGraw Hill. 1981.

BRODKEY, R. S. The Phenomena of Fluid Motions. Addison-Wesley Press. 1967.

- BROUGHTON, G.; SQUIRES, L. The Viscosity of Oil-Water emulsions. J. Phys. Chem. 42. 1938.
- FOX, R. W.; McDONALD, A. T. Introdução à Mecânica dos Fluidos. Livros Técnicos e Científicos Editora S.A.. Rio de Janeiro. 1998.
- GONÇALVES, M. A. L.; CARVALHO, C. H. M.; CAMARGO, R. M. T.; FERREIRA, L. V.; RIBEIRO, G. A. S. M. Cálculo do Escoamento de Emulsões – Reproduções em Laboratório de Situações de Campo. CENPES. Rio de Janeiro. 2003.
- HOLMAN, J. P. Heat Transfer. International Student Edition. 1981.
- ISHII, M; ZUBER, N. Drag Coefficient and Relative Velocity in Bubbly, Droplet or Particulate Flows. AIChEJ, Volume 25, Nº 5. 1979.
- JOHNSEN, E. E.; RONNINGSEN, H. P.; Viscosity of ‘live’ water-in-crude-oil emulsions: experimental work and validation of correlations. Journal of Petroleum Science and Engineering, Nº 38, pág. 23 – 36. 2003.
- MACHADO, J. C. V. Reologia e Escoamento de Fluidos – Ênfase na Indústria de Petróleo. Editora Interciência. Rio de Janeiro. 2002.
- MANNING, F. S.; THOMPSON, R. E. Oilfield Processing. Penn Well Publishing Company. University of Tulsa. Tulsa, Oklahoma. 1995.
- MOONEY, M. The Viscosity of a Concentrated Suspension of Spherical Particles. J. Colloid Sci. Vol. 6. 1951.

- MOVAFAGHIAN, S.; JAUA-MARTURET, J. A.; MOHAN, R. S.; SHOHAM, O.; KOUBA, G. E. The Effects of Geometry, Fluid Properties and Pressure on the Hydrodynamics of Gas-Liquid Cylindrical Cyclone Separators. International Journal of Multiphase Flow. USA. 2000.
- NAVARRO, R. F. Fundamentos de Reologia de Polímeros. Editora da Universidade de Caxias do Sul. Rio Grande do Sul. 1997.
- OLIVEIRA, R. C. G.; CARVALHO, C. H. M. Influência do tipo de emulsão sobre o escoamento e o processo de deposição orgânica de petróleo. Boletim Técnico da PETROBRAS. Rio de Janeiro, 1998.
- PAL, R. Effect of Droplet Size on the Rheology of Emulsions. AIChE J. 1996.
- PAL, R.; RHODES, E. Viscosity Concentration Relationships for emulsions. J. Rheol. 1989.
- PAL, R.; RHODES, E. A Novel Viscosity Correlation for Non-Newtonian Concentrated Emulsion. J. Colloid Interface Sci. 1985.
- PAL, R. Viscosity Concentration equation for emulsions of nearly spherical. J. Colloid Interface Sci. 2000.
- Portaria Conjunta ANP-INMETRO N°01, de 19 de junho de 2000, publicada no DOU de 20 de junho de 2000.
- RAMALHO, J. B. V. S. Test for Evaluation of the Main Parameters Required to Dimension Three-Phase Gravitational Separators. CENPES PETROBRAS. Rio de Janeiro. 2000.
- RONNINGSEN, H. P. Correlations for Predicting Viscosity of W/O-Emulsions Based on North Sea Cruds Oils. Proc. SPE Int. Symp. Oil Field Chem. Houston. TX. USA. 1995.

- ROSA, J. J. Desenvolvimento de um Novo Processo de Tratamento de Águas Oleosas – Processo FF. XIX Prêmio Jovem Cientista – Água – Fonte da Vida. Porto Alegre. RS. 2003.
- SALAGER, J.L. Teoria de Emulsões e sua Aplicação na Indústria de Petróleo. CENPES. Rio de Janeiro. 1956.
- SCHRAMM, G. A Practical Approach to Rheology and Rheometry. Gebrueder HAAKE GmbH, Karlsruhe. Germany. 1994.
- SEVIK, M.; PARK, S. H. The Splitting of Drops and Bubbles by Turbulent Fluid Flow. Journal of Fluids Engineering. 1973.
- SKELLAND, A. H. P. Non Newtonian Flow and Heat Transfer. John Wiley & Sons. EUA. 1967.
- TALHAVINI, I. C. N. Formação e Estabilidade de Espumas e Emulsões Utilizando Planejamento Fatorial. <http://pcserver.iqm.unicamp.br/~wloh/exp/exp2/exp2.htm#objetivo> .
- THOMAS, J. E.. Fundamentos de Engenharia de Petróleo. Editora Interciência Ltda. Rio de Janeiro. 2001.
- WILKISON, D.; WALDIE, B.; NOR, M. I. M.; LEE, H. Y.. Blaffe Plate Configurations to Enhance Separation in Horizontal Primary Separators. Chemical Engineering Journal 77. Heriot-Watt University. 2000.
- ZEMEL, B.; BOWMAN, R.W. Residence Time Distribution in Gravity Oil-Water Separations. Journal of Petroleum Technology. 1978.

Anexo 1

Dados Experimentais Coletados pelo Reômetro

Amostra 10%
Tempo de Agitação 10 min
Velocidade da Agitação 16000 rpm
Substância Óleo da Fazenda Alegre
Operador Rosi
Spindle ZA15

Experimento 1 Temperatura 10°C					Experimento 2 Temperatura 20°C				
Tensão[Pa]	Taxa[1/s]	μ [Pa.s]	t[min]	Temp[°C]	Tensão[Pa]	Taxa[1/s]	μ [Pa.s]	t[min]	Temp[°C]
8.155	0	0	0	9.6	0	0	0	0	20
62.85	0.388	161.9	0.1	9.7	111.4	1.716	64.95	0.1	19.9
134.2	0.799	168	0.21	9.7	245.1	3.651	67.14	0.21	20
215.1	1.192	180.5	0.32	9.6	369.6	5.435	68	0.31	20
300.7	1.647	182.6	0.42	9.6	512.3	7.331	69.88	0.42	20.1
405.3	2.059	196.9	0.52	9.7	646.7	9.242	69.97	0.52	20
530	2.484	213.4	0.63	9.6	787	11.07	71.12	0.63	20
638.5	2.869	222.5	0.73	9.6	933.6	12.95	72.11	0.73	19.9
755.8	3.289	229.8	0.84	9.7	1074	14.75	72.86	0.84	19.9
884.3	3.661	241.6	0.95	9.6	1216	16.61	73.2	0.95	20
1021	4.15	246	1.05	9.6	1359	18.51	73.39	1.05	20
1162	4.589	253.2	1.15	9.6	1485	20.33	73.06	1.15	19.9
1296	5.02	258.3	1.26	9.6	1635	22.12	73.91	1.26	19.9
1448	5.445	266	1.37	9.6	1774	24.04	73.81	1.37	20
1590	5.86	271.3	1.47	9.6	1914	25.96	73.7	1.47	19.9
1741	6.232	279.3	1.58	9.5	2060	27.72	74.33	1.58	20
1900	6.667	285.1	1.68	9.6	2199	29.33	75	1.68	19.9
2045	7.077	288.9	1.79	9.6	2332	31.13	74.9	1.79	20

2191	7.468	293.3	1.89	9.7	2484	33.09	75.07	1.89	20
2341	7.903	296.2	2	9.6	2621	34.75	75.43	2	20
2355	7.957	296	2	9.6	2630	34.9	75.35	2	19.9
2310	7.542	306.3	2.1	9.7	2520	32.99	76.37	2.1	19.9
2226	7.121	312.6	2.21	9.7	2414	31.23	77.28	2.21	19.9
2154	6.711	321	2.32	9.7	2290	29.37	77.97	2.32	19.9
2082	6.266	332.2	2.42	9.6	2169	27.85	77.88	2.42	20
1937	5.826	332.4	2.52	9.6	2040	25.96	78.58	2.52	20
1841	5.42	339.7	2.63	9.6	1906	24.2	78.78	2.63	19.9
1744	5.015	347.7	2.74	9.6	1770	22.27	79.49	2.74	19.9
1637	4.614	354.7	2.84	9.6	1643	20.46	80.32	2.84	19.9
1504	4.174	360.3	2.95	9.6	1508	18.55	81.32	2.95	19.9
1378	3.754	367.1	3.05	9.5	1358	16.65	81.54	3.05	19.9
1249	3.328	375.2	3.16	9.6	1221	14.86	82.21	3.16	19.9
1129	2.923	386.2	3.26	9.6	1080	13.01	82.99	3.26	20
969.3	2.477	391.4	3.37	9.7	936.5	11.24	83.35	3.37	20
820.8	2.011	408.2	3.47	9.6	788	9.247	85.21	3.47	19.9
685.4	1.617	423.8	3.58	9.6	636.4	7.4	86.01	3.58	19.9
535.8	1.193	449.1	3.68	9.7	487.4	5.572	87.47	3.68	19.8
375	0.818	458.4	3.79	9.6	327.5	3.68	89	3.79	20
219.1	0.383	572.5	3.89	9.6	174	1.794	97.02	3.89	19.9
47.6	0	0	4	9.5	13.37	0	0	4	19.9

Experimento 3					Experimento 4				
Temperatura 30°C					Temperatura 40°C				
Tensão[Pa]	Taxa[1/s]	μ [Pa.s]	t[min]	Temp[°C]	Tensão[Pa]	Taxa[1/s]	μ [Pa.s]	t[min]	Temp[°C]
0.011	0	0	0	30.3	4.864	0	0	0	40.6
120.6	5.117	23.57	0.1	30.3	126.1	15.57	8.102	0.1	40.6
249.3	10.43	23.89	0.21	30.3	250.4	31.18	8.029	0.21	40.5
369.9	15.56	23.77	0.31	30.4	365.6	46.63	7.841	0.31	40.6
498.4	21.08	23.65	0.42	30.3	489.8	62.61	7.822	0.42	40.6
622.5	26.41	23.57	0.52	30.4	610.5	78.54	7.773	0.52	40.6
745.7	31.38	23.77	0.63	30.3	726.3	94.38	7.696	0.63	40.5
865	36.51	23.69	0.73	30.2	838.2	109.9	7.629	0.73	40.5
981.8	41.84	23.47	0.84	30.4	961.9	125.8	7.649	0.84	40.5
1105	47.07	23.48	0.95	30.2	1069	141.7	7.544	0.95	40.5

1222	52.49	23.28	1.05	30.2	1190	157.5	7.554	1.05	40.5
1338	57.67	23.2	1.15	30.3	1287	173	7.44	1.15	40.4
1451	62.95	23.06	1.26	30.3	1398	189	7.401	1.26	40.5
1567	68.18	22.99	1.37	30.3	1504	204.9	7.34	1.37	40.5
1685	73.61	22.89	1.47	30.3	1609	220.8	7.286	1.47	40.5
1789	78.59	22.76	1.58	30.2	1715	236.2	7.259	1.58	40.4
1905	83.87	22.71	1.68	30.2	1820	252.1	7.219	1.68	40.4
2015	89.3	22.56	1.79	30.2	1920	268	7.166	1.79	40.4
2121	94.57	22.42	1.89	30.2	2032	283.9	7.156	1.89	40.5
2225	99.76	22.3	2	30.2	2124	299.3	7.098	2	40.5
2234	99.85	22.37	2	30.3	2116	299.8	7.057	2	40.5
2126	94.82	22.43	2.1	30.3	2029	284.5	7.134	2.1	40.4
2022	89.44	22.61	2.21	30.2	1915	268.4	7.134	2.21	40.4
1909	84.26	22.66	2.32	30.3	1802	252.6	7.133	2.32	40.4
1797	79.03	22.73	2.42	30.2	1702	237.3	7.172	2.42	40.5
1683	73.7	22.84	2.52	30.2	1593	221.3	7.199	2.52	40.5
1567	68.33	22.94	2.63	30.2	1497	205.5	7.286	2.63	40.5
1459	63.1	23.13	2.74	30.2	1387	189.4	7.32	2.74	40.4
1344	57.87	23.23	2.84	30.2	1270	174	7.299	2.84	40.5
1229	52.69	23.33	2.95	30.2	1160	158.2	7.334	2.95	40.4
1110	47.41	23.41	3.05	30.2	1055	142.3	7.413	3.05	40.5
995	42.08	23.64	3.16	30.2	946.3	126.2	7.495	3.16	40.5
875.7	36.8	23.79	3.26	30.3	837.8	110.9	7.554	3.26	40.5
757.4	31.57	23.99	3.37	30.2	717.5	95.06	7.548	3.37	40.4
634.3	26.53	23.9	3.47	30.3	602.2	79.13	7.61	3.47	40.4
514	21.26	24.18	3.58	30.2	487.3	63.15	7.717	3.58	40.4
390.4	16.07	24.29	3.68	30.3	371.5	47.85	7.764	3.68	40.4
268.5	10.76	24.96	3.79	30.2	254.4	31.92	7.97	3.79	40.5
138.2	5.254	26.3	3.89	30.1	133.3	16.07	8.298	3.89	40.4
6.707	0	0	4	30.2	9.556	0.088	108.6	4	40.5

