

**Instituto de Química - Universidade Estadual de Campinas**

**Estruturas de Fluxo em uma Câmara Cilíndrica de Fundo Rotatório: Construção, Caracterização e Experimentos com Soluções Poliméricas.**

---

---

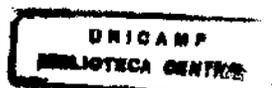
**Dissertação de Mestrado**

**Érico Teixeira Neto**

**Orientação -**

**Prof. Dr. Edvaldo Sabadini**

**Julho/1999**



12/06/2019

UNIDADE	I Q
N.º CHAMADA:	
T233 e	
V.	Ex.
TOMBO BC/	4052J
PROC.	278/00
C	<input type="checkbox"/>
D	<input checked="" type="checkbox"/>
PREÇO	\$11,00
DATA	15/03/00
N.º CPD	

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA  
BIBLIOTECA DO INSTITUTO DE QUÍMICA  
UNICAMP

CM-00140101-5

T233e Teixeira Neto, Érico  
Estruturas de fluxo em uma câmara cilíndrica de fundo rotatório: construção, caracterização e experimentos com soluções poliméricas / Érico Teixeira Neto. -- Campinas, SP: [s.n.], 1999.

Orientador: Edvaldo Sabadini.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas. Instituto de Química.

1. Vortex breakdown. 2. Poli(óxido de etileno). 3. Tratamento de imagens. I. Sabadini, Edvaldo. II. Universidade Estadual de Campinas. Instituto de Química. III. Título.

# Índice

Curriculum Vitae.....	i
Resumo.....	ii
Abstract.....	iii
Agradecimentos.....	iv
 <b>Capítulo 1 – Introdução</b>	
1.1 – Estruturas de Fluxo.....	1
1.2 – Fluxo na Câmara Cilíndrica de Fundo Rotatório.....	3
1.3 – O fenômeno de fluxo “Vortex Breakdown”.....	5
1.4 – Estrutura do fluxo na CCFR.....	8
1.5 – Fluxo laminar e turbulento.....	12
1.6 – Comportamento de aditivos de alta massa molar em solução	12
1.7 – Objetivo.....	14

## **Capítulo 2 – Construção e caracterização da CCFR**

<b>2.1 – Considerações gerais.....</b>	<b>15</b>
<b>2.2 – Dimensionamento e construção.....</b>	<b>16</b>
<b>2.3 – Filmagem, digitalização e tratamento de imagens</b>	
<b>2.3.a – Filmagem.....</b>	<b>24</b>
<b>2.3.b – Digitalização e tratamento.....</b>	<b>25</b>
<b>2.4 – Materiais.....</b>	<b>25</b>
<b>2.5 – Métodos</b>	
<b>2.5.a – Preparação do Fluido de Trabalho (FT).....</b>	<b>25</b>
<b>2.5.b – Operação da CCFR na configuração de superfície livre.....</b>	<b>25</b>
<b>2.5.c – Configuração de superfície rígida.....</b>	<b>26</b>
<b>2.5.d – Revelação das estruturas de fluxo.....</b>	<b>26</b>
<b>2.5.e – Filmagem do VB.....</b>	<b>27</b>
<b>2.5.f – Digitalização e tratamento das imagens.....</b>	<b>27</b>
<b>2.6 – Resultados e Discussão.....</b>	<b>28</b>

## Capítulo 3 – Estudo da influência de macromoléculas sobre as estruturas de VB

3.1 – Considerações gerais.....	42
3.2 – Materiais.....	42
3.3 – Métodos	
3.3.a – Preparação das soluções aquosas de PEO.....	43
3.3.b – Preparação do FT em diferentes concentrações de PEO....	43
3.3.c – Preparação do FT com 10 ppm de PEO de diferentes MM..	43
3.3.d – Tratamento de imagens.....	44
3.3.e – Estudos reológicos.....	44
3.4 – Resultados e discussão	
3.4.a – Estoque de glicerina.....	44
3.4.b – Tratamento de imagens.....	46
3.4.c – Estudo sobre toda a faixa de Re.....	47
3.4.d – Estudo sobre o efeito da concentração de PEO.....	50
3.4.e – Estudo sobre a influência do tamanho da cadeia de PEO...	53

<b>3.4.f – Estudos reológicos.....</b>	<b>56</b>
<b>Conclusão.....</b>	<b>62</b>
<b>Referências Bibliográficas.....</b>	<b>63</b>
<b>Apêndice 1.....</b>	<b>67</b>
<b>Apêndice 2.....</b>	<b>71</b>
<b>Apêndice 3.....</b>	<b>73</b>

## **Curriculum Vitae**

**Érico Teixeira Neto**

Rua Virgílio Dalben, 265 , Jardim Santa Genebra II  
Campinas – SP, CEP – 13084-832  
Fone – (019) 289-2126  
e-mail – [erico@iqm.unicamp.br](mailto:erico@iqm.unicamp.br)

### **Dados Pessoais**

Brasileiro, Solteiro, 25 anos

### **Formação**

Mestrado em Química, na área de Físico-Química, título: "Estruturas de Fluxo em uma Câmara Cilíndrica de Fundo Rotatório: Construção, Caracterização e Experimentos com Soluções Poliméricas.", agosto de 1997 a julho de 1999. Orientador Prof. Dr. Edvaldo Sabadini.

Superior em Química, na modalidade Bacharelado em Química Tecnológica, na UNICAMP – Universidade Estadual de Campinas, concluído em dezembro de 1996.

### **Idiomas**

Inglês bom, com leitura ótima, conversação boa e escrita regular.

### **Informática**

Domínio do Sistema Operacional Windows 95 e seus aplicativos.

### **Cursos**

Tecnologia em açúcar e álcool, ministrado pela FFCL-RP da USP-RP com duração de 20 horas em junho de 1991.

### **Atividades Acadêmicas e de Pesquisa**

Iniciação Científica com bolsa do CNPq de Outubro de 1994 a Fevereiro de 1996 na área da Química dos Organometálicos com aprendizado e desenvolvimento de técnicas de trabalho em atmosfera inerte com uso de vidraria do tipo Schlenk além da caracterização de produtos por espectroscopia de IV, RMN-<sup>1</sup>H e <sup>31</sup>P e de massas. Orientadora Profa. Dra. Maria Domingues Vargas.

## Resumo

O comportamento hidrodinâmico de soluções de polímeros de alta massa molar pode ser investigado em diversos sistemas. Sob condições de fluxo controlado, estruturas complexas podem ser produzidas e visualizadas em um líquido. Uma das mais interessantes é designada "vortex breakdown" (VB). Ela pode ser obtida em um recipiente cilíndrico, com o fluxo confinado, se o fundo ou a superfície superior do mesmo sofrer rotação em velocidades específicas. Este recipiente é designado por Câmara Cilíndrica de Fundo Rotatório (CCFR). Este trabalho propõe o projeto e a construção de uma CCFR que permita a realização de estudos de estabilidade das estruturas de VB para a observação das modificações causadas na estrutura dos VB pela adição de pequenas quantidades (ppm) do polímero de alta massa molar poli(óxido de etileno) (PEO) ao Fluido de Trabalho (FT) da CCFR. As estruturas dos VB gerados foram reveladas e então filmadas com uma câmera CCD. As imagens foram gravadas com um videocassete para, posteriormente, serem digitalizadas e tratadas. A CCFR construída foi caracterizada usando-se FT constituídos por misturas de glicerina e água em diferentes proporções. Com base nos parâmetros investigados, foi observada a formação de todas as estruturas esperadas, conforme descrito na literatura. Nos estudos com PEO, foram verificados os efeitos da variação da concentração e da massa molar do PEO, bem como da variação da tensão de cisalhamento sobre o FT. Estes efeitos se refletem em mudanças significativas nos parâmetros morfológicos das estruturas dos VB, provocadas pela presença de pequenas quantidades de PEO no FT. Paralelamente foram feitos estudos reológicos com os FT de forma a subsidiar os estudos feitos na CCFR. Trabalhos sobre este fenômeno publicados nas últimas três décadas concentram-se na área de engenharia. Assim, este trabalho é pioneiro em relação ao enfoque físico-químico pretendido.

## Abstract

Under controlled flow conditions, complex structures can be produced and visualized in liquids. One of the more interesting is named vortex breakdown (VB). It can be obtained in a cylindrical container, with confined flow, by rotating one endwall at specific velocities. This container is named "Cylindrical Container with Rotating Botton" (CCFR). The aim of this work is to investigate the changes produced in the VB structure by the addition of small quantities (ppm) of the high molar mass polymer poly(ethylene oxide) (PEO) to the working fluid (FT). A CCFR was projected and constructed to achieve this aim. The VB structures generated were revealed and then filmed with a CCD camera. The images were saved using a video cassette recorder, digitized and measured. The CCFR was characterized using mixtures of glycerine/water in different proportions as FT. The structures obtained are in accordance with those expected from previous works in the literature. The effects of PEO molar mass and concentration and of the shear stress on the FT were analized. These effects were observed to be associated with significant changes in the morphological parameters of the VB structures, caused by the presence of small quantities of PEO in the FT. Rheological studies were also done with the FT used in the CCFR. In the last three decades, all the research on this system was concentrated in the engineering area. The proposal of this work is to offer a new physical-chemical approach on this phenomenon.

## Agradecimentos

CNPq, bolsa.  
CNPq – PADCT, custeio.

# Capítulo 1 – Introdução

## 1.1 – Estruturas de Fluxo

No livro “Sensitive Chaos” seu autor, Theodor Schwenk<sup>1</sup>, procura mostrar, de forma artística, relações entre estruturas geradas por fluxos de líquidos e ar, e padrões morfológicos que aparecem em determinados organismos. Podemos citar como exemplo, o movimento em espiral da superfície entre a água e o ar, produzido pelo escoamento de um líquido através de um pequeno orifício, e a estrutura helicoidal de determinados tipos de conchas. O autor procura buscar um caráter universal, onde as forças que agem na natureza imprimem padrões morfológicos nos fluidos e, estes mesmos padrões aparecem na estrutura de alguns organismos. Um aspecto interessante desta universalidade está relacionado com a dimensão dos sistemas. Por exemplo, um filme de sabão, disposto verticalmente, sofre um escoamento, devido à ação da gravidade. Se um pequeno objeto sólido é colocado em contato, em um ponto do filme, são então produzidas estruturas de fluxo, compostas de uma complexa seqüência de vórtices (Figura 1A)<sup>1</sup>. O mesmo padrão pode ser observado em nuvens, onde o fluxo de ar (vento) sobre o oceano, é perturbado pela presença de uma ilha (Ilha de Guadalupe/México) (Figura 1B)<sup>2</sup>.



Figura 1A

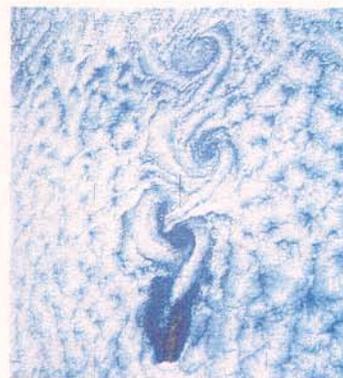


Figura 1B

Figura 1 – Complexas estruturas em vórtice formadas pelo escoamento de um filme de sabão transpondo um obstáculo sólido (Figura 1A)<sup>1</sup> e pelo deslocamento de uma massa de ar transpondo a Ilha de Guadalupe/México (Figura 1B)<sup>2</sup>.

A questão da universalidade das formas permite que sejam realizados ensaios em pequenas escalas, cujos resultados permitem o modelamento de fluxos para processos que se desenvolvem em larga escala, como por exemplo os processos turbulentos que ocorrem na atmosfera.

Uma questão central em estudos sobre estruturas de fluxo está relacionada com a visualização do fluxo. Este processo é importante em mecânica dos fluidos, pois permite o desenvolvimento de instrumentos analíticos e numéricos, necessários para resolver os problemas de fluxo. O comportamento de líquidos é primeiramente caracterizado por meio de equações constitutivas, que relacionam as variáveis tensão e deformação. As equações são resolvidas, em conjunção com as equações de conservação de massa e de momento linear e, permite prever o comportamento do fluxo. Desta forma, pode-se fazer uma comparação entre as linhas de fluxo previstas e as observadas.

No caso de fluidos Newtonianos, a equação de Navier-Stokes descreve as linhas de fluxo. No caso de fluidos não-Newtonianos, a complexidade analítica é muito maior. Neste caso, a visualização do fluxo é de extrema importância.

Na técnica de visualização de fluxo, geralmente são usados líquidos viscosos, que fluem em regime laminar. A técnica se desenvolveu muito nas últimas décadas, principalmente pela utilização de LASERs. A visualização é realizada usando partículas refletoras suspensas no fluido ou substâncias fluorescentes dissolvidas no mesmo. As linhas de fluxo podem ser reveladas, pela interação da luz do LASER (em um feixe planar, produzido por uma lente cilíndrica) com as partículas traçadoras (Figura 2)<sup>3</sup>.

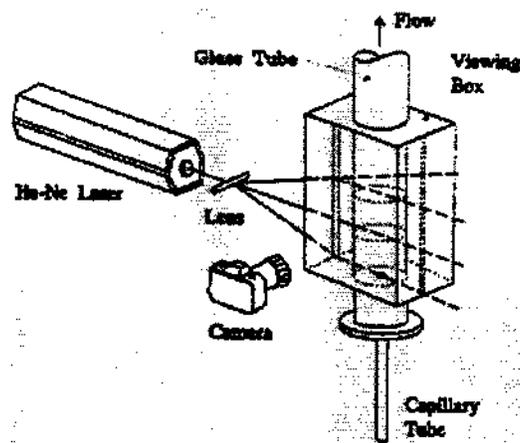


Figura 2 – Diagrama esquemático<sup>3</sup> de um sistema usado para a visualização de fluxo incluindo a luz laser e a lente cilíndrica para a produção da fonte de luz plana.

Embora os equipamentos usados para a produção de estruturas de fluxo sejam relativamente simples, o acerto das condições experimentais exigem considerável paciência do experimentador.

A muito tempo é conhecido<sup>4</sup> que um fluxo reverso local pode ser produzido no fluido quando este flui através de um tubo, pela produção de um alto grau de vorticidade<sup>a</sup> no fluxo. Tal zona de recirculação induzida pela vorticidade é a base para uma das técnicas clássicas para a estabilização de chamas em câmaras de combustão e fornos. Considerável esforço tem sido feito para se entender o mecanismo que produz o fluxo reverso e em que condições ele ocorre.

Um problema bem conhecido em análise numérica ou teórica do fluxo de fluidos não-Newtonianos é a dificuldade de separar incertezas relativas ao modelo reológico usado para representar um fluido, da incerteza usual relacionada com a definição das fronteiras físicas definidas para um fluxo complexo. A CCFR claramente elimina esta dificuldade, pois gera uma estrutura de fluxo complexa em fluxo laminar e sob condições estacionárias, permitindo assim a visualização das estruturas e a definição de suas fronteiras físicas no fluxo.

## 1.2 – Fluxo na Câmara Cilíndrica de Fundo Rotatório

A Câmara Cilíndrica de Fundo Rotatório (CCFR) gera um fluxo onde o fundo rotatório age como uma bomba, de modo análogo ao bombeamento produzido por um disco rotatório onde o fluido não se encontra confinado, analisado por von Kármán<sup>5</sup> em 1921. Nele, o fluido é puxado axialmente para baixo em direção ao fundo rotatório e então é forçado para fora, radialmente ao disco, em direção normal ao eixo, como mostrado na Figura 3.

<sup>a</sup> O termo vorticidade é definido como uma conformação de escoamento onde as linhas de corrente são círculos concêntricos.

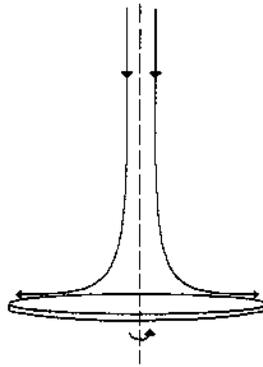


Figura 3 – Diagrama esquemático mostrando as linhas de fluxo produzidas pela rotação de um disco não confinado

No recipiente cilíndrico, o fluido encontra-se confinado pela câmara cilíndrica. Ela impõe o limite físico ao deslocamento do fluido que, então, sofre um movimento em espiral em torno de seu eixo, subindo ao longo da parede cilíndrica até a superfície quando então entra novamente na direção axial, descendo em sentido ao fundo rotatório, como mostrado na Figura 4. Este movimento em espiral para o centro do sistema resulta inicialmente em um aumento da vorticidade do fluido, devido a conservação do momento angular, levando a criação de um vórtice centralizado.

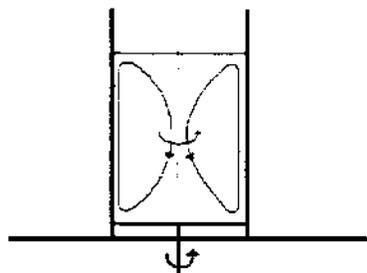


Figura 4 – Diagrama esquemático mostrando as linhas de fluxo produzidas na CCFR

O fluxo gerado na CCFR causa, sob certas condições, a formação de uma ou mais estruturas de recirculação centradas no eixo do cilindro. Os pré-requisitos básicos para a obtenção destas estruturas são: um centro do vórtice com alta vorticidade e um apreciável fluxo ao longo do eixo do vórtice<sup>6</sup>. Cada uma destas

estruturas de recirculação tem um ponto de estagnação (PE - que será definido posteriormente) no seu lado contra a corrente. Uma vez que as estruturas geradas na CCFR satisfazem estas condições, então elas seguem a definição de “vortex breakdown”(VB)<sup>b3,7-15</sup>

### 1.3 – O fenômeno de fluxo “Vortex Breakdown”

O fenômeno do VB é definido como um distúrbio caracterizado pela formação de um ponto de estagnação interno no eixo do vórtice, seguido por fluxo reverso em uma região de extensão axial limitada.

Este fenômeno vêm sendo observado em diferentes situações, especialmente em fluxo espiral em tubos<sup>8,16</sup>, em recipientes fechados<sup>17,18</sup>, em tornados, em câmaras de combustão e asas delta, podendo ser verificado em todos os sistemas que envolvem fluxo<sup>19</sup>. Alguns pesquisadores também utilizam o fenômeno para estudar as estruturas de vórtices na atmosfera do planeta. Neste caso a CCFR é também submetida à rotação para simular o processo que ocorre com a Terra<sup>20</sup>.

O fenômeno do VB tem despertado muito interesse, principalmente em simulações matemáticas, realizadas com base nas equações de Navier-Stokes<sup>21-25</sup>. Mais especificamente, muitos trabalhos de simulação usando como sistema a CCFR têm sido feitos<sup>5,26-35</sup>.

Em certas condições de fluxo, duas formas de VB predominam: a forma aproximadamente simétrica ao eixo e a forma assimétrica em espiral, mostradas na Figura 5.

<sup>b</sup> Será usado o termo “vortex breakdown” no lugar da tradução “colapso do vórtice” porque esta pode transmitir uma idéia equivocada a respeito do fenômeno.

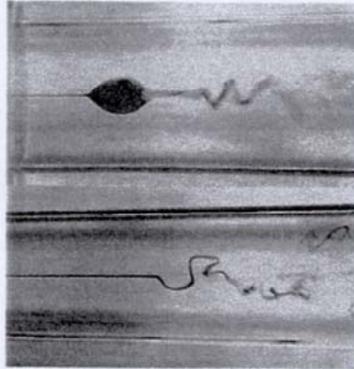


Figura 5 – “Vortex Breakdown” gerados em tubos, obtidos por Leibovich<sup>12</sup>. Forma aproximadamente simétrica ao eixo acima e forma assimétrica em espiral abaixo.

A CCFR gera o VB na forma aproximadamente simétrica. Ela consiste de um envelope aproximadamente simétrico ao eixo do vórtice, semelhante a um corpo sólido de revolução, como mostra a Figura 6.

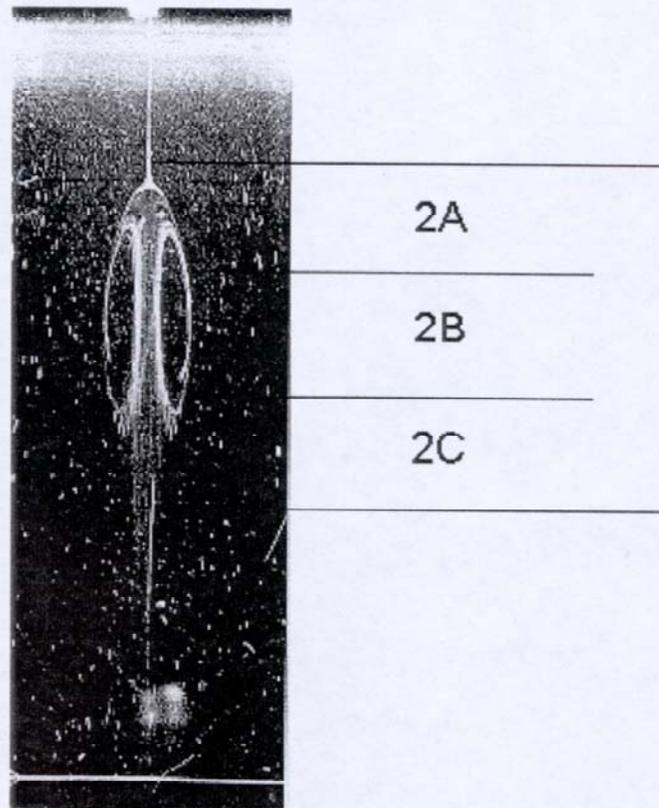


Figura 6 – Estrutura de “Vortex Breakdown” obtida na CCFR<sup>36</sup>. São identificados os campos espaciais de fluxo.

Os campos de fluxo do VB podem ser divididos em três regimes espaciais:

#### 1 – Fluxo de Aproximação:

O fluxo de aproximação consiste no núcleo do vórtice. Neste caso o fluxo pode frequentemente ser aproximado como sendo irrotacional, conforme mostrado na Figura 6 na região 1. As mudanças no fluxo de aproximação com a distância axial são lentas e o fluxo ou é laminar ou tem intensidades relativamente baixas de turbulência. Os perfis de velocidade axiais são semelhantes aos observados em tubos, com as velocidades sobre o eixo excedendo aquelas de fora do núcleo do vórtice. Nesta região, devido ao arraste hidrodinâmico, o fluxo se desenvolve com um aumento da vorticidade, freando o fluxo no sentido axial.

#### 2 – Região do “Breakdown”:

A região do “breakdown” é caracterizada por rápidas mudanças do fluxo na direção axial, mostrada na Figura 6 na região 2. Ela ocupa um intervalo axial da ordem de cinco diâmetros do núcleo do vórtice em comprimento, subdividido em três sub-intervalos com aproximadamente a mesma extensão. No primeiro sub-intervalo (região 2A), o fluxo de aproximação é desacelerado devido a formação de um ponto de estagnação (PE) sobre o eixo do vórtice. O fluxo passa pelo ponto de estagnação se dividindo tridimensionalmente em torno deste, formando um envelope aproximadamente simétrico ao eixo; no segundo (região 2B), ocorre a formação de fluxo reverso próximo ao eixo, com parte do fluido que circulou pelo perímetro do envelope entrando, em fluxo reverso, pelo interior do mesmo. A direção original do fluxo axial é retomada no terceiro sub-intervalo (região 2C), que é marcado por um grande aumento na intensidade de turbulência ou, para fluxos de aproximação laminares, pelos primeiros sinais evidentes de transição para turbulência.

#### 3 – Região Posterior ao “Breakdown”:

Uma nova estrutura em forma de vórtice, com um núcleo expandido, se estabelece corrente abaixo da zona do “breakdown”. Como na estrutura corrente acima, as variações do fluxo com a distância axial são graduais. Os perfis de velocidade axiais se assemelham rigorosamente com uma trilha de fluxo atrás de um obstáculo sólido, com as linhas de velocidade centrais menores do que aquelas de fora do núcleo do vórtice e, o fluxo é invariavelmente turbulento.

