

Universidade Estadual de Campinas



F609 – Tópicos de Ensino de Física I
Relatório Final

Efeito Kaye, princípios da mecânica dos fluidos



ALUNO: Carlos Sato Baraldi Dias
yuki@ifi.unicamp.br

RA 023341

ORIENTADORA: Profa Dra Gabriela Castellano

COORDENADOR DA DISCIPLINA: PROF. DR. JOAQUIM JOSÉ LUNAZZI

CAMPINAS, 11 DE NOVEMBRO DE 2007

1) Introdução

1.1 Motivação

A mecânica dos fluidos é uma das áreas mais complexas da Física, e por isso não costuma fazer parte dos currículos escolares. No entanto, existem muitas analogias e conceitos simples que podem ser demonstrados, introduzindo assim o aluno à mecânica dos fluidos.

Para tanto neste projeto apresentamos um efeito pouco conhecido, mas que ironicamente está presente em líquidos do dia-a-dia, como xampus e sabonetes líquidos. Estes líquidos são todos compostos por substâncias surfactantes água e sal, com uma concentração tal que forma micelas esféricas, as quais fazem com que o líquido possa

apresentar um comportamento que pode ser considerado incomum, para um líquido, mas ao mesmo tempo é um comportamento bem conhecido do público para uma partícula.

Outra curiosidade desconhecida do público, é que estes materiais, devido a esta propriedade, são classificados como materiais inteligentes: aqueles que respondem a estímulos externos de forma controlada. Esse é outro conceito que pode ser apresentado com este experimento.

1.2 Efeito Kaye

Este efeito, que acontece com fluidos viscosos, é conhecido como efeito Kaye, nome que homenageia o engenheiro Alan Kaye, que primeiro o descreveu em 1963 [1], mas que, por ter uma duração da ordem de 300 ms, só pôde ser observado e estudado em detalhes nos últimos anos [2], graças ao advento de câmeras de alta velocidade [3].

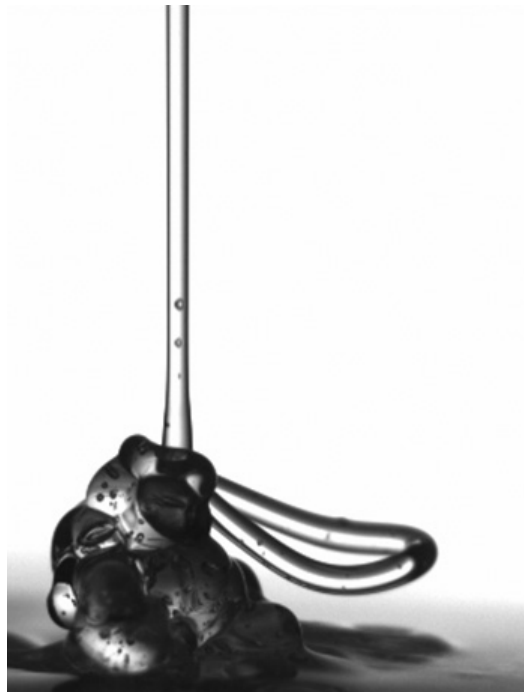


Figura 1: Foto dos primeiros instantes do efeito Kaye [1].

Como o objetivo é apresentar algo simples, pois o público alvo é qualquer um que se disponha a brincar com um xampu ou sabão líquido em sua casa, apresentaremos um modelo simples que permite entender o que se passa durante estes 300 ms. Além disso, mostraremos uma forma de ampliar o efeito permitindo que ele seja melhor observado.

2) Descrição do Efeito Kaye

2.1) Nível Básico

Neste trabalho apresentamos um fenômeno presente em muitos materiais existentes em casa, mas que, no entanto, é desconhecido da grande maioria das pessoas. Este fenômeno, conhecido como Efeito Kaye, está presente em líquidos, que ao serem despejados de um recipiente formam um filete fino de líquido (Figura 2), enquanto que a água, por exemplo, forma gotas (Figura 3).



Figura 2: Filete de xámpu.