Experimento 5 Temperatura 50°C					Experimento 6 Temperatura 60°C				
Tensão[Pa]	Taxa[1/s]	μ [Pa.s]	t[min]	Temp[°C]	Tensão[Pa]	Taxa[1/s]	μ [Pa.s]	t[min]	Temp[°C]
0.483	0	0	0	49.9	5.995	0	0	0	62
145.6	15.55	9.368	0.1	49.9	54.87	15.51	3.537	0.1	62.1

267.6	31.23	8.568	0.21	49.8	96.76	31.18	3.103	0.21	62
354.6	46.68	7.597	0.31	49.9	130.4	46.63	2.796	0.31	62.1
432.3	62.61	6.905	0.42	49.9	161.8	62.61	2.584	0.42	62.1
498.3	78.54	6.344	0.52	49.9	187.8	78.54	2.391	0.52	62
557.4	94.53	5.897	0.63	49.8	210.2	94.38	2.227	0.63	62
608.7	109.9	5.54	0.73	50	230.8	109.8	2.101	0.73	62
655.7	125.7	5.216	0.84	50	249.9	125.8	1.986	0.84	62
699.2	141.7	4.933	0.95	49.9	268.3	141.6	1.895	0.95	62.1
738.8	157.5	4.69	1.05	49.8	286.7	157.6	1.819	1.05	62
781.3	173.1	4.514	1.15	49.9	299.7	172.9	1.733	1.15	62.1
818.4	189	4.331	1.26	50	315.8	188.9	1.672	1.26	62.1
857.5	204.9	4.185	1.37	49.9	331.9	204.7	1.621	1.37	62.1
899.6	220.8	4.075	1.47	49.9	347.1	220.6	1.573	1.47	62.1
927.9	236.2	3.928	1.58	49.8	362.7	236.1	1.536	1.58	62.1
969.9	252	3.849	1.68	49.9	376.9	252	1.496	1.68	62.1
1002	268	3.739	1.79	50	393.5	267.9	1.469	1.79	62
1038	283.8	3.657	1.89	49.9	408.2	284.1	1.437	1.89	62.1
1071	299	3.581	2	49.9	423.8	299.2	1.417	2	62.1
1080	299.7	3.603	2	49.9	422.4	299.6	1.41	2	62.1
1006	284.4	3.538	2.1	49.9	397.9	284.6	1.398	2.1	62.1
943.1	268.4	3.514	2.21	49.9	369.6	268.7	1.376	2.21	62.1
878	252.6	3.476	2.32	49.9	345.6	252.5	1.369	2.32	62.1
814.5	237.2	3.433	2.42	50	322.2	237.1	1.359	2.42	62
757.8	221.4	3.423	2.52	49.9	298.2	221.2	1.348	2.52	62.1
694.3	205.4	3.38	2.63	49.9	278	205.5	1.353	2.63	62
635.6	189.4	3.356	2.74	49.9	256.5	189.5	1.354	2.74	62.1
588.7	174.1	3.381	2.84	49.9	234.4	174	1.347	2.84	62
532	158.3	3.361	2.95	49.8	213	158.1	1.347	2.95	62
472.9	142.4	3.321	3.05	49.9	192.3	142.3	1.352	3.05	62.2
419.6	126.3	3.321	3.16	49.9	169.4	126.3	1.341	3.16	62
366.3	110.8	3.306	3.26	49.8	149.9	110.9	1.351	3.26	62.1
316	95.06	3.324	3.37	49.9	128.5	95.06	1.351	3.37	62.1
266.4	79.03	3.371	3.47	49.8	107.5	79.13	1.359	3.47	62
211.3	63.15	3.346	3.58	49.9	86.69	63.15	1.373	3.58	62
161.5	47.9	3.372	3.68	49.8	67.04	47.9	1.4	3.68	62
107.4	31.92	3.364	3.79	49.8	46.51	31.82	1.462	3.79	62.1
54.25	16.06	3.378	3.89	49.9	26.67	16.02	1.665	3.89	62

1.656	0.127	13.03	4	49.9	6.337	0.137	46.3	4	62.1
-------	-------	-------	---	------	-------	-------	------	---	------

Amostra 20%
Tempo de Agitação 10 min
Velocidade da Agitação 16000 rpm
Substância Óleo da Fazenda Alegre
Operador Rosi
Spindle ZA15

Experimento 1 Temperatura 10°C					Experimento 2 Temperatura 20°C				
Tensão[Pa]	Taxa[1/s]	μ[Pa.s]	t[min]	Temp[°C]	Tensão[Pa]	Taxa[1/s]	μ[Pa.s]	t[min]	Temp[°C]
1.804	0	0	0	9.7	11.08	0	0	0	19.9
84.16	0.309	272	0.1	9.6	156.2	1.213	128.8	0.1	19.9
183.8	0.685	268.4	0.21	9.7	306.8	2.57	119.4	0.21	19.9
288.4	1.042	276.9	0.31	9.7	446.6	3.842	116.2	0.31	19.9
412.9	1.515	272.5	0.42	9.7	611.3	5.181	118	0.42	19.9
527.8	1.789	295	0.52	9.6	753	6.505	115.8	0.52	19.9
657.8	2.168	303.4	0.63	9.6	900.1	7.805	115.3	0.63	19.8
786.3	2.493	315.4	0.73	9.7	1036	9.13	113.5	0.73	19.9
949.6	2.869	331	0.84	9.6	1178	10.4	113.3	0.84	19.9
1091	3.284	332.1	0.95	9.6	1329	11.78	112.8	0.95	19.8
1243	3.646	341	1.05	9.6	1472	13.07	112.6	1.05	19.8
1360	3.891	349.5	1.15	9.5	1599	14.39	111.1	1.15	19.8
1513	4.35	347.7	1.26	9.6	1740	15.69	110.9	1.26	19.8
1654	4.692	352.6	1.37	9.7	1879	16.99	110.6	1.37	19.9
1831	5.098	359.1	1.47	9.5	2017	18.35	110	1.47	19.8
1977	5.44	363.4	1.58	9.6	2136	19.59	109	1.58	19.9
2113	5.831	362.3	1.68	9.6	2283	20.95	109	1.68	19.8
2245	6.202	362	1.79	9.7	2411	22.25	108.4	1.79	19.9
2387	6.554	364.3	1.89	9.6	2556	23.6	108.3	1.89	19.8
2495	6.921	360.4	2	9.7	2673	24.84	107.6	2	19.9
2502	6.901	362.5	2	9.6	2683	24.93	107.6	2	19.8
2438	6.544	372.5	2.1	9.6	2563	23.67	108.3	2.1	19.8
2330	6.237	373.6	2.21	9.6	2427	22.29	108.9	2.21	19.8
2248	5.831	385.5	2.32	9.5	2331	20.98	111.1	2.32	19.8
2220	5.499	403.8	2.42	9.6	2209	19.73	112	2.42	19.8

2073	5.108	405.8	2.52	9.6	2078	18.34	113.3	2.52	19.8
1979	4.756	416.2	2.63	9.6	1952	17.01	114.8	2.63	19.8
1842	4.326	425.7	2.74	9.6	1830	15.74	116.2	2.74	19.9
1725	3.988	432.6	2.84	9.6	1690	14.43	117.1	2.84	19.8
1645	3.617	454.8	2.95	9.5	1565	13.13	119.2	2.95	19.8
1529	3.226	473.9	3.05	9.6	1425	11.77	121	3.05	19.8
1380	2.923	472	3.16	9.6	1284	10.46	122.7	3.16	19.8
1237	2.563	482.6	3.26	9.6	1139	9.208	123.7	3.26	19.9
1092	2.179	501.2	3.37	9.6	993	7.845	126.6	3.37	19.8
919.7	1.811	507.9	3.47	9.5	850.3	6.51	130.6	3.47	19.8
789.2	1.477	534.5	3.58	9.6	693.9	5.196	133.6	3.58	19.8
608.4	1.101	552.7	3.68	9.6	532.1	3.978	133.7	3.68	19.9
422.7	0.723	584.7	3.79	9.6	362	2.612	138.6	3.79	19.9
217.6	0.304	716.9	3.89	9.6	195.4	1.299	150.4	3.89	19.8
8.5	0	0	4	9.5	15.53	0	0	4	19.8

Experimento 3					Experimento 4				
Temperatura 30°C					Temperatura 40°C				
Tensão[Pa]	Taxa[1/s]	μ [Pa.s]	t[min]	Temp[°C]	Tensão[Pa]	Taxa[1/s]	μ [Pa.s]	t[min]	Temp[°C]
0	0	0	0	29.6	2.466	0	0	0	40.6
181.9	4.663	39.01	0.1	29.5	221.8	15.52	14.29	0.1	40.4
351.7	9.428	37.3	0.21	29.6	427	31.23	13.67	0.21	40.5
524.7	14.18	37	0.31	29.6	615.1	46.63	13.19	0.31	40.5
688.5	18.91	36.4	0.42	29.6	798.9	62.61	12.76	0.42	40.6
861	23.71	36.31	0.52	29.6	976.8	78.69	12.41	0.52	40.5
1013	28.58	35.46	0.63	29.5	1148	94.43	12.16	0.63	40.6
1168	32.89	35.51	0.73	29.4	1302	109.9	11.85	0.73	40.5
1320	37.63	35.09	0.84	29.5	1452	125.8	11.55	0.84	40.4
1454	42.47	34.23	0.95	29.5	1595	141.6	11.26	0.95	40.5
1619	47.31	34.22	1.05	29.6	1710	157.5	10.86	1.05	40.4
1766	51.81	34.08	1.15	29.5	1868	173	10.8	1.15	40.5
1900	56.55	33.59	1.26	29.5	1986	188.9	10.52	1.26	40.4
2054	61.34	33.49	1.37	29.5	2091	204.8	10.21	1.37	40.5
2181	66.23	32.93	1.47	29.5	2230	220.7	10.1	1.47	40.5
2317	70.82	32.72	1.58	29.6	2339	236.2	9.904	1.58	40.5
2446	75.56	32.37	1.68	29.6	2432	252	9.654	1.68	40.4

2598	80.4	32.31	1.79	29.6	2516	267.9	9.39	1.79	40.4
2722	85.09	31.99	1.89	29.5	2626	283.9	9.249	1.89	40.5
2844	89.74	31.7	2	29.5	2708	299.3	9.047	2	40.5
2839	89.93	31.57	2	29.5	2744	299.8	9.155	2	40.4
2716	85.24	31.87	2.1	29.6	2599	284.6	9.135	2.1	40.4
2597	80.55	32.24	2.21	29.6	2485	268.5	9.255	2.21	40.4
2446	75.66	32.33	2.32	29.5	2349	252.7	9.293	2.32	40.4
2328	71.16	32.72	2.42	29.5	2210	237.3	9.313	2.42	40.5
2193	66.42	33.01	2.52	29.6	2131	221.3	9.632	2.52	40.5
2063	61.68	33.45	2.63	29.6	1988	205.4	9.68	2.63	40.5
1913	56.79	33.68	2.74	29.6	1848	189.5	9.754	2.74	40.5
1771	52.15	33.96	2.84	29.5	1741	174.1	9.999	2.84	40.5
1643	47.41	34.66	2.95	29.5	1579	158.2	9.986	2.95	40.5
1495	42.62	35.08	3.05	29.5	1450	142.4	10.18	3.05	40.5
1339	37.83	35.41	3.16	29.6	1312	126.3	10.38	3.16	40.4
1183	33.14	35.7	3.26	29.6	1169	110.8	10.55	3.26	40.4
1032	28.54	36.16	3.37	29.5	1043	95.01	10.98	3.37	40.5
869.8	23.89	36.41	3.47	29.6	875.6	79.13	11.07	3.47	40.4
709	19.01	37.29	3.58	29.6	713.4	63.15	11.3	3.58	40.5
543.3	14.43	37.64	3.68	29.6	541.8	47.85	11.32	3.68	40.5
379.1	9.555	39.67	3.79	29.5	376.1	31.92	11.78	3.79	40.4
192.6	4.795	40.16	3.89	29.5	190.1	16.04	11.85	3.89	40.4
0.636	0	0	4	29.5	7.402	0.127	58.25	4	40.5

Experimento 5 Temperatura 50°C					Experimento 6 Temperatura 60°C				
Tensão[Pa]	Taxa[1/s]	μ [Pa.s]	t[min]	Temp[°C]	Tensão[Pa]	Taxa[1/s]	μ [Pa.s]	t[min]	Temp[°C]
0.83	0	0	0	50	0	0	0	0	61.2
97.31	15.55	6.257	0.1	50	61.52	15.55	3.957	0.1	61.3
190.7	31.28	6.097	0.21	50	125.5	31.23	4.02	0.21	61.2
273.9	46.63	5.875	0.31	50	174.1	46.63	3.734	0.31	61.3
354.6	62.56	5.669	0.42	50.1	217.5	62.56	3.477	0.42	61.2
434.8	78.49	5.539	0.52	49.9	257	78.69	3.266	0.52	61.3
513.5	94.38	5.441	0.63	49.9	290.6	94.48	3.076	0.63	61.3
582.9	109.8	5.31	0.73	50	321.4	109.8	2.927	0.73	61.3
662.6	125.8	5.267	0.84	50	355.7	125.8	2.827	0.84	61.3

