
Universidade Estadual de Campinas
Instituto de Química

***ESTUDO DO IMPACTO DE GOTAS USANDO
REDUTORES DE ATRITO
HIDRODINÂMICO.***

Dissertação de Mestrado

Melissa Inger Alkschbirs

Orientação

Prof. Dr. Edvaldo Sabadini

1999

| | | | |
|--------------|--------------------------|---|-------------------------------------|
| UNIDADE | 32 | | |
| N.º CHAMADA: | | | |
| | | | |
| V. | Ex. | | |
| TOMBO BC/ | 40464 | | |
| PROC. | 278100 | | |
| C | <input type="checkbox"/> | D | <input checked="" type="checkbox"/> |
| PREÇO | 511,00 | | |
| DATA | 11/03/00 | | |
| N.º CPD | | | |

CM-00140107-4

**FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DO INSTITUTO DE QUÍMICA
UNICAMP**

AL49e Alkschbirs, Melissa Inger
Estudo do impacto de gotas usando redutores de atrito hidrodinâmico / Melissa Inger Alkschbirs. – Campinas, SP: [s.n.], 1999.

Orientador: Edvaldo Sabadini.

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

1. Poli(óxido de etileno). 2. Splash. 3. Redução de atrito hidrodinâmico. I. Sabadini, Edvaldo. II. Universidade Estadual de Campinas. Instituto de Química. III. Título.

“Cavalgue um cavalo selvagem pelo céu.

Agarre-se bem às suas asas,

Antes que venha a morte.

Não importa o que deixe de fazer,

Cavalgue um cavalo selvagem rumo ao sol,

Ao menos uma vez.”

- Hannah Kahn -

Agradecimentos

Agradeço:

- a Deus;
- a toda minha família;
- ao Amado Giovani;
- às amigas Andresa e Elisângela;
- aos amigos do laboratório I-114, especialmente Érico, Walcyr, Karoline e Rita;
- ao Professor e amigo Edvaldo Sabadini;
- aos Professores Jarbas José Rodrigues Rohwedder e Ivo Milton Raimundo Jr.;
- às oficinas do Instituto de Química, especialmente às Oficinas Mecânica e Mecânica Fina;
- ao setor de Desenho do Instituto de Química;
- ao Instituto de Química;
- à UNICAMP;
- ao CNPq.

ÍNDICE

| | |
|---|-----|
| RESUMO..... | i |
| ABSTRACT..... | ii |
| Curriculum vitae..... | iii |
| Lista de Figuras..... | v |
| Lista de Tabelas..... | ix |
| Lista de Símbolos..... | x |
| CAPÍTULO 1 - O impacto de gotas contra superfícies líquidas. | |
| 1.1 - A coalescência da gota..... | 1 |
| 1.2 - O fenômeno do “splash”..... | 3 |
| CAPÍTULO 2 – A Redução de atrito hidrodinâmico. | |
| 2.1 - Conceitos fundamentais sobre dinâmica de fluidos..... | 9 |
| 2.2 - O efeito Toms..... | 14 |
| CAPÍTULO 3 – Parte Experimental. | |
| 3.1 - Materiais..... | 23 |
| 3.2 - Métodos. | |
| a) Preparação de solução de PEO..... | 23 |
| b) Construção de um dispositivo para a geração das estruturas de impacto..... | 23 |
| c) Filmagem das estruturas de impacto..... | 26 |
| d) Digitalização e tratamento de imagens..... | 26 |
| e) Forma de análise dos resultados..... | 27 |
| f) Determinação das propriedades químicas..... | 27 |
| CAPÍTULO 4 – Resultados e Discussão. | |
| 4.1 - Estudos relacionados ao dispositivo utilizado para a geração e filmagem das estruturas de impacto. | |
| a) Estudo sobre a reprodutibilidade da gota..... | 28 |
| b) Influência da altura de queda da gota na posição de impacto..... | 29 |
| c) Obtenção das imagens do “splash”..... | 30 |
| 4.2 - A oscilação da gota..... | 33 |

| | |
|--|----|
| 4.3 - O efeito da redução de atrito na morfologia das estruturas de impacto do “splash”..... | 35 |
| 4.4 - Efeito da rugosidade da superfície rígida de impacto..... | 38 |
| 4.5 - A contribuição do líquido alvo e da gota no fenômeno do “splash”. | |
| a) Formação da coroa..... | 43 |
| b) Colapso da coroa e da cavidade..... | 44 |
| c) Formação do jato Rayleigh..... | 44 |
| d) Repouso..... | 45 |
| 4.6 - Modelo para as modificações morfológicas do “splash”..... | 47 |
| 4.7 - Estudo de outros parâmetros relativos ao dispositivo de fluxo. | |
| a) Estudo sobre a profundidade do líquido alvo nas estruturas do “splash”... | 51 |
| b) Estudo sobre a altura de queda da gota (energia potencial) nas estruturas de impacto..... | 54 |
| 4.8 - Estudos sobre alguns aspectos relativos ao PEO. | |
| a) Estudo sobre a influência da concentração de PEO sobre as estruturas de impacto..... | 57 |
| b) Estudo sobre a influência da massa molar de PEO sobre as estruturas de impacto..... | 62 |
| CONCLUSÃO | 66 |
| APÊNDICES. | |
| Apêndice 1..... | 67 |
| Apêndice 2..... | 68 |
| Apêndice 3..... | 70 |
| Apêndice 4..... | 73 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 75 |

RESUMO

O fenômeno do “splash” tem levantado interesse desde muito tempo atrás, principalmente pela beleza das estruturas produzidas pelo impacto de uma gota contra uma superfície líquida. Como o “splash” ocorre num curto intervalo de tempo (milissegundos), é necessário uma técnica rápida para se conseguir imagens.

Utilizando uma câmera CCD e um programa de digitalização de imagens, este trabalho tem o objetivo de estudar as modificações morfológicas do “splash” quando o líquido contém um agente redutor de atrito hidrodinâmico: a presença de pequenas quantidades de polímeros em solução (ppm), provoca considerável redução de atrito, quando a mesma é submetida à escoamento turbulento.

Através das imagens das estruturas do “splash”, foi possível estudar o efeito do polímero poli(óxido de etileno), PEO, o mais eficiente agente redutor de atrito hidrodinâmico, sobre as estruturas do “splash”, bem como os efeitos relacionados às energias potencial e superficial, e observamos, pela primeira vez, que as estruturas do “splash” podiam ser utilizadas de maneira quantitativa para estudar o Efeito de redução de atrito hidrodinâmico.

ABSTRACT

The splash is a phenomenon that has aroused a lot of interest since a long time ago, mainly due to the beauty of the structures produced by the impact of a drop against a liquid surface. Since splash occurs in a short period of time (milliseconds), a fast technique is necessary to record images.

Using a CCD camera and a software for image digitalization, the present work aims the study of morphological changes in the splash when the liquid contains a drag reduction agent: the presence of small amounts (ppm) of polymers in the solutions provokes a considerable drag reduction, when it is submitted to turbulent flow.

Using the images of splash structures, known possible to study the effect of the polymer poly(ethylene oxide), PEO, the most efficient drag reduction agent, on splash structures, as well as the effects related to potential and superficial energies. It was first time that splash structures can be used quantitatively to study the drag reduction effect.

Curriculum Vitae

1 - Dados Pessoais.

Nome: Melissa Inger Alkschbirs

Endereço: Rua Professor Carlos Liepin, 167 – Centro

Cidade: Nova Odessa – SP

e-mail: inger@iqm.unicamp.br

2 – Formação Acadêmica.

Bacharelado em química pela Universidade Estadual de Campinas (Unicamp) 12/1996.

3 – Trabalhos Apresentados em Congresso.

Alkschbirs, M.I.; Sabadini, E.; “Estudo do Efeito Toms nas estruturas do ‘splash’ utilizando imagens digitais”, 22^a Reunião Anual da Sociedade Brasileira de Química (05/1999)

Alkschbirs, M.I.; K., Lutfi, M. e outros; “Perfil do aluno de licenciatura de química da Unicamp”, XVII Encontro de Debates sobre o ensino de química (10/1997).

4 – Conhecimento em língua estrangeira.

Curso de língua (inglês) na UNICAMP, duração de 3 anos, possibilitando o conhecimento gramatical, bem como leitura e conversação.

5 – Conhecimento em informática.

Editores de texto e gráficos - prática com Windows 95

6 - Experiência Profissional.

Ajudante Geral, Salmar Supermercados – Nova Odessa / SP

Monitoria, via a graduação, de QG102 (Química Experimental I) para o curso de Engenharia de Computação (2ºS/1998), na UNICAMP.

Monitoria no programa “Seu Colégio na UNICAMP” (09/1997).

Monitoria, via a graduação, de QG102 (Química Experimental I) para o curso de Engenharia Civil (1ºS/1997), na UNICAMP.

Monitoria, via a graduação, de QG107 (Química I – Biologia), para o curso de Biologia (1ºS/1997), na UNICAMP.

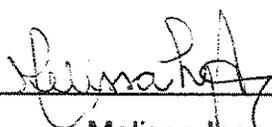
7 – Outros.

Ingresso na Pós-Graduação, no nível Mestrado, na UNICAMP (2º S/1997), com dissertação prevista a ser defendida em 09/1999.

Reingresso na UNICAMP (1º S/1997) para complementação de histórico escolar na modalidade Licenciatura em Química, com término previsto para 12/1999.

Subcrevo-me,

Campinas, 01 de Setembro de 1999.



Melissa Inger Alkschbirs

Lista de Figuras

| | |
|--|----|
| Figura 1 - Imagens mostrando a coalescência e a penetração para o interior da líquido alvo, de uma gota de água-glicerina. Ao lado de cada imagem está indicado a evolução temporal do processo..... | 2 |
| Figura 2 - Esquema representado a gota de um líquido (a) antes, (b) durante e (c) após o impacto contra uma superfície líquida..... | 2 |
| Figura 3 - Foto do “splash”, em um determinado instante. Estão indicados as estruturas referentes à coroa, os jatos e as gotas secundárias..... | 3 |
| Figura 4 - Imagens da evolução das 4 fases do “splash”(obtidas em nosso Laboratório)..... | 4 |
| Figura 5 - Imagem de um jato Rayleigh (obtida em nosso Laboratório)..... | 5 |
| Figura 6 - Esquema da formação do jato Rayleigh..... | 5 |
| Figura 7 - Propaganda utilizando um estágio do fenômeno do “splash”..... | 6 |
| Figura 8 - Modelo do “splash” desenvolvido em situações de pequena profundidade do líquido alvo..... | 6 |
| Figura 9 - Desenho esquemático mostrando o deslizamento das camadas devido a ação de uma força..... | 9 |
| Figura 10 - Camadas adjacentes do flido movendo-se à diferentes velocidades..... | 10 |
| Figura 11 - Diagramas de tensão de cisalhamento em função da taxa de cisalhamento para fluídos Newtonianos, e fluídos não-Newtonianos..... | 11 |
| Figura 12 - Diagrama esquemático representando os escoamentos laminar e turbulento..... | 13 |

| | |
|---|----|
| Figura 13 - O limiar entre a zona de ocorrência do “splash” e da coalescência para uma gota d’água com relação aos números adimensionais de Reynolds e de Froude..... | 14 |
| Figura 14 - Esquema de um Reômetro de escoamento turbulento para medidas de redução de atrito. P_1 e P_2 são os transdutores de pressão..... | 16 |
| Figura 15 - Fator de fricção versus o número de Reynolds para solução de PEO N750, 1500ppm, em um tubo..... | 17 |
| Figura 16 - Redução de fricção como uma função da concentração e massa molar de PEO em água..... | 18 |
| Figura 17 - Gráfico da taxa de escoamento em função da tensão de cisalhamento na parede do tubo, para água pura e para solução aquosa contendo 1,03ppm de PEO..... | 19 |
| Figura 18 - Representação esquemática da deformação da cadeia polimérica induzida por um escoamento..... | 21 |
| Figura 19 - Linha de bombeamento de petróleo no Alasca, onde é empregado redutores de atrito hidrodinâmico..... | 22 |
| Figura 20 - Esquema do dispositivo para o estudo do impacto de gotas (1-9) em conjunto com o equipamento para a captura de seqüência de imagens (10-15)..... | 24 |
| Figura 21 - Ilustração do frasco de Mariotte..... | 25 |
| Figura 22 - O jato Rayleigh para (a) água e (b) solução de PEO (4 milhões, 50ppm)..... | 27 |
| Figura 23 - Seqüência do “splash” da gota d’água, com a câmera posicionada de frente para o evento..... | 32 |
| Figura 24 - Seqüência do “splash” da gota d’água, com a câmera posicionada de topo para o evento..... | 32 |
| Figura 25 - A oscilação da gota, nas formas prolato, esférica e oblato..... | 33 |
| Figura 26 - Gota em queda livre na forma esférica..... | 34 |
| Figura 27 - Oscilação da gota na forma (a) oblato e (b) prolato, desprendendo de uma altura de 50,0cm..... | 34 |

| | |
|---|----|
| Figura 28 - A estrutura da coroa para (a) água e (b) solução de PEO (4milhões, 50ppm)..... | 36 |
| Figura 29 - O jato Rayleigh para (a) água e (b) solução de PEO (4 milhões, 50ppm)..... | 37 |
| Figura 30 - Micrografia da placa lisa. Ampliação de 157,5 vezes..... | 38 |
| Figura 31 - Micrografia da placa rugosa. Ampliação de 157,5 vezes..... | 38 |
| Figura 32 - Efeito da rugosidade da placa na altura do jato Rayleigh (altura de queda de $183,5\pm 0,5\text{cm}$ e profundidade do líquido alvo de $0,31\pm 0,01\text{cm}$)..... | 39 |
| Figura 33 - Imagens do “splash” de uma gota d’água, corada com violeta de metila, que cai de uma altura de $135,5\pm 0,5\text{cm}$ e tendo como líquido alvo a mesma solução a uma profundidade de $0,32\pm 0,01\text{cm}$. Filmagem realizada com a câmera posicionada de topo para evento..... | 41 |
| Figura 34 - Imagens do “splash” de uma gota de solução de PEO (4 milhões, 40ppm), corada com violeta de metila, que cai de uma altura de $135,5\pm 0,5\text{cm}$ e tendo como líquido alvo a mesma solução a profundidade de $0,32\pm 0,01\text{cm}$. Filmagem realizada com a câmera posicionada de topo para o evento..... | 42 |
| Figura 35 - Diferenças de coloração observada na estrutura do “splash” para (a) água, e para (b) solução de PEO (4 milhões, 40ppm)..... | 43 |
| Figura 36 - Imagem ilustrando os “veios” coloridos, observados na coroa..... | 44 |
| Figura 37 - O jato Rayleigh para (a) água, e para (b) solução de PEO (4 milhões, 40ppm)..... | 45 |
| Figura 38 - A mancha deixada pela gota no líquido alvo, após o término do “splash” para (a) água e (b) solução de PEO (4 milhões, 40ppm)..... | 46 |
| Figura 39 - Modelo proposto para o “splash” da água..... | 48 |
| Figura 40 - Modelo proposto para o “splash” de uma solução polimérica..... | 49 |

| | |
|---|----|
| Figura 41 - Esquema proposto para a formação de parte da coroa e da cavidade produzida no líquido alvo para: --- água, e — solução polimérica..... | 50 |
| Figura 42 - Diâmetro da coroa em função da profundidade do líquido alvo..... | 51 |
| Figura 43 - Altura da coroa em função da profundidade do líquido alvo..... | 52 |
| Figura 44 - Altura do jato Rayleigh em função da profundidade do líquido alvo..... | 52 |
| Figura 45 - Efeito da altura de queda sobre a altura do jato Rayleigh, para uma profundidade de líquido alvo de $0,31\pm 0,01$ cm. A solução de PEO utilizada no estudo é a de massa molar 4 milhões e concentração de 40ppm..... | 55 |
| Figura 46 - Efeito da concentração de PEO, 4 milhões, na altura do jato Rayleigh, para uma altura de queda de $183,5\pm 0,5$ cm e profundidade do líquido alvo de $0,32\pm 0,01$ cm..... | 58 |
| Figura 47 - Tensão superficial em função da concentração de PEO 4 milhões..... | 59 |
| Figura 48 - Densidade em função da concentração de PEO 4 milhões..... | 60 |
| Figura 49 - Viscosidade em função da concentração de PEO 4 milhões..... | 60 |
| Figura 50 - Redução de atrito como uma função da concentração de PEO 4 milhões, em água..... | 61 |
| Figura 51 - Efeito da massa molar de PEO sobre a altura do jato Rayleigh, para uma profundidade de líquido alvo de $0,31\pm 0,01$ cm..... | 62 |
| Figura 52 - Linhas de pressão para o impacto de uma gota contra o líquido alvo..... | 65 |

Lista de Tabelas

- Tabela 1 - Valores das medidas realizadas nas estruturas do “splash” (altura e diâmetro da coroa, altura do jato Rayleigh), para água e solução de PEO, (4 milhões, 50ppm), para altura de queda de $135,5 \pm 0,5$ cm e profundidade do líquido alvo de $0,26 \pm 0,01$ cm. As médias foram obtidas de aproximadamente 20 imagens..... 37
- Tabela 2 - Valores medidos da área referente à mancha deixada no alvo por uma gota corada, para a água e para a solução de PEO (4 milhões, 40ppm), para uma altura de queda de $135,5 \pm 0,5$ cm e profundidade do líquido alvo de $0,32 \pm 0,01$ cm (amostragem de 20 manchas)..... 46
- Tabela 3 - Componentes de energia do “splash” para água e solução de PEO (4 milhões, 40ppm), em diferentes profundidades do líquido alvo, em Joule e expressos como uma fração porcentual da energia total de impacto, E_d (valores em parênteses)..... 53
- Tabela 4 - Valores de viscosidade para PEO (concentração de 40ppm), para massas molares de 100 mil, 600 mil, 900 mil, 4 milhões e 8 milhões/ g.mol^{-1} 63
- Tabela 5 - Valores de tensão superficial para PEO (concentração de 40ppm), para massas molares de 100 mil, 600 mil, 900 mil, 4 milhões e 8 milhões/ g.mol^{-1} 64
- Tabela 6 - Valores de densidade para PEO (concentração de 40ppm), para massas molares de 100 mil, 600 mil, 900 mil, 4 milhões e 8 milhões/ g.mol^{-1} 64

Lista de Símbolos

| | |
|----------|---|
| v | Velocidade |
| R_d | Raio da gota |
| D | Profundidade do líquido alvo |
| η | Viscosidade |
| ρ | Densidade |
| σ | Tensão superficial |
| R_a | Rugosidade da superfície de impacto |
| U_1 | Energia potencial devido à cavidade |
| U_2 | Energia potencial devido à coroa |
| U_3 | Energia potencial de superfície |
| R_c | Raio da coroa |
| g | Aceleração local devido à gravidade |
| H | Altura da coroa |
| W_1 | Energia viscosa |
| t | tempo |
| E_d | Energia inicial total de impacto, da gota |
| m | Massa da gota |
| E | Energia restante, dissipada |
| F | Força |
| A | Área |
| τ | Tensão de cisalhamento |
| dv/dy | Gradiente de velocidade |
| μ | Coefficiente Newtoniano de viscosidade |
| Re | Número de Reynolds |
| d | Diâmetro do conduto |
| f | Fator de fricção de Fanning |
| L | Comprimento |
| P_p | Pressão causada pela solução |

| | |
|---------------|--|
| P_s | Pressão causada pelo solvente |
| R_g | Raio de giração do polímero |
| Ω_t | Constante única para cada sistema polímero/solvente |
| τ_w^* | Tensão de cisalhamento na parede do tubo |
| δ | Aumento da inclinação da curva de $f^{1/2}$ em função de $(Re f^{1/2})$ para a solução polimérica em relação ao solvente |
| K | Constante de proporcionalidade característica do sistema polímero/solvente |
| N | Número de ligações da cadeia polimérica |
| C | Concentração do polímero |
| M_a | Massa molecular da unidade de repetição |
| w | Quantidade de energia armazenada por metro |
| R | Constante dos gases |
| γ | Taxa de cisalhamento |
| τ_i | Tempo de relaxamento do i -ésimo modo de deformação da cadeia polimérica. |
| T | Temperatura |
| S | Número de segmentos por moléculas |
| ξ_{turb} | Aumento da viscosidade local |
| N_A | Número de Avogadro |
| a | Comprimento de uma unidade de repetição do polímero |
| α | Razão entre o comprimento da cadeia em uma dada situação de escoamento e o comprimento da mesma totalmente estendida |
| N_p | Grau de polimerização |
| \varnothing | Diâmetro |
| H_s | Altura do jato Rayleigh para o solvente |
| H_p | Altura do jato Rayleigh para a solução polimérica |

CAPÍTULO 1

O impacto de gotas contra superfícies líquidas.

Quando uma gota atinge uma superfície líquida dois fenômenos podem ocorrer: a coalescência da gota ou o "splash". A ocorrência de um ou outro fenômeno depende essencialmente da velocidade de queda da gota, (v); do raio da gota, (R_d); da profundidade do líquido que receberá o impacto (o qual chamaremos de líquido alvo), (D); da viscosidade, (η), densidade, (ρ), e tensão superficial, (σ), dos líquidos que formam a gota e o líquido alvo; e da rugosidade da superfície de impacto, (R_a)^{1 - 5}. À seguir será realizada uma breve apresentação sobre os dois processos, dando maior ênfase ao "splash", pois está diretamente relacionado com este Trabalho.

1.1) A coalescência da gota.

Em alguns casos específicos, quando uma gota atinge o líquido alvo, o que ocorre é a coalescência da gota, ou seja, esta entra na superfície, com posterior formação de um anel em forma de vórtice. Este anel viaja para o interior do líquido alvo, até se dissipar completamente (Figura 1). Portanto, todo o processo, após o impacto, ocorrerá no interior do líquido alvo⁶.

Para explicar a formação do vórtice, que se desenvolve no interior do líquido alvo, considere uma gota em queda, assim que ela se desprende da ponta de um tubo. A Figura 2 mostra esquematicamente uma gota esférica (a) antes do contato, (b) durante o contato e (c) depois do contato com a superfície líquida. No Esquema estão também indicadas as linhas de fluxo, no interior da gota (devido à sua oscilação) e logo após o impacto⁷.

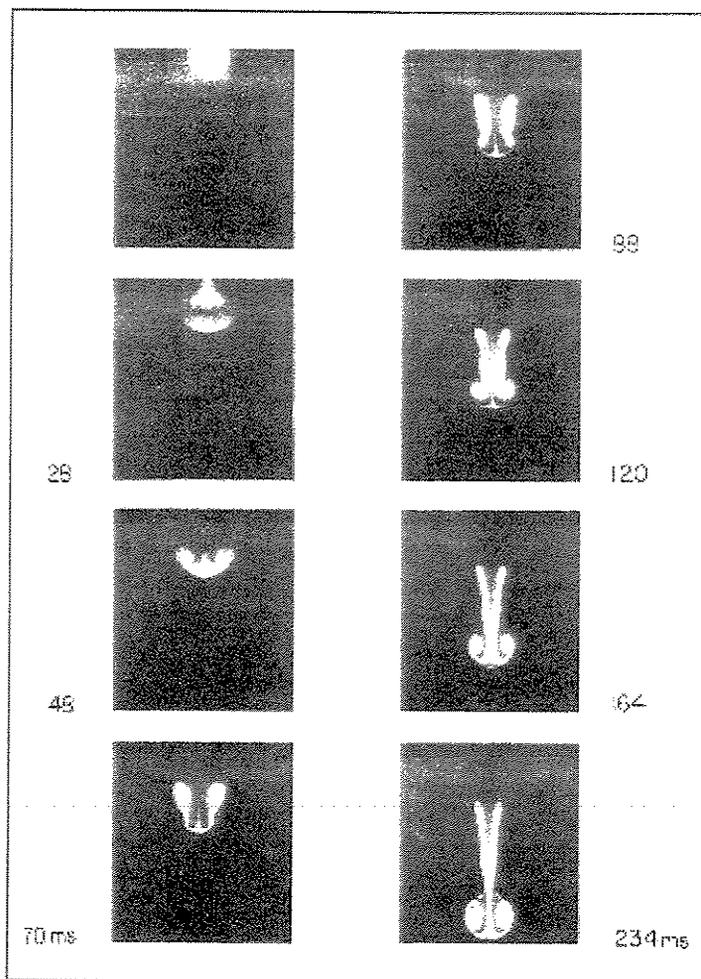


Figura 1 – Imagens mostrando a coalescência e a penetração para o interior do líquido alvo, de uma gota de água-glicerina. Ao lado de cada imagem está indicando a evolução temporal do processo ⁶.

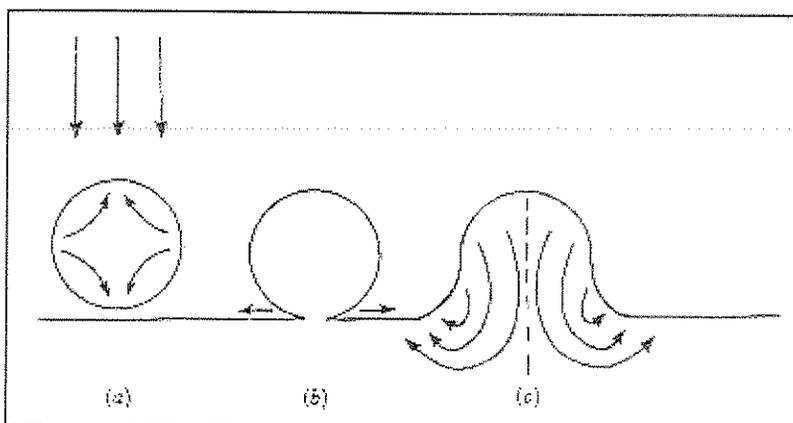


Figura 2 – Esquema representando a gota de um líquido (a) antes, (b) durante e (c) após o impacto contra uma superfície líquida ⁷.

A tensão superficial pode ser importante no processo que se desenvolve e, se for significativa, ocorrerá a formação do anel em forma de vórtice como mostrado anteriormente. Na Figura 2c a curvatura da superfície livre é tal que o líquido comprimindo a gota está experimentando uma pressão relativamente baixa. O fluído da gota é acelerado como mostrado e, assim, uma circulação interna é produzida resultando no anel em forma de vórtice ⁷.

O anel carrega consigo parte da energia do impacto da gota e estima-se que para um anel bem desenvolvido, esta energia representa 25% da energia de impacto ⁸.

1.2) O fenômeno do “splash”.