Figura 3: Gotas de água.

Esta característica faz com que um líquido desse tipo, quando despejado em um recipiente contendo o mesmo líquido, não se misture imediatamente. Isto acontece por que o líquido que chega está com uma dada velocidade enquanto que o outro, no recipiente, está parado. Isto cria a possibilidade de que a porção do líquido que chega ricocheteie no líquido parado, como mostra a Figura 1.

2.2) Nível Médio

O efeito Kaye ocorre em líquidos conhecidos como tixotrópicos, uma classe de líquidos chamados não-newtonianos, que se comportam de maneira diferente aos líquidos newtonianos, como a água, com os quais estamos mais familiarizados.

Podemos definir um líquido como uma substância que não tem forma definida e se adapta à forma do recipiente no qual se encontra. Por causa disso um líquido apresenta o que chamamos de viscosidade, que pode ser vista como a resistência do líquido em relação a ele mesmo¹. Newton interpretou a viscosidade como a falta de deslizamento dentre duas camadas adjacentes do líquido, criando uma força proporcional à velocidade com que estas camadas se movem, mas que não pode ser armazenada na forma de energia elástica como em um sólido.

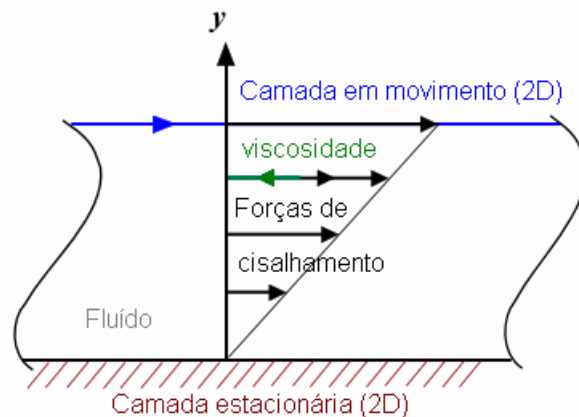


Figura 4: Deslocamento laminar de um fluido.

Com isto podemos definir um líquido newtoniano como um material que assume a forma do recipiente onde está contido e cuja viscosidade é invariante em relação às forças aplicadas nele². O exemplar mais conhecido é a água, tanto que muitas vezes, definem-se líquidos newtonianos como aqueles que se comportam como a água.

¹ Uma forma de enxergar esta propriedade é imaginar que se despejássemos um líquido sobre uma superfície sem atrito, ele ainda iria perder energia e parar – esta perda seria devida à viscosidade.

² As forças às quais nos referimos são sempre muito superiores à força da tensão superficial do líquido, que pode ser então desprezada.

Resta-nos assim definir o que é um líquido não-newtoniano, que como comentado, poderia ser definido como aquele que não se comporta como a água, mas para algo mais produtivo, é aquele que viola alguma das definições já citadas para líquidos newtonianos. No entanto é de se esperar que estes líquidos, por ainda serem líquidos, não tenham forma definida e assumam a forma de seus recipientes. Por outro lado a variação da viscosidade em alguns líquidos caracterizaria um líquido não-newtoniano:

- líquidos tixotrópicos: são os que apresentam uma diminuição gradual da viscosidade quando expostos a uma força externa;
- líquidos reopéticos: são os que apresentam um aumento gradual da viscosidade quando expostos a uma força externa.

Para o efeito Kaye teremos um líquido tixotrópico conhecido como “shear-thining”, líquidos que afinam sob uma força de cisalhamento.

Se imaginarmos o líquido solto no espaço sem gravidade sua tensão superficial irá formar uma esfera deste líquido³. Em seguida, se tentarmos deformar esta esfera, com forças de cisalhamento, teremos uma resistência do próprio líquido devido a sua viscosidade.

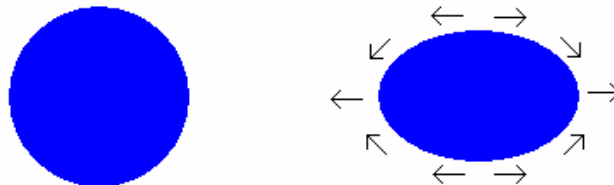


Figura 5: Forças sobre a gota.

