

**UNIVERSIDADE SANTA CECÍLIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**  
**MESTRADO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**HISSAM ABDUL BASSET KHATIB**

**DISPOSITIVOS EM ESCALA PILOTO PARA A FORMAÇÃO EM DUTO  
VERTICAL DE SISTEMA “*CORE ANNULAR FLOW*” A PARTIR DE UMA  
MISTURA ÁGUA ÓLEO**

**SANTOS-SP**

**2016**

**HISSAM ABDUL BASSET KHATIB**

**DISPOSITIVOS EM ESCALA PILOTO PARA A FORMAÇÃO EM DUTO  
VERTICAL DE SISTEMA “*CORE ANNULAR FLOW*” A PARTIR DE UMA  
MISTURA ÁGUA ÓLEO**

Dissertação de Mestrado apresentado  
à Universidade Santa Cecília, como  
requisito para a obtenção do título de  
Mestre em Engenharia Mecânica, sob  
orientação do Prof. Dr. Deovaldo de  
Moraes Júnior e coorientação do Prof.  
Dr. Aldo Ramos Santos e Prof<sup>a</sup>. Dra.  
Marlene Silva de Moraes.

**SANTOS-SP**

**2016**

Autorizo a reprodução parcial ou total deste trabalho, por qualquer que seja o processo, exclusivamente para fins acadêmicos e científicos.

Khatib, Hissam Abdul Basset  
Dispositivos em Escala Piloto para a Formação em Duto Vertical de Sistema "Core Annular Flow" a partir de uma mistura água óleo.  
Hissam Abdul Basset Khatib. - 2016. 91 p.

Orientador: Prof. Dr. Deovaldo de Moraes Júnior.  
Coorientadores: Prof. Dr. Aldo Ramos Santos e Prof. Dra. Marlene Silva de Moraes.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Santa Cecília,  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Santos,  
SP, 2016.

1. core annular flow. 2. hidrociclone. 3. placas coalescentes  
4. petróleo. 5. transporte. I. Junior, Deovaldo de Moraes,  
orient. II. Santos, Aldo Ramos e Moraes, Marlene Silva de,  
coorient.  
III. Dispositivos em escala piloto para a formação em  
duto vertical de sistema "core annular flow" a partir de uma  
mistura óleo água.

Elaborada pelo SIBi – Sistema Integrado de Bibliotecas - Unisanta

## DEDICATÓRIA

Dedico aos meus pais, Abdul Basset Nouredine El Khatib e Aichi Abdul Latif Khatib, pela educação que me foi dada desde o início da vida, sendo eles os responsáveis por qualquer sucesso que eu possa obter durante minha vida pessoal e profissional. Dedico também aos meus irmãos Amer Abdul Basset El Khatib, Alya Abdul Basset El Khatib, namorada Yasmin Hassane Hammoud e ao primo Maher Khalil Majzoub que estão sempre me apoiando nas decisões da vida. Aos meus amigos em geral que estão do meu lado nos melhores e piores momentos.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus por me permitir a vida e todas as bênçãos dadas por Ele.

Ao professor Doutor Deovaldo de Moraes Júnior que dedicou seu tempo para me passar conhecimento e pela sua paciência para me apoiar no meu desenvolvimento profissional.

Aos professores Doutores Aldo Ramos Santos e Marlene Silva de Moraes e professor Mestre Vitor Rosa pelo apoio nas correções dos artigos publicados e da dissertação, e pelo suporte emocional dado durante todo o curso.

Aos técnicos Gilmar Alcantra, Volnei de Lemos, Victor Dias e Irineu Penha da Ressurreição do Laboratório de Operações Unitárias da UNISANTA pelo apoio ao desenvolvimento dos equipamentos estudados.

Aos estagiários do Laboratório de Operações Unitárias da UNISANTA.

Aos alunos graduandos do último semestre do curso de Engenharia Química aos quais tive a oportunidade de orientar e desenvolver nossas atividades.

**H.A.B.K.**

“Sucesso é ir de fracasso em fracasso sem perder o entusiasmo. ”

**Winston Churchill**

**RESUMO**

O fluxo centralizado anelar (“*Core Annular Flow*”, CAF) vem sendo estudado por ser de extrema importância para a indústria química e petroquímica. Através dele é possível diminuir a potência consumida com um fluido de alta viscosidade sem necessitar de bomba de grande porte ou de alto consumo de energia. O transporte de óleo pesado pode ser facilitado quando este é envolto por um anel de água no interior de um duto (CAF). O óleo, por essa técnica, é transportado com menos perda de carga e menor incrustação. Se o sistema CAF for formado em um duto vertical a partir de uma mistura de óleo e água e eventualmente gás, pode ser de grande utilidade em poços de petróleo. O presente trabalho visou projetar e construir dois dispositivos para formar o CAF de uma mistura óleo e água, em um trecho de tubulação reta, vertical e analisar seu comportamento com variações de vazão óleo-água. O primeiro dispositivo, denominado de placas coalescentes, foi constituído de uma tubulação de 120 mm de diâmetro e 300 mm de comprimento. No interior dessa tubulação havia 47 pratos ondulados com o diâmetro interno de 196 mm e externo de 55,1 mm. Nessas ondulações, o óleo com maior viscosidade e, como consequência, maior dificuldade em fluir em relação à água, era direcionado para o centro do duto e a água para a parte externa. O segundo dispositivo era formado, basicamente, de uma tubulação de 150 mm de diâmetro com comprimento de 655 mm, contendo um hidrociclone com um coeficiente de giro de 9,72. O óleo saía pela parte superior do hidrociclone e a água da base era direcionada para a parte externa do duto, formando o CAF. Variou-se nos dispositivos a vazão de água de 10 a 30 L/min e a frequência da bomba de óleo. O dispositivo por placas coalescentes foi mais eficiente, obtendo vazão mássica máxima de óleo de 12,15 kg/min com a correspondente perda de carga de 0,23 kgf/cm<sup>2</sup>. A unidade com hidrociclone formou o CAF com no máximo 11,96 kg/min de óleo e perda de carga de 0,56 kgf/cm<sup>2</sup>. Após os dispositivos a perda de carga no duto vertical foi de aproximadamente 2,8 vezes menor em relação ao duto com apenas óleo, operando com a mesma vazão do fluido viscoso.

**Palavras-chave:** *core annular flow*. hidrociclone. placas coalescentes. consumo energético. velocidade. transporte.

## ABSTRACT

Core Annular Flow (CAF) has been studied because of its utmost importance for chemical and petrochemical industries. With Core Annular Flow, it is possible to decrease the power drop by a high-viscosity fluid without the use of a large pump, or high-energy consumption. It may help move heavy oil along a pipe if a water tube involves it. By the CAF technique, heavy oil is transported with less pressure drop and fouling. A CAF system constituted by a vertical pipe carrying an oil and water mixture, and possibly with gas, may be useful in petroleum wells. This dissertation aims to design and construct two devices to constitute a CAF system of an oil and water mixture, in a straight, vertical pipe, and to analyze its behavior by varying the oil and water flow rates. The first device, named coalescing plates, constitutes of a 120 mm diameter and 300 mm length tube whose interior has 47 wavy plates of 196 mm interior and 55.1 mm exterior diameter. Inside those plates, the oil moves to the center of the tube because of its viscosity while the water forms a pipe inside the tube around the oil. The second device is, basically, a tube of 150mm diameter and 655mm length containing a hydrocyclone with a drag coefficient of 9.72. In this apparatus, the CAF system consists of a tube in which oil flows through the upper section of the hydrocyclone while the water moves around to envelop the fluid. The water flow rate was varied from 10 to 30 L per minute, and the pumping frequency was also manipulated. The coalescing plate device was more efficient, and it yielded an oil maximum mass flow of 12.15 kg per minute, and a pressure drop of 0.23 kgf/cm<sup>2</sup>. The device containing the hydrocyclone formed a CAF system with an oil maximum mass flow of 11.96 kg per minute, and a pressure drop of 0.56 kgf/cm<sup>2</sup>. After the devices, the pressure drop in the vertical tube was approximately 2.8 times smaller in comparison to a pure oil transport with the same flow rate.

**Keywords:** *core annular flow*. hydrocyclone. coalescing plates. energy consumption. flow rate. oil transport.

### Lista de Figuras



|              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |    |
|--------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 3.2 - | Produção mundial. (INFOPETRO, 2012)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 27 |
| Figura 3.3 - | Misturador Estático (MORAES, SILVA; MORAES, 2011)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 28 |
| Figura 3.4 - | Padrões de escoamento para tubos horizontais óleo-água. (JOSEPH, RINARDY, 1993)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 30 |
| Figura 3.5 - | Padrões de escoamento para tubos verticais óleo-água. a) Escoamento em Bolhas; b) Escoamento em Golfadas; c) Escoamento de Transição ou Intermitente Agitante; d) Escoamento Anular (SILVA S.S, 2006)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 30 |
| Figura 3.6 - | Esquema do hidrociclone (ARRUDA, 2008).                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 37 |
| Figura 3.7 - | Trajetoória do fluido no interior do hidrociclone (ARRUDA, 2008).                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 38 |
| Figura 3.8 - | Hidrociclone por Colman & Thew, 1998.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 39 |
| Figura 4.1 - | Equipamento utilizado para formação do <i>Core Annular Flow</i> (Laboratório de Operações Unitárias – UNISANTA)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 41 |
| Figura 4.2 - | Vista da planta equipamento utilizado para formação do <i>Core Annular Flow</i> . 1) DCAFV – Dispositivo para a formação do <i>Core Annular Flow</i> na vertical; 2) Pressão a jusante; 3) Pressão a 650 mm do PI a jusante; 4) Duto de 1” de PVC transparente para estudo da formação do CAF; 5) SC – Coletor de amostra; 6) TK-03 - tanque de separação água e óleo; 7) M – misturador estático; 8) FI – rotâmetro da linha de água; 9) V – Válvula de regulagem; 10) CHV – válvula de retenção; 11) B-02 – bomba da linha de óleo; 12) B-01 – bomba da linha de água; 13) TK-01 – tanque de água; 14) TK-02 – tanque de óleo e 15) V – válvula de regulagem a montante do dispositivo (Laboratório de Operações Unitárias – UNISANTA). | 42 |
| Figura 4.3 - | Tanque de separação água e óleo de 74 litros                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 43 |
| Figura 4.4 - | Tanque de óleo de 74 litros                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 44 |
| Figura 4.5 - | Tanque da mistura água-óleo de 192 litros                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 45 |
| Figura 4.6 - | Bomba regenerativa de 0,9 HP                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 46 |
| Figura 4.7 - | Medidor de vazão (rotâmetro)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 46 |
| Figura 4.8 - | Inversor de frequência                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 47 |

|               |                                                                                                                                       |    |
|---------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 4.9 -  | Misturador estático do tipo fita torcida                                                                                              | 47 |
| Figura 4.10 - | Singularidade a montante da bomba                                                                                                     | 48 |
| Figura 4.11 - | Válvula de retenção                                                                                                                   | 49 |
| Figura 4.12 - | Válvula de gaveta                                                                                                                     | 49 |
| Figura 4.13 - | Representação em papelão do dispositivo de placas                                                                                     | 52 |
| Figura 4.14 - | Estrutura teórica do dispositivo de placas coalescentes. Medidas em milímetros. Valores iniciais de projeto.                          | 53 |
| Figura 4.15 - | Planta do dispositivo placas coalescentes. Medidas em milímetros. Valores iniciais de projeto.                                        | 54 |
| Figura 4.16 - | Torno mecânico                                                                                                                        | 56 |
| Figura 4.17 - | Medição das placas coalescentes com paquímetro                                                                                        | 57 |
| Figura 4.18 - | Molde das placas                                                                                                                      | 57 |
| Figura 4.19 - | Placas moldadas                                                                                                                       | 58 |
| Figura 4.20 - | Placas fixadas ao suporte                                                                                                             | 59 |
| Figura 4.21 - | Dispositivo de placas coalescentes para formação em duto vertical do sistema “ <i>Core Annular Flow</i> ”. Altura de 180 mm.          | 60 |
| Figura 4.22 - | Unidade com as placas coalescentes. Medidas em milímetros. Valores iniciais de projeto.                                               | 61 |
| Figura 4.23 - | Protótipo hidrociclone (interno)                                                                                                      | 62 |
| Figura 4.24 - | Protótipo hidrociclone (externo)                                                                                                      | 63 |
| Figura 4.25 - | Dimensões do hidrociclone, perfil. Dispositivo para a formação do <i>Core Annular Flow</i> na Vertical (DCAFV). Medidas em milímetros | 64 |
| Figura 4.26 - | Dimensões do hidrociclone, planta. Medidas em milímetros                                                                              | 65 |
| Figura 4.27 - | Construção do mole da parte inferior do hidrociclone                                                                                  | 66 |
| Figura 4.28 - | Construção do molde da parte superior do hidrociclone                                                                                 | 66 |
| Figura 4.29 - | Dispositivo hidrociclone desenvolvido                                                                                                 | 67 |
| Figura 4.30 - | Fluxograma do sistema. Legenda: DCAFV – Dispositivo para a formação do Core Annular Flow na vertical; TE –                            | 69 |

tanque; V – válvula; B – bomba; M – misturador estático; IF – inversor de frequência; TK – tanque; PI – indicador de pressão; FI – rotâmetro; CHV – válvula de retenção; SC – coletor de amostra

|              |                                                                                                                                                                                                   |    |
|--------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 5.1 - | Formação do Core Annular Flow                                                                                                                                                                     | 70 |
| Figura 5.2 - | Curva da bomba regenerativa (turbo bomba) em operação com água                                                                                                                                    | 73 |
| Figura 5.3 - | Escoamento monofásico. Número de Reynolds e tempo espacial                                                                                                                                        | 75 |
| Figura 5.4 - | Perda de carga do dispositivo em função da vazão mássica de óleo para o sistema Core Annular Flow no dispositivo com placas coalescentes Frequências no motor da bomba de óleo de 30, 40 e 50 Hz. | 82 |
| Figura 5.5 - | Perda de carga do trecho reto em função da vazão mássica de óleo para o sistema Core Annular Flow após as placas coalescentes. Frequências no motor da bomba de óleo de 30, 40 e 50 Hz.           | 82 |
| Figura 5.6 - | Perda de carga em função da vazão mássica de óleo para o sistema Core Annular Flow                                                                                                                | 85 |
| Figura 5.7 - | Perda de carga do dispositivo em função da vazão mássica de óleo para o sistema Core Annular Flow no dispositivo com placas coalescentes Frequências no motor da bomba de óleo de 30, 40 e 50 Hz. | 86 |
| Figura 5.8 - | Perda de carga do trecho reto em função da vazão mássica de óleo para o sistema Core Annular Flow após as placas coalescentes. Frequências no motor da bomba de óleo de 30, 40 e 50 Hz.           | 87 |

### **Lista de Tabelas**

|              |                     |    |
|--------------|---------------------|----|
| Tabela 3.1 - | Composição petróleo | 22 |
|--------------|---------------------|----|

|               |                                                                            |    |
|---------------|----------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 3.2 -  | Classificação de °API                                                      | 24 |
| Tabela 3.3 -  | Relação entre °API e a massa específica                                    | 24 |
| Tabela 3.4 -  | Comprimento equivalente para PVC ou cobre                                  | 36 |
| Tabela 4.1 -  | Propriedades físico-químicas do óleo Lubrax 680                            | 50 |
| Tabela 4.2 -  | Propriedades físico-químicas da água deionizada                            | 51 |
| Tabela 5.1 -  | Determinação da densidade da água a 20 °C                                  | 71 |
| Tabela 5.2 -  | Dados da bomba em operação com água (40Hz, 2395 rpm)                       | 72 |
| Tabela 5.3 -  | Dados da bomba em operação com água (50Hz, 2992 rpm)                       | 72 |
| Tabela 5.4 -  | Dados da bomba em operação com água (60Hz, 3568 rpm)                       | 73 |
| Tabela 5.5 -  | Dados da bomba em operação com óleo (40Hz, 2290 rpm)                       | 74 |
| Tabela 5.6 -  | Dados da bomba em operação com óleo (50Hz, 2786 rpm)                       | 74 |
| Tabela 5.7 -  | Dados da bomba em operação com óleo (60Hz, 3482 rpm)                       | 75 |
| Tabela 5.8 -  | Dados experimentais para água                                              | 76 |
| Tabela 5.9 -  | Dados experimentais para óleo                                              | 77 |
| Tabela 5.10 - | Dados do ensaio nº 1 com o dispositivo de placas coalescentes (30 Hz)      | 78 |
| Tabela 5.11 - | Resultados do ensaio nº 1 com o dispositivo de placas coalescentes (30 Hz) | 79 |
| Tabela 5.12 - | Dados do ensaio nº 2 com o dispositivo de placas coalescentes (40 Hz)      | 80 |
| Tabela 5.13 - | Resultados do ensaio nº 2 com o dispositivo de placas coalescentes (40 Hz) | 80 |
| Tabela 5.14 - | Dados do ensaio nº 3 com o dispositivo de placas coalescentes (50 Hz)      | 81 |
| Tabela 5.15 - | Resultados do ensaio nº 3 com o dispositivo de placas coalescentes (50 Hz) | 81 |

|               |                                                                  |    |
|---------------|------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 5.16 - | Dados do ensaio nº 1 com o dispositivo hidrociclone (30 Hz)      | 83 |
| Tabela 5.17 - | Resultados do ensaio nº 1 com o dispositivo hidrociclone (30 Hz) | 83 |
| Tabela 5.18 - | Dados do ensaio nº 2 com o hidrociclone (40 Hz)                  | 84 |
| Tabela 5.19 - | Resultados do ensaio nº 2 com o hidrociclone (40 Hz)             | 84 |
| Tabela 5.20 - | Dados do ensaio nº 3 com o hidrociclone (50 Hz)                  | 84 |
| Tabela 5.21 - | Resultados do ensaio nº 3 com o hidrociclone (50 Hz)             | 85 |

### **Lista de símbolos**

|         |                                                       |
|---------|-------------------------------------------------------|
| $\beta$ | Relação entre a abertura interna e o diâmetro interno |
|---------|-------------------------------------------------------|

|                   |                                                                                                                                                                                                  |
|-------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $\gamma$          | Peso específico do fluido (kgf/m <sup>3</sup> )                                                                                                                                                  |
| $\varepsilon$     | Rugosidade equivalente (m)                                                                                                                                                                       |
| $\Delta P$        | Diferença de pressão no escoamento (kgf/m <sup>2</sup> )                                                                                                                                         |
| $l_{\text{—}}$    | Perda de carga no sistema (tubulações, acessórios) (m)                                                                                                                                           |
| $\Delta Z$        | Desnível entre a altura do manômetro e saída do sistema                                                                                                                                          |
| $n$               | Número de placas;                                                                                                                                                                                |
| CGS               | Unidades – centímetro (comprimento), grama (massa) e segundo (tempo).                                                                                                                            |
| cm                | Centímetro, unidade de comprimento (SI).                                                                                                                                                         |
| cm <sup>2</sup>   | Centímetro quadrado, unidade derivada do SI, utilizada para determinação de áreas (superfície).                                                                                                  |
| $D$               | Diâmetro da tubulação (m)                                                                                                                                                                        |
| $f$               | Fator de atrito na tubulação (adimensional)                                                                                                                                                      |
| $g$               | Aceleração da gravidade (m/s <sup>2</sup> )                                                                                                                                                      |
| $h$               | Hora, unidade de tempo (SI), equivalente a 60 minutos.                                                                                                                                           |
| hp                | Unidade de medida de potência origem inglesa                                                                                                                                                     |
| Hz                | Hertz, unidade derivada do SI, utilizada para a determinação de frequência, equivalente a 1 ciclo por segundo.                                                                                   |
| kg                | Quilograma, unidade básica de massa equivalente a 1.000 gramas (SI)                                                                                                                              |
| kg/m <sup>3</sup> | Quilograma por metro cúbico (SI)                                                                                                                                                                 |
| km                | Quilometro, unidade equivalente a 1.000 metros (SI).                                                                                                                                             |
| kPa               | Quilopascal, unidade padrão de pressão (SI).                                                                                                                                                     |
| $L$               | Comprimento do sistema (m)                                                                                                                                                                       |
| L/min             | Litros por minuto.                                                                                                                                                                               |
| $L_{eq}$          | Comprimento dos acessórios no sistema (m)                                                                                                                                                        |
| LPM               | Litros por minuto                                                                                                                                                                                |
| $m$               | Metro, unidade de comprimento, equivalente a 100 cm. (SI).                                                                                                                                       |
| $m^2$             | Metro quadrado, unidade derivada do SI, utilizada para determinação de áreas (superfície).                                                                                                       |
| $m^3/h$           | Metros cúbicos por hora                                                                                                                                                                          |
| mca               | Metros de coluna de água.                                                                                                                                                                        |
| min               | Minuto, unidade de tempo (SI), equivalente a 60 segundos.                                                                                                                                        |
| mm                | Milímetro, unidade de comprimento equivalente à 1/1.000 metro (SI).                                                                                                                              |
| NRe               | Número de Reynolds (adimensional)                                                                                                                                                                |
| °                 | Grau, símbolo gráfico utilizado para designar a grandeza de um ângulo ou quando acompanhado das letras maiúsculas C ou F, uma temperatura em <i>Celsius</i> ou <i>Fahrenheit</i> , entre outros. |
| °API              | Grau API. Escala hidrométrica, utilizada para a definição das densidades de petróleo e seus derivados                                                                                            |
| Pa.s              | Pascal segundo, unidade utilizada para expressar viscosidade dinâmica, equivalente a 1 kg m/s (SI).                                                                                              |
| Poise             | Unidade de viscosidade dinâmica no sistema CGS de unidades.                                                                                                                                      |
| $R$               | Raio da curvatura                                                                                                                                                                                |
| rpm               | Rotações por minuto                                                                                                                                                                              |
| $s$               | Segundo, unidade de tempo (SI).                                                                                                                                                                  |
| $s^2$             | Segundo quadrado, unidade derivada do SI.                                                                                                                                                        |
| SI                | Sistema Internacional de Unidades (MKS)                                                                                                                                                          |

## SUMÁRIO

### 1. INTRODUÇÃO

19

### 2. OBJETIVO

21

|                                                                |           |
|----------------------------------------------------------------|-----------|
| 2.1 Objetivo Geral                                             | 21        |
| 2.2 Objetivos Específicos                                      | 21        |
| <b>3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>                                 | <b>22</b> |
| 3.1 Petróleo                                                   | 22        |
| 3.2 Extração e transporte de petróleo                          | 25        |
| 3.3 Misturador Estático                                        | 27        |
| 3.4 <i>Core Annular Flow</i>                                   | 28        |
| 3.5 Equação da continuidade                                    | 32        |
| 3.6 Reynolds                                                   | 32        |
| 3.7 Tempo Espacial                                             | 33        |
| 3.8 Perda de Carga                                             | 33        |
| 3.9 Singularidades                                             | 35        |
| 3.10 Dispositivo de placas                                     | 36        |
| 3.11 Hidrociclone                                              | 36        |
| <b>4 MATERIAL E MÉTODOS</b>                                    | <b>41</b> |
| 4.1 Equipamentos e Acessórios                                  | 41        |
| 4.2 Dispositivo por placas coalescentes                        | 51        |
| 4.3 Hidrociclone                                               | 62        |
| 4.4 Procedimento Experimental                                  | 68        |
| <b>5 RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>                               | <b>70</b> |
| 5.1 Formação do “Core Annular Flow”                            | 70        |
| 5.2 Escoamento Monofásico. Curva da bomba                      | 71        |
| 5.3 Escoamento monofásico. Número de Reynolds e tempo espacial | 75        |
| 5.4 Escoamento bifásico. Experimentos                          | 78        |
| 5.5 Ensaio com apenas óleo em trecho reto vertical             | 86        |
| <b>6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES</b>                                | <b>87</b> |
| <b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>                              | <b>88</b> |
| <b>ANEXO A</b>                                                 | <b>92</b> |
| <b>ANEXO B</b>                                                 | <b>93</b> |

## 1. INTRODUÇÃO

O petróleo é conhecido desde o início das civilizações, porém sua exploração e refino se tornaram expressivas a partir do final do século XIX, em função do surgimento de veículos à combustão. Substituindo o óleo de baleia e querosene, a gasolina e o óleo diesel se tornaram as maiores fontes de energia para o transporte. (BRASIL; ARAÚJO; SOUSA; 2012).