## 1.4 – Estrutura do fluxo na CCFR

A estrutura do fluxo na CCFR é determinada pelas variáveis adimensionais razão de aspecto da câmara cilíndrica  $H/R$ , que é uma razão entre a altura do fluido no cilindro dividida pelo seu raio, e pelo parâmetro de fluxo número de Reynolds ( $Re$ ), sendo:

$$Re = \Omega R^2 / \nu$$

Onde:  $R$  é o raio interno do cilindro,  $\Omega$  a velocidade angular do fundo rotatório e  $\nu$  a viscosidade cinemática do fluido<sup>37</sup>.

O parâmetro de fluxo número de Reynolds representa a razão entre as forças inerciais e viscosas e é um cálculo feito para se padronizar o regime de fluxo, levando em conta a natureza do fluido, sua velocidade e temperatura e o formato do tubo por onde flui<sup>19</sup>.

A CCFR pode operar em duas configurações diferentes: a de superfície rígida (neste caso o fluido fica em contato com uma espécie de tampa rígida) e a de superfície livre (contato do fluido é feito diretamente com o ar). Na configuração de superfície rígida, esta impõe a condição de não-deslizamento ao fluxo, levando a formação de camadas de fronteira tridimensionais, ou camadas limite, que resultam da interação entre a parede da câmara cilíndrica e a superfície rígida com o movimento em espiral do fluido na parte interna do recipiente<sup>15, 37,38</sup>. Na configuração de superfície livre ocorre interação apenas entre a parede da câmara cilíndrica e o fluido em movimento<sup>38</sup>.

Na CCFR o número de Reynolds pode ser mudado pela variação da velocidade angular do fundo rotatório e, a razão de aspecto pela variação da altura de fluido na câmara, uma vez que  $R$  é constante.

Sob condições bem definidas para as variáveis adimensionais  $Re$  e  $H/R$ , um fluxo espiralado simétrico e tridimensional é induzido pelo fundo rotatório. Isso causa a formação do VB em certos domínios do plano ( $Re$ ,  $H/R$ ), conforme apresentado na Figura 7.

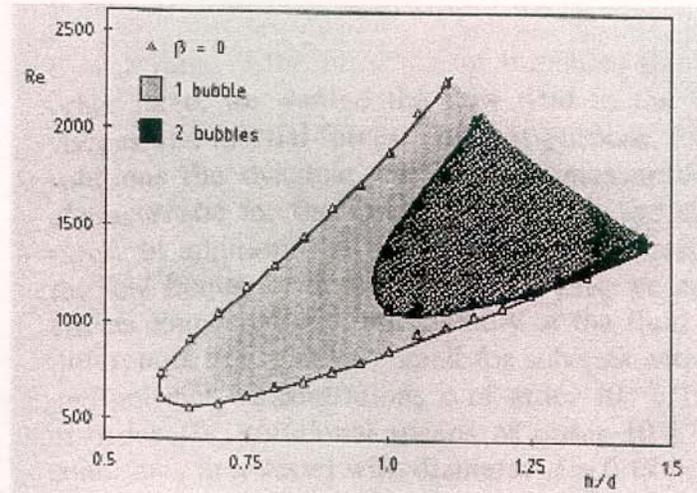


Figura 7 – Domínios no plano  $(Re, H/R)$  onde há formação de 1 e 2 estruturas de VB para a CCFR operando na configuração de superfície rígida<sup>5</sup>.

Visualizações do VB feitas por Vogel<sup>17</sup> em 1968, com a CCFR operando na configuração de superfície rígida, demonstram a ocorrência de uma única estrutura de VB no intervalo de  $Re \leq 3000$  e  $H/R \leq 2,5$ . Escudier<sup>18</sup>, em 1984, ampliou o intervalo de  $H/R$ 's estudados nesta configuração até 3,5 com a obtenção de regimes de fluxo com até três estruturas de VB separadas, apresentadas na Figura 8 e, definiu o domínio para a ocorrência destas estruturas no plano  $(H/R, \Omega R^2/\nu)$ , mostrado na Figura 9.

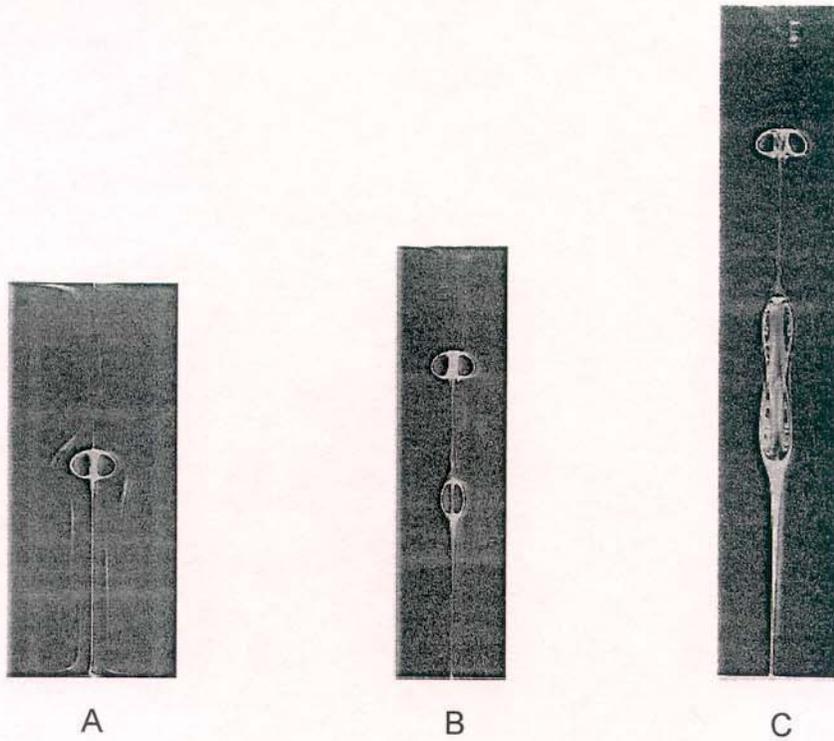


Figura 8 – Estruturas de VB obtidas por Escudier<sup>18</sup>. A - um VB em  $H/R=1,5$  e  $Re=1139$ ; B - dois VB em  $H/R=2,5$  e  $Re=1994$ ; C - três VB em  $H/R=3,25$  e  $Re=2752$ .

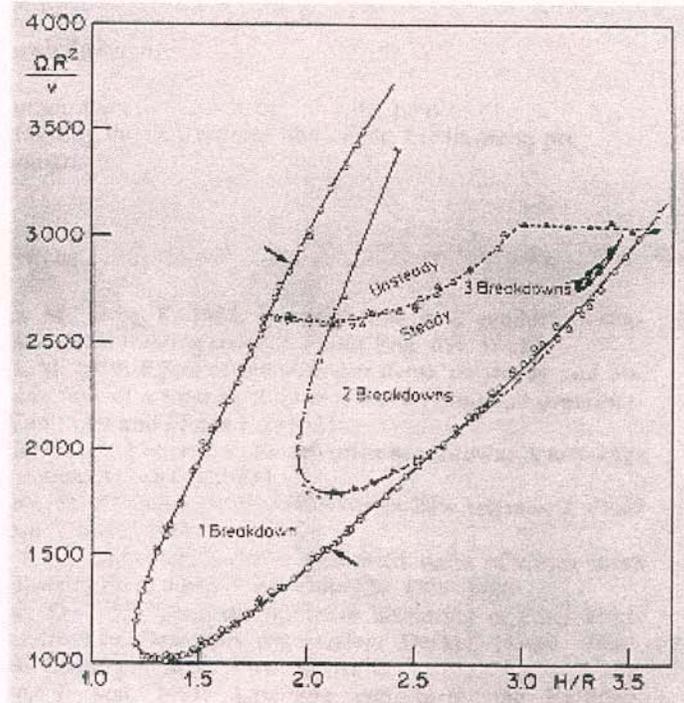


Figura 9 – Domínios no plano ( $Re$ ,  $H/R$ ) obtidos por Escudier<sup>18</sup>, onde há formação de até três estruturas de VB.

Spohn<sup>36</sup>, em 1993, investigou as conseqüências para as estruturas de fluxo quando a superfície rígida é substituída por uma superfície livre. Seus estudos cobrem o intervalo de  $Re \leq 4000$  e  $H/R \leq 4$ . Em seus estudos foram obtidas uma e duas estruturas separadas, apresentadas na Figura 10. O domínio de estabilidade das estruturas de VB no plano  $(H/R, \Omega R^2/\nu)$  é mostrado na Figura 11.

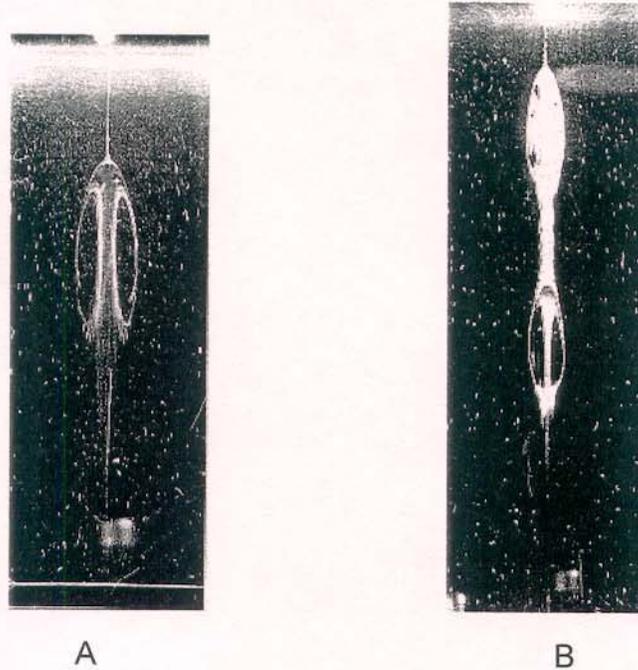


Figura 10 – Estruturas de VB obtidas por Spohn<sup>36</sup>: A - um VB em  $H/R=2$  e  $Re=1210$ ; B - dois VB em  $H/R=2,75$  e  $Re=1760$ .

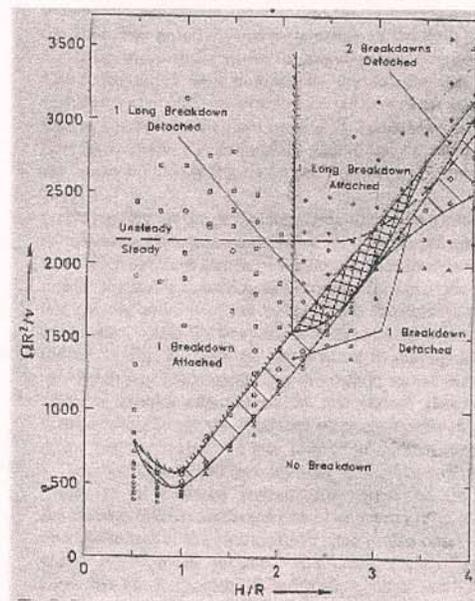


Figura 11 – Domínios no plano  $(Re, H/R)$  obtidos por Spohn<sup>36</sup>, onde há formação de uma e duas estruturas de VB.

## 1.5 – Fluxo laminar e turbulento

Um fluido apresenta, dependendo da intensidade do fluxo, um regime de fluxo de laminar a turbulento. Os fluidos fluem em lâminas com diferentes velocidades e seu fluxo se dá apresentando um determinado perfil de velocidades, dependendo da geometria do duto<sup>19</sup>. O fluxo se caracteriza pelo cisalhamento das lâminas, umas deslizando sobre as outras. Esta condição de fluxo caracteriza o regime laminar. Quando a intensidade do fluxo aumenta, podem ocorrer, de modo espaço-temporalmente randômico, abruptos saltos de velocidade no fluxo, que caracterizam a transição para fluxo turbulento. As lâminas aceleradas cisalham sobre as outras enrolando-se sobre si mesmas para dissipar a energia excedente à estabilidade do fluxo laminar, dando origem a vórtices, que são as estruturas dissipadoras de energia em fluxo turbulento. Esta perda de energia se dá em sentido normal ao fluxo e é a origem do arraste hidrodinâmico<sup>15,19,37,38</sup>.

## 1.6 – Comportamento de aditivos de alta massa molar em solução

Sistemas constituídos por soluções poliméricas de alto peso molar, bem como outras soluções que formam agregados de alta massa molar, surfactantes, sistemas micelares e até suspensões de partículas insolúveis como fibras, afetam o fluxo reduzindo de modo significativo o arraste hidrodinâmico quando em fluxo turbulento. A influência dos polímeros de alta massa molar sobre o fluxo depende do tamanho da cadeia polimérica, com os polímeros lineares de maiores massas molares tendo maior influência sobre o fluxo<sup>49</sup>. Como as soluções de polímeros de alta massa molar apresentam uma taxa de cisalhamento menor que a esperada para um fluido Newtoniano em fluxo turbulento e não linear com a tensão de cisalhamento, elas são classificadas como não-Newtonianas pseudoplásticas<sup>19</sup>. O comportamento genérico destas soluções em fluxo, comparado ao de fluidos Newtonianos é mostrado no diagrama reológico da Figura 12 a seguir.

Os sistemas mais eficientes na redução do arraste hidrodinâmico e, portanto mais amplamente estudados e utilizados, são as soluções poliméricas de alto peso molecular (acima de  $10^5 \text{ g.mol}^{-1}$ ), e dentre elas, as mais eficientes são as de poli(óxido de etileno) (PEO), capazes de uma redução de até 80%. O PEO é um polímero linear com estrutura molecular não-iônica de unidades  $-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{O}-$ , que tem boa solubilidade em água e solventes orgânicos.

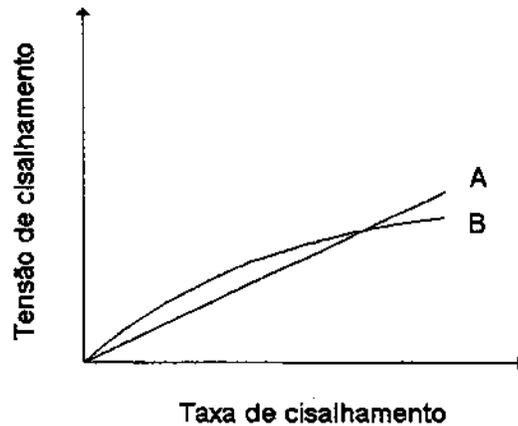


Figura 12 – Diagrama mostrando o comportamento reológico genérico de fluidos Newtonianos (A) e não-Newtonianos (B).

A presença de moléculas de PEO, mesmo em pequena quantidade, modifica algumas características reológicas do fluido Newtoniano<sup>39,40</sup>. A presença do polímero em solução faz com que esta passe a ter um comportamento não-Newtoniano pseudoplástico<sup>19</sup>, o que resulta, como pode ser observado na Figura 12, em um aumento da viscosidade da solução para fluxos laminares, com uma menor taxa de cisalhamento para um mesma tensão de cisalhamento, e uma diminuição do arraste hidrodinâmico em fluxo turbulento<sup>41-45</sup>, com uma maior taxa de cisalhamento para uma mesma tensão de cisalhamento.

## 1.7 – Objetivo

Projetar e construir uma Câmara Cilíndrica de Fundo Rotatório que permita a realização de estudos de estabilidade das estruturas de VB no plano de variáveis independentes ( $Re, H/R$ ) com diferentes fluídos, orgânicos ou inorgânicos, com a presença de diferentes aditivos, para se observar como a mudança no comportamento hidrodinâmico do fluído (60% glicerina/água v/v), causada pela presença de pequenas quantidades do redutor de arraste hidrodinâmico PEO, influencia o formato das estruturas do fenômeno de fluxo VB.

## Capítulo 2 – Construção e caracterização da CCFR

### 2.1 – Considerações gerais

A CCFR foi projetada para permitir a geração e visualização das estruturas de VB com o fluxo confinado, de maneira controlada e estável, em regime de fluxo laminar. Em geral as estruturas de VB são geradas em sistemas constituídos por tubos<sup>6-9,11,42-44,46,47.</sup> em regime de fluxo turbulento, o que impõe diversas dificuldades para a definição precisa das fronteiras físicas das estruturas de VB geradas.

A CCFR foi projetada ainda para permitir a realização de estudos com o uso de diferentes fluidos, orgânicos e inorgânicos, com diferentes viscosidades, em diferentes condições de pH e força iônica. Para tanto, torna-se necessário que todos os componentes em contato direto com os FT sejam inertes, com um sistema de vedação da câmara bastante eficiente, que não seja dissolvido e intumescido ou atacado pelos fluidos. Também é necessário um sistema de controle da velocidade da rotação do disco rotatório bastante preciso e com uma faixa bastante ampla de rotações de operação.

O fluido estudado na CCFR deve estar rigorosamente termostaticado pois a viscosidade dos fluidos é função exponencial da temperatura<sup>47</sup>, e então para se permitir a comparação entre os dados obtidos nos experimentos é necessário que todos tenham sido obtidos na mesma temperatura. Como os estudos propostos para a CCFR envolvem a visualização e filmagem das estruturas geradas em seu interior, suas paredes e as do tanque de termostatização devem ser transparentes.

A CCFR foi projetada à partir do diagrama esquemático do arranjo experimental usado por Spohn<sup>36</sup>, mostrado na Figura 13.

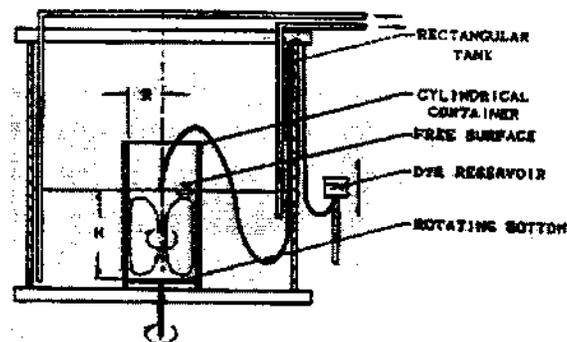


Figura 13 – Diagrama esquemático do arranjo experimental usado por Spohn<sup>36</sup>.

Com o objetivo de se montar uma CCFR que permitisse estudos com H/R de até 4,0, foi feito o dimensionamento da CCFR. O Diagrama esquemático do aparelho construído é mostrado na Figura 14.

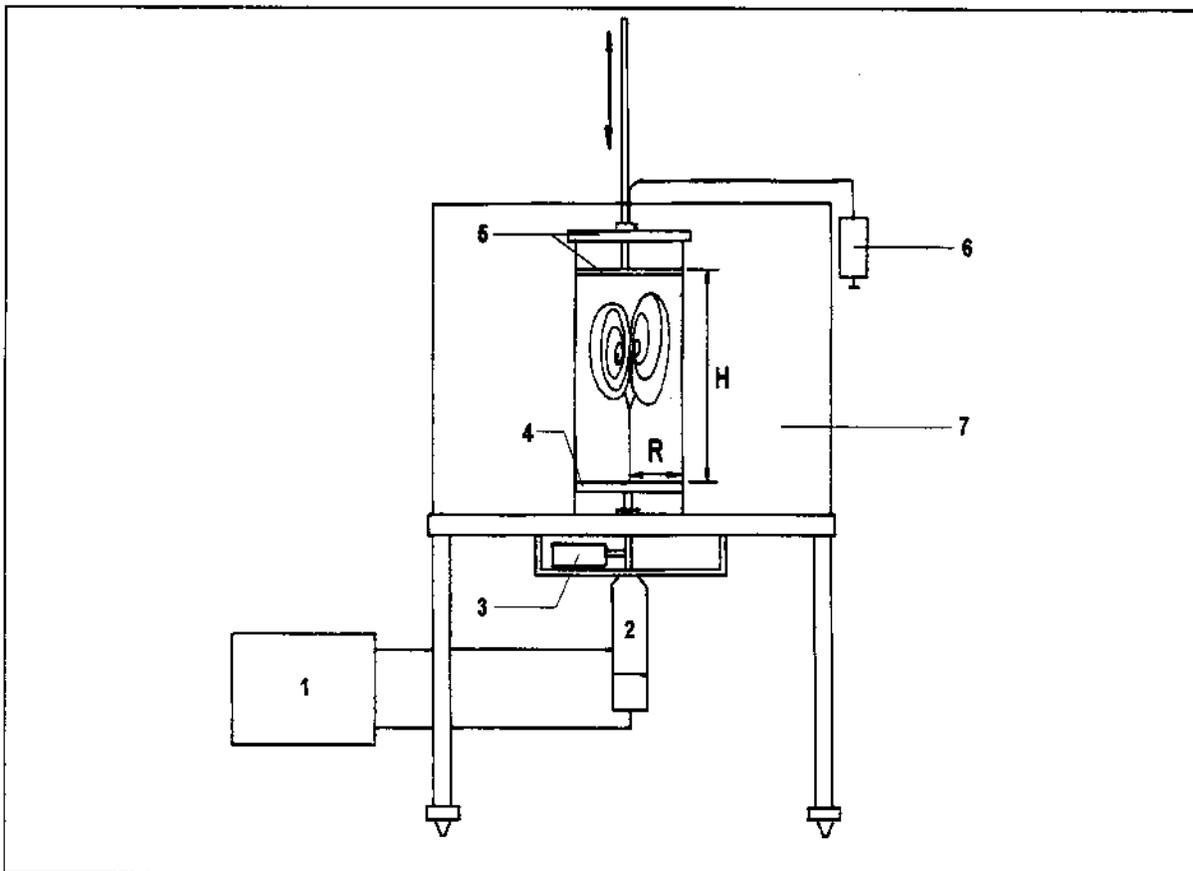


Figura 14 – Diagrama esquemático do aparelho construído.

## 2.2 – Dimensionamento e construção

– Câmara cilíndrica e disco rotatório:

Para a câmara cilíndrica foi usado um tubo de vidro com raio interno nominal de 55 mm. Um disco bruto de aço inox foi torneado e polido para se obter o disco rotatório usado. A este foi soldado um eixo, também de aço inox, que foi usinado para ficar em ângulo normal ao disco. Devido a imperfeições do tubo de vidro, o disco foi torneado até um raio de 52 mm. O disco rotatório e outros componentes de aço da CCFR foram construídos com aço inox 304 pois este é inerte aos FT que se planeja estudar.

– Plataforma de montagem:

O tubo de vidro foi fixo a uma chapa de aço usinada para as dimensões de 350 x 350 x 17 mm e com massa de 16,3 Kg. Esta plataforma de montagem foi escolhida para que o sistema fosse montado sobre uma plataforma bastante estável, livre de vibrações. A plataforma foi montada sobre pilares de alumínio. Os pilares foram usinados para permitir que discos de alumínio parafusados à eles nivelassem o sistema, permitindo sua operação sobre diferentes superfícies. A plataforma de montagem com os pilares e os discos de alumínio é mostrada na Figura 15.



Figura 15 – Fotografia da plataforma de montagem.

– Termostatização do sistema:

O sistema, montado no centro da plataforma de montagem, está instalado dentro de um tanque retangular feito de vidro, com dimensões de 300 x 300 x 400 mm, que tem em seu interior dois radiadores, construídos com placas de cobre, por onde recircula água através de um banho termostatizado Ética modelo 521.3. Com esta montagem se obtém uma boa troca de calor entre o banho termostatizado e o tanque de termostatização do sistema, além de fechar o circuito de circulação de água do banho termostatizado através do radiador. A montagem feita para a termostatização do sistema é mostrada na Figura 16. Com ela pode-se visualizar e filmar as estruturas geradas no interior da CCFR, pois as paredes do tanque e a câmara cilíndrica são feitos de vidro e os dois radiadores ficam posicionados ao lado da câmara, deixando a frente da mesma livre para a visualização e filmagem. O FT dentro da câmara é termostatizado em temperaturas com precisão de 0,1°C.