Sendo assim podemos imaginar que ao despejar um líquido de um recipiente, a gravidade criará forças de cisalhamento que puxarão a extremidade deste líquido em direção ao chão, criando o filete de líquido que vemos sair do recipiente e que vai afinando à medida que cai. Ao mesmo tempo a viscosidade se opõe a esta deformação, se opondo à formação do filete; logo quando a viscosidade for grande o suficiente, o filete deixará de ser coeso, se romperá e formará gotas (o que acaba acontecendo, pois com o filete cada vez mais fino, mais facilmente ele se rompe). Por outro lado, em um líquido tixotrópico a

³ Assim como os planetas e estrelas que assumem esta forma por ser a de menor energia.

viscosidade diminui à medida que o filete cai, permitindo que o filete fique coeso por muito mais tempo (Figura 2).

No efeito Kaye este filete de líquido chega ainda coeso a um recipiente contendo mais deste líquido. Ao chegar no líquido parado, as primeiras partes do filete irão começar a se amontoar formando um monte (Figura 6.1), já que a viscosidade do próprio líquido exige um certo tempo para ele se acomodar.

Porem o líquido que ainda está chegando pode encontrar uma superfície no próprio monte de líquido que favoreça o ricochete (Figura 6.2). Isso faz com que esta frente de líquido seja ejetada formando um jato que não se mistura com o líquido do monte.

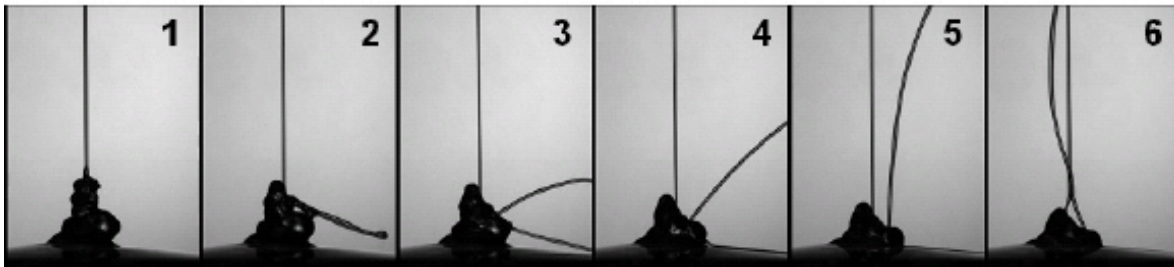


Figura 6: Fotos sequenciais do efeito Kaye.

Infelizmente, o efeito dura apenas alguns centésimos de segundos. Isto ocorre pois após o jato ser formado o filete começa a pressionar o monte onde ele ricocheteia e o deforma formando uma vala cada vez mais profunda. Isso aumenta o ângulo de ejeção do filete (Figura 6.3-6.5) até que ele atinge o filete incidente (Figura 6.6), cortando o fluxo contínuo.

2.3) Nível de Graduação

Neste efeito podemos identificar um dos conceitos mais simples, porém muito importante, da mecânica dos fluidos, o conceito de continuidade. Neste conceito como a matéria não é criada a quantidade de líquido fluindo por um cano é sempre a mesma ao longo de todo o percurso. Matematicamente temos:

$$V_{in} R_{in} = V_{out} R_{out},$$

Equação 1

onde V é a velocidade do líquido em um ponto

R é o raio da seção transversal no mesmo ponto

Sendo assim, se observarmos a Figura 7 iremos perceber que o raio do feixe muda ao ser ricocheteado. Isto ocorre porque, como mostrado na Figura 8, o filete vem com uma velocidade V_{in} e um diâmetro R_{in} . Ao passar pelo líquido $[L]$, o filete deve perder um pouco de sua energia devido ao atrito $[\eta]$, e sair com uma velocidade V_{out} e um diâmetro R_{out} .