O petróleo apresenta um elevado valor econômico tanto em panoramas nacionais como nos internacionais, uma vez que este recurso mineral movimenta bilhões de dólares anualmente e está estritamente atrelado ao desenvolvimento bruto de todas as nações.

A crescente demanda deste produto estimulou as necessidades de novas descobertas, o aprimoramento no conhecimento geológico, a exploração do petróleo em terra e águas profundas, o transporte do óleo e de seus derivados e a investigação por diversas empresas do ramo energético.

Embora o país possua um cenário energético de vasta disponibilidade do material (LUCCHESI, 1998), a exploração tem tido inúmeros desafios e necessidades de novas tecnologias. Desafios estes nas produções de petróleo em terras e águas profundas, exploração do petróleo não convencional (petróleos pesados), transporte de petróleo com baixo custo operacional e viável economicamente.

A exploração de petróleo no Brasil vem crescendo gradualmente tanto em águas profundas. As bacias de petróleo e gás no Brasil, tanto terrestres quanto marítimas, em sua grande maioria apresentam características de óleo pesado como viscosidade entre 100 e 10000 cP e baixo grau API (American Petroleum Institute) entre 28 e 30° de acordo com a classificação da Agência Nacional de Petróleo (ANP – Brasil).

Para a exploração das reservas de petróleo e transporte do mesmo consiste em utilizar novas tecnologias para que se torne viável economicamente a produção de óleo e gás no país.

Tendo em vista a solução das dificuldades, é apresentada a técnica de escoamento anular central de transporte de fluido ou *Core Annular Flow* (CAF), patenteada por Isaacs e Speed em 1904, nos Estados Unidos.



Essa técnica de transporte consiste na formação de um escoamento anular de água na periferia do fluxo de óleo, formando um sistema bifásico de escoamento objetivando a diminuição das perdas de cargas geradas por atrito.

Não foram encontrados dados na literatura pesquisada da formação, a partir de uma mistura de água e óleo, do CAF na vertical, simulando um poço de petróleo.

## 2. OBJETIVO

### 2.1. Objetivo Geral

O presente estudo objetivou projetar, construir dois dispositivos e verificar o desempenho da tecnologia, um com placas coalescentes e outro com um hidrociclone, capazes de formar um escoamento bifásico (água-óleo) na forma de *Core Annular Flow* em duto reto e vertical a partir de uma mistura desses dois fluidos.

### 2.2. Objetivos Específicos

Os objetivos específicos deste trabalho foram:

- a) Demonstrar em duto vertical transparente a formação do sistema;
- b) Determinar a perda de carga experimental dos dispositivos;
- c) Quantificar a perda de carga da tubulação a jusante dos dispositivos (*riser*) durante a formação do *Core Annular Flow*;
- d) Comparar os resultados com dados de escoamento convencional.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1. Petróleo

O petróleo é um derivado de matéria orgânica tendo como principais componentes os hidrocarbonetos aromáticos, que chegam a atingir 30% da sua composição total (TISSOT & WELTE, 1984; KENNISH, 1996; USEPA, 2005). Possui também compostos sulfurados, nitrogenados e metálicos dentre outros (ELLIS E PAUL, 1998). Contém ainda traços de metais como vanádio, níquel, sódio, cálcio, cobre e urânio. A Tabela 3.1 demonstra os teores mais comuns dos componentes do petróleo.

**Tabela 3.1 – Composição petróleo.**

| <b>Componente</b> | <b>Teor (%)</b> |
|-------------------|-----------------|
| Carbono           | 84 – 87         |
| Hidrogênio        | 11 – 14         |
| Enxofre           | 0 - 6           |
| Nitrogênio        | < 1             |
| Oxigênio          | < 1             |
| Metais            | < 1             |
| Sais              | < 1             |

Fonte: Adaptado de Santos (2007).

De aspecto oleoso e geralmente menos denso que a água, o petróleo é produto da degradação de plantas e animais soterrados a milhares de anos, que sofreram grandes modificações de temperatura e pressão. Depois de sedimentar em lamas argilosas, foram submetidos a transformações aeróbicas e anaeróbicas por bactérias.

Durante esses processos, o petróleo disperso acumulou-se por migração em reservatórios formando as acumulações de óleo, normalmente em terrenos porosos e arenosos. A maior parte é encontrada em rochas sedimentares (bacias sedimentares) caracterizadas por alta permeabilidade, além de quase todos os tipos de petróleo mostrarem atividade óptica, com origem de organismos vivos, sendo estes opticamente ativos. (FARAH, 2012).

As dimensões dos poços variam quanto à profundidade e quanto à direção. Os poços rasos não ultrapassam normalmente 10 metros de profundidade, os médios variam de 10 a 2500 metros e os considerados profundos passam de 2500 metros. Eles podem ser verticais, horizontais ou inclinados. Por ser uma substância rica, fonte de energia e matéria-prima de inúmeros produtos, tomou uma grande importância no cenário econômico mundial.

Atualmente são utilizados métodos sísmicos, como refração e reflexão, para a prospecção de petróleo, além de um prévio conhecimento da geologia do espaço, bem como métodos potenciais como gravimetria e magnetometria (variáveis que comprovam a existência ou não de óleo na área analisada). Após a prospecção, a fase de perfuração ocorre com as brocas sendo introduzidas ao poço juntamente com os fluidos de perfuração. Esses fluidos devem apresentar algumas características (THOMAS, 2001):

- a) ser bombeável;
- b) ser quimicamente estável;
- c) facilitar a separação dos cascalhos na superfície;
- d) manter os sólidos em suspensão quando estiver em repouso;
- e) ser inerte em relação às rochas;
- f) aceitar qualquer tratamento químico-físico para seu reaproveitamento;
- g) apresentar baixo grau de corrosão e abrasão com relação aos equipamentos de perfuração.

A classificação do petróleo é medida pelo seu grau API (“American Petroleum Institute”), uma escala hidrométrica criada para mencionar a densidade relativa dos líquidos derivados do petróleo. Sendo assim calculado conforme a equação 3.1.

$$^{\circ}\text{API} = \frac{141,5}{d} - 131,5 \quad (3.1)$$

Sendo

d a densidade relativa do petróleo.

A classificação do óleo pode ser superleve, leve, médio, pesado e extrapesado conforme Tabela 3.2.

**Tabela 3.2 – Classificação de °API.**

| <b>Petróleo</b> | <b>°API</b> |
|-----------------|-------------|
| Extrapesado     | < 10        |
| Pesado          | 10 - 22,3   |
| Médio           | 22,3 - 31,1 |
| Leve            | 31,1 - 39   |
| Superleve       | 39          |

Quanto maior o grau API, maior é o valor agregado no mercado. (MORAES, 2013, p. 363).

Para a maior compreensão dos dados apresentados na Tabela 3.2, apresenta-se na Tabela 3.3 a relação entre a caracterização °API e a massa específica em g/cm<sup>3</sup>.

**Tabela 3.3 – Relação entre °API e a massa específica.**

| <b>°API</b> | <b>Massa específica<br/>(g/cm<sup>3</sup>)</b> |
|-------------|------------------------------------------------|
| < 10,0      | >1,0                                           |
| 10,0 - 22,3 | 1,0 - 0,92                                     |
| 22,3 - 31,1 | 0,92 - 0,87                                    |
| 31,1 - 39   | 0,87 - 0,83                                    |
| > 39        | < 0,83                                         |

Nota-se na Tabela 3.3 que quanto menor o °API maior a massa específica do petróleo caracterizando assim como pesado.

Economicamente os petróleos mais leves são de maior valor comercial, tendo em vista a existência de diversas tecnologias de extração e transporte

garantindo assim o menor custo operacional. Os petróleos de menor °API (pesado e extrapesado) são de difícil extração e transporte, necessitando assim o uso de novas tecnologias e estudos para que se torne economicamente viável.

Os processos de viscorredução iniciaram-se em 1939 objetivando reduzir a viscosidade de petróleos preparando, assim, a extração das matérias-primas do óleo em destilações atmosféricas. A injeção de vapor d'água e o craqueamento térmico são exemplos de processos de viscorredução empregados.

No decorrer dos anos necessitou-se o aumento da extração de petróleos pesados. Segundo Mandil (2002) os óleos abaixo de 20 °API (pesado e extrapesados) são considerados como não convencionais. As propriedades dos óleos pesados e extrapesados necessitam de soluções para a extração, transporte e refino.

Jazidas de óleos não convencionais são encontrados em grandes escalas em países como o Canadá e Venezuela, possuindo reservatórios que atingem cifras de 3 a 4 trilhões de barris de óleo, com potenciais atingíveis de 600 bilhões de barris de óleo. (USGS, 2003 e HIRCH et al, 2005).

Para o transporte de óleos pesados usa-se a técnica Core Annular Flow, técnica está implementada em oleodutos de países como a Venezuela e Canadá.

### **3.2. Extração e transporte de petróleo**

A extração de petróleo inicia-se pelas prospecções garantindo assim a probabilidade de existência de petróleo a ser explorado. Finalizando esta fase, inicia-se o processo de perfuração dos poços. Processo este de grande custo operacional e riscos. Os óleos dos poços produtores de petróleo é transportado por tubulações chamadas de *riser* e *howline* até as unidades estacionárias de produção.

Os *risers* são estruturas que agregam na extração do petróleo, como principal finalidade efetuar o transporte até as plataformas. Este possui como

característica dutos rígidos, para suportar a grande pressão da coluna de água e os deslocamentos sofridos pela correnteza marítima.

As unidades estacionárias de produção podem ser de diversos tipos, como terrestres e marítimas. As marítimas podem ser do tipo plataforma fixa, plataforma flutuante, FPSO (*Floating Production Storage and Offloading*) entre outras.

Conforme a pressão interna dos reservatórios, temperatura e °API do óleo explorado, os poços podem ser dos tipos surgentes e forçados. Poços surgentes são aqueles cuja a pressão interna do reservatório garante o escoamento do óleo até as unidades estacionárias de produção. Os poços forçados são aqueles em que os reservatórios não possuem capacidade para escoar, apenas com a pressão natural, o óleo até as unidades estacionárias de produção, pois em sua maioria são poços de baixo °API e poços no final da vida útil (SZKLO, 2005).

Para a otimização da exploração de petróleo em poços forçados, utilizam-se forças mecânicas para que este óleo possa-se ser escoado até as unidades estacionárias de produção. Este tipo de otimização pode ser com injeção de gás lift e vapor de água nos poços de produção garantindo, assim, a diminuição da viscosidade do óleo e aumento da pressão. Além desses podem citar a produção através de bombas. Estas, que na maioria das vezes, precisam ter uma capacidade muito alta consumindo muita energia, pois seu fluido é de alta viscosidade (WEC, 2001).

O Brasil possui vários tipos de óleos e poços produtores. Variando de óleos médios a óleos pesados, unidades estacionárias de produção terrestre e marítima, exploração surgente e forçada.

Os maiores reservatórios de petróleo do Brasil estão localizados na bacia de Santos (maior) e na bacia de Campos, sendo a qualidade respectivamente de 28°API e 25°API, sendo assim classificado como médio (DIÁRIO DO PRE-SAL, 2015).

Atualmente (TRANSPETRO, 2015) a produção extraída em alto-mar no Brasil já chega a 86% de toda a produção nacional, como mostra a Figura 3.1, sendo o primeiro em nível mundial no cenário de produção em águas profundas, conforme Figura 3.2.

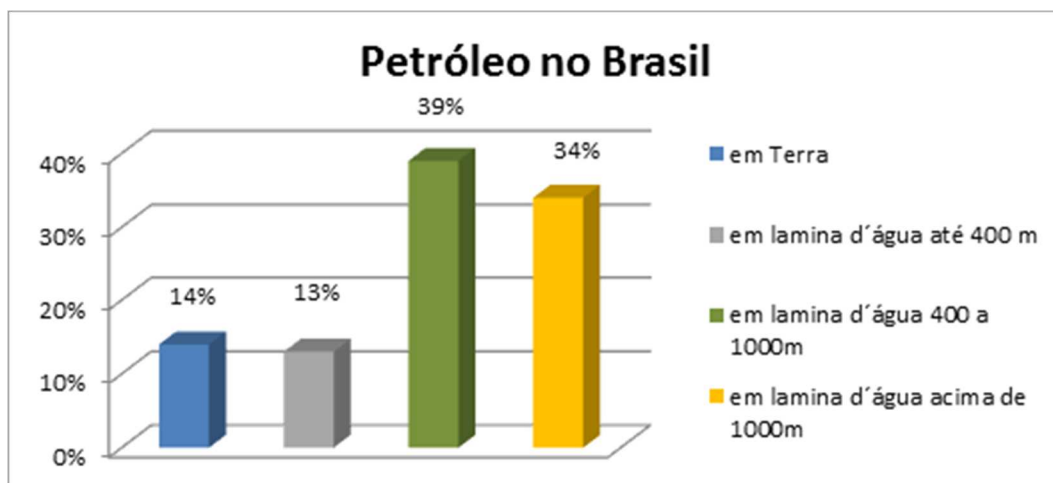


Figura 3.1 – Petróleo no Brasil. (TRANSPETRO, 2015).

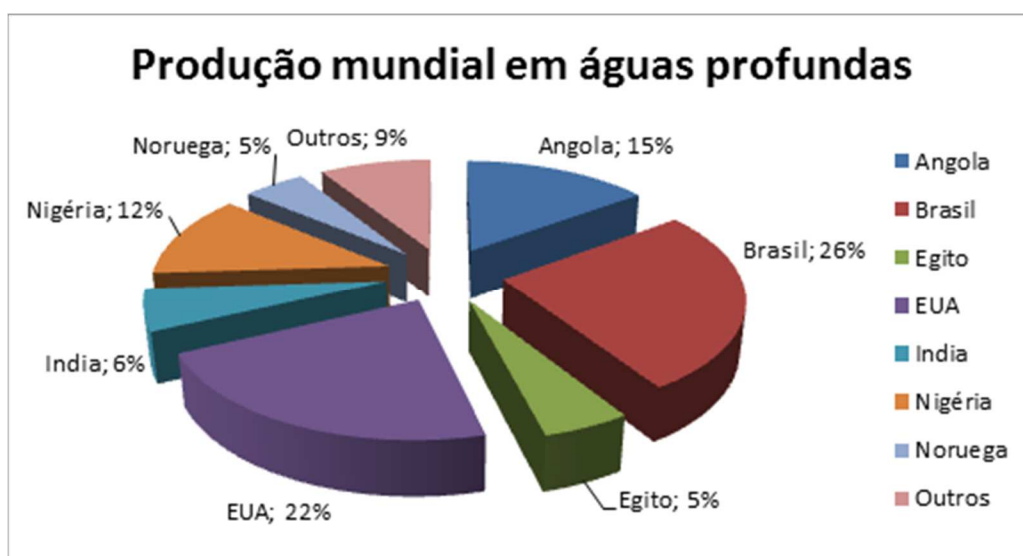


Figura 3.2 – Produção mundial (INFOPETRO, 2012).

Em virtude da sua composição variável e do grande número de substâncias que o compõem, antes de ser utilizado, o petróleo passa pelo processamento primário que consiste na separação de petróleo, gás e água sob condições controladas no tratamento para que possam ser transferidos para as refinarias (HERNANDEZ-VALENCIA et al.; 2001).

### 3.3 Misturador Estático



Misturador estático (Figura 3.3) é uma combinação em série de peças que usam da força de deslocamento dos fluidos através de uma tubulação para formação de misturas homogêneas. Sua configuração permite que os fluidos envolvidos se subdividam em dois a cada vez que passam por uma de suas peças. Estão relacionados à queda de pressão, tempo de residência, viscosidade, densidade dos fluidos e ao fator de atrito. São de fácil utilização industrial por possuírem baixo custo de manutenção e boa homogeneização. A utilização do misturador estático também visa a simulação com as condições reais de poços de petróleo. Um fluido ao passar por um misturador estático em cada seção sofre  $2^n$  divisões (MORAES, JR D.; SILVA, E.L.; MORAES, M.S, 2011). A equação 3.2 expressa o número de divisões (ND) que o fluido sofre ao percorrer um duto com um misturador estático do tipo fita torcida.

$$^nD = 2^n \quad (3.2)$$

Sendo:

n o número de fitas



Figura 3.3 – Misturador Estático (MORAES, SILVA; MORAES, 2011).

### 3.4 Core Annular Flow

Escoamentos podem ser divididos em 3 tipos: monofásico, bifásico e multifásico. Esses caracterizando, respectivamente, o transporte de um só fluido, dois fluidos simultaneamente e três ou mais fluidos simultaneamente. Escoamentos amplamente encontrados em indústrias químicas e petroquímicas são os transportes nas fases de: gás-líquido, líquido-sólido e líquido-líquido-gás.

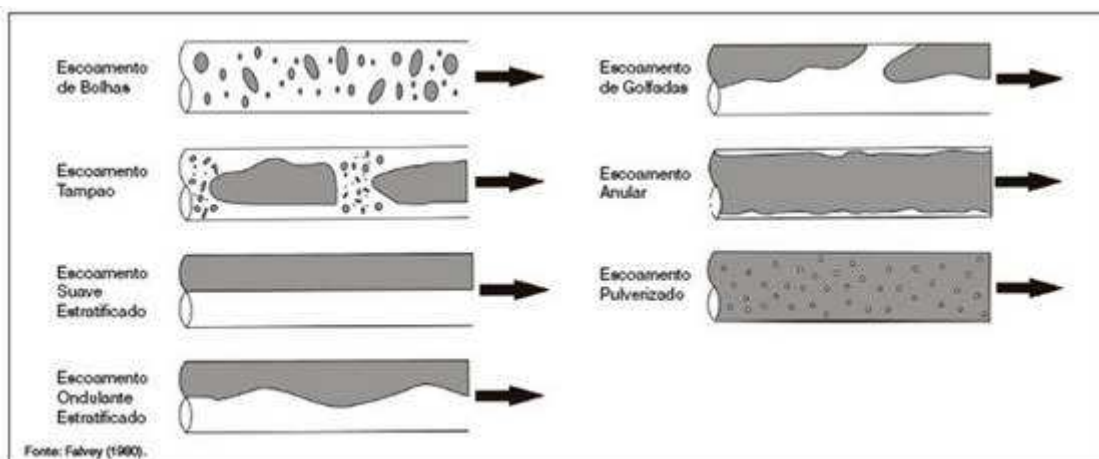
Na exploração e produção de petróleo encontram-se escoamentos de poços, através de *risers*, até as unidades estacionárias de produção e no transporte por oleodutos.

O conceito *Core Annular Flow*, patenteado por Issac e Speed (1904), cita a possibilidade de transporte eficiente de fluidos altamente viscosos, utilizando a água como fluido lubrificante.

*Core Annular Flow* é um meio de transporte de óleo através de um anel de água na periferia interna da tubulação. Varia-se segundo condições de bombeamento com a frequência adotada pela bomba, pressão na linha, temperatura do fluido e a proporção água-óleo. Visa-se através desse método a economia de energia. .