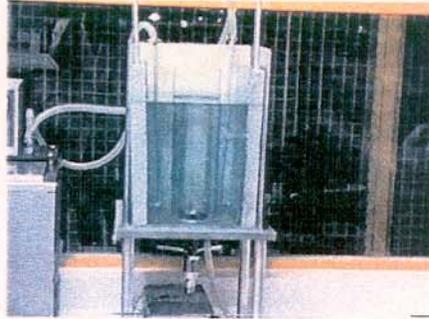


Figura 16 – Fotografia do tanque de termostatização da CCFR.

– Fixação e vedação da câmara cilíndrica:

A fixação do tubo de vidro à mesa de inox gerou problemas devido aos vazamentos que ocorriam nesta junção, já que o sistema foi projetado para ter uma coluna de fluido de até 300 mm sobre a mesma. A vedação/fixação foi feita através do dispositivo de fixação projetado e construído, que é mostrado na Figura 17.

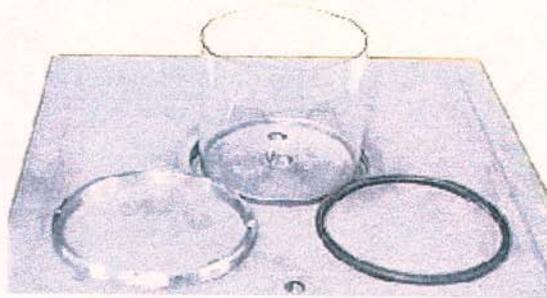


Figura 17 – Fotografia dos componentes do dispositivo de fixação.

Nele, um anel de fixação de aço inox, produzido pela usinagem de um anel bruto de aço inox, é parafusado na mesa, deformando radialmente um anel de viton contra as paredes do tubo de vidro, fixando o tubo à mesa e vedando o sistema, isolando-o do banho termostatizado. Para se parafusar o anel de fixação na mesa com a tensão necessária a vedação do sistema foi construída uma ferramenta de aperto feita de aço, que é mostrada na figura 18.

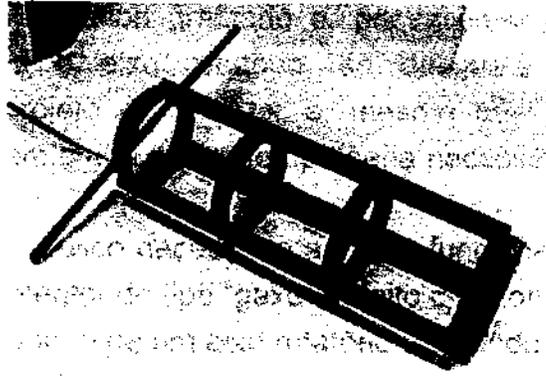


Figura 18 – Fotografia da ferramenta de aperto.

Ela foi projetada para envolver o tubo de vidro, alcançando o anel de fixação e tem, fixo à sua base, um anel de aço inox com quatro ponteiros, dispostas em cruz, que se encaixam a orifícios do anel de fixação, permitindo o aperto necessário a vedação do sistema. O anel de vedação usado permite a realização de estudos com os diferentes FT pretendidos.

– Isolamento hidráulico do eixo:

O isolamento hidráulico entre a mesa e o eixo do disco rotatório foi outro ponto da montagem que gerou vários problemas devido a constantes vazamentos. Esta é outra peça da CCFR que estará em contato direto com o FT. Portanto seus componentes devem ser inertes ao ataque dos diferentes FT. A princípio foi projetado um retentor como o esquematizado na Figura 19.

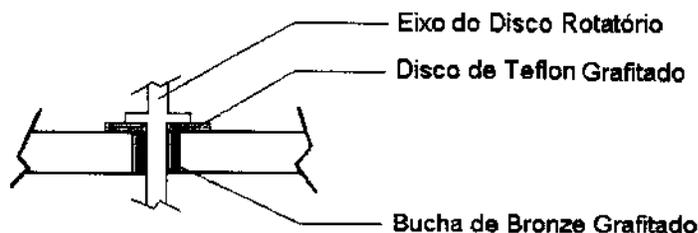


Figura 19 – Diagrama esquemático do retentor projetado.

Este retentor não se mostrou satisfatório pela existência de vazamentos e pelo atrito excessivo entre o eixo e o disco de teflon. Duas outras adaptações deste primeiro projeto de retentor foram testadas, ambas sem sucesso. Os maiores problemas deste tipo de projeto de retentor são, além de efetivamente não evitarem vazamentos, terem uma pequena durabilidade das peças que atritam

com o eixo. O disco de teflon grafitado e, principalmente a bucha de bronze grafitado, que alojava o eixo rotatório, se desgastaram muito durante o desenvolvimento do projeto do retentor e, mesmo que se tivesse obtido um resultado satisfatório, em muito pouco tempo seria necessária a troca de todos os componentes do retentor.

O isolamento hidráulico necessário ao bom funcionamento do aparelho foi obtido usando-se um retentor do tipo "gaxeta", feito de viton, que é específico para o tipo de problema tratado, o de um eixo rotatório passando através de um suporte fixo com fluido em um dos lados do mesmo. Para se evitar o movimento de precessão do eixo, foi adaptado juntamente com o retentor, um rolamento preso à plataforma de montagem, que mantém o eixo rotatório fixo na direção normal. Para esta adaptação do projeto, o furo original do retentor foi usinado obtendo-se um orifício maior na plataforma de montagem para o encaixe do rolamento. Os componentes do projeto final do dispositivo de isolamento hidráulico do eixo são mostrados na Figura 20.



Figura 20 – Fotografia dos componentes do dispositivo de isolamento hidráulico do eixo, motor/tacogerador, rolamento, retentor e disco rotatório.

– Configuração de operação da CCFR:

A CCFR, como foi concebida, pode operar em duas configurações de sistema diferentes, a de superfície livre e a de superfície rígida. Para tanto foi projetada uma superfície rígida móvel, que pode ser regulada em diferentes alturas para se obter  $H/R$ 's na faixa  $1 \leq H/R \leq 4$  para a configuração de superfície rígida. A remoção deste acessório permite a operação com a superfície livre na mesma faixa de  $H/R$ . A fotografia da superfície rígida regulável é mostrada na Figura 21.



Figura 21 – Fotografia da superfície rígida regulável.

– Revelação das estruturas de fluxo:

A revelação das estruturas de VB foi obtida adicionando-se corante ao fluxo no interior da câmara. Para tanto, a superfície rígida regulável foi usinada para se obter um orifício com 1 mm de diâmetro no seu centro. A este orifício foi ligado um adaptador, construído à partir de uma ponteira para pipeta volumétrica, onde pode-se ligar um tubo de silicone (40 cm) adaptado a uma seringa de 10 mL, como mostrado na Figura 22. O FT é então corado com azul de metileno e colocado na seringa, de onde pode-se injetar o mesmo na CCFR na configuração de superfície rígida.

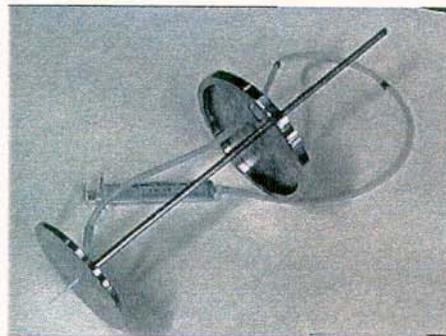


Figura 22 – Fotografia do sistema de revelação das estruturas de VB.

Para a revelação das estruturas na configuração de superfície livre é adaptado ao orifício no centro da superfície rígida uma agulha usinada e coberta com teflon, como pode ser observado na Figura 22. Desta maneira, e com o H/R da coluna de fluido acertada, regula-se a altura da superfície rígida móvel para que a agulha apenas toque a superfície do FT. Assim pode-se injetar o FT corado no centro do sistema na configuração de superfície livre.

– Escolha do motor:

O motor foi escolhido seguindo critérios de potência e precisão. A CCFR necessita de uma grande estabilidade quanto a possíveis vibrações, de um preciso controle da velocidade de rotação, em uma ampla faixa de rotações, já que o estudo de diferentes FT com diferentes viscosidades impõe diferentes esforços ao motor. Para tanto foram avaliados modelos de motor que se mostraram insatisfatórios devido ou a baixa potência ou a excessiva robustez. Foi obtido então um catálogo do fabricante Minimotor S/A<sup>49</sup>, que produz uma linha bastante extensa de modelos para diferentes aplicações como instrumentos de precisão, maquinário e equipamento industrial. O modelo de motor escolhido foi o DC-Micromotor, devido ao tipo de aplicação requerido. Foi feito então um teste com um DC-Micromotor modelo 2233 4,5 S, usando um disco de metal com raio de 25 mm e massa de 80 g. No teste se verificou a precisão e potência deste modelo de motor, faltando então apenas escolher o modelo de DC-Micromotor mais adequado a operação da CCFR.

Para esta operação, há necessidade de se manter a velocidade constante com diferentes esforços aplicados ao motor. Então a alternativa escolhida foi a combinação do motor com um circuito de controle, que atendesse as características de operação citadas. O modelo de DC-Micromotor escolhido foi o 3557 024 CS, pelo torque adequado ao funcionamento da CCFR, voltagem de operação de 24 V e faixa de rotação de operação de até 5500 rpm.

O modelo de circuito de controle escolhido foi o Servo Amplificador LC 3002, na configuração de controle de velocidade, com controle retroalimentado motor-tacômetro. Nesta configuração, o controle de velocidade do motor é feito através de um potenciômetro, e é necessária a instalação, acoplado ao eixo do motor, de um tacogerador que gera uma diferença de potencial relativa a velocidade de rotação do motor. Este sinal é mandando para o circuito de controle que monitora a voltagem de alimentação do motor de modo a manter a velocidade constante. O motor foi acoplado a um tacogerador tipo 4,3 G 60, que gera um sinal para o circuito de controle de 4,3 mV/rpm. Este conjunto motor/tacogerador é mostrado na Figura 20. O servo amplificador e todos os componentes do circuito de controle foram montados em uma caixa de controle com ventilação, mostrada na Figura 23.

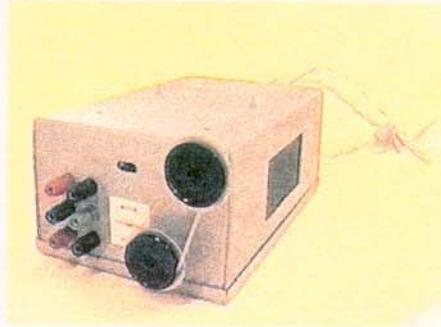


Figura 23 – Fotografia da caixa de controle

– Fixação do conjunto motor/tacogerador à plataforma de montagem:

Para a fixação do conjunto motor/tacogerador à plataforma de montagem, foi projetado um suporte que oferecesse, além de uma perfeita fixação, o maior espaço livre sobre a plataforma de montagem, condição necessária para a leitura ótica da velocidade de rotação do motor. O suporte projetado e construído é mostrado na Figura 24.

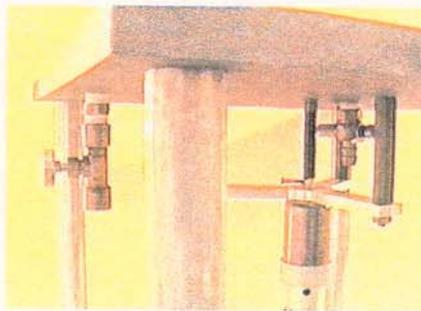


Figura 24 – Fotografia do suporte de fixação do motor à plataforma de montagem e torneiras de escoamento da câmara cilíndrica e do tanque termostatizado.

– Leitura da velocidade de rotação do eixo:

Para a leitura da velocidade de rotação do eixo foi necessário o uso de um tacômetro, já que o circuito de controle não tem nenhum “display” que forneça este dado. O tacômetro escolhido foi o Foto-Tacômetro Digital modelo MDT-2244 fabricado por Minipa Ind. Com. Ltda. . Este aparelho permite a leitura da velocidade de rotação do eixo através da reflexão do feixe de luz emitido por ele em um fita refletora aplicada sobre o eixo. Ele permite uma operação a distâncias variadas, o que vinha de encontro às necessidades do projeto, que não oferece muito espaço na junção motor/eixo. Suas especificações são as seguintes<sup>50</sup>: Display LCD 5 dígitos, faixa de medidas: 5 a 99999 rpm, resolução 0.1 rpm (< 1000 rpm) e 1 rpm (> 1000 rpm), precisão: +/- (0,05% + 1 díg.), base de tempo: cristal de quartz, 4,194 MHz.

– Escoamento do fluido de trabalho e do tanque de termostatização:

Para se escoar o fluído de trabalho do sistema foi adaptada uma torneira à plataforma de montagem, o mesmo sendo feito para se escoar a água do tanque de termostatização. As torneiras adaptadas à plataforma de montagem são mostradas na Figura 24.

Uma fotografia do aparato experimental construído é mostrada na Figura 25.



Figura 25 – Fotografia do aparato experimental construído.

## 2.3 – Filmagem, digitalização e tratamento de imagens

### 2.3.a – Filmagem

As filmagens foram feitas usando-se uma câmera digital Sony CCD-IRIS modelo DXC-107A, acoplada a uma lente Vivitar 100 mm 1:3:5 Macro Focusing Lens. A câmera é ligada a um adaptador Sony modelo CMA-D7 ligado a um vídeo-cassete Panasonic Super VHS Ag-1980 e a um monitor Panasonic. As imagens foram gravadas em fitas para Super VHS tipo ST-20.

### **2.3.b – Digitalização e tratamento**

As imagens foram digitalizadas e tratadas com o uso de uma interface video-cassete/microcomputador Media Cybernetics e do software de digitalização e tratamento de imagens Image Pro-Plus 3.0, operando em um microcomputador padrão IBM-PC com processador Pentium 133 MHz, 64 Mbytes de memória RAM e 2 Gbytes de HD.

### **2.4 – Materiais**

- A glicerina pa. foi obtida da Merck S/A.
- O corante usado foi o azul de metileno.
- Todas as soluções foram preparadas com água recentemente destilada.

### **2.5 – Métodos**

#### **2.5.a – Preparação do Fluido de Trabalho (FT)**

O FT é preparado como uma solução de glicerina em água na concentração de 60% em volume. Foram também preparados FT com concentrações de 65%, 67% e 70% v/v.

#### **2.5.b – Operação da CCFR na configuração de superfície livre**

- Altura da coluna de FT

Primeiramente adiciona-se o FT à câmara cilíndrica da CCFR. Adapta-se à ela a superfície rígida móvel com a agulha na altura correspondente ao H/R requerido. Deixa-se então escoar o FT através da torneira até que a agulha apenas toque a superfície do FT, como mostrado na Figura 26.

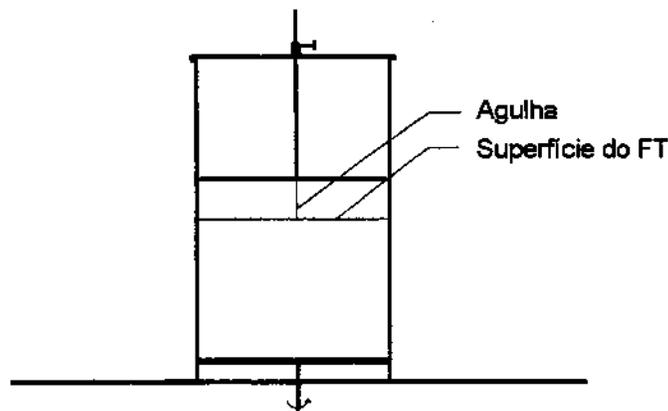


Figura 26 – Diagrama esquemático da posição da agulha em relação à superfície do FT  
– Geração dos VB

Coloca-se então o motor em funcionamento e ajusta-se a velocidade de rotação desejada, medida com o tacômetro, no potenciômetro da caixa de controle. Em, tipicamente 5 minutos, atinge-se o estado de fluxo estacionário. Então a estrutura de fluxo obtida pode ser revelada com o sistema de revelação pela injeção cuidadosa do FT corado ao fluxo.

### 2.5.c – Configuração de superfície rígida

#### – Altura da coluna de FT

Para a operação com superfície rígida, adiciona-se o fluido de trabalho à câmara cilíndrica e, adaptando-se a superfície rígida móvel sem a agulha à CCFR, se regula sua altura até o valor de H/R desejado. Então se procede da mesma maneira que para a configuração de superfície livre para a geração dos VB.

### 2.5.d – Revelação das estruturas de fluxo

Para a revelação das estruturas de fluxo geradas na CCFR é usado o sistema de revelação projetado e construído. Para a sua operação retiram-se 30 mL do FT da CCFR, antes de se fixar a altura da coluna de FT no H/R à ser estudado, e, com 0,0050 g de azul de metileno, prepara-se uma solução. Completa-se o volume do conjunto seringa/tubo de silicone com esta solução e conecta-se o tubo à ponteira fixa na superfície rígida móvel. Então, com a cuidadosa injeção da solução do FT corado à CCFR com H/R ajustado, revela-se as estruturas de fluxo, tanto na configuração de superfície rígida quanto na de superfície livre.

### 2.5.e – Filmagem do VB

As filmagens são realizadas com a câmera CCD no modo de operação “speed shutter” = 1/120 a uma velocidade de 30 quadros por segundo. As imagens são gravadas com o vídeo-casste enquanto visualizadas no monitor. As imagens são obtidas de frente, a uma distância específica, de aproximadamente 4 m. A CCFR é iluminada por lâmpadas fluorescentes direcionadas para o sistema.

### 2.5.f – Digitalização e tratamento das imagens

Com as imagens gravadas em fitas de vídeo pode-se selecionar os quadros mais interessantes e, com o uso da interface videocassete/computador e do software de digitalização e tratamento de imagens, pode-se digitalizá-los e tratá-los para se obter os parâmetros distância do PE à superfície e largura da estrutura dos VB estudados, indicados na Figura 27.

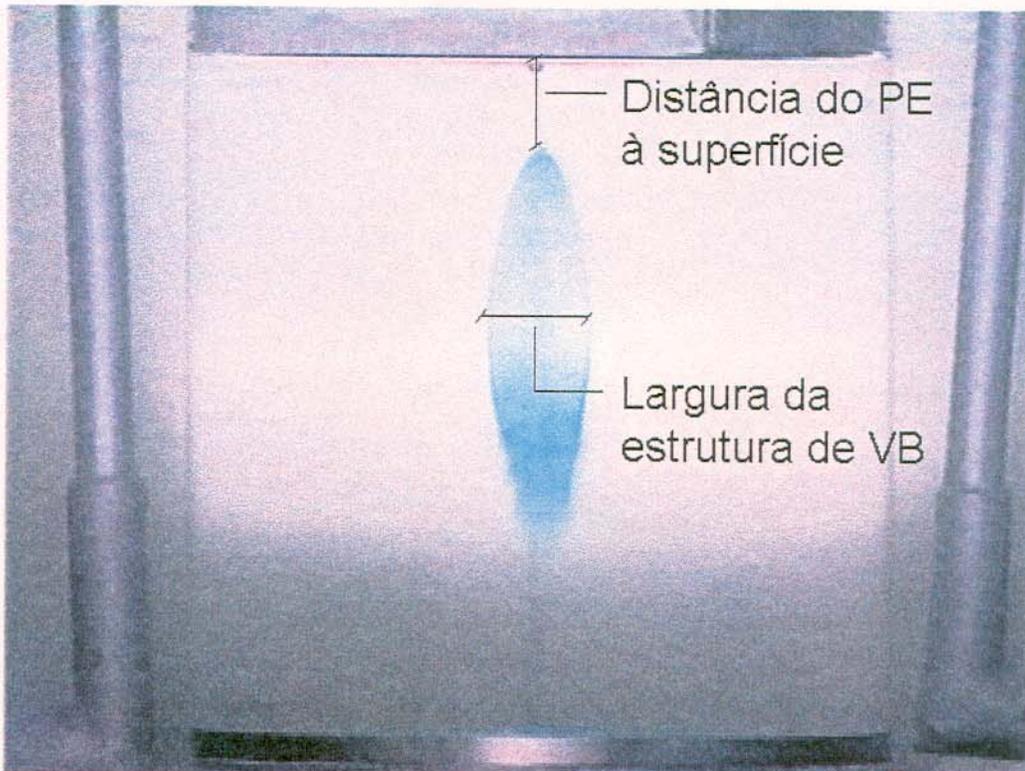


Figura 27 – Estrutura de VB indicando a posição onde foram medidos os parâmetros distância do PE à superfície e largura da estrutura.

## 2.6 – Resultados e Discussão

A CCFR foi projetada e construída para possibilitar a realização de estudos sistemáticos sobre qual a influência da presença de pequenas concentrações de PEO adicionadas ao FT sobre formato das estruturas de VB geradas.

Para tanto foram tomados diversos cuidados, descritos no item 2.2, e desenvolvidos métodos, descritos no item 2.3, com o objetivo de se padronizar as condições experimentais para a realização de experimentos. Assim toma-se possível a realização dos estudos pretendidos.

Durante a fase de montagem da CCFR foram feitos testes para se comprovar a estabilidade rotacional do conjunto motor/disco rotatório. O disco foi colocado em rotação a velocidades de 1000, 2000 e 3000 rpm, apresentando, em 20 medidas feitas a cada 15 segundos, variações de, respectivamente, 0,2%, 0,2% e 1,6%. A corrente de alimentação do motor mostrou-se nestes experimentos praticamente constante, variando não mais que 3% durante as medidas. Estes resultados demonstram o bom desempenho do conjunto motor/circuito de controle para o controle da velocidade de rotação do disco rotatório. Foram feitos ainda testes para se conhecer a velocidade máxima que poderia ser atingida pelo disco e esta foi de 4408 rpm.

Foram feitos então testes de estabilidade de rotação com uma coluna de fluido (água) em H/R de 1 a 4 em 1000 rpm com o objetivo de se verificar a influência de diferentes alturas de coluna de fluido sobre o funcionamento do conjunto motor/circuito de controle. As medições foram feitas durante 5 minutos e a cada 30 segundos e estas mostraram-se estáveis no período medido. A corrente de alimentação do motor também se mostrou constante.

O volume de FT na CCFR é de 940 mL para H/R=2 e 1385 mL para H/R=3, mostrando que para que a coluna de fluido varie de uma unidade em H/R, deve-se adicionar um volume de FT de 445 mL e que a câmara tem um volume de FT que fica abaixo do disco rotatório de 50 mL.

Foram realizados também testes de estabilidade de rotação variando-se o esforço aplicado sobre o motor, obtido pelo aumento da viscosidade do FT. Para tanto foi feita uma primeira medida com a CCFR em H/R=3 usando-se água como FT. À partir daí foram retirados volumes de 100 mL de água e adicionadas volumes de 100 mL de glicerina por três vezes. Em nenhuma das operações se verificou qualquer tendência de diminuição ou aumento da velocidade ou da corrente de alimentação do motor.

A leitura da velocidade de rotação do disco rotatório é feita com um tacômetro. Para se avaliar o erro em suas leituras foi feito um estudo onde, com o motor em rotação constante, foram feitas 30 leituras no “display”, por três vezes. Os resultados obtidos são mostrados na Tabela 1.

Tabela 1 – Médias entre as leituras obtidas com o tacômetro

média (M)	Desvio (s)
$M_1=39,7$	$s_1=0,4$
$M_2=40,2$	$s_2=0,3$
$M_3=39,5$	$s_3=0,6$
$M_{total}=39,8$	$s_{total}=0,3$

A média entre os resultados é denominada  $M_{total}$  e o desvio entre eles  $s_{total}$ . Estes resultados demonstram que os erros cometidos em uma medida são bastante pequenos e o sistema de leitura atende as necessidades impostas pelos estudos pretendidos.