725.1	141.6	5.119	0.95	50	376.7	141.7	2.658	0.95	61.3
800.4	157.6	5.079	1.05	49.9	407	157.6	2.583	1.05	61.4
853.2	173.1	4.93	1.15	50	426	173.1	2.462	1.15	61.3
913.8	188.9	4.839	1.26	49.9	450.5	188.9	2.385	1.26	61.3
969	204.7	4.733	1.37	50	470	204.9	2.294	1.37	61.3
1030	220.8	4.665	1.47	49.9	496.4	220.9	2.248	1.47	61.4
1083	236.1	4.587	1.58	50	514	236.1	2.177	1.58	61.3
1152	252	4.573	1.68	49.9	542.4	252	2.152	1.68	61.3
1202	267.9	4.486	1.79	50	530.1	267.9	1.979	1.79	61.4
1265	284	4.455	1.89	50	563.9	283.9	1.986	1.89	61.3
1314	299	4.393	2	50	584.9	299.1	1.956	2	61.4
1307	299.8	4.361	2	50	601	299.9	2.004	2	61.4
1256	284.4	4.418	2.1	49.9	570.2	284.5	2.005	2.1	61.4
1190	268.5	4.431	2.21	50	509.1	268.6	1.896	2.21	61.4
1120	252.6	4.432	2.32	50	479.8	252.5	1.9	2.32	61.3
1050	237.2	4.424	2.42	49.8	461.7	237.2	1.946	2.42	61.3
991.5	221.5	4.477	2.52	50	424.6	221.4	1.918	2.52	61.3
934.8	205.4	4.551	2.63	49.8	400.1	205.5	1.947	2.63	61.4
862	189.4	4.55	2.74	49.9	357.6	189.5	1.887	2.74	61.4
794	174.1	4.561	2.84	49.9	329.7	174	1.895	2.84	61.4
725.6	158.3	4.585	2.95	49.9	297	158.2	1.878	2.95	61.4
660.1	142.3	4.638	3.05	49.9	283.3	143.4	1.976	3.04	61.4
593.6	126.3	4.699	3.16	50	245.4	126.4	1.941	3.16	61.3
529.6	110.9	4.776	3.26	49.9	215.6	110.9	1.944	3.26	61.4
448.5	94.97	4.723	3.37	49.9	184	95.06	1.936	3.37	61.3
375.2	79.18	4.738	3.47	50	155.5	79.08	1.966	3.47	61.4
308.7	63.29	4.877	3.58	49.9	123.7	63.29	1.955	3.58	61.4
237	47.85	4.953	3.68	49.9	90.89	47.85	1.9	3.68	61.4
162	31.92	5.077	3.79	49.9	57.95	31.87	1.818	3.79	61.5
83.38	16.09	5.184	3.89	49.9	24.18	16.07	1.505	3.89	61.4
1.368	0.088	15.55	4	50	0	0.132	0	4	61.4

Amostra 30%
Tempo de Agitação 10 min
Velocidade da Agitação 16000 rpm
Substância Óleo da Fazenda Alegre

Operador
Spindle

Rosi
ZA15

Experimento 1					Experimento 2				
Temperatura 10°C					Temperatura 20°C				
Tensão[Pa]	Taxa[1/s]	μ[Pa.s]	t[min]	Temp[°C]	Tensão[Pa]	Taxa[1/s]	μ[Pa.s]	t[min]	Temp[°C]
7.093	0	0	0	9.4	8.773	0	0	0	19.7
49.17	0.152	324.6	0.1	9.3	175.9	1.608	109.4	0.1	19.8
112.4	0.392	287	0.21	9.3	332.3	3.04	109.3	0.21	19.8
169.2	0.584	289.6	0.31	9.3	495.1	4.668	106.1	0.31	19.7
234.3	0.779	300.7	0.42	9.3	664.2	6.32	105.1	0.42	19.8
298	1.015	293.6	0.52	9.4	840.6	7.928	106	0.52	19.7
369.8	1.237	299.1	0.63	9.4	962.8	9.55	100.8	0.63	19.7
438.8	1.463	299.8	0.73	9.4	1114	11.05	100.8	0.73	19.7
513.5	1.653	310.6	0.84	9.3	1269	12.69	100	0.84	19.7
587.8	1.836	320.2	0.95	9.5	1407	14.32	98.26	0.95	19.7
676.8	2.049	330.2	1.05	9.4	1546	15.95	96.93	1.05	19.7
763.3	2.311	330.3	1.15	9.2	1676	17.4	96.32	1.15	19.7
847.4	2.516	336.8	1.26	9.4	1810	19.03	95.12	1.26	19.7
928.5	2.686	345.7	1.37	9.4	1948	20.62	94.48	1.37	19.6
1041	2.947	353.2	1.47	9.3	2072	22.27	93.04	1.47	19.7
1124	3.099	362.7	1.58	9.4	2203	23.71	92.91	1.58	19.7
1198	3.26	367.4	1.68	9.3	2325	25.37	91.64	1.68	19.7
1294	3.475	372.3	1.79	9.4	2446	27.02	90.54	1.79	19.7
1385	3.705	373.7	1.89	9.4	2596	28.57	90.85	1.89	19.7
1470	3.939	373	2	9.4	2722	29.81	91.31	2	19.7
1472	3.944	373.2	2	9.3	2737	29.96	91.34	2	19.7
1433	3.768	380.4	2.1	9.4	2625	28.35	92.59	2.1	19.7
1407	3.524	399.3	2.21	9.4	2499	26.99	92.59	2.21	19.7
1339	3.28	408.3	2.32	9.3	2387	25.36	94.12	2.32	19.7
1255	3.05	411.5	2.42	9.3	2278	23.88	95.39	2.42	19.8
1229	2.889	425.3	2.52	9.3	2150	22.26	96.55	2.52	19.8
1159	2.703	428.8	2.63	9.4	2017	20.68	97.54	2.63	19.7
1091	2.462	443	2.74	9.3	1891	18.99	99.59	2.74	19.6
1014	2.302	440.4	2.84	9.3	1756	17.54	100.1	2.84	19.7
945.1	2.078	454.8	2.95	9.4	1624	15.93	101.9	2.95	19.8
863.5	1.877	460	3.05	9.4	1484	14.33	103.6	3.05	19.8

782.4	1.65	474.1	3.16	9.4	1340	12.66	105.8	3.16	19.6
710	1.411	503.2	3.26	9.4	1198	11.23	106.7	3.26	19.7
622	1.256	495.4	3.37	9.4	1040	9.526	109.2	3.37	19.7
530.2	1.024	517.8	3.47	9.4	885.1	7.952	111.3	3.47	19.8
425.6	0.763	557.8	3.58	9.3	725.3	6.305	115	3.58	19.7
341.5	0.619	551.9	3.68	9.4	572.3	4.839	118.3	3.68	19.7
239.2	0.372	643.8	3.79	9.4	389	3.162	123	3.79	19.8
125.8	0.169	743.7	3.89	9.4	201.3	1.598	126	3.89	19.7
14.52	0	0	4	9.4	8.92	0	0	4	19.7

Experimento 3					Experimento 4				
Temperatura 30°C					Temperatura 40°C				
Tensão[Pa]	Taxa[1/s]	μ [Pa.s]	t[min]	Temp[°C]	Tensão[Pa]	Taxa[1/s]	μ [Pa.s]	t[min]	Temp[°C]
0.954	0	0	0	29.5	0.505	0	0	0	40.3
143.8	3.627	39.64	0.1	29.6	203.2	10.42	19.51	0.1	40.3
277.9	7.331	37.9	0.21	29.7	385.2	21.08	18.28	0.21	40.3
403.9	11.06	36.52	0.31	29.7	549.4	31.09	17.68	0.31	40.3
524.2	14.76	35.51	0.42	29.6	706.8	41.59	16.99	0.42	40.2
645.4	18.4	35.07	0.52	29.6	857.3	52.35	16.38	0.52	40.3
758.3	22.26	34.06	0.63	29.6	993.7	62.9	15.8	0.63	40.3
867.8	25.77	33.67	0.73	29.6	1122	73.17	15.34	0.73	40.2
974.3	29.23	33.34	0.84	29.6	1247	83.92	14.86	0.84	40.3
1088	32.99	32.98	0.95	29.6	1367	94.38	14.49	0.95	40.3
1176	36.75	32	1.05	29.6	1490	105	14.19	1.05	40.2
1270	40.32	31.5	1.15	29.6	1594	115.2	13.83	1.15	40.3
1385	44.04	31.45	1.26	29.6	1713	126	13.6	1.26	40.2
1468	47.7	30.77	1.37	29.6	1813	136.6	13.27	1.37	40.3
1564	51.52	30.36	1.47	29.6	1918	147.2	13.03	1.47	40.3
1671	55.08	30.34	1.58	29.6	2025	157.3	12.88	1.58	40.2
1761	58.7	30	1.68	29.5	2116	168	12.59	1.68	40.3
1875	62.51	29.99	1.79	29.6	2227	178.5	12.48	1.79	40.4
1935	66.18	29.24	1.89	29.7	2322	189.1	12.28	1.89	40.2
2008	69.79	28.77	2	29.6	2407	199.6	12.06	2	40.2
2005	69.79	28.72	2	29.5	2411	200	12.06	2	40.2
1945	66.32	29.33	2.1	29.5	2298	189.6	12.12	2.1	40.2
1853	62.66	29.57	2.21	29.6	2174	179.1	12.14	2.21	40.3

1768	58.85	30.05	2.32	29.5	2066	168.4	12.27	2.32	40.3
1682	55.33	30.4	2.42	29.6	1945	158.1	12.3	2.42	40.2
1550	51.52	30.08	2.52	29.5	1826	147.7	12.36	2.52	40.3
1437	47.85	30.03	2.63	29.6	1703	136.9	12.45	2.63	40.2
1325	44.23	29.96	2.74	29.7	1583	126.3	12.54	2.74	40.3
1225	40.47	30.27	2.84	29.6	1470	116	12.67	2.84	40.2
1094	36.75	29.77	2.95	29.6	1351	105.5	12.8	2.95	40.2
1027	33.14	30.98	3.05	29.6	1221	94.77	12.89	3.05	40.3
917.1	29.42	31.17	3.16	29.7	1093	84.16	12.99	3.16	40.4
824.8	26.11	31.58	3.26	29.6	974.2	73.9	13.18	3.26	40.3
716.3	22.29	32.14	3.37	29.6	846.1	63.29	13.37	3.37	40.2
608.2	18.55	32.78	3.47	29.7	709.7	52.69	13.47	3.47	40.3
497.8	14.92	33.37	3.58	29.6	573.4	42.18	13.59	3.58	40.2
381	11.19	34.05	3.68	29.7	441.4	31.92	13.83	3.68	40.2
266.2	7.493	35.52	3.79	29.6	300.7	21.41	14.04	3.79	40.3
137.1	3.773	36.33	3.89	29.5	154.5	10.77	14.34	3.89	40.2
2.127	0	0	4	29.6	4.073	0.029	138.9	4	40.3

Experimento 5 Temperatura 50°C					Experimento 6 Temperatura 60°C				
Tensão[Pa]	Taxa[1/s]	μ [Pa.s]	t[min]	Temp[°C]	Tensão[Pa]	Taxa[1/s]	μ [Pa.s]	t[min]	Temp[°C]
0	0	0	0	49.8	0	0	0	0	61.5
143.8	15.52	9.265	0.1	49.8	63.45	15.58	4.073	0.1	61.7
274.4	31.33	8.758	0.21	49.8	119.8	31.28	3.828	0.21	61.7
383.5	46.68	8.216	0.31	49.9	166.5	46.63	3.57	0.31	61.7
489.6	62.51	7.832	0.42	49.8	209.5	62.56	3.349	0.42	61.7
587.3	78.54	7.478	0.52	49.8	250.2	78.49	3.188	0.52	61.6
678.2	94.48	7.179	0.63	49.8	288.3	94.43	3.053	0.63	61.6
759.4	109.8	6.914	0.73	49.8	316.1	109.8	2.88	0.73	61.6
844.4	125.9	6.709	0.84	49.7	352.8	125.8	2.804	0.84	61.7
917.7	141.7	6.475	0.95	49.8	378.7	141.6	2.674	0.95	61.7
992.5	157.5	6.301	1.05	49.8	416.3	157.6	2.642	1.05	61.7
1061	173.1	6.133	1.15	49.8	434.4	172.9	2.512	1.15	61.7
1131	189.1	5.98	1.26	49.8	462.8	189	2.449	1.26	61.6
1198	204.9	5.846	1.37	49.8	489.2	204.7	2.389	1.37	61.8
1265	221	5.726	1.47	49.9	512.6	220.9	2.32	1.47	61.8