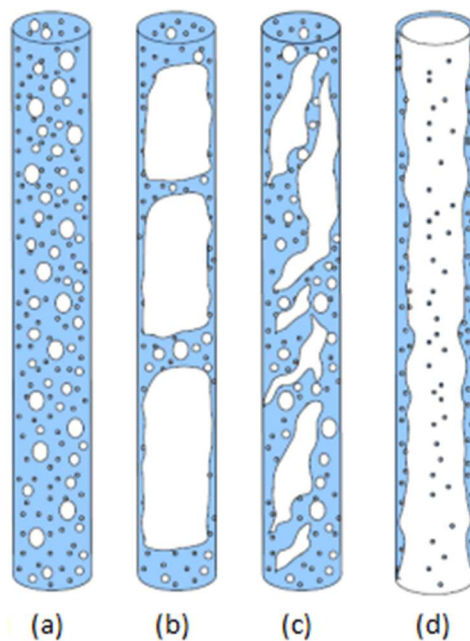
No escoamento através dessa técnica, força-se o deslocamento da água de menor viscosidade e maior densidade pela parede da tubulação, já o óleo, de maior viscosidade e menor densidade, é direcionado para o centro da tubulação. Reduzem-se dessa forma os atritos e diminui-se a perda de carga causada no sistema, o que possibilita a utilização de bombas de menor capacidade e viabilizando a operação em função dos custos para produção e extração.

Issac e Speed (1904) foram os primeiros a discutir sobre a aplicação de água no escoamento de óleos para diminuir o atrito em tubulações. Depois deles, os estudos e pesquisas pela técnica do *Core Annular Flow* não vem aumentando nos últimos anos. São vários os tipos de escoamento do binário óleo-água como apresentado na Figura 3.4:



**Figura 3.4 – Padrões de escoamento para tubos horizontais óleo-água. (JOSEPH, RINARDY, 1993).**

Ao se tratar de tubulações verticais, não foram localizados dados na literatura pesquisada os quais descrevam precisamente métodos ou equipamentos para a separação de misturas de líquidos imiscíveis. Colman & Thew (1988) relatam experimentos de separação de emulsões por meios mecânicos. Porém, os métodos descritos têm por finalidade a separação definitiva dos fluidos presentes na mistura, o que não é tão necessário para formação de *Core Annular Flow* em tubulações verticais, como mostra a Figura 3.5:



**Figura 3.5 – Padrões de escoamento para tubos verticais óleo-água. a) Escoamento em Bolhas; b) Escoamento em Golfadas; c) Escoamento de Transição ou Intermitente Agitante; d) Escoamento Anular (Retirado de SILVA S.S, 2006).**

Os padrões de escoamento da Figura 3.4 são resumidos a seguir conforme Silva, S.S. (2006).

(a) Escoamento em Bolhas: A tubulação é preenchida com o líquido (água) e a fase oleosa está presente de maneira discreta, distribuída na forma de pequenas bolhas na fase líquida contínua. A fase líquida (água) está em contato permanente com as paredes do duto.

(b) Escoamento em Golfadas (intermitente regular): A fase óleo é mais pronunciada em comparação com o escoamento de bolhas, apesar da fase líquida ainda ser contínua. A maioria do óleo é concentrada em largas bolhas que tem o diâmetro quase igual ao do duto.

(c) Escoamento de Transição ou Intermitente Agitante: Neste escoamento as bolhas são menores, sua forma é desordenada, e a distribuição e frequência são muito irregulares comparando com o escoamento em golfadas. O escoamento de transição apresenta grande desordem. A continuidade do líquido nas golfadas entre as sucessivas bolhas é repetidamente destruída pela alta concentração de óleo. Apesar do efeito da fase líquida ser significativa, a quantidade de óleo é predominante neste escoamento.

(d) Escoamento Annular: Tem como característica a continuidade da fase óleo ao longo do centro do duto, onde o mesmo se desloca a uma velocidade maior. As paredes do duto são cobertas pela fase líquida que se move ascendentemente como um filme de líquido, e parcialmente na forma de gotículas (névoa) distribuídas na fase óleo. É necessária uma alta vazão de óleo para manter a coluna de líquido estável; ocorrendo uma redução na velocidade de óleo abaixo de um certo valor crítico, o filme de líquido desaba, não formando o escoamento Annular.

De acordo com pesquisas de Andrade em 2008, a técnica do *Core Annular Flow* não modifica a viscosidade do óleo, mas transforma o padrão de escoamento, e reduz o atrito no transporte de produtos muito viscosos, como por exemplo, óleos pesados.

O resultado mais promissor de escoamentos bifásicos em dutos é do tipo *Core Annular Flow*. Técnica que tem como função resolver uma das dificuldades que inviabilizam a produção de petróleo pesado (SANTOS, A.R., 2007)

### 3.5 Equação da continuidade

A equação da continuidade (3.3), obtida a partir do princípio geral da conservação da massa para densidade constante, é a base para o estudo dos fluidos em movimento (MORAES, SILVA, MORAES, 2011), (PEREIRA e SEQUIM, 2012).

$$Q = V . A \quad (3.3)$$

Sendo

Q a vazão do processo em m<sup>3</sup>/s;

V a velocidade média do escoamento em m/s;

A a área da seção transversal da tubulação em metros.

### 3.6 Reynolds

Segundo Osborne Reynolds (1883), um regime de fluxo pode ser dividido em três tipos, sendo eles laminar ( $Re < 2100$ ), transição ( $2100 < Re < 4000$ ) e turbulento ( $Re > 4000$ ), de acordo com as propriedades do produto desejado, conforme a equação 3.4:

$$Re = \frac{\rho . D . v}{\mu} \quad (3.4)$$

Sendo

Re o número de Reynolds - adimensional;

$\rho$  a massa específica em kg/m<sup>3</sup>;

D o diâmetro interno da tubulação em metros;

V a velocidade média do fluido na seção em m/s;

$\mu$  a viscosidade dinâmica em kg m/s.

### 3.7 Tempo Espacial

O Tempo Espacial é definido como o tempo em que um fluxo reside dentro de um processo, sendo a razão entre o volume do processo e a vazão do fluido, como mostra a Equação 3.5:

$$\tau = \frac{V}{Q} \quad (3.5)$$

Sendo:

$\tau$  é o tempo espacial em horas;

Q é a vazão volumétrica em m<sup>3</sup>/h;

V é o volume em m<sup>3</sup>.

### 3.8 Perda de carga

Perda de Carga ( $h_f$  ou  $l_w$ ) é a energia gasta por um fluido ao passar pelo processo. A equação de Darcy (Equação 3.6), válida para qualquer diâmetro e fluido incompressível, foi desenvolvida como uma expressão relativa à perda de carga distribuída, ou seja, em trechos retos de tubulação (MORAES JR,

MORAES, SILVA, 2011). Esta equação pode ser usada com o auxílio do diagrama de Moody, que relaciona o fator de atrito com o número de Reynolds e a rugosidade relativa da tubulação. O fator de atrito também pode ser obtido pela equação de Round, como mostra a equação 3.7, para  $Re > 2100$ . Caso o  $Re < 2100$  o fator de atrito pode ser calculado pela equação 3.8. (PEREIRA, SEGUIM, 2012):

$$h_f = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2g} \quad (3.6)$$

$$f = \frac{1,6364}{\ln\left[0,135\frac{\varepsilon}{D} + \frac{6,5}{Re}\right]} \quad (Re > 2100) \quad (3.7)$$

$$f = \frac{64}{Re} \quad (Re < 2100) \quad (3.8)$$

Sendo

$f$  o fator de atrito (adimensional);

$L$  o comprimento da tubulação em metros;

$D$  o diâmetro interno da tubulação em metros;

$v$  a velocidade média de escoamento em m/s;

$g$  a aceleração da gravidade em  $m/s^2$ .

A altura manométrica do sistema é a energia por unidade de peso que o sistema necessita para transportar o fluido de um ponto 1 até um ponto 2. Essa energia deve ser fornecida por uma bomba, sendo  $H$  o parâmetro fundamental para a sua seleção. É causado pela diferença de pressão, velocidade, de desnível e pela perda de carga entre os pontos analisados para uma vazão pré-determinada. Pode ser obtida pela equação do Balanço de Energia Mecânica (BEM), como mostra a equação 3.9. (MORAES JR, D; MORAES, MS; 2011)

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} + Z_1 + H = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} + Z_2 + lw_{1,2} \quad (3.9)$$

Sendo

$P_1$  e  $P_2$  as pressões entre os pontos analisados em kgf/m<sup>2</sup>;

$v_1$  e  $v_2$  as velocidades médias de escoamento em m/s;

$Z_1$  e  $Z_2$  o desnível em relação a um ponto de referência em metros;

$H$  a altura manométrica em metros;

$lw$  a perda de carga em metros;

$\gamma$  o peso específico em kgf/m<sup>3</sup>.

### 3.9 Singularidades

Acidentes são acessórios presentes no equipamento que causam um aumento na perda de carga, por dificultar a passagem do fluido. A Tabela 3.4 foi construída com os dados da NBR – 5626 (ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas) com as letras da primeira coluna correspondente aos acessórios existentes na sucção e descarga da bomba no equipamento estudado: a) joelho 90°; b) tê 90° saída de lado; c) entrada de borda; d) saída de canalização; e) válvula de gaveta; f) válvula de globo; g) válvula de retenção leve (horizontal).



**Tabela 3.4 – Comprimento equivalente para PVC ou cobre.**

| Acessório               | Diâmetro nominal (Dn) em polegadas (in.) |      |      |      |      |
|-------------------------|------------------------------------------|------|------|------|------|
|                         | 1/2                                      | 3/4  | 1    | 1 ¼  | 1 ½  |
| a. joelho 90°           | 1,1                                      | 1,2  | 1,5  | 2,0  | 3,2  |
| b. tê 90° saída de lado | 2,3                                      | 2,4  | 3,1  | 4,6  | 7,3  |
| c. entrada borda        | 0,9                                      | 1,0  | 1,2  | 1,8  | 2,3  |
| d. saída canalização    | 0,8                                      | 0,9  | 1,3  | 1,4  | 3,2  |
| e. gaveta               | 0,1                                      | 0,2  | 0,3  | 0,4  | 0,7  |
| f. globo                | 11,1                                     | 11,4 | 15,0 | 22,0 | 35,8 |
| g. retenção leve        | 2,5                                      | 2,7  | 3,8  | 4,9  | 6,8  |

### 3.10 Dispositivo de placas

Os separadores gravitacionais de água e óleo são equipamentos que usam as propriedades físicas dos fluidos para uma dada configuração, que propicia a separação por diferença de densidade e viscosidade. O óleo por ser mais leve tende a flutuar na água, causando o arraste indesejado de gotículas ao longo do processo. Os recheios coalescentes líquido-líquido promovem a separação de líquidos imiscíveis e são apropriados para evitar esse arraste, causando acúmulo de gotas de óleo que quando juntas tem maior força de ascensão. Para tal, são usadas placas inclinadas ou com ondulações e com certa rugosidade, de modo que o óleo fique mais aderido, enquanto a água passa com maior facilidade.

### 3.11 Hidrociclone

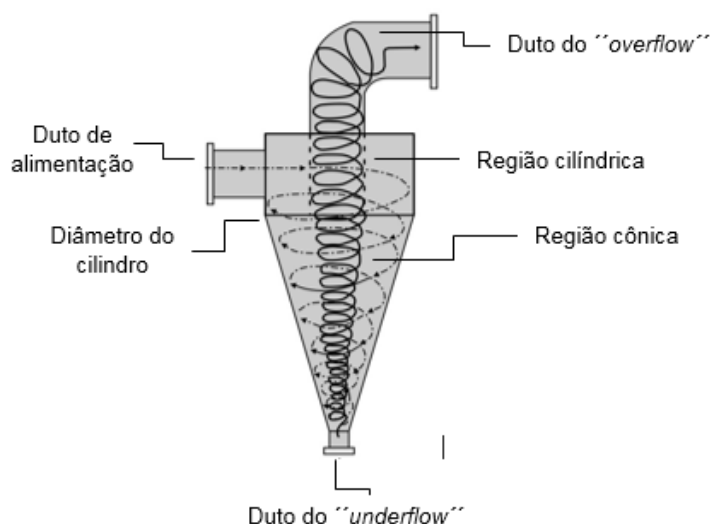
Vários modelos de hidrociclones líquido-líquido podem ser encontrados na literatura. A grande maioria desses tem por finalidade a separação das espécies presentes na mistura líquida que entra no hidrociclone, exigindo que haja uma grande eficiência de separação para se atingir o objetivo desejado.

O primeiro hidrociclone foi patenteado em 1891, no entanto, ele só foi utilizado industrialmente após a 2ª Guerra Mundial, nas indústrias de extração

e processamento de minérios. Após isso, vêm sendo utilizados nas indústrias química, petroquímica, metalúrgica, têxtil, alimento, bioengenharia, entre outras, de maneiras distintas, visto que dentre suas principais vantagens estão simplicidade, fácil instalação, baixo custo operacional e de manutenção. (ARRUDA, 2008).

A eficiência de separação de um hidrociclone depende de diversos fatores como vazão e diâmetro médio da partícula líquida. Uma vazão menor implica em um maior tempo de residência, mas também implica em forças de aceleração menores. Diâmetros de partícula menores significam emulsões mais fortes e de mais difícil separação, o que reduz a eficiência.

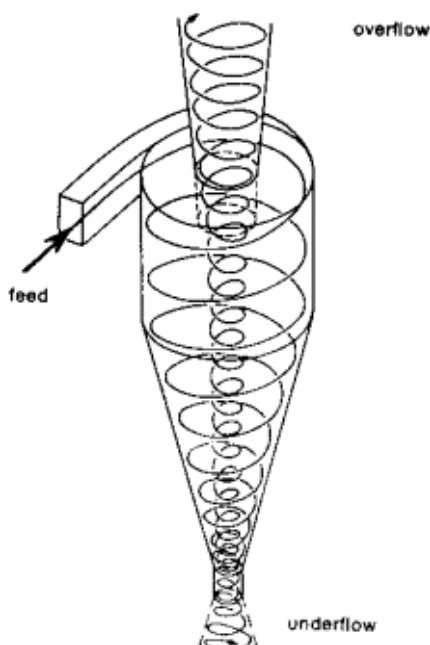
Segundo CRUZ (2008), o hidrociclone compõe-se de uma parte cônica ligada à uma cilíndrica, na qual existe uma entrada tangencial para a suspensão de alimentação (duto de alimentação). A parte superior do hidrociclone apresenta um tubo para saída da suspensão diluída (duto do “overflow”) e na parte inferior há um orifício de saída da suspensão concentrada (duto do “underflow”), como mostra a Figura 3.6.



**Figura 3.6 - Esquema do hidrociclone (ARRUDA, 2008).**

O princípio de separação dos fluidos nos hidrociclones é a sedimentação centrífuga, em que as partículas em suspensão são submetidas a um campo centrífugo. A mistura alimentada dotada de energia de pressão é inserida no topo da parte cilíndrica do hidrociclone, fazendo com que a mesma realize ao longo de sua trajetória um movimento rotacional. As partículas maiores e de maior densidade são projetadas contra a parede do dispositivo e assim arrastadas para saída inferior (underflow), enquanto as partículas menores e menos densas são arrastadas para o centro do equipamento formando um vórtex ascendente, saindo pela parte superior – overflow (ARRUDA, 2008). A Figura 3.7, esquematiza o sistema de um hidrociclone.

O hidrociclone baseia-se no fato de que uma mistura, ao ser introduzida tangencialmente na parte superior (de maior área), é separada por diferença de densidades, onde a fração mais leve tende a sair pela parte superior (menor velocidade) e a fração mais pesada, em contra corrente, escoar axialmente pela parte inferior do ciclone (maior velocidade).



**Figura 3.7 – Trajetória do fluido no interior do hidrociclone (ARRUDA, 2008).**

Colman & Thew (1988) descreveram um hidrociclone (Figura 3.8) para baixas concentrações de óleo e vazões entre 70 e 110 L/min, sendo constatado que há pouca variação na eficiência de separação para a faixa testada.

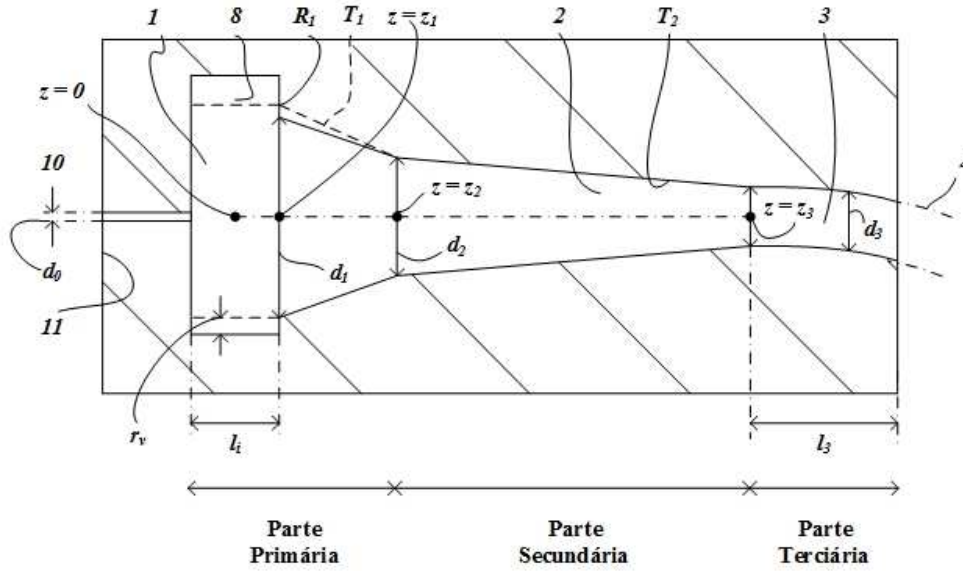


Figura 3.8 – Hidrociclone por Colman & Thew, 1998.

Colman & Thew (1988) recomendam as relações descritas nas equações de 3.15 a 3.22.

$$S = \frac{\pi \cdot d_2 \cdot (d_1 + r_{v \text{ máx}})}{4 \cdot l_i \cdot r_{v \text{ máx}}} \quad (3.15)$$

$$6 < S = \frac{\pi \cdot d_2 \cdot d_i}{4 \cdot A_i} < 8 \quad (3.16)$$

$$0,01 < d_0/d_2 < 0,2 \quad (3.17)$$

$$0,9 \cdot d_1 > d_2 \quad (3.18)$$

$$0,9 \cdot d_2 > d_3 \quad (3.19)$$

$$1,25 < d_1/d_2 < 3 \quad (3.20)$$

$$0,3 < d_3/d_2 < 0,7 \quad (3.21)$$

$$3 < \alpha < 12 \quad (3.22)$$

Sendo

$S$  o coeficiente de giro ou de redemoinho;

$d_i$  o diâmetro da saída da entrada lateral;

$d_0$  o diâmetro da saída de óleo;

$d_1$  o diâmetro da parte superior do hidrociclone;

$d_2$  o diâmetro do hidrociclone após a primeira redução;

$d_3$  o diâmetro da saída de água do hidrociclone.

$r_{v\,máx}$  o diâmetro da entrada;

$l_i$  o comprimento da sessão reta do hidrociclone.

$A_i$  a área da saída da entrada lateral.

$\alpha$  o ângulo de inclinação.

## 4 MATERIAL E MÉTODOS

### 4.1 Equipamentos e Acessórios

A Figura 4.1 fornece uma vista geral da unidade experimental e a Figura 4.2 o desenho em planta, elevação e perfil.

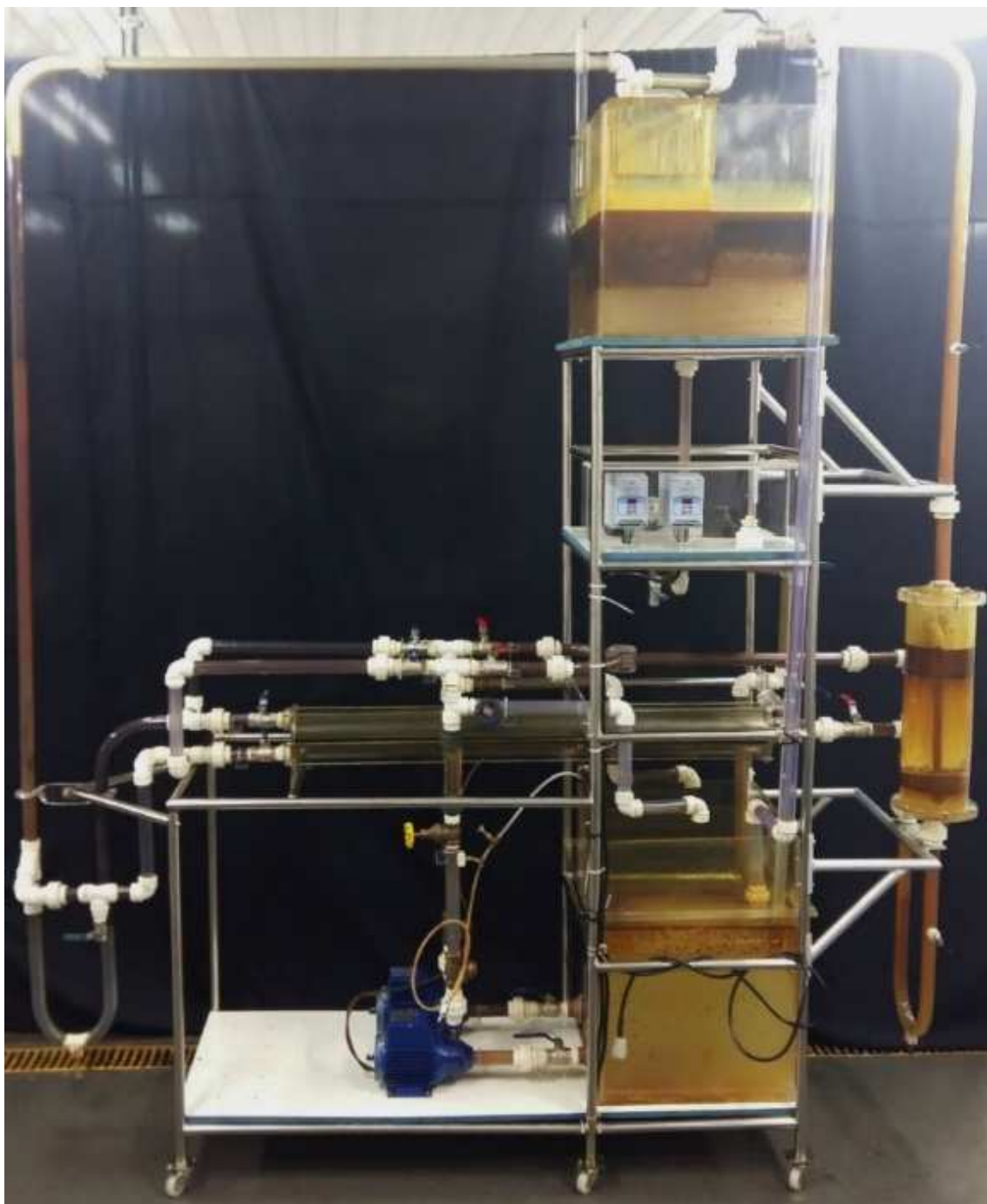


Figura 4.1 – Equipamento utilizado para formação do Core Annular Flow (Laboratório de Operações Unitárias – UNISANTA).