O termo “splash” é usado para indicar a formação de uma estrutura conhecida como coroa, e de gotas secundárias, produzidas após o impacto de uma gota contra uma superfície líquida sendo, portanto, um fenômeno que ocorre acima da superfície do líquido alvo, na interface ar/líquido (Figura 3) ⁶.

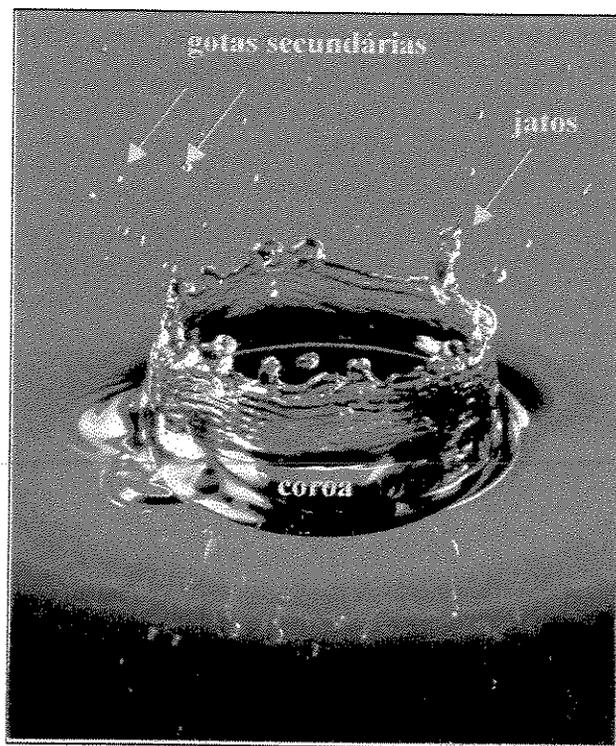


Figura 3 – Imagem do “splash” ⁹, em um determinado instante. Estão indicadas as estruturas referentes à coroa, os jatos e as gotas secundárias ⁶.

A evolução do “splash” pode ser convenientemente dividida em 4 fases (Figura 4): (a) a formação da coroa; (b) a instabilidade da coroa formada e a formação dos jatos; (c) a quebra dos jatos e a formação de gotas secundárias; (d) o período de colapso da coroa ⁶.

No período de colapso da coroa, observa-se na superfície líquida um fenômeno conhecido como “Efeito Pétala” (por formar estruturas semelhantes a um anel de pétalas), o qual se deve a mistura do líquido da parede da coroa com o da superfície ¹⁰. As estruturas em forma de pétalas, podem ser obtidas por fotografias de topo.

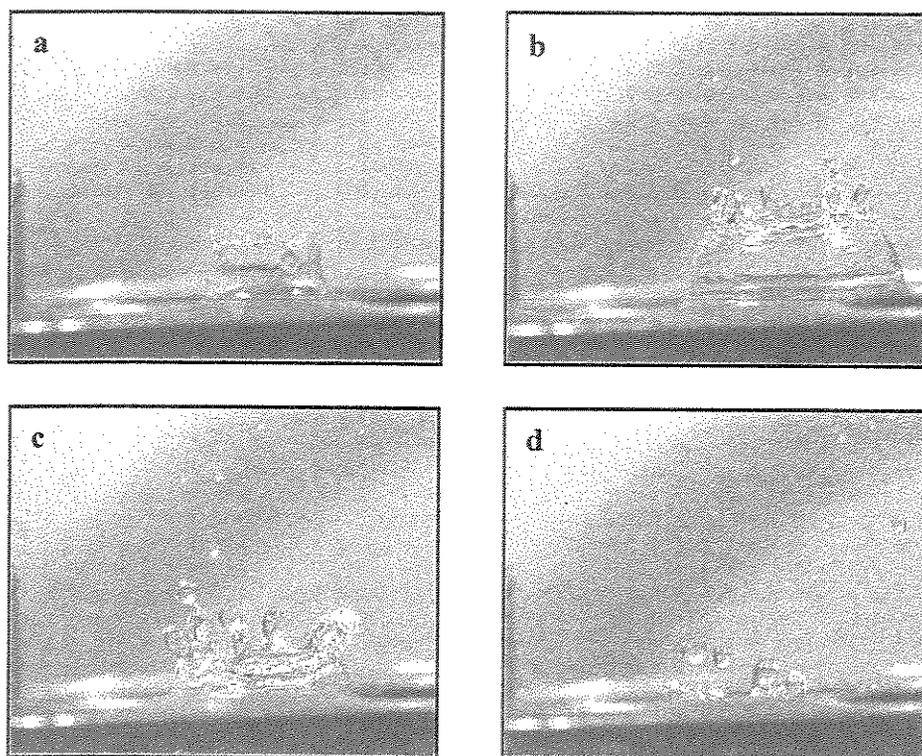


Figura 4 – Imagens da evolução das 4 fases do “splash” (obtidas em nosso Laboratório).

Após o período de colapso da coroa, há a formação de um jato líquido, conhecido como jato Rayleigh (Figura 5). O aparecimento do jato Rayleigh se deve a um processo combinado do colapso da coroa e do fechamento da cavidade que se forma no líquido alvo, impulsionando o líquido, mais uma vez, contra a gravidade ¹¹⁻¹³.

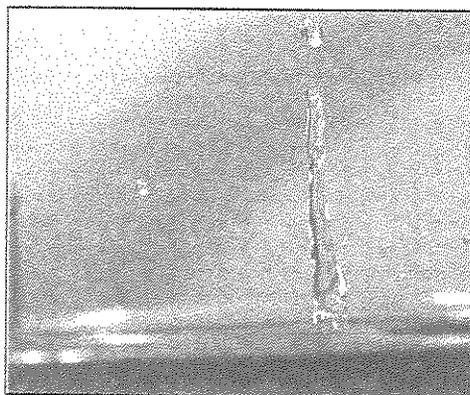


Figura 5 – Imagem de um jato Rayleigh (obtida em nosso Laboratório).

Um esquema do processo que envolve o colapso da coroa e o fechamento da cavidade está, simplificadamente, apresentado na Figura 6.

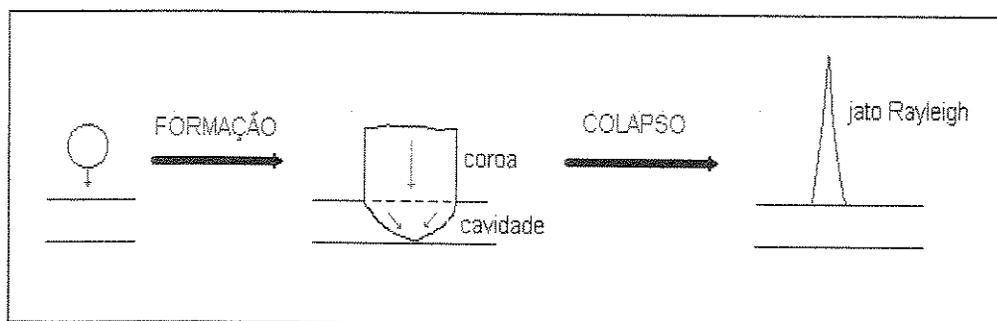


Figura 6 – Esquema da formação do jato Rayleigh.

O fenômeno do “splash” foi, primeiramente, estudado por Worthington ¹⁴, em 1908, e tinha como objetivo principal demonstrar a eficiência da técnica de fotografia rápida e do uso da luz estroboscópica, dada à rapidez do fenômeno (que ocorre em dezenas de milissegundos) ¹⁴⁻¹⁸.

Além de ser um fenômeno complexo e muito bonito, utilizado ainda hoje nos meios de comunicação e propaganda (Figura 7) ^{19, 20}, o desenvolvimento das estruturas pós-impacto tem caráter geral e, por isso, o “splash” tem sido utilizado em estudos variados, como a interferência de gotas de chuva na erosão do solo ²¹, a dispersão de esporos de fungos e sementes ²¹, em danos causados em aviões

em alta velocidade durante chuvas ²², em estudos sobre o impacto de meteoritos ²³,
²⁴ e em processos de pintura ²⁵.

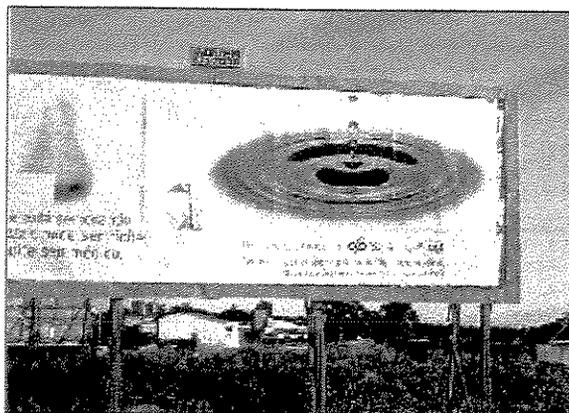


Figura 7 – Propaganda utilizando um estágio do fenômeno do “splash”.

Os estudos sobre o “splash” são divididos em duas categorias: aqueles que se desenvolvem em condições nas quais a profundidade do líquido alvo é pequena (com dimensões inferiores ou igual ao diâmetro da gota) e aqueles nas quais a profundidade do líquido alvo é grande (com dimensões superiores ao diâmetro da gota). No caso de pequena profundidade, as paredes da coroa produzida no “splash” pode ser representada, em duas dimensões, como uma coluna cilíndrica, como mostrado na Figura 8 ⁴.

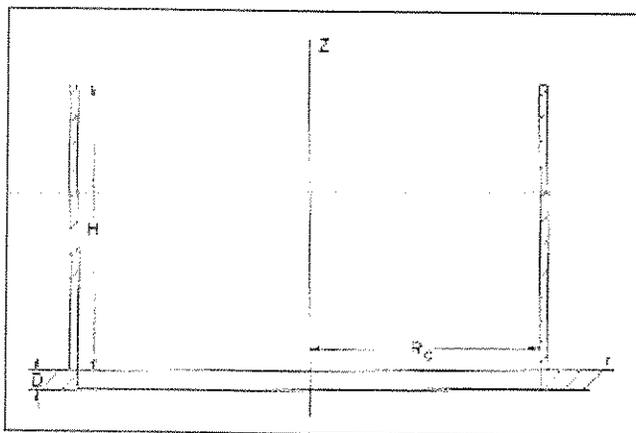


Figura 8 – Modelo do “splash” desenvolvido em situações de pequena profundidade do líquido alvo ⁴.

Existem dois termos de energia potencial, que podem ser definidos, um devido à cavidade (U_1) e outro devido a coroa (U_2). Estes são:

$$U_1 = \frac{1}{2}(\pi g \rho D^2 R_c^2) \quad (1)$$

e

$$U_2 = \frac{1}{2}(\pi g H \rho D R_c^2) \quad (2)$$

onde R_c é o raio da cavidade, g é aceleração local devido à gravidade e H é a altura da coroa, produzida acima da superfície líquida ⁴.

A energia potencial de superfície devido à superfície líquida gerada (cavidade + coroa) é:

$$U_3 = 2\pi R_c D \sigma + 4\pi R_c H \sigma \quad (3)$$

Uma equação para a dissipação devido a energia viscosa na superfície líquida durante a formação da cavidade é:

$$W_1 = 4\pi \eta \int_0^t D (dR_c/dt)^2 dt. \quad (4)$$

O balanço de energia do "splash" é dado por:

$$E_d = U_1 + U_2 + U_3 + W_1 + E \quad (5)$$

onde E_d é a energia de impacto da gota e E é a energia restante, associada com outros processo dissipativos (que não estão sendo considerados).

A energia inicial total da gota abrange as energias cinética, potencial e de superfície. Assim, no instante do impacto, E_d é:

$$E_d = \frac{1}{2}(mv^2) + mgR_d + 4\pi R_d^2 \sigma \quad (6)$$

onde m é a massa da gota. Com este modelo simplificado é possível determinar como a energia da gota se distribui, deformando o fluido, produzindo as várias estruturas.

De forma geral, após o impacto da gota no líquido alvo, aproximadamente 40% desta energia é usada para formar a coroa, 15% usada para formar a cavidade no líquido alvo e 45% usada em outros processos dissipativos. Já para o caso desenvolvido em grandes profundidades, 35% da energia inicial é utilizada para formar a cavidade, 20% na formação da coroa, 20% na formação de um menisco na interface ar/corona e os restantes 25% em outros processos ⁴.

Grande parte dos estudos realizados se baseia principalmente:

- no número de gotas ejetadas ⁷;
- na altura máxima do jato Rayleigh ^{12, 26};
- na altura alcançada pelas gotas secundárias ²⁶;
- na distribuição de velocidade e direção das gotas secundárias ²⁷;
- na profundidade da cavidade ²⁸;
- no som do “splash” ^{29, 30};
- no limiar entre a formação ou não do “splash” ^{1, 30, 31}.

Este trabalho envolve o estudo sobre as modificações morfológicas nas estruturas do “splash” produzidas por pequenas quantidades de poli(óxido de etileno) de elevada massa molar média. Este polímero é o mais eficiente agente redutor de atrito hidrodinâmico conhecido que pode, conseqüentemente, produzir grandes alterações morfológicas. Em relação à literatura, existe apenas um breve relato sobre o uso de redutores de atrito hidrodinâmico nas estruturas de impacto ³². Neste trabalho, o enfoque está centrado na possibilidade de verificar o ponto de ejeção das gotas secundárias, os quais não são detectados na ausência do polímero. Portanto, consideramos que este Trabalho, que procura unir os dois estudos (sobre as estruturas de impacto e sobre a redução de atrito hidrodinâmico) é inédito. O fenômeno de redução de atrito hidrodinâmico está descrito no Capítulo 2 desta Tese.

CAPÍTULO 2

A redução de atrito hidrodinâmico.

Neste Capítulo será feita uma breve apresentação sobre os princípios fundamentais da reologia, de forma a poder compreender com maior clareza os conceitos envolvidos com a redução do atrito hidrodinâmico.

2.1) Conceitos fundamentais sobre dinâmica de fluídos.

Quando um fluído é deformado devido à aplicação de forças externas, efeitos de fricção são exibidos pelo movimento das moléculas relativas umas às outras. Considere uma fina camada de fluído entre dois planos paralelos (1 e 2) colocados a uma certa distância, dy , uma da outra (Figura 9) ^{33, 34}.

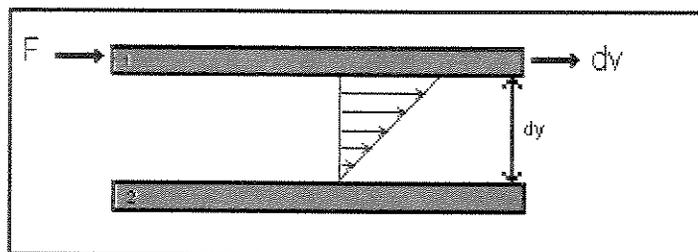


Figura 9 – Desenho esquemático mostrando o deslizamento das camadas devido a ação de uma força ³⁴.

No plano 1, inicialmente em repouso, é aplicada uma força (tensão) de cisalhamento, F . Instantaneamente, a camada 1 e aquelas adjacentes movem-se, ocasionado um perfil de velocidades. A camada 1 move-se a uma velocidade dv , relativa à camada estacionária (2) e, sobre condições estáveis, a força externa F é balanceada por uma força interna de mesma grandeza, devido à viscosidade do fluído. A tensão de cisalhamento por unidade de área (F/A), é proporcional ao gradiente de velocidade no fluído:

$$F/A = \tau \propto (dv/dy) \quad (7)$$

onde τ é a tensão de cisalhamento por unidade de área e dv/dy é o gradiente de velocidade (também chamado de taxa de cisalhamento) e A é a área da camada. A igualdade da equação 1 é obtida pela introdução do fator de proporcionalidade μ , que é o coeficiente Newtoniano de viscosidade:

$$\tau = \mu.(dv/dy) \quad (8)$$

O coeficiente de viscosidade μ é uma característica dos fluídos e seu valor é função da temperatura, pressão e taxa de cisalhamento ³⁴.

A força viscosa que atua entre duas camadas de fluído também pode ser expressa como uma taxa de transferência de momento entre as camadas. A tensão de cisalhamento definida pela equação 8 é uma força por unidade de área, e equivalente à taxa de mudança de momento por unidade de área. O movimento relativo das camadas adjacentes produz uma força de atrito entre as mesmas. Para compreendê-la, considere a camada 1 e a adjacente a esta, movendo-se com velocidades v e $v+dv$, respectivamente (Figura 10). As moléculas do fluído movem-se da camada 1 para a adjacente e desta para a 1. As moléculas que se movem de 1 têm menor momento que aquelas que se movem da camada adjacente. Desta forma, surge uma força de atrito entre as camadas ³⁴.

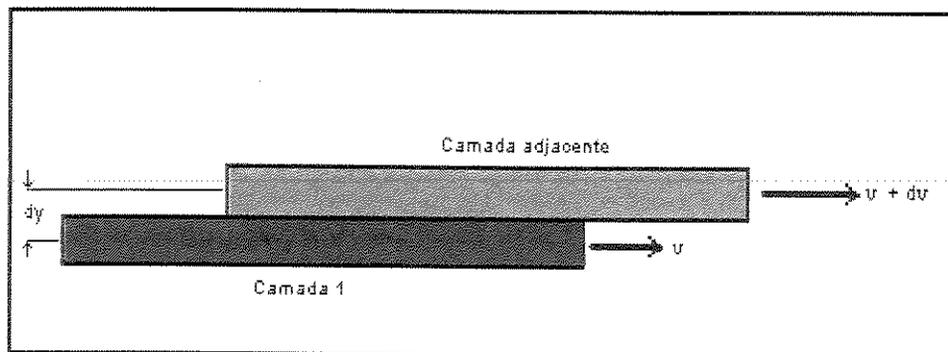


Figura 10 – Camadas adjacentes do fluído movendo-se à diferentes velocidades ³⁴.

A viscosidade pode ser definida qualitativamente como a propriedade de um material resistir a uma deformação e, quantitativamente, como a razão entre a tensão e a taxa de cisalhamento ^{33, 35, 36}.

Um fluido ideal é aquele que é incompressível e tem viscosidade zero, não oferecendo, portanto, resistência à tensão de cisalhamento. Muitos problemas de fluido são simplificados assumindo que o fluido é ideal. Todos os fluidos reais tem viscosidade finita e, por isso, são também chamados de fluidos viscosos. Fluidos não-viscosos são aqueles que tendo viscosidade zero, podem ou não ser incompressíveis.

Fluidos reais são divididos em duas classes: fluidos Newtonianos e não-Newtonianos (Figura 11). Fluidos Newtonianos são aqueles para o qual o coeficiente de viscosidade é independente da taxa de cisalhamento, isto é, o coeficiente de viscosidade, μ , na equação 8 é uma constante para o fluido Newtoniano à uma dada temperatura e pressão. Nos fluidos não-Newtonianos a viscosidade à uma dada pressão e temperatura é uma função da taxa de cisalhamento. Estes fluidos podem ser classificados de acordo com a maneira com a qual a viscosidade varia com a taxa de cisalhamento. Plásticos de Bingham algumas vezes chamados plásticos ideais, podem resistir a uma certa tensão de cisalhamento até um determinado valor, quando então se deformam. Materiais pseudoplásticos são aqueles no qual o coeficiente de viscosidade diminui com a taxa de cisalhamento mas o material se deforma logo que a tensão de cisalhamento é aplicada. Materiais dilatantes são aqueles no qual o coeficiente de viscosidade aumenta com a taxa de cisalhamento ^{33, 34, 36}.

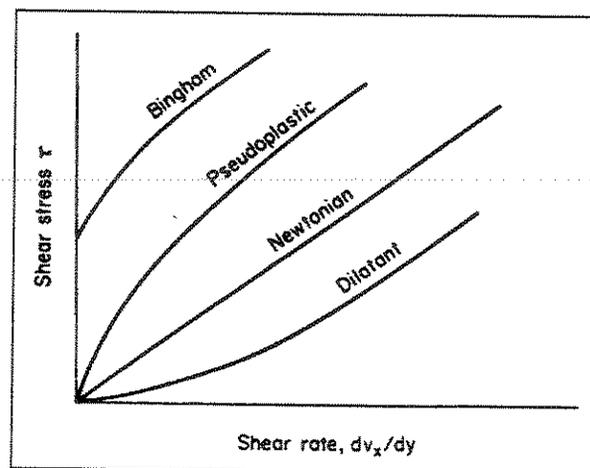


Figura 11 – Diagramas de tensão de cisalhamento em função da taxa de cisalhamento para fluidos Newtonianos e não-Newtonianos ³⁶.

A observação do movimento de fluídos no interior de condutores pode indicar a existência de dois tipos diferentes de movimento. Imaginemos o escoamento de um líquido num tubo de vidro conforme está esquematicamente apresentado na Figura 12.

Dentro do tubo, quando a velocidade do líquido é pequena, as partículas seguem trajetórias bem definidas, constituídas por linhas muito regulares, praticamente imóveis no interior da massa em movimento. É possível a visualização deste tipo de escoamento injetando uma solução colorida de densidade praticamente igual ao do líquido em movimento. Todas as partículas que passam por um ponto A seguem a mesma trajetória. Neste caso, diz-se que o líquido está fluindo em um regime de escoamento laminar ³⁷.

Para velocidades de escoamento elevadas, à curta distância da introdução da solução colorida, todo o líquido se tornará colorido, em consequência da difusão do corante no interior do líquido. O movimento não se processa mais por filetes regulares e paralelos, bem individualizados no interior da massa, mas por trajetórias irregulares, tortuosas e continuamente variáveis, em consequência da chamada agitação hidráulica ou turbulência. Estes movimentos irregulares são classificados como secundários e se superpõem ao movimento geral de translação do fluído. Neste caso, diz-se que o líquido está fluindo em um regime de escoamento turbulento ³⁷.

Reynolds demonstrou em 1883 que, nas mesmas circunstâncias qualitativas de escoamento, pode ocorrer um ou outro regime, dependendo de alguns elementos característicos do movimento (velocidade, viscosidade, diâmetro do condutor) estarem abaixo ou acima de certos valores críticos. O número adimensional de Reynolds, Re , pode ser determinado para escoamentos em tubos circulares pela equação:

$$Re = vd\rho / \mu \quad (9)$$

no qual d é o diâmetro do conduto, v é a velocidade de translação da massa líquida e ρ é a densidade do fluído ^{38, 39}.

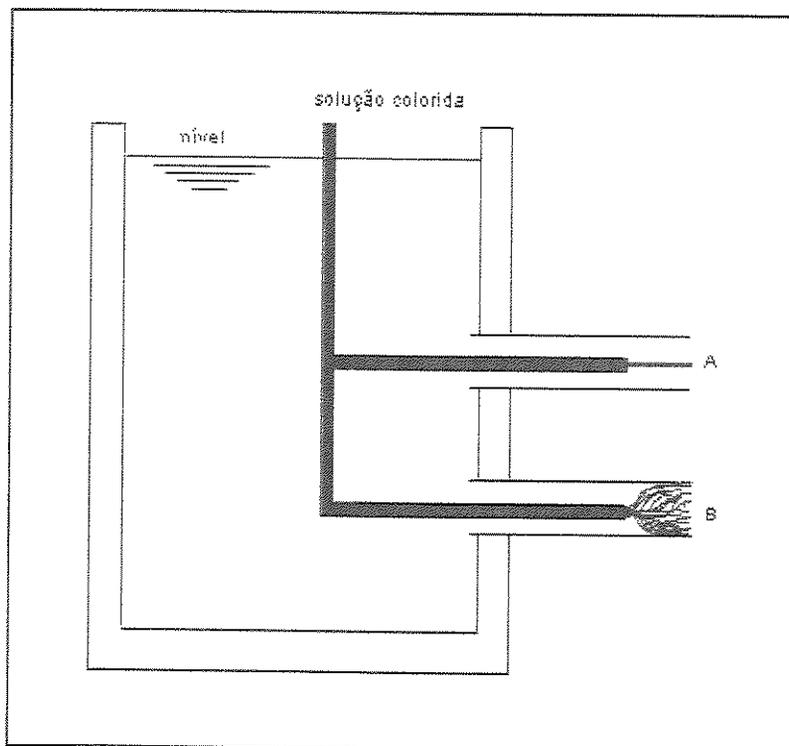


Figura 12 –Diagrama esquemático representando os escoamentos laminar e turbulento ³⁷.

Para Re variando no intervalo de 0-2000, o regime é sempre laminar. Para $Re > 12000$, o regime é sempre turbulento; para $2000 < Re < 12000$ é possível a existência de um ou outro regime, na dependência de certas peculiaridades do escoamento, o que é denominado de região de transição ^{37, 38}.

No caso do impacto de gotas contra a superfície de líquidos, Re também pode ser determinado, a partir da equação 10 ^{3, 4}:

$$Re = vR_d\rho / \eta \quad (10)$$

Outros parâmetros adimensionais também são utilizados para definir as condições em que o impacto se desenvolve (Figura 13). São eles o número de Froude $[v^2/(gR_d)]$ e o número de Weber $(\rho R_d v^2/\sigma)$, sendo estes medidas das razões das forças inerciais relacionadas com a gravidade e a viscosidade, respectivamente ²⁻⁴.

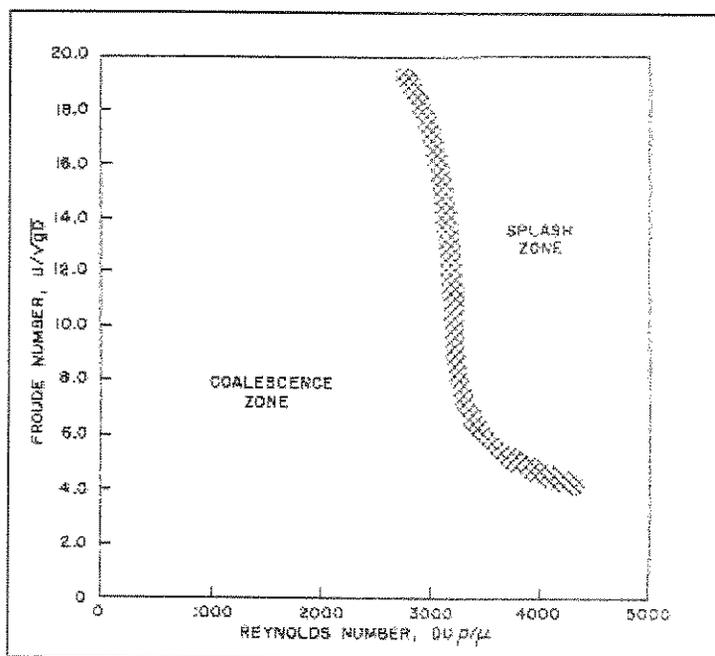


Figura 13 – O limiar entre a zona de ocorrência do “splash” e da coalescência para uma gota d’água com relação aos números adimensionais de Reynolds e de Froude ².

