



DISPOSITIVO DIDÁTICO PARA VERIFICAÇÃO DO PRINCÍPIO DA CONSERVAÇÃO DA MASSA / EQUAÇÃO DA CONTINUIDADE

Ramon Carneiro^a, Renan da Silva Gadelha^b, Angelo Passaro^c, Paulo Gilberto de Paula Toro^d, George Santos Marinho^e

^a Pós-Graduação em Ciências e Tecnologias Espaciais / Instituto Tecnológico de Aeronáutica – ramon_cgd@hotmail.com

^b Escola de Ciências e Tecnologia / Universidade Federal do Rio Grande do Norte – renan.gadelha.707@ufrn.edu.br

^c Instituto de Estudos Avançados – Departamento de Ciência e Tecnologia Aeroespacial – angelo@ieav.cta.br

^d Pós-Graduação em Engenharia Aeroespacial / Universidade Federal do Rio Grande do Norte - toro11pt@gmail.com

^e Departamento de Engenharia Mecânica / Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Centro de Tecnologia, Natal RN Brasil, 59078-970 – george.marinho@ufrn.br

Resumo

Foi construído e testado um dispositivo didático para demonstrar o princípio de conservação de massa. Feito a partir de material de fácil aquisição, encontrado no comércio ou descartado, o dispositivo é portátil e pode ser utilizado em laboratório ou sala de aula para turmas de Mecânica dos Fluidos. Durante os testes, foi verificado desvio máximo de 12 % em relação aos cálculos teóricos (equação da continuidade). Com instrumentação adequada, o dispositivo também pode ser empregado em outros experimentos de Mecânica dos Fluidos, como, por exemplo, o princípio de Bernoulli.

Palavras-chave: Mecânica dos Fluidos; Conservação de Massa; Experimental; Aerodinâmica; Difusor.

Abstract

A didactic device was built and tested to demonstrate the principle of conservation of mass. Made from easily purchased material, found commercially or discarded, the device is portable and can be used in the laboratory or classroom for Fluid Mechanics classes. During the tests, a maximum deviation of 12% was verified in relation to the theoretical calculations (continuity equation). With adequate instrumentation, the device can also be used in other experiments in Fluid Mechanics, such as, for example, Bernoulli's principle.

Keywords: Fluid Mechanics; Mass Conservation; Experimental; Aerodynamics; Diffuser.

1. INTRODUÇÃO

Borgnakke e Sonntag (2009, p. 114) fizeram uma interessante discussão sobre a variação da massa de um sistema quando sua energia varia. Como ilustração, consideraram uma mistura com 1 kg de ar e gasolina, cuja queima gera ~ 2900 kJ de calor

e que, pela equação $E = m.c^2$, sendo E – energia do sistema (J), m – massa (kg) e c – velocidade da luz (m/s), resulta em uma variação da massa de $\sim 3 \times 10^{-11}$ kg. Finalizaram explicando que, nessa ordem de grandeza, a variação da massa é irrelevante em engenharia e, portanto, as leis da conservação da massa e da energia podem ser consideradas independentes.

Vê-se que, ao contrário do sugerido pelo “bom senso”, a conservação da massa não é uma questão trivial.

Alunos de engenharia que cursam a disciplina Mecânica dos Fluidos devem, obrigatoriamente, conhecer os princípios conservativos da massa, quantidade de movimento e energia. Quando acompanhado da prática em laboratório, acredita-se, o conhecimento pode se tornar perene.

Nesta comunicação teve-se por objetivo proporcionar ao professor de Mecânica dos Fluidos – matéria intrinsecamente experimental, uma alternativa barata para superar deficiências de recursos laboratoriais e, desse modo, transmitir ao Aluno conhecimentos práticos.

2. FUNDAMENTAÇÃO

O princípio da conservação de massa foi deduzido em 1760, por Mikhail Vasilyevich Lomonosov (1711 – 1775). Porém, na Europa ocidental, somente em 1773, com Antoine-Laurent de Lavoisier (1743 – 1794), passou-se a conhecer esse que, juntamente com os princípios da conservação da quantidade de movimento e da conservação da energia, se tornou um dos pilares da ciência.

Qualitativamente, a conservação da massa é expressa na forma do postulado de Lavoisier: “Na natureza, nada se cria, nada se perde, tudo se transforma”. Sua forma quantitativa pode ser deduzida matematicamente de modo fácil.