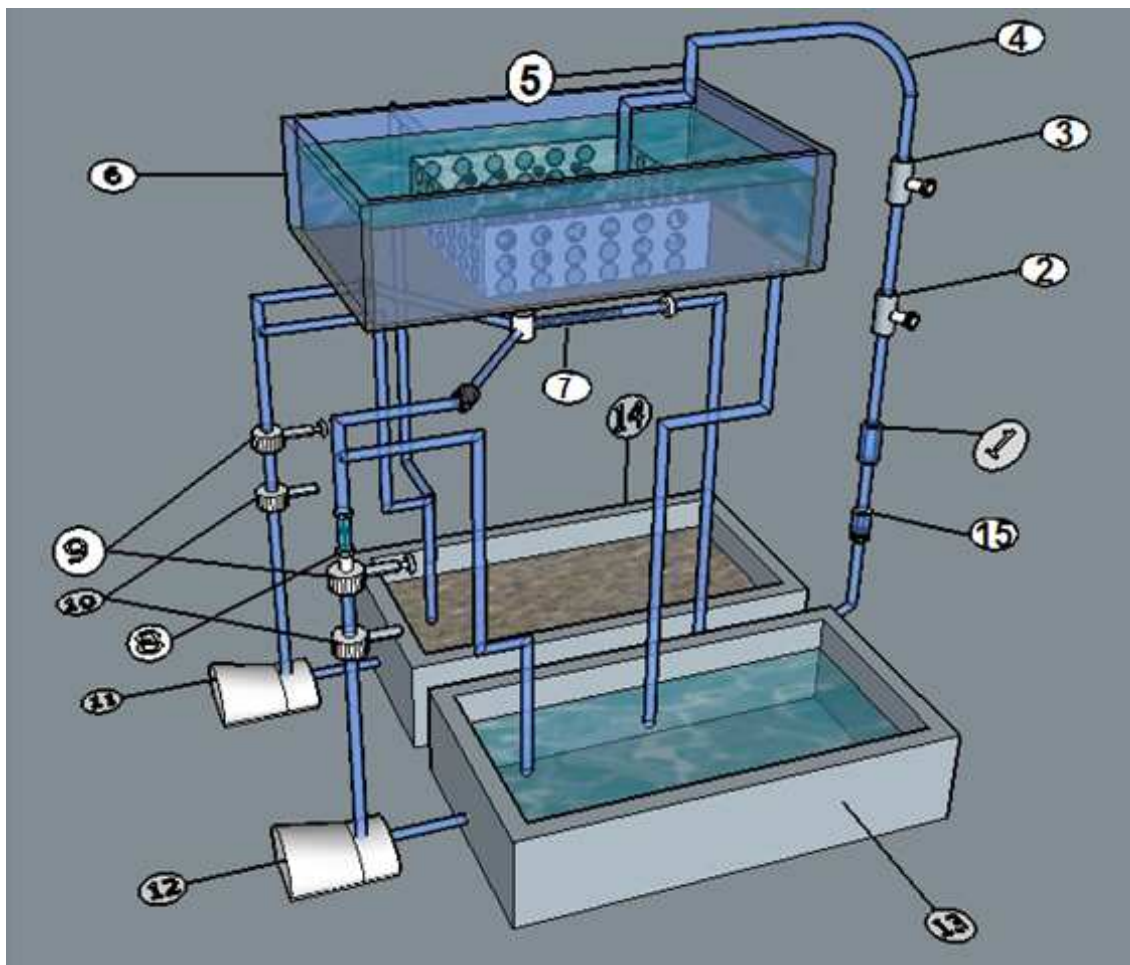
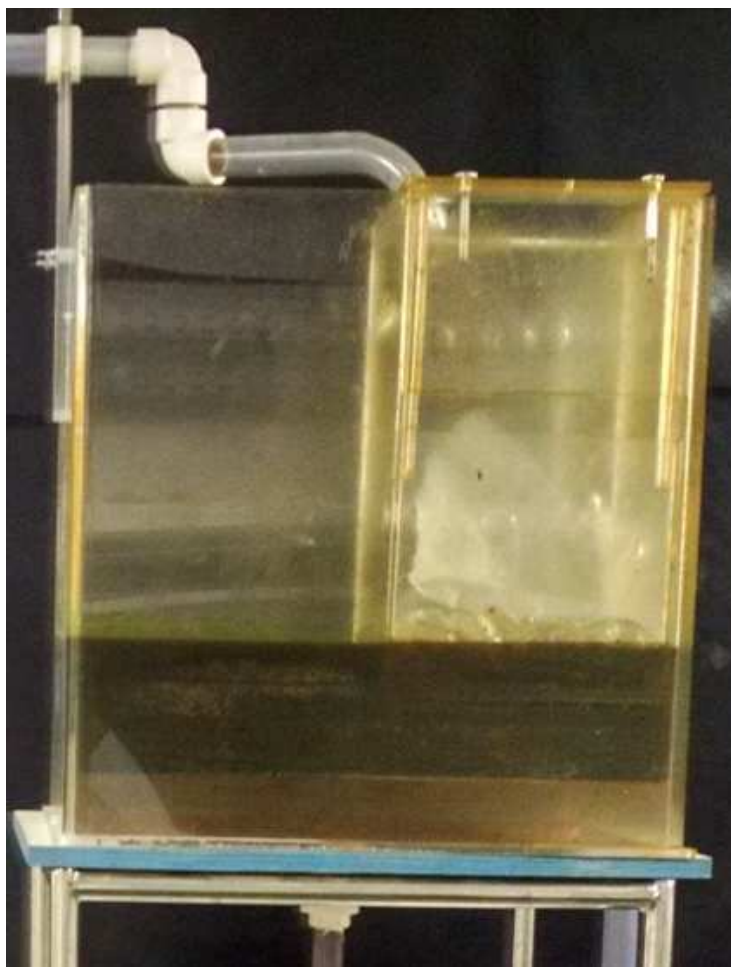


Figura 4.2 – Vista da planta equipamento utilizado para formação do Core Annular Flow. 1) DCAFV – Dispositivo para a formação do *Core Annular Flow* na vertical; 2) PI - pressão a jusante; 3) PI - pressão a 650 mm do PI a jusante; 4) Duto de 1" de PVC transparente para estudo da formação do CAF; 5) SC – Coletor de amostra; 6) TK-03 - tanque de separação água e óleo; 7) M – misturador estático; 8) FI – rotâmetro da linha de água; 9) V – Válvula de regulagem; 10) CHV – válvula de retenção; 11) B-02 – bomba da linha de óleo; 12) B-01 – bomba da linha de água; 13) TK-01 – tanque de água; 14) TK-02 – tanque de óleo e 15) V – válvula de regulagem a montante do dispositivo (Laboratório de Operações Unitárias – UNISANTA).

A bancada experimental utilizada no estudo supracitado, consiste basicamente em:

- a) Três tanques de armazenamento de líquidos, sendo: um para água e um para óleo, ambos com capacidade para 74 litros; e um para a mistura servindo como decantador com capacidade e 192 litros (Figura 4.3, 4.4 e 4.5).



**Figura 4.3 – Tanque de separação água e óleo de 74 litros.**





**Figura 4.4 – Tanque de óleo de 74 litros.**



**Figura 4.5 – Tanque da mistura água-óleo de 192 litros.**

- b) Duas bombas regenerativas (bombas turbina) de 0,9 hp, 60 Hz e 220 V sendo uma para o óleo e outra para água. Ambas com inversor de frequência e rotâmetro com capacidade para 40 L/min (aparelho utilizado para medir vazão) (Figura 4.6, 4.7 e 4.8).



**Figura 4.6 – Bomba regenerativa de 0,9 HP.**



**Figura 4.7 – Medidor de vazão (rotâmetro).**



**Figura 4.8 – Inversor de frequência.**

- c) Um misturador estático utilizado para simular a emulsão proveniente de um poço produtor de petróleo. De acordo com Moraes Jr., Silva e Moraes (2011, p. 85) num misturador estático, o fluido ao passar por cada seção sofre  $2^n$  divisões. Nesse caso, o misturador era constituído de 11 seções, caracterizando 2048 divisões ao longo de todo seu comprimento (Figura 4.9).



**Figura 4.9 – Misturador estático do tipo fita torcida.**

- d) Acessórios a montante da bomba (sucção, Figura 4.10): 1 (uma) entrada de borda; 1 (uma) união; 1 (uma) válvula de gaveta de 1"; 2 (dois) nipple.



**Figura 4.10 – Acidentes a montante da bomba.**

- e) Acessórios no trecho de recalque a jusante da bomba (recalque, descarga): 1 (uma) válvula de retenção (Figura 4.11); 1 (uma) válvula de gaveta; (Figura 4.12); 2 (duas) válvulas de globo; 1 rotâmetro; 2 têes saída de lado; 3 joelhos de 90°; 2 uniões.



**Figura 4.11 – Válvula de retenção.**



**Figura 4.12 – Válvula de gaveta.**

Foi empregado nos ensaios óleo Lubrax 680 com as propriedades físico-químicas demonstradas na Tabela 4.1.

**Tabela 4.1 – Propriedades físico-químicas do óleo Lubrax 680.**

| Propriedade                         | Líquido límpido                           |
|-------------------------------------|-------------------------------------------|
| Cor                                 | Castanho (L3,5 - ASTM).                   |
| Odor                                | Não se aplica.                            |
| pH                                  | Característico de óleo lubrificante.      |
| Ponto de fusão                      | -3 °C.                                    |
| Ponto de fulgor                     | > 246 °C.                                 |
| Ponto de combustão                  | > 250 °C.                                 |
| Limites de explosividade no ar      | Não se aplica.                            |
| Pressão de vapor                    | < 5 mmHg @ 20 °C.                         |
| Densidade                           | 0,9295 g/cm <sup>3</sup> @ 20.4 °C.       |
| Solubilidade em água                | Insolúvel.                                |
| Solubilidade em solventes orgânicos | Miscível em solventes de hidrocarbonetos. |
| Ponto de fluidez                    | < - 27 °C.                                |
| Viscosidade                         | 638 cSt @ 40 °C.                          |

A água utilizada no estudo foi deionizada conforme propriedades físico-químicas demonstradas na Tabela 4.2.

**Tabela 4.2 – Propriedades físico-químicas da água deionizada.**

| Propriedade                          | Líquido límpido                     |
|--------------------------------------|-------------------------------------|
| Odor                                 | Inodoro                             |
| pH                                   | 5,0 a 7,5                           |
| Ponto de fusão/ponto de congelamento | 0 °C                                |
| Ponto de ebulição                    | 100 °C                              |
| Ponto de fulgor                      | Produto não inflamável.             |
| Inflamabilidade                      | Produto não inflamável.             |
| Densidade                            | Aproximadamente 1 g/cm <sup>3</sup> |
| Condutividade                        | < 3,0 µS/cm                         |
| Pressão de vapor                     | 17,5 mmHg (a 20 °C)                 |

#### **4.2 Dispositivo por placas coalescentes**

Foram feitas representações em papelão e cartolina (Figura 4.13), a fim de viabilizar a construção do primeiro dispositivo.





**Figura 4.13 – Representação em papelão do dispositivo de placas.**

**a) Dados teóricos**

A princípio foi estimado o diâmetro de 60 mm como diâmetro externo ( $D_2$ ) das placas coalescentes e o diâmetro de 84 mm ( $D_1$ ) para a camisa do dispositivo. Para efeito de comparação de resultados entre os dispositivos, o diâmetro máximo do casco permitido foi de 102 mm ( $D_0$ ), como mostram as figuras 4.14 e 4.15. Esse valor foi estimado visando a construção em escala real, como por exemplo em uma extração por *riser* e também em proporções adequadas para uma escala de bancada.

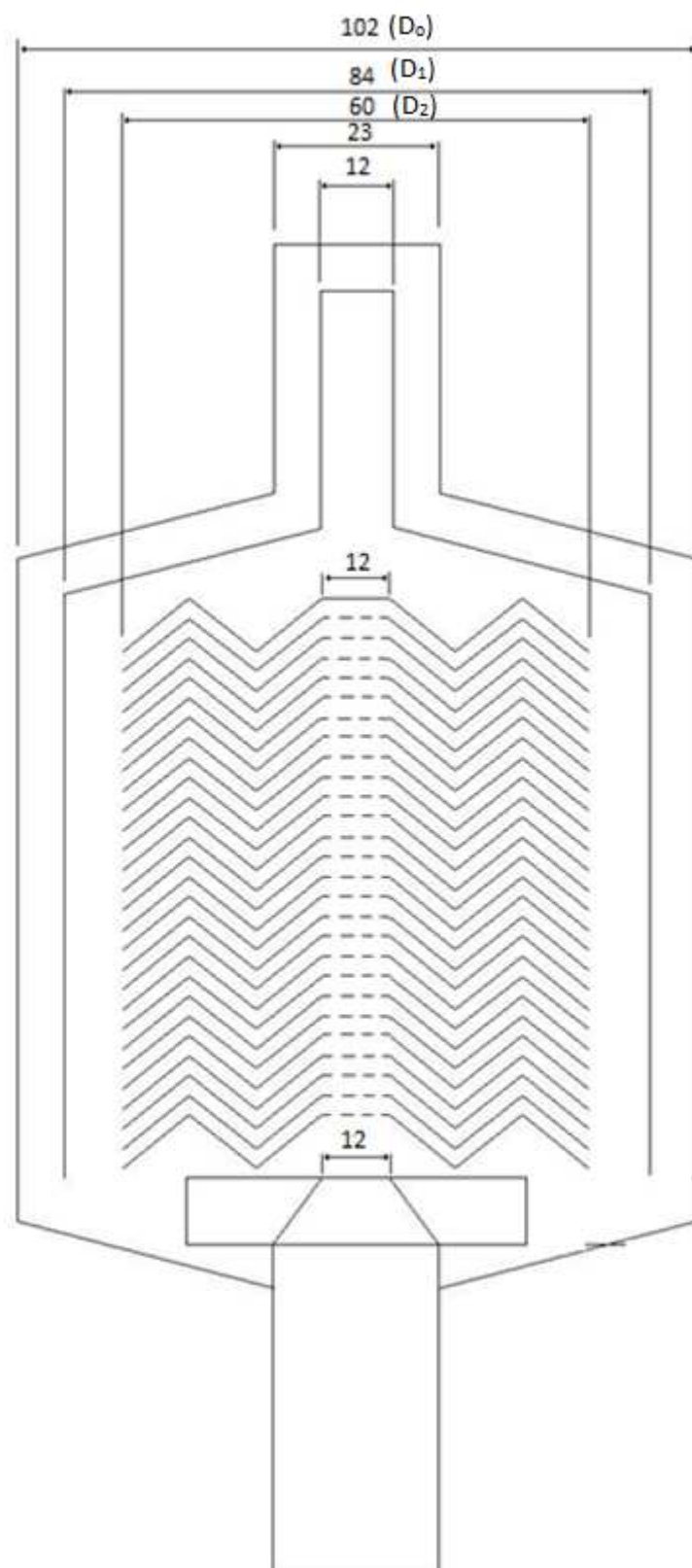


Figura 4.14 – Estrutura teórica do dispositivo de placas coalescentes. Medidas em milímetros. Valores iniciais de projeto.

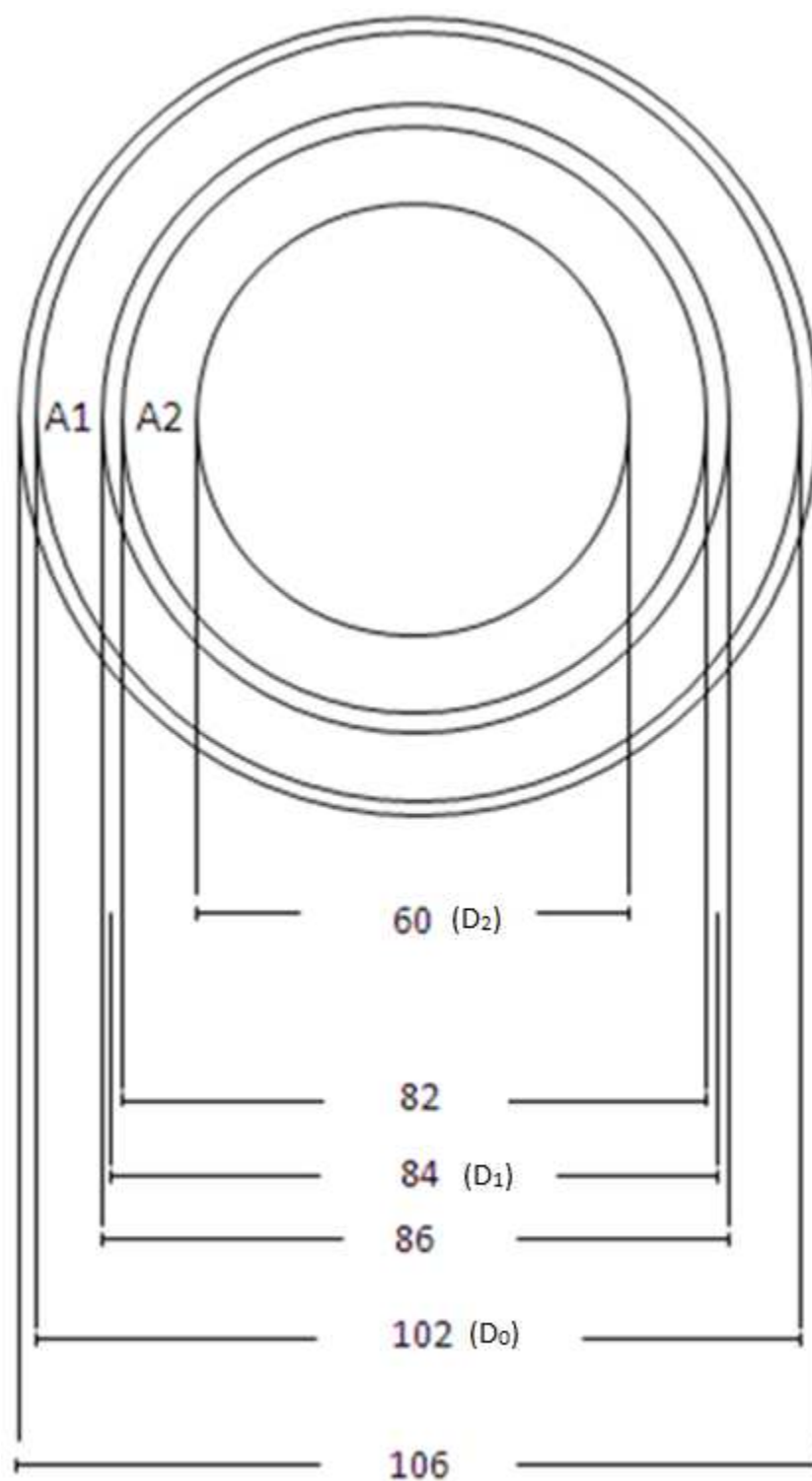


Figura 4.15 – Planta do dispositivo placas coalescentes. Medidas em milímetros. Valores iniciais de projeto.

