

## PROCESSO DE CRIAÇÃO DA EXPERIÊNCIA VIRTUAL “CONTINUIDADE”<sup>i</sup>

Pedro Leonidas Oseliero Filho<sup>1</sup>, Nora Lia Maidana<sup>2(\*)</sup>

<sup>1</sup>Universidade de São Paulo, Instituto de Física, [pedroleonidasoseliero@hotmail.br](mailto:pedroleonidasoseliero@hotmail.br)

<sup>2</sup>Universidade de São Paulo, Instituto de Física, [nmaidana@if.usp.br](mailto:nmaidana@if.usp.br)

### 1. INTRODUÇÃO

Apesar do interesse em realizar experimentos de Mecânica de Fluidos, é difícil encontrar o material e o *marcador* adequados para acompanhar o seu escoamento, cuja cor contraste com o fluido e cujo movimento seja o mesmo do fluido, o que precisa ser testado.

Encontramos um detergente comercial que contém bolinhas de manteiga de *karité*, avermelhadas, que funcionam como marcadores. A fig.1 mostra a aparência do produto, que pode ser encontrado nas prateleiras de supermercados.

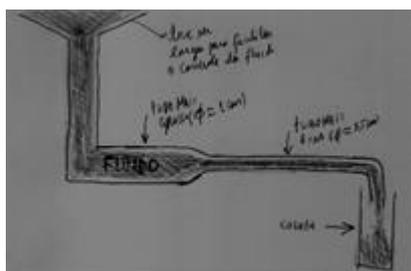


**Figura 1:** Frasco de detergente encontrado em supermercados e que foi usado na experiência.

Este primeiro experimento foi planejado para verificar se os marcadores testemunhavam corretamente a velocidade do fluido, que foi medida ao longo de um tubo de seção transversal variável, para verificar a equação de continuidade.

### 2. MATERIAIS E MÉTODOS

A fig. 2 mostra um esboço para um possível aparato, e abaixo o que foi construído no laboratório didático do IFUSP.



**Figura 2:** Acima, o esboço do tubo a ser usado no experimento. Abaixo, o aparato construído.

O aparato consistiu num tubo de vidro em forma de "L" com uma parte vertical de 34,30(5) cm de altura e 2,262(2) cm de diâmetro e uma parte horizontal com o mesmo raio anterior e 25,60(5) cm de comprimento até a união com outro tubo de 0,55(5) cm de diâmetro e 17,20(5) cm de comprimento. A experiência consistiu em deixar cair o detergente no tubo vertical e manter a altura do mesmo constante para garantir que o peso coluna de fluido gere, no tubo horizontal, uma vazão constante. A experiência foi repetida diversas vezes, a fim de procurar as melhores condições de filmagem, no sentido de facilitar a análise dos quadros extraídos. A fig. 3 mostra quadros de várias filmagens realizadas.

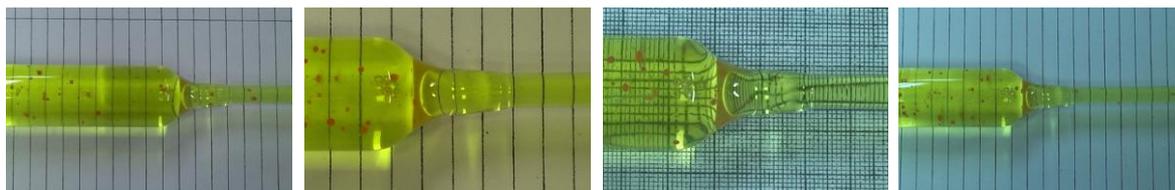


Figura 3: Alguns exemplos de filmagens realizadas.