2.2) O efeito Toms.

Quando um fluido se move, relativo à uma superfície sólida, uma força é exercida sobre a superfície na direção do movimento, que é chamada força de atrito. O atrito resulta em uma correspondente dissipação de energia e muito têm-se feito para minimizar este efeito.

Em 1946, B.A. Toms estava investigando o mecanismo de degradação de soluções poliméricas de alta massa molecular submetidas à escoamentos vigorosos, e observou que uma solução de poli(metil metacrilato) em monoclorobenzeno requeria menor gradiente de pressão do que o solvente puro para produzir a mesma taxa de escoamento, para regimes turbulentos. Esta foi a primeira demonstração sistemática da redução de atrito hidrodinâmico e o fenômeno passou a ser conhecido por efeito Toms ^{39, 40}. Existem relatos do século passado, sobre alterações de escoamento (aumentos de até 10%) em bombeamento de água. Hoje sabe-se que este aumento do escoamento é devido

a presença de pequenas quantidades de substâncias poliméricas, produzidas por algas³⁹.

O fenômeno de redução de atrito pode ser definido como qualquer modificação em um sistema fluido com escoamento turbulento que resulta em uma diminuição na taxa normal de perda de energia friccional, quando a este fluido é adicionado uma substância redutora de atrito.

Diversos sistemas solvente/aditivo têm demonstrado redução de atrito hidrodinâmico quando estão sob escoamento turbulento, incluindo soluções poliméricas diluídas, surfatantes e sistemas micelares e suspensões de partículas insolúveis, como fibras. As soluções poliméricas constituem o sistema mais estudado e empregado e, basicamente, qualquer polímero solúvel de alta massa molar produz redução na resistência friccional. Poli(acrilamida), poli(óxido de etileno), poli(estireno), polímeros naturais, como goma guar e DNA e biopolímeros modificados, como carboximetilcelulose e hidroxietilcelulose são alguns dos polímeros estudados^{36, 40 – 43}.

Em um sistema polímero/solvente, a obtenção da máxima redução de atrito no fluido está relacionada com uma combinação específica de condições de escoamento e de concentração e massa molecular do polímero. Os polímeros mais eficientes apresentam moléculas flexíveis e lineares e estão presentes em concentrações muito baixas (ppm). Entre eles, o poli(óxido de etileno), PEO, é o mais estudado e aplicado, por apresentar uma máxima redução de atrito na ordem de 70-80%, sendo constituído por uma estrutura molecular não-iônica com unidades $-(CH_2-CH_2-O)-$, com boa solubilidade tanto em água como em solventes orgânicos^{44 – 46}.

A redução de atrito em tubos circulares pode ser apresentada convenientemente em termos do fator de fricção de Fanning, equação 11:

$$f = 1/4 (D/L) \cdot [P_0 - P_L / (1/2 \rho \langle v \rangle^2)] \quad (11)$$

onde $P_0 - P_L$ é a queda de pressão ao longo de um tubo de comprimento L e $\langle v \rangle$ e a velocidade média sobre uma seção do tubo⁴³.

As medidas de pressão, neste caso, são obtidas por transdutores de pressão, instalados em dois pontos ao longo do tubo pelo qual o fluido passa (Figura 14).

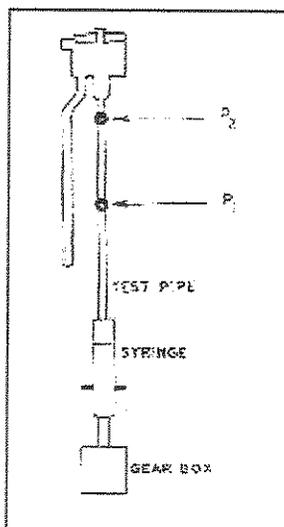


Figura 14 –Esquema de um Reômetro de escoamento turbulento para medidas de redução de atrito. P_1 e P_2 são os transdutores de pressão ⁴⁵.

Há várias maneira possíveis de representar os dados de redução de atrito, mas somente através de gráficos do fator de fricção, por exemplo, em termos do número de Reynolds do solvente, que a redução de atrito é imediatamente revelada. Este tipo de gráfico mostra um aumento do atrito na região laminar devido ao aumento da viscosidade da solução. Na região turbulenta o fator de fricção se reduz destacadamente para a solução de PEO (Figura 15) ³⁸.

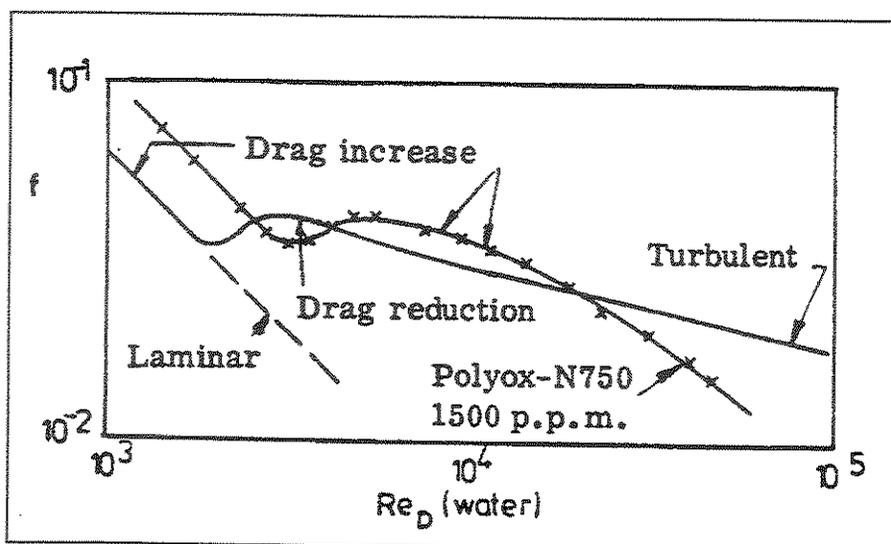


Figura 15 – Fator de fricção versus o número de Reynolds para solução de PEO N750, 1500ppm, em um tubo ³⁸.

Também pode-se graficar a porcentagem de redução de atrito, obtida da equação 12, em função de alguma variável de interesse:

$$\% \text{ fricção} = (1 - \Delta P_p / \Delta P_s) \times 100 \quad (12)$$

onde ΔP_p é a pressão causada pela solução e ΔP_s é a pressão causada pelo solvente puro. Neste gráfico, a porcentagem de fricção torna-se uma assíntota quando é alcançado o máximo valor da redução de atrito ^{38, 45}. Na Figura 16 está apresentado o resultado da porcentagem de redução de atrito em função da concentração e massa molar de PEO.

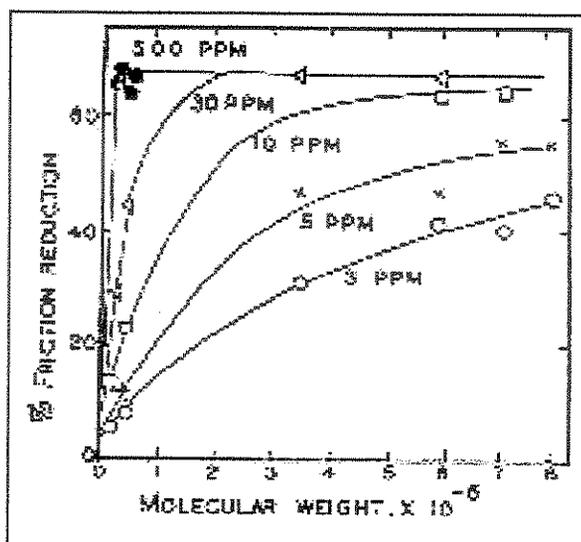


Figura 16 – Redução de fricção em função da concentração e massa molar de PEO em água ⁴⁵.

Outra maneira de apresentar a redução de atrito é com gráficos de taxa de escoamento em função da taxa de cisalhamento (na parede do tubo, Figura 17) ⁴⁷. Neste caso, no regime laminar a curva apresentada pela água e pela solução polimérica (1,03ppm de PEO) são idênticas. Na região de transição do regime laminar para a região turbulenta, há uma diminuição da taxa de escoamento para a água. No entanto, para a solução polimérica, para uma mesma taxa de cisalhamento, a taxa de escoamento é maior e há uma faixa adicional de escoamento laminar, chamada pseudo-laminar. Isto se deve a uma menor perda de carga (energia), ocasionada pela presença do polímero em solução.

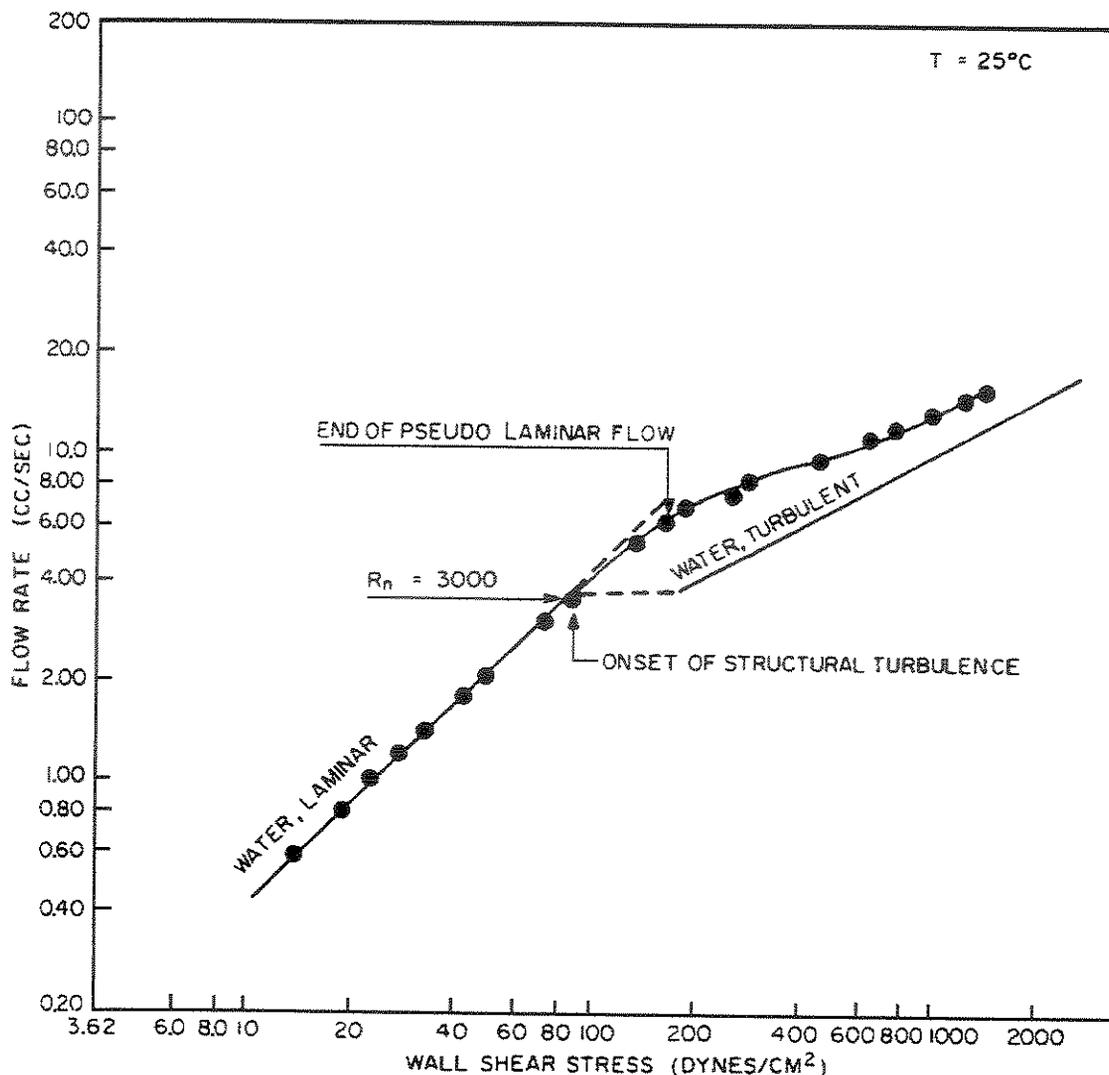


Figura 17 – Gráfico da taxa de escoamento em função da tensão de cisalhamento na parede do tubo, para água pura e para solução aquosa contendo 1,03 ppm de PEO ⁴⁷.

Vários modelos são utilizados para explicar a redução de atrito, os quais levam em consideração parâmetros moleculares, como massa molecular, raio de giração, volume hidrodinâmico e rigidez da cadeia e agregação e interações entre moléculas do polímero e do solvente, assim como propriedades relacionadas ao escoamento que são afetadas pela presença do polímero, como cavitação, transferência de calor e de massa e turbulência ⁴⁸⁻⁵⁰.

O modelo proposto por Virk ⁵¹ sugere que o ponto em que a fricção para a solução polimérica é menor do que para o solvente puro (“onset point”) esteja relacionado ao raio de giração do polímero (R_g) conforme a equação 13:

$$R_g^3 \tau_w^* = \Omega_t \quad (13)$$

onde τ_w^* é a tensão de cisalhamento na parede do tubo, Ω_t é uma constante única para cada sistema polímero/solvente. A magnitude do efeito de redução de atrito pode ser verificado nos gráficos de $f^{1/2}$ em função de $Re f^{1/2}$. Para a solução polimérica ocorre um aumento na inclinação da curva (aproximadamente linear) em relação ao solvente puro, e Virk define este aumento como o parâmetro δ , procurando relacioná-lo com o efeito da concentração, C , e massa molar do polímero, M_a , propondo uma relação entre δ e o número de ligações da cadeia polimérica (N), dado pela equação 14:

$$\delta = KN^{3/2}(C/M_a)^{1/2} \quad (14)$$

O modelo desenvolvido por Khon ⁵² prevê que a redução de atrito será mais eficaz se a macromolécula conseguir dissipar a energia dos vórtices formados no fluido em escoamento turbulento. O efeito dependerá da capacidade com que a macromolécula armazena energia, equação 15, afetando o balanço de energia do escoamento turbulento:

$$w = (CRT/2M_a) \sum_{i=1 \rightarrow S} \ln[1 + (\gamma\tau_i)^2] \quad (15)$$

onde w é a quantidade de energia armazenada por metro, C é a concentração do polímero, R é a constante dos gases, T é a temperatura, M_a é a massa molecular da unidade de repetição, S é o número de segmentos por moléculas, γ é a taxa de cisalhamento e τ_i o tempo de relaxamento do i -ésimo modo de deformação da cadeia do polímero.

Outro modelo, apresentado por Ryskin ^{42, 52}, se baseia na idéia de que a extensão macromolecular esteja envolvida na redução de atrito hidrodinâmico. Ryskin prevê que as macromoléculas, sob forma espiralada e compactada quando a solução está em repouso, tornam-se alongadas, principalmente na sua parte central, pela ação do movimento do fluido, ocasionando um maior grau de alinhamento na direção do escoamento (Figura 18).

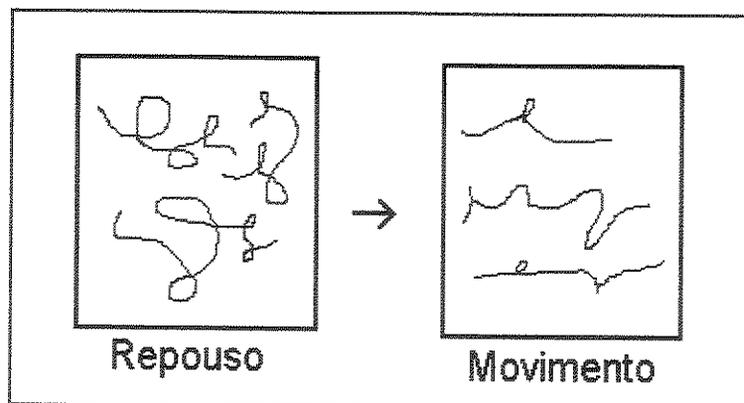


Figura 18 – Representação esquemática da deformação da cadeia polimérica induzida por um escoamento.

Quando o escoamento é diminuído, a macromolécula retoma sua conformação original. Este estiramento (como um “iô-iô”), causa um aumento na viscosidade local, ξ_{turb} . A magnitude deste aumento é dado pela equação 16:

$$\xi_{\text{turb}} = 0.05\alpha^3 N_A a^3 N_p C / M_a \quad (16)$$

onde N_A é o número de Avogadro, a é o comprimento de uma unidade de repetição, α é a razão entre o comprimento da cadeia em uma dada situação de escoamento e o comprimento da mesma totalmente estendida e N_p é o grau de polimerização.

Ryskin obtém um bom ajuste do modelo à dados experimentais para vários sistemas poliméricos, no entanto, α é um parâmetro de ajuste, que não pode ser determinado experimentalmente. O modelo também é específico para a redução de atrito hidrodinâmico que ocorre em sistemas poliméricos, não podendo ser estendido a outros sistemas, como por exemplo, micelares.

Outros modelos são ainda propostos, mas nenhum deles é suficiente para explicar em sua totalidade a redução de atrito hidrodinâmico, e muitos consideram que mais de um mecanismo atue ou pode atuar no processo.

O fenômeno de redução de atrito é extremamente interessante, não somente devido a seu potencial em aplicações de engenharia mas também para examinar os fundamentos da dinâmica dos fluídos, que ajudam a elucidar um comportamento turbulento. Áreas especializadas de aplicação para este fenômeno

podem ser encontradas no campo da pesquisa de óleo cru, em escoamentos tubulares de linha, em extinção de incêndio, no transporte hidráulico de partículas sólidas suspensas, em sistemas de aquecimento e resfriamento, em sistemas de irrigação e fornecimento de água, etc., outra possível aplicação está no tratamento e prevenção de artérias bloqueadas ^{39, 53, 54}.

Uma das mais significativas aplicações em larga escala, envolve o uso de redutores de atrito no bombeamento de petróleo entre as baías Prudhoe e Valdez em uma distância de 1287 km através do Alasca (Figura 19) ³⁹.

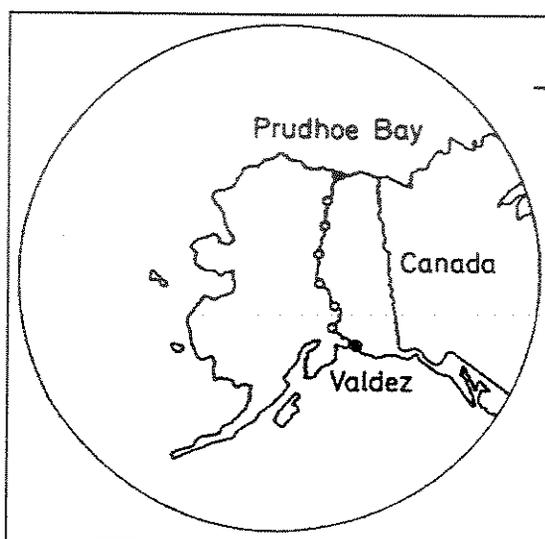


Figura 19 - Linha de bombeamento de petróleo no Alasca, onde é empregado redutores de atrito hidrodinâmico ³⁹.

Apesar do estudo do efeito Toms já ter praticamente 50 anos, muitos aspectos químicos e hidrodinâmicos permanecem desconhecidos e o estudo da redução de atrito hidrodinâmico constitui-se um importante tópico a ser pesquisado.

CAPÍTULO 3

Parte Experimental

3.1) Materiais.

- água destilada e deionizada;
- poli(óxido de etileno), PEO (Aldrich, massas molares médias MM: 100mil, 600 mil, 900 mil, 4 milhões e 8 milhões/g.mol⁻¹);
- corantes (alaranjado de metila, Aldrich; violeta de metila).

3.2) Métodos.

3.2.a) Preparação de solução de PEO.

As soluções de PEO foram preparadas de acordo com o método sugerido por Little⁵⁵, da seguinte maneira: após a pesagem em balança analítica, a massa de PEO foi espalhada sobre a superfície da água contida num Béquer e seguidas 3 horas, a solução foi gentilmente homogeneizada, em intervalos regulares, até completadas 24 horas sendo, então, transferida para um balão volumétrico. Após completa diluição foi novamente homogeneizada e utilizada após 1 hora. Havendo a necessidade de estocagem da solução preparada, esta foi mantida em geladeira, sendo que seu uso não excedeu mais do que 2 dias após sua preparação.

3.2.b) Construção de um dispositivo para a geração das estruturas de impacto.

Grande parte do trabalho realizado esteve envolvido com a construção de um dispositivo que permitisse a formação do “splash” com o máximo de reprodutibilidade. Um esquema deste dispositivo está apresentado na Figura 20.

A altura de queda da gota pode ser variada utilizando uma base magnética Mitutoyo (7) que fica presa a uma régua metálica que possui uma altura máxima de 2m (5). Esta régua metálica consiste de um perfil de ferro em forma de T escalado, onde foi colada uma fita métrica. Este perfil está soldado em uma chapa

de ferro quadrada de dimensões 30 x 30 x 1cm sendo, portanto, pesada o suficiente para manter o perfil na posição vertical e reduzir vibrações (esta chapa é a base da régua). Esta base, pode ser nivelada através de 4 parafusos colocados em suas extremidades (1).

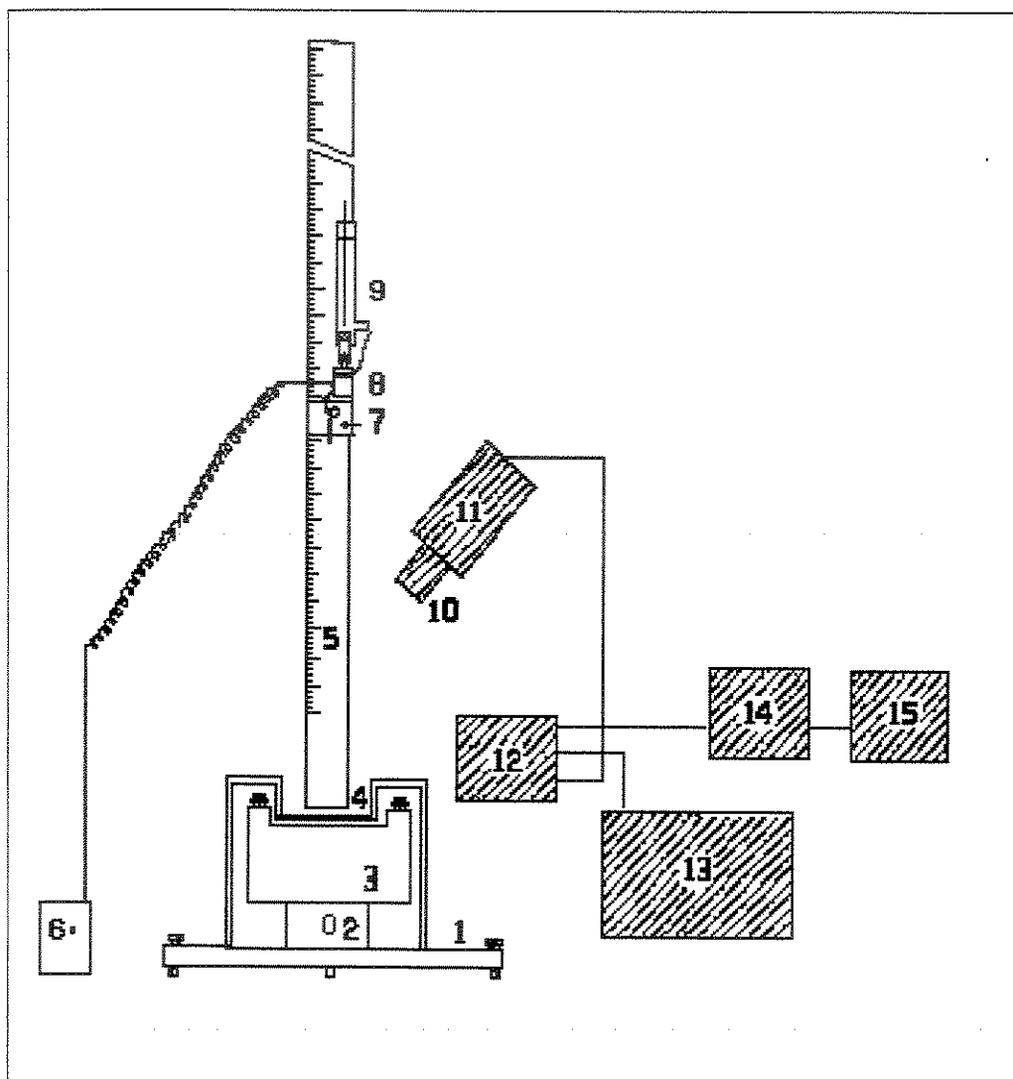


Figura 20 – Esquema do dispositivo para o estudo do impacto de gotas (1-9) em conjunto com o equipamento para a captura de seqüência de imagens (10-15).

Sobre a base magnética Mitutoyo, foram fixados um Frasco de Mariotte (9), uma válvula solenóide (Cole Parmer Instrument Co., 3 vias, 1,5 Watts, 30Psi) (8) e um tubo de vidro na saída sendo estes interligados entre si por tubos de Teflon

($\varnothing=0,5\text{mm}$). A válvula solenóide pode ser controlada através de um circuito temporizador (ver Apêndice 1) (6), alimentado por uma fonte $\pm 12\text{V}$ e 500mA .

O frasco de Mariotte (Figura 21) é um sistema de alimentação gravitacional de líquidos, de fácil elaboração e manuseio, mas pouco conhecido. Ele consiste de um frasco de vidro de forma alongada e de pequeno diâmetro interno, adequado para manter um escoamento pequeno e constante. Sobre este sistema se estabelece uma linha isobárica através da introdução de um tubo de vidro de pequeno diâmetro no líquido contido no frasco. Isto elimina a possibilidade do escoamento variar conforme a coluna de líquido diminui permitindo, assim, uma vazão constante e precisa, além de ser isento de pulsações ⁵⁶.

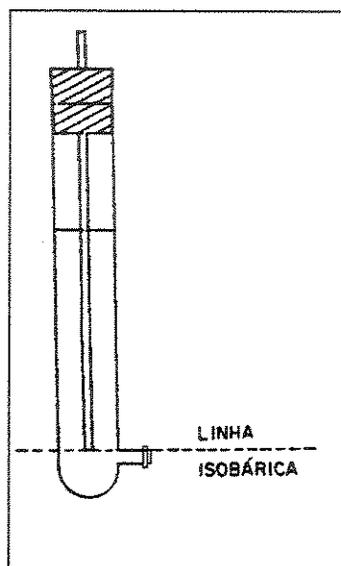


Figura 21 – Ilustração do frasco de Mariotte ⁵⁶.