Considere-se um volume de controle fixo no espaço, correspondendo à superfície interna de uma tubulação cujos diâmetros de entrada e saída são diferentes. Um fluido escoando no interior dessa tubulação apresentará velocidade ϑ_1 ao cruzar a seção com diâmetro D_1 e velocidade ϑ_2 ao cruzar a seção com diâmetro D_2 . O princípio da conservação da massa pode ser demonstrado conforme se vê na Fig. 1.

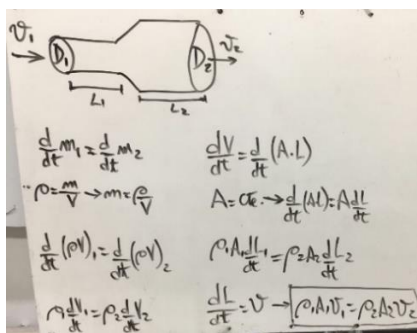


Fig. 1 – Dedução da equação da continuidade.

A equação da continuidade – forma quantitativa do princípio da conservação de massa, resulta em:

$$\rho \cdot A \cdot \vartheta = \text{constante} \quad (1)$$

ou

$$\frac{d}{dt} m = \rho \cdot A \cdot \vartheta \quad (2)$$

Sendo:

dm/dt = fluxo da massa no tempo (vazão mássica, kg/s)

ρ = massa específica do fluido (kg/m³)

A = área da seção reta da tubulação (m²)

ϑ = velocidade do escoamento do fluido (m/s).

Aplicada à tubulação representada na Fig. 1, a equação da continuidade pode ser reescrita na seguinte forma:

$$\rho_1 A_1 \vartheta_1 = \rho_2 A_2 \vartheta_2 \quad (3)$$

A hipótese de massa específica do ar constante ($\rho_1 = \rho_2$) é razoável para escoamentos subsônicos abaixo do número de Mach 0,3. Portanto, a Eq. (3) pode ser reescrita na forma como será utilizada na prática:

$$A_1 \vartheta_1 = A_2 \vartheta_2 \quad (4)$$

A partir da Eq. (4) percebe-se que, se a área na saída do difusor (A_2) é maior que a área na entrada (A_1), a conservação da massa estabelece que a relação entre as velocidades será:

$$\vartheta_2 < \vartheta_1 \quad (5)$$

3. MATERIAL E MONTAGEM

O dispositivo didático é um difusor, que consiste em dois tubos com diâmetros diferentes, unidos por uma seção cônica e acoplado a um ventilador – que, dependendo da posição em que é montado, funciona como exaustor ou insuflador.

O fluido de trabalho empregado foi ar atmosférico, porém outros gases podem ser utilizados. Neste trabalho, optou-se por montar o ventilador após a seção cônica – funcionando como exaustor (Fig. 2).

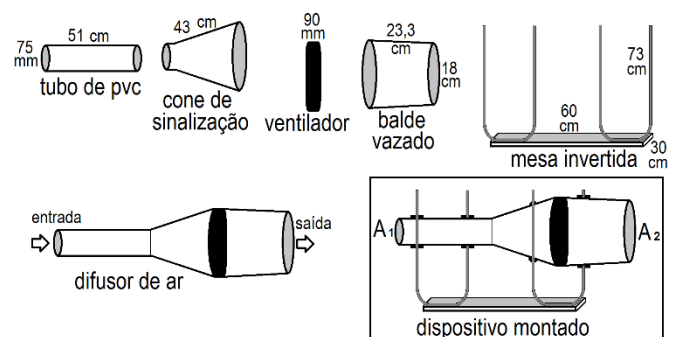


Fig. 2 – Dispositivo para prática de Mecânica dos Fluidos.

Utilizou-se um ventilador axial, modelo AK2582HB / Berflo, com 23,3 cm de diâmetro, alimentado com 220 V (Fig. 3).



Fig. 3 – Ventilador do difusor didático.

As junções entre tubo e seção cônica, saída da seção cônica e ventilador e entre ventilador e balde vazado foram vedadas com fita de teflon, tornando o conjunto estanque ao ar.

O difusor foi fixado às pernas de uma mesa escolar e o tampo da mesa serviu como base do dispositivo. Porém, qualquer estrutura pode ser utilizada para essa função, desde que a montagem proporcione alinhamento entre os centros das áreas de entrada (A_E) e de saída (A_S) e nivelamento horizontal.