1328	236.2	5.624	1.58	49.7	542.4	236.1	2.298	1.58	61.7
1396	252	5.54	1.68	49.7	564.9	252.1	2.241	1.68	61.7
1456	267.9	5.436	1.79	49.8	594.2	267.9	2.218	1.79	61.8
1522	283.9	5.362	1.89	49.8	621.6	284	2.189	1.89	61.7
1579	299.1	5.279	2	49.8	647	299.2	2.162	2	61.8
1580	299.8	5.27	2	49.7	640.2	299.9	2.135	2	61.7
1502	284.5	5.281	2.1	49.7	609.4	284.5	2.142	2.1	61.7
1417	268.5	5.277	2.21	49.7	565.4	268.6	2.105	2.21	61.8
1331	252.7	5.267	2.32	49.8	533.6	252.5	2.113	2.32	61.8
1252	237.2	5.275	2.42	49.8	501.9	237.3	2.115	2.42	61.7
1170	221.3	5.289	2.52	49.8	459.3	221.4	2.075	2.52	61.7
1093	205.5	5.32	2.63	49.8	428.6	205.5	2.086	2.63	61.7
1012	189.4	5.342	2.74	49.7	397.3	189.4	2.097	2.74	61.8
931.9	174.1	5.353	2.84	49.7	359.6	174	2.067	2.84	61.7
850.3	158.3	5.373	2.95	49.8	328.8	158.2	2.079	2.95	61.8
768.2	142.3	5.399	3.05	49.8	300	142.4	2.107	3.05	61.7
687	126.3	5.44	3.16	49.8	263.6	126.4	2.085	3.16	61.8
609.8	111	5.494	3.26	49.7	233.6	111	2.105	3.26	61.7
523.8	95.06	5.51	3.37	49.9	201.6	95.01	2.122	3.37	61.7
439.7	79.13	5.557	3.47	49.8	165.8	79.13	2.096	3.47	61.7
353.7	63.15	5.601	3.58	49.8	132.9	63.25	2.101	3.58	61.8
272.1	47.9	5.68	3.68	49.8	100.8	47.85	2.107	3.68	61.7
183.7	31.87	5.763	3.79	49.8	68.05	31.87	2.135	3.79	61.7
92.85	16.11	5.762	3.89	49.8	33.64	16.06	2.095	3.89	61.8
1.497	0.137	10.94	4	49.8	0	0.122	0	4	61.7

Amostra 40%
Tempo de Agitação 10 min
Velocidade da Agitação 16000 rpm
Substância Óleo da Fazenda Alegre
Operador Rosi
Spindle ZA15

Experimento 1					Experimento 2				
Temperatura 10°C					Temperatura 20°C				
Tensão[Pa]	Taxa[1/s]	μ[Pa.s]	t[min]	Temp[°C]	Tensão[Pa]	Taxa[1/s]	μ[Pa.s]	t[min]	Temp[°C]
0.673	0	0	0	9.3	0.208	0	0	0	19.7

169.7	0.215	789.3	0.1	9.4	101.2	0.712	142.2	0.1	19.6
329.8	0.481	685.6	0.21	9.3	206.6	1.533	134.8	0.21	19.6
496.9	0.719	691.6	0.31	9.4	301.2	2.268	132.8	0.31	19.6
646.5	0.999	647.1	0.42	9.4	416.1	3.089	134.7	0.42	19.7
776	1.268	611.8	0.52	9.4	513.8	3.876	132.6	0.52	19.7
929.9	1.557	597.4	0.63	9.3	616.5	4.697	131.3	0.63	19.6
1063	1.79	594.1	0.73	9.3	679	5.42	125.3	0.73	19.7
1195	2.074	576.3	0.84	9.4	759.7	6.232	121.9	0.84	19.6
1336	2.315	577.2	0.95	9.3	855	7.038	121.5	0.95	19.7
1445	2.585	559.1	1.05	9.4	934.2	7.825	119.4	1.05	19.7
1566	2.848	549.9	1.15	9.4	1028	8.607	119.4	1.15	19.7
1683	3.109	541.3	1.26	9.3	1101	9.394	117.2	1.26	19.7
1811	3.377	536.1	1.37	9.3	1196	10.19	117.4	1.37	19.6
1941	3.636	533.8	1.47	9.3	1272	10.93	116.3	1.47	19.6
2031	3.866	525.4	1.58	9.3	1333	11.72	113.8	1.58	19.5
2129	4.179	509.6	1.68	9.3	1414	12.53	112.9	1.68	19.7
2263	4.443	509.4	1.79	9.4	1487	13.3	111.8	1.79	19.7
2362	4.692	503.4	1.89	9.3	1564	14.13	110.7	1.89	19.6
2479	4.941	501.7	2	9.4	1639	14.89	110.1	2	19.6
2464	4.932	499.7	2	9.3	1643	14.96	109.9	2	19.5
2360	4.682	504	2.1	9.3	1579	14.17	111.5	2.1	19.6
2280	4.404	517.7	2.21	9.3	1506	13.39	112.4	2.21	19.6
2187	4.115	531.3	2.32	9.4	1435	12.59	114	2.32	19.7
2083	3.891	535.4	2.42	9.3	1371	11.79	116.3	2.42	19.7
1974	3.636	543	2.52	9.4	1306	11.02	118.5	2.52	19.7
1858	3.363	552.6	2.63	9.4	1225	10.2	120.1	2.63	19.7
1738	3.079	564.4	2.74	9.3	1141	9.409	121.3	2.74	19.7
1653	2.874	575.3	2.83	9.3	1062	8.636	122.9	2.84	19.6
1503	2.602	577.8	2.95	9.3	986	7.849	125.6	2.95	19.7
1380	2.317	595.4	3.05	9.3	902.4	7.019	128.6	3.05	19.7
1266	2.116	598.1	3.16	9.4	805.1	6.256	128.7	3.16	19.7
1130	1.834	616.4	3.26	9.2	718.6	5.508	130.5	3.26	19.7
968.1	1.515	638.9	3.37	9.4	627.2	4.697	133.5	3.37	19.7
844.4	1.271	664.2	3.47	9.4	533.4	3.876	137.6	3.47	19.7
686.5	1.031	666	3.58	9.3	431.7	3.128	138	3.58	19.8
540.4	0.772	699.8	3.68	9.4	338.4	2.367	143	3.68	19.8
375.2	0.498	753.4	3.79	9.3	236.3	1.581	149.5	3.79	19.7

198.4	0.211	939.8	3.89	9.4	123.9	0.761	162.8	3.89	19.6
9.666	0	0	4	9.3	3.141	0	0	4	19.7

Experimento 3 Temperatura 30°C					Experimento 4 Temperatura 40°C				
Tensão[Pa]	Taxa[1/s]	μ[Pa.s]	t[min]	Temp[°C]	Tensão[Pa]	Taxa[1/s]	μ[Pa.s]	t[min]	Temp[°C]
0	0	0	0	29.5	2.886	0	0	0	40
189.8	3.573	53.12	0.1	29.5	119.4	10.41	11.48	0.1	40.1
371.8	7.302	50.92	0.21	29.6	229.5	21.03	10.91	0.21	40.1
528.2	11.07	47.73	0.31	29.6	323	31.09	10.39	0.31	40
684.1	14.73	46.44	0.42	29.5	417.8	41.59	10.05	0.42	40.2
828.8	18.41	45.03	0.52	29.5	499.5	52.39	9.533	0.52	40.1
975.4	22.24	43.86	0.63	29.5	587.4	62.9	9.339	0.63	40.1
1092	25.81	42.32	0.73	29.5	665.2	73.17	9.091	0.73	40.1
1213	29.18	41.59	0.84	29.5	740.4	83.72	8.844	0.84	40.1
1339	32.94	40.65	0.95	29.5	819.1	94.48	8.67	0.95	40.1
1447	36.66	39.46	1.05	29.6	889.5	105	8.473	1.05	40.1
1564	40.42	38.69	1.15	29.5	959.9	115.2	8.329	1.15	40
1688	43.99	38.36	1.26	29.5	1026	126	8.145	1.26	40
1784	47.65	37.43	1.37	29.6	1101	136.5	8.063	1.37	40
1862	51.47	36.17	1.47	29.6	1167	147.2	7.931	1.47	40
1968	54.99	35.79	1.58	29.5	1224	157.3	7.784	1.58	40
2082	58.65	35.51	1.68	29.5	1294	168	7.702	1.68	40.1
2191	62.51	35.06	1.79	29.5	1355	178.5	7.588	1.79	40.1
2289	66.13	34.61	1.89	29.6	1421	189.2	7.509	1.89	40
2414	69.79	34.58	2	29.5	1486	199.5	7.451	2	40.1
2377	69.89	34	2	29.5	1488	199.8	7.446	2	40
2323	66.32	35.02	2.1	29.5	1414	189.5	7.46	2.1	40
2187	62.71	34.87	2.21	29.5	1328	179	7.42	2.21	40
2100	58.8	35.71	2.32	29.5	1250	168.4	7.422	2.32	40
1998	55.28	36.15	2.42	29.5	1173	158.1	7.424	2.42	40
1883	51.52	36.55	2.52	29.5	1091	147.6	7.396	2.52	40
1783	47.9	37.23	2.63	29.5	1018	136.8	7.442	2.63	40
1663	44.23	37.6	2.74	29.5	936.4	126.3	7.412	2.74	40.2
1555	40.57	38.33	2.84	29.6	859.7	116.1	7.406	2.84	39.9
1446	36.85	39.23	2.95	29.6	782.5	105.5	7.418	2.95	40.1

1321	33.14	39.86	3.05	29.6	702.8	94.77	7.416	3.05	40
1194	29.33	40.73	3.16	29.6	628.5	84.16	7.468	3.16	40.1
1071	26.13	40.97	3.26	29.6	554.7	74	7.496	3.26	40
929.5	22.29	41.7	3.37	29.6	476	63.39	7.509	3.37	40.1
798	18.59	42.92	3.47	29.5	396.3	52.74	7.515	3.47	40.1
648.9	14.92	43.5	3.58	29.6	320.1	42.08	7.606	3.58	40
503.8	11.24	44.83	3.68	29.5	245.9	31.82	7.728	3.68	40.1
343.9	7.458	46.11	3.79	29.6	167.4	21.34	7.841	3.79	40
178.3	3.778	47.19	3.89	29.5	86.66	10.71	8.092	3.89	40.1
1.177	0	0	4	29.5	5.281	0.024	216.1	4	40.1

Experimento 5 Temperatura 50°C					Experimento 6 Temperatura 60°C				
Tensão[Pa]	Taxa[1/s]	μ [Pa.s]	t[min]	Temp[°C]	Tensão[Pa]	Taxa[1/s]	μ [Pa.s]	t[min]	Temp[°C]
0	0	0	0	49.6	0.61	0	0	0	62
92.53	15.52	5.961	0.1	49.6	41.08	15.56	2.64	0.1	62
179.8	31.23	5.756	0.21	49.5	76.37	31.28	2.441	0.21	61.9
252.7	46.63	5.419	0.31	49.5	105.7	46.58	2.269	0.31	61.9
315.1	62.66	5.028	0.42	49.5	133.1	62.61	2.125	0.42	62
376.6	78.59	4.792	0.52	49.6	156.6	78.54	1.993	0.52	61.9
434.3	94.43	4.599	0.63	49.7	178	94.43	1.885	0.63	61.9
486.6	109.8	4.433	0.73	49.7	197.9	109.8	1.803	0.73	61.9
537	125.8	4.268	0.84	49.6	218	125.8	1.733	0.84	61.9
582.9	141.7	4.112	0.95	49.6	234.3	141.5	1.655	0.95	62
624	157.5	3.962	1.05	49.6	255.4	157.5	1.621	1.05	61.9
672.3	173	3.887	1.15	49.5	268.8	172.9	1.555	1.15	61.8
714.9	189.1	3.781	1.26	49.6	285	188.9	1.509	1.26	62
756.4	204.8	3.693	1.37	49.6	298.8	204.7	1.46	1.37	61.9
804.3	220.8	3.643	1.47	49.6	314	221	1.421	1.47	62
836.1	236.2	3.539	1.58	49.6	329.1	236.1	1.394	1.58	62
885.4	252	3.514	1.68	49.6	344.3	252.2	1.365	1.68	61.9
915.3	268	3.415	1.79	49.6	359.9	267.9	1.343	1.79	62
958.3	283.8	3.376	1.89	49.6	377	283.9	1.328	1.89	61.9
993	299.1	3.32	2	49.6	390.2	299.1	1.305	2	61.9
1001	299.8	3.34	2	49.6	388.7	299.7	1.297	2	62
940.7	284.4	3.307	2.1	49.6	367.2	284.5	1.291	2.1	61.9

891.8	268.5	3.322	2.21	49.5	342.3	268.5	1.275	2.21	61.9
824.3	252.7	3.262	2.32	49.5	319.8	252.5	1.267	2.32	62
769.6	237.4	3.242	2.42	49.5	298.3	237.1	1.258	2.42	61.9
724.2	221.3	3.273	2.52	49.6	277.6	221.4	1.254	2.52	61.9
668.4	205.4	3.254	2.63	49.6	256.8	205.5	1.25	2.63	61.9
610.3	189.3	3.223	2.74	49.5	236.6	189.4	1.249	2.74	61.9
563.8	174	3.24	2.84	49.6	215.5	174.1	1.238	2.84	62
510.1	158.3	3.223	2.95	49.6	195.3	158.1	1.235	2.95	62
453.9	142.2	3.191	3.05	49.5	176.6	142.3	1.241	3.05	61.9
410.4	126.3	3.249	3.16	49.6	155.3	126.4	1.229	3.16	62
355.6	110.9	3.205	3.26	49.6	137.3	110.9	1.238	3.26	62
303.3	95.06	3.191	3.37	49.6	116.9	95.01	1.23	3.37	61.9
256.3	79.03	3.243	3.47	49.7	96.94	79.08	1.226	3.47	61.9
205.3	63.29	3.244	3.58	49.5	77.54	63.15	1.228	3.58	61.9
154.3	47.9	3.222	3.68	49.6	59.36	47.9	1.239	3.68	62
101.1	31.92	3.167	3.79	49.6	39.52	31.87	1.24	3.79	61.9
49.32	16.05	3.073	3.89	49.6	20.5	16.08	1.275	3.89	61.9
0	0.108	0	4	49.6	0.903	0.112	8.035	4	61.9