## b) Fundamentos Teóricos

### b.1) Cálculos do diâmetro da camisa por centroides de áreas iguais

$$A_1 = A_2 \quad (4.1)$$

$$\frac{\pi \cdot D_0^2}{4} - \frac{\pi \cdot D_1^2}{4} = \frac{\pi \cdot D_1^2}{4} - \frac{\pi \cdot D_2^2}{4} \quad (4.2)$$

$$\frac{\pi \cdot (102\text{mm})^2}{4} - \frac{\pi \cdot D_1^2}{4} = \frac{\pi \cdot D_1^2}{4} - \frac{\pi \cdot (60\text{mm})^2}{4} \quad (4.3)$$

$$8171,28\text{mm}^2 - \frac{\pi \cdot D_1^2}{4} = \frac{\pi \cdot D_1^2}{4} - 2827,43\text{mm}^2 \quad (4.4)$$

$$\frac{-\pi \cdot D_1^2}{4} = \frac{\pi \cdot D_1^2}{4} - 2827,43\text{mm}^2 - 8171,28\text{mm}^2 \quad (4.5)$$

$$\frac{-\pi \cdot D_1^2}{4} = \frac{\pi \cdot D_1^2}{4} - 10998,71\text{mm}^2 \quad (4.6)$$

$$\frac{-\pi \cdot D_1^2}{4} = \frac{\pi \cdot D_1^2 - 43994,84\text{mm}^2}{4} \quad (4.7)$$

$$4 \cdot -\frac{\pi \cdot D_1^2}{4} = \pi \cdot D_1^2 - 43994,84\text{mm}^2 \quad (4.8)$$

$$-\pi \cdot D_1^2 = \pi \cdot D_1^2 - 43994,84\text{mm}^2 \quad (4.9)$$

$$-2\pi \cdot D_1^2 = -43994,84\text{mm}^2 \quad (4.10)$$

$$D_1 = \sqrt{\frac{-43994,84\text{mm}^2}{-2\pi}} = 83,67\text{mm} \cong 84\text{mm} \quad (4.11)$$

b.2) Cálculo da área de escoamento de água e de óleo

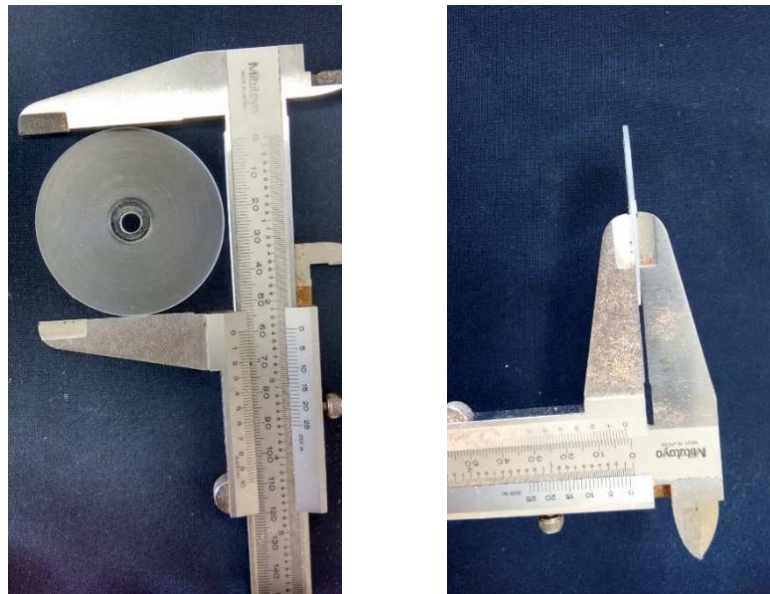
$$A_1 = A_2 = \frac{\pi \cdot (84mm)^2}{4} = 5541,77mm^2 \quad (4.12)$$

Devido à disponibilidade de material, foi empregado diâmetro  $D_1$  de 95,05 mm e o  $D_2$  de 55,1 mm, obtendo assim um desvio de 13,6% do método de centroides, conforme os dados construtivos.

As Figuras 4.16 e 4.17, apresentam a fabricação de placas de acrílico, que se iniciaram no torno mecânico.



**Figura 4.16 – Torno mecânico.**



**Figura 4.17 – Medição das placas coalescentes com paquímetro.**

Foram moldadas, cortadas e prensadas 47 placas (Figuras 4.18 e 4.19) com 55,1 mm de diâmetro externo e 19,6 mm de diâmetro interno, espaço este responsável por receber a emulsão. Essa sequência de placas foi fechada na extremidade superior.



**Figura 4.18 – Molde das placas.**



**Figura 4.19 – Placas moldadas.**

As placas foram sobrepostas e fixadas com três tirantes de acordo com a Figura 4.20.





**Figura 4.20 – Placas fixadas ao suporte. Altura de 130 mm.**



A Figura 4.21 apresenta a unidade montada e a Figura 4.22 o equipamento com as dimensões dadas pelos materiais disponíveis.



**Figura 4.21 – Dispositivo de placas coalescentes para formação em duto vertical do sistema “Core Annular Flow”. Altura de 180 mm.**

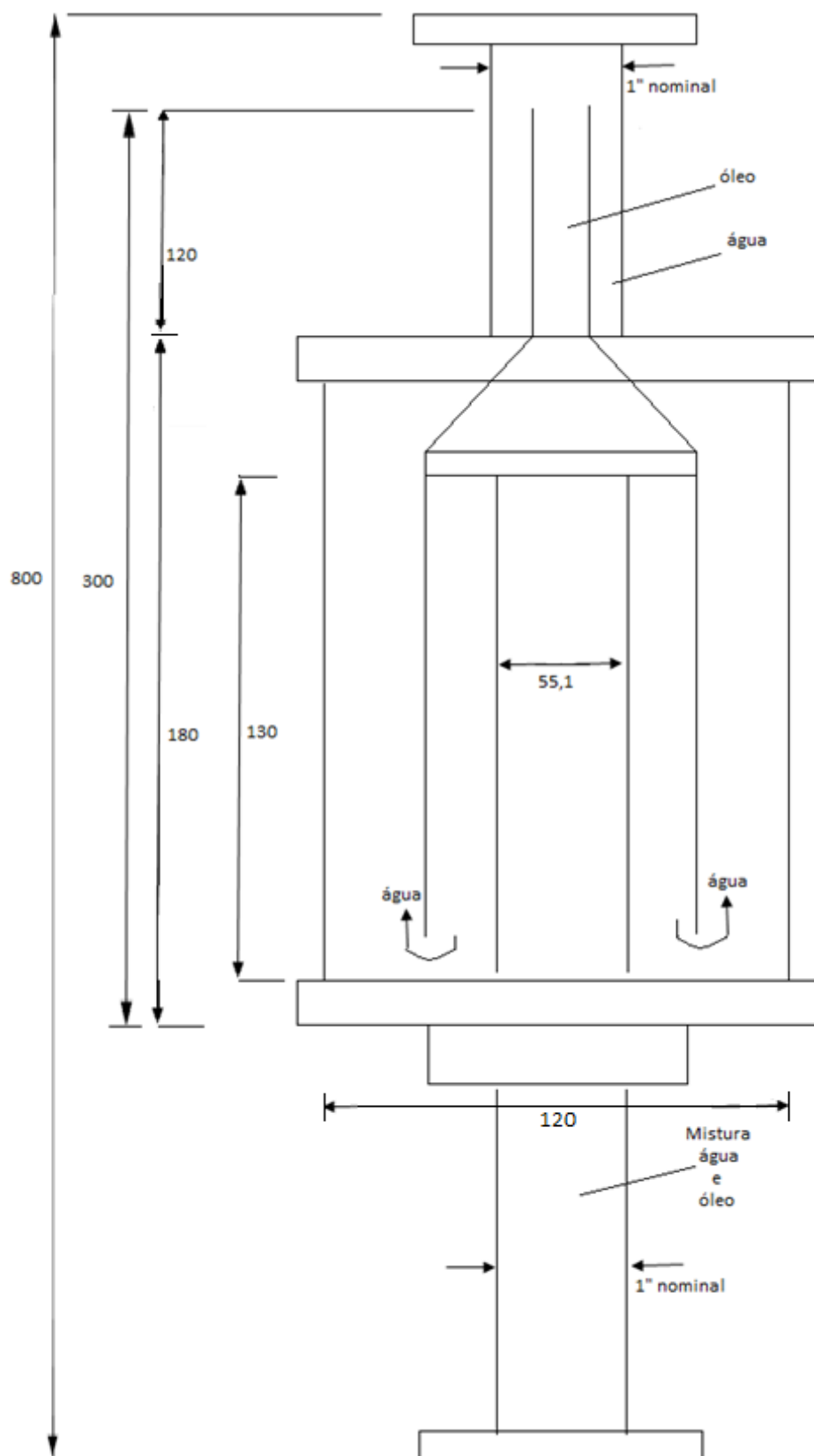


Figura 4.22 - Unidade com as placas coalescentes. Medidas em milímetros. Valores iniciais de projeto.

### 4.3 Hidrociclone

O segundo dispositivo denominado de hidrociclone, foi inicialmente dimensionado pelo método Colman & Thew (1988). As Figuras 4.23 e 4.24 mostram o protótipo de papelão.



**Figura 4.23 – Protótipo hidrociclone (interno).**



**Figura 4.24 – Protótipo hidrociclone (externo).**

Uma camisa foi adicionada para direcionar a água separada pelo hidrociclone. Abaixo do hidrociclone foi instalada uma placa inclinada para a entrada da mistura água/óleo no duto de alimentação do ciclone (Figura 4.25 e 4.26).

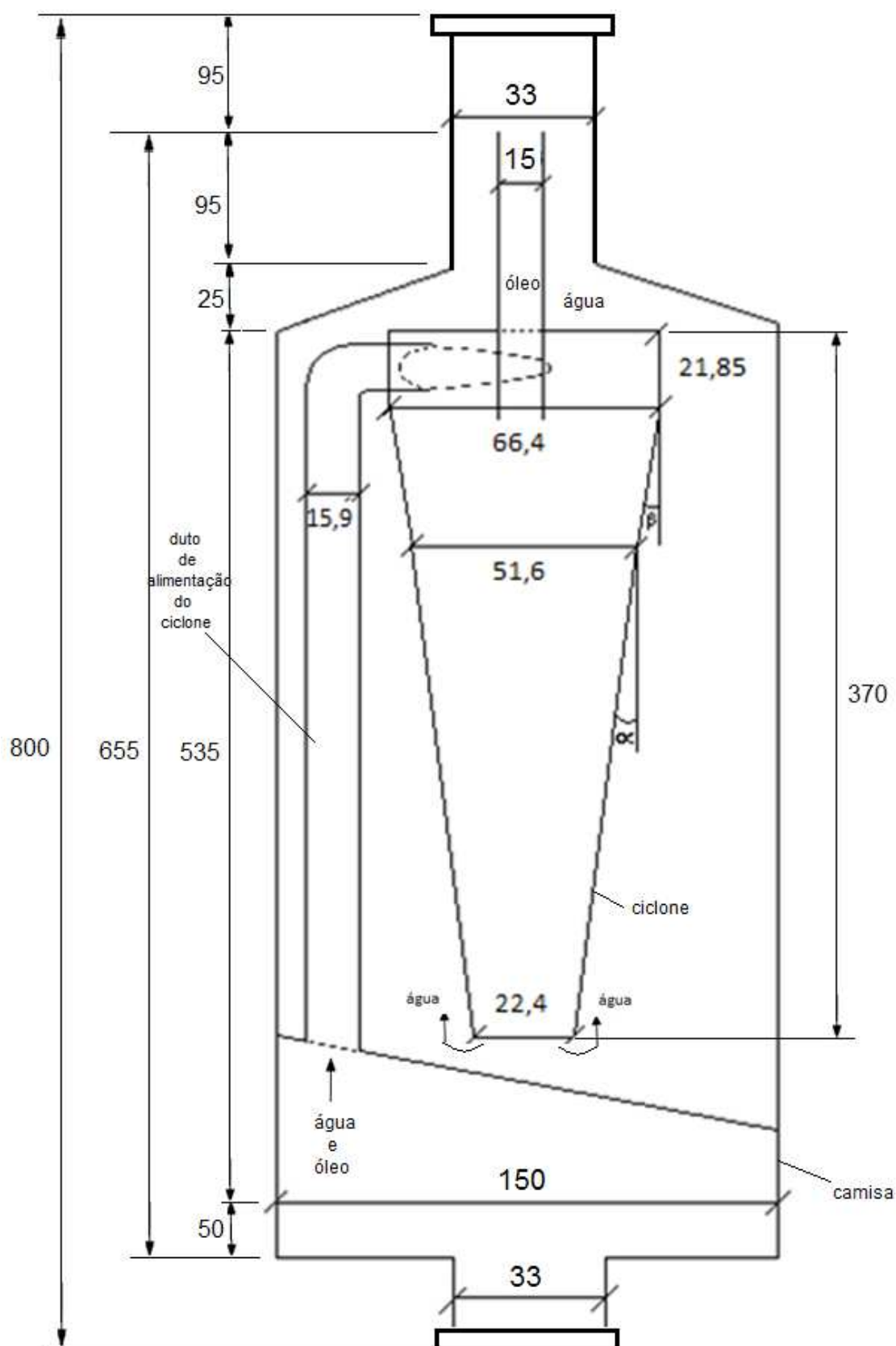


Figura 4.25 – Dimensões do hidrociclone, perfil. Dispositivo para a formação do Core Annular Flow na Vertical (DCAFV). Medidas em milímetros.

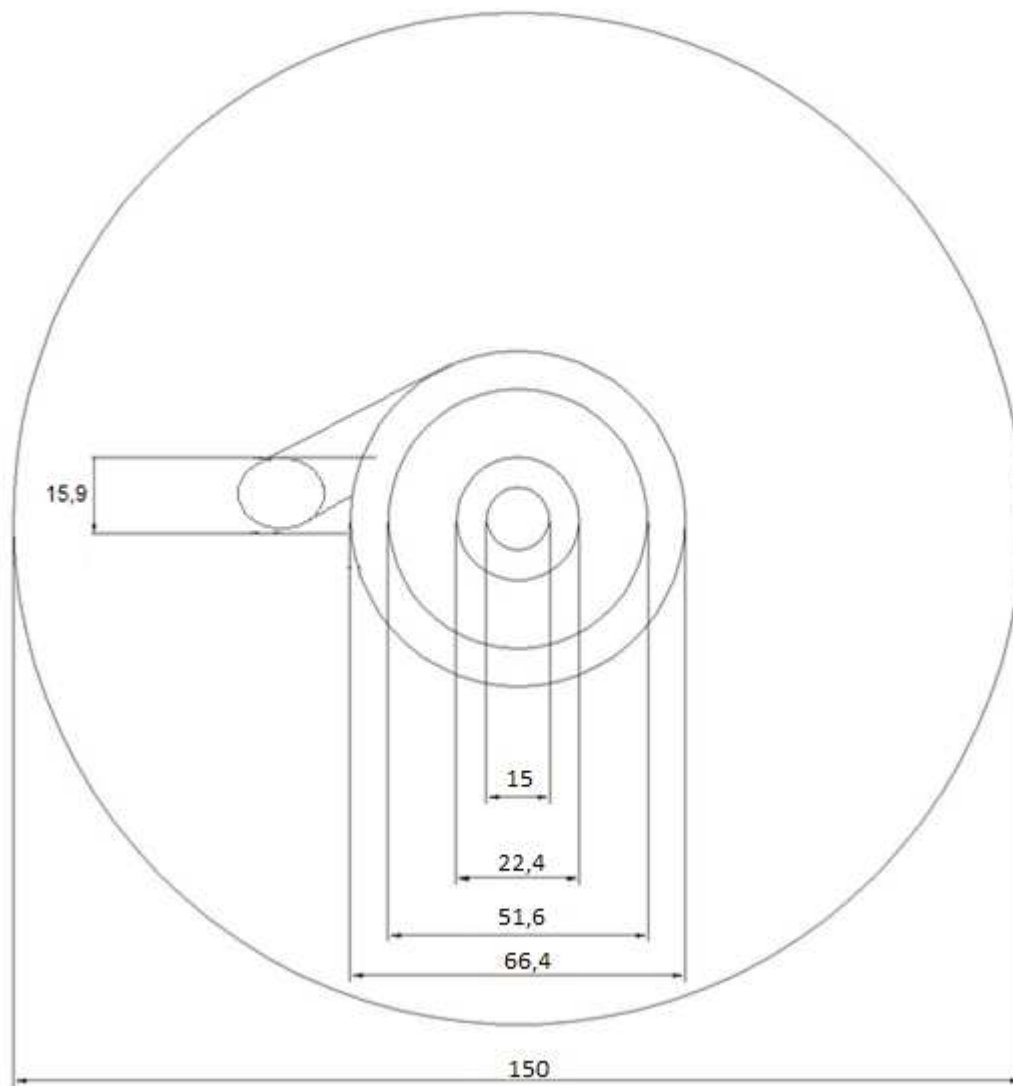


Figura 4.26 – Dimensões do hidrociclone, planta. Medidas em milímetros.

O coeficiente de giro em função do material disponível (referente às Figuras 4.13 e 4.14) foi calculado pela equação:

$$S = \frac{\pi \cdot 51.6 \text{ mm} \cdot (66.4 \text{ mm} + 15.9 \text{ mm})}{4 \cdot 21.85 \text{ mm} \cdot 15.9 \text{ mm}} \quad (4.13)$$

$$S = 9.6 \quad (4.14)$$

Após calculado e dimensionado o dispositivo pelo método de Colman & Thew (1988), foi criado o molde do hidrociclone mostrado nas Figuras 4.27, 4.28 e 4.29.



**Figura 4.27 – Construção do molde da parte inferior do hidrociclone.**



**Figura 4.28 – Construção do molde da parte superior do hidrociclone.**





Figura 4.29 – Dispositivo hidrociclone desenvolvido.



#### **4.4 Procedimento Experimental**

Conforme a Figura 4.30 o procedimento experimental seguiu a sequência, com todas as válvulas inicialmente fechadas: a) abriu-se a válvula V-1A; b) ligou-se a bomba B-01 através do inversor de frequência IF-01; c) abriu-se as válvulas V-1B e V-1C, desta forma alinhou-se o deslocamento da água para reciclo. A alimentação do deslocamento de óleo foi semelhante: a) abriu-se a válvula V-2A; b) ligou-se a bomba B-02 através do inversor de frequência IF-02; c) abriu-se a válvula V-2B.

As válvulas V-03, V-D e V2C foram abertas na sequência tendo os fluxos de óleo e água alinhados para o misturador estático M-03. Mediu-se a pressão a montante e a jusante do dispositivo DCAFV e pressões no trecho reto a jusante do dispositivo através dos indicadores de pressão PI (manômetros digitais).

Retirou-se o dispositivo e transportou-se apenas óleo no sistema, coletou-se a vazão e mediu-se a pressão através dos PI.

Coletou-se amostra a jusante do dispositivo DCAFV com um recipiente para medição de vazão mássica do fluido água/óleo.

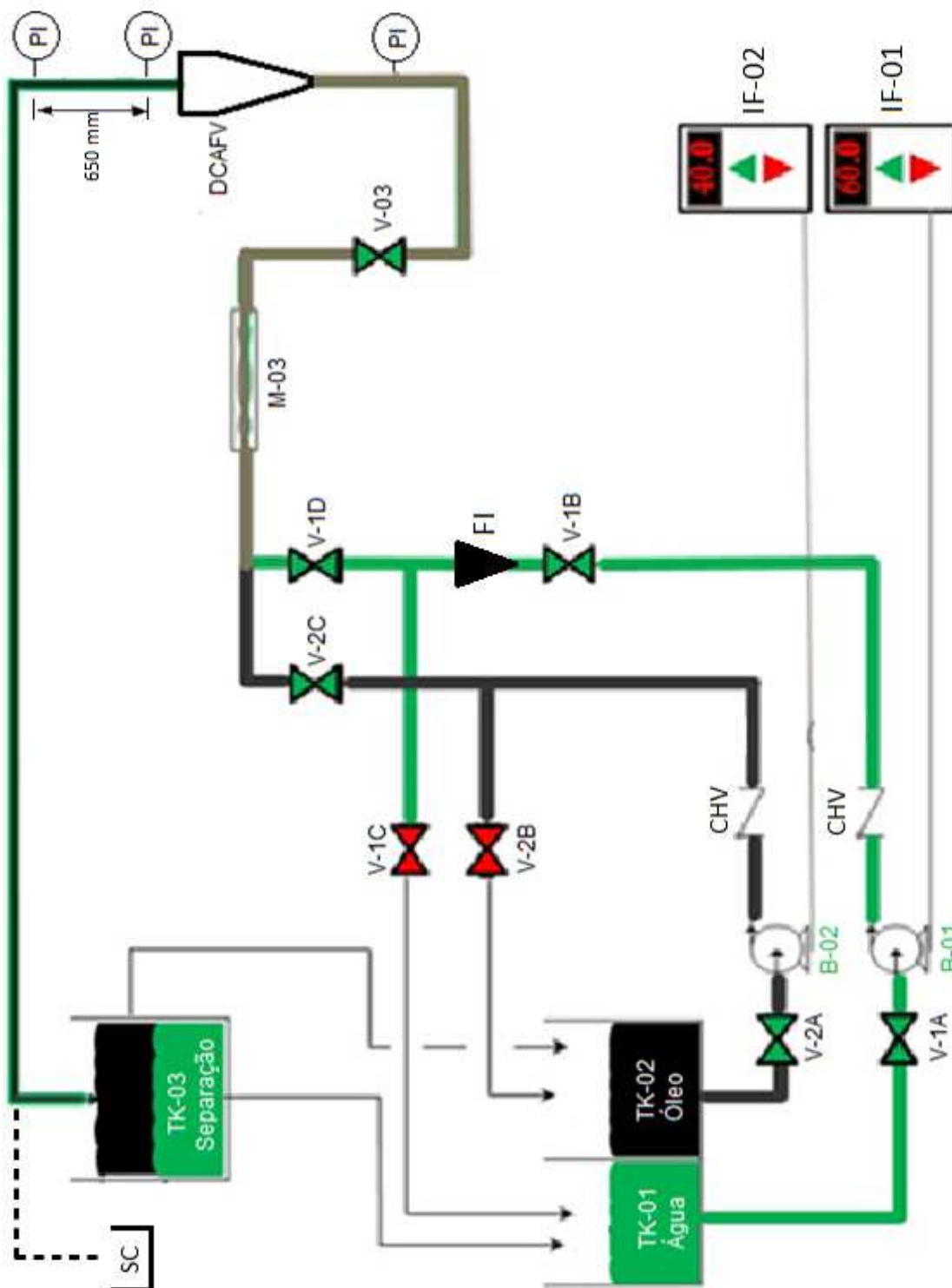


Figura 4.30 – Fluxograma do sistema. Legenda: DCAFV – Dispositivo para a formação do Core Annular Flow na vertical; TE – tanque; V – válvula; B – bomba; M – misturador estático; IF – inversor de frequência; TK – tanque; PI – indicador de pressão; FI – rotômetro; CHV – válvula de retenção; SC – coletor de amostra.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1 Formação do “Core Annular Flow”

Após o desenvolvimento dos dispositivos, observou-se experimentalmente a formação do Core Annular Flow a jusante dos dois dispositivos desenvolvidos, conforme a Figura 5.1.