Para facilitar o manuseio (variações na altura do conjunto) a ligação entre a válvula e o circuito foi feita utilizando um fio espiralado de telefone, de grande extensão.

Na base da régua metálica, sobre a chapa de ferro, foi montada a câmara de impacto que consiste de uma câmara de alumínio termostatizada (3) presa sobre um elevador com parafuso micrométrico (2) dentro do qual está colocada uma placa de Petri. Dentro desta placa de Petri se encontra uma chapa de alumínio (4) que se mantém suspensa através de sua fixação em braços de aço,

presos também na base da régua. Isto torna possível variar a profundidade onde a gota irá cair. Esta profundidade foi medida utilizando um paquímetro manual Mitutoyo, específico para medidas de profundidades.

A temperatura foi mantida constante utilizando um banho termostaticado, à $(25,0 \pm 0,5)^\circ\text{C}$, durante todos os estudos.

3.2.c) Filmagem das estruturas de impacto.

Foi utilizada uma câmera Sony CCD-IRIS (modelo DXC-107A) (11), tendo acoplada uma lente Vivitar 100mm 1:3:5 Macro Focusing Lens (10). As imagens foram obtidas em duas posições:

- de topo para o evento;
- de frente para o evento.

As filmagens foram obtidas no módulo “shutter speed” = 1/10000s e velocidade de 30 quadros/s (ver Apêndice 2). Foram utilizadas duas lâmpadas de Halogênio de 300W direcionadas para a câmera de impacto (estas lâmpadas não são apresentadas na Figura 20).

A câmera está ligada a um adaptador Sony (modelo CMA-D7) (12) e, posteriormente, ao vídeo cassete (Panasonic SVHS Ag-1980) (14) e a um monitor (13) onde a imagem pode ser gravada e assistida.

Para cada parâmetro de interesse, foi obtido um número médio de 30 imagens do impacto de gotas que, posteriormente, foram selecionadas para serem usadas nas obtenções dos parâmetros morfológicos médios.

3.2.d) Digitalização e tratamento de imagens.

Após a gravação da imagem em fita magnética, o vídeo cassete possibilita o “congelamento” de uma imagem desejada na tela do monitor. Desta forma, estando a imagem selecionada ela é, então, digitalizada, usando uma placa de digitalização Media Cybernetics e arquivada no computador (15). Os parâmetros morfológicos podem ser obtidos utilizando o software Image Pro-Plus 3.0.

3.2.e) Forma de análise dos resultados.

Será apresentado o procedimento usado para medir a altura do jato Rayleigh quando este atinge sua altura máxima. Usando o software de tratamento de imagem é possível determinar a altura do jato para os casos da solução polimérica e do solvente puro, como mostra a Figura 22. Sempre é utilizada uma escala externa para fazer a calibração das imagens.

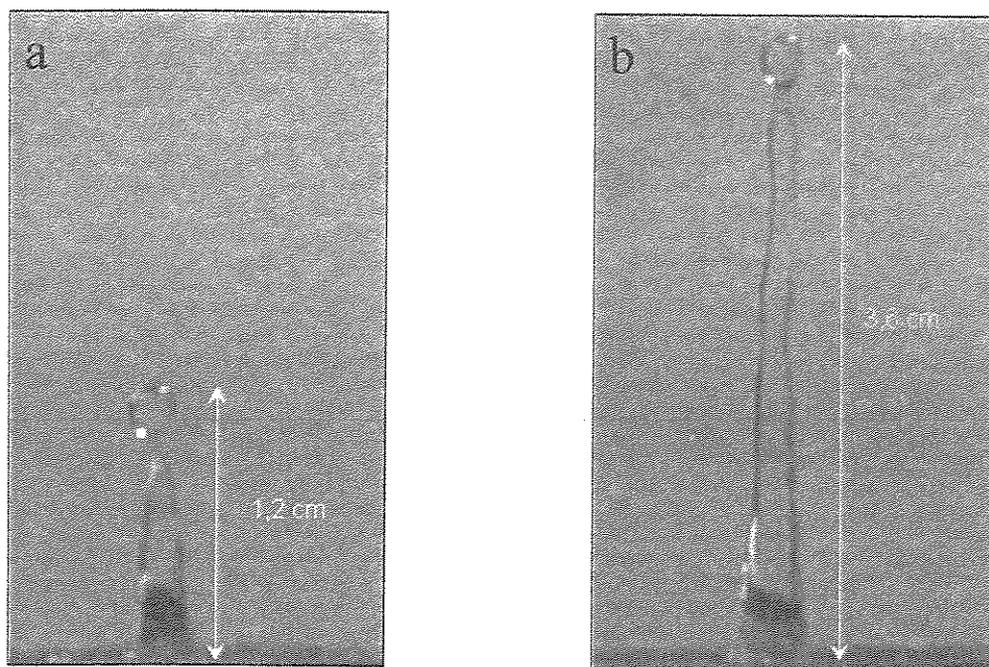


Figura 22 – O jato Rayleigh para (a) água e (b) solução de PEO (4 milhões, 50ppm).

3.2.f) Determinação das propriedades químicas.

As propriedades físico-químicas das soluções foram estudadas utilizando:

- um picnômetro de 25mL (20°C), Hermex[®], para medidas de densidade;
- um viscosímetro de Ostwald 50, Vidrolabor[®], para medidas de viscosidade;
- um tensiômetro Sigma 701 System Unit, para medidas de tensão superficial.

CAPÍTULO 4

Resultados e Discussão

4.1) Estudos relacionados ao dispositivo utilizado para a geração e filmagem das estruturas de impacto.

4.1.a) Estudo sobre a reprodutibilidade da gota.

A primeira preocupação com relação ao dispositivo apresentado na Figura 20 está relacionada com a reprodutibilidade da gota formada. Nos estudos de impacto é fundamental que as características da gota sejam muito bem controladas. Utilizamos a massa da gota para avaliar os parâmetros experimentais em questão; para tanto acumulamos em torno de 10 gotas em um frasco receptor e, em seguida determinamos a massa das gotas em uma balança analítica. Um primeiro ponto que foi analisado se refere à influência do volume de líquido presente no reservatório (frasco de Mariotte). Para determinar se a altura da coluna de líquido estoque presente no frasco possuía alguma influência sobre a vazão, variou-se a altura da coluna de líquido. Uma leve variação de 0,1-0,2cm não provoca qualquer modificação na vazão. Mesmo assim, uma preocupação tomada durante os estudos foi não permitir que a altura da coluna do líquido diminuísse mais que 0,5cm, o que é conseguido por reposição de líquido no frasco de Mariotte.

O controle da válvula solenóide, responsável pela liberação da gota, foi realizado através de um circuito temporizador (Apêndice 1), o qual possui um resistor variável (do tipo Trimpot) que modifica o tempo de abertura/fechamento. Foram realizados estudos para determinar o melhor tempo de abertura que gerasse uma primeira gota espontaneamente (definida fundamentalmente pela geometria do tubo).

Primeiramente tentou-se estabelecer, através do Trimpot, um tempo de abertura específico de modo que se gerasse uma única gota para cada intervalo de abertura/fechamento automático da válvula. Isto foi conseguido, mas o desvio

apresentado para a massa de 10 gotas coletadas (juntamente) e pesadas foi muito alto ($\pm 40\%$). Os fatores que poderiam estar afetando a formação da gota, produzindo a elevada irreprodutibilidade podem estar relacionados com:

- 1- a ação mecânica do funcionamento da válvula solenóide, gerando uma perturbação na gota, fazendo com que ela se desprenda do tubo irregularmente;
- 2- o líquido residual deixado por uma gota no tubo, o qual pode ser acoplado a uma outra gota;
- 3- irregularidades no tempo de abertura da válvula solenóide.

Para eliminar o primeiro problema, a geração da gota passou a ser realizada manualmente produzindo (pelo fechamento do circuito) uma única gota e, logo após a sua queda, o circuito é aberto. Assim, somente seria produzida outra gota quando o circuito fosse fechado novamente; a válvula é mantida aberta até que a gota se desprenda do tubo. Quanto ao segundo problema, passou-se a selecionar as gotas que seriam coletadas. Neste caso, uma gota produzida na sequência de uma outra que apresentou alguma irregularidade foi descartada. Sobre o terceiro problema, realizou-se um estudo usando diferentes valores para o tempo de abertura da válvula solenóide. Observou-se que o tempo de abertura da válvula não tem grande influência sobre a massa da gota produzida. Fundamentalmente, a geometria do tubo e a densidade e viscosidade do líquido é que definem a massa da gota produzida. Foi realizado um estudo estatístico para avaliar a massa da gota produzida pelo procedimento manual e obteve-se uma massa de $0,025 \pm 0,002\text{g}$, apresentando assim um desvio aceitável. Este foi, então, o método adotado para a geração de gotas nos estudos.

4.1.b) Influência da altura de queda da gota na posição de impacto.

O dispositivo construído para os estudos de impacto permitem variações de alturas de queda de, até aproximadamente, 2 metros. Durante a trajetória da gota em queda livre, esta pode ser afetada por correntes de ar, provocando o desvio dos pontos de impacto. Neste caso deveríamos adotar procedimentos para evitar ou reduzir este problema. Foram realizados alguns estudos, e determinadas as posições de impacto da gota, para diferentes alturas de queda.

Para maiores alturas de queda da gota, foi observado que esta caía em uma posição aleatória no líquido alvo, algumas vezes no centro da placa de alumínio e em outras em posições próximas a este centro. Esta aleatoriedade pode ser explicada principalmente por dois fatores:

- 1 - correntes de ar no local de realização do experimento;
- 2 - saída da gota com ângulos ligeiramente diferentes da ponta do tubo de Teflon.

Para determinar se este problema de aleatoriedade de local de impacto iria afetar os estudos a serem realizados, selecionou-se as primeiras imagens do toque da gota no líquido alvo, para uma altura de $135,5 \pm 0,5$ cm e observou-se a posição destas imagens dentro do campo de filmagem.

Observou-se que todas as imagens produzidas estão dentro de um campo de filmagem muito próximo; sempre dentro do campo de enquadramento da câmera. Este resultado mostrou que não seria necessária a proteção da trajetória da gota (por exemplo colocar um tubo de vidro) que acarretaria alguns inconvenientes, como dificuldade de manipulação e limitação espacial. De qualquer forma, durante os experimentos, as portas do Laboratório foram mantidas fechadas, para minimizar as correntes de ar.

4.1.c) Obtenção das imagens do "splash".

Na obtenção das imagens do "splash" utilizando a câmera CCD nos defrontamos com o problema de tempo entre a captura de imagem feita pela câmera e o tempo de ocorrência do fenômeno.

Utilizando o maior "shutter speed" disponível da câmera CCD que é de $100 \mu\text{s}$ ($1/10000\text{s}$) foi possível "congelar" imagens e transmiti-las numa velocidade de 30 quadros/s (velocidade constante de transferência de quadros, independente do "shutter speed"), isto é, em intervalos de 33ms (ver Apêndice 2) entre duas imagens consecutivas. Como o "splash" ocorre em dezenas de milisegundos, não é possível ter uma seqüência completa deste fenômeno para uma única gota. Para solucionar este problema, foram realizadas filmagens do impacto para várias gotas e depois se faz uma montagem entre as várias imagens, tendo-se com isto,

uma seqüência completa. Um exemplo desta metodologia está apresentado nas Figuras 23 e 24.

Apesar do método adotado ser conveniente para se apresentar toda a evolução do fenômeno do “splash”, surgem dificuldades quando se realiza comparações entre as imagens (no caso em questão, do solvente e da solução de PEO), que permitem a obtenção dos parâmetros morfológicos. Esta dificuldade poderia ser contornada se fosse utilizado um dispositivo sincronizador que permitisse obter a imagem do “splash” apenas no instante desejado, pelo engatilhamento da câmera.

Nos estudos realizados, as comparações e classificações das imagens são meramente visuais. Realiza-se, então, o estudo de um grande número de estruturas de impacto, selecionando as imagens que estejam aproximadamente no mesmo instante de impacto. À partir destas imagens são obtidos os valores dos parâmetros morfológicos de interesse e, posteriormente, as médias.

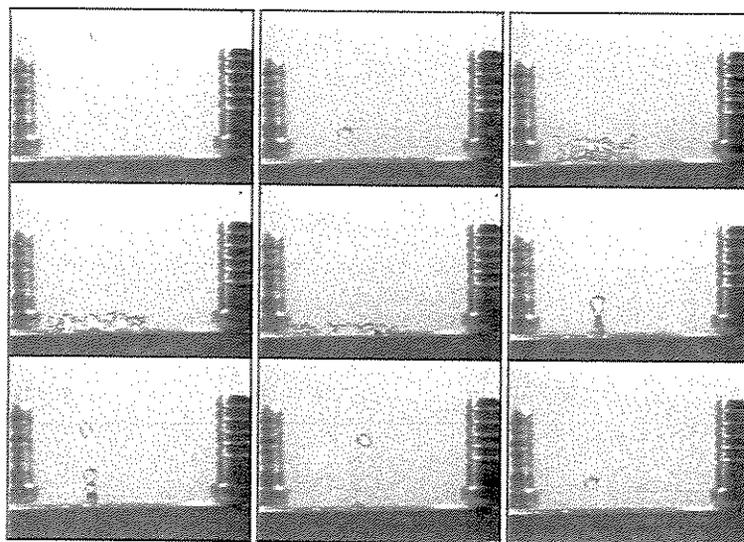


Figura 23 – Seqüência do “splash” da gota d’água, com a câmara posicionada de frente para o evento.

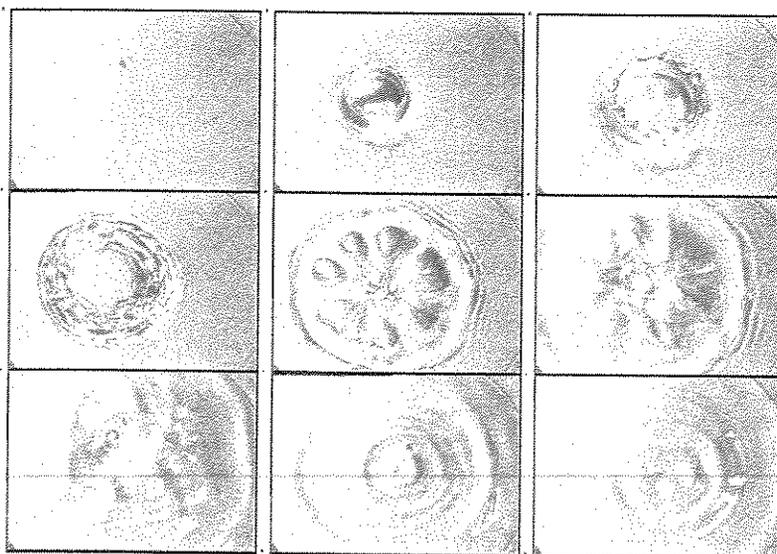


Figura 24 - - Seqüência do “splash” da gota d’água, com a câmara posicionada de topo para o evento.

4.2) A oscilação da gota.

Ao desprender da ponta do tubo a gota se deforma, oscilando entre as formas prolato, esférica e oblato (Figura 25).

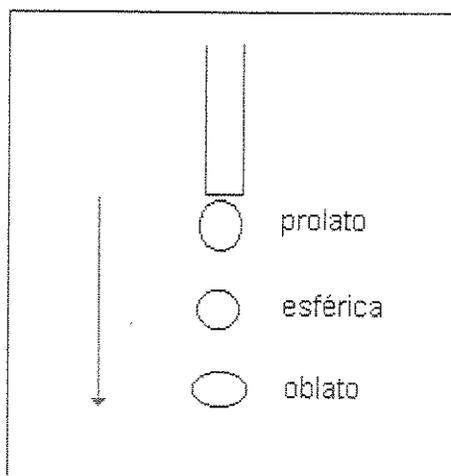


Figura 25 – A oscilação da gota nas formas prolato, esférica e oblato.

Estudos sobre o impacto de gotas, especialmente aqueles que tratam da coalescência de gotas, demonstram que a oscilação da gota entre suas formas oblato, esférica e prolato influencia grandemente este fenômeno: a coalescência e a formação do anel em forma de vórtice são maximizadas quando a gota tem uma forma esférica ou próxima à esférica^{7, 57, 58}. Ao atingir a superfície do líquido alvo, a área de impacto pode variar dependendo da forma da gota naquele instante. A área de impacto da gota na forma prolato é menor que a das formas esférica e oblato.

Para determinar se esta oscilação teria influência no fenômeno do “splash”, fez-se este estudo, onde as imagens da gota em queda livre foram obtidas com a câmera posicionada frontalmente, a 12,0-14,0cm acima do local de impacto. Filmando gotas para alturas de queda de 98,0, 118,0 e 138,0cm, não se observou nas imagens qualquer oscilação visível da gota, estando esta sempre na forma esférica (Figura 26). Para a altura de queda de 50,0cm, observa-se claramente a oscilação da gota nas três formas anteriormente mencionadas (Figura 27).

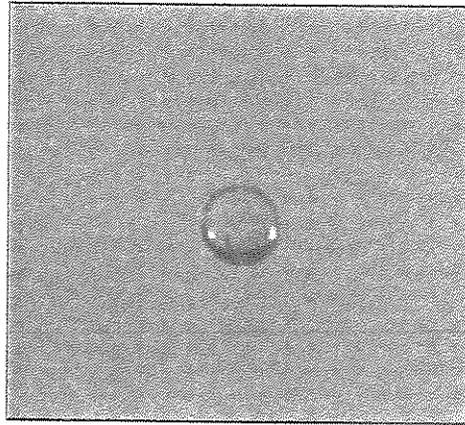


Figura 26 – Gota em queda livre na forma esférica.

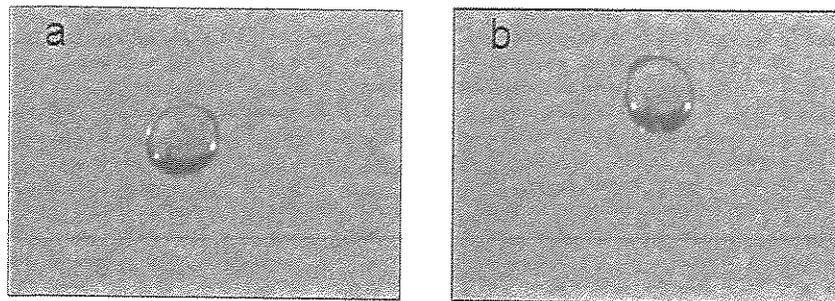


Figura 27 – Oscilação da gota na forma (a) oblato e (b) prolato, desprendendo de uma altura de 50,0cm.

A razão para esta oscilação é a mudança no campo de forças de velocidade interno da gota. A tensão superficial tende a manter a gota na forma esférica, ao mesmo tempo que o movimento interno, devido ao desprendimento da gota, a faz oscilar. Para alturas de queda pequenas, a energia superficial da gota é a principal fonte de energia para formar a estrutura de impacto: a coalescência e posterior formação de um anel em forma de vórtice. Isto explica sua grande influência neste processo.

Para alturas de queda grandes, a oscilação da gota gradualmente vai diminuindo, e esta assume uma forma esférica. Neste caso, a principal fonte de energia para formar a estrutura de impacto, no caso o "splash", é a energia potencial da gota ⁵⁹.

Podemos, então, afirmar deste estudo, que no “splash”, que envolve maiores alturas de queda, a oscilação da gota pouco afetará os estudos a serem realizados. Pode-se considerar que no instante do impacto a gota estará sempre na forma esférica.

4.3) O efeito da redução de atrito na morfologia das estruturas de impacto do “splash”.

As primeiras imagens realizadas tinham como objetivo principal determinar visualmente as principais diferenças ocasionadas pela presença de PEO em solução.

Foram estudadas duas alturas de queda ($93,5\pm 0,5\text{cm}$ e $135,5\pm 0,5\text{cm}$), mantendo-se a profundidade do líquido alvo constante ($0,26\pm 0,01\text{cm}$) e utilizada uma solução de PEO de massa molar 4 milhões na concentração de 50ppm.

Foi possível observar uma nítida distinção na estrutura da coroa e no jato Rayleigh. Na estrutura da coroa, os jatos formadores das gotas secundárias são mais alongados quando há a presença do polímero (Figura 28), no entanto a altura e diâmetro médios da coroa praticamente não se modificam (Tabela 1).

É importante ressaltar que as imagens apresentadas na Figura 28 podem não estar exatamente no mesmo estágio da evolução morfológica da coroa. No entanto, qualitativamente, no conjunto das imagens obtidas, este comportamento se repete.

A coroa formada pela água é mais “rugosa”, e na extremidade superior, onde são produzidos os jatos, observa-se a fragmentação do líquido, produzindo as gotas secundárias. No caso da solução de PEO, formam-se jatos alongados, e o número de gotas produzidos aparentemente é menor.

O jato Rayleigh, para a água, se apresenta disforme e ondulado enquanto que para a solução de PEO é uniforme e liso. Observa-se, também, uma grande diferença na altura máxima atingida pelo jato Rayleigh, a qual para a solução de PEO é muito maior (Figura 29 e Tabela 1). Estas diferenças se apresentam mais pronunciadas para a altura de queda de 135,5cm, em relação à 93,5cm,

demonstrando desta forma, o que já foi mencionado anteriormente, que a fonte de energia principal na formação do “splash” é a energia potencial da gota.

Em todas as imagens obtidas neste estudo, o jato Rayleigh, para a solução de PEO nunca se fragmentou: a gota produzida na extremidade superior do jato permaneceu junto com a coluna líquida. No caso da água ocorreu o desprendimento de uma ou mais gotas (Figura 29). A rugosidade observada no jato para a água, se deve à nucleação de gotas de forma a minimizar a energia superficial.

Este estudo é consistente com estudos relacionados com a influência de polímeros na fragmentação de jatos^{32, 38, 60}. Isto indica que o deslizamento do fluido na direção do movimento, no caso da solução polimérica, é maior do que na água. Este comportamento se deve ao efeito Toms.

À partir destes resultados, a modificação morfológica escolhida para quantificar o Efeito de redução de atrito hidrodinâmico foi a altura do jato Rayleigh, porque este se apresentou mais nítido e razoavelmente fácil de ser medido. Além disso, o jato Rayleigh, como já mencionado na Introdução, é uma causa combinada do colapso das paredes da coroa e da cavidade que forma abaixo da superfície. Portanto, o efeito estudado se apresenta muito mais pronunciado.

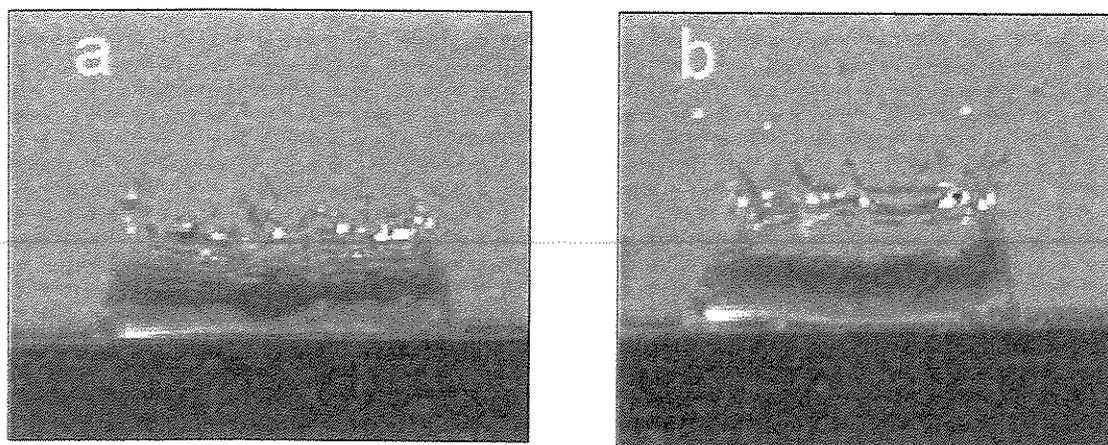


Figura 28 – A estrutura da coroa para (a) água e (b) solução de PEO (4 milhões, 50ppm).

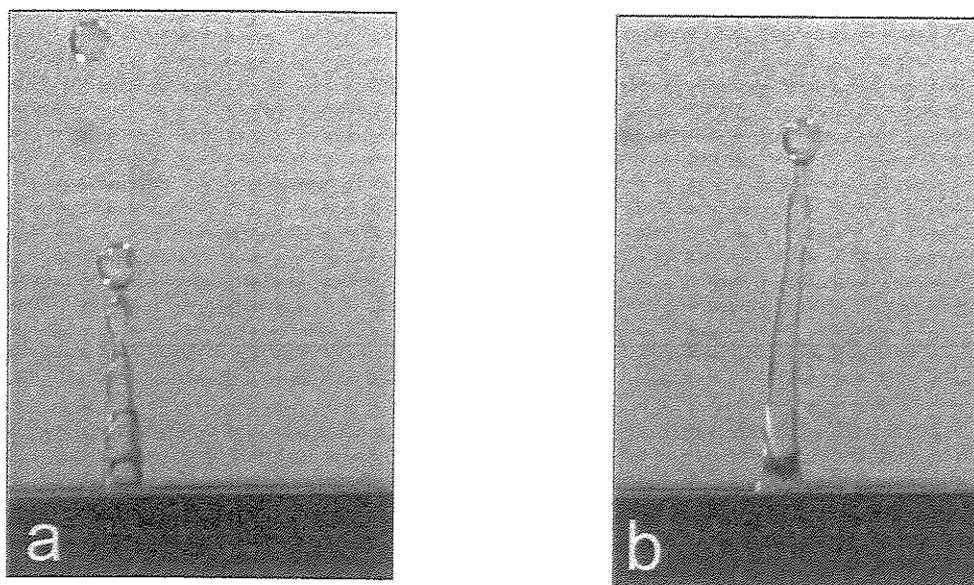


Figura 29 – O jato Rayleigh para (a) água e (b) solução de PEO (4 milhões, 50ppm).

