

# Aerodinâmica de bolas

(*Aerodynamics of balls*)

Bruno Seixas Gomes de Almeida<sup>1</sup>, Robson Coutinho Silva<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>Museu Espaço Ciência Viva, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil

<sup>2</sup>Instituto de Biofísica Carlos Chagas Filho, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil

<sup>3</sup>Museu Espaço Ciência Viva, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil

Recebido em 12/1/2015; Aceito em 28/5/2015; Publicado em 30/9/2015

O ensino de física nos diferentes níveis da educação é, geralmente, considerado tedioso e complexo quando é apresentado dissociado da realidade e com excesso de formalismo matemático. A parceria entre universidades e museus de ciências pode ajudar no desenvolvimento de estratégias práticas que auxiliem o ensino de física nos diferentes segmentos do ensino. O presente trabalho apresenta experimentos desenvolvidos na oficina “aerodinâmica de bolas”, apresentada ao público no evento temático “Ciência do Esporte” realizado no ano da Copa do Mundo pelo museu de ciências Espaço Ciência Viva da cidade do Rio de Janeiro. O trabalho procurou fundamentar a teoria relativa aos módulos experimentais, apresentar detalhes da elaboração dos modelos, bem como discorrer brevemente acerca da importância da divulgação de ciências em espaços de ensino não formal.

**Palavras-chave:** divulgação científica, princípio de Bernoulli, efeito Magnus, arrasto.

The teaching of Physics at different levels of education is often considered tedious and complex when it is disconnected from reality and with an excess of mathematical formalism. The partnership between universities and science museums may lead to the development of practical strategies that will assist the teaching of physics in different segments. The present article presents the experiments carried out the “Aerodynamics of the Balls” workshop presented to the public in the event “Sport Science” held at the Museum of Science “Espaço Ciência Viva”, at Rio de Janeiro, during the year of the World Soccer Cup. The approach of this study sought to encompass the theoretical aspects of the experiments, details of the construction of the models, as well as to briefly summarize the importance of scientific publications in situations of non-formal education.

**Keywords:** science communication, Bernoulli principle, Magnus effect, dragging.

## 1. Introdução

A física dos esportes é uma ciência fascinante, com inúmeras aplicações, entre as quais a busca pela melhoria do desempenho de atletas. No Brasil, o Futebol é esporte com grande adesão e apelo popular, capaz de arrastar multidões aos estádios. Associar aspectos da prática dos esportes aos respectivos conceitos físicos pode se tornar um caminho lúdico e útil não só para despertar o interesse pelo ensino da física, mas também para facilitar o aprendizado dessa disciplina.

O presente artigo busca discutir os experimentos desenvolvidos e apresentados na oficina “aerodinâmica de bolas” por ocasião da exposição temática “Ciência do Esporte”, realizada no museu de ciências Espaço Ciência Viva. A instituição, que há mais de trinta anos realiza divulgação científica no Brasil, é palco do trabalho contínuo desenvolvido em parceria com universidades e centros de pesquisa do Rio de Janeiro. Da

interação surgiram os chamados Sábados de Ciência, isto é, mostras temáticas organizadas com diferentes setores das universidades que são convidados não só para desenvolver experimentos ligados aos temas, como para divulgar os trabalhos de pesquisa realizados no Brasil. Apresentar novos aparatos científicos experimentais em um espaço de ensino não formal, em geral, resulta em rápida aceitação por parte do público visitante de museus, sendo estes espaços protagonistas em processos de ensino-aprendizagem ao compartilhar significados científicos e apresentar a ciência de maneira dinâmica, interativa e participativa [1-2]. Particularmente, o Espaço Ciência Viva tem grande visibilidade na cidade do Rio de Janeiro por conta de seus constantes projetos na área de divulgação científica, não só direcionados aos alunos de ensino fundamental, médio e superior, mas também ao público geral curioso nos assuntos explorados, sejam nas atividades permanentes

<sup>2</sup>E-mail: [rcsilva@biof.ufrj.br](mailto:rcsilva@biof.ufrj.br).