Como a CCFR tem um conjunto motor/circuito de controle capaz de levar o disco rotatório a rotação de até 4.408 rpm, foi explorada a possibilidade de usá-la também para estudos em regime de fluxo turbulento. Nesta rotação, o FT (60% glicerina) estaria em um  $Re=116.648$ , o que representa um regime de fluxo muito turbulento, já que a transição para a turbulência<sup>19</sup> se dá em torno de  $Re=3.000$ . Nos experimentos exploratórios para a utilização da CCFR em regime turbulento demonstrou-se que, fazendo uso do equipamento de gravação, digitalização e tratamento de imagens pode-se obter parâmetros de estruturas formadas em regime turbulento, como mostrado na Figura 28.

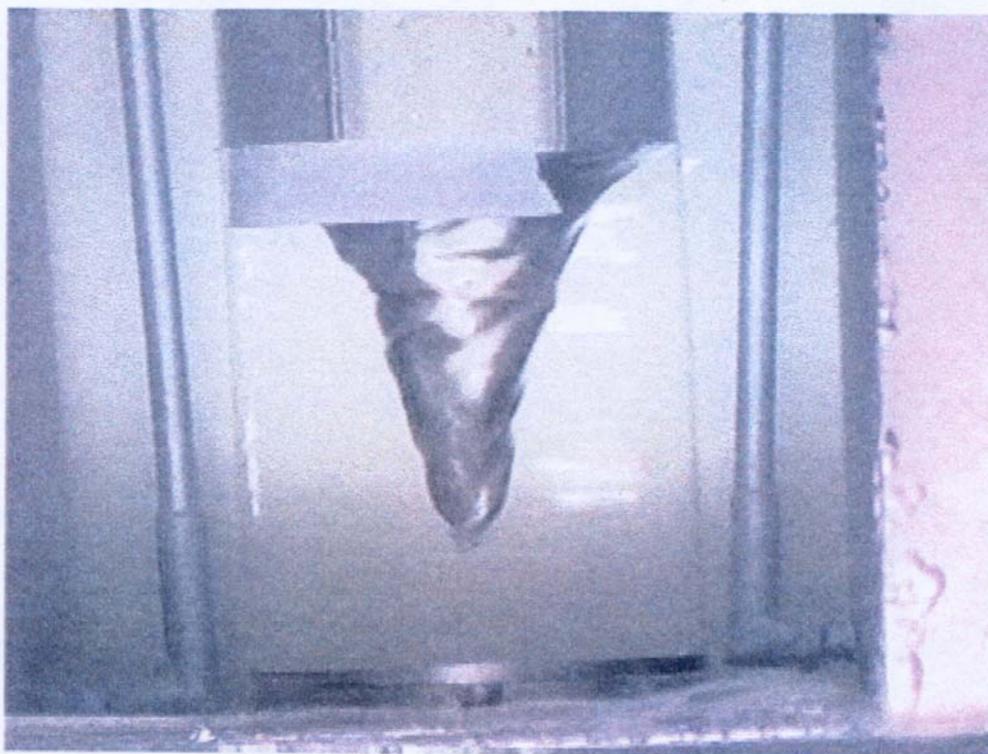


Figura 28 – Estrutura obtida com a CCFR operando em regime de fluxo turbulento.

Pode-se também obter dados sobre o esforço do motor pela medida de sua corrente de alimentação. Com isso pode-se avaliar o torque necessário para se manter determinada rotação com diferentes fluidos de trabalho e assim se estudar o efeito de redução do atrito hidrodinâmico pela presença de pequenas quantidades de aditivos. O motor desenvolve um torque de  $41,05 \text{ mNm/A}^{49}$ . Assim pode-se estudar a influência da presença de aditivos no FT sobre o formato das estruturas. Como a CCFR foi construída para operar com diversos aditivos e fluidos diferentes, o estudo em regime turbulento abre inúmeras possibilidades de utilização da CCFR construída.

As estruturas de VB foram então investigadas. Para tanto foi desenvolvido um método de revelação das estruturas, descrito no item 2.5.d. A revelação das estruturas é um momento bastante crítico na realização dos experimentos pois, se mal feita, inviabiliza a realização das medidas naquele experimento. À princípio foi feita a tentativa de revelação usando-se uma solução aquosa do corante. Com o uso deste revelador o que se verificava era a subida da solução corada pelo FT à partir do ponto de injeção, como mostrado na Figura 29.

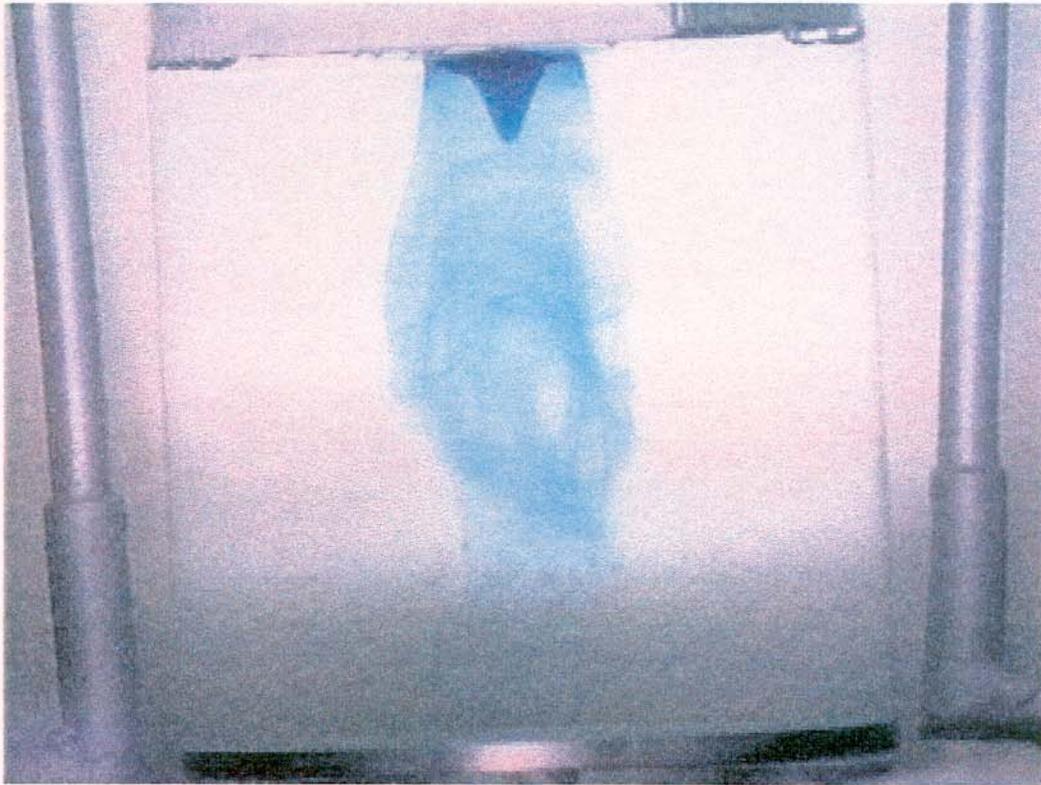


Figura 29 – Imagem da revelação de uma estrutura de VB com a solução de corante voltando à superfície assim que é injetada.

Isso ocorre pois o FT é composto por uma solução de 60% glicerina em água, que é mais densa que a solução aquosa do corante. Então a solução encontrada foi preparar o FT corado para a revelação. Outros problemas que foram identificados como sendo de diferenças de densidades entre o FT corado e o FT contido na CCFR foram solucionados com o método descrito no item 2.5.d, onde se coleta o FT de dentro da CCFR, imediatamente antes dos experimentos, para a preparação do revelador. Este procedimento permitiu manter a temperatura e portanto a densidade dos fluidos próximas entre si.

A CCFR gera as estruturas de VB em uma faixa de viscosidades específica. Independente da velocidade de rotação do disco rotatório, não foi possível a obtenção do VB para a água devido à sua baixa viscosidade.

Com a CCFR é possível se obter as estruturas de VB em uma determinada faixa de  $Re$ , para cada  $H/R$  estudado. Este comportamento foi observado em estudos anteriores<sup>6,18,36</sup> que mostram que as estruturas são estáveis em um domínio dentro do plano ( $Re$ ,  $H/R$ ), como mostrado nas Figuras 7, 9 e 11. O  $Re$  é variado nos experimentos pela mudança na velocidade de rotação do fundo rotatório.

A evolução temporal da revelação de uma estrutura de VB em  $H/R=2$  em  $Re=1250$  é mostrada na Figura 30.

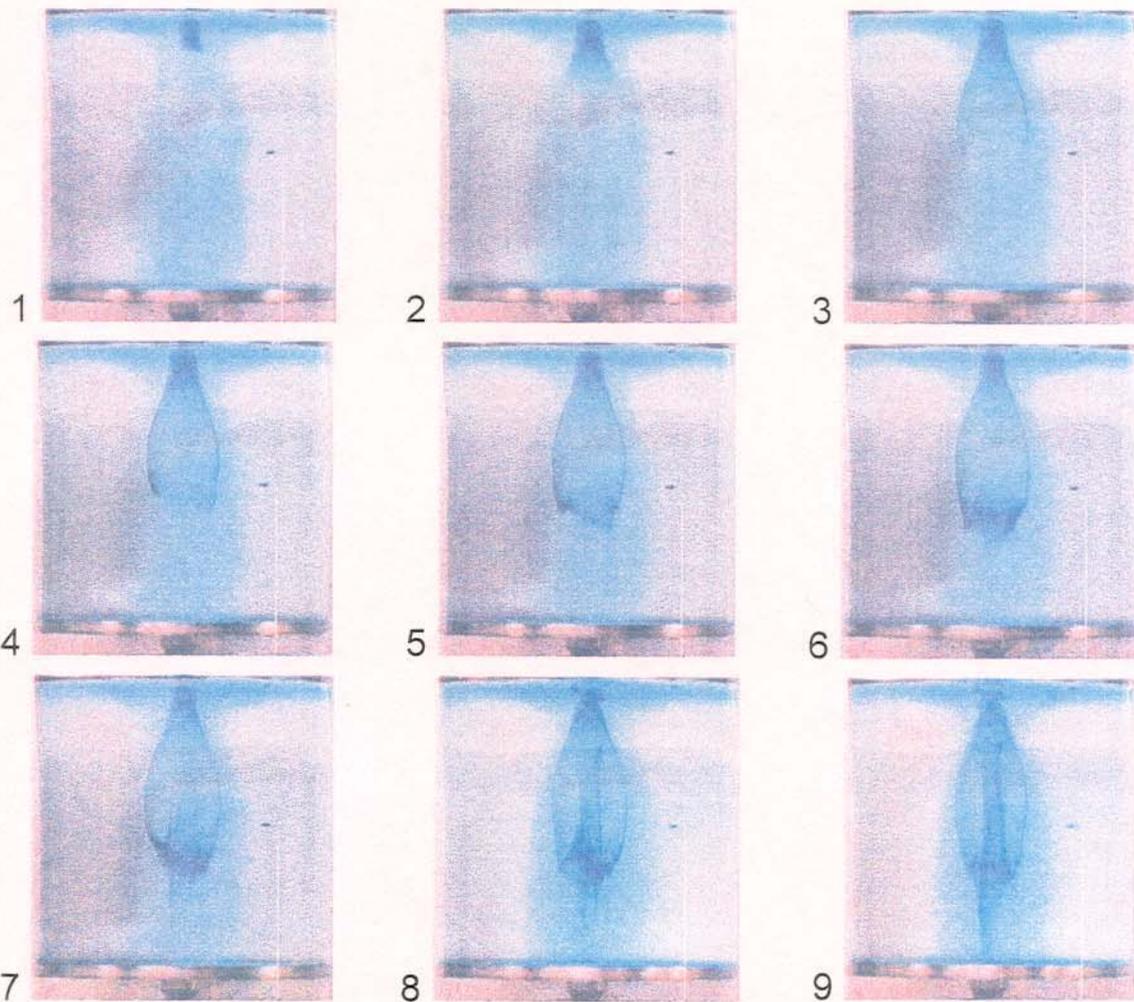


Figura 30 – Evolução temporal da revelação de uma estrutura de VB. O intervalo temporal entre os quadros é de 10 s.

Nela podemos observar o revelador passando pelos campos de fluxo descritos no item 1.2, na fotografia 1 pode-se ver o fluido em fluxo no fluxo de aproximação chegando até o ponto de estagnação. Em seguida, nas fotos 2 a 6 observa-se o FT corado circundando a estrutura do VB e formando um envelope aproximadamente simétrico ao eixo. Nas fotografias 7 e 8 pode-se observar o FT corado entrando em fluxo reverso pelo interior da estrutura do VB. Na fotografia 9 pode-se observar a retomada da direção original do fluxo axial e a região posterior ao VB.

A revelação não cuidadosa pode destruir a estrutura de VB. O fluxo onde ocorre a formação do VB é laminar e portanto bastante sensível a perturbações

externas. Quando se injeta o FT corado com uma taxa de fluxo muito forte deforma-se a estrutura do VB e dependendo da intensidade do fluxo aplicado na injeção do corante pode-se desestabilizar totalmente a estrutura do VB, como mostrado na Figura 31.

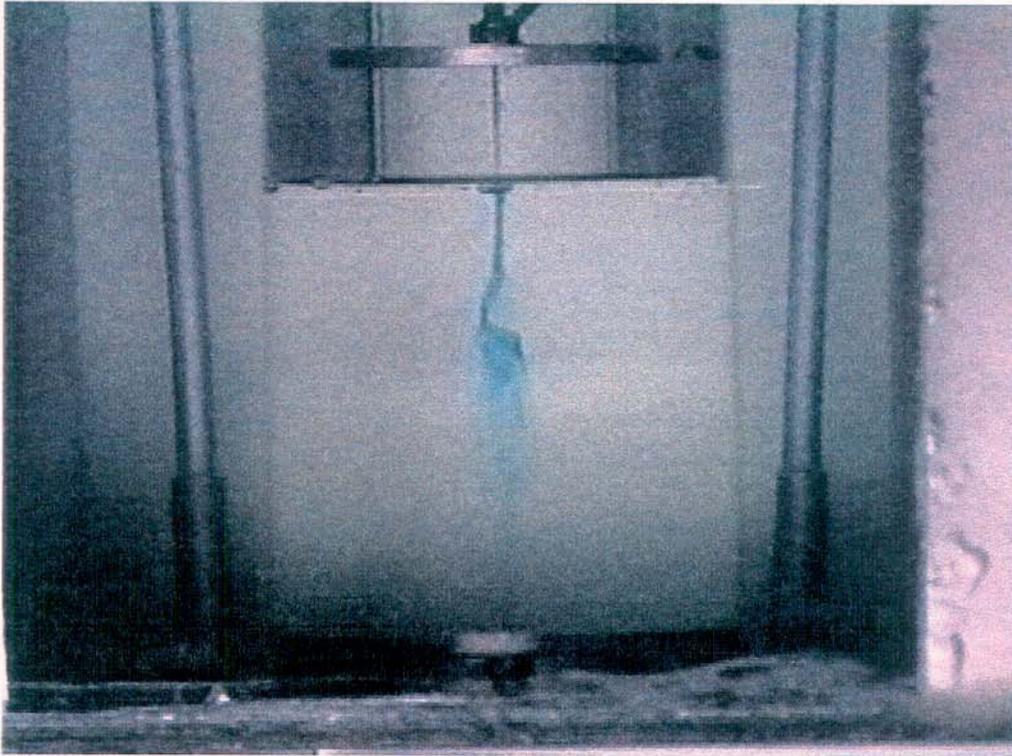


Figura 31 – Imagem de uma estrutura de VB destruída pela injeção não cuidadosa do corante.

O fluxo na CCFR leva cerca de 5 minutos para entrar em regime de fluxo estacionário e gerar novas estruturas do VB.

A CCFR foi construída para operar tanto na configuração de superfície livre como na de superfície rígida. Em ambas foram obtidas todas as estruturas de VB previstas pelas investigações anteriores de Escudier<sup>18</sup>, para as estruturas em superfície rígida, e Spohn<sup>36</sup>, para as estruturas em superfície livre. As estruturas obtidas são mostradas nas Figuras 32 e 33, juntamente com os planos ( $Re$ ,  $H/R$ ) obtidos nos estudos anteriores mostrando os domínios de estabilidade das estruturas de VB. Neles é possível se observar as regiões, dentro de tais planos, onde as estruturas obtidas na CCFR construída se formaram.

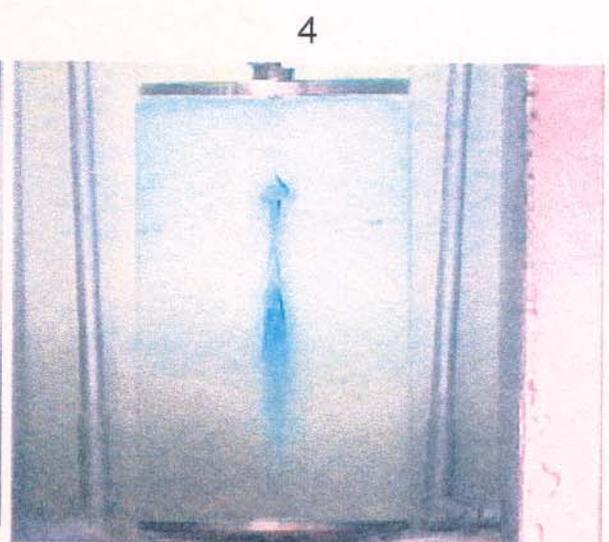
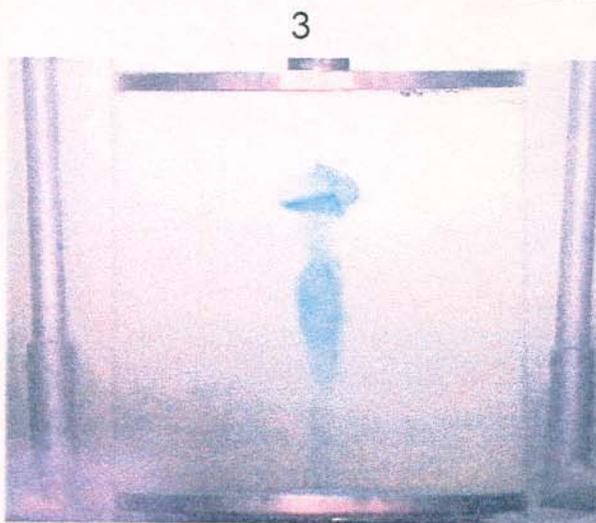
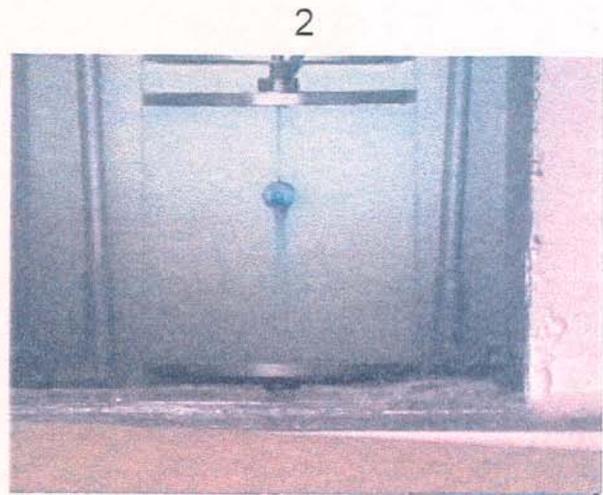
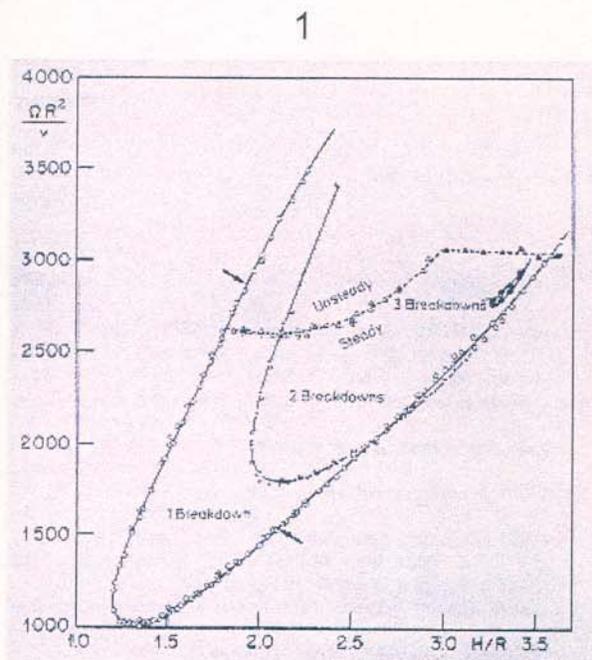
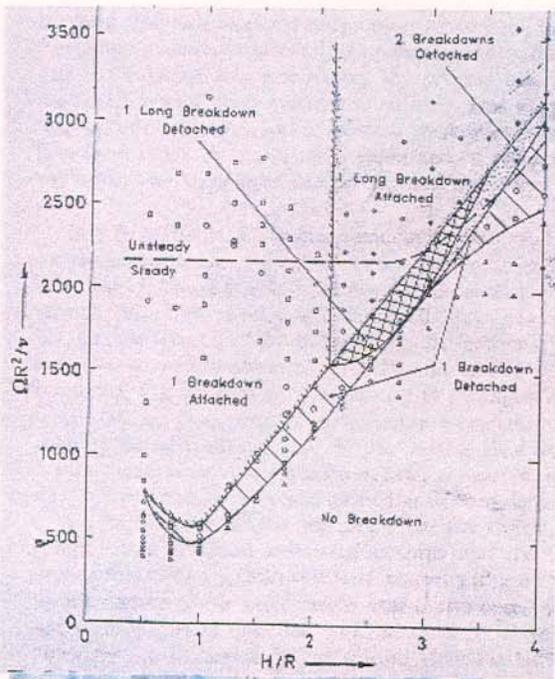


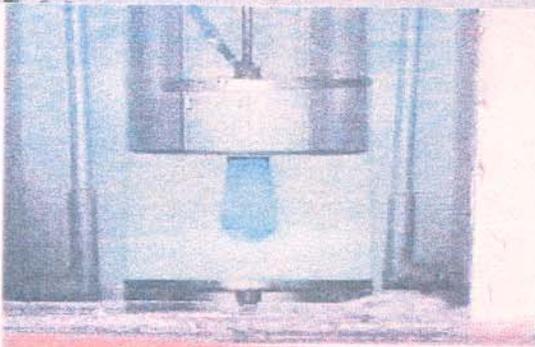
Figura 32 – 1: Plano  $(Re, H/R)$  mostrando os domínios de estabilidade das estruturas de VB obtido nos estudos de Escudier<sup>18</sup> com a superfície rígida; 2: Uma estrutura em  $H/R=2$  e  $Re=1632$ ; 3: Duas estruturas em  $H/R=2$  e  $Re=1977$ ; 4: Duas estruturas em  $H/R=3$  e  $Re=2490$ .