Tabela 1 – Valores das medidas realizadas nas estruturas do “splash” (altura e diâmetro da coroa, altura do jato Rayleigh), para água e solução de PEO, (4 milhões, 50ppm), para altura de queda de $135,5 \pm 0,5$ cm e profundidade do líquido alvo de $0,26 \pm 0,01$ cm. As médias foram obtidas de aproximadamente 20 imagens.

| Medidas | Água | PEO |
|----------------------------|---------------|---------------|
| Altura da coroa/cm | $1,0 \pm 0,1$ | $1,0 \pm 0,1$ |
| Diâmetro da coroa/cm | $2,6 \pm 0,1$ | $2,7 \pm 0,1$ |
| Altura do jato Rayleigh/cm | $1,7 \pm 0,3$ | $2,1 \pm 0,2$ |

Dos estudos reológicos, sabe-se que o efeito de redução de atrito ocorre somente em regimes de escoamento turbulento. A determinação do regime em escoamento turbulento ou laminar é realizada pelo valor do número de Reynolds, já apresentado anteriormente, sendo uma razão das forças de inércia às viscosas. Os números de Reynolds calculados (equação 10), para alturas de queda superiores à 20cm, são sempre da ordem de 10^3 e pode-se afirmar com segurança que o regime de escoamento no qual estamos trabalhando é o turbulento e, assim, as modificações na estrutura do “splash” que forem observadas podem ser justificadas pelo Efeito de redução de atrito hidrodinâmico.

4.4) Efeito da rugosidade da superfície rígida de impacto.

A superfície rígida sobre a qual está a fina camada do líquido alvo pode, conforme será mostrado, exercer grande influência no desenvolvimento das estruturas de impacto. Quanto maior for a rugosidade da superfície, mais turbulento e, portanto, mais dissipativo será o movimento (deformação) do líquido.

Para avaliar a influência da superfície rígida, foram utilizadas como superfície de impacto duas placas de alumínio (uma lisa e outra rugosa). As diferenças nas rugosidades foram observadas em análises microscópicas, utilizando um Microscópio de Fluorescência Carls Zeiss, modelo Jenalunar, com lâmpada de Halogênio incidente (Figuras 30 e 31). O número de ranhuras é muito maior na placa rugosa e estas estão relacionadas principalmente com o processo de torneamento a que foram submetidas.

Como observado na Figura 32 para a placa lisa a altura do jato Rayleigh se apresenta maior que para a placa rugosa (as condições em que os experimentos foram realizados estão apresentadas na Figura), sendo este efeito relevante principalmente quando há a presença do polímero em solução.

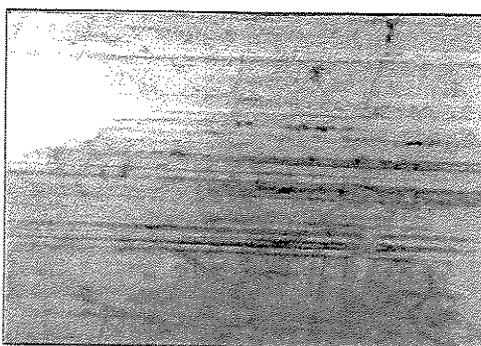


Figura 30 – Micrografia da placa lisa. Ampliação de 157,5 vezes.

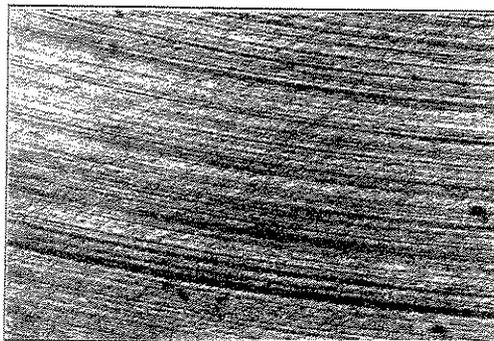


Figura 31 – Micrografia da placa rugosa. Ampliação de 157,5 vezes.

A maior altura atingida pelo jato quando se utiliza a placa lisa está intimamente ligada ao fato de que nesta placa existem menos riscos (ranhuras), que na placa rugosa. Desta forma, a evolução do “splash” ocorrerá, no caso da placa rugosa, em regime mais turbulento ⁶¹.

A redução de atrito devido à presença de PEO ocorre nas duas placas, no entanto, aparentemente, para a placa lisa o efeito é mais intensificado. Conforme será discutido posteriormente (item 4.6), a diferença deve esta associada à maior deformação da gota e da cavidade no caso da placa lisa. Para a placa mais rugosa é possível que a mistura dos líquidos tenha ocorrido em maior extensão.

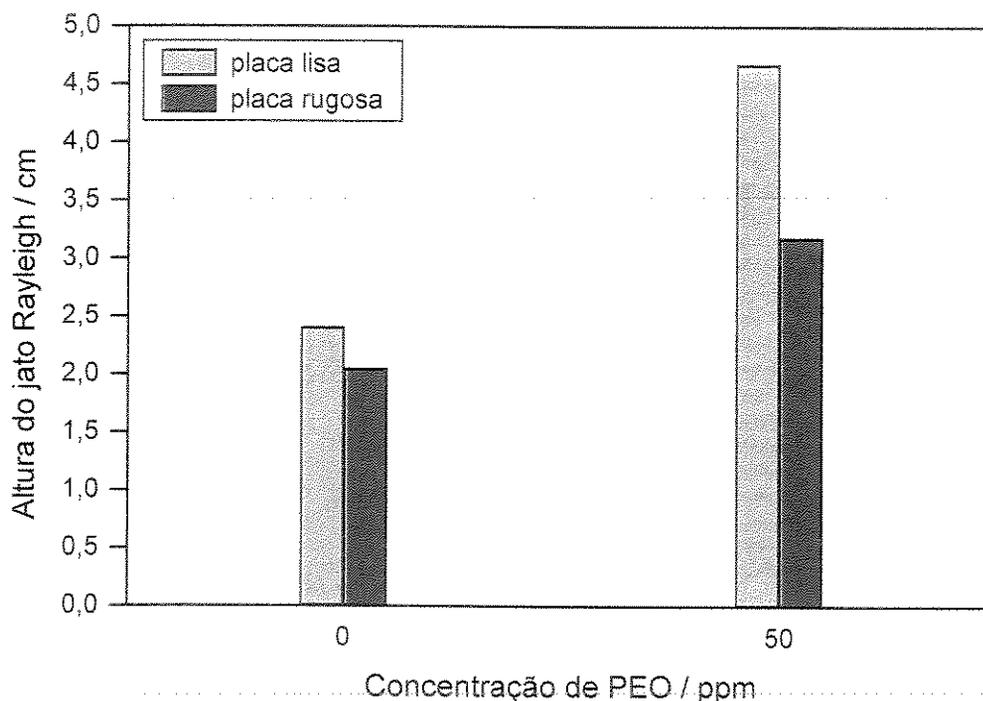


Figura 32 – Efeito da rugosidade da placa na altura do jato Rayleigh (altura de queda de $183,5 \pm 0,5$ cm e profundidade do líquido alvo de $0,31 \pm 0,01$ cm).

4.5) A contribuição do líquido alvo e da gota no fenômeno do “splash”.

O jato Rayleigh produzido no processo de colapso combinado da coroa e da cavidade é, portanto, uma deformação secundária do líquido. Destacadamente, esta é a estrutura morfológica que mais intensamente mostra o efeito Toms. A explicação para este resultado foi possível estudando a contribuição da gota e do líquido alvo nas estruturas morfológicas do “splash”. O estudo foi realizado utilizando um corante dissolvido no líquido gerador da gota (este procedimento é muito utilizado no estudo do “splash”^{19, 62}). Foi também estudado o quanto a presença de PEO afeta a contribuição da gota e do líquido alvo no fenômeno do “splash”.

Os corantes utilizados para tal estudo foram: azul de metileno, alaranjado de acridina, vermelho de fenol, fluoresceína e violeta de metila. Através das imagens obtidas do impacto da gota corada foi observado que os melhores corantes, entre os estudados, para realizar este estudo eram o alaranjado de acridina e o violeta de metila.

Foram obtidas as estruturas de impacto para água e solução de PEO (4 milhões, 40ppm), filmando de frente e de topo. As filmagens de topo se mostraram mais reveladoras. As Figuras 33 e 34, respectivamente, apresentam uma montagem da evolução do processo para água e solução de PEO filmadas de topo. As evoluções obtidas pela filmagem de frente estão apresentadas no Apêndice 3.

A concentração do corante (violeta de metila) usada nos experimentos é sempre a mesma. Os resultados apresentam importantes diferenças. Observa-se que, sendo a gota colorida e o alvo incolor, grande parte da coroa formada deve-se ao alvo, ficando a coloração referente a gota concentrada na base da coroa. Isto indica que do topo até certa altura da coroa, a coluna líquida é formada principalmente pelo líquido alvo, e a base da coroa formada pela gota. Estudos já realizados mostram realmente que a coroa é essencialmente o líquido alvo, havendo pouca contribuição da gota na estrutura¹⁷.

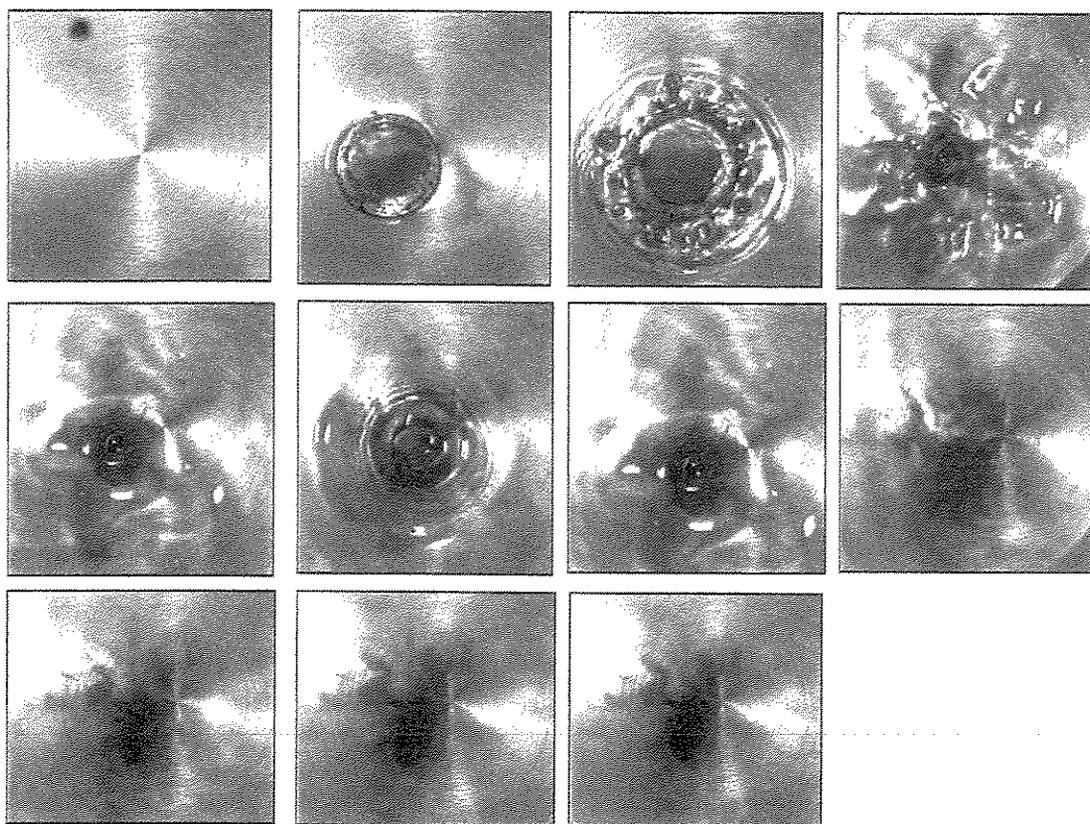


Figura 33 - Imagens do "splash" de uma gota d'água, corada com violeta de metila, que cai de uma altura de $135,5 \pm 0,5$ cm e tendo como líquido alvo a mesma solução a uma profundidade de $0,32 \pm 0,01$ cm. Filmagem realizada com a câmera posicionada de topo para o evento.

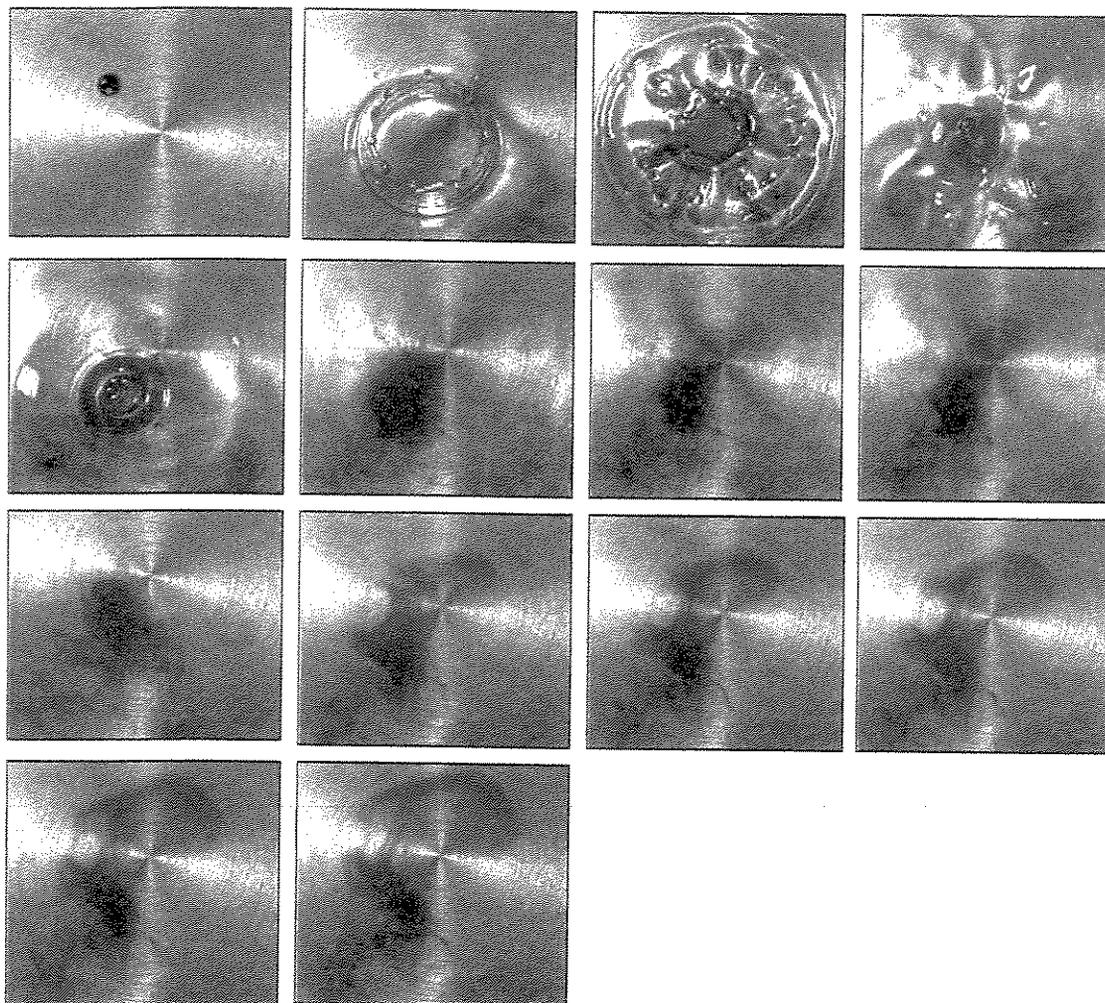


Figura 34 – Imagens do “splash” de uma gota de solução de PEO (4 milhões, 40ppm), corada com violeta de metila, que cai de uma altura de $135,5 \pm 0,5$ cm e tendo como líquido alvo a mesma solução a profundidade de $0,32 \pm 0,01$ cm. Filmagem realizada com a câmera posicionada de topo para o evento.

Quando a coroa se extingue e começa a aparecer o jato Rayleigh, este apresenta uma forte coloração, principalmente no seu topo. Esta forte coloração indica que o tempo de ocorrência do fenômeno não é suficiente para causar uma mistura significativa dos líquidos da gota e do alvo – o grau de mistura dos líquidos é pequeno durante a formação da coroa. Assim, a gota é principalmente deformada (sofre expansão) no estágio de formação da coroa e posteriormente sofre contração no colapso e formação do jato Rayleigh, simplesmente sofrendo ação do movimento do líquido durante a formação destas estruturas.

Os resultados serão apresentados e discutidos considerando as etapas de:

- a) formação da coroa;
- b) colapso da coroa e da cavidade;
- c) formação do jato Rayleigh;
- d) repouso.

4.5.a) Formação da coroa.

Na Figura 35 está apresentada uma ampliação das estruturas da coroa para água e solução de PEO.

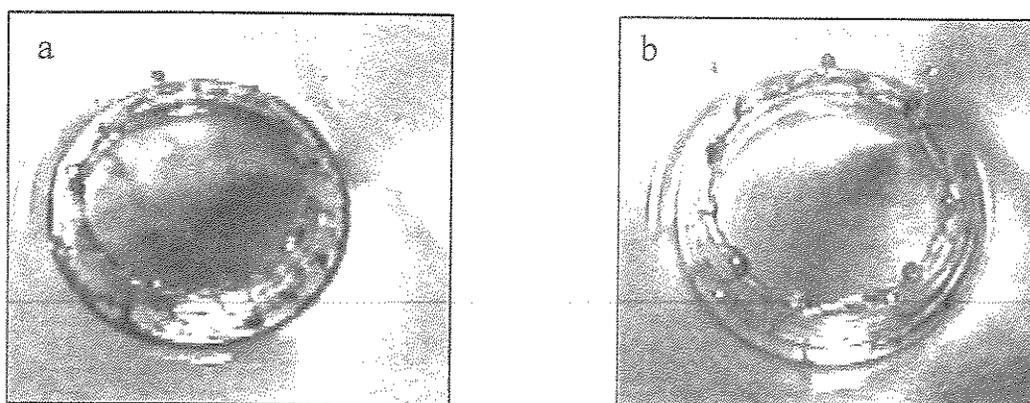


Figura 35 – Diferenças de coloração observada na estrutura do “splash” para (a) água e para (b) solução de PEO (4 milhões, 40ppm).

A comparação das imagens mostra que a coloração é mais homogênea para a coroa na solução polimérica do que na água e que a intensidade da cor violeta na base da coroa formada na água é maior. Isto é explicado pela maior

amplitude da deformação da gota de PEO, no processo de impacto e evolução da coroa. Assim, a espessura da camada líquida da gota expandida é mais delgada do que na água, onde a amplitude da deformação é menor. É importante ressaltar que o tempo necessário para o desenvolvimento da estrutura não é suficiente para diluir o corante (misturar os líquidos).

Observa-se, ainda, nas imagens tanto da água como do PEO alguns “veios” coloridos na coroa. É à partir destes “veios” que as gotas secundárias são formadas e, por isso podemos dizer que estes “veios” são regiões de maior velocidade do líquido (Figura 36).

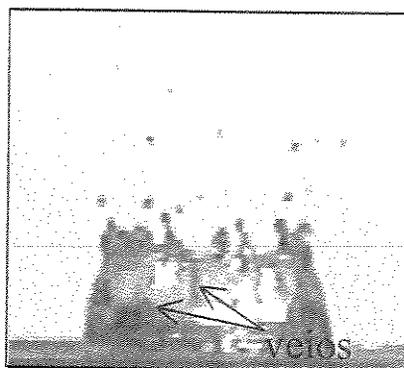


Figura 36 – Imagem ilustrando os “veios” coloridos, observados na coroa.

4.5.b) Colapso da coroa e da cavidade.

Quando ocorre o colapso da coroa e da cavidade formando as estruturas em forma de pétalas, observa-se pelas Figuras 33 e 34 (terceiro quadro) que, no caso da água, as bordas externas contém muito mais líquido colorido do que na solução de PEO.

4.5.c) Formação do jato Rayleigh.

Na seqüência do colapso, ocorre a contração da gota (tentando restituir a forma original), que pode ser observado pelo aumento da intensidade da cor violeta. Este aumento está relacionado com o aumento da espessura das paredes do líquido da gota. Assim, na produção do jato Rayleigh, a intensidade da cor

aumenta nos dois casos (Figura 37). No entanto, para a solução de PEO, a região colorida é mais delimitada e menor.

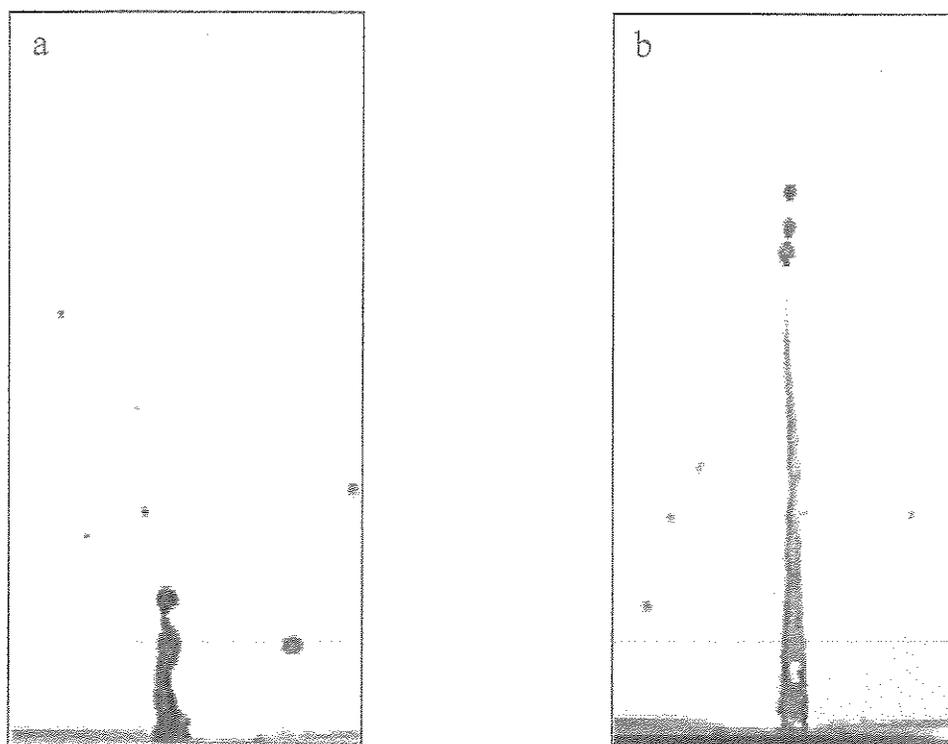


Figura 37 – O jato Rayleigh para (a) água, e para (b) solução de PEO (4 milhões, 40ppm).

4.5.d) Repouso.

Nas imagens que mostram o colapso da coroa e cavidade pode-se observar que a mistura dos líquidos (gota e alvo) é maior no caso da água do que no PEO. Como resultado, a mancha colorida, obtida alguns instantes após o líquido ter entrado em repouso, é muito maior para a água do que para a solução de PEO, indicando de forma definitiva, o desenvolvimento de escoamento mais turbulento para a água (Figura 38).

Para tentar “quantificar” a porcentagem relativa de mistura dos líquidos, foi determinada a área aproximada da mancha colorida. Tal determinação é uma das ferramentas do programa Image Pro-Plus 3.0. Foram obtidos as áreas coloridas, após o líquido estar em repouso, para água e solução de PEO (no Apêndice 4,

estão apresentadas algumas manchas deixadas para cada caso). Na Tabela 2 estão apresentados os resultados obtidos para as áreas. Os resultados mostram que a mistura dos líquidos é praticamente duas vezes maior no caso da solução de PEO.

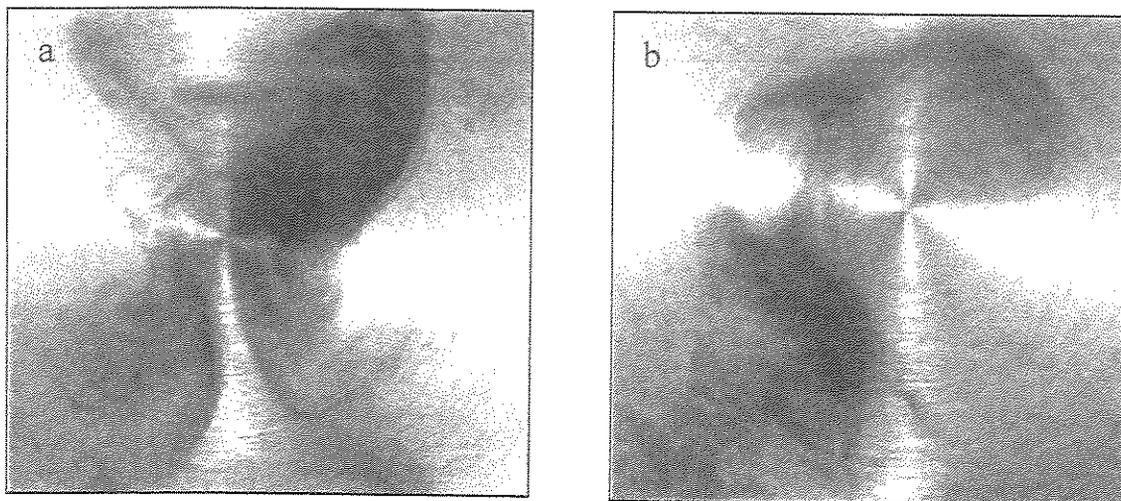


Figura 38 –A mancha deixada pela gota no líquido alvo, após o término do “splash” para (a) água e (b) solução de PEO (4 milhões, 40ppm).

Tabela 2 – Valores medidos da área referente à mancha deixada no alvo por uma gota corada, para a água e para a solução de PEO (4 milhões, 40ppm), para uma altura de queda de $135,5 \pm 0,5$ cm e profundidade do líquido alvo de $0,32 \pm 0,01$ cm (amostragem de 20 manchas).

| Solução | Área / cm ² |
|---------|------------------------|
| Água | 11±1 |
| PEO | 5±1 |

Estes resultados permitiram propor um mecanismo para a evolução morfológica das estruturas do “splash”, que será apresentado à seguir.

4.6) Modelo para as modificações morfológicas do “splash”.

À partir das observações experimentais que foram apresentadas no item 4.5 foi possível propor um modelo para as modificações que a presença de PEO produzem nas estruturas do “splash” que levam à maior amplitude do jato Rayleigh.

Nas Figuras 39 e 40, estão apresentadas, respectivamente, um esquema da evolução da coroa, baseado naquele proposto por Harlow e Shannon ⁶³, para água e para a solução contendo redutores de atrito. As proporções da gota e da profundidade do líquido alvo que aparecem nas Figuras representam aquelas utilizadas em nosso experimento.

No primeiro quadro de cada uma das Figuras, está representado o instante do impacto. As deformações da gota e do líquido alvo podem ser analisadas, pois a gota está com uma coloração preta, representando o corante e o líquido alvo incolor. Logo após o impacto a gota começa a deformar e produzir a cavidade com conseqüente deslocamento do líquido alvo.