ou temporárias do museu. Como espaços de educação não formal, além de popularizar o conhecimento científico, os museus permitem refinamento cultural [3-4]. O produtivo confronto entre as ideias originárias do visitante com teorias científicas ensinadas ou investigadas na academia se dá pela disponibilidade do visitante para explorar módulos e experimentos museais, através de ações como observar, acionar, tocar, manusear, comparar, registrar e jogar. Ações desta natureza potencializam o processo de aquisição de conhecimento por parte do visitante de museus de ciências [5]. A estratégia de comunicação, no entanto, é um dos grandes desafios em museus. Faz-se necessário desenvolver táticas que facilitem apreensão e interpretação das informações apresentadas. Nesse sentido, no presente trabalho, buscou-se explorar aspectos associados à interatividade, ferramenta reconhecidamente lúdica e facilitadora da mediação entre o público e o saber [6].

Este artigo está organizado de forma a facilitar a apresentação dos experimentos e atividades realizadas, buscando integrar fundamentos teóricos da física com discussões sobre o ensino e a divulgação científica. A seguir, encontram-se discriminados os tópicos na sequência em que foram abordados: no *item 2*), os experimentos são brevemente apresentados, tais como foram desenvolvidos e expostos na exposição temática “Ciência do Esporte”; no *item 3*), a construção e montagem dos modelos experimentais são detalhadas; no *item 4*), dinâmica e fundamentos teóricos dos experimentos são discutidos; no *item 5*), impacto dos experimentos para o ensino em diferentes níveis escolares e para a divulgação científica é analisado; no *item 6*), considerações finais sobre os experimentos desenvolvidos e o evento no museu são apresentadas.

## 2. Experimentos desenvolvidos para a exposição temática “Ciência do Esporte”

Uma vez que a exposição temática destinou-se a abordar assuntos relativos ao esporte, foram desenvolvidos dois experimentos para compartilhar significados sobre fenômenos físicos presentes em estudos de aerodinâmica, sobretudo em bolas. O primeiro, intitulado “bola flutuante” (Fig. 1A) teve por objetivo apresentar/discutir o princípio de Bernoulli e o efeito Magnus, dois conceitos relevantes da física, sendo o segundo negligenciado em muitos currículos de Ensino Médio. O segundo experimento, intitulado “bola de futebol *versus* bola de futebol americano” (Fig. B), buscou discutir a diferença de comportamento entre esses dois tipos de bolas quando submetidos à passagem de uma corrente de ar. A Fig. 1B apresenta o formato das bolas de futebol (redonda, confeccionada em isopor) e de futebol americano (elíptica, confeccionada com material de garrafa pet).

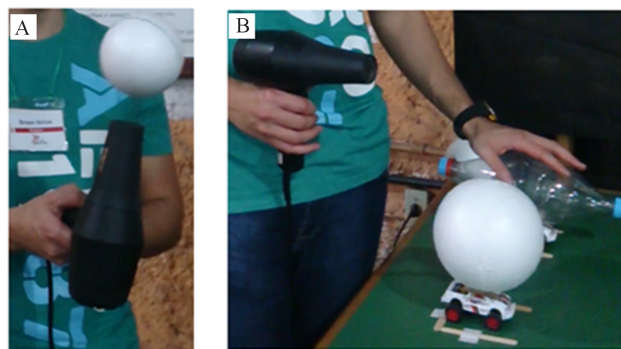


Figura 1 - Experimento “bola flutuante” – Bola de futebol levitando quando exposta à saída de fluxo de ar do secador de cabelo (A); Experimento “bola de futebol *versus* bola de futebol americano” – Bola de futebol e bola de futebol americano presas a carrinhos de brinquedo, sendo cada conjunto impulsionado por mesma intensidade de fluxo de ar provido por um secador de cabelo com idêntica potência (B).

## 3. Construção e montagem dos modelos experimentais

Para construir o experimento “bola flutuante”, foram empregados um secador de cabelo modelo *Taiiff Turbo*, com 1600 W de potência, e uma bola de isopor de tamanho médio (diâmetro aproximado de 12 cm). Uma faixa azul foi desenhada ao longo da linha média da bola, de forma a facilitar a observação de movimento e rotação quando ela era submetida à corrente de ar do secador de cabelo. É válido ressaltar que a bola de isopor apresentava-se com peso suficiente para não voar e permanecer em posição estável e vertical, levitando quando exposta ao fluxo de ar na saída do secador, tal como mostrado na Fig. 1A.