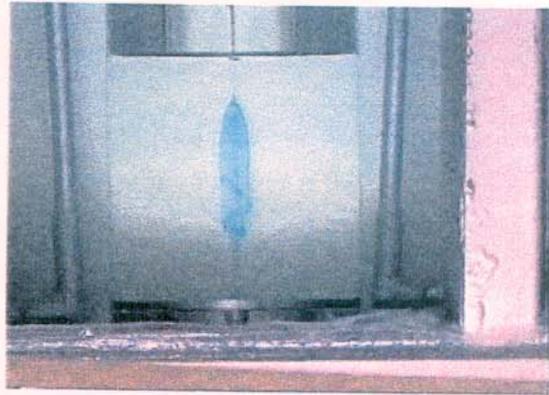
1



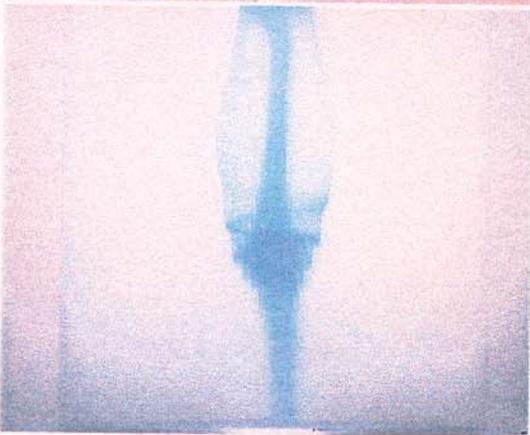
2



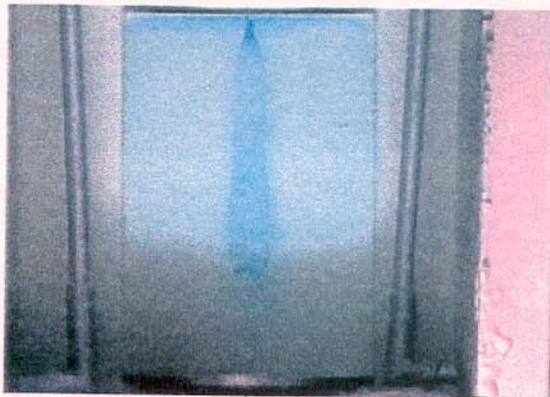
3



4



5



6

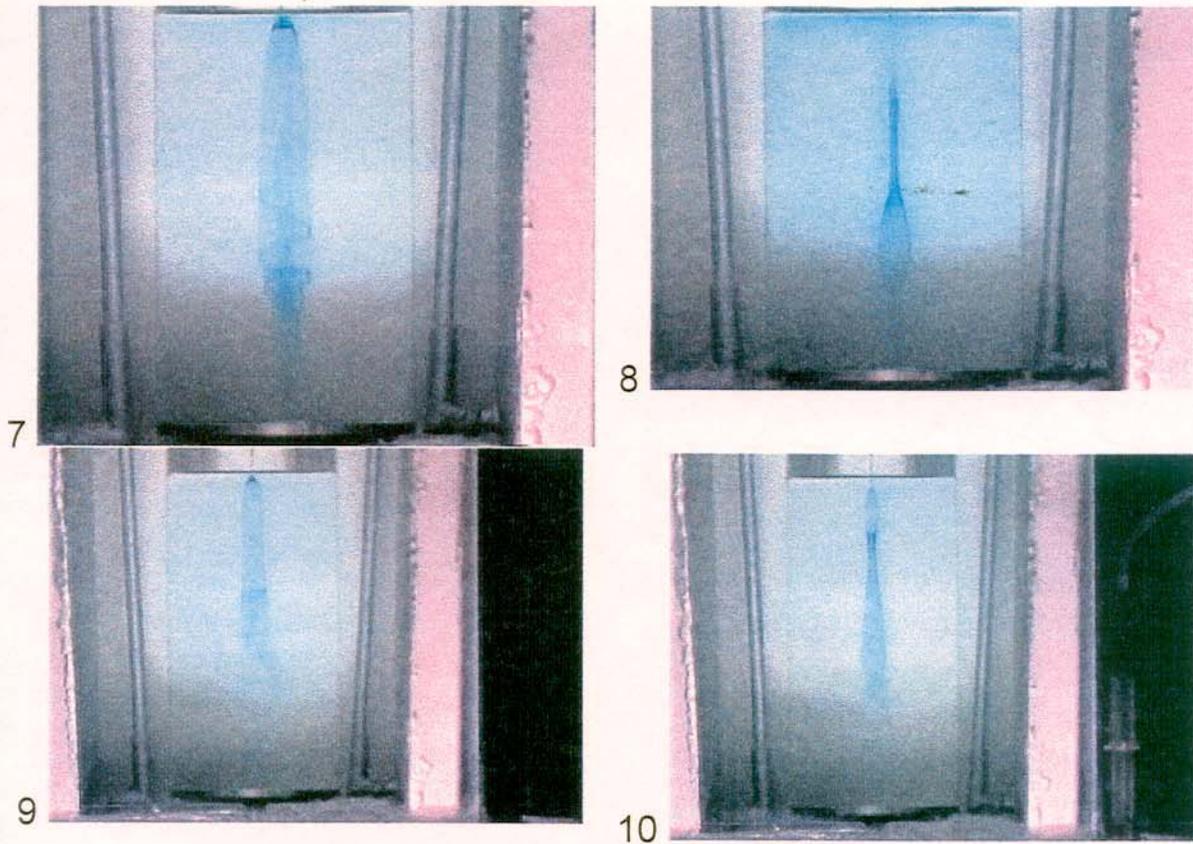


Figura 32 – 1: Plano  $(Re, H/R)$  mostrando os domínios de estabilidade das estruturas de VB obtido nos estudos de Spohn<sup>36</sup> com a superfície livre; 2: Uma estrutura não ligada à superfície em  $H/R=1$  e  $Re=573$ ; 3: Uma estrutura ligada à superfície em  $H/R=1$  e  $Re=977$ ; 4: Uma estrutura não ligada à superfície em  $H/R=2$  e  $Re=1211$ ; 5: Uma estrutura ligada à superfície em  $H/R=2$  e  $Re=1652$ ; 6: Uma estrutura não ligada à superfície em  $H/R=3$  e  $Re=2021$ ; 7: Uma estrutura ligada à superfície em  $H/R=3$  e  $Re=2330$ ; 8: Duas estruturas não ligadas à superfície em  $H/R=3$  e  $Re=1984$ ; 9: Uma estrutura não ligada à superfície em  $H/R=4$  e  $Re=2654$ ; 10: Duas estruturas não ligadas à superfície em  $H/R=4$  e  $Re=2950$ .

Para os estudos propostos com a CCFR foi escolhida a operação na configuração de superfície livre por esta mostrar as estruturas mais bem formadas, com o ponto de estagnação bem definido e em  $H/R=2$  que é o caso típico de  $H/R$  intermediários.

A realização dos estudos envolve a filmagem das estruturas de VB, a digitalização dos quadros mais interessantes das imagens obtidas e, nestes, a medição de parâmetros morfológicos das estruturas de VB. Com isso pode-se acompanhar as mudanças no formato das estruturas, relativas a mudanças no comportamento hidrodinâmico do FT causado pela presença de diferentes aditivos. Os parâmetros escolhidos, por se mostrarem os mais adequados para os estudos foram: a posição do PE da estrutura em relação à superfície do FT e a largura da estrutura de VB, que são medidos com o uso do programa de tratamento de imagens como mostrado na Figura 27. O parâmetro que envolve o PE só pode ser visualizado em uma pequena faixa de  $Re$ , pois à partir de um certo valor a estrutura toca a superfície do FT e o PE não pode mais ser visualizado.

Foram feitos então estudos de caracterização das estruturas de VB com a CCFR operando com a superfície livre e em  $H/R=2$ , que mostra estruturas bem formadas.

O primeiro estudo, o Estudo N° 1, realizado envolveu a obtenção das estruturas de VB em toda a faixa de  $Re$  na qual elas existem em  $H/R=2$ , como pode ser visualizado na Figura 33.

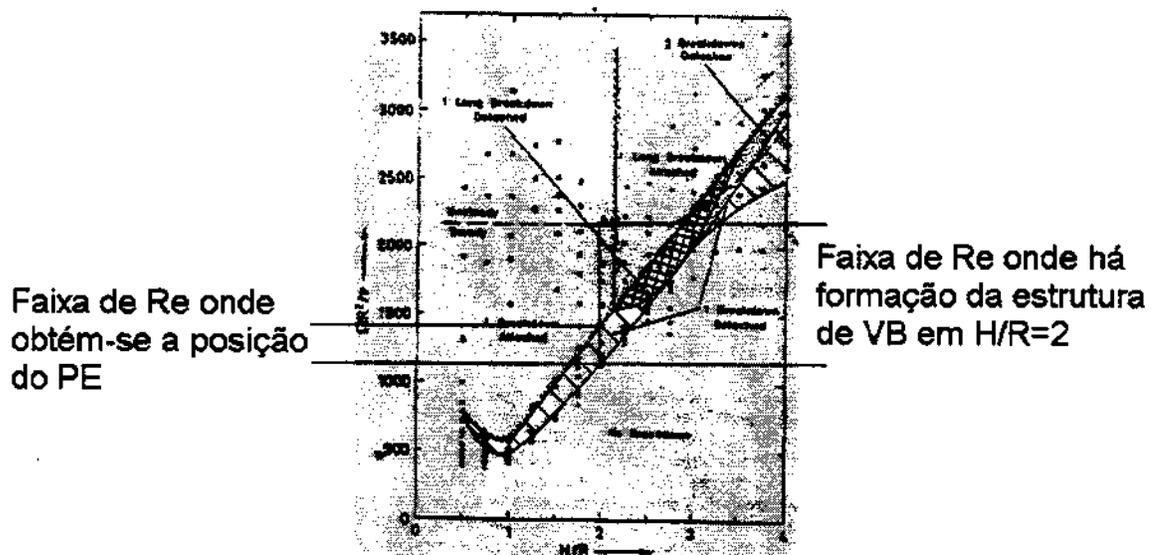
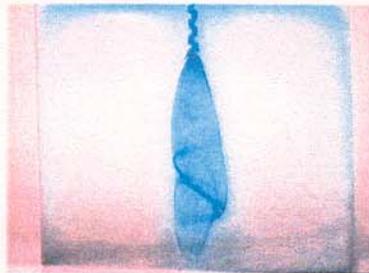
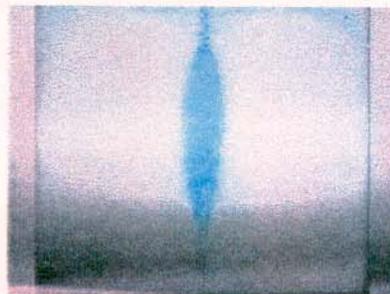


Figura 33 – Plano ( $Re$ ,  $H/R$ ) com as faixas de  $Re$  onde obtém-se a posição do PE e onde há formação da estrutura de VB em  $H/R=2$  indicadas.

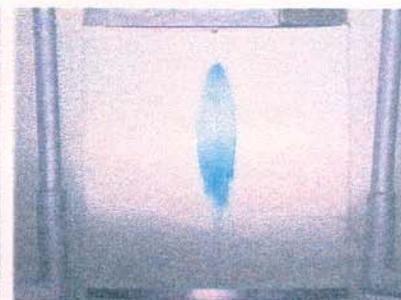
Com ele poderíamos visualizar todo o desenvolvimento do formato da estrutura de VB com o aumento do  $Re$ , desde sua formação até seu desaparecimento, depois da transição para fluxo turbulento. Neste estudo o parâmetro medido foi a largura da estrutura de VB, pois a posição do PE não seria acessível à partir de  $Re=1400$ , quando a estrutura toca a superfície, o que pode ser observado na Figura 33. Os resultados deste estudo são mostrados na Figura 34, onde pode-se verificar a mudança no formato da estrutura como um aumento em sua largura com o aumento do  $Re$  à partir de  $Re=1071$ , quando se forma, até  $Re=2254$ , quando a estrutura torna-se instável com o fluxo na CCFR passando pela transição para fluxo turbulento. Neste estudo foi feita a variação do  $Re$  com a variação da velocidade de rotação do disco rotatório. Pode-se observar que a primeira estrutura obtida neste estudo, em  $Re=1071$ , não acompanha a tendência esperada, de diminuição nas dimensões da estrutura com o aumento do  $Re$ . Isso se deve a um erro de preparação do FT, já que a velocidade de rotação do disco foi determinada e estava de acordo com o planejado para este estudo.



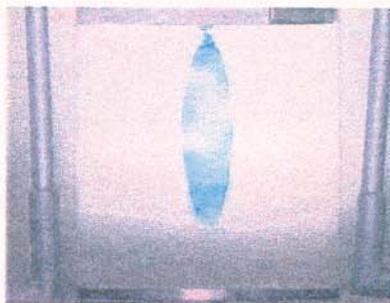
Re=1071



Re=1124



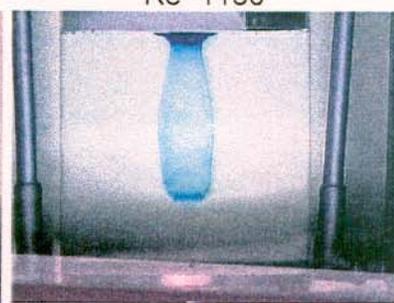
Re=1130



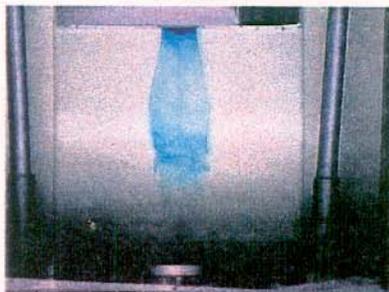
Re=1215



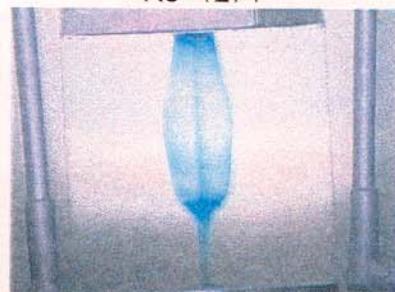
Re=1271



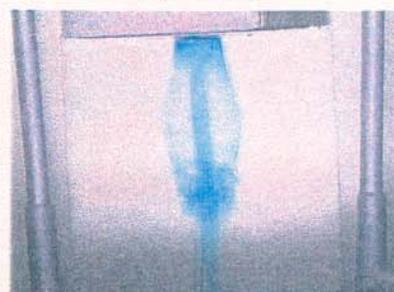
Re=1320



Re=1424



Re=1499



Re=1638

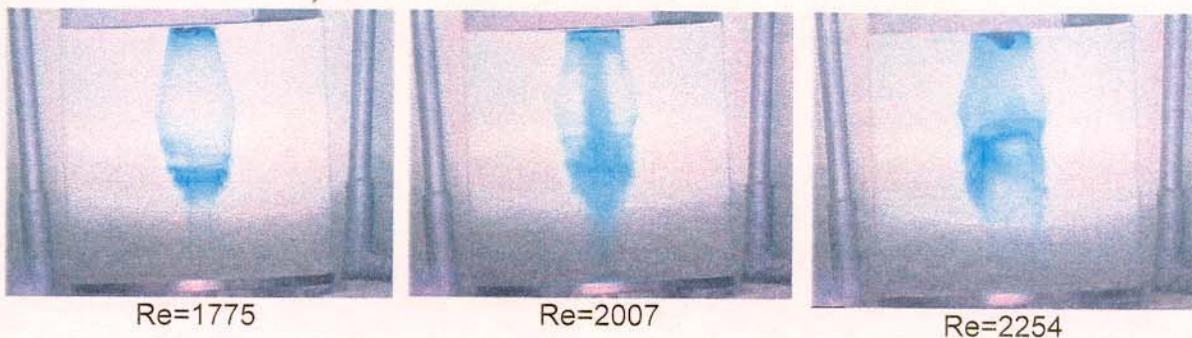


Figura 34 – Imagens das estruturas obtidas no Estudo N° 1.

Foi planejado então mais um estudo, o Estudo N° 2, para a caracterização da CCFR. O da variação de  $Re$  com a variação da viscosidade do FT, com o objetivo de se verificar possíveis mudanças no formato das estruturas relativo a mudanças na viscosidade, com a velocidade de rotação do disco rotatório constante. Para tanto foram preparados FT com composições de 60, 65, 67 e 70% v/v glicerina em água. Estes FT tem viscosidades de, respectivamente,  $7,19 \cdot 10^{-3}$ ,  $9,85 \cdot 10^{-3}$ ,  $11,3 \cdot 10^{-3}$  e  $14,1 \cdot 10^{-3} \text{ Kg.m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$  e, mantendo-se a velocidade de rotação do disco rotatório fixa em 47,6 rpm, obtém-se  $Re$  de, respectivamente, 1563, 1107, 943 e 739. Com isso, observou-se a formação de estruturas de VB apenas nas duas primeiras soluções (60 e 65% glicerina), nas outras não se obtém tais estruturas, como mostrado na Figura 35.

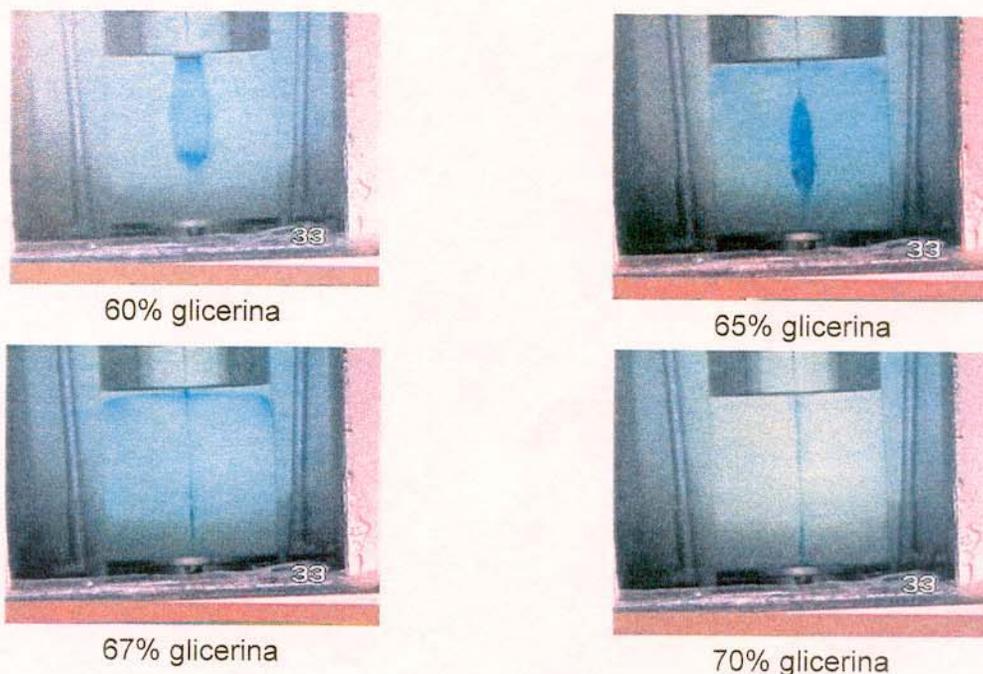


Figura 35 – Imagens das estruturas obtidas no Estudo N° 2.

O formato das duas estruturas obtidas não mostrou diferença em relação às obtidas com FT 60% glicerina no Estudo N° 1. Portanto isso confirma a eficiência do  $Re$  como normalizador do fluxo, pois, variando-se a velocidade de rotação do disco rotatório ou a viscosidade das soluções, pode-se obter uma variação em  $Re$  equivalente, e as estruturas de VB variam seu formato da mesma maneira, independente do parâmetro variado.

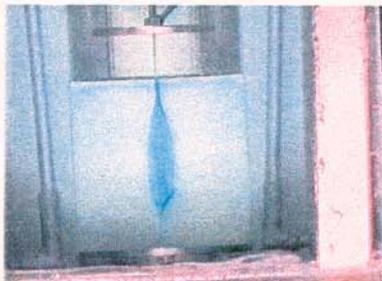
Mais um último estudo, o Estudo N° 3, para a caracterização da CCFR foi planejado da seguinte maneira: com FT de mesmas composições que os usados no estudo anterior, foram obtidas estruturas em mesmo  $Re$ , variando-se agora então tanto a viscosidade dos FT quanto a velocidade de rotação do disco rotatório. Este estudo foi realizado com o objetivo de se aprimorar a técnica de operação da CCFR, obtendo-se as mesmas estruturas pela variação simultânea de dois parâmetros do  $Re$ , a natureza do fluido (sua composição) e a velocidade de rotação do disco rotatório. Há uma grande dificuldade em se obter uma regulação bastante precisa de velocidade com o circuito de controle, devido a grande sensibilidade do potenciômetro usado para tanto. Com isso, observou-se um desvio entre as velocidades calculadas para  $Re$  constante e as obtidas, o que se reflete em uma variação no  $Re$  e na forma das estruturas obtidas, como mostrado na Figura 36.



60% glicerina  
 $Re=1208$



65% glicerina  
 $Re=1167$



67% glicerina  
 $Re=1121$



70% glicerina  
 $Re=1093$

Figura 36 – Imagens das estruturas obtidas no Estudo N° 3.

Com o desenvolvimento do projeto e a construção da CCFR como descrito, o desenvolvimento de métodos e técnicas para sua operação e de métodos para a aquisição e tratamento dos dados gerados, foi possível a realização de estudos sobre a influência da presença de pequenas quantidades de PEO no FT sobre o formato das estruturas geradas.

## Capítulo 3 – Estudo da influência de macromoléculas sobre as estruturas de VB

### 3.1 – Considerações gerais

A morfologia das estruturas de VB é muito sensível a pequenas variações hidrodinâmicas. Neste Capítulo serão descritos os resultados obtidos nos estudos da influência de pequenas quantidades de PEO (faixa de dezenas de ppm) sobre o formato das estruturas de VB geradas na CCFR. Os experimentos foram planejados para, em um estudo complementar ao Estudo N° 1 (Capítulo 2), poder se verificar o efeito causado pela presença de PEO sobre o formato das estruturas de VB gerados sobre toda a faixa de  $Re$ , em  $H/R=2$ . Foram também investigadas as alterações no formato das estruturas de VB causadas por um aumento na concentração e no tamanho de cadeia de PEO, presente no FT. Para estes estudos foram utilizados  $H/R = 2$  e  $Re$  fixo .

Para a realização de tais experimentos, é requerido um grande volume de glicerina. A glicerina é higroscópica e diferenças na sua composição alteram sua viscosidade e densidade<sup>47,48</sup>. Para se garantir que todo material usado nos experimentos tivesse a mesma composição, foi feito um único estoque de glicerina a ser utilizado nos estudos propostos.

### 3.2 – Materiais

- Os Poli(óxido de etileno), PEO de massas molares 100.000, 600.000, 900.000, 4.000.000 e 8.000.000  $g.mol^{-1}$ , foram obtidos da Aldrich Chemical Co. .
- A glicerina pa. foi obtida da Merck S/A.
- A glicerina comercial foi obtida da Chemco Ind. Com. Ltda..
- O corante usado foi o azul de metileno.
- Todas as soluções foram preparadas com água recentemente destilada.

### 3.3 – Métodos

#### 3.3.a – Preparação das soluções aquosas de PEO

Para se obter boa reprodutibilidade nas propriedades das soluções de PEO preparadas, foi adotado o seguinte esquema de preparação<sup>46</sup>. A massa pesada de PEO foi espalhada sobre a superfície da água contida em um béquer e, após 3 horas, a solução foi cuidadosamente homogeneizada. Em intervalos ocasionais, a solução foi novamente homogeneizada com cuidado até se completarem 24 horas, quando a solução foi transferida para um balão volumétrico, onde foi diluída até a concentração desejada, sendo então homogeneizada e utilizada após 1 hora.

A estocagem das soluções preparadas foi feita na geladeira e estas mantêm suas propriedades estáveis por até 2 meses, à partir da data de sua preparação<sup>46</sup>.

#### 3.3.b – Preparação do FT em diferentes concentrações de PEO

A preparação de soluções de PEO diretamente no FT não foi possível, uma vez que apenas o entumescimento do polímero foi obtido neste fluido. Para a preparação do FT com diferentes concentrações de PEO  $4.000.000 \text{ g.mol}^{-1}$  foi então, preparada uma solução estoque de 1 L deste PEO em água, em uma concentração de 5000 ppm. Para a obtenção das soluções com o FT, retirou-se determinado volume de FT do frasco de 1 L e então adicionou-se o mesmo volume que foi retirado da solução estoque de PEO. O volume retirado e depois adicionado depende da concentração requerida de PEO no FT. Foram preparados FT com concentrações de 10 a 80 ppm de PEO em intervalos de 10 ppm, correspondendo, respectivamente à volumes adicionados de 2,0 a 16,0 mL da solução estoque de PEO em intervalos de 2,0 mL. Nos estudos comparativos, sem a presença do PEO, o mesmo volume retirado foi completado apenas com água.