Um complexo movimento ocorre no interior da gota e do líquido alvo. Na solução de PEO o movimento ocorre em um regime menos turbulento do que na água. O deslizamento radial do líquido alvo é maior na solução de PEO do que na água; portanto, para a água o líquido alvo flui em maior quantidade na direção perpendicular à superfície que formará as paredes da coroa.

Dado a pequena profundidade do líquido alvo a gota também se deforma, tendendo a formar um cilindro oco sem a parte superior. No caso da solução de PEO, este movimento é facilitado pela presença do redutor de atrito. Assim, a expansão da gota na solução de PEO é maior e, conseqüentemente, a contribuição da gota para as paredes da coroa também é maior do que na água.

Quando a amplitude da coroa tiver atingido seu ponto máximo, a gota terá expandido muito mais na solução de PEO do que na água (isto explica a diferença na intensidade da cor, apresentada no item 4.5). Desta forma, maior quantidade de energia estará armazenada na gota expandida da solução de PEO.

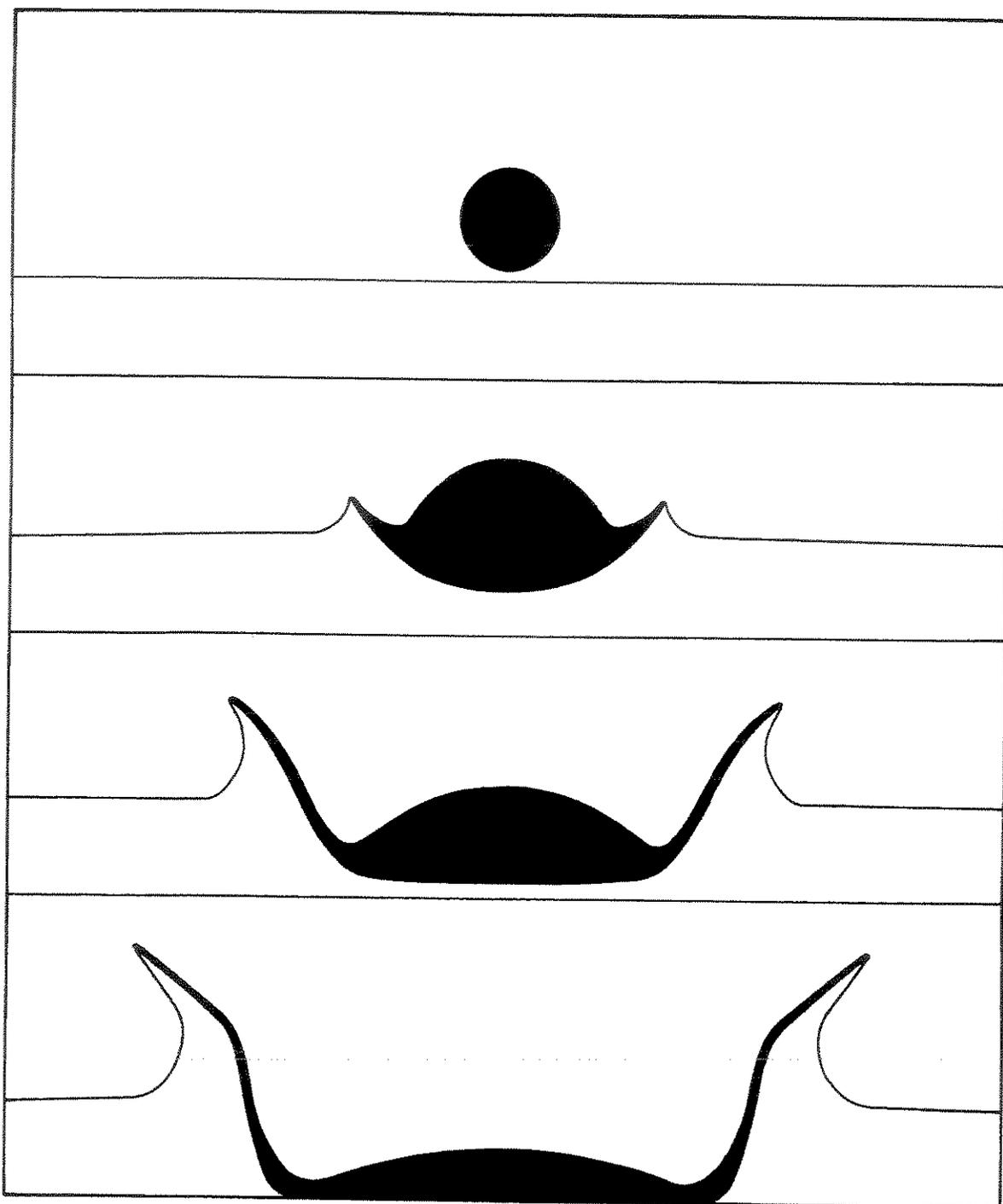


Figura 39 – Modelo proposto para o “splash” da água.

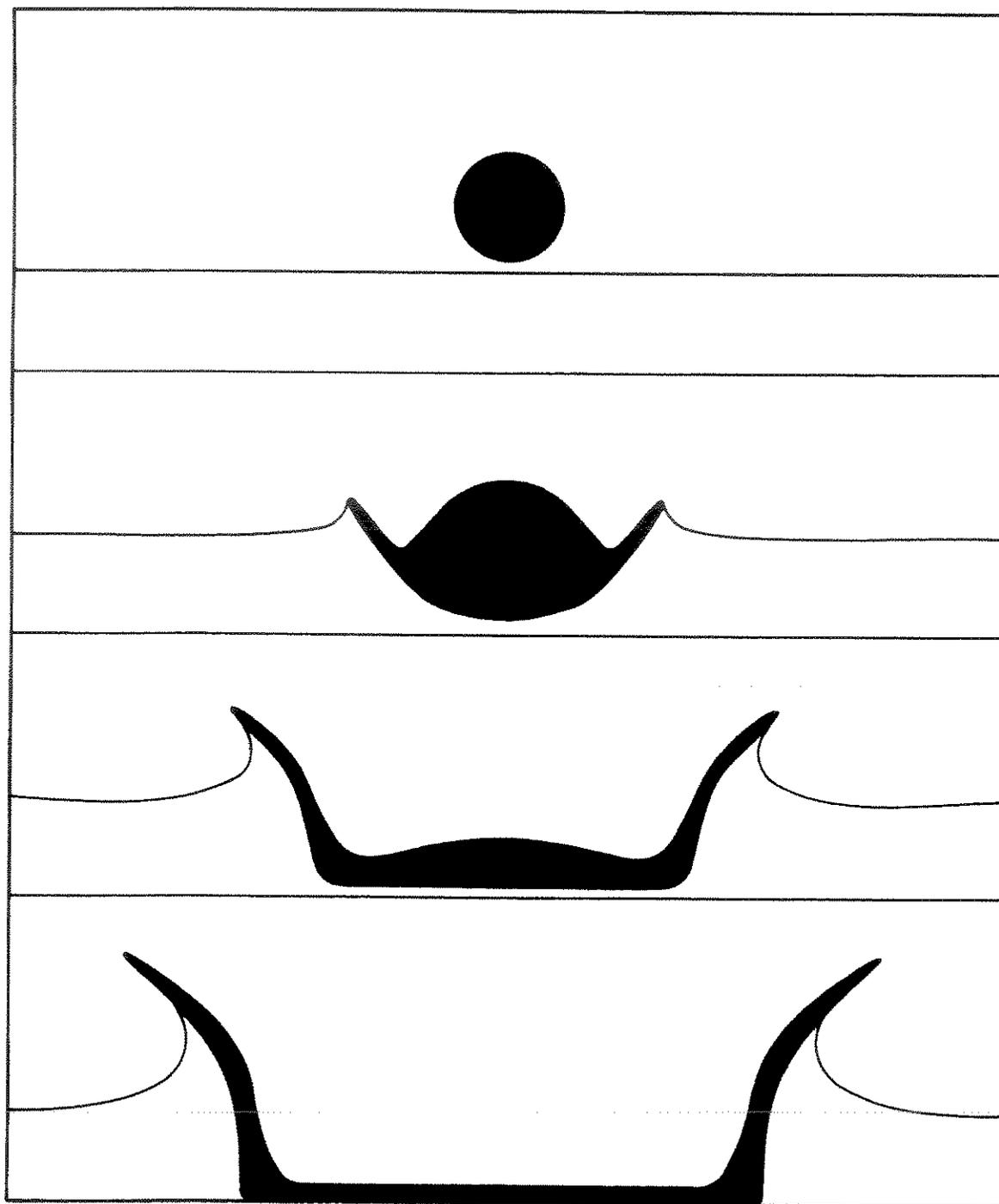


Figura 40 – Modelo proposto para o “splash” de uma solução polimérica.

As paredes da coroa possuem maior contribuição da gota em relação ao líquido alvo para a solução de PEO do que para a água (último quadro das Figuras).

Em relação à cavidade, apesar de não possuímos dados experimentais, provavelmente, a deformação causada no líquido alvo, para a solução de PEO, é mais suave do que a da água (Figura 41), o que se deve à maior facilidade de deslizamento radial do líquido presente na solução polimérica. Desta forma, no processo de formação da coroa e cavidade existe maior quantidade de energia do impacto armazenada nas estruturas produzidas para a solução polimérica.

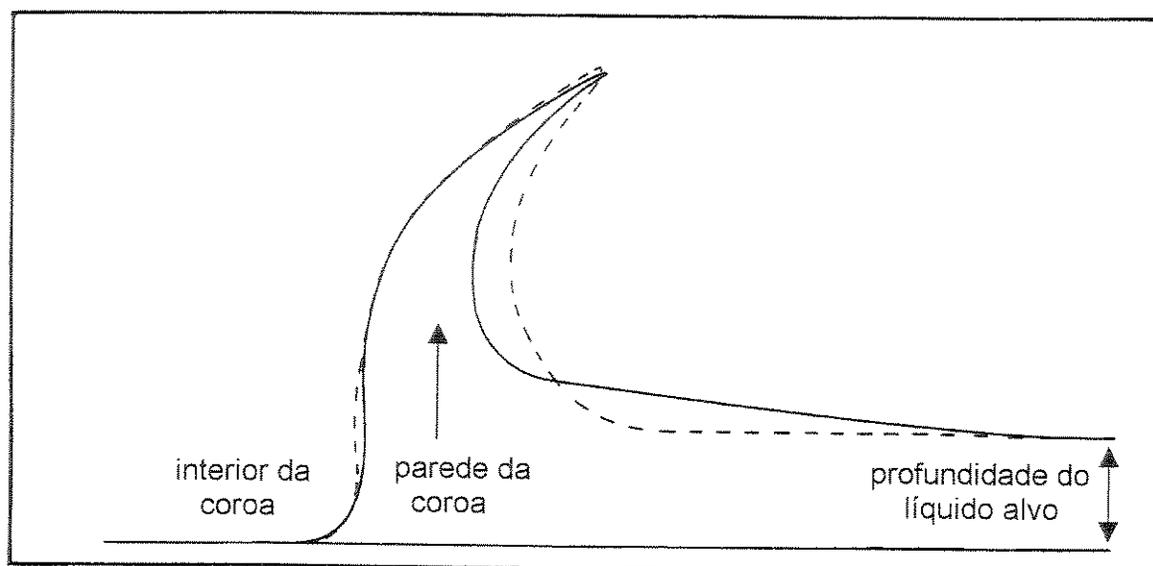


Figura 41 – Esquema proposto para a formação de parte da coroa e da cavidade produzida no líquido alvo para: --- água, e — solução polimérica.

No processo da volta, que irá originar o jato Rayleigh, o processo de escoamento também ocorrerá de forma menos turbulento na solução polimérica, e portanto, a amplitude máxima do jato Rayleigh será maior, pois a energia dissipada na formação e colapso é menor.

Este modelo também está de acordo com os resultados apresentados na Tabela 1, os quais mostram que o raio e a altura da coroa são iguais para a água e a solução polimérica. Fundamentalmente, a contribuição da gota e do líquido alvo para a formação da coroa é que muda.

4.7) Estudo de outros parâmetros relativos ao dispositivo de fluxo.

Foi estudada a influência do PEO nas estruturas do “splash” formados em maior profundidade do líquido alvo e mudando a energia potencial da gota. Os resultados serão apresentados à seguir.

4.7.a) Estudo sobre a profundidade do líquido alvo nas estruturas do “splash”.

Neste estudo foram utilizadas duas profundidades para o líquido alvo: 0,32cm e 0,80cm, que correspondem ao valor de 1,7 e 5,0, respectivamente para a razão profundidade do líquido alvo/raio da gota. A altura de queda foi mantida constante em 185,5cm.

Através da análise estatística das imagens, foram obtidos os parâmetros comparativos do diâmetro da coroa (Figura 42), altura da coroa (Figura 43), e altura do jato Rayleigh (Figura 44), para água e solução de PEO (4milhões, 40ppm).

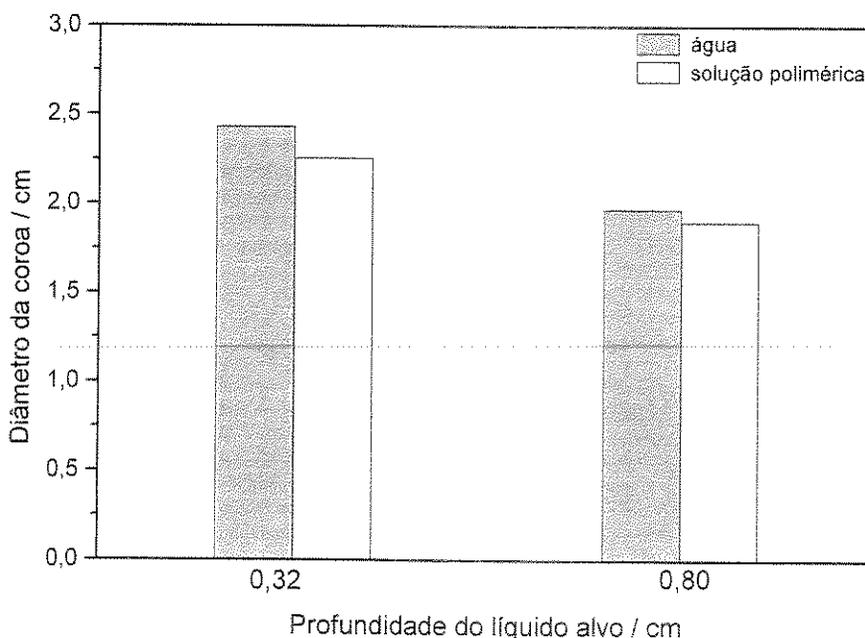


Figura 42 – Diâmetro da coroa em função da profundidade do líquido alvo.

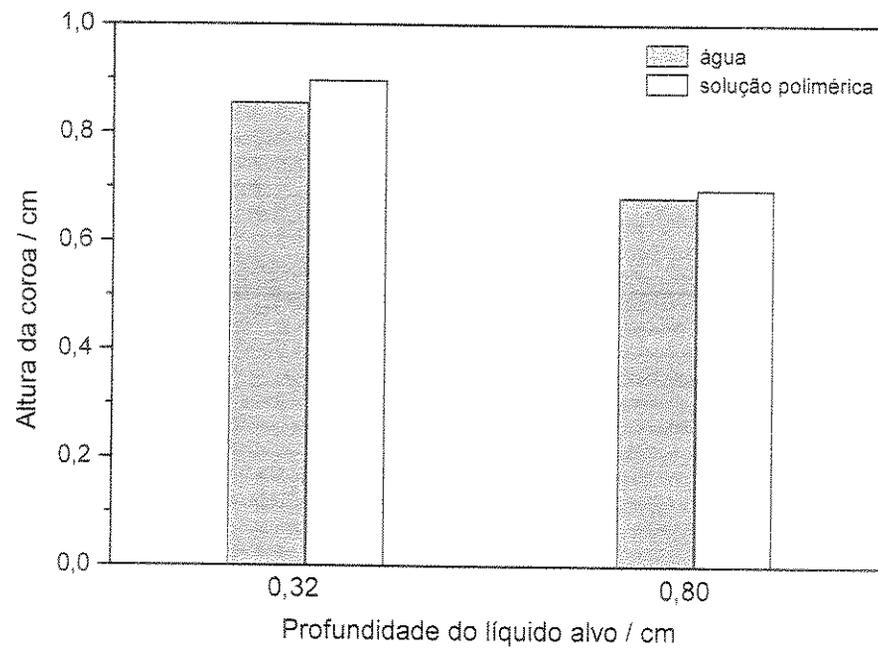


Figura 43 - Altura da coroa em função da profundidade do líquido alvo.

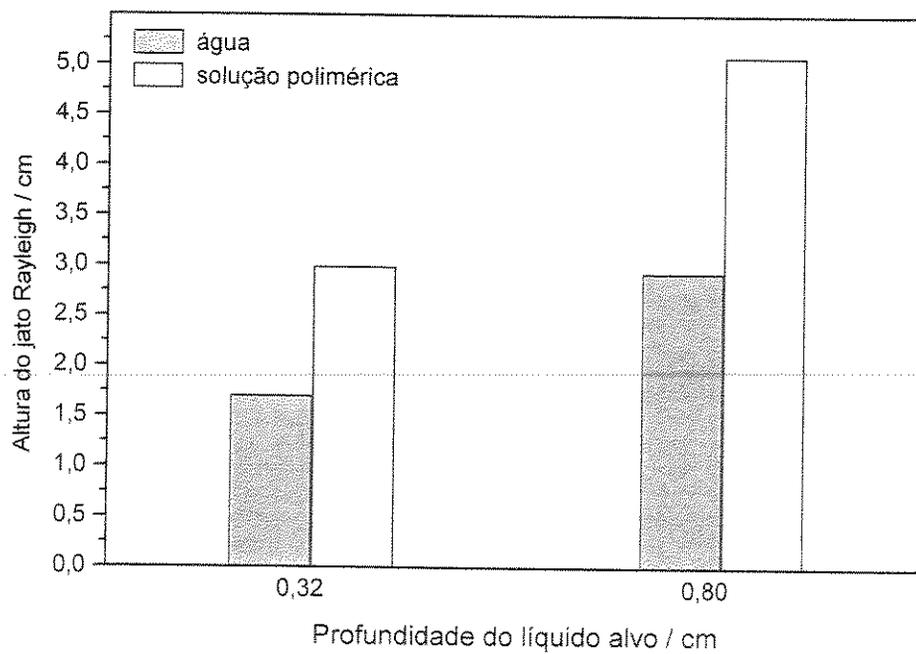


Figura 44 - Altura do jato Rayleigh em função da profundidade do líquido alvo.

Analisando as Figuras, observa-se que nenhuma diferença significativa é apresentada no diâmetro e altura da coroa com a modificação da profundidade do líquido alvo, tanto para água como para a solução de PEO. Entretanto, uma marcante diferença é apresentada na medida da altura do jato Rayleigh, que quase duplica de tamanho quando se aumenta a profundidade do líquido alvo.

As equações apresentadas no Capítulo 1, que tratam das energias potencial e superficial da coroa e da cavidade, foram utilizadas para tentar compreender as modificações morfológicas produzidas pelo impacto da gota. À partir dos parâmetros médios do raio e da altura da coroa, obteve-se os valores de energia para U_1 , U_2 , U_3 e E_d , referentes às energias potencial da cavidade, da coroa e da superfície líquida gerada (cavidade + coroa), e à energia total da gota no instante do impacto, respectivamente, apresentadas na Tabela 3. Para tais cálculos, utilizou-se que:

- 1 - a gota é esférica e seu raio é $1,78 \times 10^{-3} \text{m}$;
- 2 - sua velocidade no instante do impacto (na altura de 183,5cm) é 6m/s;
- 3 - a densidade para a água e para a solução de PEO iguais à $1,071 \times 10^3 \text{Kgm}^{-3}$
- 4 - a tensão superficial da água é de $72,42 \text{mNm}^{-1}$ e da solução de PEO é de $62,58 \text{mNm}^{-1}$.

Tabela 3 – Componentes de energia do “splash” para água e solução de PEO (4milhões, 40ppm), em diferentes profundidades do líquido alvo, em Joule e expressos como uma fração porcentual da energia total de impacto, E_d (valores em parênteses).

| Solução | D /cm | U_1 / Joule | U_2 / Joule | U_3 / Joule | E_d / Joule |
|---------|-------|---------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|
| Água | 0,32 | $3,2 \times 10^{-6}$ (0,007) | $2,5 \times 10^{-5}$ (0,06) | $1,0 \times 10^{-4}$ (0,22) | $4,6 \times 10^{-4}$ (1,0) |
| | 0,80 | $1,2 \times 10^{-5}$ (0,03) | $3,0 \times 10^{-5}$ (0,07) | $7,4 \times 10^{-5}$ (0,16) | |
| PEO | 0,32 | $3,2 \times 10^{-6}$ (0,007) | $2,3 \times 10^{-5}$ (0,05) | $8,5 \times 10^{-5}$ (0,18) | $4,6 \times 10^{-4}$ (1,0) |
| | 0,80 | $1,3 \times 10^{-5}$ (0,03) | $3,0 \times 10^{-5}$ (0,07) | $6,3 \times 10^{-5}$ (0,14) | |

Considerando a Tabela 3, observa-se que os valores para os diferentes termos de energia, para a água e para a solução de PEO, não são muito diferentes. Em relação à profundidade, observa-se que o termo U_1 é o que sofre a maior variação: aumentando a profundidade de 0,31 para 0,80 cm, ocorre um aumento de aproximadamente quatro vezes. No entanto, este resultado não explica as amplitudes atingidas pelo jato Rayleigh, uma vez que o termo U_1 representa a menor fração da energia total da gota (E_d).

Se considerarmos que o modelo utilizado nos cálculos dos termos de energia representa razoavelmente as mudanças na energia, então, as diferenças nas amplitudes do jato devem estar relacionadas com a outra parte da energia, que não foi considerada (aproximadamente 70% da energia E_d). Assim, pode-se concluir, que a formação do jato Rayleigh é muito mais complexa e não envolve somente o efeito combinado do colapso da coroa e da cavidade mas, também, o processo global de escoamento que ocorre no interior do líquido alvo. Este processo, para a maior profundidade do líquido alvo, é menos turbulento do que para a menor profundidade e, por isso, a amplitude do jato Rayleigh é maior.

4.7.b) Estudo sobre a altura de queda da gota (energia potencial) nas estruturas de impacto.

É esperado que o aumento da energia de impacto da gota produza um regime de escoamento mais turbulento. Foi realizado um estudo, variando-se a altura de queda de 40cm até 183,5cm, para verificar a influência do PEO nas estruturas de impacto. O jato Rayleigh foi utilizado para parametrizar a redução do atrito hidrodinâmico e os resultados estão apresentados na Figura 45.

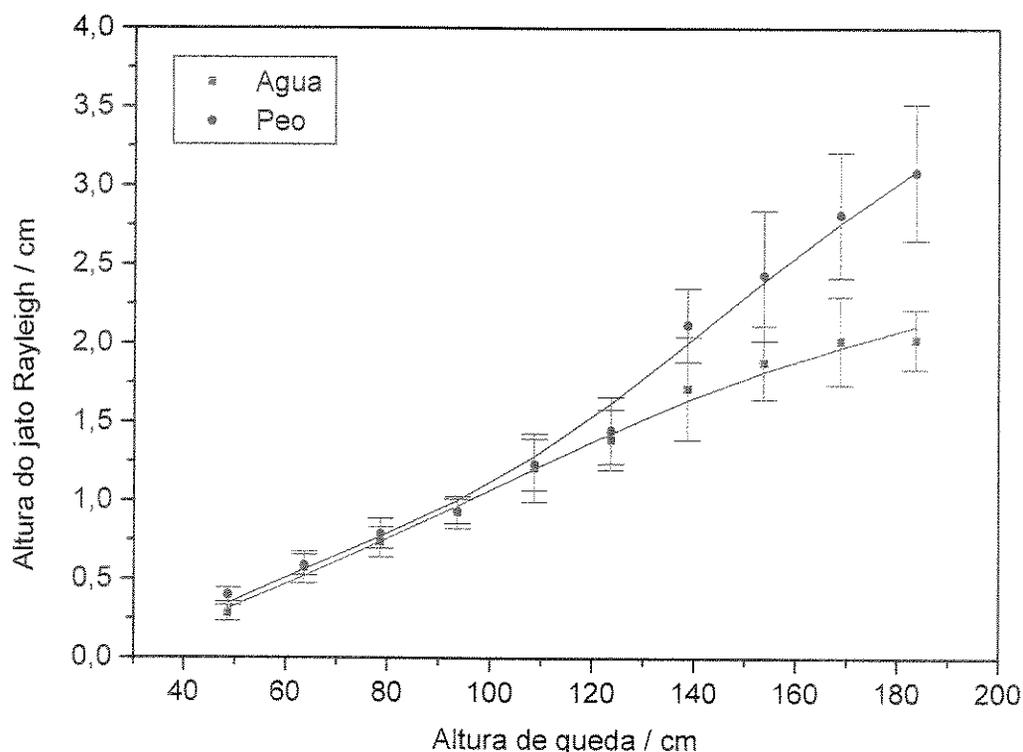


Figura 45 – Efeito da altura de queda sobre a altura do jato Rayleigh, para uma profundidade de líquido alvo de $0,31 \pm 0,01$ cm. A solução de PEO utilizada no estudo é a de massa molar 4 milhões e concentração de 40ppm.

Os resultados apresentados na Figura 45 mostram de forma definitiva o Efeito Toms no processo de formação do jato Rayleigh.

Para alturas de queda menores que 48,5cm nenhuma estrutura (inclusive o jato Rayleigh) é observada se formar acima da superfície do líquido alvo, demonstrando que a energia cinética para estas alturas é muito baixa para vencer as forças de viscosidade e tensão superficial do líquido.

Até a altura aproximada de 110cm, o efeito do polímero na altura do jato Rayleigh é quase que nulo, comportando-se como a água. Ultrapassada esta altura começa a haver uma diferenciação de comportamento, que vai aumentando conforme se aumenta a altura de queda. Esta diferenciação se deve ao efeito Toms e se apresenta mais pronunciada para a maior altura conseguida pelo

dispositivo utilizado (183,5cm). Observa-se, aqui, que a principal fonte de energia formadora das estruturas de impacto para o “splash” é a energia potencial da gota.

Pode-se observar que a barra de erro aumenta com o aumento da altura de queda da gota, o que se deve ao fato de que o jato Rayleigh torna-se mais “frágil”, por ser mais longo e fino, implicando algumas vezes em jatos distorcidos.

Conforme mencionado anteriormente, o número de Reynolds (equação 10), obtido para o processo de impacto (de 40 à 183,5cm) é de regime turbulento. Para alturas menores, apesar de ser alcançado um regime de escoamento turbulento, aparentemente o efeito Toms, considerando o jato Rayleigh, não aparece.