Figura 5.1 – Formação do Core Annular Flow.

## 5.2 Escoamento monofásico. Curva da bomba

A caracterização da máquina geratriz empregada para deslocar a água e o óleo no presente trabalho foi feita pelas curvas da altura manométrica (H) em função da vazão, dada pela equação 5.1.

$$H = \frac{P}{\gamma} \quad (5.1)$$

Sendo

H a altura manométrica em metros de coluna de fluido, mcf;

P a pressão na descarga da bomba em kgf/m<sup>2</sup>;

$\gamma$  o peso específico do fluido, em kgf/m<sup>3</sup>, produto da densidade (d) pela aceleração da gravidade.

Com os dados obtidos experimentalmente, foi elaborada a Tabela 5.1 visando quantificar a densidade da água após ser separada do óleo.

**Tabela 5.1 – Determinação da densidade da água a 20°C.**

| Ensaio | Balão de<br>1 litro<br>(kg) | Massa<br>(kg) |         | Densidade<br>(kg/m <sup>3</sup> ) |
|--------|-----------------------------|---------------|---------|-----------------------------------|
|        |                             | Total         | Líquida |                                   |
| 1      | 257,90                      | 1254,60       | 996,70  | 996,70                            |
| 2      | 258,10                      | 1254,68       | 996,58  | 996,58                            |
| 3      | 258,12                      | 1254,75       | 996,63  | 996,63                            |
| 4      | 258,18                      | 1254,60       | 996,42  | 996,42                            |
| Média  | 258,08                      | 1254,66       | 996,58  | 996,58                            |

As Tabelas 5.2, 5.3, 5.4, 5.5, 5.6, 5.7 fornecem os dados experimentais para a determinação da curva da bomba (Figuras 5.2 e 5.3). Empregou-se nos cálculos a densidade da água de 996,58 kg/m<sup>3</sup> e a densidade do óleo de 929,6 kg/m<sup>3</sup>.

**Tabela 5.2 – Dados da bomba em operação com água (40Hz, 2395 rpm).**

| Condição | P <sub>man</sub><br>(kgf/cm <sup>2</sup> ) | Massa<br>total<br>(kg) | Tara<br>(kg) | Massa<br>líquida<br>(kg) | Tempo<br>(s) | Vazão<br>calculada |                     | H<br>(mca) |
|----------|--------------------------------------------|------------------------|--------------|--------------------------|--------------|--------------------|---------------------|------------|
|          |                                            |                        |              |                          |              | (L/min)            | (m <sup>3</sup> /h) |            |
| Shut off | 3,52                                       | 0                      | 0            | 0                        | 0            | 0                  | 0                   | 36,42      |
| 2        | 2,84                                       | 3,000                  | 0,650        | 2,350                    | 22,27        | 6,355              | 0,381               | 29,38      |
| 3        | 2,17                                       | 5,610                  | 0,640        | 4,970                    | 21,86        | 13,688             | 0,821               | 22,45      |
| 4        | 1,50                                       | 5,330                  | 0,640        | 4,690                    | 13,35        | 21,159             | 1,270               | 15,51      |
| 5        | 0,83                                       | 8,890                  | 0,620        | 8,270                    | 15,20        | 32,767             | 1,966               | 8,59       |
| Aberto   | 0,16                                       | 8,280                  | 0,610        | 7,670                    | 11,62        | 39,740             | 2,384               | 1,65       |

Obs.1: as condições 2, 3, 4 e 5 da primeira coluna são aberturas em relação ao shut-off.

Obs.2: A altura manométrica (H) foi obtida pela equação 5.1. Exemplo:

$$H_{\text{água}} = \frac{P}{\gamma_{\text{água}}} = \frac{3,52 \text{ kgf/cm}^2 (100 \text{ cm/1m})^2}{966,58 \text{ kgf/m}^3} = 36,42 \text{ mc}$$

**Tabela 5.3 – Dados da bomba em operação com água (50Hz, 2992 rpm).**

| Condição | P <sub>man</sub><br>(kgf/cm <sup>2</sup> ) | Massa<br>total<br>(kg) | Tara<br>(kg) | Massa<br>líquida<br>(kg) | Tempo<br>(s) | Vazão<br>calculada |                     | H<br>(mca) |
|----------|--------------------------------------------|------------------------|--------------|--------------------------|--------------|--------------------|---------------------|------------|
|          |                                            |                        |              |                          |              | (L/min)            | (m <sup>3</sup> /h) |            |
| Shut off | 5,30                                       | 0                      | 0            | 0                        | 0            | 0                  | 0                   | 54,83      |
| 2        | 4,25                                       | 3,110                  | 0,650        | 2,460                    | 17,87        | 8,288              | 0,497               | 43,97      |
| 3        | 3,24                                       | 6,190                  | 0,650        | 5,540                    | 18,60        | 17,937             | 1,076               | 33,52      |
| 4        | 2,23                                       | 8,120                  | 0,650        | 7,470                    | 16,72        | 26,898             | 1,614               | 23,07      |
| 5        | 1,22                                       | 7,780                  | 0,650        | 7,130                    | 11,74        | 36,564             | 2,194               | 12,62      |
| Aberto   | 0,21                                       | 8,580                  | 0,650        | 7,930                    | 9,58         | 49,862             | 2,992               | 2,17       |

Obs.: as condições 2, 3, 4 e 5 da primeira coluna são aberturas em relação ao shut-off.

Tabela 5.4 – Dados da bomba em operação com água (60Hz, 3568 rpm).

| Condição | P <sub>man</sub><br>(kgf/cm <sup>2</sup> ) | Massa<br>total<br>(kg) | Tara<br>(kg) | Massa<br>líquida<br>(kg) | Tempo<br>(s) | Vazão<br>calculada |                     | H<br>(mca) |
|----------|--------------------------------------------|------------------------|--------------|--------------------------|--------------|--------------------|---------------------|------------|
|          |                                            |                        |              |                          |              | (L/min)            | (m <sup>3</sup> /h) |            |
| Shut off | 7,40                                       | 0                      | 0            | 0                        | 0            | 0                  | 0                   | 76,56      |
| 2        | 5,96                                       | 4,790                  | 0,650        | 4,140                    | 25,33        | 9,842              | 0,591               | 61,66      |
| 3        | 4,54                                       | 6,170                  | 0,660        | 5,510                    | 15,63        | 21,224             | 1,273               | 46,97      |
| 4        | 3,12                                       | 8,290                  | 0,660        | 7,630                    | 14,09        | 32,603             | 1,956               | 32,28      |
| 5        | 1,70                                       | 9,280                  | 0,650        | 8,630                    | 11,97        | 43,406             | 2,604               | 17,59      |
| Aberto   | 0,28                                       | 8,680                  | 0,650        | 8,030                    | 8,37         | 57,795             | 3,468               | 2,90       |

Obs.: as condições 2, 3, 4 e 5 da primeira coluna são aberturas em relação ao shut-off.

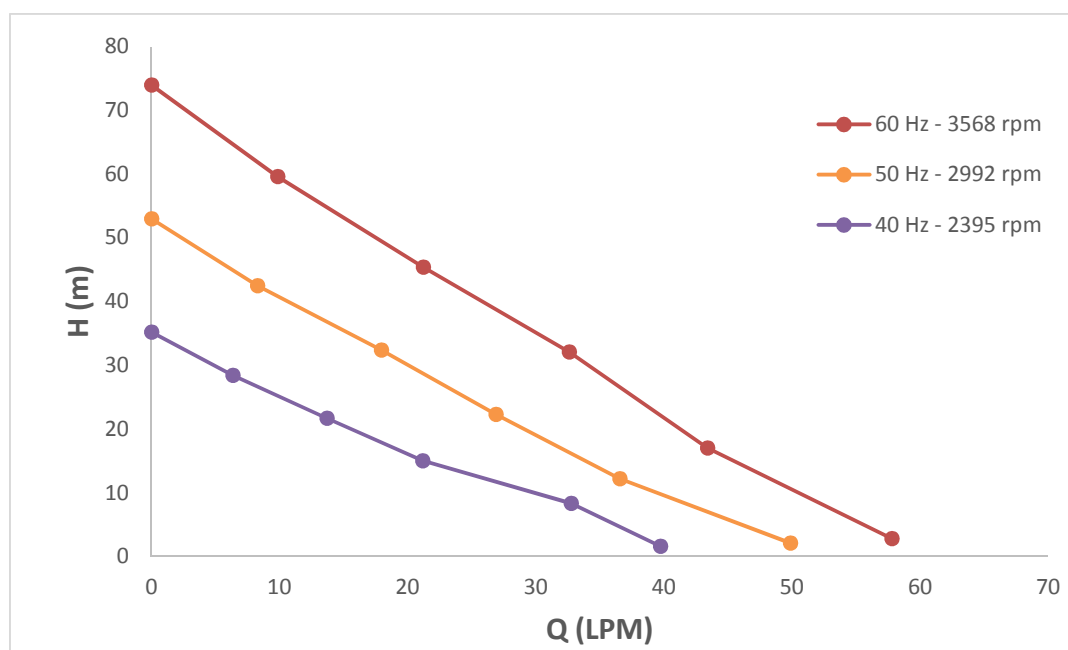


Figura 5.2 – Curva da bomba regenerativa (turbo bomba) em operação com água.

**Tabela 5.5 – Dados da bomba em operação com óleo (40Hz, 2290 rpm).**

| Condição | P <sub>man</sub><br>(kgf/cm <sup>2</sup> ) | Massa<br>total<br>(kg) | Tara<br>(kg) | Massa<br>líquida<br>(kg) | Tempo<br>(s) | Vazão<br>calculada |                     | H<br>(mco) |
|----------|--------------------------------------------|------------------------|--------------|--------------------------|--------------|--------------------|---------------------|------------|
|          |                                            |                        |              |                          |              | (L/min)            | (m <sup>3</sup> /h) |            |
| Shut off | 2,06                                       | 0                      | 0            | 0                        | 0            | 0                  | 0                   | 22,1       |
| 2        | 1,74                                       | 2,230                  | 0,780        | 1,450                    | 24,94        | 3,753              | 0,225               | 18,71      |
| 3        | 1,43                                       | 2,780                  | 0,690        | 2,090                    | 20,66        | 6,531              | 0,392               | 15,38      |
| 4        | 1,12                                       | 3,620                  | 0,705        | 2,915                    | 22,11        | 8,511              | 0,511               | 1205       |
| 5        | 0,81                                       | 4,000                  | 0,710        | 3,290                    | 19,170       | 11,077             | 0,665               | 8,71       |
| Aberto   | 0,38                                       | 5,370                  | 0,650        | 4,720                    | 22,80        | 13,362             | 0,802               | 4,09       |

Obs.1: as condições 2, 3, 4 e 5 da primeira coluna são aberturas em relação ao shut-off.

Obs.2: A altura manométrica (H) foi obtida pela equação 5.1. Exemplo:

$$H_{\text{óleo}} = \frac{P}{\gamma_{\text{óleo}}} = \frac{2,06 \text{ kgf/cm}^2 (100 \text{ cm/1m})^2}{929,6 \text{ kgf/m}^3} = 22,16 \text{ cm}$$

**Tabela 5.6 – Dados da bomba em operação com óleo (50Hz, 2786 rpm).**

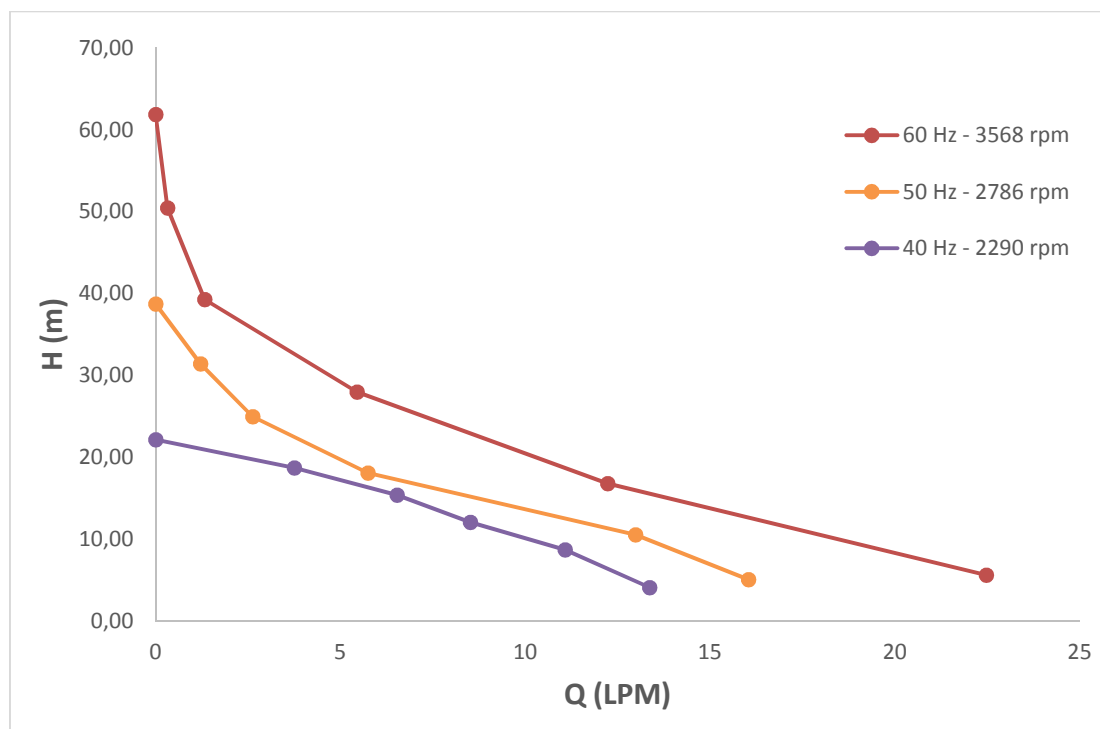
| Condição | P <sub>man</sub><br>(kgf/cm <sup>2</sup> ) | Massa<br>total<br>(kg) | Tara<br>(kg) | Massa<br>líquida<br>(kg) | Tempo<br>(s) | Vazão<br>calculada |                     | H<br>(mco) |
|----------|--------------------------------------------|------------------------|--------------|--------------------------|--------------|--------------------|---------------------|------------|
|          |                                            |                        |              |                          |              | (L/min)            | (m <sup>3</sup> /h) |            |
| Shut off | 3,60                                       | 0                      | 0            | 0                        | 0            | 0                  | 0                   | 38,73      |
| 2        | 2,92                                       | 2,630                  | 0,740        | 1,890                    | 100,46       | 1,214              | 0,073               | 31,41      |
| 3        | 2,32                                       | 3,320                  | 0,800        | 2,520                    | 62,00        | 2,623              | 0,157               | 24,96      |
| 4        | 1,68                                       | 3,810                  | 0,810        | 3,000                    | 33,74        | 5,740              | 0,344               | 18,07      |
| 5        | 0,98                                       | 5,220                  | 0,800        | 4,420                    | 21,99        | 12,976             | 0,779               | 10,54      |
| Aberto   | 0,47                                       | 6,270                  | 0,750        | 5,520                    | 22,21        | 16,045             | 0,963               | 5,05       |

Obs.: as condições 2, 3, 4 e 5 da primeira coluna são aberturas em relação ao shut-off.

**Tabela 5.7 – Dados da bomba em operação com óleo (60Hz, 3482 rpm).**

| Condição | $P_{man}$<br>(kgf/cm <sup>2</sup> ) | Massa<br>total<br>(kg) | Tara<br>(kg) | Massa<br>líquida<br>(kg) | Tempo<br>(s) | Vazão<br>calculada |                     | H<br>(mco) |
|----------|-------------------------------------|------------------------|--------------|--------------------------|--------------|--------------------|---------------------|------------|
|          |                                     |                        |              |                          |              | (L/min)            | (m <sup>3</sup> /h) |            |
| Shut off | 5,75                                | 0                      | 0            | 0                        | 0            | 0                  | 0                   | 61,85      |
| 2        | 4,69                                | 0,980                  | 0,640        | 0,340                    | 69,19        | 0,317              | 0,019               | 50,45      |
| 3        | 3,65                                | 2,140                  | 0,700        | 1,440                    | 69,97        | 1,328              | 0,080               | 39,26      |
| 4        | 2,60                                | 3,340                  | 0,680        | 2,660                    | 31,53        | 5,446              | 0,327               | 27,97      |
| 5        | 1,56                                | 4,720                  | 0,680        | 4,040                    | 19,72        | 13,223             | 0,793               | 16,78      |
| Aberto   | 0,52                                | 5,110                  | 0,640        | 4,470                    | 12,84        | 22,470             | 1,348               | 5,59       |

Obs.: as condições 2, 3, 4 e 5 da primeira coluna são aberturas em relação ao shut-off.

**Figura 5.3 – Escoamento monofásico. Número de Reynolds e Tempo espacial.**

### 5.3 Escoamento monofásico. Número de Reynolds e tempo espacial

Com os dados obtidos experimentalmente foram calculados a vazão (Q), a velocidade média ( $v$ ) nos dutos, o número de Reynolds (Re) nos dutos e o tempo espacial ( $\tau$ ) nos dispositivos, conforme mostrado nas Tabelas 5.8 e 5.9.



Tabela 5.8 – Dados experimentais para água.

| Equações        |               | $Q = \frac{V}{t}$      | $v = \frac{Q}{A}$        | $Re = \frac{D \cdot v \cdot \rho}{\mu}$ | $\tau = \frac{V}{Q}$ |               |
|-----------------|---------------|------------------------|--------------------------|-----------------------------------------|----------------------|---------------|
| Frequência (Hz) | Rotação (rpm) | Vazão calculada (m³/h) | Velocidade no duto (m/s) | Reynolds (adimensional)                 | Tempo Espacial (min) |               |
|                 |               |                        |                          |                                         | Placas               | Hidro-ciclone |
| 40              | 2395          | 0,38                   | 0,185                    | 4965,48                                 | 0,27                 | 1,30          |
|                 |               | 0,82                   | 0,398                    | 10714,98                                | 0,13                 | 0,60          |
|                 |               | 1,27                   | 0,617                    | 16595,15                                | 0,08                 | 0,39          |
|                 |               | 1,96                   | 0,952                    | 25611,41                                | 0,05                 | 0,25          |
|                 |               | 2,38                   | 1,156                    | 31099,57                                | 0,04                 | 0,21          |
| 50              | 2992          | 0,49                   | 0,238                    | 6402,85                                 | 0,21                 | 1,00          |
|                 |               | 1,07                   | 0,520                    | 13981,74                                | 0,10                 | 0,46          |
|                 |               | 1,61                   | 0,782                    | 21037,94                                | 0,06                 | 0,31          |
|                 |               | 2,19                   | 1,064                    | 28616,83                                | 0,05                 | 0,23          |
|                 |               | 2,99                   | 1,452                    | 39070,47                                | 0,03                 | 0,17          |
| 60              | 3482          | 0,59                   | 0,287                    | 7709,56                                 | 0,18                 | 0,84          |
|                 |               | 1,27                   | 0,617                    | 16595,15                                | 0,08                 | 0,39          |
|                 |               | 1,95                   | 0,947                    | 25480,74                                | 0,05                 | 0,25          |
|                 |               | 2,60                   | 1,263                    | 33974,32                                | 0,04                 | 0,19          |
|                 |               | 3,46                   | 1,680                    | 45211,98                                | 0,03                 | 0,14          |

Obs.1: área da seção transversal de um duto de 1" nominal, diâmetro interno de 0,027 m.  $A = \pi D^2 / 4 = \pi (0,027 \text{ m})^2 / 4 = 5,72 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$

Obs.2: velocidade média no duto de 1" nominal. Exemplo:

$$v = \frac{Q}{A} = \frac{0,38 \text{ (m}^3/\text{h})(1\text{h}/3600\text{s})}{5,72 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2} = 0,18 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Obs.3: número de Reynolds duto de 1" nominal. Exemplo:

$$Re = \frac{D \cdot v \cdot \rho}{\mu} = \frac{0,027 \text{ m} \cdot 0,18 \text{ m/s} \cdot 996,58 \text{ kg/m}^3}{0,001 \text{ kg/(m.s)}} = 4965,48 \text{ adimensional}$$

Obs.4: volume do dispositivo com placas de 1,71 l e do hidrociclone de 8,23 l.