Amostra 50%
Tempo de Agitação 10 min
Velocidade da Agitação 16000 rpm
Substância Óleo da Fazenda Alegre
Operador Rosi
Spindle ZA15

Experimento 1					Experimento 2				
Temperatura 10°C					Temperatura 20°C				
Tensão[Pa]	Taxa[1/s]	μ[Pa.s]	t[min]	Temp[°C]	Tensão[Pa]	Taxa[1/s]	μ[Pa.s]	t[min]	Temp[°C]
1.602	0	0	0	9.5	5.581	0	0	0	19.8
413.8	0.406	1020	0.1	9.6	245	0.751	326.2	0.1	19.8
805.8	0.761	1059	0.21	9.4	453.8	1.533	296	0.21	19.8
1130	1.231	918.5	0.31	9.5	640	2.329	274.8	0.31	19.8
1418	1.627	871.3	0.42	9.4	809.1	3.118	259.5	0.42	19.7
1679	2.057	816.3	0.52	9.5	940.1	3.886	241.9	0.52	19.7
1895	2.535	747.7	0.63	9.5	1070	4.682	228.4	0.63	19.8
2058	2.857	720.6	0.73	9.5	1177	5.425	216.9	0.73	19.7

2235	3.28	681.5	0.84	9.6	1296	6.251	207.3	0.84	19.8
2331	3.719	626.6	0.95	9.5	1411	7.038	200.5	0.95	19.8
2419	4.15	583	1.05	9.4	1541	7.825	196.9	1.05	19.7
2444	4.521	540.6	1.15	9.5	1658	8.602	192.7	1.15	19.8
2596	5.039	515.2	1.26	9.5	1766	9.355	188.7	1.26	19.7
2640	5.386	490.2	1.37	9.6	1878	10.18	184.6	1.37	19.8
2651	5.855	452.8	1.47	9.5	2009	10.99	182.7	1.47	19.8
2801	6.305	444.3	1.58	9.5	2107	11.74	179.6	1.58	19.8
2646	6.632	399	1.68	9.5	2194	12.52	175.2	1.68	19.8
2570	7.009	366.6	1.79	9.5	2302	13.31	172.9	1.79	19.8
2642	7.512	351.6	1.89	9.5	2409	14.12	170.7	1.89	19.8
2624	7.903	332.1	2	9.5	2500	14.91	167.6	2	19.8
2620	7.898	331.7	2	9.5	2503	14.96	167.4	2	19.8
2428	7.507	323.5	2.1	9.5	2431	14.15	171.8	2.1	19.8
2250	7.121	316	2.21	9.4	2338	13.34	175.3	2.21	19.8
2144	6.686	320.7	2.32	9.5	2234	12.54	178.2	2.32	19.8
2047	6.266	326.7	2.42	9.5	2175	11.81	184.2	2.42	19.7
1968	5.831	337.5	2.52	9.4	2106	11.01	191.2	2.52	19.8
1940	5.406	358.9	2.63	9.5	2013	10.22	197.1	2.63	19.8
1889	5.005	377.4	2.74	9.5	1930	9.413	205	2.74	19.8
1851	4.609	401.6	2.84	9.5	1843	8.607	214.1	2.84	19.8
1778	4.169	426.5	2.95	9.4	1723	7.825	220.2	2.95	19.8
1700	3.71	458.3	3.05	9.4	1630	7.067	230.7	3.05	19.7
1606	3.309	485.5	3.16	9.6	1502	6.232	241	3.16	19.7
1498	2.928	511.8	3.26	9.5	1386	5.489	252.5	3.26	19.8
1383	2.505	552	3.37	9.4	1235	4.619	267.5	3.37	19.8
1245	2.088	596.2	3.47	9.4	1088	3.881	280.4	3.47	19.8
1073	1.656	647.9	3.58	9.4	930.3	3.089	301.2	3.58	19.8
893.3	1.216	734.9	3.68	9.5	755.8	2.367	319.4	3.68	19.7
673.4	0.733	918.5	3.79	9.5	553	1.559	354.7	3.79	19.7
438.3	0.385	1138	3.89	9.4	327.7	0.781	419.5	3.89	19.8
96.32	0	0	4	9.5	47.22	0	0	4	19.8

Experimento 3					Experimento 4				
Temperatura 30°C					Temperatura 40°C				
Tensão[Pa]	Taxa[1/s]	μ [Pa.s]	t[min]	Temp[°C]	Tensão[Pa]	Taxa[1/s]	μ [Pa.s]	t[min]	Temp[°C]

5.514	0	0	0	29.9	0	0	0	0	40.3
452.4	3.837	117.9	0.1	30	621.3	15.61	39.81	0.1	40.2
788.2	7.918	99.54	0.21	29.9	1005	31.23	32.19	0.21	40.3
1093	11.76	92.92	0.31	29.9	1233	46.63	26.44	0.31	40.3
1320	15.82	83.49	0.42	29.9	1470	62.61	23.48	0.42	40.3
1518	19.71	77.02	0.52	29.9	1703	78.59	21.67	0.52	40.3
1653	23.73	69.67	0.63	29.9	1747	94.43	18.5	0.63	40.3
1758	27.72	63.42	0.73	29.9	1789	109.8	16.3	0.73	40.3
1881	31.43	59.84	0.84	30	1362	125.8	10.83	0.84	40.3
2073	35.44	58.49	0.95	29.8	1422	141.6	10.05	0.95	40.2
2224	39.44	56.38	1.05	29.9	723	157.6	4.587	1.05	40.4
2360	43.16	54.67	1.15	30	514.3	173	2.973	1.15	40.3
2430	47.07	51.63	1.26	29.9	344.2	188.3	1.828	1.26	40.3
2482	51.22	48.46	1.37	29.9	196.5	204.7	0.96	1.37	40.3
2361	55.18	42.8	1.47	30	258.4	220.9	1.17	1.47	40.2
2424	58.9	41.16	1.58	29.9	192	236.1	0.813	1.58	40.2
2507	62.95	39.83	1.68	29.9	203.5	252	0.808	1.68	40.3
2567	66.86	38.39	1.79	29.9	82.98	268	0.31	1.79	40.3
2602	70.82	36.75	1.89	29.9	122.6	283.9	0.432	1.89	40.3
2641	74.93	35.24	2	29.9	85.67	299.2	0.286	2	40.4
2622	74.88	35.02	2	29.9	86.79	299.9	0.289	2	40.3
2541	71.11	35.74	2.1	30	78.14	284.5	0.275	2.1	40.3
2454	67.16	36.55	2.21	29.9	79.02	268.5	0.294	2.21	40.3
2366	63.1	37.5	2.32	29.8	188	253.2	0.743	2.31	40.3
2271	59.29	38.31	2.42	29.8	86.06	237.3	0.363	2.42	40.3
2184	55.28	39.51	2.52	29.9	141.7	221.4	0.64	2.52	40.2
2090	51.17	40.85	2.63	29.9	214.8	205.4	1.046	2.63	40.2
1999	47.31	42.25	2.74	29.8	93.39	189.4	0.493	2.74	40.3
1899	43.45	43.7	2.84	29.9	127.5	174	0.732	2.84	40.3
1794	39.44	45.48	2.95	29.9	145.6	158.2	0.921	2.95	40.2
1670	35.53	47.01	3.05	29.8	129	142.3	0.907	3.05	40.2
1559	31.52	49.45	3.16	29.9	195.7	126.2	1.55	3.16	40.3
1439	27.85	51.67	3.26	30	275.5	110.9	2.485	3.26	40.3
1299	23.89	54.37	3.37	29.9	388.2	95.01	4.085	3.37	40.3
1144	19.93	57.43	3.47	29.9	381.8	79.08	4.828	3.47	40.4
978.3	15.87	61.63	3.58	29.9	445.8	63.25	7.049	3.58	40.3
796	12.06	66.01	3.68	29.9	464.4	47.9	9.696	3.68	40.3

578	7.981	72.42	3.79	29.9	418	31.92	13.1	3.79	40.3
331.7	3.959	83.78	3.89	30	298.7	16.11	18.54	3.89	40.3
29.02	0.015	1979	4	29.9	12.65	0.112	112.5	4	40.3

Experimento 5 Temperatura 50°C					Experimento 6 Temperatura 60°C				
Tensão[Pa]	Taxa[1/s]	μ [Pa.s]	t[min]	Temp[°C]	Tensão[Pa]	Taxa[1/s]	μ [Pa.s]	t[min]	Temp[°C]
0	0	0	0	49.8	0	0	0	0	61.9
400.5	15.62	25.64	0.1	49.8	123.2	15.56	7.916	0.1	61.9
706.9	31.28	22.6	0.21	49.8	233.3	31.28	7.457	0.21	61.9
940.1	46.63	20.16	0.31	49.8	327.8	46.63	7.03	0.31	61.9
1131	62.61	18.07	0.42	49.8	418.2	62.61	6.68	0.42	61.9
1296	78.49	16.52	0.52	49.8	499.3	78.59	6.354	0.52	62
1448	94.38	15.34	0.63	49.7	569.2	94.33	6.035	0.63	61.9
1559	109.8	14.2	0.73	49.8	634.7	109.7	5.787	0.73	62
1599	125.8	12.71	0.84	49.8	707.6	125.9	5.622	0.84	61.9
1728	141.6	12.2	0.95	49.7	752	141.6	5.311	0.95	62.1
1812	157.6	11.49	1.05	49.8	821.4	157.5	5.215	1.05	62
1903	172.9	11.01	1.15	49.8	854.2	172.9	4.941	1.15	62
1937	188.9	10.25	1.26	49.7	896.2	188.9	4.744	1.26	62.1
1949	204.7	9.521	1.37	49.8	948	204.6	4.634	1.37	61.9
1934	220.7	8.761	1.47	49.8	984.2	220.9	4.455	1.47	61.9
2073	236.1	8.78	1.58	49.7	1015	236.1	4.297	1.58	62
1794	252	7.121	1.68	49.7	1017	252	4.037	1.68	61.9
1910	267.9	7.128	1.79	49.8	1065	267.9	3.974	1.79	62
1588	284	5.592	1.89	49.7	1071	284	3.772	1.89	62
2115	299.4	7.065	2	49.8	1076	298.9	3.6	2	62
1993	299.7	6.65	2	49.7	997.4	299.9	3.326	2	61.9
229.4	284.6	0.806	2.1	49.8	1005	284.5	3.534	2.1	62
180.2	268.5	0.671	2.21	49.8	915.3	268.6	3.407	2.21	62
204.1	252.6	0.808	2.32	49.8	898.7	252.5	3.558	2.32	62
183.8	237.2	0.775	2.42	49.8	868.4	237.1	3.662	2.42	62.1
175.5	221.2	0.793	2.52	49.7	875.7	221.4	3.955	2.52	62
154.9	205.5	0.754	2.63	49.7	853.2	205.4	4.153	2.63	62
174.1	189.5	0.919	2.74	49.8	802.9	189.5	4.236	2.74	62
170.2	174	0.978	2.84	49.7	733.5	174.1	4.212	2.84	62.1

181.4	158.2	1.147	2.95	49.7	693.4	158.3	4.381	2.95	61.9
217.6	142.3	1.53	3.05	49.8	655.3	142.2	4.607	3.05	61.9
478.7	126.2	3.792	3.16	49.8	574.1	126.3	4.544	3.16	62
554.9	111	4.999	3.26	49.8	535.5	110.9	4.827	3.26	62
532	95.06	5.596	3.37	49.8	473.9	94.97	4.991	3.37	62
488.5	79.03	6.18	3.47	49.8	412.4	79.13	5.211	3.47	62.1
433.7	63.05	6.879	3.58	49.8	343.9	63.34	5.43	3.58	62
372.1	47.9	7.769	3.68	49.8	271.8	47.9	5.674	3.68	62
277.8	31.92	8.704	3.79	49.7	190.7	31.87	5.986	3.79	61.9
158.1	16.06	9.844	3.89	49.7	102.2	16.07	6.361	3.89	62
0	0.117	0	4	49.7	2.674	0.122	21.88	4	62.1

Anexo 2

Dados Experimentais das Viscosidades das Emulsões

Tabela de Viscosidade (cP)

T (°C)	Emulsões					
	Óleo Puro	E1	E2	E3	E4	E5
10	143500	298600	361000	371700	479500	253700
20	46070	75430	105400	88230	106900	149500
30	17520	23680	34990	32230	42880	30470
40	6719	7027	8825	11710	7258	16690
50	3303	3321	4293	5581	3490	2732
60	1317	1307	1840	2251	1369	3285