As velocidades de escoamento de ar na entrada e saída do exaustor foram medidas por meio de um anemômetro de ventoinha (Fig. 4), modelo MDA – 10 / Minipa, com faixa de medição de 0,0 m/s a 45 m/s, resolução = 0,1 e incerteza = $\pm 3,0\%$ da leitura ou 0,1 – o que for maior (MINIPA, 2000).



Fig. 4 – Anemômetro de ventoinha.

Foi o item de maior custo desta proposta. Um anemômetro de ventoinha pode ser encontrado no comércio de eletrônicos e custar algo entre cem e duzentos reais. Outras opções também podem ser consideradas, como o anemômetro de fio quente (MARINHO et al., 1999).

Em função do anemômetro disponível para realizar os testes, o ajuste da posição para medir a velocidade do ar na região de entrada do difusor foi bastante simples, pois os diâmetros do tubo e do anemômetro eram praticamente coincidentes. As medições do fluxo de ar na saída do difusor, por sua vez, exigiram um ajuste cuidadoso entre o eixo da ventoinha do anemômetro e o centro da seção de saída (A_S).

O uso de um estabilizador de tensão não é imprescindível. Porém, quando essa não for uma opção viável, deve-se ficar atento para flutuações de energia da rede elétrica, que fazem variar a velocidade de rotação do ventilador e, desse modo, podem interferir na repetição dos resultados.

Na Fig. 3 observa-se o dispositivo em sua montagem final, pronto para ser utilizado em aula.



Fig. 3 – Difusor didático com anemômetro na saída (A_2).

4. PROCEDIMENTOS PARA USO DO DISPOSITIVO

Ao ser ligado à rede elétrica, o ventilador aspira o ar ambiente, que entra no tubo de PVC em A_E , atravessa a seção cônica, cruza as pás do ventilador e chega à saída em A_S .

Na Fig. 4 representam-se os pontos de instalação do anemômetro, na entrada e saída do difusor, respectivamente nos pontos a montante (esquerda) e a jusante (direita).

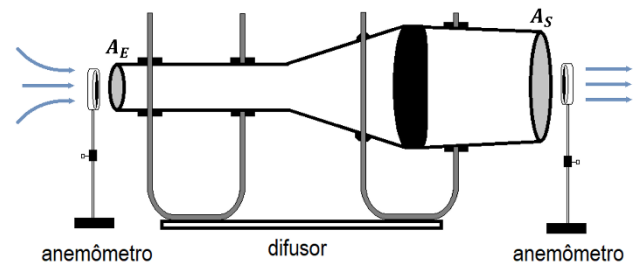


Fig. 4 – Pontos de instalação do anemômetro.

Obviamente, para manter os custos baixos, utiliza-se o mesmo anemômetro nas medições das velocidades de escoamento do ar nas duas extremidades do difusor.

O ajuste do anemômetro nos pontos de medição deve ser feito com extremo cuidado, para garantir o correto alinhamento aos respectivos centros das áreas de entrada (A_E) e de saída (A_S) do difusor. Sugere-se que os Alunos realizem pelo menos cinco medições da velocidade em cada seção.

A verificação do princípio da conservação da massa permite diferentes abordagens. Aqui, considerou-se a estimativa teórica (Eq. 4) da velocidade do ar na saída do difusor ($\vartheta_{S,teor}$) a partir da velocidade média do ar na entrada ($\bar{\vartheta}_{E,exp}$), obtida por meio do anemômetro. Acredita-se que esse procedimento pode estimular os Alunos a, trabalhando em grupos, realizar as atividades como em uma competição: quanto maior o empenho menor será o desvio relativo entre o resultado teórico ($\vartheta_{S,teor}$), da Eq. (4), e a média experimental ($\bar{\vartheta}_{S,exp}$).

5. RESULTADOS

Visando validar a proposta da presente comunicação, foram realizadas medições do fluxo de ar nas duas seções do difusor durante um intervalo de tempo de 60 minutos, a cada minuto, totalizando 120 medições, como pode ser visto na Tab.1.