#### 3.3.c – Preparação do FT com 10 ppm de PEO de diferentes MM

Para a preparação do FT com 10 ppm de PEO de MM 100.000, 600.000, 900.000, 4.000.000 e 8.000.000  $\text{g.mol}^{-1}$ , preparou-se 400 mL de solução aquosa

com 0,010 g de cada um dos PEO de acordo com o método citado no item 3.3.a e então faz-se a solução com glicerina até a concentração de 60% glicerina v/v.

### 3.3.d – Tratamento de imagens

O tratamento das imagens foi feito como descrito no item 2.5.f. A unidade de distância para a realização das medidas pelo software de tratamento de imagens foi calibrada pela medida do diâmetro da câmara cilíndrica. Foram realizadas 15 medidas para cada experimento, tanto para a determinação da posição do ponto de estagnação como para a medida do diâmetro da estrutura. As medidas foram realizadas após o término da injeção de FT corado ao sistema.

### 3.3.e – Estudos reológicos

Os estudos reológicos foram realizados em um reômetro Brookfield modelo DV-III acoplado a um banho termostático Brookfield modelo TC-500. O reômetro foi operado com o "spindle" SC4-18, em um programa geométrico, com rotação variando de 0,1 a 250 rpm com 5 segundos para aquisição de dados e intervalos de 10 rpm. Os estudos reológicos foram feitos a 25°C com todos os FT usados nos experimentos com a CCFR. Também foram feitas medidas de viscosidade destes FT em um viscosímetro capilar Vidrolabor com capilaridade 150 (faixa de 7 a 35 cSt).

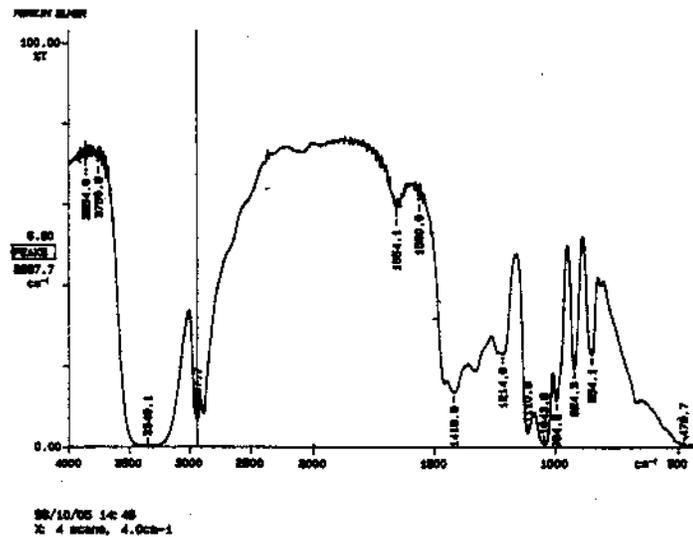
## 3.4 – Resultados e discussão

### 3.4.a – Estoque de glicerina

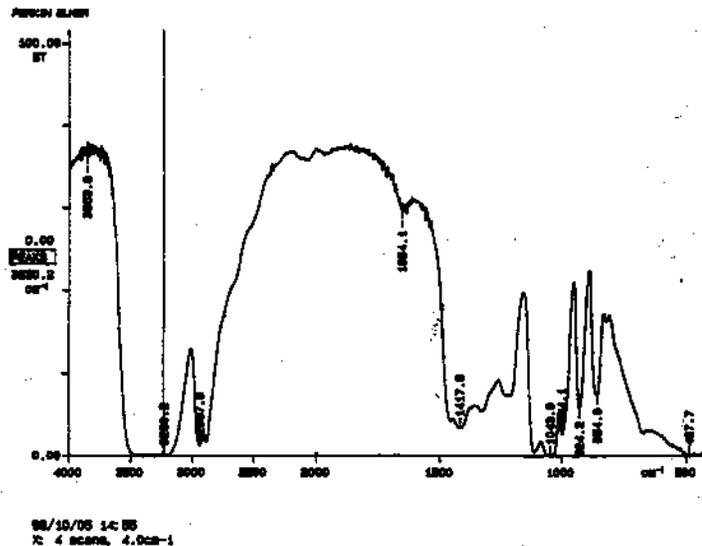
A realização de estudos sistemáticos sobre a influência de pequenas concentrações de PEO no FT sobre o formato das estruturas de VB requer condições experimentais reprodutíveis e estáveis. Isso foi alcançado tomando-se os vários cuidados na operação da CCFR citados no Capítulo 2. Em relação ao FT tomou-se o cuidado de preparar um estoque único de glicerina que foi usado nos experimentos. Este procedimento foi feito porque, como o volume de glicerina a ser usado na realização dos experimentos era muito grande, não foi possível a utilização exclusiva de glicerina pa., que tem um custo relativamente

alto. A glicerina comercial não tem sua composição (% glicerina) exatamente definida, sendo fornecida uma faixa de composições aceitáveis.

Foram feitos então testes com a glicerina comercial para atestar a sua qualidade frente à da glicerina pa. Foram realizadas medidas de densidade e pH, além de serem obtidos espectros de infravermelho das gliceras pa. e comercial. Nas medidas de densidade foram obtidos os valores de  $1,251 \text{ g.cm}^{-3}$  para a glicerina pa. e  $1,254 \text{ g.cm}^{-3}$  para a glicerina comercial. Esta pequena diferença nos valores de densidade é relativa a diferenças de composição (em água) entre as gliceras. As medidas de pH foram feitas pois se a glicerina estivesse em  $\text{pH} > 9$  ou  $< 5$  poderia ocorrer a hidrólise do PEO. Estas medidas mostraram que as duas gliceras tem o mesmo pH, 7. Os espectros de infravermelho das gliceras pa. e comercial são apresentados na Figura 37.



Espectro de infravermelho da glicerina pa.



Espectro de infravermelho da glicerina comercial

Figura 37 – Espectros de infravermelho das glicerinas pa. e comercial

A comparação entre os espectros mostra que todas as absorções relativas à glicerina pa. estão presentes no espectro da glicerina comercial, que apresenta uma absorção larga em 3230,2, relativa a presença de água na amostra. Os resultados demonstram que a glicerina comercial apresenta uma composição (% glicerina) comparável à da pa. (99% glicerina) e portanto é confiável para a realização dos experimentos com PEO.

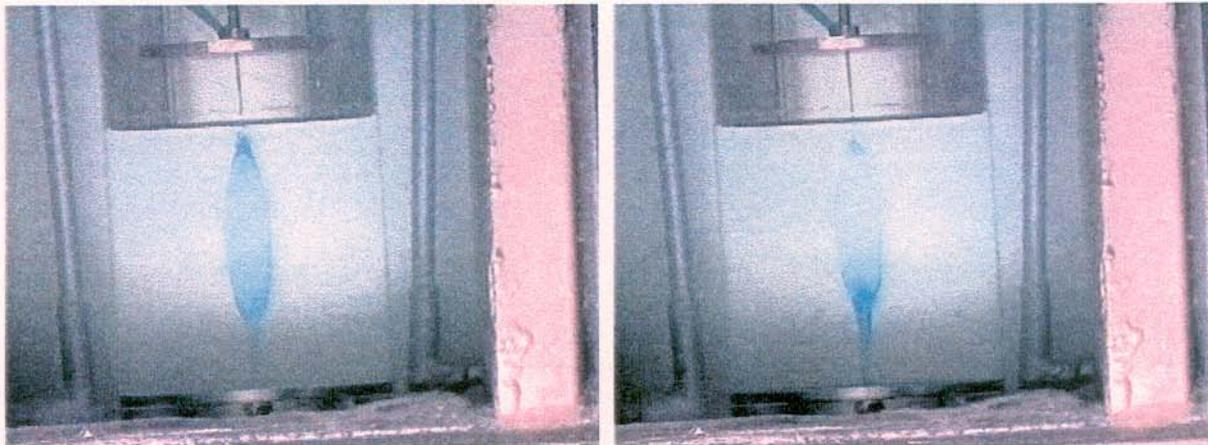
Para se garantir uma composição uniforme da glicerina usada durante a realização dos experimentos foi o preparo de um estoque único de glicerina de 50L. Com isso, pôde-se evitar flutuações de composição entre frascos diferentes da glicerina comercial.

### 3.4.b – Tratamento de imagens

As medidas feitas pelo “software” de tratamento de imagens teve como base de calibração para as medidas o diâmetro da câmara cilíndrica pois esta referência, obtida das imagens, possui dimensão conhecida e é o maior objeto enquadrado nas imagens. Assim, com uma referência de dimensões maiores que a das estruturas medidas, minimiza-se o erro cometido nas medidas.

Foram feitos estudos para a determinação do desvio médio entre as medidas feitas pelo “software” e, em 15 medidas, para uma média de 20,0 mm, ele foi de 0,9 mm; um valor considerado aceitável para as medidas pretendidas. As dimensões das estruturas foram então sempre determinadas pela média de 15

medidas. Estas foram feitas sempre após o término da injeção do corante ao sistema pois, durante a injeção, obtém-se algumas distorções no formato das bolhas que comprometem a reprodutibilidade das medidas, principalmente aquelas referentes à posição do PE em relação à superfície, como mostrado na Figura 38.



Durante a injeção  
PE=11,4 unidades

Após a injeção  
PE=7,7 unidades

Figura 38 – Imagens da revelação de uma estrutura de VB a  $Re=1211$  mostrando a diferença obtida entre as medidas da posição do PE durante e após a injeção do corante.

### 3.4.c – Estudo sobre toda a faixa de $Re$

Este estudo foi planejado para, em conjunto com o Estudo N° 1, permitir a visualização do modo como o formato da estrutura de VB muda com o aumento do  $Re$  em  $H/R=2$  para FT contendo ou não PEO.

As estruturas foram obtidas nos mesmos  $Re$  das que foram obtidas no Estudo N°1 para se ter uma comparação direta do comportamento das estruturas com o aumento do  $Re$  com e sem PEO. As imagens foram obtidas no mesmo  $Re$  porque, além de permitir a comparação direta com as do Estudo N° 1, a regulação da velocidade de rotação do disco rotatório em um valor pré-determinado é bastante difícil, como citado no item 2.6. Então os estudos foram feitos sempre regulando-se a velocidade de rotação do disco para se obter um  $Re$  específico e então trocando-se o FT da câmara sem mexer na regulação de velocidade do disco, obtém-se as estruturas com o FT sem e com PEO. Assim se garantiu uma mesma velocidade de rotação do disco para as duas estruturas

obtidas, que são comparadas diretamente. Posteriormente, uma nova regulagem, para se obter outro Re diferente, foi feita para se estudar vários valores dentro da faixa pretendida.

A concentração de PEO no FT usada para os experimentos foi de 50 ppm. A faixa de Re estudada foi a mesma do Estudo N° 1,  $1071 < Re < 2254$ , nos mesmos valores, os quais se estendem desde antes da formação da estrutura de VB, até depois da transição para fluxo turbulento, quando as estruturas tornam-se instáveis. As estruturas obtidas, em comparação com as obtidas no Estudo N° 1, são mostradas no Apêndice 1. A comparação entre as imagens mostra o efeito da presença do PEO como uma diminuição nas dimensões das estruturas, em relação às obtidas sem PEO, como pode ser observado, por exemplo, em  $Re=1271$  nas estruturas apresentadas na Figura 39.



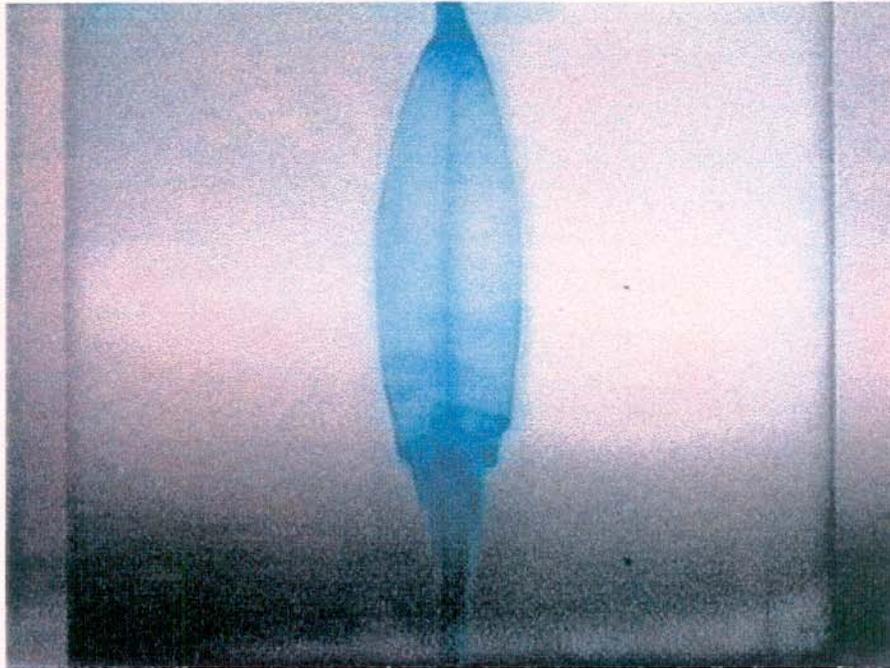


Figura 39 – Comparação entre estruturas obtidas sem e com a presença de PEO no FT.

Foram feitas então medidas da largura das estruturas obtidas com e sem PEO para se poder observar graficamente este comportamento. O resultado deste estudo pode ser visualizado na Figura 40.

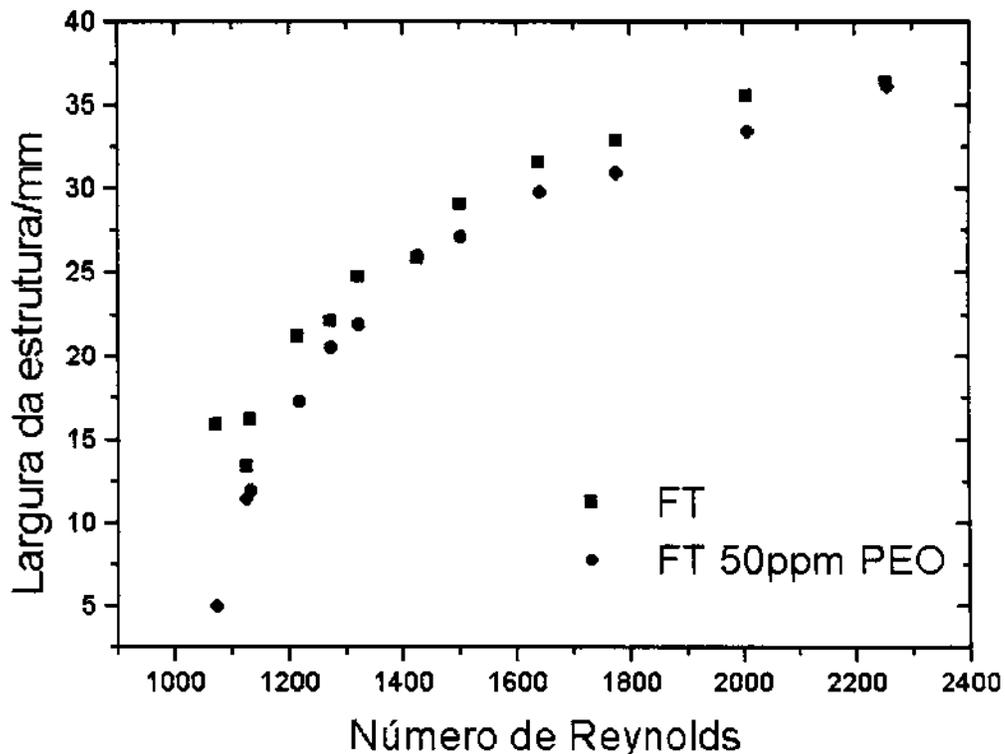


Figura 40 – Gráfico da largura da estrutura em função do Re.

Pode-se observar uma clara tendência de diminuição nas dimensões das estruturas de VB quando se adiciona PEO ao FT em toda a faixa estudada. Observa-se também que esta diferença tem uma tendência de diminuição com o aumento de Re, com os valores convergindo para um valor de largura máxima da estrutura de VB obtida, com o aumento de Re. Como citado no ítem 2.6, o ponto relativo à estrutura obtida em  $Re=1071$  sem PEO apresentou um grande desvio do comportamento esperado e este foi identificado como um erro na preparação do FT.

Esta mudança de formato das estruturas de VB obtidas sem e com PEO é relativa a mudança no comportamento hidrodinâmico do FT causada pela adição de PEO ao FT. Esta mudança no comportamento hidrodinâmico do FT pode estar associada com um aumento da viscosidade do FT devido à presença do PEO<sup>19,39-45</sup>. A convergência do formato das estruturas de VB obtidas sem e com PEO em Re mais altos, em uma região próxima a transição para regime turbulento, é atribuída a não linearidade observada no desenvolvimento morfológico das estruturas de VB com o aumento de Re. Resultados deste tipo, para fluidos sem

polímeros, foi observado nos estudos de modelagem deste sistema<sup>5,26-35</sup>. Os estudos realizados demonstram que o desenvolvimento morfológico das estruturas de VB em função de Re ocorre da mesma maneira para o FT com e sem PEO. A partir do valor máximo atingido para a largura, as estruturas de fluxo tornam-se instáveis por se desenvolverem em regime de fluxo turbulento e desaparecem<sup>6,18,36</sup>. A presença das macromoléculas de PEO, solvatadas pelas moléculas do FT, apesar de estarem em pequenas quantidades, produzem um efeito marcante nas dimensões da estrutura do VB, elas reduzem a vorticidade do fluxo. As macromoléculas agem como uma barreira física que se alinha ao fluxo e reduz o livre deslizamento entre as lâminas, levando a um aumento na viscosidade do FT. Assim, é possível que a medida em que o Re aumenta, aumenta a taxa de cisalhamento das lâminas e, com isso, aumenta o grau de alinhamento das cadeias do PEO. Assim, a diferença produzida nas estruturas do VB, devido a presença de PEO, vai se reduzindo, e as curvas convergem na região onde o cisalhamento é maior.

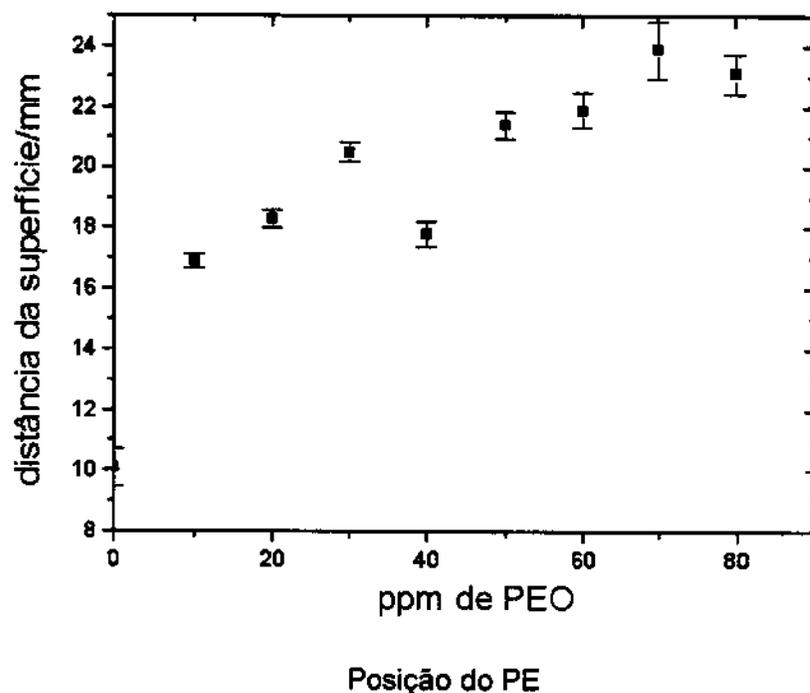
#### 3.4.d – Estudo sobre o efeito da concentração de PEO

Para a realização deste estudo, dada a dificuldade citada nos itens 2.6 e 3.4.c de regulação da velocidade de rotação do disco, não foi desligado o circuito de controle entre os experimentos. Se isso fosse feito poderiam ocorrer mudanças nas velocidades de rotação do disco fazendo com que se perdesse este parâmetro de comparação entre as estruturas obtidas. Os experimentos foram realizados todos juntos, trocando-se apenas o FT com diferentes concentrações de PEO da câmara, sem mexer no circuito de controle. Com isso pôde-se obter condições experimentais estáveis, o que permitiu a realização deste estudo de comparação direta entre as estruturas obtidas com FT com diferentes concentrações de PEO  $4.000.000 \text{ g.mol}^{-1}$ .

Os estudos foram realizados em  $Re=1175$ . Assim pôde-se visualizar, como pode ser verificado no item 2.6, o PE das estruturas de VB formadas. Com isso, e diferente do Estudo N° 1 e do Estudo sobre toda a faixa de Re, obteve-se dois parâmetros morfológicos das estruturas de VB formadas: a posição do PE em relação à superfície e a largura da estrutura.

A CCFR foi operada neste estudo na configuração de superfície livre e em  $H/R=2$ . As concentrações variaram de 0 a 80 ppm de PEO, em intervalos de 10 ppm. Com isso pôde-se observar a influência do aumento da concentração de PEO no FT sobre o formato das estruturas de VB, em Re constante. As imagens

obtidas são mostradas no Apêndice 2. A comparação entre as imagens, obtidas em concentração crescente de PEO no FT mostra sua influência como uma diminuição nas dimensões das estruturas formadas com o aumento da concentração. Foram feitas então medidas da largura e da posição do PE em relação à superfície das estruturas de VB obtidas para se poder observar graficamente o comportamento do formato das mesmas. O resultado deste estudo pode ser visualizado na Figura 41.



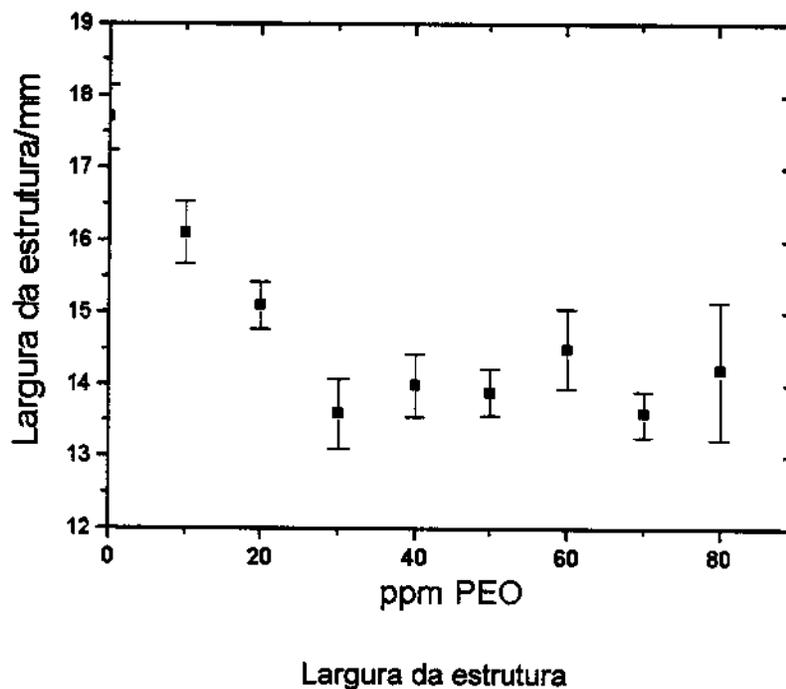


Figura 41 – Gráficos com os parâmetros medidos no Estudo sobre o efeito da concentração de PEO.