Anexo 3

Dados Experimentais dos Diâmetros de Partículas

Tabela dos diâmetros de partículas

Amostras	Diâmetros (μm)
01	474,85
02	237,48
03	249,69
04	136.19
05	272.40
06	163.47
07	85.96
08	276.29
09	377.45
10	385.23
11	556.42
12	167.36
13	342.41

Amostras	Diâmetros (μm)
14	62.38
15	171.25
16	105.06
17	35,02
18	233.50
19	342.41
20	66.26
21	97.35
22	120.62
23	74.03
24	120.62
25	210.12
26	93.39

Anexo 4

Dados Experimentais de Temperatura das Emulsões

Tabela de temperatura de cada emulsão

t (min)	Temperatura (°C)					
	E1	E2	E3	E4	E5	Água
0	20.5	20.5	20.5	20.5	20.5	22.0
1	40.0	27.0	24.0	22.0	21.0	23.0
2	52.0	40.0	37.0	35.0	27.0	23.5
3	61.0	52.0	45.0	38.0	32.0	24.0
4	65.0	60.0	50.0	42.0	36.0	25.0
5	69.0	62.0	52.0	44.0	38.0	25.5
6	71.0	65.0	54.0	46.5	40.0	26.5
7	72.0	67.0	60.0	49.0	41.0	27.0
8	73.0	68.0	62.0	54.0	42.0	27.8
9	74.5	71.0	64.5	57.0	43.0	28.2
10	76.0	73.0	68.0	60.5	44.0	29.0

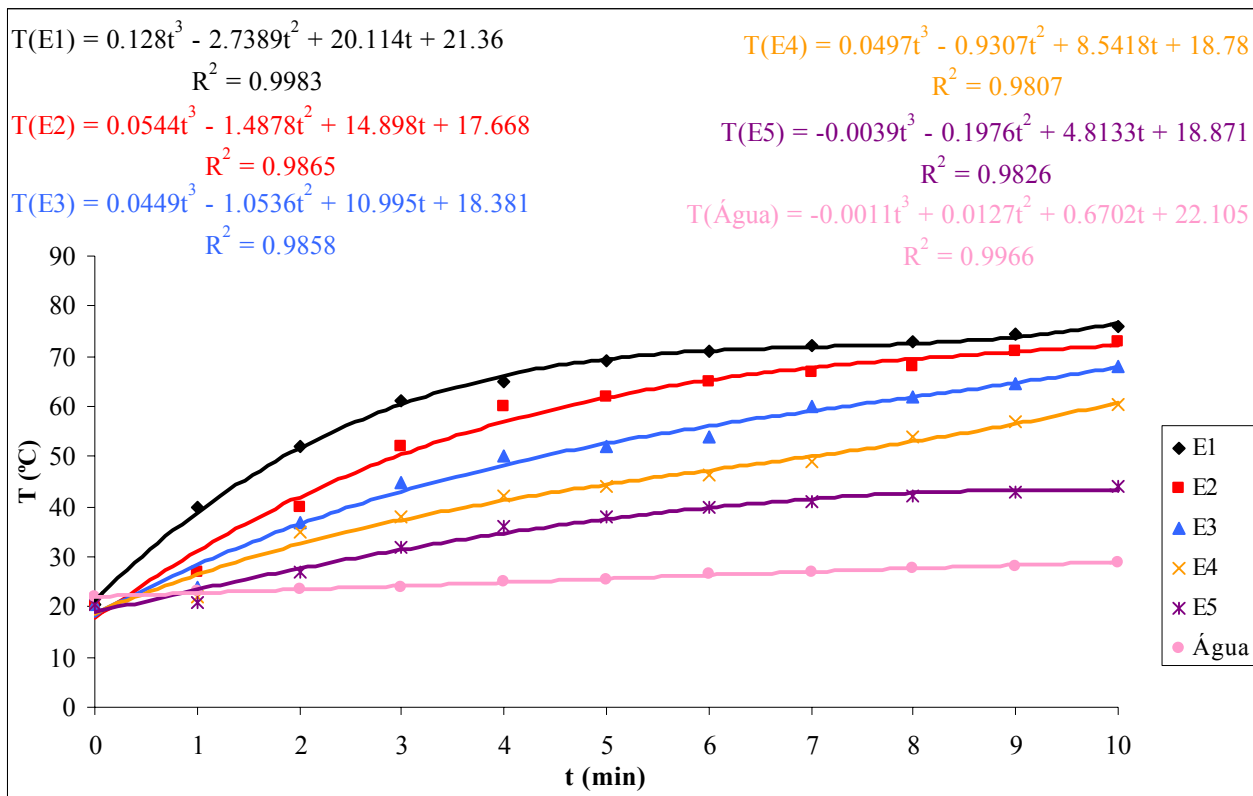


Gráfico da temperatura em função do tempo

Anexo 5

Erro referente à constante k para o cálculo do diâmetro de partícula

Como o valor referente à k depende de outras medidas, que por sua vez, apresentam incertezas, o erro apresentado pelo valor desta constante foi obtido pela propagação das incertezas relativas das outras grandezas mensuradas. Essa propagação é dada pela seguinte sequência de fórmulas, onde Δ corresponde ao erro da grandeza medida:

$$\begin{aligned}\frac{\Delta \dot{Q}}{\dot{Q}} &= \sqrt{\left(\frac{\Delta D}{D}\right)^2 + \left(\frac{\Delta h}{h}\right)^2 + \left(\frac{\Delta T}{T}\right)^2} \\ \frac{\Delta m_f}{m_f} &= \sqrt{\left(\frac{\Delta m_o}{m_o}\right)^2 + \left(\frac{\Delta m_A}{m_A}\right)^2} \\ \frac{\Delta \dot{W}}{\dot{W}} &= \sqrt{\left(\frac{\Delta m_o}{m_o}\right)^2 + \left(\frac{\Delta m_A}{m_A}\right)^2 + \left(\frac{\Delta m_v}{m_v}\right)^2 + \left(\frac{\Delta T}{T}\right)^2 + \left(\frac{\Delta t}{t}\right)^2 + \left(\frac{\Delta \dot{Q}}{\dot{Q}}\right)^2} \\ \frac{\Delta \dot{w}}{\dot{w}} &= \sqrt{\left(\frac{\Delta \dot{W}}{\dot{W}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta m_f}{m_f}\right)^2} \\ \frac{\Delta k}{k} &= \sqrt{\left(\frac{\Delta d_{\max}}{d_{\max}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta \dot{w}}{\dot{w}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta \rho_c}{\rho_c}\right)^2 + \left(\frac{\Delta \mu_c}{\mu_c}\right)^2}\end{aligned}$$

A incerteza obtida no valor final de k_I e k_{II} , em média de 2,1% e 3,2%, respectivamente, do valor medido considera apenas os desvios aleatórios das medidas. Entretanto, o procedimento utilizado para a determinação experimental de k envolve outras fontes de erro, sobretudo na avaliação do calor perdido e de algumas propriedades físicas do óleo (sobretudo seu calor específico, o qual não foi medido).

Anexo 6

Projeto de Separadores Trifásicos para Óleos Pesados

Projeto de Separadores Trifásicos para Óleos Pesados

■ 1. Dados iniciais

```
(* qq => Vazão Volumétrica do Gás, m³/s
   qo => Vazão Volumétrica do Óleo, m³/s
   qw => Vazão Volumétrica da Água, m³/s
   tg => Tempo de Retenção do óleo no gás = (Volume do gás)/qq, s
   to => Tempo de Retenção do óleo na água = (Volume da água)/qw, s
   tw => Tempo de Retenção da água no óleo = (Volume do óleo)/qo, s*)

g = 9.81; (*Aceleração da Gravidade, m/s²*)
ρG = 1; (*Densidade do Gás, kg/m³*)
ρO = 950; (*Densidade do Óleo, kg/m³*)
ρW = 1000; (*Densidade da Água, kg/m³*)
μG = 1.8 * 10-5; (*Viscosidade do Gás, Pa*s*)
μO = 1; (*Viscosidade do Óleo, Pa*s*)
μW = 1 * 10-3; (*Viscosidade da Água, Pa*s*)
σOG = 0.07; (*Tensão Superficial do óleo no gás, N/m*)
σWO = 0.03; (*Tensão Superficial da água no óleo, N/m*)
σOW = 0.03; (*Tensão Superficial do óleo na água, N/m*)
```

■ 2. Cálculo da Velocidade Terminal

```
dcrit[k_, rod_, roc_, sigma_] :=  $\sqrt{\frac{k * \text{sigma}}{\text{Abs}[\text{rod} - \text{roc}] * g}}$ 
(*diâmetros críticos apenas p/ referência*)
```

```

{dOG = dcrit[0.4, ρO, ρG, σOG], dWO = dcrit[0.4, ρW, ρO, σWO], dOW = dcrit[6, ρO, ρW, σOW]}
{0.00173425, 0.00494619, 0.0191565}

rey[roc_?NumberQ, rod_?NumberQ, mic_?NumberQ, mid_?NumberQ,
  alfad_?NumberQ, v_?NumberQ, d_?NumberQ] := 
$$\frac{((1 - \text{alfad}) * \text{roc} + \text{alfad} * \text{rod}) * v * d}{\text{mic} * (1 - \text{alfad})^{-2.5 \frac{\text{mid} + 0.4 * \text{mic}}{\text{mid} + \text{mic}}}}$$

(*número de Reynolds da emulsão; alfad=0 significa uma partícula sozinha*)

cd[r_?NumberQ] := 
$$\frac{24}{r} + \frac{6}{1 + \sqrt{r}} + 0.4$$


eqvt[roc_?NumberQ, rod_?NumberQ, mic_?NumberQ, mid_?NumberQ, alfad_?NumberQ,
  v_?NumberQ, d_?NumberQ] := v - 
$$\sqrt{\left(\frac{4}{3} * (\text{Abs}[\text{rod} - ((1 - \text{alfad}) * \text{roc} + \text{alfad} * \text{rod})] * g * d) / \right.}$$


$$\left.(((1 - \text{alfad}) * \text{roc} + \text{alfad} * \text{rod}) * \text{cd}[\text{rey}[\text{roc}, \text{rod}, \text{mic}, \text{mid}, \text{alfad}, v, d]])\right)}$$
;

vt[roc_?NumberQ, rod_?NumberQ, mic_?NumberQ, mid_?NumberQ, alfad_?NumberQ,
  d_?NumberQ] := v /. FindRoot[eqvt[roc, rod, mic, mid, alfad, v, d] == 0, {v, 0.0001, 1}]

vt[950, 1000, μO, μW, 0.5, 0.001]
7.54122 × 10-6

```

■ 3. Cálculo do Comprimento do Separador (Alfa - 10%, 30%, 50%)

```

eqdif[qc_?NumberQ, vterm_, ls_?NumberQ] :=

$$\frac{qc}{(1 - \text{ad}[x])^2} * \text{ad}'[x] + \text{vterm} * (ls / 3) * \text{ad}[x] \text{ (*Nota: ad=alfad*)}$$


eqcomp[qc_, roc_, rod_, mic_, mid_, dpart_, ad0_, ls_] := NDSolve[
  {eqdif[qc, vt[roc, rod, mic, mid, ad[x], dpart], ls] == 0, ad[0] == ad0}, ad, {x, 0, ls}]

comp[qc_, roc_, rod_, mic_, mid_, dpart_, ad0_] := ls /. FindRoot[
  (ad[ls] /. eqcomp[qc, roc, rod, mic, mid, dpart, ad0, ls][[1]]) == 0.01, {ls, 1, 1000}]

Tamanhos : 500, 1000, 2000, 5000

Syntax::tsntxi : "Tamanhos:500,1000,2000,5000" is incomplete; more input is needed.

Tamanhos : 500, 1000, 2000, 5000

```

```

alfa10 = Plot[{comp[0.008,  $\rho_o$ ,  $\rho_w$ , mic,  $\mu_w$ , 0.0005, 0.1],
  comp[0.008,  $\rho_o$ ,  $\rho_w$ , mic,  $\mu_w$ , 0.001, 0.1], comp[0.008,  $\rho_o$ ,  $\rho_w$ , mic,  $\mu_w$ , 0.002, 0.1],
  comp[0.008,  $\rho_o$ ,  $\rho_w$ , mic,  $\mu_w$ , 0.005, 0.1]}, {mic, 0.001, 0.1},
  AxesLabel → {" $\mu_o$  (Pa.s)", "Lsep (m)"}, PlotLabel → " $\alpha_{d,o}=10\%$ "

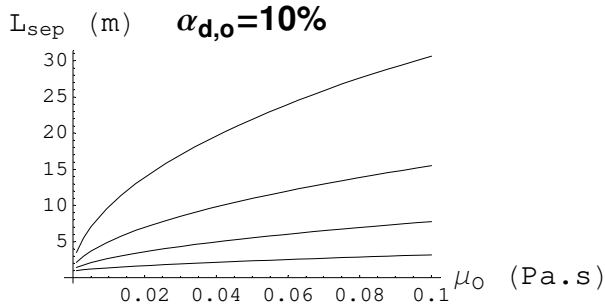
```

FindRoot::frsec : Secant method failed to converge to the prescribed accuracy after 15 iterations.

FindRoot::frsec : Secant method failed to converge to the prescribed accuracy after 15 iterations.

FindRoot::frsec : Secant method failed to converge to the prescribed accuracy after 15 iterations.

General::stop : Further output of FindRoot::frsec will be suppressed during this calculation.