Tabela 5.9 – Dados experimentais para óleo.

| Equações           |                  | $Q = \frac{V}{t}$         | $v = \frac{Q}{A}$   | $Re = \frac{D.v.\rho}{\mu}$ | $\tau = \frac{V}{Q}$    |              |
|--------------------|------------------|---------------------------|---------------------|-----------------------------|-------------------------|--------------|
| Frequência<br>(Hz) | Rotação<br>(rpm) | Vazão calculada<br>(m³/h) | Velocidade<br>(m/s) | Reynolds<br>(adimensional)  | Tempo Espacial<br>(min) |              |
|                    |                  |                           |                     |                             | Placas                  | Hidrociclone |
| 40                 | 2395             | 0,22                      | 0,107               | 288,49                      | 0,46                    | 2,21         |
|                    |                  | 0,39                      | 0,189               | 511,42                      | 0,27                    | 1,27         |
|                    |                  | 0,51                      | 0,248               | 668,78                      | 0,20                    | 0,97         |
|                    |                  | 0,66                      | 0,321               | 865,48                      | 0,16                    | 0,75         |
|                    |                  | 0,80                      | 0,389               | 1049,06                     | 0,13                    | 0,62         |
| 50                 | 2992             | 0,07                      | 0,034               | 91,79                       | 1,43                    | 6,82         |
|                    |                  | 0,15                      | 0,073               | 196,70                      | 0,66                    | 3,16         |
|                    |                  | 0,34                      | 0,165               | 445,85                      | 0,30                    | 1,44         |
|                    |                  | 0,77                      | 0,374               | 1009,72                     | 0,13                    | 0,64         |
|                    |                  | 0,96                      | 0,466               | 1258,88                     | 0,11                    | 0,52         |
| 60                 | 3482             | 0,01                      | 0,005               | 13,11                       | 5,47                    | 26,10        |
|                    |                  | 0,08                      | 0,039               | 104,91                      | 1,31                    | 6,23         |
|                    |                  | 0,32                      | 0,155               | 419,63                      | 0,32                    | 1,52         |
|                    |                  | 0,79                      | 0,384               | 1035,95                     | 0,13                    | 0,63         |
|                    |                  | 1,34                      | 0,651               | 1757,18                     | 0,08                    | 0,37         |

Obs.1: área da seção transversal de um duto de 1" nominal, diâmetro interno de

$$0,027 \text{ m. } A = \pi D^2 / 4 = \pi (0,027 \text{ m})^2 / 4 = 5,72 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

Obs.2: velocidade média no duto de 1" nominal. Exemplo:

$$v = \frac{Q}{A} = \frac{0,22 \text{ (m}^3/\text{h})(1\text{h}/3600\text{s})}{5,72 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2} = 0,107 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Obs.3: número de Reynolds duto de 1" nominal. Exemplo:

$$Re = \frac{D \cdot v \cdot \rho}{\mu} = \frac{0,027 \text{ m} \cdot 0,107 \text{ m/s} \cdot 929,6 \text{ kg/m}^3}{0,009295 \text{ kg/(m.s)}} = 288,49 \text{ adimensional}$$

Obs.4: volume do dispositivo com placas de 1,71 l e do hidrociclone de 8,23 l.

### 5.4 Escoamento bifásico. Experimentos

Ensaio realizado com o dispositivo de placas coalescentes.

#### a) Ensaio nº 1

O ensaio nº 1 foi realizado com frequência no motor da bomba de óleo em 30 Hz. A Tabela 5.10 apresenta os dados obtidos.

**Tabela 5.10 – Dados do ensaio nº 1 com o dispositivo de placas coalescentes (30 Hz).**

| Vazão Volumétrica da Água (L/min) | Pressão Montante (kgf/cm <sup>2</sup> ) | Pressão Jusante (kgf/cm <sup>2</sup> ) | Pressão após 0,65 metro da saída (kgf/cm <sup>2</sup> ) | Massa da Mistura + Tara (kg) | Tara (kg) | Tempo (s) |
|-----------------------------------|-----------------------------------------|----------------------------------------|---------------------------------------------------------|------------------------------|-----------|-----------|
| 15                                | 0,31                                    | 0,14                                   | 0,08                                                    | 6,960                        | 0,85      | 18,70     |
| 20                                | 0,32                                    | 0,15                                   | 0,08                                                    | 5,530                        | 0,83      | 10,475    |
| 25                                | 0,34                                    | 0,13                                   | 0,09                                                    | 7,340                        | 0,80      | 12,375    |
| 30                                | 0,39                                    | 0,18                                   | 0,10                                                    | 8,620                        | 0,72      | 12,065    |

Com os dados obtidos na Tabela 5.10 calcularam-se, através das equações de 5.1 a 5.4 a vazão mássica de água, a vazão mássica de óleo e a perda de carga experimental. A mesma base de cálculo segue para todos os ensaios do presente estudo.

$$W_{H_2O} = Q_{rotâmetro} \cdot \rho_{água} \quad (5.1)$$

$$W_{H_2O} = 15 \frac{L}{min} \times \frac{1 m^3}{1000 L} \times 996,58 \frac{kg}{m^3} = 15 \frac{kg}{min} \quad (5.2)$$

Uma vez que a unidade experimental não possuía medidor de vazão para a linha de óleo, a mistura desse fluido viscoso por unidade de tempo foi obtida pelo balanço de massa conforme as equações 5.3 e 5.4

$$W_{mistura} = [(m_{mistura+tara}) - (m_{tara})]/t \quad (5.3)$$

$$W_{\text{mistura}} = \frac{6,960 \text{ kg} - 0,850 \text{ kg}}{18,70 \text{ s} \cdot \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}}} = 19,6 \frac{\text{kg}}{\text{min}} \quad (5.4)$$

$$W_{\text{óleo}} = (W_{\text{mistura}}) - (W_{\text{água}}) = 19,6 \frac{\text{kg}}{\text{min}} - 15 \frac{\text{kg}}{\text{min}} = 4,6 \frac{\text{kg}}{\text{min}} \quad (5.5)$$

$$\text{Perda de carga no dispositivo} = (P_{\text{montante}}) - (P_{\text{jusante}}) \quad (5.6)$$

$$\text{Perda de carga no dispositivo} = 0,31 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} - 0,14 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} = 0,17 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} \quad (5.7)$$

$$\text{Perda de carga CAF} = (P_{\text{jusante}}) - (P_{\text{saída}}) \quad (5.8)$$

$$\text{Perda de carga CAF} = 0,14 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} - 0,08 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} = 0,06 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} \quad (5.9)$$

A Tabela 5.11 apresenta os resultados obtidos.

**Tabela 5.11 – Resultados do ensaio nº 1 com o dispositivo de placas coalescentes (30 Hz).**

| Vazão Mássica da Mistura (kg/min) | Vazão Mássica da Água (kg/min) | Vazão Mássica do Óleo (kg/min) | Perda de Carga do Dispositivo (kgf/cm <sup>2</sup> ) | Perda no CAF kgf/cm <sup>2</sup> |
|-----------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|------------------------------------------------------|----------------------------------|
| 19,60                             | 15                             | 4,60                           | 0,17                                                 | 0,06                             |
| 26,92                             | 20                             | 6,92                           | 0,17                                                 | 0,07                             |
| 31,71                             | 25                             | 6,71                           | 0,21                                                 | 0,04                             |
| 39,29                             | 30                             | 9,29                           | 0,21                                                 | 0,08                             |

No ensaio nº1 obteve-se a maior vazão de óleo (9,29 kg/min) com a vazão de água de 30 kg/min. A perda de carga do dispositivo foi de 0,21 kgf/cm<sup>2</sup> e comparada com a menor perda de carga (0,17 kgf/cm<sup>2</sup>) na vazão de 4,60 kg/min de óleo um aumento de 19,4%. A perda de carga no trecho reto, a jusante do dispositivo, foi de 0,08 kgf/cm<sup>2</sup> por 0,65 m para a mesma vazão de óleo.

b) Ensaio nº 2

Empregando-se no motor da bomba de óleo em 40 Hz. Apresentou-se na Tabela 5.12 os dados obtidos.

**Tabela 5.12 – Dados do ensaio nº 2 com o dispositivo de placas coalescentes (40 Hz).**

| Vazão Volumétrica da Água (L/min) | Pressão Montante (kgf/cm <sup>2</sup> ) | Pressão Jusante (kgf/cm <sup>2</sup> ) | Pressão após 0,65 metro da saída (kgf/cm <sup>2</sup> ) | Massa da Mistura + Tara (kg) | Tara (kg) | Tempo (s) |
|-----------------------------------|-----------------------------------------|----------------------------------------|---------------------------------------------------------|------------------------------|-----------|-----------|
| 15                                | 0,34                                    | 0,14                                   | 0,08                                                    | 6,110                        | 0,88      | 12,88     |
| 20                                | 0,34                                    | 0,14                                   | 0,09                                                    | 5,540                        | 0,86      | 9,56      |
| 25                                | 0,38                                    | 0,18                                   | 0,10                                                    | 6,100                        | 0,94      | 8,735     |
| 30                                | 0,40                                    | 0,18                                   | 0,11                                                    | 4,880                        | 0,96      | 6,16      |

Os resultados do ensaio nº 2 são fornecidos na Tabela 5.13 e Figura 5.5.

**Tabela 5.13 – Resultados do ensaio nº 2 com o dispositivo de placas coalescentes (40 Hz).**

| Vazão Mássica da Mistura (kg/min) | Vazão Mássica da Água (kg/min) | Vazão Mássica do Óleo (kg/min) | Perda de Carga do Dispositivo (kgf/cm <sup>2</sup> ) | Perda no CAF (kgf/cm <sup>2</sup> ) |
|-----------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|------------------------------------------------------|-------------------------------------|
| 24,36                             | 15                             | 9,36                           | 0,20                                                 | 0,06                                |
| 29,37                             | 20                             | 9,37                           | 0,20                                                 | 0,05                                |
| 35,44                             | 25                             | 10,44                          | 0,20                                                 | 0,08                                |
| 38,18                             | 30                             | 8,18                           | 0,22                                                 | 0,07                                |

Obteve-se no ensaio nº 2 maior vazão coletada de óleo (10,44 kg/min) com 25 kg/min de água e a perda de carga no dispositivo foi de 0,20 kgf/cm<sup>2</sup>. A perda de carga na formação do CAF a jusante do dispositivo com a mesma vazão de óleo e água foi de 0,08 kgf/cm<sup>2</sup> por um comprimento de tubo vertical de 0,65 m.

### c) Ensaio nº 3

A frequência de 50 Hz foi a utilizada no motor da bomba de óleo no ensaio nº 3. A Tabela 5.14 apresenta os dados experimentais e a Figura 5.6 os resultados referente a Tabela 5.15.

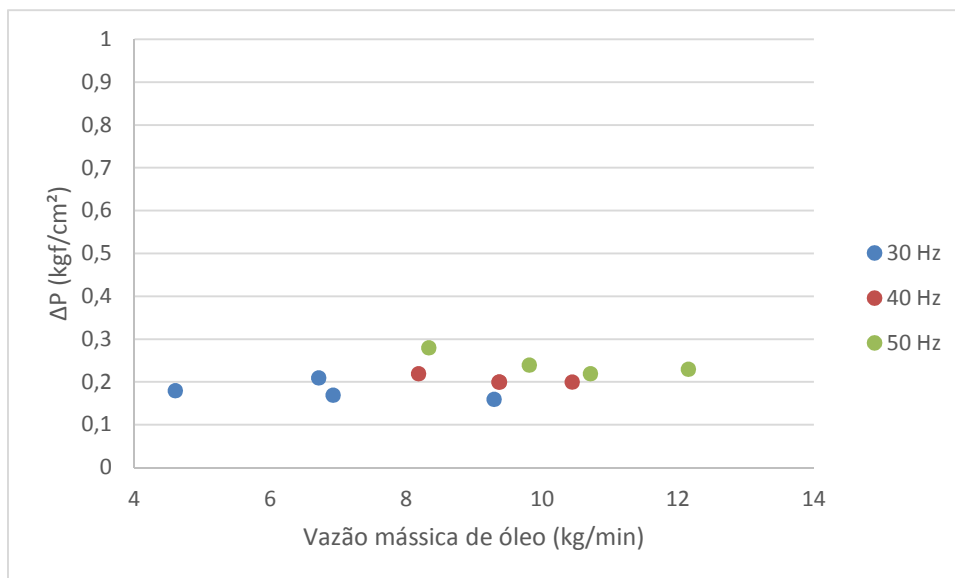
**Tabela 5.14 – Dados do ensaio nº 3 com o dispositivo de placas coalescentes (50 Hz).**

| Vazão Volumétrica da Água (L/min) | Pressão Montante (kgf/cm <sup>2</sup> ) | Pressão Jusante (kgf/cm <sup>2</sup> ) | Pressão após 0,65 metro da saída (kgf/cm <sup>2</sup> ) | Massa da Mistura + Tara (kg) | Tara (kg) | Tempo (s) |
|-----------------------------------|-----------------------------------------|----------------------------------------|---------------------------------------------------------|------------------------------|-----------|-----------|
| 15                                | 0,37                                    | 0,14                                   | 0,08                                                    | 7,620                        | 0,96      | 14,72     |
| 20                                | 0,38                                    | 0,16                                   | 0,09                                                    | 7,340                        | 0,95      | 12,485    |
| 25                                | 0,42                                    | 0,18                                   | 0,10                                                    | 7,500                        | 0,90      | 11,375    |
| 30                                | 0,46                                    | 0,18                                   | 0,10                                                    | 7,230                        | 0,89      | 9,925     |

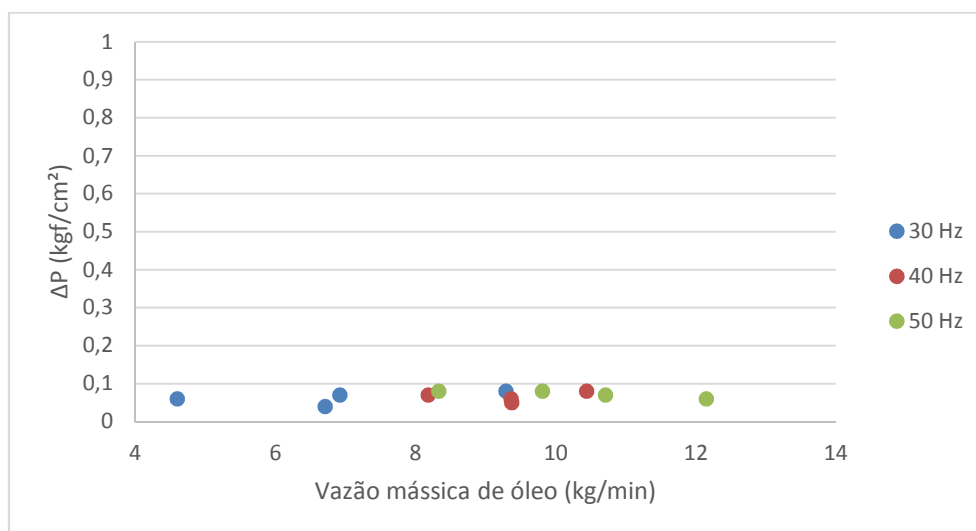
**Tabela 5.15 – Resultados do ensaio nº 3 com o dispositivo de placas coalescentes (50 Hz).**

| Vazão Mássica da Mistura (kg/min) | Vazão Mássica da Água (kg/min) | Vazão Mássica do Óleo (kg/min) | Perda de Carga do Dispositivo (kgf/cm <sup>2</sup> ) | Perda no CAF kgf/cm <sup>2</sup> |
|-----------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|------------------------------------------------------|----------------------------------|
| 27,15                             | 15                             | 12,15                          | 0,23                                                 | 0,06                             |
| 30,71                             | 20                             | 10,71                          | 0,22                                                 | 0,07                             |
| 34,81                             | 25                             | 9,81                           | 0,24                                                 | 0,08                             |
| 38,33                             | 30                             | 8,33                           | 0,28                                                 | 0,08                             |

A maior vazão de óleo no ensaio nº 3 foi de 12,15 kg/min formando o CAF com a vazão de água de 15,00 kg/min. A perda de carga no dispositivo foi de 0,23 kgf/cm<sup>2</sup>, na conclusão supracitada pode-se observar os 3 ensaios de perda de carga do dispositivo através da Figura 5.7 e a perda no tubo após o dispositivo com CAF na Figura 5.8



**Figura 5.4 – Perda de carga do dispositivo em função da vazão mássica de óleo para o sistema Core Annular Flow no dispositivo com placas coalescentes. Frequências no motor da bomba de óleo de 30, 40 e 50 Hz.**



**Figura 5.5 – Perda de carga do trecho reto em função da vazão mássica de óleo para o sistema Core Annular Flow após as placas coalescentes. Frequências no motor da bomba de óleo de 30, 40 e 50 Hz.**

Observou-se que o equipamento Core Annular Flow Vertical com o dispositivo de placas coalescentes e com frequência de óleo de 50 Hz, apresentou a vazão de 12,15 kg/min de óleo e perda de carga de 0,23 kgf/cm<sup>2</sup> do dispositivo e 0,06 kgf/cm<sup>2</sup> em trecho reto com comprimento de 0,65 m.

### 5.5 Escoamento bifásico. Experimentos

O mesmo estudo foi repetido com o dispositivo do tipo hidrociclone, também com três ensaios fornecendo as Tabelas de 5.16 a 5.21 e as Figuras 5.9 e 5.10.

#### a) Ensaio nº 1

**Tabela 5.16 – Dados do ensaio nº 1 com o dispositivo hidrociclone (30 Hz).**

| Vazão Volumétrica da Água (L/min) | Pressão Montante (kgf/cm <sup>2</sup> ) | Pressão Jusante (kgf/cm <sup>2</sup> ) | Pressão após 0,65 metro da saída (kgf/cm <sup>2</sup> ) | Massa da Mistura + Tara (kg) | Tara (kg) | Temp o (s) |
|-----------------------------------|-----------------------------------------|----------------------------------------|---------------------------------------------------------|------------------------------|-----------|------------|
| 15                                | 0,47                                    | 0,17                                   | 0,12                                                    | 6,600                        | 0,630     | 16,105     |
| 20                                | 0,58                                    | 0,18                                   | 0,13                                                    | 7,440                        | 0,740     | 15,945     |
| 25                                | 0,66                                    | 0,21                                   | 0,14                                                    | 7,340                        | 0,810     | 13,16      |
| 30                                | 0,79                                    | 0,22                                   | 0,14                                                    | 7,290                        | 0,860     | 10,72      |

**Tabela 5.17 – Resultados do ensaio nº 1 com o dispositivo hidrociclone (30 Hz).**

| Vazão Mássica da Mistura (kg/min) | Vazão Mássica da Água (kg/min) | Vazão Mássica do Óleo (kg/min) | Perda de Carga do Dispositivo (kgf/cm <sup>2</sup> ) | Perda no CAF kgf/cm <sup>2</sup> |
|-----------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|------------------------------------------------------|----------------------------------|
| 22,24                             | 15                             | 7,24                           | 0,30                                                 | 0,05                             |
| 25,21                             | 20                             | 5,21                           | 0,40                                                 | 0,05                             |
| 29,77                             | 25                             | 4,77                           | 0,45                                                 | 0,07                             |
| 35,99                             | 30                             | 5,99                           | 0,57                                                 | 0,08                             |



## b) Ensaio nº 2

**Tabela 5.18 – Dados do ensaio nº 2 com o hidrociclone (40 Hz).**

| Vazão Volumétrica da Água (L/min) | Pressão Montante (kgf/cm <sup>2</sup> ) | Pressão Jusante (kgf/cm <sup>2</sup> ) | Pressão após 0,65 metro da saída (kgf/cm <sup>2</sup> ) | Massa da Mistura + Tara (kg) | Tara (kg) | Tempo (s) |
|-----------------------------------|-----------------------------------------|----------------------------------------|---------------------------------------------------------|------------------------------|-----------|-----------|
| 15                                | 0,51                                    | 0,19                                   | 0,12                                                    | 7,330                        | 0,820     | 17,03     |
| 20                                | 0,65                                    | 0,20                                   | 0,13                                                    | 6,880                        | 0,880     | 12,59     |
| 25                                | 0,73                                    | 0,22                                   | 0,14                                                    | 7,280                        | 0,870     | 11,675    |
| 30                                | 0,88                                    | 0,26                                   | 0,17                                                    | 7,450                        | 0,840     | 10,94     |

**Tabela 5.19 – Resultados do ensaio nº 2 com o hidrociclone (40 Hz).**

| Vazão Mássica da Mistura (kg/min) | Vazão Mássica da Água (kg/min) | Vazão Mássica do Óleo (kg/min) | Perda de Carga do Dispositivo (kgf/cm <sup>2</sup> ) | Perda no CAF kgf/cm <sup>2</sup> |
|-----------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|------------------------------------------------------|----------------------------------|
| 22,94                             | 15                             | 7,94                           | 0,32                                                 | 0,07                             |
| 28,59                             | 20                             | 8,59                           | 0,45                                                 | 0,07                             |
| 32,94                             | 25                             | 7,94                           | 0,51                                                 | 0,08                             |
| 36,25                             | 30                             | 6,25                           | 0,62                                                 | 0,09                             |