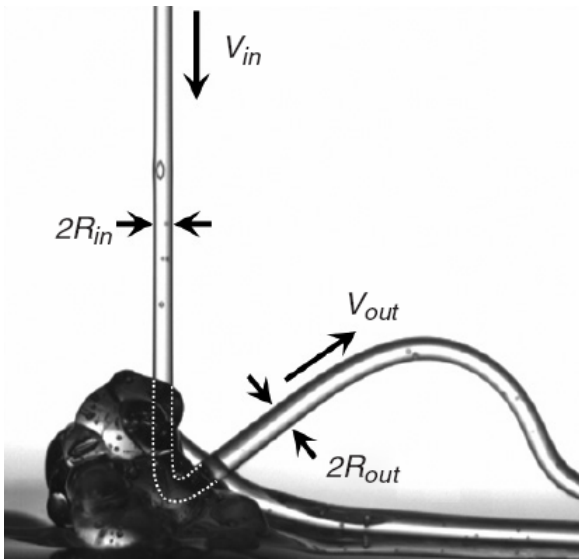


Figura 7: Foto do efeito Kaye.

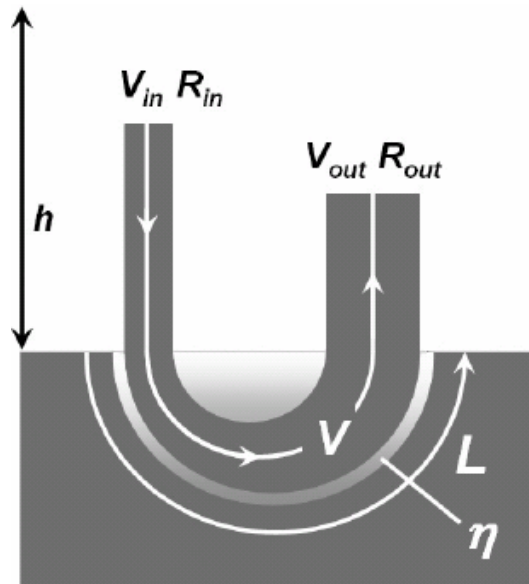


Figura 8: Modelo do efeito Kaye.

Pode-se até estimar a velocidade $[V_{out}]$ com que o feixe deixa a superfície L :

Pelo princípio de conservação de energia teremos que a energia cinética com que o feixe chega na superfície é igual à energia potencial disponível na queda:

$$mgh = \frac{mV_{in}^2}{2} \Rightarrow V_{in} = \sqrt{2gh}, \quad \text{Equação 2}$$

onde h é a altura de queda do feixe
 g é a aceleração da gravidade

Portanto a velocidade V_{out} pode ser calculada pela relação de continuidade mostrada na Equação 1:

$$V_{out} = \sqrt{2gh} \frac{R_{in}}{R_{out}} \quad \text{Equação 3}$$

As medidas de raio R podem ser feitas com uma fotografia do efeito.

3) Montagem experimental

O esquema inicial para a montagem experimental pode ser visto na Figura 9, nele podemos identificar que a rampa inclinada deve favorecer o acontecimento do evento.

Os materiais utilizados são listados abaixo e mostrados na Figura 10.

- Xampu *Seda Lissage* da empresa Unilever®
- Suporte (estruturas, parafusos e arames)
- Reservatório de xampu (garrafa)
- Coletor de xampu (bacia)
- Alvo (cano de PVC cortado)
- Regulador de fluxo (torneira)

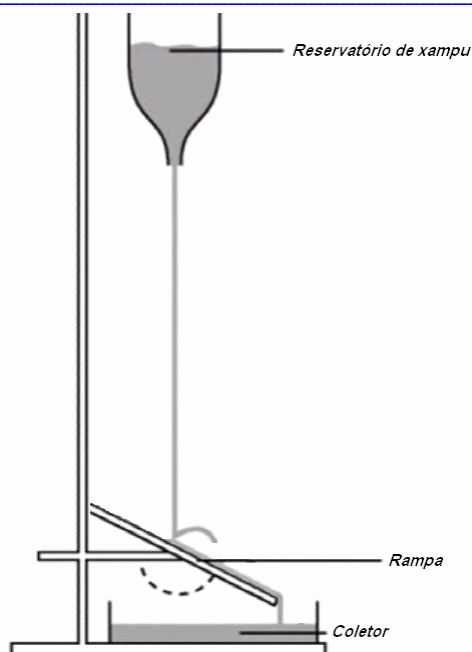




Figura 10: Materiais utilizados.