- Graphics -

```

alfa30 =
Plot[{comp[0.008,  $\rho_o$ ,  $\rho_w$ , mic,  $\mu_w$ , 0.0005, 0.3], comp[0.008,  $\rho_o$ ,  $\rho_w$ , mic,  $\mu_w$ , 0.001, 0.3],
  comp[0.008,  $\rho_o$ ,  $\rho_w$ , mic,  $\mu_w$ , 0.002, 0.3], comp[0.008,  $\rho_o$ ,  $\rho_w$ , mic,  $\mu_w$ , 0.005, 0.3]},
  {mic, 0.001, 0.1}, PlotStyle → Dashing[{0.02}],
  AxesLabel → {" $\mu_o$  (Pa.s)", "Lsep (m)"}, PlotLabel → " $\alpha_{d,o}=30\%$ "

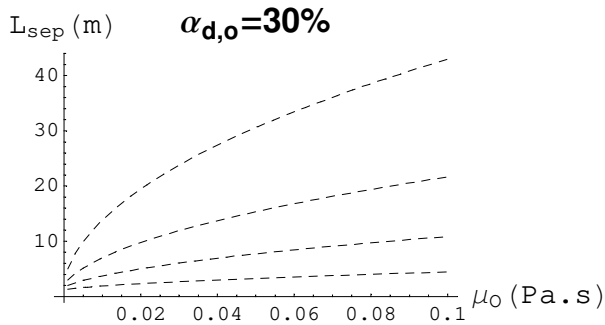
```

FindRoot::frsec : Secant method failed to converge to the prescribed accuracy after 15 iterations.

FindRoot::frsec : Secant method failed to converge to the prescribed accuracy after 15 iterations.

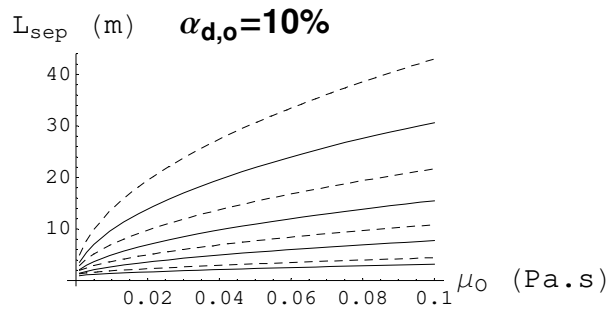
FindRoot::frsec : Secant method failed to converge to the prescribed accuracy after 15 iterations.

General::stop : Further output of FindRoot::frsec will be suppressed during this calculation.



- Graphics -

```
Show[alfa10, alfa30]
```



- Graphics -

■ 4. Variação da fração volumétrica de acordo com o diâmetro da partícula ($d_{\text{part}} = 500, 1000, 2000$ e $5000 \mu\text{m}$) - Com Viscosidade = $0,1 \text{ Pa.s}$

```
Clear[ad]
```

```
dpart = {0.0005, 0.001, 0.002, 0.005};
```

```
compsep = Table[comp[0.008, rho_o, rho_w, 0.1*mu_o, mu_w, dpart[[i]], 0.5], {i, 1, 4}];
```

```
regra =
```

```
Table[eqcomp[0.008, rho_o, rho_w, 0.1*mu_o, mu_w, dpart[[i]], 0.5, compsep[[i]][[1]], {i, 1, 4}]
```

```
FindRoot::frsec : Secant method failed to converge to the prescribed accuracy after 15 iterations.
```

```
FindRoot::frsec : Secant method failed to converge to the prescribed accuracy after 15 iterations.
```

```
FindRoot::frsec : Secant method failed to converge to the prescribed accuracy after 15 iterations.
```

```
General::stop : Further output of FindRoot::frsec will be suppressed during this calculation.
```

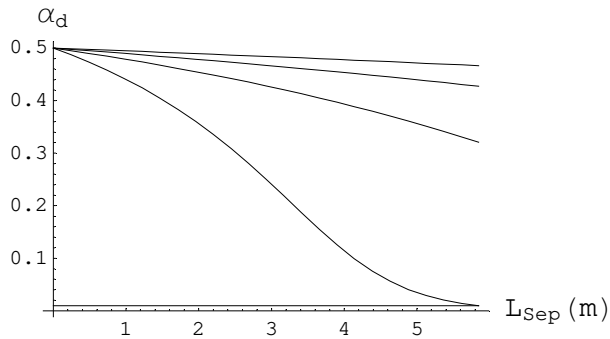
```
{ad -> InterpolatingFunction[{{0., 57.1037}}, <>],
```

```
{ad -> InterpolatingFunction[{{0., 28.8173}}, <>],
```

```
{ad -> InterpolatingFunction[{{0., 14.4314}}, <>],
```

```
{ad -> InterpolatingFunction[{{0., 5.84749}}, <>]}
```

```
advisc1 = Plot[Evaluate[Append[Table[ad[x] /. regra[[i]], {i, 1, 4}], 0.01]],
  {x, 0, Min[compsep]}, AxesLabel → {"Lsep (m)", "αd"}]
```



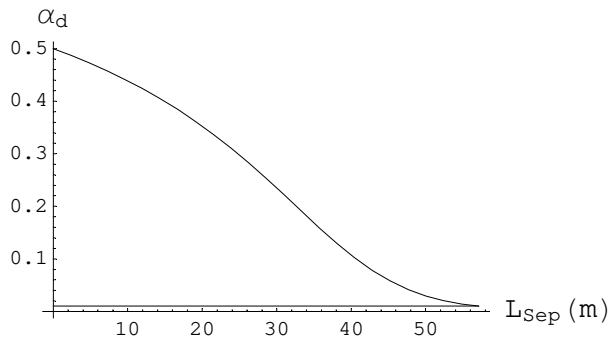
- Graphics -

```
compsep1 = Table[comp[0.008, ρo, ρw, 0.1 * μo, μw, 0.0005, 0.5]];
regra1 = Table[eqcomp[0.008, ρo, ρw, 0.1 * μo, μw,
  0.0005, 0.5, comp[0.008, ρo, ρw, 0.1 * μo, μw, 0.0005, 0.5]][[1]]];
ad500 = Plot[{0.01, Table[ad[x] /. regra1]}, {x, 0, compsep1},
  AxesLabel → {"Lsep (m)", "αd"}]
```

FindRoot::frsec : Secant method failed to converge to the prescribed accuracy after 15 iterations.

FindRoot::frsec : Secant method failed to converge to the prescribed accuracy after 15 iterations.

```
{ad → InterpolatingFunction[{{0., 57.1037}}, <>]}
```



- Graphics -

```

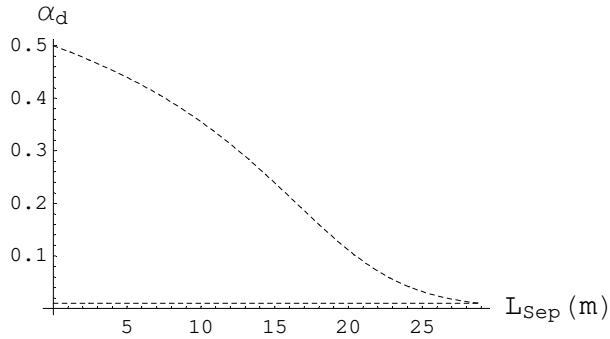
compsep2 = Table[comp[0.008,  $\rho_o$ ,  $\rho_w$ ,  $0.1 * \mu_o$ ,  $\mu_w$ , 0.001, 0.5]];
regra2 = Table[eqcomp[0.008,  $\rho_o$ ,  $\rho_w$ ,  $0.1 * \mu_o$ ,  $\mu_w$ ,
  0.001, 0.5, comp[0.008,  $\rho_o$ ,  $\rho_w$ ,  $0.1 * \mu_o$ ,  $\mu_w$ , 0.001, 0.5]][[1]]]
ad1000 = Plot[{0.01, Table[ad[x] /. regra2]}, {x, 0, compsep2},
  PlotStyle -> Dashing[{0.01}], AxesLabel -> {"LSep (m)", " $\alpha_d$ "}]

```

FindRoot::frsec : Secant method failed to converge to the prescribed accuracy after 15 iterations.

FindRoot::frsec : Secant method failed to converge to the prescribed accuracy after 15 iterations.

```
{ad -> InterpolatingFunction[{{0., 28.8173}}, <>]}
```



- Graphics -

```

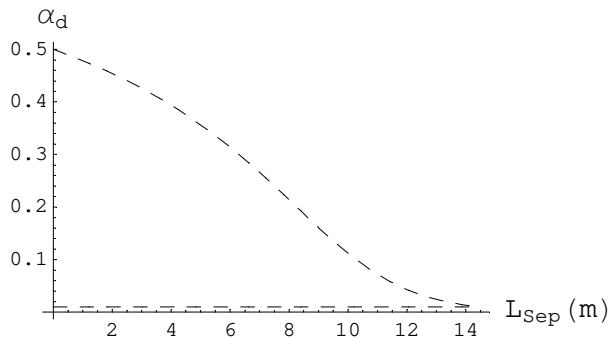
compsep3 = Table[comp[0.008,  $\rho_o$ ,  $\rho_w$ ,  $0.1 * \mu_o$ ,  $\mu_w$ , 0.002, 0.5]];
regra3 = Table[eqcomp[0.008,  $\rho_o$ ,  $\rho_w$ ,  $0.1 * \mu_o$ ,  $\mu_w$ ,
  0.002, 0.5, comp[0.008,  $\rho_o$ ,  $\rho_w$ ,  $0.1 * \mu_o$ ,  $\mu_w$ , 0.002, 0.5]][[1]]]
ad2000 = Plot[{0.01, Table[ad[x] /. regra3]}, {x, 0, compsep3},
  PlotStyle -> Dashing[{0.03}], AxesLabel -> {"LSep (m)", " $\alpha_d$ "}]

```

FindRoot::frsec : Secant method failed to converge to the prescribed accuracy after 15 iterations.

FindRoot::frsec : Secant method failed to converge to the prescribed accuracy after 15 iterations.

```
{ad -> InterpolatingFunction[{{0., 14.4314}}, <>]}
```



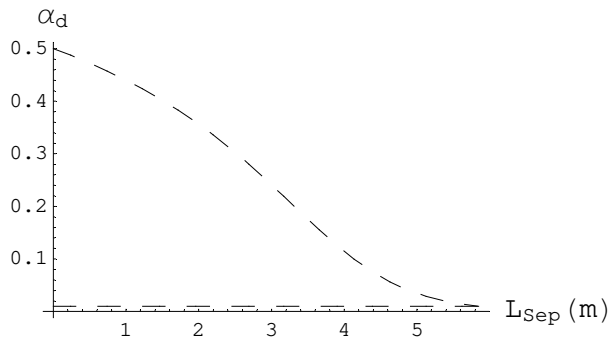
- Graphics -


```
compsep4 = Table[comp[0.008,  $\rho_o$ ,  $\rho_w$ , 0.1 *  $\mu_o$ ,  $\mu_w$ , 0.005, 0.5]];
regra4 = Table[eqcomp[0.008,  $\rho_o$ ,  $\rho_w$ , 0.1 *  $\mu_o$ ,  $\mu_w$ ,
  0.005, 0.5, comp[0.008,  $\rho_o$ ,  $\rho_w$ , 0.1 *  $\mu_o$ ,  $\mu_w$ , 0.005, 0.5]][[1]]]
ad5000 = Plot[{0.01, Table[ad[x] /. regra4]}, {x, 0, compsep4},
  PlotStyle -> Dashing[{0.05}], AxesLabel -> {" $L_{Sep}$  (m)", " $\alpha_d$ "}
```

FindRoot::frsec : Secant method failed to converge to the prescribed accuracy after 15 iterations.