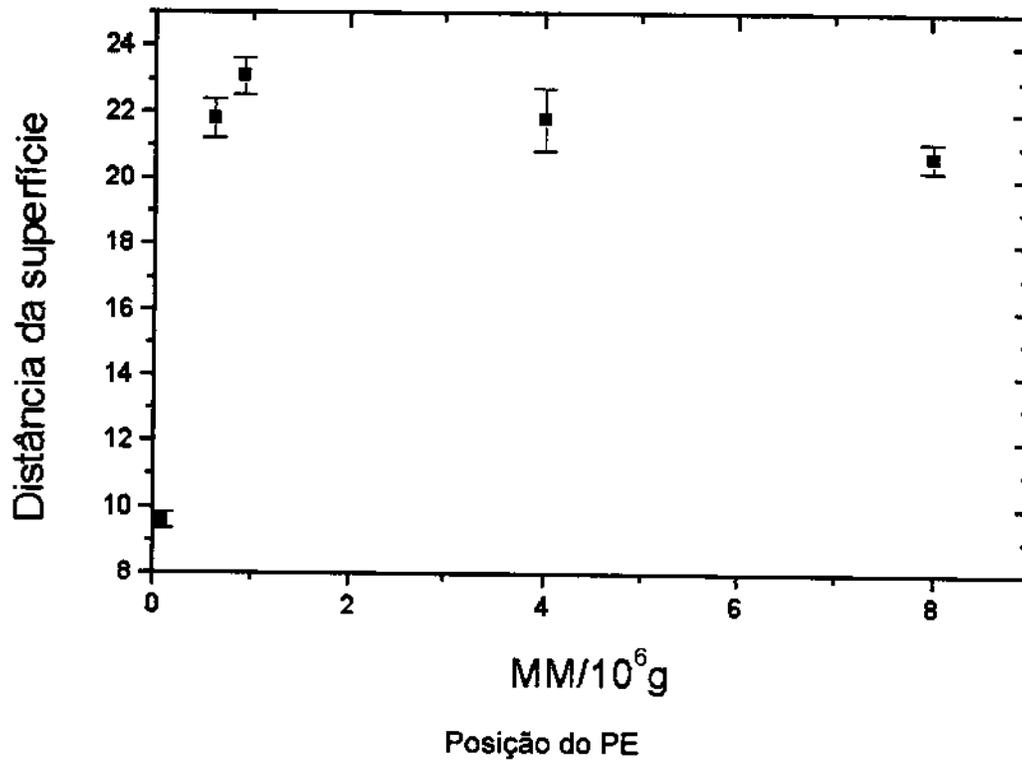
Os resultados do Estudo da concentração de PEO em Re constante mostram uma clara tendência de diminuição das dimensões das estruturas de VB com o aumento da concentração de PEO. Esta mudança no formato das estruturas de VB obtidas com o aumento da concentração de PEO no FT em Re constante é relativa a mudança no comportamento hidrodinâmico do FT causado pela adição de quantidades crescentes de PEO ao FT, citada no item 1.4. Esta mudança no comportamento hidrodinâmico do FT deve estar associada com um aumento da viscosidade do FT causado pelo aumento da concentração de PEO<sup>19,39-45</sup>. Quanto maior a concentração de PEO no FT e portanto maior número de macromoléculas em fluxo, maior a influência e o efeito sobre a viscosidade<sup>52</sup>. É interessante observar que a influência da macromolécula começa a aparecer em soluções onde a concentração de PEO é extremamente reduzida.

### 3.4.e – Estudo sobre a influência do tamanho da cadeia de PEO

Este estudo, como o estudo anterior, item 3.4.d, envolve a comparação entre as estruturas de fluxo formadas no mesmo  $Re$ . Para tanto há a necessidade de se manter a velocidade de rotação do disco rotatório constante. Então, os experimentos foram todos realizados sem desligar o circuito de controle, que poderia desregular a velocidade de rotação do disco.

Os estudos foram realizados em  $Re=1175$ , como no Estudo da concentração de PEO, item 3.4.d. A CCFR foi operada na configuração de superfície livre, em  $H/R=2$  e foram estudados PEO de massas molares 100.000, 600.000, 900.000, 4.000.000 e 8.000.000  $g.mol^{-1}$  em uma concentração de 10 ppm no FT. Com isso pôde-se observar a influência de um aumento da massa molar do PEO adicionado ao FT, em concentração fixa, sobre o formato das estruturas de VB, em  $Re$  constante. Optou-se por realizar o estudo na concentração de 10 ppm, de forma a minimizar possíveis formações de agregados macromoleculares, permitindo assim verificar os efeitos de extensão das macromoléculas sobre as estruturas do VB.

As imagens obtidas são mostradas no Apêndice 3. A comparação entre as imagens, mostra a influência do PEO como uma diminuição nas dimensões das estruturas formadas com o aumento em sua massa molar (portanto do tamanho das cadeias poliméricas). Foram feitas então medidas da largura e da posição do PE das estruturas de VB. Foram obtidos os gráficos destes parâmetros, em função da massa molar de PEO. Os resultados estão apresentados na Figura 42.



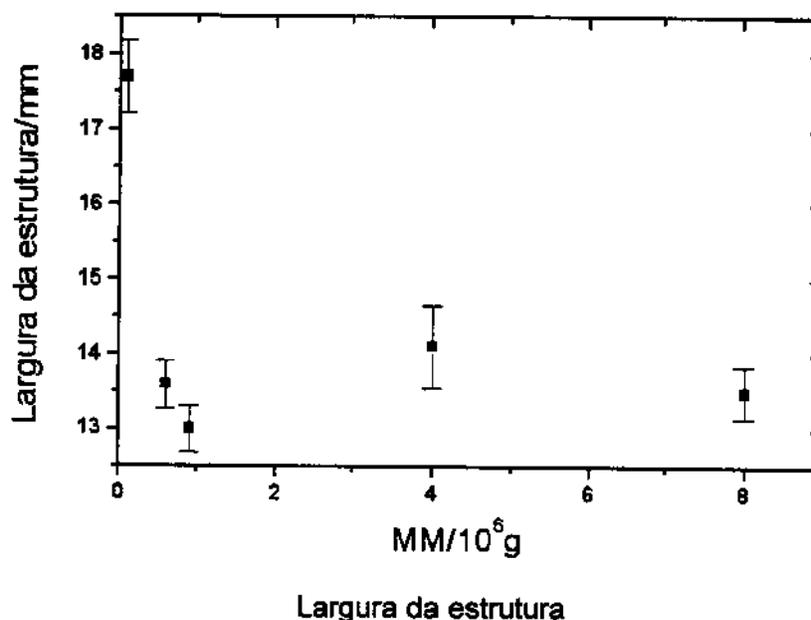


Figura 42 – Gráficos com os parâmetros medidos no Estudo sobre a influência do tamanho da cadeia de PEO.

Os resultados do Estudo do tamanho da cadeia de PEO em Re constante mostram uma clara tendência de diminuição das dimensões das estruturas de VB com o aumento da massa molar do polímero, em concentração fixa, até um certo patamar. Esta mudança no formato das estruturas de VB também pode ser relativa a mudança no comportamento hidrodinâmico do FT causado pela adição de PEO de diferentes massas molares. A viscosidade do FT deve aumentar com o aumento da massa molar de PEO<sup>19,39-45</sup>. É interessante observar, que para o PEO de massa molar 100.000 g.mol<sup>-1</sup>, as modificações não são tão acentuadas, em relação ao FT sem PEO.

A obtenção de uma tendência a um patamar máximo de influência do PEO pode ser identificada como um limite máximo de influência das macromoléculas solvatadas sobre a estrutura de fluxo<sup>52</sup>.

### 3.4.f – Estudos reológicos

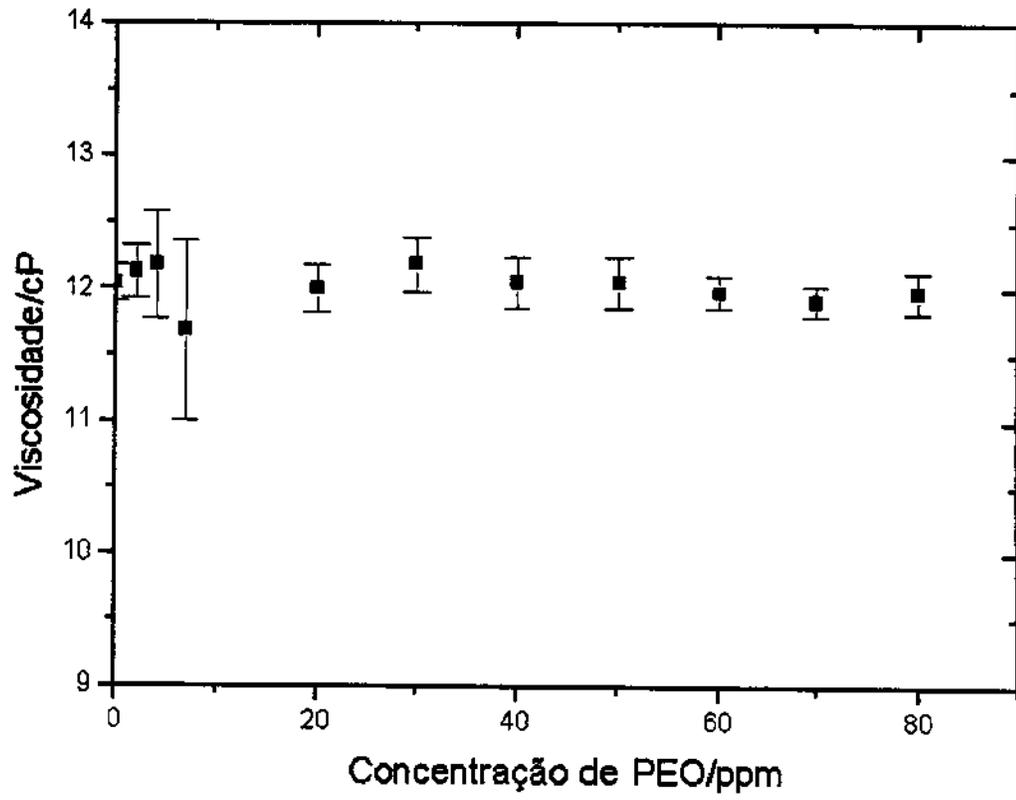
Os resultados dos estudos apresentados nos itens 3.4.d e 3.4.e, mostram uma marcante influência do PEO sobre as estruturas de VB. Tal influência foi atribuída a uma mudança no comportamento hidrodinâmico do FT, causando uma mudança na viscosidade do mesmo, pela presença de pequenas concentrações de PEO.

Para se poder quantificar a influência do PEO sobre a viscosidade do FT foram realizados estudos reológicos com todos os FT usados nos experimentos com a CCFR. O objetivo destes estudos foi o de se obter dados sobre a influência do PEO sobre o parâmetro hidrodinâmico viscosidade em todos os FT usados nos experimentos e assim se poder comparar as mudanças morfológicas observadas nas estruturas de VB com a mudança nas viscosidades dos FT.

Os Estudos reológicos foram planejados para fornecerem ainda as curvas reológicas dos FT (taxa de cisalhamento em função da tensão de cisalhamento), caracterizando assim o tipo de comportamento hidrodinâmico dos FT<sup>19</sup>.

O comportamento hidrodinâmico dos FT usados foi caracterizado como Newtoniano, nas faixas de concentração e tensão de cisalhamento usadas, mostrando curvas reológicas de taxa de cisalhamento em função da tensão de cisalhamento lineares. Estes resultados estão de acordo com aqueles obtidos por Hoyt<sup>52</sup>, que estudou o comportamento reológico de PEO de elevada massa molar, na faixa de ppm, em solução aquosa.

Os valores de viscosidade obtidos para os FT são muito próximos, ficando muito parecidos com o do FT sem PEO, tanto para as diferentes concentrações como para os diferentes tamanhos de cadeia estudados, como pode ser observado na Figura 43.



Concentração de PEO

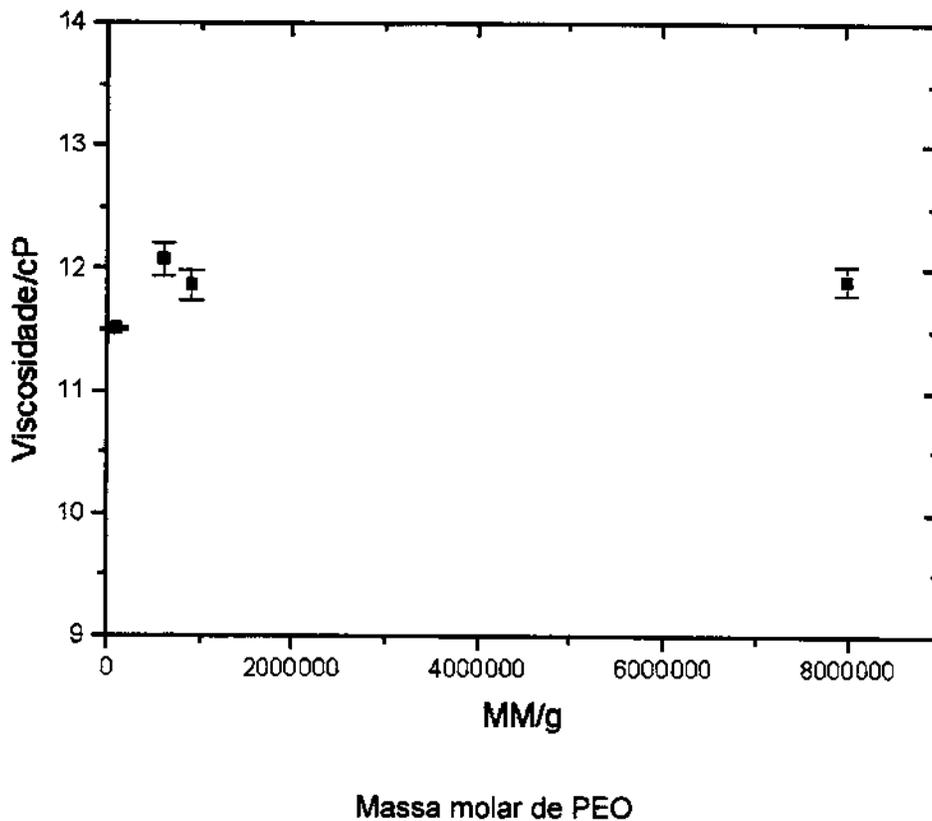
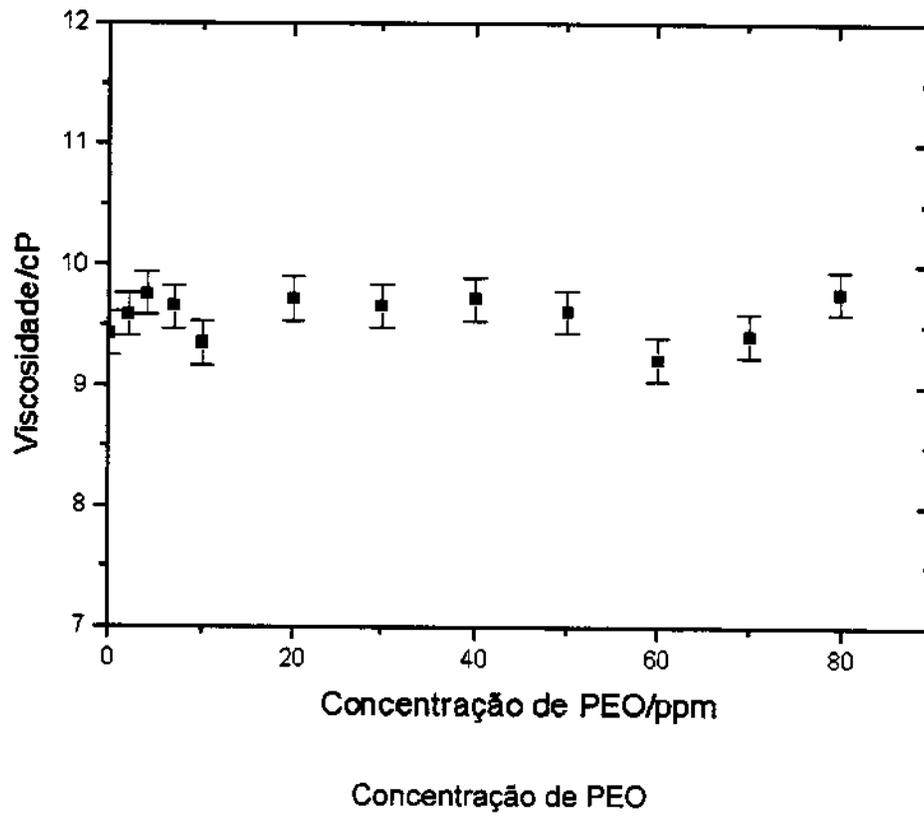


Figura 43 – Gráficos, com dados obtidos no reômetro, mostrando a viscosidade do FT em função da variação da concentração e da massa molar de PEO.

Como a variação observada no formato das estruturas de VB é muito maior que a variação observada entre as viscosidades dos FT, foi feita mais uma determinação das mesmas usando-se um viscosímetro capilar para se confirmar os dados obtidos. Os resultados são apresentados no Figura 44 e apresentam um desvio em relação aos que foram obtidos no reômetro. O que se observa é um abaixamento proporcional nos valores medidos, possivelmente causado por diferentes condições de preparação do FT. O formato das curvas, entretanto, segue o mesmo comportamento, mostrando que as diferenças entre as viscosidades dos diferentes FT é muito menor que a variação observada no formato das estruturas de VB.



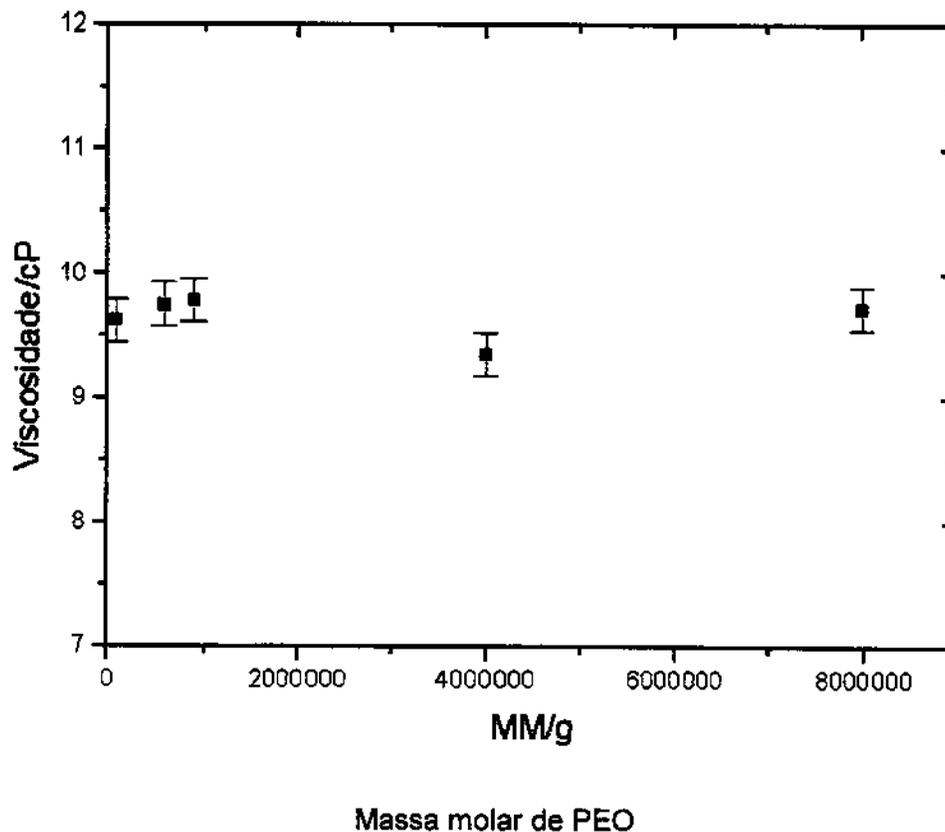


Figura 44 – Gráficos, com dados obtidos no viscosímetro, mostrando a viscosidade do FT em função da variação da concentração e da massa molar de PEO.

Conforme pode ser constatado, a variação na viscosidade dos FT é muito menor que a variação observada nas dimensões das estruturas de VB nas diversas concentrações e massas molares estudadas. É possível que a presença de PEO no FT cause uma influência não-linear entre a viscosidade e o formato das estruturas de VB; esta dependência não linear tem sido observada em estudos de simulação para tipo sistema<sup>6</sup>.

O pequeno aumento da viscosidade causado pela adição de pequenas quantidades de PEO ao FT leva a uma grande modificação das estruturas de fluxo. A complexidade do fenômeno associado ao VB é muito grande e estudos futuros, que possam explicar efeitos tão pronunciados produzidos por quantidades tão pequenas de PEO são muito estimulantes.

## Conclusão

Uma CCFR foi projetada e construída para permitir a realização de estudos sistemáticos sobre a influência de pequenas quantidades de PEO no FT sobre a estrutura dos VB gerados. Para tanto foram tomados diversos cuidados descritos para se obter uma boa reprodutibilidade entre os estudos realizados.

A CCFR foi caracterizada e repetiu todas as estruturas de fluxo previstas em estudos realizados por outros pesquisadores usando este sistema.

Os estudos com PEO foram realizados e demonstram que a presença de pequenas quantidades de PEO no FT resulta em uma marcante influência no formato das estruturas de VB. As estruturas apresentam uma diminuição em suas dimensões. Este comportamento é atribuído ao aumento na viscosidade do FT causado pela presença do PEO.

A CCFR pode ainda ser usada para estudos em fluxo turbulento, em várias condições de temperatura e com diversos tipos de fluidos e aditivos diferentes, abrindo a possibilidade de inúmeras combinações de fluidos e aditivos para serem estudadas futuramente.