### 3. FLUÍDOS EM MOVIMENTO

Em primeira aproximação, supomos que o fluido possa ser tratado como um fluido ideal, incompressível e em escoamento laminar. Desse modo, a equação de continuidade [1,2,3] nos fornece

$$A_1 \cdot v_1 = A_2 \cdot v_2 \quad (1)$$

onde “v” e “A” correspondem à velocidade e à área da seção reta do tubo, respectivamente, enquanto os índices “1” e “2” identificam as duas partes do tubo. A equação (1) prevê qualitativamente que a velocidade de escoamento é maior no trecho mais estreito do que no mais largo. De fato, observamos isso nas nossas filmagens, mas (1) não é satisfeita quantitativamente dentro das incertezas experimentais envolvidas. Chegamos à conclusão de que a viscosidade, que expressa o atrito existente entre as moléculas do fluido durante seu escoamento, precisa ser levada em conta, de modo que o movimento das bolinhas varia com a distância à parede do tubo; a imagem que diferencia o fluido real do ideal se encontra na fig. 4.

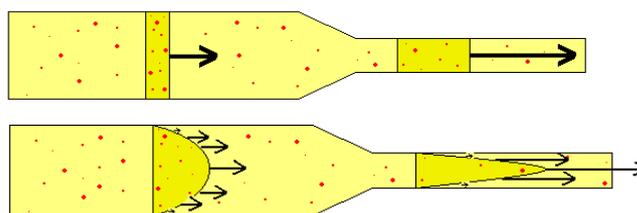


Figura 4: O esboço de cima ilustra o perfil das velocidades de um fluido ideal, em função da distância à parede do tubo cilíndrico; o esboço de baixo trata de uma situação mais realista, onde, por causa da viscosidade, o perfil das velocidades não é constante.

Assim, na análise dos dados, é preciso levar em conta o *perfil de velocidades*. Esse perfil, que inclui o fato do fluido em contato com a parede do tubo encontrar-se parado,

aliado ao tamanho finito dos marcadores, implica em correções na equação (1) usando valores médios  $\bar{v}_1$  e  $\bar{v}_2$  em cada secção do tubo:

$$A_1 \cdot \bar{v}_1 = A_2 \cdot \bar{v}_2 \tag{2}$$

#### 4. RESULTADOS

A fig. 5 mostra a distribuição de velocidades obtidas na secção estreita do tubo, na medida das velocidades de 104 bolinhas.

As velocidades médias da expressão (2) foram obtidas como a média aritmética de 500 bolinhas analisadas, mas, levando em conta o desenho da fig. 4, essa média deveria envolver não só o número total de bolinhas consideradas, mas a distância ao eixo central do tubo.

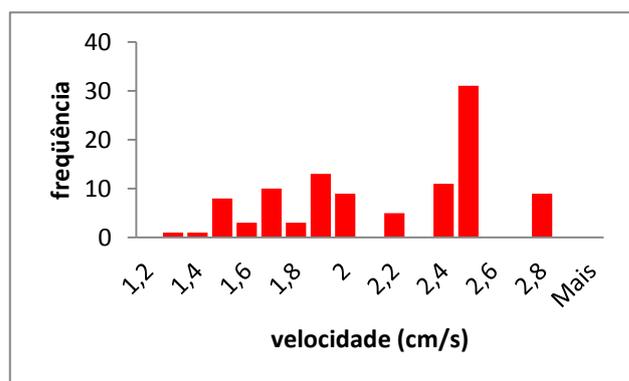


Figura 5: Distribuição de velocidades na secção estreita do tubo.

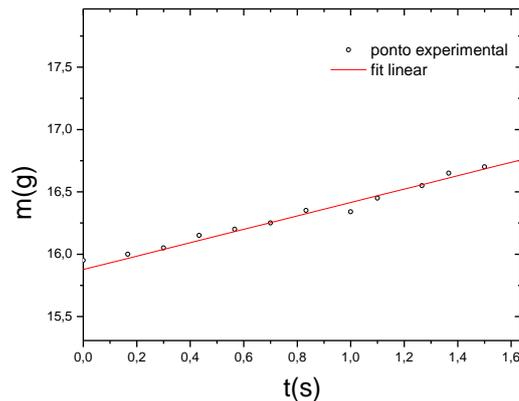
A velocidade média no trecho estreito foi  $1,98(14)$  cm/s e para o tubo mais largo,  $0,14(1)$  cm/s.