A análise do gráfico da Figura 45 mostra que é possível que a diferença de comportamento entre a água e a solução de PEO aumente para maiores alturas. Aparentemente, para a água, a curva começa a atingir um patamar para a altura do jato Rayleigh, enquanto que para o PEO a curva é ainda ascendente e, à partir de certa altura de queda, a amplitude do jato não se modifique mais.

As mesmas considerações realizadas anteriormente (itens 4.5 e 4.6) podem ser utilizadas para explicar os resultados apresentados na Figura 45. Com o aumento da energia potencial da gota, a mesma se deformará em maior amplitude e a abertura da cavidade conterá maior energia. No colapso das estruturas, o jato apresentará maior altura. Deve-se considerar também, conforme apresentado no item 4.7.a, o processo de escoamento global que muda em função da energia potencial da gota. A presença de PEO faz com que os processos de escoamento sejam menos turbulento, tornando o jato mais alongado.

Uma questão a ser discutida é o efeito do atrito do ar durante a queda livre da gota. Espera-se que, à partir de uma certa altura, a gota tenha uma velocidade constante, devido à resistência do ar. Esta velocidade é dada pela equação 17, que é resultado de uma relação de igualdade entre a força da gravidade e a resistência viscosa:

$$v = (mg / 6\pi\eta R_d) \quad (17)$$

onde η é a viscosidade do ar⁶⁴.

Realizando alguns cálculos foi estimado que, para uma gota com as mesmas características que a nossa, somente acima da altura de 770m, a gota

passaria a ter uma velocidade constante. Assim, podemos desprezar, para os estudos, este efeito.

Ainda não foram discutidos os aspectos reológicos relacionados com a macromolécula, que produzem as modificações morfológicas nas estruturas de impacto. Alguns dos aspectos relativos ao redutor de atrito foram estudados e serão apresentados à seguir.

4.8) Estudos sobre alguns aspectos relativos ao PEO.

Foram escolhidos dois parâmetros do PEO que são os mais investigados nos processos de redução de atrito: o efeito da concentração e da massa molar de PEO.

4.8.a) Estudo sobre a influência da concentração de PEO sobre as estruturas de impacto.

Foi estudada a influência da concentração de PEO (em dezenas de ppm), na altura do jato Rayleigh para a máxima altura de queda (183,5cm). Esta altura de queda foi escolhida de forma à maximizar as diferenças no jato Rayleigh em relação à este parâmetro. Este estudo foi realizado com o objetivo de comparar os resultados obtidos à partir do “splash” com aqueles obtidos em medidas reológicas convencionais.

Nos estudos de redução de atrito hidrodinâmico em tubos, usando um reômetro do tipo que está apresentado na Figura 14, é utilizada uma equação para a porcentagem de redução de atrito que se baseia na queda de pressão (equação 12)^{45, 65}. Para tratar de maneira quantitativa a redução de atrito, baseada na altura do jato Rayleigh, estamos propondo uma equação análoga, equação 18, que se mostrou muito adequada para os estudos envolvendo a concentração de PEO.

$$\% \text{ redução de atrito} = (1 - H_s / H_p) \times 100 \quad (18)$$

onde H_p é a altura do jato Rayleigh para a solução polimérica e H_s é a altura do jato Rayleigh para o solvente puro.

Foi estudado o efeito de concentração para soluções aquosas de PEO 4 milhões, na faixa de concentração entre 0 e 100 ppm. Observa-se, na Figura 46, que a maior altura do jato Rayleigh ocorre para a faixa de concentração entre 40-50ppm, e representa uma porcentagem máxima de redução de atrito próxima de 60%, o que foi calculado utilizando a equação 18.

A energia geradora das estruturas de impacto provém da energia potencial da gota que, após o impacto, é usada para formar a cavidade e a coroa (aproximadamente 30%; Tabela 3), sendo o restante usado em outros processos dissipativos.

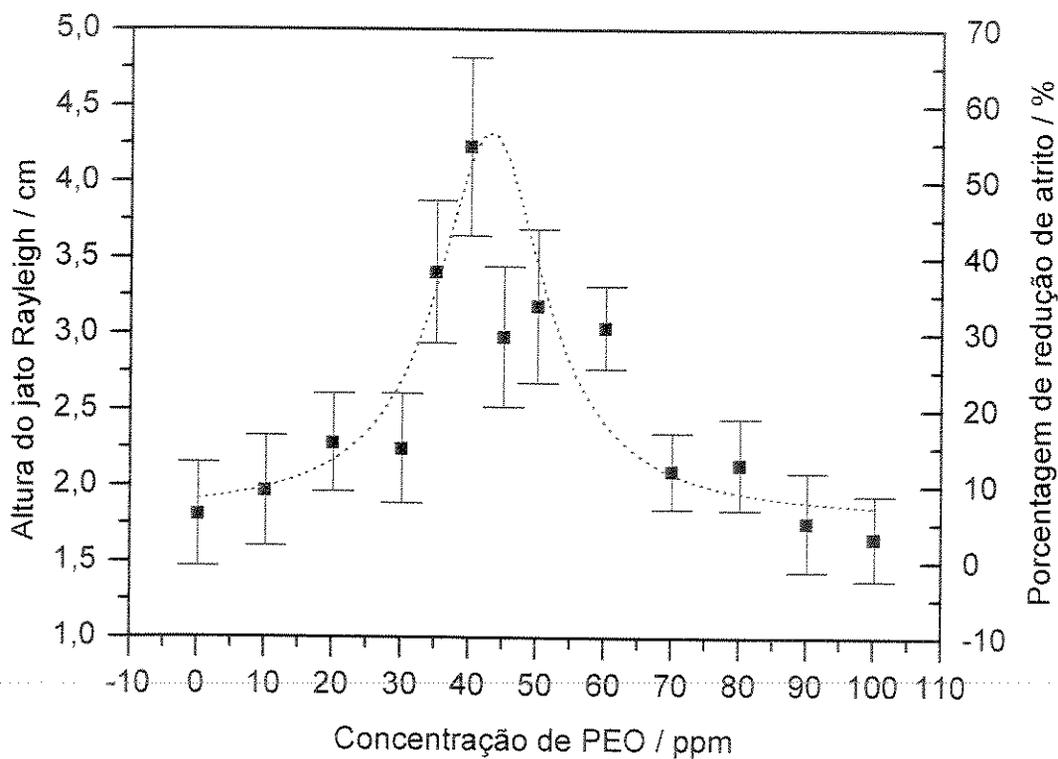


Figura 46 – Efeito da concentração de PEO, 4 milhões, na altura do jato Rayleigh, para uma altura de queda de $183,5 \pm 0,5$ cm e profundidade do líquido alvo de $0,32 \pm 0,01$ cm.

A energia superficial do líquido e a viscosidade tendem a reduzir a amplitude do movimento do líquido na interface com o ar ²⁶. Neste processo, a presença de PEO em pequenas quantidades (<40ppm) permite maior deslizamento do líquido e, portanto, maior amplitude de deslocamento.

Após 40ppm, começa a ocorrer uma diminuição da altura do jato Rayleigh, sendo este comportamento atribuído ao aumento da viscosidade da solução, que dissipa grande parte da energia de impacto.

A grande variação na altura do jato Rayleigh está associada com o efeito de redução de atrito pois as mudanças nas propriedades da solução (tensão superficial, viscosidade e densidade), que poderiam alterar as características do jato, são pequenas, conforme está apresentado nas Figuras 47, 48 e 49.

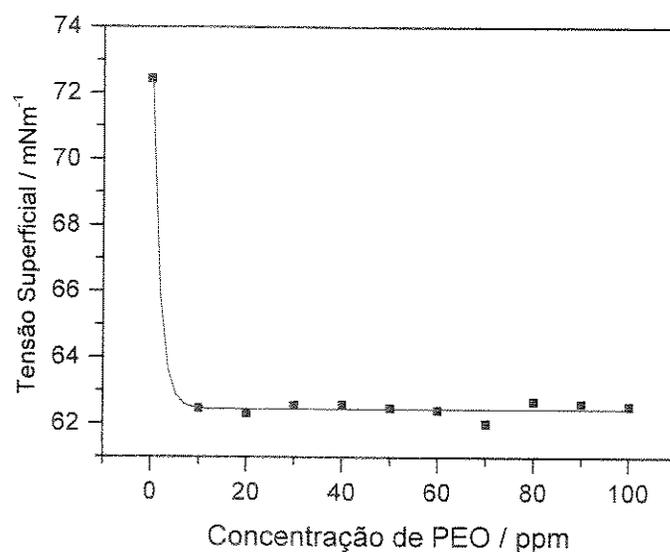


Figura 47 – Tensão superficial em função da concentração de PEO 4 milhões.

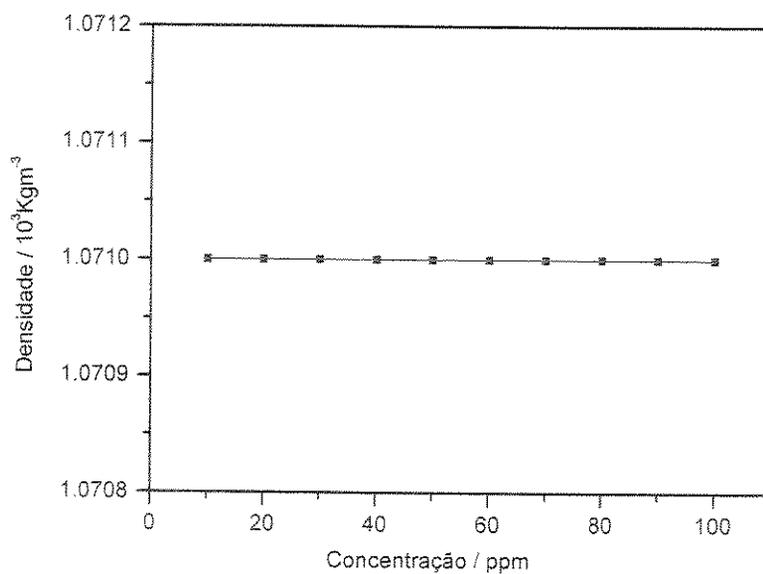


Figura 48 – Densidade em função da concentração de PEO 4 milhões.

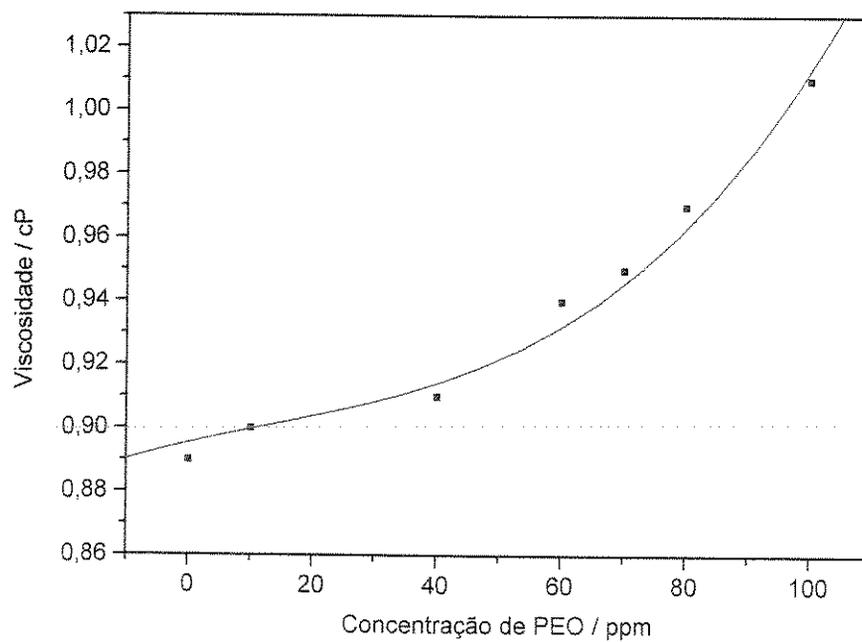


Figura 49 – Viscosidade em função da concentração de PEO 4 milhões.

A comparação desses estudo, com o de Hoyt ⁴⁵, que usou um reômetro de escoamento para estudar o PEO 4 milhões (Figura 50), mostra um comportamento semelhante: para baixas concentrações do polímero a redução de atrito aumenta bruscamente, até que se alcance o ponto de máxima redução quando, então, começa a ocorrer uma diminuição da função. No caso dos trabalhos de Hoyt a diminuição é menos acentuada, porque a energia é continuamente fornecida no reômetro, enquanto que no caso do impacto de gotas isto não ocorre. Apesar das medidas terem sido realizadas em sistemas diferentes, o ponto de máxima redução de atrito é aproximadamente o mesmo demonstrando, assim, que a medida da altura do jato Rayleigh é um bom parâmetro para se quantificar a redução de atrito hidrodinâmico.

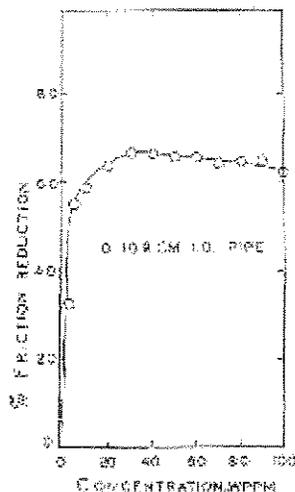


Figura 50 – Redução de atrito como uma função da concentração de PEO 4 milhões, em água ⁴⁵.

Os desvios das medidas observados na Figura 46 se devem ao problema de escolha das imagens, o qual, como já mencionado, vem sendo realizado visualmente, por comparação. As imagens escolhidas para se realizar as medidas da altura do jato Rayleigh foram aquelas que apresentaram esse parâmetro num valor máximo. Entretanto, não se pode afirmar que a imagem está num mesmo ou num próximo intervalo de tempo de outra e isto leva à imprecisão apresentada nas medidas, apesar de terem sido analisadas um grande número de imagens.

O modelo de Ryskin ⁵², conforme apresentado no Capítulo 2 relaciona o Efeito Toms com a concentração do polímero ($\eta = 0,05\alpha^3 N_{AA}^3 N_p C / M_a$). O aumento da viscosidade anisotrópica (η), relacionada com a orientação das macromoléculas aos fluxo, está linearmente relacionado com a concentração do polímero (C). Analisando a Figura 46 para menores concentrações de PEO, observa-se que o crescimento da porcentagem de redução de atrito não é linear. Aparentemente, trata-se de uma dependência exponencial com a concentração. Assim, deve haver uma dependência exponencial da altura máxima atingida pelo jato Rayleigh com η .

4.8.b) Estudo sobre a influência da massa molar de PEO sobre as estruturas de impacto.

Realizou-se um estudo sobre a influência da massa molar de PEO para uma concentração fixa de 40ppm, sobre a amplitude máxima atingida pelo jato Rayleigh. Os resultados obtidos estão apresentados na Figura 51.

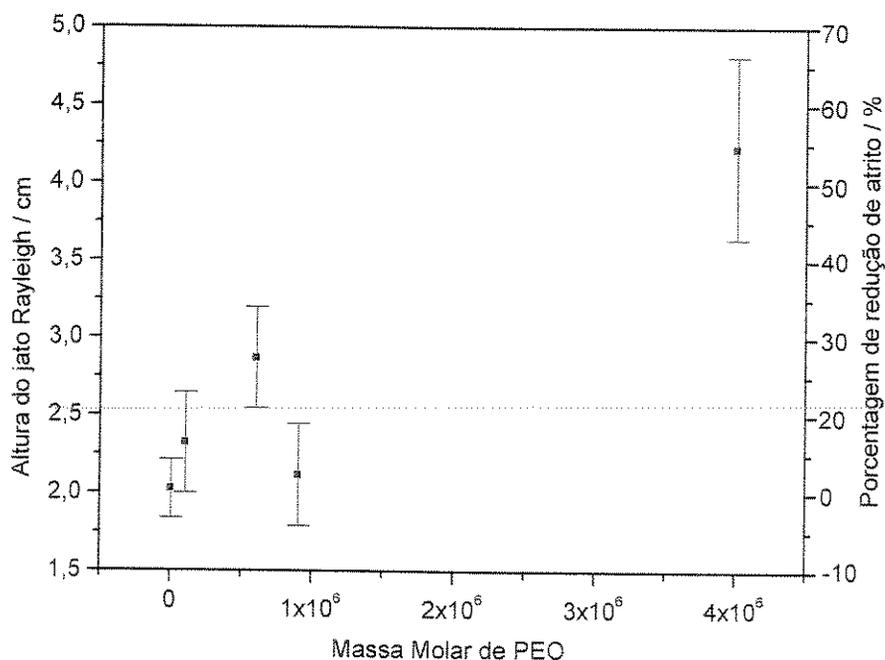


Figura 51 – Efeito da massa molar de PEO sobre a altura do jato Rayleigh, para uma profundidade de líquido alvo de $0,31 \pm 0,01$ cm.

Através deste estudo observa-se que o alcance máximo do jato Rayleigh é dependente da massa molar do PEO. Conforme foi mostrado no Capítulo 2 (Figura 16), polímeros de diferentes massas molares apresentarão máximas reduções do atrito hidrodinâmico em diferentes concentrações. Para a concentração de 40ppm, a solução de PEO 4 milhões é a que apresenta a maior altura para o jato Rayleigh.

O fato de diferentes massas molares apresentarem o máximo do Efeito Toms em diferentes concentrações pode ser melhor entendido considerando os modelos que tratam da redução de atrito hidrodinâmico. Nos modelos de Ryskin⁵², e Virk⁵¹, os parâmetros de redução do atrito hidrodinâmico se relacionam diretamente com o grau de polimerização em uma dependência de ordem 1 e 1,5, respectivamente. Analisando o gráfico apresentado na Figura 51, nota-se que a amplitude atingida pelo jato Rayleigh aumenta suavemente com o aumento do tamanho da cadeia de PEO, no entanto, pelo pequeno número de pontos não é possível estabelecer o grau de dependência entre estas variáveis.

Este estudo também demonstrou que a viscosidade é um fator importante na formação do “splash”. Pequenas variações da viscosidade podem impedir a formação de estruturas de impacto: soluções com viscosidade mais alta (por exemplo, PEO 8 milhões, 40ppm, Tabela 4) não apresentam qualquer tipo de estrutura de impacto, mas diminuindo um pouco a viscosidade, pela redução na concentração, esta começa a aparecer.

Tabela 4 – Valores de viscosidade para PEO (concentração de 40ppm), para massas molares de 100 mil, 600 mil, 900 mil, 4 milhões e 8 milhões/ $\text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$:

| Massa Molar de PEO / $\text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$ | Viscosidade / cP |
|---|------------------|
| 100 mil | 0,884 |
| 600 mil | 0,911 |
| 900 mil | 0,897 |
| 4 milhões | 0,912 |
| 8 milhões | 0,966 |

Foram realizadas medidas de tensão superficial (Tabela 5) e densidade (Tabela 6) para as soluções de PEO (40ppm) de diferentes massas molares. Observa-se que estas propriedades praticamente não se alteram com o aumento da massa molar dos PEO, na faixa de concentração estudada.

Tabela 5 - Valores de tensão superficial para PEO (concentração de 40ppm), para massas molares de 100 mil, 600 mil, 900 mil, 4 milhões e 8 milhões/g.mol⁻¹.

| Massa Molar de PEO / g.mol ⁻¹ | Tensão Superficial / 10 ⁻³ Kgs ⁻² |
|--|---|
| 100 mil | 62,61 |
| 600 mil | 62,81 |
| 900 mil | 62,89 |
| 4 milhões | 62,58 |
| 8 milhões | 62,76 |

Tabela 6 – Valores de densidade para PEO (concentração de 40ppm), para massas molares de 100 mil, 600 mil, 900 mil, 4 milhões e 8 milhões/g.mol⁻¹.

| Massa Molar de PEO / g. mol ⁻¹ | Densidade/ 10 ³ Kgm ⁻³ |
|---|--|
| 100 mil | 1,070 |
| 600 mil | 1,071 |
| 900 mil | 1,071 |
| 4 milhões | 1,071 |
| 8 milhões | 1,071 |

À seguir serão analisados dois aspectos interessantes envolvendo os modelos sobre a redução de atrito e as estruturas de impacto.

No modelo de Ryskin⁵², a extensão macromolecular (α) é uma variável muito importante nos processos de redução de atrito hidrodinâmico. Harlow⁶³, utilizando a equação de Navier-Stokes obteve, através de cálculos computacionais, as linhas de pressão sofrida pelo líquido alvo, com a evolução do impacto da gota. Uma das simulações está apresentada na Figura 52.

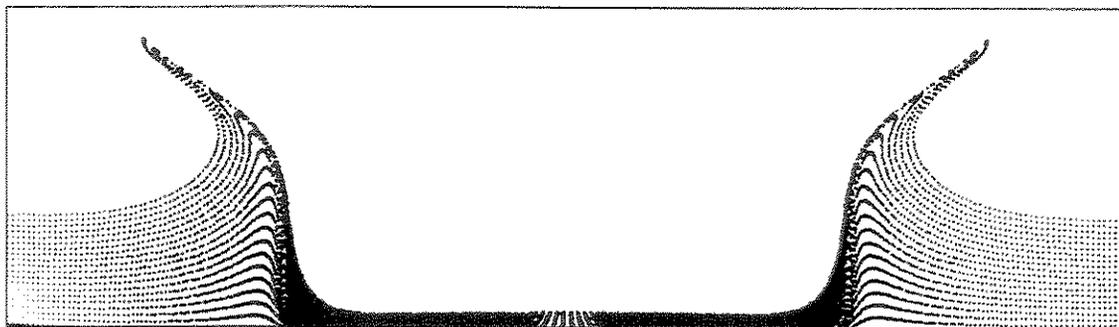


Figura 52 - Linhas de pressão para o impacto de uma gota contra o líquido alvo⁶³.

Considerando o esquema apresentado por Harlow para o impacto de uma gota contra uma solução polimérica pode-se considerar o mecanismo envolvido no Efeito Toms. O escoamento do líquido ocorrerá seguindo as linhas de pressão, e as cadeias do polímero tenderão a se alinhar, ocorrendo o alongamento e o aumento da extensão molecular. As camadas do fluido na solução polimérica tenderão a se misturar menos, produzindo o efeito Toms.

Outro aspecto interessante, que pode ser considerado, está relacionado com o tempo requerido para o desenvolvimento das estruturas do "splash" (da ordem de dezenas de mili-segundos) e o tempo de relaxação dos segmentos da cadeia do polímero (modelo de Khon⁵²). A reação da cadeia do polímero à aplicação do cisalhamento, devido as ondas de choque produzidas pela colisão é muito mais rápida do que o tempo para o desenvolvimento das estruturas de impacto. Desta forma, a macromolécula pode se estender ao máximo (dependendo da energia do impacto) e produzir as modificações na morfologia das estruturas de impacto, descritas neste Trabalho.

CONCLUSÃO

O dispositivo construído para estudar a formação do “splash” demonstrou reproduzir bem o evento estudado e a técnica adotada demonstrou ser viável para os estudos.

O estudo realizado permitiu observar que a presença de PEO provoca modificações morfológicas nas estruturas do “splash”, principalmente quanto a coroa e ao jato Rayleigh formados. Estas modificações se devem ao efeito de redução de atrito hidrodinâmico (visto que as modificações nas propriedades da água provocadas pela presença do polímero não são suficientes para explicar, totalmente, o que foi observado) e seu valor é totalmente influenciado pela concentração e massa molar do polímero, rugosidade da superfície e altura de queda da gota.

Um estudo da contribuição do líquido alvo e da gota na formação do “splash”, foi realizado, sendo possível, novamente, observar diferenças morfológicas, e através destas observações propor um mecanismo diferenciado para o fenômeno do “splash” quando este ocorre somente com o solvente (água) e com uma solução de PEO.

APÊNDICES

Apêndice 1

O circuito temporizador construído para acionar a válvula solenóide, está esquematicamente apresentado abaixo, na Figura 1a.

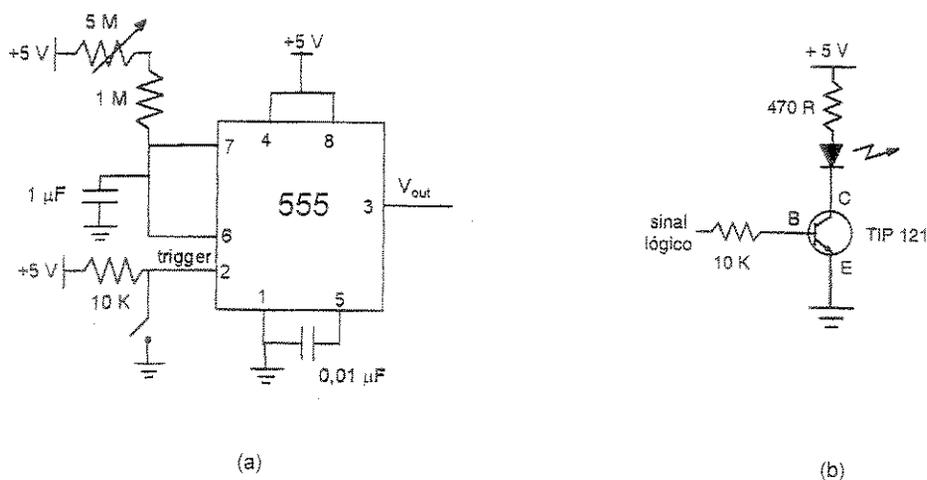


Figura 1 - (a) Circuito temporizador baseado no CI 555 e (b) Circuito eletrônico para acender o LED ⁶⁶.

Neste caso, o CI 555 é utilizado como um monoestável, um dispositivo cuja saída é forçada a permanecer em um determinado estado lógico caso tenha sido alterada para outro nível.

Interligado a este circuito temporizador está um circuito eletrônico para acender o LED (Figura 1b), cuja função é indicar o estado lógico da saída do circuito temporizador (alto = LED acesso). O tempo que o LED fica acesso, e portanto, o tempo de abertura da válvula solenóide, podem ser alterados variando, no circuito temporizador, o valor da resistência do trimpot (somada à de 1M) e do capacitor.

Apêndice 2

A câmera utilizada nas filmagens, possibilita o seu uso em vários modos de “shutter speed” (Tabela 1).