Figura 11: Montagem experimental

Na Figura 11 vemos a estrutura de suporte montada, ela tem uma altura de $\sim 77\text{cm}$ e suportará tanto a parte superior quanto a inferior do conjunto.

Na parte superior teremos o reservatório de xampu, que deverá alimentar a torneira que libera o fio de xampu (Figuras 12 e 13).



Figura 12: Parte superior da estrutura.



Figura 13: Detalhe da torneira



Na parte inferior temos a rampa e o reservatório final que recolhe o xampu (Figura 14).

Figura 14: Parte inferior da estrutura.

4) Resultados obtidos

Como mencionado, para se obter as medidas foi preciso fotografar o efeito. Esta fotografia é mostrada na Figura 15, na qual pode-se notar, com alguma dificuldade, o efeito. Para melhorar a visualização fizemos um pós-processamento na imagem a fim de melhorar a relação brilho contraste, o resultado é mostrado na Figura 16.

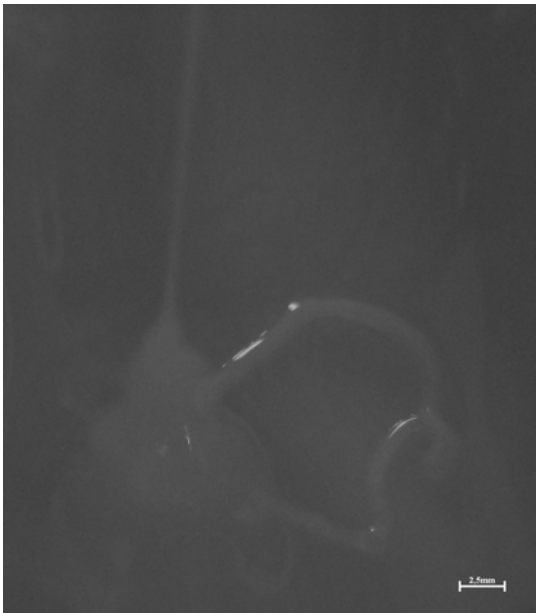


Figura 15: Foto do efeito Kaye.



Figura 16: Foto pós-processada.

Neste caso, a altura h foi de 20cm, fazendo a velocidade V_{in} igual a 2m/s. Ao mesmo tempo, segundo a Figura 17, podemos identificar que $2R_{in}$ é aproximadamente 1mm, enquanto que $2R_{out}$ é aproximadamente 2mm. Com isso podemos calcular a velocidade de escape $V_{out} = 1\text{m/s}$.

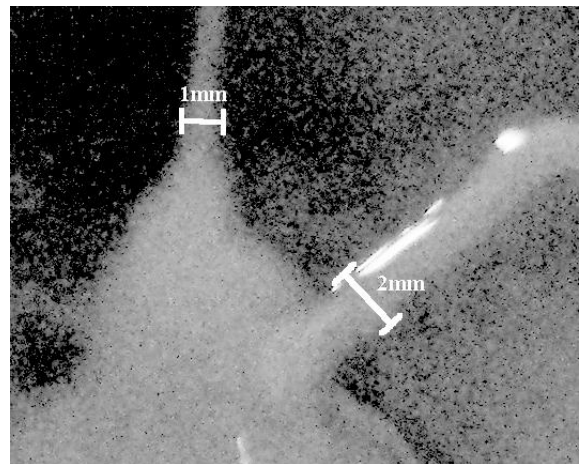


Figura 17: Medidas de R_{in} e R_{out} .