## Referências Bibliográficas

- 1 – T. Schwenck, "Sensitive Chaos", Schocken Books, NY, (1996), 72
- 2 – J. Apt, et al., "Orbit: NASA astronauts photograph the earth", National Geographic Society, NY, (1996), 162
- 3 – D.V. Boger, K. Walters, "Rheological Phenomena in Focus", Elsevier, NY, (1993), 6
- 4 – M.P. Escudier, J.J. Keller, "Recirculation in swirling flow: a manifestation of vortex breakdown", *AIAA Journal*, 23, 1, (1985), 111-116
- 5 – T. von Kármán, "Laminare und turbulente reibung", *ZAMM*, 1, (1921), 233
- 6 – G. Böhme et al., "Vortex breakdown in shear-thinning liquids: experiment and numerical simulation", *J. Non-Newtonian Fluid Mech.*, 45, (1992), 1-20
- 7 – M.P. Escudier, "Vortex breakdown in the absence of an endwall boundary layer", *Experiments in Fluids*, 1, (1983), 193-194
- 8 – M.P. Escudier, J. Bornstein, T. Maxworthy, "The dynamics of confined vortices", *Proc. R. Lond. A*, 382, (1982), 335-360
- 9 – M.P. Escudier, N. Zehnder, "Vortex-flow regimes", *J. Fluid Mech.*, 115, (1982), 105-121
- 10 – T.B. Benjamin, "Theory of the vortex breakdown", *Journal of Fluid Mechanics*, 14, (1962), 593-629
- 11 – J.J. Keller, MP Escudier, "Theory and observations of waves on hollow-core vortices", *J. Fluid Mech.*, 99, (1980), 495-511
- 12 – S. Leibovich, "The structure of vortex breakdown", *Ann. Rev. Fluid Mech.*, 10, (1978), 221-246
- 13 – S. Leibovich, *Am. Inst. Aeron. Astron. J.*, 22, (1984), 1192-1206

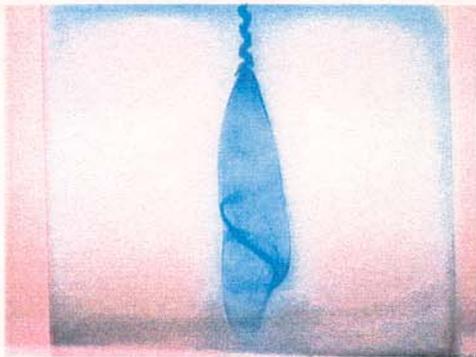
- 14 – M.P. Escudier, *Progr. Aerospace Sci.*, 25, (1988), 189-229
- 15 – M.G. Hall, "Vortex Breakdown", *Ann. Rev. Fluid Mech.*, 4, (1972), 195-218
- 16 – T. Sarpkaya, *J. Fluid Mech.*, 45, (1971), 545-559
- 17 – H.U. Vogel, "Experimentelle Ergebnisse über die laminare Strömung in einem Zylindrischen Gehäuse mit darin rotierender Scheibe", Max-Planck-Institut für Strömungsforschung, Göttingen, Bericht, 6, (1968)
- 18 – M.P. Escudier, "Observations of the flow produced in a cylindrical container with a rotating bottom", *Experiments in Fluids*, 2, (1984), 189-196
- 19 – R.W. Fox, A.T. McDonald, "Introdução a mecânica dos fluidos", trad. P. Silvestre, 3a ed., Rio de Janeiro, Ed. Guanabara, (1988)
- 20 – J.B. Segur, H.E. Oberstar, "Viscosity of glycerol and its aqueous solutions", *Industrial and Engineering Chemistry*, 43, 9, (1951) 2117-2120
- 21 – W.J. Grabowski, S.A. Berger, *J. Fluid Mech.*, 75, (1976), 525-544
- 22 – H.J. Lugt, M. Abboud, *J. Fluid Mech.*, 179, (1987), 179-200
- 23 – J.N. Sorensen, T.P. Loc, *Int. J. Numer. Methods Fluids*, 9, (1989), 1517-1537
- 24 – J.M. Lopez, *J. Fluid Mech.*, 221, (1990), 533-576
- 25 – E. Krause, in "Lecture Notes in Physics", 371, Springer-Verlag, Berlin, (1990), 35-50
- 26 – J.M. Hyun, "Flow in an Open tank with a free surface driven by the spinning bottom", *J. Fluid Eng.*, 107, (1985), 495-499
- 27 – H.J. Lugt, H.J. Haussling, "Axisymmetric vortex breakdown in rotating fluid within a container", *J. App. Mech.*, 49, (1982), 921-923
- 28 – H.P. Pao, "Numerical computation of a confined rotating flow", *ASME J. App. Mech.*, 37, (1970), 480-487

- 29 – H.P. Pao, "Numerical solutions of the Navier-Stokes equations for flows in the disk-cylinder system", *The Physics of Fluids*, 15, (1972), 4-11
- 30 – H.J. Lugt, H.J. Haussling, "Development of flow circulation in a rotating tank", *Acta Mechanica*, 18, (1973), 255-272
- 31 – C.V. Alonso, "Steady Laminar flow in a stationary tank with a spinning bottom", *ASME J. App. Mech.*, 42, (1975), 771-776
- 32 – M. Bertela, F. Gori "Laminar flow in a cylindrical container with a rotating cover", *ASME J. Fluid Eng.*, 104, (1982), 31-39
- 33 – D. Dijkstra, G.J.F. Van Heijst, "The flow between two finite rotating disks enclosed by a cylinder" *J. Fluid Mech.*, 128, (1983), 123-154
- 34 – M.U. Kim, "Slow rotation of a disk in a fluid-filled circular cylinder", *J. Phys. Soc. Japan*, 50, (1981), 4063-4067
- 35 – J.M. Hyun, "Flow near a slowly rotating disk in a finite cylinder", *J. Phys. Soc. Japan*, 53, (1984), 3808-3813
- 36 – A. Spohn, M. Mory, E.J. Hopfinger, "Observations of vortex breakdown in an open cylindrical container with a rotating bottom", *Experiments in Fluids*, 14, (1993), 70-77
- 37 – H. Schlichting, "Boundary-layer theory" 7a ed., Mc Graw-Hill, NY, 1979
- 38 – R.B. Bird, W.E. Stewart, E.N. Lightfoot, "Transport Phenomena", Wiley, NY, 1960
- 39 – J.M. Di Meglio, S. Cohen-Addad, "Stabilization of aqueous foam by hydrosoluble polymers.2. Role of polymer-surfactant interactions", *Langmuir*, 10, (1994), 773
- 40 – W. Johannes, S. Whitaker, "Thinning of soap films - The effect of surface viscosity", *J. Phys. Chem.*, 69(5), (1965), 1471

- 41 – P.J. Flory, "Principles of Polymer Chemistry", Cornell University Press, NY, 1986
- 42 – M.P. Escudier, I.W. Gouldson, D.M. Jones, "Flow of shear-thinning fluids in a concentric annulus", *Experiments in Fluids*, 18, (1995) 225-238
- 43 – M.P. Escudier, I.W. Gouldson D.M. Jones, "Taylor vortices in Newtonian and shear-thinning liquids", *Proc. R. Soc. Lond. A*, 449, (1995), 155-176
- 44 – R.C. Little, M. Wiegard, "Drag reduction and structural turbulence in flowing polyox solutions", *J. App. Polym. Sci.*, 14, (1970), 409-419
- 45 – D. Bonn, Y. Couder, P.H.J. van Dam, S. Douady, "From small scales to large scales in three-dimensional turbulence: The effect of diluted polymers", *Physical Review E*, 47(1), (1993), R28-R31
- 46 – Adaptação do esquema de preparação proposto por R.C. Little, M. Wiegard, "Drag reduction and structural turbulence in flowing polyox solutions", *J. App. Polym. Sci.*, 14, (1970), 409-419
- 47 – M.L. Sheely, "Glycerol viscosity tables", *Industrial and Engineering Chemistry*, 24, 9, (1932) 1060-1064
- 48 – Sellin, R.H.J., Hoyt, J.W., Scriver, O., "The effect of drag-reducing additives on fluid flows and their industrial applications", *Journal of Hydraulic Research*, 20, (1982), 29-68
- 49 – Catálogo Minimotor, Minimotor S.A., Croglia, (1997)
- 50 – Manual de operação MDT-2244, Foto Tacômetro Digital, Minipa Indústria e Comércio Ltda., São Paulo, (1996)
- 51 – Eisenga, M., "Dynamics of vortex rings", Vortex Dynamics Group, <http://tnj.phys.tue.nl/work/rings.html>
- 52 – Hoyt, J.W., Encyclopedia of Polymer Science and Engineering", John Wiley & Sons, NY, (1985), 5, 129

## Apêndice 1

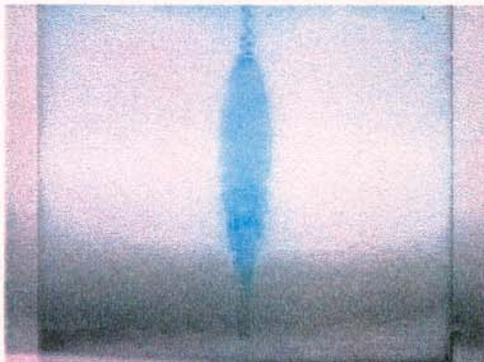
Este apêndice apresenta as imagens das estruturas obtidas no Estudo sobre toda a faixa de  $Re$  em comparação com as obtidas no Estudo N° 1. A concentração de PEO no FT é de 50 ppm e o  $H/R=2$ . Os  $Re$  estão indicados em cada imagem.



Sem PEO  
 $Re=1071$



Com PEO  
 $Re=1071$



Sem PEO  
 $Re=1124$



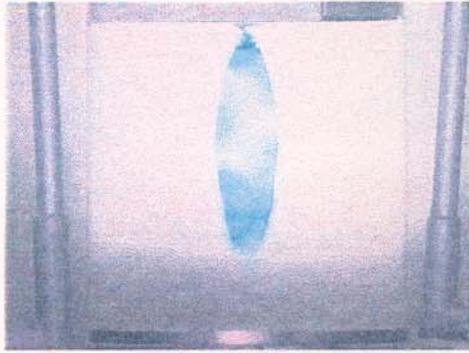
Com PEO  
 $Re=1124$



Sem PEO  
 $Re=1130$



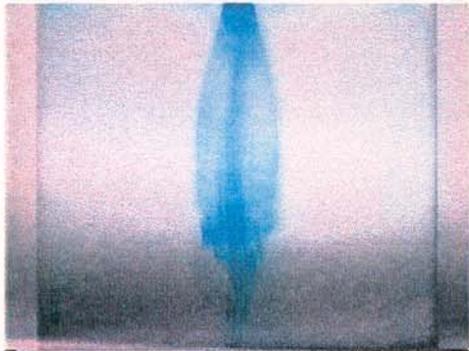
Com PEO  
 $Re=1130$



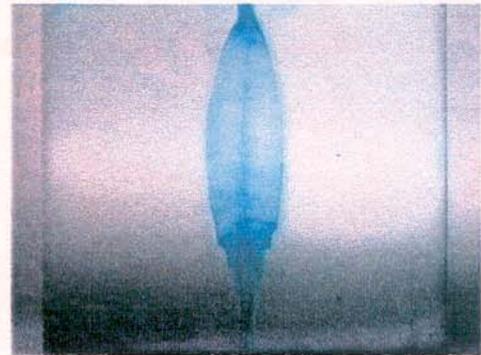
Sem PEO  
Re=1215



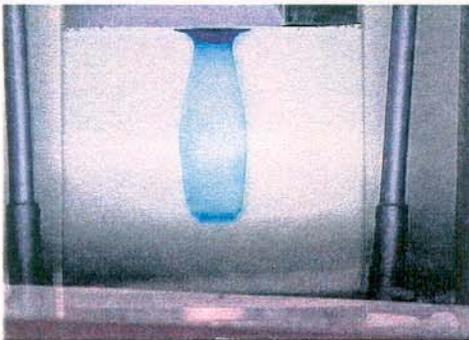
Com PEO  
Re=1215



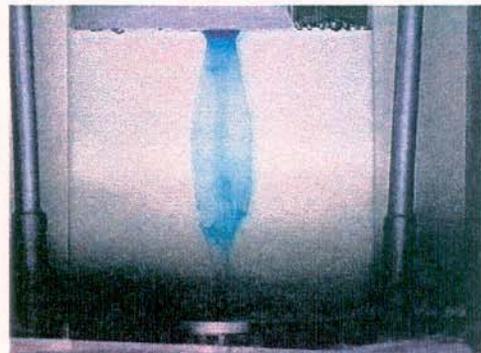
Sem PEO  
Re=1271



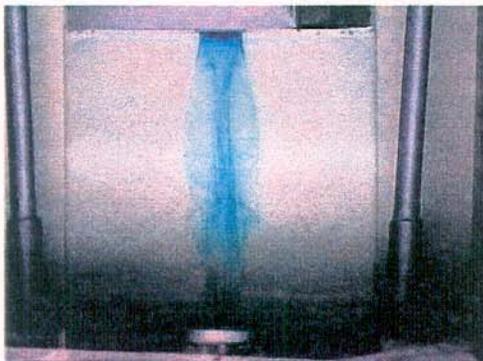
Com PEO  
Re=1271



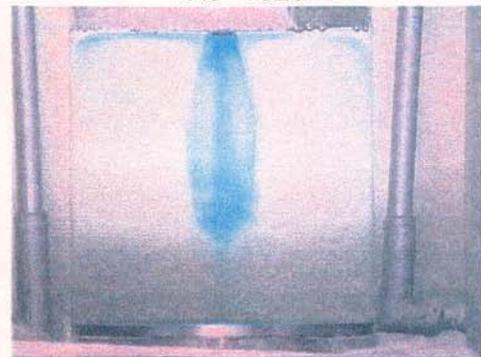
Sem PEO  
Re=1320



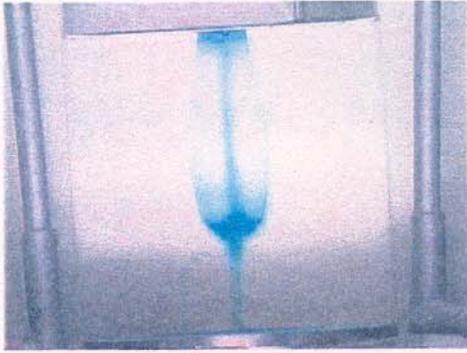
Com PEO  
Re=1320



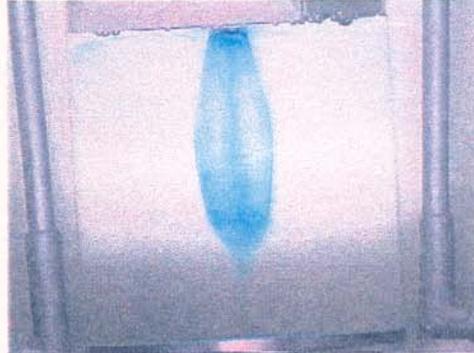
Sem PEO  
Re=1424



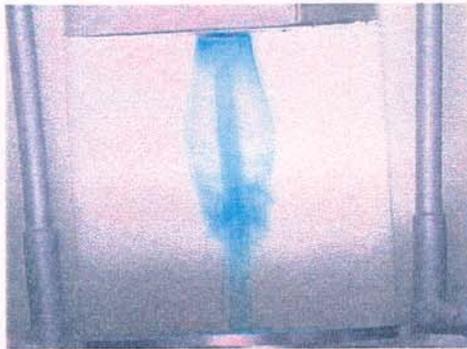
Com PEO  
Re=1424



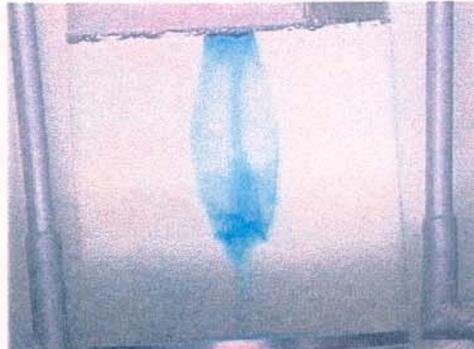
Sem PEO  
Re=1499



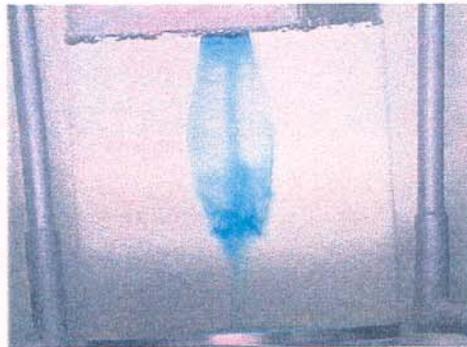
Com PEO  
Re=1499



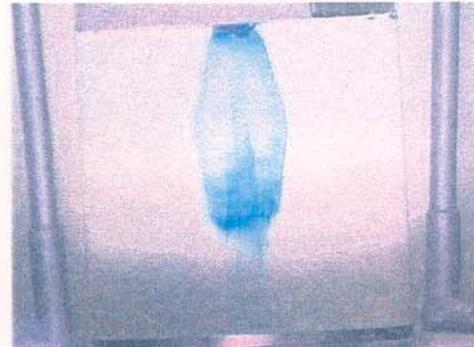
Sem PEO  
Re=1638



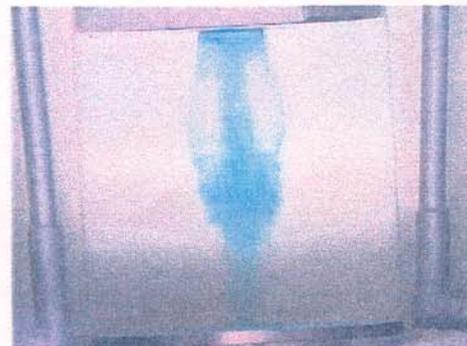
Com PEO  
Re=1638



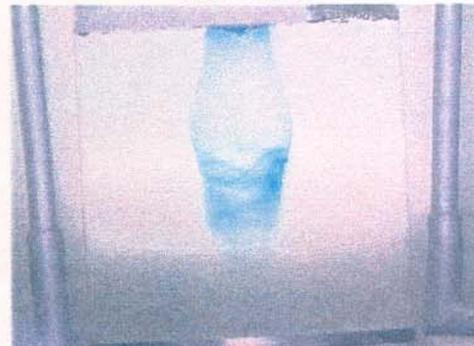
Sem PEO  
Re=1775



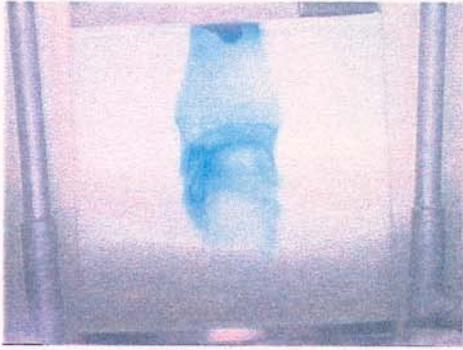
Com PEO  
Re=1775



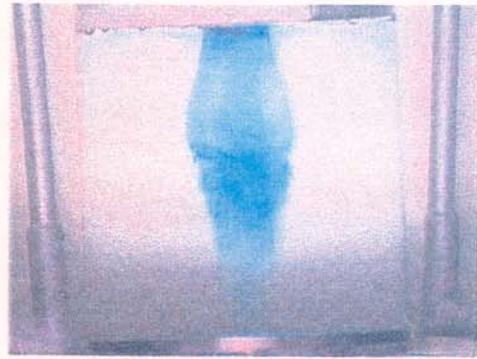
Sem PEO  
Re=2007



Com PEO  
Re=2007



Sem PEO  
Re=2254



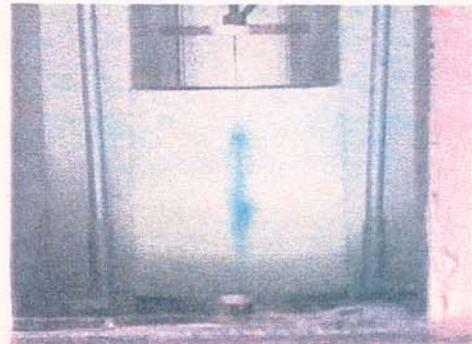
Com PEO  
Re=2254

## Apêndice 2

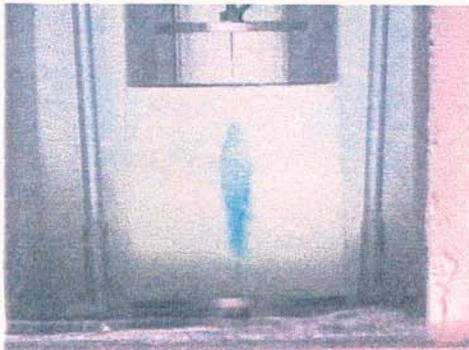
Este apêndice apresenta as imagens das estruturas obtidas no Estudo sobre o efeito da concentração de PEO. O Re usado é de 1175 em  $H/R=2$ . A concentração de PEO  $4.000.000 \text{ g.mol}^{-1}$ , em ppm, para cada estrutura esta indicada na respectiva imagem



0 ppm



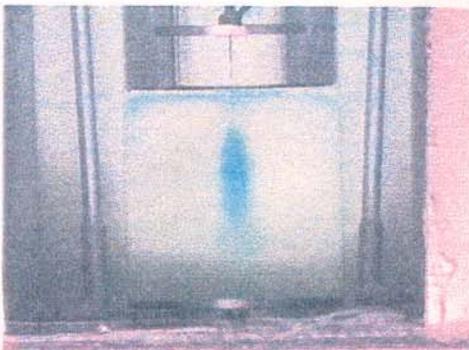
10 ppm



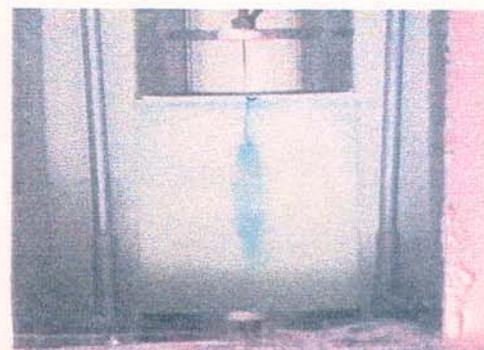
20 ppm



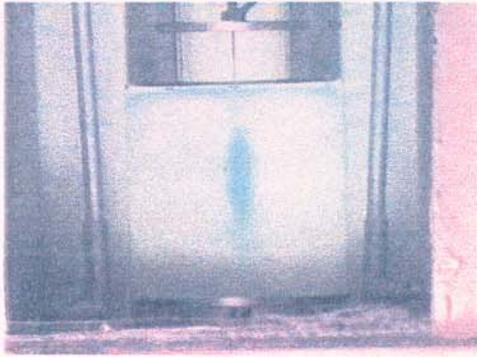
30 ppm



40 ppm



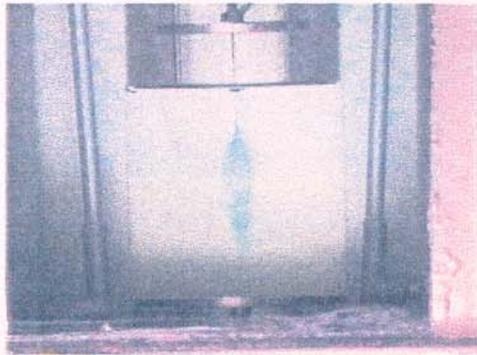
50 ppm



60 ppm



70 ppm



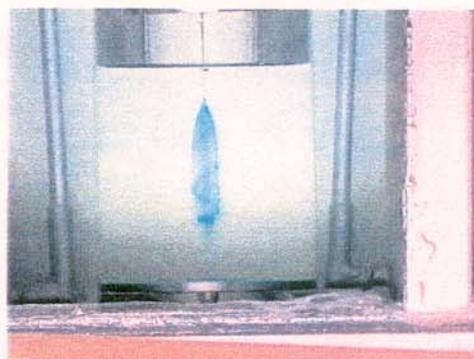
80 ppm

### Apêndice 3

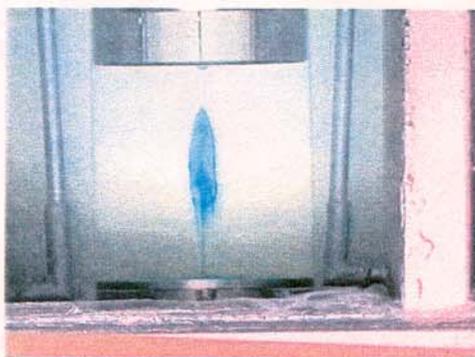
Este apêndice apresenta as imagens das estruturas obtidas no Estudo sobre a influência do tamanho da cadeia de PEO. O Re usado é de 1175 em H/R=2. A concentração de PEO é de 10 ppm para cada massa molar estudada, indicada na imagem da respectiva estrutura.



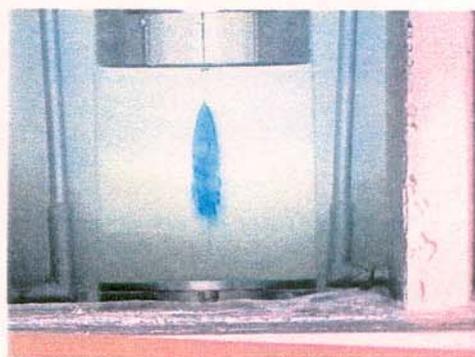
MM=100.000 g.mol<sup>-1</sup>



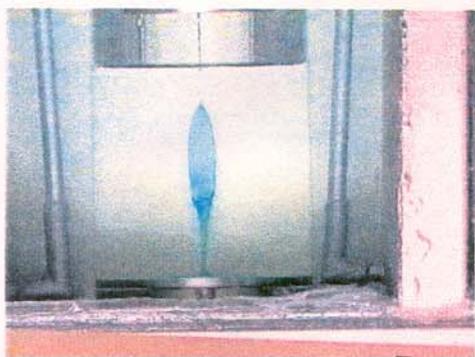
MM=600.000 g.mol<sup>-1</sup>



MM=900.000 g.mol<sup>-1</sup>



MM=4.000.000 g.mol<sup>-1</sup>



MM=8.000.000 g.mol<sup>-1</sup>