Tab. 1 – Velocidades do ar obtidas com anemômetro.

| Medição | $\vartheta_{E,exp}$ m/s | $\vartheta_{S,exp}$ m/s | Medição | $\vartheta_{E,exp}$ m/s | $\vartheta_{S,exp}$ m/s |
|---------|----------------------------|----------------------------|---------|----------------------------|----------------------------|
| 1 | 7,6 | 1,2 | 31 | 7,7 | 1,4 |
| 2 | 7,6 | 1,1 | 32 | 7,7 | 1,1 |
| 3 | 7,5 | 1,3 | 33 | 7,6 | 1,0 |
| 4 | 7,5 | 1,2 | 34 | 7,6 | 1,3 |
| 5 | 7,9 | 1,3 | 35 | 7,6 | 1,1 |
| 6 | 7,7 | 1,1 | 36 | 7,9 | 1,3 |
| 7 | 7,8 | 1,1 | 37 | 7,7 | 1,1 |
| 8 | 7,7 | 1,4 | 38 | 7,9 | 1,5 |
| 9 | 7,6 | 1,1 | 39 | 7,7 | 1,0 |
| 10 | 7,6 | 1,3 | 40 | 8 | 1,1 |
| 11 | 7,9 | 1,2 | 41 | 8 | 1,1 |
| 12 | 8,0 | 1,1 | 42 | 7,9 | 1,1 |
| 13 | 7,4 | 1,1 | 43 | 7,7 | 1,2 |
| 14 | 7,7 | 1,0 | 44 | 7,9 | 1,2 |
| 15 | 7,7 | 1,1 | 45 | 7,4 | 1,0 |
| 16 | 7,5 | 1,2 | 46 | 8,3 | 1,1 |
| 17 | 7,8 | 1,1 | 47 | 7,5 | 1,6 |
| 18 | 7,7 | 1,2 | 48 | 7,7 | 1,3 |
| 19 | 7,7 | 1,4 | 49 | 7,6 | 1,2 |
| 20 | 7,7 | 1,1 | 50 | 7,8 | 1,0 |
| 21 | 7,8 | 1,1 | 51 | 7,7 | 1,0 |
| 22 | 7,9 | 1,2 | 52 | 7,6 | 1,2 |
| 23 | 7,7 | 1,0 | 53 | 7,9 | 1,2 |
| 24 | 7,8 | 1,2 | 54 | 7,9 | 1,2 |
| 25 | 7,8 | 1,2 | 55 | 8,1 | 1,3 |
| 26 | 7,7 | 1,3 | 56 | 7,5 | 1,1 |
| 27 | 8,0 | 1,4 | 57 | 7,6 | 1,0 |
| 28 | 7,7 | 1,5 | 58 | 7,8 | 1,1 |
| 29 | 7,7 | 1,0 | 59 | 7,7 | 1,2 |
| 30 | 7,6 | 1,4 | 60 | 8 | 1,0 |

Na Tab. 2 apresentam-se os valores médios das velocidades $\bar{\vartheta}_{E,exp}$ e $\bar{\vartheta}_{S,exp}$ e os respectivos desvios-padrões das medidas obtidas por meio do anemômetro.

Tab. 2 – Médias e desvios-padrões das velocidades do ar.

| | $\bar{\vartheta}_{E,exp}$ | $\bar{\vartheta}_{S,exp}$ |
|---------------|---------------------------|---------------------------|
| Velocidade | 7,7 m/s | 1,2 m/s |
| Desvio-padrão | $\pm 0,14$ m/s | $\pm 0,13$ m/s |

Na Tab. 3 apresentam-se os valores relativos à aplicação dos dados experimentais à Eq. (4) e o respectivo resultado teórico da velocidade na saída do difusor.

Tab. 3 – Dados do escoamento através do difusor didático.

| A_E | $\bar{\vartheta}_{E/exp}$ | A_S | $\vartheta_{S/teor}$ (Eq.4) |
|------------------------|---------------------------|------------------------|-----------------------------|
| 0,00442 m ² | 7,7 m/s | 0,02545 m ² | 1,34 m/s |

Na Tab. 4 comparam-se os resultados teórico (Eq. 4) e experimental para velocidade do ar na saída do difusor.