4.1) Comentário sobre os resultados obtidos

Porém, este resultado não é muito claro, já que foi possível efetuar apenas uma medida. Isto ocorreu devido ao fato que o efeito é muito rápido e acontece aleatoriamente, dificultando a obtenção de uma foto de qualidade.

Uma opção para este problema seria a montagem proposta anteriormente no relatório parcial e inspirada em [3]. Nele é apresentada uma montagem que possibilitaria a criação de um efeito Kaye estável, e portanto mais susceptível às medidas. Contudo a montagem proposta não foi eficiente em criar o efeito estável que se queria, pois apesar de seguir as recomendações discutidas em [3] esbarramos em um problema que não foi previsto. Este problema foi bolhas de ar encontradas em suspensão no xampu utilizado e que deformam o feixe incidente variando seu diâmetro - dessa forma foi impossível criar a constância no fluxo necessária para criar o efeito Kaye estável.

5) Comentários e orientações de docentes

5.1) Orientadora Profa Dra Gabriela Castellano

5.1.1) Comentário do relatório parcial

Minha orientadora, Profa. Gabriela Castellano, expressou a seguinte opinião sobre o relatório parcial:

“O relatório está muito bom: além de bem escrito, as ilustrações utilizadas são de grande valia no entendimento do fenômeno. A descrição do mesmo para os vários níveis de “ouvintes” me pareceu adequada. Percebe-se que o aluno se esforçou bastante tanto na pesquisa para entender o fenômeno, quanto na busca dos materiais e construção do protótipo inicial para o experimento. Considero o desempenho geral excelente.”

5.1.2) Comentário do relatório final

Minha orientadora, Profa. Gabriela Castellano, concorda com o expressado neste relatório final e deu a seguinte opinião:

“O relatório está muito bom. Apesar do objetivo final do projeto não ter sido alcançado, foi conseguida uma foto para a demonstração do mesmo. Considero o desempenho do aluno satisfatório.”

5.2) Profa Dra Inês Joecker do Instituto de Química (IQ)

Colaborou com os conhecimentos de química sobre a composição química dos xampus:

“Um xampu constituído, basicamente, de água, surfactante e sal. O surfactante, geralmente, um laurilssulfato de sódio ou um lauril-éter-sulfato de sódio (ou de amônia), em concentração tal que forma micelas, pequenos agregados esféricos.

O sal adicionado como moderador de viscosidade. Todos os demais 'ingredientes' são prescindíveis: aumentadores de espuma (dietanolamidas, betaínas, etc.), controladores de pH (ácido cítrico, etc.), opacificantes (estearatos).”

5.3) Prof Dr Alberto Saa do Instituto de Matemática, Estatística e Computação Científica (IMECC)

Pode colaborar na compreensão da modelagem matemática utilizada em [2]

6) PESQUISA REALIZADA

[1] Kaye A, *A bouncing liquid stream*, 1963 *Nature* **197** 1001

A primeira documentação que relata a existência do efeito Kaye, embora nesta época o autor não teve sucesso em descrever o fenômeno.

[2] Versluis, M.; et al. "Leaping shampoo and the stable Kaye effect". *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment* [JSTAT/2006/P07007]

O primeiro artigo que explica em detalhes o funcionamento do efeito Kaye.

[3] http://www.youtube.com/watch?v=GX4_3cV_3Mw Acessado em 04/10/2007.

Filme feito pela equipe que escreveu o artigo do item anterior, muito instrutivo em como realizar o experimento proposto neste trabalho.

[4] http://en.wikipedia.org/wiki/Kaye_effect

[5] http://en.wikipedia.org/wiki/Non-Newtonian_fluid

[6] http://en.wikipedia.org/wiki/Newtonian_fluid

[7] <http://en.wikipedia.org/wiki/Thixotropy>

[8] <http://en.wikipedia.org/wiki/Rheopecty>

[9] http://en.wikipedia.org/wiki/Shear_thinning

Conjunto de artigos acessados pela última vez em 04/11/2007, que explicam os conceitos de mecânica de fluidos utilizados neste trabalho.