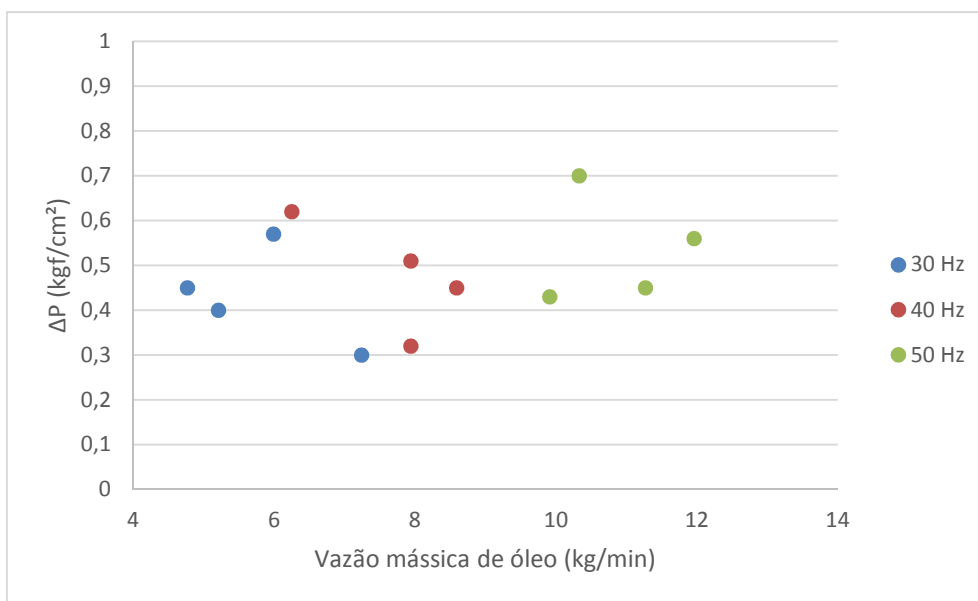
## c) Ensaio nº 3

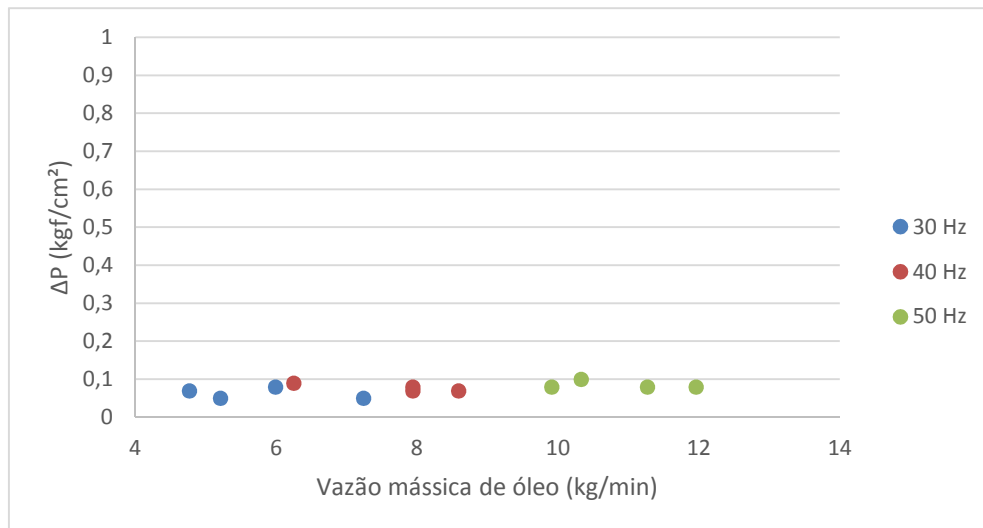
**Tabela 5.20 – Dados do ensaio nº 3 com o hidrociclone (50 Hz).**

| Vazão Volumétrica da Água (L/min) | Pressão Montante (kgf/cm <sup>2</sup> ) | Pressão Jusante (kgf/cm <sup>2</sup> ) | Pressão após 0,65 metro da saída (kgf/cm <sup>2</sup> ) | Massa da Mistura + Tara (kg) | Tara (kg) | Tempo (s) |
|-----------------------------------|-----------------------------------------|----------------------------------------|---------------------------------------------------------|------------------------------|-----------|-----------|
| 15                                | 0,64                                    | 0,21                                   | 0,13                                                    | 6,330                        | 0,880     | 13,125    |
| 20                                | 0,67                                    | 0,22                                   | 0,14                                                    | 6,920                        | 0,900     | 11,550    |
| 25                                | 0,79                                    | 0,23                                   | 0,15                                                    | 6,720                        | 0,920     | 9,415     |
| 30                                | 0,94                                    | 0,24                                   | 0,14                                                    | 6,940                        | 0,900     | 8,985     |

**Tabela 5.21 – Resultados do ensaio nº 3 com o hidrociclone (50 Hz).**

| Vazão Mássica da Mistura (kg/min) | Vazão Mássica da Água (kg/min) | Vazão Mássica do Óleo (kg/min) | Perda de Carga do Dispositivo (kgf/cm <sup>2</sup> ) | Perda no CAF kgf/cm <sup>2</sup> |
|-----------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|------------------------------------------------------|----------------------------------|
| 24,91                             | 15                             | 9,91                           | 0,43                                                 | 0,08                             |
| 31,27                             | 20                             | 11,27                          | 0,45                                                 | 0,08                             |
| 36,96                             | 25                             | 11,96                          | 0,56                                                 | 0,08                             |
| 40,33                             | 30                             | 10,33                          | 0,70                                                 | 0,10                             |

**Figura 5.6 –Perda de carga do hidrociclone em função da vazão mássica de óleo para o sistema Core Annular Flow.**

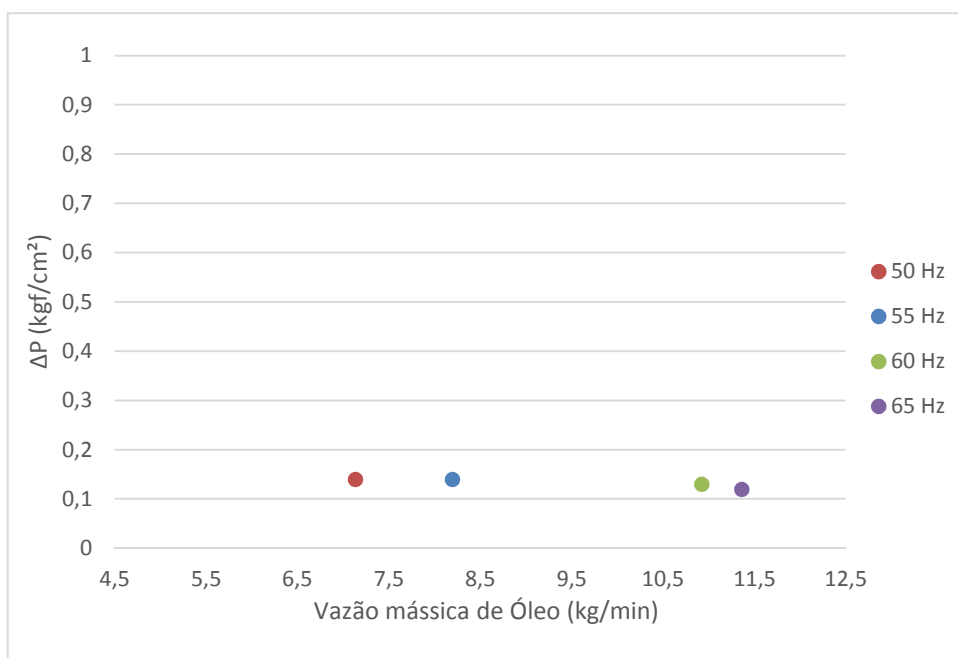


**Figura 5.7 – Perda de carga do trecho reto em função da vazão mássica de óleo para o sistema Core Annular Flow após o hidrociclone. Frequências no motor da bomba de óleo de 30, 40 e 50 Hz.**

Observou-se que o equipamento Core Annular Flow Vertical com o dispositivo hidrociclone e com frequência de óleo de 50 Hz, apresentou potencial de coleta de 11,96 kg/min de óleo, perda de carga de 0,56 kgf/cm<sup>2</sup> e 0,08 kgf/cm<sup>2</sup> no trecho vertical de 0,65 m a jusante.

### **5.6 Ensaio com apenas óleo em trecho reto vertical**

Visando a comparação, realizaram-se 4 ensaios sem o dispositivo transportando apenas óleo e variando a frequência em 50, 55, 60 e 65 Hz. Os valores foram para a mesma vazão, de óleo, superiores ao do CAF, indicado na Figura 5.8.



**Figura 5.8 – Perda de carga ( $\Delta P$ ) experimental em função da vazão mássica de óleo em trecho reto sem a formação do Core Annular Flow.**

## 6. CONCLUSÃO E SUGESTÕES

Ambos os dispositivos formaram o CAF a partir de uma mistura na vertical de água e óleo, com potencial emprego em poços de petróleo.

O dispositivo de placas coalescentes foi, para as condições estudadas, mais eficiente que o hidrociclone atingindo vazão mássica de óleo de 12,15 kg/min e uma baixa perda de carga de 0,23 kgf/cm<sup>2</sup> com um menor tempo espacial. A perda de carga do CAF a jusante da unidade com placas coalescentes foi de 0,06 kgf/cm<sup>2</sup> por 0,65 m ou seja 0,09 kgf/cm<sup>2</sup> por metro. O dispositivo hidrociclone obteve uma vazão mássica de óleo similar de 11,96 kg/min com uma perda de carga de 0,56 kgf/cm<sup>2</sup>, quase três vezes maior.

Visando a continuidade do estudo sugere-se:

- a) Realizar ensaios com diferentes vazões de água e óleo;
- b) Trocar a bomba de óleo de tipo regenerativa para bomba de deslocamento positivo do tipo engrenagem para verificar a variação das características de óleo;
- c) Estudar a injeção de desemulsificante na amostra;
- d) Quantificar a influência da temperatura.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. <[www.abnt.org.br](http://www.abnt.org.br)>. Acesso em 23 abr. 2015.

AGÊNCIA NACIONAL DE PETROLEO, GAS NATURAL E BIOCOMBUSTIVEL, Anuário Estatístico 2012. Distrito Federal. Disponível em <<http://www.anp.gov.br/>>. Acesso 2015.

ANDRADE, T. H. F. Estudo numérico do transporte de óleos pesados em tubos lubrificados por água. Campina Grande, UFCG, 2008. 61p. (tese), PPGCS/UFCG.

ARRUDA, A. A. Otimização de um hidrociclone utilizado na separação de uma mistura líquido-líquido. Dissertação de Pós Graduação. Dez. 2008. Universidade Católica de Pernambuco.

BRASIL, N.I. do; ARAÚJO, M.A.S; SOUSA, E.C.M de. Processamento de Petróleo e Gás: Petróleo e seus derivados, Processamento primário, Processos de refino, Petroquímica, Meio Ambiente. Rio de Janeiro, LTC Petrobras, 2012.

COLMAN, D.A.; THEW, M.T. Cyclone Separator. US. Pat. 4764287, 1988. 8p.

CRUZ, O. C. Desempenho de um Hidrociclone de geometria “rietema” como pré-filtro para sistemas de irrigação. Monografia. Nov. 2008 - Universidade Estadual Paulista – UNESP.

DIÁRIO DO PRÉ-SAL. <[www.diariodopresal.wordpress.com](http://www.diariodopresal.wordpress.com)>. Acesso em 20 abr. 2015.

ELLIS, P., J. e PAUL, C., A, (1998), Tutorial: Delayed Coking Fundamentals. Great Lakes Carbon Corporation. Port Arthur, Texas. USA.

FARAH, M.A. Petróleo e seus derivados: Definição, Constituição, Aplicação, Especificações, Características de Qualidade. Rio de Janeiro, LTC Petrobras, 2012.

HERNANDEZ-VALENCIA, V., et al., Design Glycol Units for Maximum Efficiency, BR&E Technical Papers, 2001.

HIRSCH, R. L. et al, (2005), Peaking of World Oil Production: Impacts, Mitigation, & Risk Management.

INFOPETRO – Blog Infopetro. Produção mundial em águas profundas 2012. Disponível em: <<https://infopetro.wordpress.com/>>. Acesso em 24 abr. 2015.

ISAACS, J., SPEED, J. Method of piping fluids. US Patent 759374, 1904.

JOSEPH, D. D.; Renardy Y. Y. Fundamentals of Two-Fluid Dynamics. Nova Iorque, Springer-Verlag New York, 1993. 442p.

KENNISH, M.J. Practical handbook of estuarine and marine pollution. Boca Raton, CRC Press, 1996. 524p.

LUCCHESI, Dante (1998). A constituição histórica do português brasileiro como um processo bipolarizado: tendências atuais de mudança nas normas culta e popular. In: Große, Sybille & Zimmermann, Klaus (eds.). *"Substandard" e mudança no português do Brasil*. Frankfurt am main: TFM, p. 73-100.

MANDIL, C., (2002), Environmental and technological issues associated with nonconventional oil. Recent technological advancements. Institut Français du Pétrole.

MORAES, G. Sistemas de Gestão de Riscos Estudos de Análise de Risco "Onshore e Offshore". Rio de Janeiro, GVC, 2013. 2v.

MORAES, JR D.; SILVA, E.L.; MORAES, M.S.; Aplicações Industriais de Estática e Dinâmica dos Fluidos I. Santos, 2011. 360p.

PEREIRA, F.N.; SEGUIM, M.C. Projetos químicos e petroquímicos: movimentação de fluidos. 2 ed. Santos, Comunicar, 2012. 241p.

REYNOLDS, O. An experimental investigation of the circumstances which determine whether the motion of water in parallel channels shall be direct or sinuous and of the law of resistance in parallel channels. In: Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 1883, v. 174, p. 935-982.

SANTOS, A. R., (2007), A Geração de Coque de Petróleo Devido ao Processamento de Petróleos Pesados e o Seu Uso na Produção de Clínques de Cimento Portland. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica – Programa de Doutorado. Universidade Federal de Itajubá.

SILVA, S. S. Estudo do Escoamento Bifásico em Risers em Movimento na Produção Marítima de Petróleo em Águas Profundas. Dissertação de mestrado. Abr. 2006 – Universidade estadual de Campinas – Faculdade de Engenharia Mecânica.

SZKLO, A. S., (2005), Fundamentos do refino de petróleo. Editora Interciência.

THOMAS, J.E.; Fundamentos de Engenharia de Petróleo. 7 ed. Interciência, 2001.

TISSOT, B. P.; WELTE, D. H. Petroleum formation and occurrence. 2 ed. Berlin, SpringerVerlag, 1984. 699p.

TRANSPETRO – Petrobras Transporte S/A. 2015.

USEPA – U.S. Environmental Protection Agency. EPA Oil Spill Program Overview. Disponível em: <<http://www.epa.gov/oilspill/>>. Acesso em 05 abr. 2005.

USGS – United States Geological Service. Heavy Oil and Natural Bitumen – Strategic Petroleum Resources. USGS Fact Sheet FS – 070 – 03. 2003.

WEC – World Energy Council. Natural Bitumen and Extra-heavy Oil. The Complete 2001. Survey of Energy Resources. Disponível em <http://www.worldenergy.org/wecgeis/publications/reports/ser/bitumen/bitumen.asp>.



## ANEXO A – Patente americana n° 4764287

**United States Patent** [19] **Patent Number:** **4,764,287**  
**Colman et al.** [42] **Date of Patent:** **Aug. 16, 1988**

[54] **CYCLONE SEPARATOR**  
 [75] **Inventors:** Derek A. Colman, Flore; Martin T. Thew, South Hampton, both of United Kingdom  
 [73] **Assignee:** B.W.N. Vortrol Rights Co. Pty. Ltd., Victoria, Australia

[21] **Appl. No.:** 852,964  
 [22] **PCT Filed:** Aug. 2, 1985  
 [86] **PCT No.:** PCT/AU85/00181  
 § 371 **Date:** May 14, 1986  
 § 102(c) **Date:** May 14, 1986  
 [87] **PCT Pub. No.:** WO86/01130  
 PCT **Pub. Date:** Feb. 27, 1986

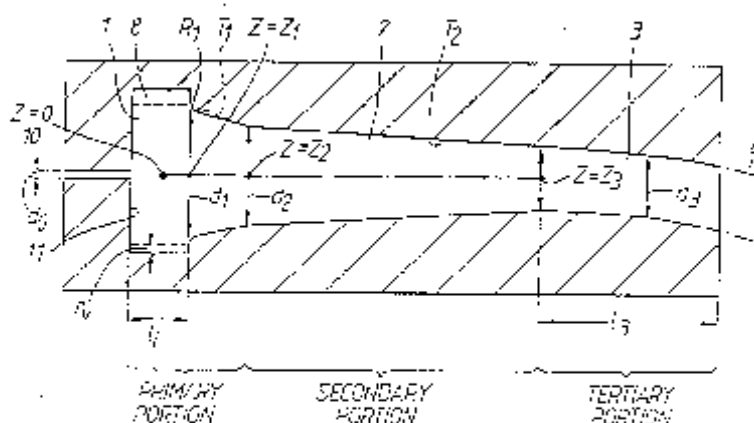
[30] **Foreign Application Priority Data**  
 Aug. 2, 1984 [GB] United Kingdom ..... 241977.  
 [51] **Int. Cl.:** ..... B01D 17/038  
 [52] **U.S. Cl.:** ..... 210/788; 209/144;  
 209/211; 210/512.1  
 [58] **Field of Search:** ..... 210/512.1, 287, 788;  
 209/144, 211

[56] **References Cited**  
**U.S. PATENT DOCUMENTS**  
 2,372,524 8/1945 Sanison et al. .... 210/512.1  
 2,735,547 3/1956 Weiss ..... 210/512.1  
 4,576,724 7/1986 Colman et al. .... 210/512.1

**Primary Examiner**—Frank Sever  
**Attorney, Agent, or Firm**—Ludka & Pater

[57] **ABSTRACT**  
 This invention relates generally to cyclone separators. The separator of the present invention may find application in removing a lighter phase from a large volume of a denser phase, such as oil from water, with minimum contamination of the more voluminous phase. Generally, cyclone separators are designed for the opposite purpose, that is, removing a denser phase from a large volume of a lighter phase, with minimum contamination of the less voluminous phase. In one form of the present invention, a typical starting liquid-liquid dispersion would contain under 1% by volume of the lighter (less dense) phase, but it could be more.

**21 Claims, 1 Drawing Sheet**



## ANEXO B – Especificações do Óleo

### INFORMAÇÕES TÉCNICAS

## LUBRAX GEAR

Óleo lubrificante para engrenagens fechadas e redutores industriais em serviços severos sob cargas elevadas. Disponível nos graus ISO 32, 46, 68, 100, 150, 220, 320, 460, 680, 1000 e 1500.

**LUBRAX GEAR** controla o desgaste e a corrosão das partes lubrificadas e sua aditivação lhe garante características de extrema pressão, resistência à oxidação e à formação de espuma.

**LUBRAX GEAR** não é corrosivo ao cobre e suas ligas, sendo isento de chumbo e outros agentes tóxicos.

**LUBRAX GEAR** é recomendado para a lubrificação de engrenagens industriais fechadas com dentes retos, cônicas de dentes retos, cônico-helicoidais, espinha de peixe, parafusos sem fim e helicoidais executando serviços severos sob cargas elevadas.

**LUBRAX GEAR** atende aos requisitos das especificações USS 224, AGMA 9005-D94 e DIN 51517 Parte 3.

**LUBRAX GEAR 32** (antigo BR-332-EX) possui fórmula diferenciada com aprovação da Petrobras para uso nos sistemas de bombeamento multifásico submarino (SBMS-500).

O nome **LUBRAX GEAR** é a nova denominação do antigo **LUBRAX INDUSTRIAL EGF-...-PS**.

Aditivos - anticorrosivo, antiespumante, antioxidante, abaixador do ponto de fluidez e agente de extrema pressão.

#### ANÁLISES TÍPICAS \*

| GRAU ISO                             | 32    | 46    | 68    | 100   | 150   | 220   | 320   | 460   | 680   | 1000   | 1500  |
|--------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|
| GRAU AGMA                            | 0     | 1     | 2(EP) | 3(EP) | 4(EP) | 5(EP) | 6(EP) | 7(EP) | 8(EP) | 8A(EP) | 9(EP) |
| Densidade a 20/4°C                   | 0,870 | 0,880 | 0,883 | 0,887 | 0,892 | 0,896 | 0,900 | 0,903 | 0,917 | 0,930  | 0,940 |
| Ponto de Fulgor (VA) (°C)            | 200   | 232   | 236   | 242   | 258   | 270   | 282   | 290   | 300   | 324    | 330   |
| Ponto de Fluidez (°C)                | -12   | -9    | -9    | -9    | -9    | -9    | -9    | -6    | -6    | -3     | -3    |
| Viscosidade a 40°C (cSt)             | 32,0  | 48,6  | 70,3  | 103,9 | 156,0 | 233   | 327   | 472   | 673   | 1051   | 1545  |
| Viscosidade a 100°C (cSt)            | 5,50  | 7,17  | 9,00  | 11,85 | 15,4  | 19,90 | 24,9  | 31,8  | 37,6  | 46,7   | 57,1  |
| Índice de Viscosidade                | 110   | 106   | 102   | 103   | 100   | 98    | 99    | 98    | 92    | 85     | 81    |
| Corrosão a Lâmina de Cobre 3h, 100°C | 1b    | 1b    | 1b    | 1b    | 1b    | 1b    | 1b    | 1b    | 1b    | 1b     | 1b    |

\*As Análises Típicas representam os valores modais da produção, não constituindo especificações. Para informações mais detalhadas primeiramente consulte nossa assistência técnica.

#### CARACTERÍSTICAS COMPLEMENTARES \*\*

|                                          |     |
|------------------------------------------|-----|
| Teste FZG (Estágio de falha)             | 12  |
| Carga Timken (lb)                        | 60  |
| Teste 4 Esferas (Carga de soldagem) (kg) | 250 |

\*\*Obtidas para o grau ISO 220.

Janeiro/2011

**LUBRAX** **BR** **PETROBRAS**

Não necessita de aditivação extra. Para descarte use as instalações dos postos de serviço, conforme Resolução CONAMA 362/05. Preservar o meio ambiente é responsabilidade de todos.