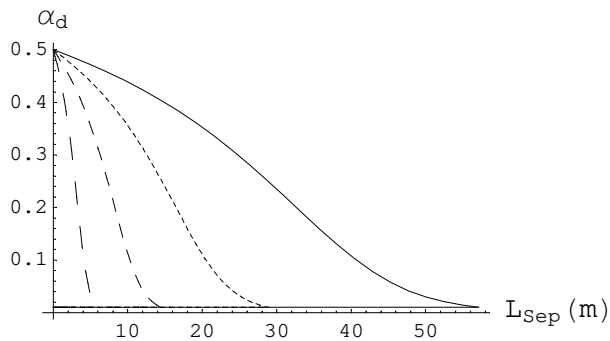
FindRoot::frsec : Secant method failed to converge to the prescribed accuracy after 15 iterations.

```
{ad -> InterpolatingFunction[{{0., 5.84749}}], <>]}
```



■ Graphics ■

```
Show[ad500, ad1000, ad2000, ad5000]
```



■ Graphics ■

■ 5. Variação da fração volumétrica - Com Viscosidade = 1 Pa.s

```
Clear[ad]
```

```

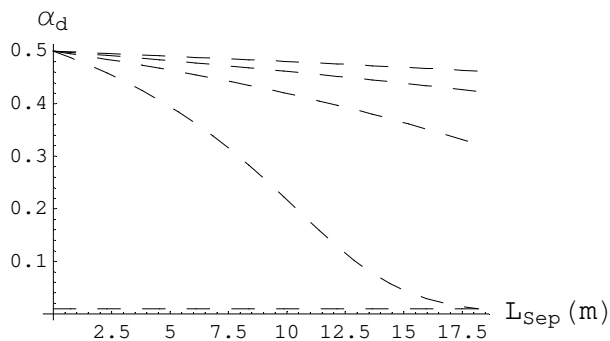
dpart = {0.0005, 0.001, 0.002, 0.005};
compsep22 = Table[comp[0.008,  $\rho_o$ ,  $\rho_w$ ,  $\mu_o$ ,  $\mu_w$ , dpart[[i]], 0.5], {i, 1, 4}];
regra22 =
  Table[eqcomp[0.008,  $\rho_o$ ,  $\rho_w$ ,  $\mu_o$ ,  $\mu_w$ , dpart[[i]], 0.5, compsep22[[i]]][[1]], {i, 1, 4}]

FindRoot::frsec : Secant method failed to converge to the prescribed accuracy after 15 iterations.

{{ad → InterpolatingFunction[{{0., 168.077}}, <>]],
 {ad → InterpolatingFunction[{{0., 88.6852}}, <>]],
 {ad → InterpolatingFunction[{{0., 45.3056}}, <>]],
 {ad → InterpolatingFunction[{{0., 18.2041}}, <>]]}

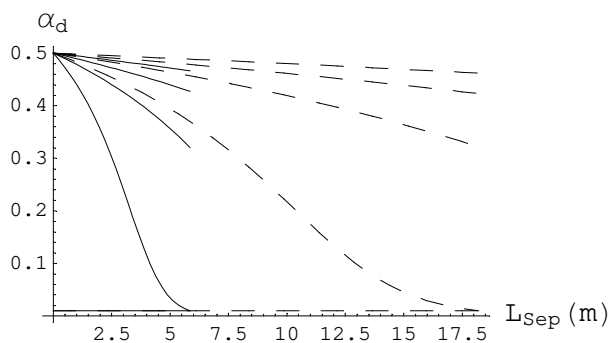
advise2 = Plot[Evaluate[Append[Table[ad[x] /. regra22[[i]], {i, 1, 4}], 0.01]],
  {x, 0, Min[compsep22]}, AxesLabel → {"Lsep (m)", " $\alpha_d$ "}, PlotStyle → Dashing[{0.05}]]

```



- Graphics -

```
Show[advise1, advise2]
```



- Graphics -

■ 6. Variação da fração volumétrica - Com Densidade = 900 kg/m³

```
Clear[ad]
```

```

dpart = {0.0005, 0.001, 0.002, 0.005};
compsep33 = Table[comp[0.008, 900,  $\rho_w$ , 0.1 *  $\mu_o$ ,  $\mu_w$ , dpart[[i]], 0.5], {i, 1, 4}];
regra33 = Table[
  eqcomp[0.008, 900,  $\rho_w$ , 0.1 *  $\mu_o$ ,  $\mu_w$ , dpart[[i]], 0.5, compsep33[[i]]][[1]], {i, 1, 4}]

FindRoot::frsec : Secant method failed to converge to the prescribed accuracy after 15 iterations.

FindRoot::frsec : Secant method failed to converge to the prescribed accuracy after 15 iterations.

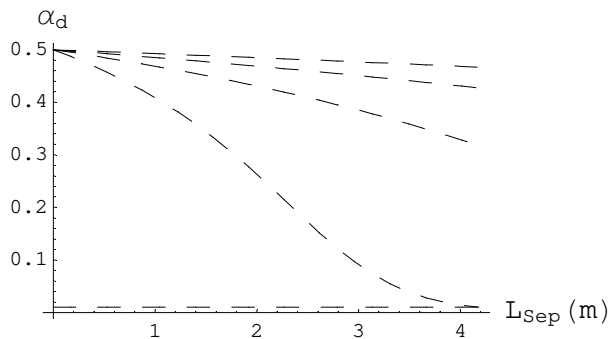
FindRoot::frsec : Secant method failed to converge to the prescribed accuracy after 15 iterations.

General::stop : Further output of FindRoot::frsec will be suppressed during this calculation.

{{ad → InterpolatingFunction[{{0., 40.6617}}, <>]],
 {ad → InterpolatingFunction[{{0., 20.397}}, <>]],
 {ad → InterpolatingFunction[{{0., 10.218}}, <>]],
 {ad → InterpolatingFunction[{{0., 4.17923}}, <>]]}

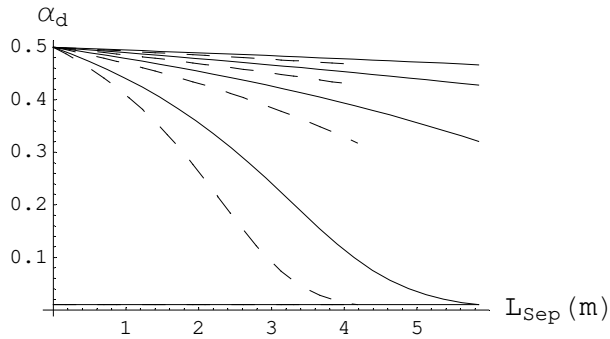
advise3 = Plot[Evaluate[Append[Table[ad[x] /. regra33[[i]], {i, 1, 4}], 0.01]],
  {x, 0, Min[compsep33]}, AxesLabel → {"Lsep (m)", " $\alpha_d$ "}, PlotStyle → Dashing[{0.05}]]

```



- Graphics -

Show[adviscl, advisc3]



- Graphics -

■ 7. Cálculo do Tempo de Retenção

Considerando que o custo dos cabeçotes por unidade de massa é de 50 a 200% superior ao da calandra, obtém-se $2 \leq L/D \leq 4$ para minimizar o custo total para um dado volume. Assumiremos $L/D = 3$. Assumimos também que o óleo ocupa 1/3 do volume do separador.

```
(*volume total do vaso separado*)
volsep[qc_, roc_, rod_, mic_, mid_, dpart_, ad0_] :=
  
$$\frac{\pi}{36} (\text{comp}[qc, roc, rod, mic, mid, dpart, ad0])^3$$


(*volume ocupado pelo óleo (fase contínua) no separador*)
volc[qc_, roc_, rod_, mic_, mid_, dpart_, ad0_] :=
  
$$\frac{\text{volsep}[qc, roc, rod, mic, mid, dpart, ad0]}{3}$$


(*Tempo de retenção do óleo no separador*)
tempo[qc_, roc_, rod_, mic_, mid_, dpart_, ad0_] :=
  
$$\frac{\text{volc}[qc, roc, rod, mic, mid, dpart, ad0]}{qc}$$

```

■ 7. 1. Tempo de Retenção (Alfa - 10, 30 e 50%)

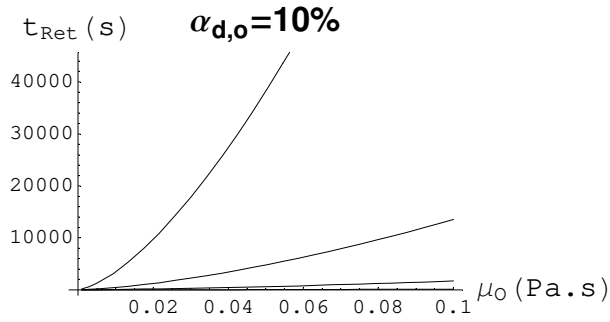
```
graftemp1 = Plot[{tempo[0.008, rho_o, rho_w, mic, mu_w, 0.0005, 0.1],
  tempo[0.008, rho_o, rho_w, mic, mu_w, 0.001, 0.1], tempo[0.008, rho_o, rho_w, mic, mu_w, 0.002, 0.1],
  tempo[0.008, rho_o, rho_w, mic, mu_w, 0.005, 0.1]}, {mic, 0.001, 0.1},
  AxesLabel -> {"mu_O (Pa.s)", "t_Ret (s)"}, PlotLabel -> "alpha_d,o=10%"]
```

FindRoot::frsec : Secant method failed to converge to the prescribed accuracy after 15 iterations.

FindRoot::frsec : Secant method failed to converge to the prescribed accuracy after 15 iterations.

FindRoot::frsec : Secant method failed to converge to the prescribed accuracy after 15 iterations.

General::stop : Further output of FindRoot::frsec will be suppressed during this calculation.



- Graphics -

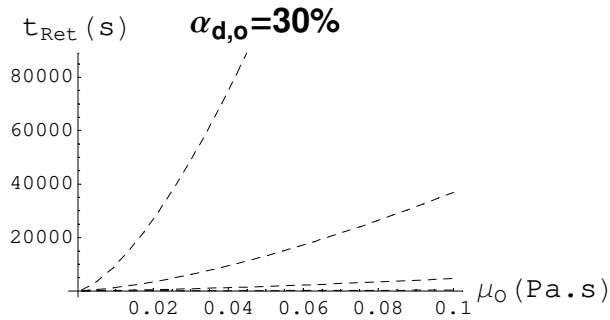
```
graftemp3 = Plot[
  {tempo[0.008,  $\rho_o$ ,  $\rho_w$ , mic,  $\mu_w$ , 0.0005, 0.3], tempo[0.008,  $\rho_o$ ,  $\rho_w$ , mic,  $\mu_w$ , 0.001, 0.3],
  tempo[0.008,  $\rho_o$ ,  $\rho_w$ , mic,  $\mu_w$ , 0.002, 0.3], tempo[0.008,  $\rho_o$ ,  $\rho_w$ , mic,  $\mu_w$ , 0.005, 0.3]},
  {mic, 0.001, 0.1}, AxesLabel -> {" $\mu_o \text{ (Pa.s)}$ ", " $\tau_{\text{Ret}} \text{ (s)}$ "},
  PlotLabel -> " $\alpha_{d,o}=30\%$ ", PlotStyle -> Dashing[{0.02}]]
```

FindRoot::frsec : Secant method failed to converge to the prescribed accuracy after 15 iterations.

FindRoot::frsec : Secant method failed to converge to the prescribed accuracy after 15 iterations.

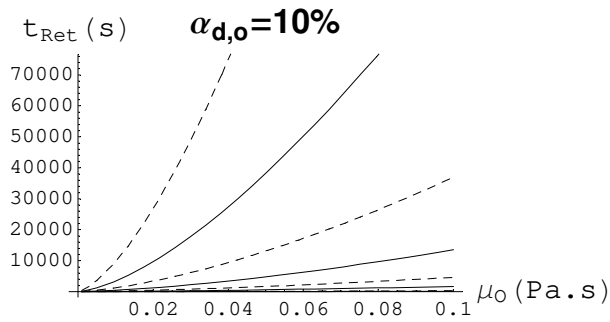
FindRoot::frsec : Secant method failed to converge to the prescribed accuracy after 15 iterations.

General::stop : Further output of FindRoot::frsec will be suppressed during this calculation.



- Graphics -

```
Show[graftemp1, graftemp3]
```



- Graphics -

■ 7. 2. Tempo de Retenção ($\rho_o = 900\text{kg/m}^3$)

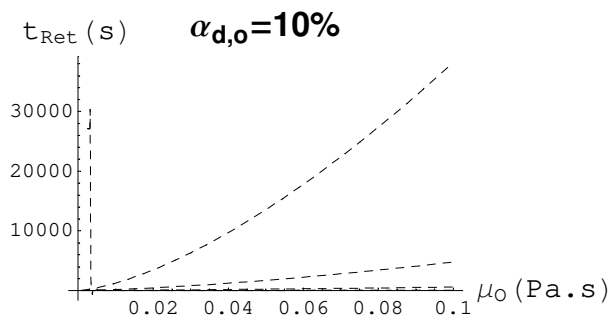
```
graftemp900 = Plot[
  {tempo[0.008, 900, rho_w, mic, mu_w, 0.0005, 0.1], tempo[0.008, 900, rho_w, mic, mu_w, 0.001, 0.1],
   tempo[0.008, 900, rho_w, mic, mu_w, 0.002, 0.1], tempo[0.008, 900, rho_w, mic, mu_w, 0.005, 0.1]},
  {mic, 0.001, 0.1}, AxesLabel -> {"mu_O (Pa.s)", "t_Ret (s)"},
  PlotLabel -> "alpha_d,o=10%", PlotStyle -> Dashing[{0.02}]]
```

FindRoot::frsec : Secant method failed to converge to the prescribed accuracy after 15 iterations.

FindRoot::frsec : Secant method failed to converge to the prescribed accuracy after 15 iterations.

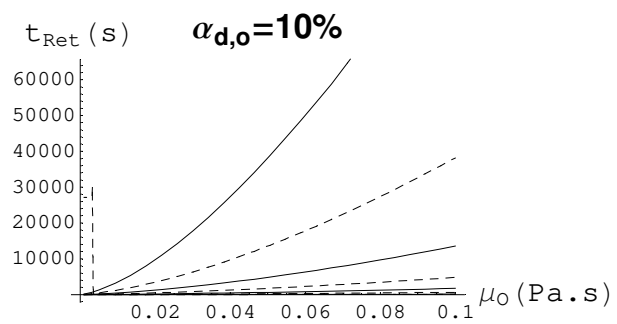
FindRoot::frsec : Secant method failed to converge to the prescribed accuracy after 15 iterations.

General::stop : Further output of FindRoot::frsec will be suppressed during this calculation.



- Graphics -

```
Show[graftemp1, graftemp900]
```



- Graphics -