Tabela 1 – Seleção de “shutter speed” da câmera Sony DXC – 107A ⁶⁷.

| Shutter Speed (em segundos) | | Seleção |
|-----------------------------|--|----------------|
| OFF (1/60) | | 0 ^a |
| FL (1/100) | | 1 ^b |
| 1/250 | | 2 |
| 1/1000 | | 3 |
| 1/2000 | | 4 |
| 1/4000 | | 5 |
| 1/10000 | | 6 |
| CCD IRIS | Modo “backlight”: este modo reduz a sombra quando a luz vem de trás do objeto. | 7 |
| | Modo normal: para condições normais | 8 |
| | Modo “spotlight”: este modo reduz a coloração branca quando há uma forte luz no objeto em frente de um fundo escuro. | 9 |

^a Posição normal.

^b FL (“flickerless”): prevenir a figura de flutuar devido à alimentação de 50Hz.

O modo “shutter speed” utilizado neste trabalho foi o 6, o que significa que cada imagem é gravada por um período de 100 μ s e a tomada da próxima imagem só se dará 33ms após a anterior (Figura 1).

Como não há uma sincronização entre o tempo de captura da câmera (filmagem) e a queda da gota, as imagens obtidas para, por exemplo, duas gotas, serão diferentes. Por isso há a necessidade da obtenção de um grande número de imagens para que haja uma boa representação estatística do que se deseja estudar.

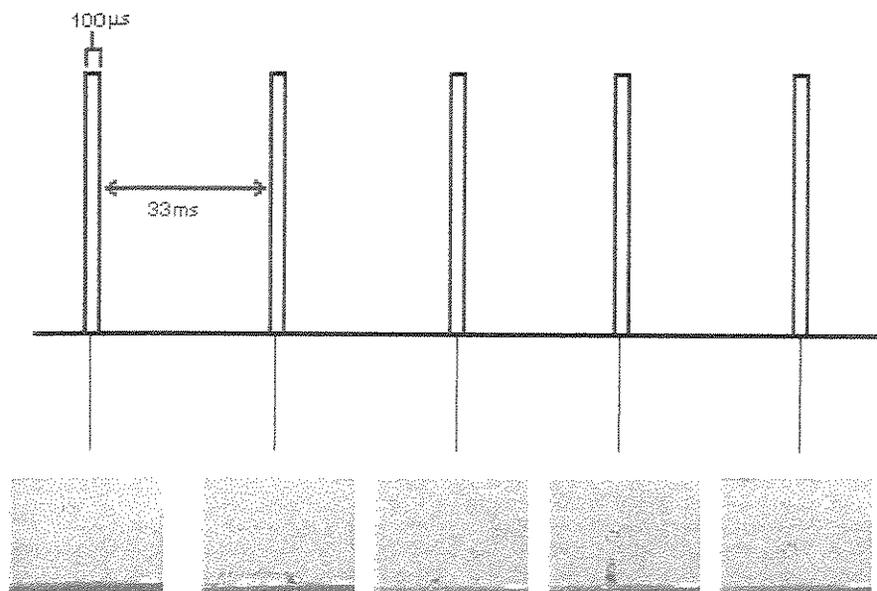


Figura 1 – “Shutter speed” para a filmagem do impacto de uma gota contra uma superfície líquida.

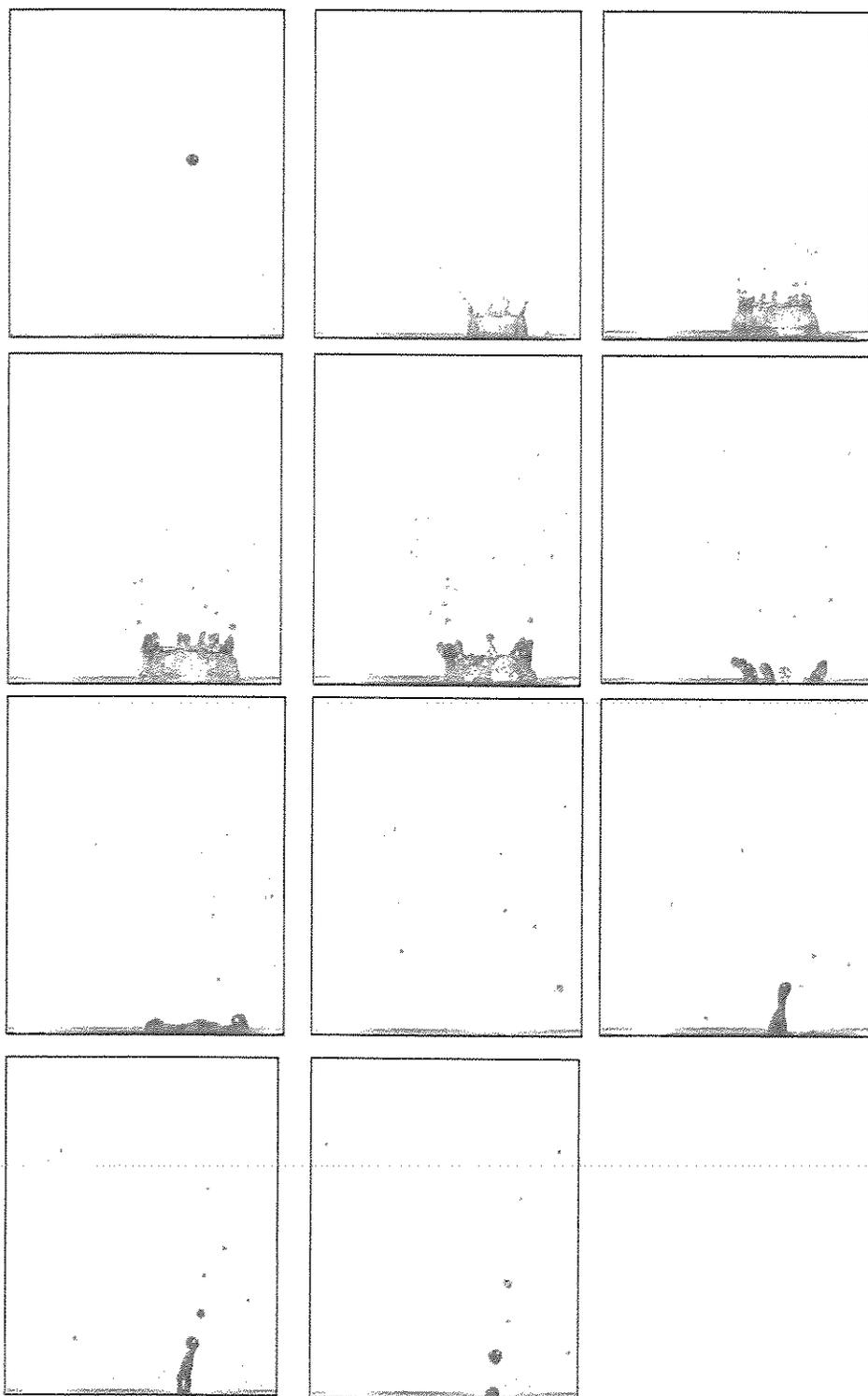
Apêndice 3

Figura 1 – Imagens do “splash” de uma gota d’água, corada com violeta de metila, que cai de uma altura de $185,5 \pm 0,5$ cm e tendo como líquido alvo a mesma solução e uma profundidade de $0,32 \pm 0,01$ cm. Filmagem realizada com a câmera posicionada de frente para o evento.



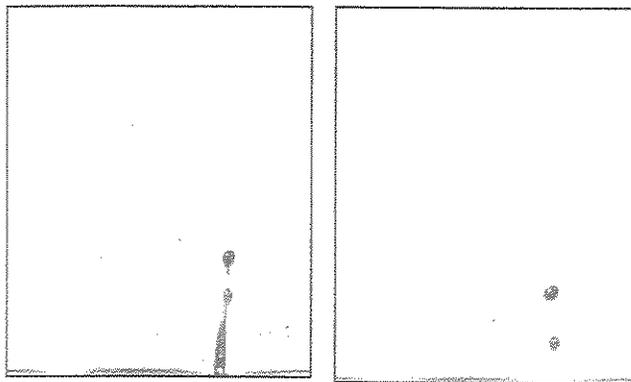


Figura 2 - Imagens do "splash" de uma gota de solução de PEO (4 milhões, 40ppm), corada com violeta de metila, que cai de uma altura de $185,5 \pm 0,5$ cm e tendo como líquido alvo a mesma solução e uma profundidade de $0,32 \pm 0,01$ cm. Filmagem realizada com a câmera posicionada de frente para o evento.

Apêndice 4

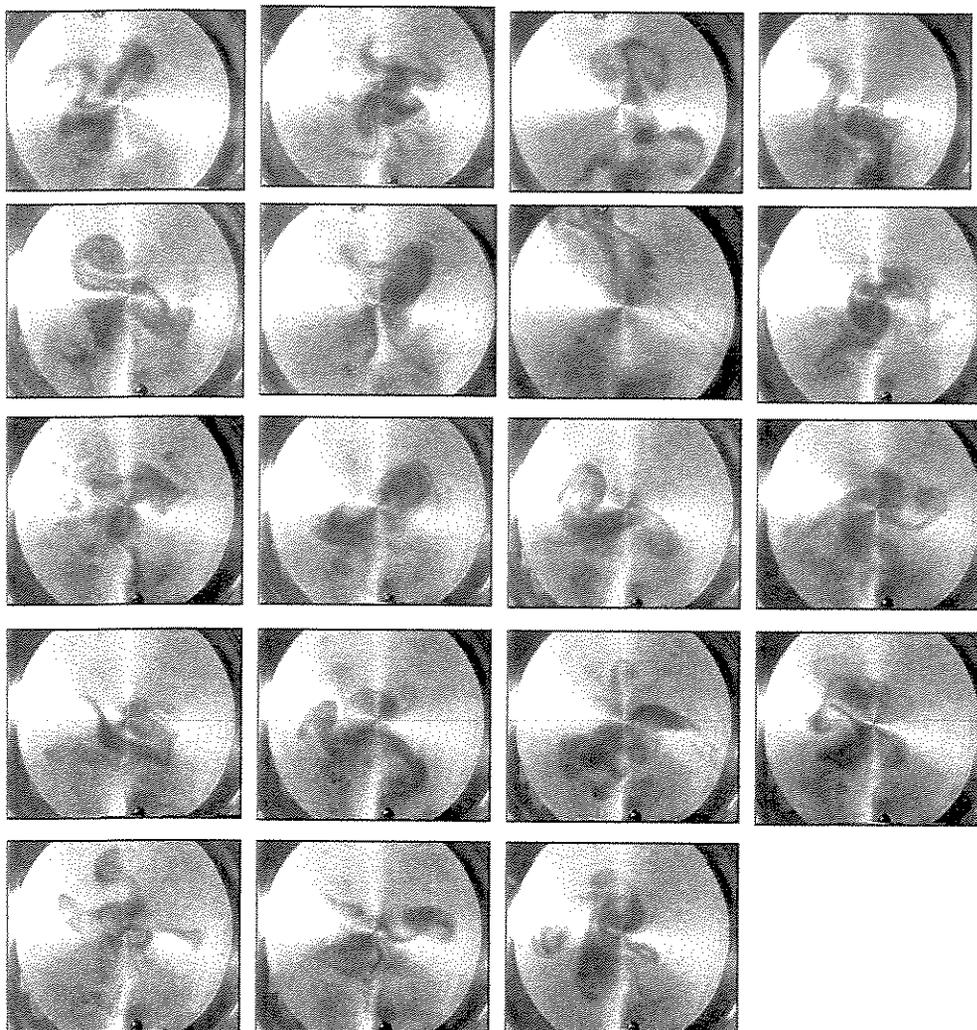


Figura 1 – Imagens mostrando a área da mancha deixada pela gota corada com violeta de metila para água.

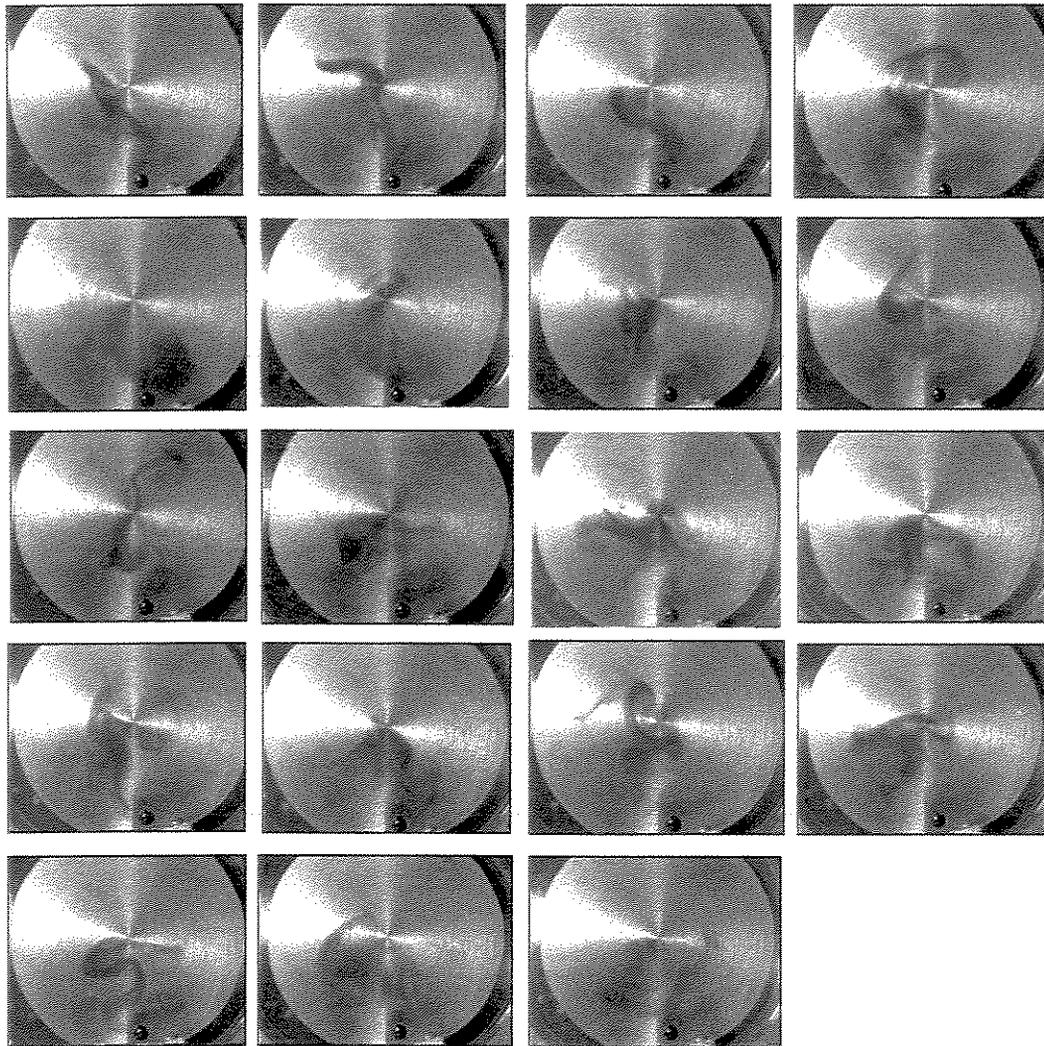


Figura 2 – Imagens mostrando a área da mancha deixada pela gota corada com violeta de metila para a solução polimérica de PEO 4 milhões, 40ppm.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ¹ Hsiao, M.; Lichter, S.; Quintero, L.G.; "The critical Weber number for vortex and jet formation for drops impinging on a liquid pool", *Phys. Fluids A* **1988**, *31*, 3560.
- ² Rodriguez, F.; Mesler, R.; "Some drops don't splash". *J. Colloid Interface Sci.* **1985**, *106*, 347.
- ³ Cossali, G.E.; Coghe, A.; Marengo, M.; "The impact of a single drop on a wetted solid surface", *Experiments in Fluids* **1997**, *22*, 463.
- ⁴ Macklin, W.C.; Metaxas, G.J.; "Splashing of drops on liquid layers", *J. Appl. Phys.* **1976**, *47*, 3963.
- ⁵ Range, K.; Feuillebois, F.; "Influence of surface roughness on liquid drop impact", *J. Colloid Interface Sci.* **1998**, *203*, 16.
- ⁶ Anikumar, A.V.; Lee, C.P.; Wang, T.G.; "Surface-tension-induced mixing following coalescence of initially stationary drops", *Phys. Fluids A* **1991**, *11*, 2587.
- ⁷ Chapman, D.S.; Critchlow, P.R.; "Formations of vortex rings from falling drops", *J. Fluid Mech.* **1967**, *29*, 177.
- ⁸ Rein, M.; "The transitional regime between coalescing and splashing drops", *J. Fluid Mech.* **1996**, *306*, 145.
- ⁹ Folder Merck; "A garantia da qualidade no controle ambiental".
- ¹⁰ Walters, D.A.; "A stable transitional flow pattern in the surface tension driven spreading of ethanol-water solutions", *Langmuir* **1991**, *6*, 991.

¹¹ Macklin, W.C.; Hobbs, P.V.; "Subsurface phenomena and the splashing of drops on shallow liquids", *Science* **1969**, *166*, 107.

¹² Hobbs, P.V.; Kezweeny, A.J.; "Splashing of a water drop", *Science* **1967**, *155*, 1112.

¹³ Hobbs, P.V.; Osheroff, T.; "Splashing of drops on shallow liquids", *Science* **1967**, *158*, 1184.

¹⁴ Worthington, A.M.; Cole, S.R.; "Impact with a liquid surface studied by means of instantaneous photography", *Proc. Roy. Soc. (London)* **1896**, *355*, 250.

¹⁵ <http://www.ee.nmt.edu/~jmathys/milkreport.html>, "Technique employed to capture a milk drop splash".

¹⁶ <http://www.foothill.net/~arachne/ja01017htm>, "Cherry splash".

¹⁷ Worthington, A.M.; "On impact with a liquid surface", *Proc. Roy. Soc. (London)* **1882**, *1188*, 217.

¹⁸ Engel, O.G.; "Crater depth in fluid impacts", *J. Appl. Phys.* **1966**, *37*, 1798.

¹⁹ Reed, H.L.; "Gallery of fluid motion", *Phys. Fluids A* **1991**, *3*, 2027.

²⁰ Foster, N.; Metaxas, D.; "Realistic animation of liquids", *Graph. Model and Im. Proc.* **1996**, *58*, 471.

²¹ MacDonald, O.C.; McCartney, H.A.; "A photographic technique for investigating the splashing of water drops on leaves", *Ann. Appl. Biol.* **1988**, *113*, 627.

²² Peregrine, D.H.; "The fascination of fluid mechanics", *J. Fluid Mech.* **1981**, *106*, 59.

²³ <http://128.165.1.1/solarys/tercrate.htm#meteor> , "Terrestrial Impact Craters".

²⁴ Ganapathy, R.; "A major meteorite impact on the Earth 65 Million years ago: a evidence from the cretaceous-tertiary boundary clay", *Science* **1980**, *209*, 921.

²⁵ Sobolev, V.V.; Guilemany, J.M.; Nuttling, J.; Miquel, J.R.; "Development of substrate-coating adhesion in thermal spraying", *Int. Mater. Rev.* **1997**, *42*, 117.

²⁶ Shin, J.; McMahon, T.A.; "The tuning of splashing", *Phys. Fluids* **1990**, *8*, 1312.

²⁷ Allen, R.F.; "The mechanics of splashing", *J. Colloid Interface Sci.* **1988**, *124*, 309.

²⁸ Jones, A.T.; "The sounds of splashes", *Science* **1920**, *52*, 295.

²⁹ Prosperetti, A.; Oguz, H.; "The impact of drops on liquid surfaces and the underwater noise of rain", *Ann. Rev. Fluid Mech.* **1993**, *25*, 577.

³⁰ Ching, B.; Golay, M.W.; Johnson, T.J.; "Droplet impact upon liquid surfaces", *Science* **1984**, *226*, 535.

³¹ Carrol, K.; Mesler, R.; "Splashing liquid drops form vortex rings and not jets at low Froude numbers", *J. Appl. Phys.* **1981**, *52*, 507.

³² Hoyt, J.W.; "Use of high-polymer solutions as an aid in flow visualization", *Flow Visualization – Fluid Engineering Divison (ASME)* **1989**, 81.

- ³³ Barnes, H.A.; Hutton, J.T.; Walters, K.; "An introduction to rheology", Rheology Series 3, Elsevier, N.Y., **1989**.
- ³⁴ Knudsen, J.G.; Katz, D.L.; "Fluid dynamics and heat transfer", McGraw – Hill Book Co., Inc., N.Y., **1958**.
- ³⁵ Nevers, N.; "Fluid Mechanics", Addison – Wesley Publishing Co., London, **1970**.
- ³⁶ Davies, J.T.; "Turbulence Phenomena – An introduction to the eddy transfer of momentum, mass, and heat, particularly at interfaces", Academic Press, N.Y., **1972**.
- ³⁷ Garcez, L.N.; "Elementos de mecânica dos fluídos – Hidráulica geral", 2^a Edição, Editora Edgard Blücher Ltda., **1960**.
- ³⁸ White, A.; Hemmings, J.A.G.; "Drag reduction by additives – review and bibliography", BHRA Fluid Engineering, **1976**.
- ³⁹ Andreis, M.; Grägerm, H.; Koenig, J.J.; "Drag reduction phenomenon with special emphasis on homogeneous polymer solutions – Polymer Characterization/Polymer Solutions"; Springer-Verlag, Berlin **1989**, 1,
- ⁴⁰ Figueredo, R.C.R.; "Drenagem de espumas usadas em incêndios classe B – influência da presença de polímeros redutores de atrito hidrodinâmico", Dissertação de Mestrado, UNICAMP – IQ, **1997**.
- ⁴¹ Deshmukh, S.R.; Sudhakar, K.; Singh, R.P.; "Drag-reduction efficiency, shear stability and biodegradation resistance of carboxymethyl cellulose-based and starch-based graft copolymers", J. Appl. Polym. Sci. **1991**, 43, 1091.

- ⁴² McCormick, C.L.; Morgia, S.E.; "Water-soluble copolymers. XXXII: Macromolecular drag reduction. A review of predictive theories and the effects of polymer structure", *Prog. Polym. Sci.* **1990**, *15*, 507.
- ⁴³ Bird, B.R.; Armstrong, C.R.; Hassager, O.; "Dynamics of polymeric liquids", 2nd Edition, *Fluid Mechanics 1*, John Wiley & Sons.
- ⁴⁴ Sellin, R.H.J.; Hoyt, J.W.; Scrivener, O.; "The effect of drag-reducing additives on fluid flows and their industrial applications – Part 1: Basic Aspects", *J. Hydraul. Res.* **1982**, *20*, 29.
- ⁴⁵ Bailey, F.E.; Kolesve, J.V.; "Poli(ethylene oxide)", Academic Press, N.Y., **1976**.
- ⁴⁶ Kim, O.K.; Little, R.C.; Ting, R.Y.; "Polymer structural effects in turbulent drag reduction", *Drag reduction in polymer solutions*, AIChE Symposium Series **1973**, *69*, 130.
- ⁴⁷ Little, R.C.; Wilgard, M.; "Drag reduction and structural turbulence in flowing polyox solutions", *J. Appl. Polym. Sci.* **1970**, *14*, 409.
- ⁴⁸ McCormick, C.L.; Morgia, S.E.; Safieddine, A.M.; "Water-soluble copolymers. XXXI: Effects of molecular parameters, solvation and polymer associations on drag reduction performance", *Macromolecules* **1990**, *23*, 2132.
-
- ⁴⁹ Matthys, E.F.; "Heat tranfer, drag reduction and fluid characterization for turbulent flow of polymer solutions: recents and research needs", *J. Non-Newtonian Fluid Mech.* **1991**, *38*,313.
- ⁵⁰ Bonn. D., et al; "From small scales to large scales in three-dimensional turbulence: The effect of diluted polymers", *Phys. Rev. E.* **1993**, *47*, R28.

- ⁵¹ Virk, P.S.; "Drag reduction fundamentals", *AIChE J.* **1975**, *21*, 625.
- ⁵² Ryskin, G.; "Calculation of the effect of polymer additive in a converging flow", *J. Fluid Mech.* **1987**, *178*, 423.
- ⁵³ Figueredo, R.C.R.; Ribeiro, F.A.R.; Sabadini, E.; "Ciência de espumas – aplicação na extinção de incêndios", *Química Nova* **1999**, *22*, 126.
- ⁵⁴ Sellin, R.H.J.; Hoyt, J.W.; Scrivener, O.; "The effect of drag-reducing additives on fluid flows and their industrial applications – Part 2: Present applications and future proposals", *J. Hydraul. Res.* **1982**, *20*, 235.
- ⁵⁵ Little, R.C.; Wiegard, M.; "Drag reduction and structural turbulence in flowing poliox solutions", *J. Appl. Polym. Sci.* **1970**, *14*, 409.
- ⁵⁶ Andrade, J.C.; Ferreira, M.; Baccan, N.; "Sistema gravitacional de alimentação de líquidos com vazão constante para uso em análise por injeção em fluxo", *Química Nova* **1986**, *9*, 123.
- ⁵⁷ Rodriguez, F.; Mesler, R.; "The penetration of drop-formed vortex rings from falling drops", *J. Fluid Mech.* **1967**, *29*, 177.
- ⁵⁸ Thotoddesen, S.T.; Sakakibata, J.; "Evolution of the fingering pattern of na impacting drop", *Phys. Fluids* **1998**, *10*, 1359.
- ⁵⁹ Jayaratne, O.W.; Mason, B.J.; "The coalescence and bouncing of a water drop at an ar/water interface", *Proc. Roy. Soc. (London)* **1964**, *280*, 546.
- ⁶⁰ Meier, G.E.; Klöpffer, A.; Grabitz, G.; "The influence of kinematic waves on jet break down", *Experiments in Fluids* **1992**, *12*, 173.

- ⁶¹ Range, K.; Feuillebois, F.; "Influence of surface roughness on liquid drop impact", *J. Colloid Interface Sci.* **1998**, *203*, 16.
- ⁶² Merzkirch, W.; "Flow Visualization", Academic Press, N.Y., **1987**.
- ⁶³ Harlow, F.H.; Shannon, J.P.; "The splash of a liquid drop", *J. Appl. Phys.* **1967**, *38*, 3855.
- ⁶⁴ Mahan, B.H.; "Química – um curso universitário", Editora Edgard Blücher Ltda., S.P. **1991**, 306.
- ⁶⁵ A. Gyr (Editor), "Structure of turbulence and drag reduction", IUTAM Symposium Zurich, Springer-Verlag, Switzerland, **1989**.
- ⁶⁶ Rohwedder, J.J.R.; "Relatório Técnico – Instrumentação e automação em química analítica. Projeto de auxílio ao ensino", UNICAMP – IQ **1996**.
- ⁶⁷ Manual de operação para a câmera Sony DXC – 107A / 107AP.
-