Tab. 4 – Velocidade do ar na saída do difusor.

| $\bar{\vartheta}_{S,experimental}$ | $\vartheta_{S,teórica}$ (Eq. 4) | $\Delta = \left \frac{\bar{\vartheta}_{S/exp} - \vartheta_{S/teor}}{\bar{\vartheta}_{S/exp}} \right \cdot 100$ |
|------------------------------------|---------------------------------|--|
| 1,2 m/s | 1,34 m/s | 11,6 % |

Comparando-se os resultados obtidos nos experimentos (Tab. 4), constatou-se um desvio máximo relativo entre teoria e prática de aproximadamente 12 %, que pode ser considerado dentro da faixa esperada para um dispositivo didático fabricado utilizando-se peças aproveitadas de descartes.

Foram observadas flutuações na velocidade do escoamento de ar indicadas pelo anemômetro, sendo as de maior magnitude verificadas na saída do difusor (A_S).

Além das flutuações de energia da rede elétrica, é possível que essas variações também tenham ocorrido devido a refluxos e turbulências causadas pelo ventilador na seção de saída do difusor didático.

Como previsto, na medida em que o número de medições aumentou, a amplitude dos desvios diminuiu. Desse modo, a diferença entre os valores calculado e medido na saída do difusor também diminuiu.

Na Tab. 5 apresentam-se os dados de estimativa de custo de montagem do dispositivo didático. Os valores em reais foram estimados com base em pesquisa de preço em fabricantes e revendedores disponíveis no comércio local ou nacional, estando sujeitos a flutuações.

Tab. 5 – Estimativa de custo do dispositivo didático.

| Componente | Valor R\$ |
|-----------------------------|---------------------|
| Ventilador axial AK2582HB | 466,40 |
| Anemômetro MINIPA MDA10 | 415,90 |
| Tubo de PVC (75 mm x 51 cm) | 8,50 |
| Cone de sinalização | 24,18 |
| Mesa de madeira | 227,90 |
| Balde de plástico | 12,55 |
| TOTAL | R\$ 1.155,43 |

6. CONCLUSÕES

O dispositivo desenvolvido é barato, prático (portátil) e pode ser totalmente operado por Alunos, mostrando-se adequado às aulas de Laboratório de Mecânica dos Fluidos ou para demonstrações em sala durante aulas teóricas.

Com instrumentação (e.g., manômetros ou sensores de pressão) e adaptações, o dispositivo pode ser empregado em outros experimentos de princípios da Mecânica dos Fluidos, como por exemplo a estimativa da pressão na saída do difusor (aplicação do Princípio de Bernoulli).

Sugere-se considerar a inserção de um elemento (*dimmer*) para regular a corrente elétrica de alimentação do motor do ventilador e, desse modo, dispor de diferentes valores de velocidade de escoamento do ar através do difusor didático.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior do Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001, com apoio do Programa de Cooperação Acadêmica em Defesa Nacional (PROCAD-DEFESA), outorga 88881.387753/2019-01. O primeiro autor é financiado pela bolsa 88887.600747/2021-00 (CAPES). O terceiro autor é financiado pela bolsa 402673/2021-2, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq). O quarto autor é financiado pela bolsa 306004/2020-8 Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

Os autores agradecem à Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN) pelo apoio concedido para realização de pesquisas sobre propulsão supersônica aspirada.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da UFRN, que, graças à intervenção de sua Coordenadora, Profa. Eve Maria Freire de Aquino, disponibilizou verba do CNPq para custear a aquisição do anemômetro de ventoinha pelo Laboratório de Transferência de Calor da UFRN.

À Chefe do Departamento de Material e Patrimônio da UFRN, Sra. Adriane Tramontin, pela autorização de acesso ao setor de descarte de material desta Instituição.

Ao Aluno que, anonimamente, doou o ventilador axial ao Laboratório de Transferência de Calor da UFRN.

REFERÊNCIAS

BORGNACKE, C.; SONNTAG, R. E. *Fundamentos da Termodinâmica*. São Paulo: Edgard Blücher, 2009, pp. 114.

MARINHO, G. S.; ROCHA, A. C. B.; HILDEBRAND JR, L.; ROMA, W. N. L. *Medición de bajas velocidades del flujo de aire en procesos de transferencia de calor por convección natural*. Información Tecnológica, La Serena, Chile, v. 10, n.1, p. 139-148, 1999.

MINIPA. *Manual de Instruções do Anemômetro MDA – 10*. São Paulo, Minipa Indústria e Comércio Ltda. [2000].