##### 4.1. Velocidade de escoamento do fluido

Para verificar se as bolinhas realmente testemunhavam a velocidade de escoamento do fluido, foi determinada a massa de detergente que escoava do aparato experimental com uma balança digital e uma filmadora. Assim, foi filmado o visor de uma balança digital com a filmadora enquanto o fluido saía da extremidade do tubo estreito. Da análise dos quadros obtidos das filmagens obtivemos o gráfico mostrado na fig. 6, cujo ajuste linear fornece um fluxo de massa de  $0,51(1)$  g/s. Usando o valor de densidade determinado experimentalmente, a vazão é  $0,50(2)$  cm<sup>3</sup>/s que composto com  $0,24(5)$  cm<sup>2</sup> de secção reta do tubo estreito nos fornece a velocidade média da segunda coluna da tabela 1.

Tabela 1. Velocidade média do fluido na parte estreita

Secção	Velocidade média obtida pela vazão em massa e pela densidade (cm/s)	Velocidade média da análise de velocidade de 500 bolinhas (cm/s)
estreita	2,1(4)	1,9 (1)



**Figura 6:** Conforme o líquido era coletado, a filmadora acompanhava a indicação da balança. Nos gráficos estão representados poucos pontos em relação aos que de fato usamos para determinar o fluxo de massa, mas que ilustram bem o comportamento linear dos mesmos.

#### 4.2. Viscosidade do fluido

Os alunos para os quais essa experiência se destina provavelmente não terão contato com o fluido de trabalho. É possível determinar a viscosidade do fluido usado na experiência usando a Lei de Poiseuille [1,2,3],

$$V = \frac{\pi a^4 P}{8\eta l} \tag{3}$$

onde “V” é a vazão, “a” e “l” são o raio e comprimento do tubo (estreito), “P” a pressão do fluido (obtido pelo peso da coluna de fluido que se encontrava no tubo vertical), e “η” a viscosidade. Com os dados experimentais a viscosidade encontrada foi

$$\eta = 1,9(2) \frac{Kg}{ms} \tag{4}$$

#### 4.3. Verificação da validade da Equação de Continuidade

A razão das velocidades nas duas secções,  $\frac{\bar{v}_2}{\bar{v}_1} = 14(1)$ , a razão das áreas “efetivas” (seção reta de cada trecho do tubo com correções no diâmetro do tubo tendo em vista o diâmetro aproximado da bolinha)  $\frac{A_1}{A_2} = 16(2)$ .

### 5. CONCLUSÃO

A equação de continuidade (2), que considera efeitos não ideais como a viscosidade do fluido, foi satisfeita uma vez que o quociente das áreas e o inverso das velocidades foram compatíveis dentro das incertezas experimentais. Continuaremos com

a preparação do roteiro da experiência assim como sua disponibilização no sitio de experimentos (<http://fep.if.usp.br/~fisfoto>).

Pretendemos definir como objetivo principal desta experiência que o aluno comprove a validade da equação de continuidade. Para isso ele determinará também a viscosidade do fluido e o número de Reynolds para o escoamento do fluido, o que garantirá que o fluido está escoando laminarmente e não de maneira turbulenta.

## 6. BIBLIOGRAFIA

NUSSENZVEIG, H. Moysés. *Curso de Física Básica: 2 – Fluidos, Oscilações e Ondas, Calor*. 4 ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2002.

BISTAFA, Sylvio R. *Mecânica dos Fluidos – Noções e Aplicações*. 1 ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2010.

MUNSON, Bruce R., OKIISHI, Theodore H., YOUNG, Donald F. *Fundamentos de Mecânica dos Fluidos*. 4 ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2004.

---

<sup>i</sup> Projeto desenvolvido no âmbito do Programa Ensinar com Pesquisa, da Pró-Reitoria de Graduação da Universidade de São Paulo.

(\*) Integram este projeto: Pedro Leonidas Oseliero Filho, Glaucio Gomes Moreno Senhora, Suelen Fernandes de Barros, Monaliza da Fonseca, Nora Lia Maidana e Vito Roberto Vanin.