Para construir o experimento “bola de futebol *versus* bola de futebol americano”, foram utilizados um secador de cabelo modelo *Taiiff Turbo*, com 1600 W de potência, uma bola de isopor bipartida (diâmetro aproximado de 18 cm), duas garrafas pet, dois carrinhos idênticos de brinquedo, dois pedaços idênticos de papelão e fita dupla face. A bola de futebol americano foi confeccionada cortando-se as duas garrafas pet ao meio e, com fita dupla face, unindo-se as partes superiores de cada garrafa contendo suas respectivas tampas (Fig. 2). A bola de futebol foi simulada pela bola de isopor bipartida. Para permitir que ambas as bolas pudessem se deslocar de forma semelhante quando impulsionadas pelo fluxo de ar do secador de cabelo, cada uma das bolas foi presa a um carrinho de brinquedo. Ou seja, ambas as bolas foram coladas com fita dupla face sobre um pedaço de papelão e cada qual foi colada sobre um carrinho, tal como mostrado na Fig. 2. Brevemente, colou-se com fita dupla face um pedaço de papelão na parte superior de cada carrinho; posteriormente, colou-se cada bola sobre o papelão já colado sobre cada carrinho, também utilizando a fita dupla face, garantindo-se que todas as partes permanecessem unidas de forma

lativamente estável e resistente. É importante ressaltar que os carrinhos utilizados apresentavam boa estabilidade, e asseguraram que, quando as bolas se deslocassem impulsionadas pelo fluxo de ar, elas percorressem um caminho em linha reta e não tombassem.

Para garantir a comparação entre os movimentos das bolas, e eventualmente associá-los ao formato das bolas, procurou-se equilibrar a massa final dos conjuntos montados (bola, carrinho, papelão e fita dupla face). Para tal, pequenos objetos foram gradativamente colocados no interior da bola de isopor bipartida, e o peso foi aferido em balança comercial até que os conjuntos montados apresentassem mesma massa final.



Figura 2 - Montagem final de modelos de bola de futebol (redonda, de isopor) e de bola de futebol americano (elíptica, de material de garrafa pet) sobre modelos idênticos de carrinhos de brinquedo.

É importante ressaltar que os materiais empregados são de baixo custo e reaproveitáveis, o que torna viável a reprodução dos experimentos aqui apresentados, seja para ensino em sala de aula ou para divulgação em espaços de ensino não formal. Outros materiais podem ser utilizados para simular as bolas com o fim de avaliar seus comportamentos quando impulsionadas por uma corrente de ar, desde que seja mantida semelhança geométrica com aquelas de futebol e de futebol americano e que ambas tenham a mesma massa, para permitir a comparação entre elas. Antes da confecção do modelo da bola de futebol americano utilizando-se garrafas pets, foi feita uma tentativa de modelagem geométrica desse tipo de bola a partir de um bloco compacto de isopor. Entretanto, por ser o isopor um material extremamente leve e que dificulta a realização de cortes precisos, tal tentativa foi descartada e o modelo com garrafas pet selecionado.

## 4. Dinâmica e fundamentos teóricos dos experimentos

### 4.1. Experimento “bola flutuante”

O experimento “bola flutuante” consistiu em colocar uma bola de isopor acima da região de saída de ar do secador de cabelo posicionado na vertical. Nessa posição, observou-se que a bola flutuava, oscilando pouco e permanecendo em uma situação relativamente equilibrada e estável. Mantendo-se o secador ligado, e inclinándolo suavemente, de forma a aumentar sua angulação em

torno da posição vertical, o visitante tinha a oportunidade de verificar que a bola de isopor começava a girar muito mais rápido em relação ao seu próprio eixo. Neste momento, o visitante podia observar que, mesmo quando o secador estava muito inclinado e distante da bola, ainda assim a bola apresentava sustentação suficiente para não cair no chão, mantendo-se em equilíbrio nessa posição. Neste momento, a seguinte questão se colocava para o visitante “Como a bola se mantém flutuando sem cair?”. A fundamentação teórica associada a tal comportamento da bola nesse módulo experimental é atribuído ao princípio de Bernoulli, cujos significados eram discutidos com o visitante na medida em que ele demonstrava curiosidade e demandava explicações. Detalhamento teórico relativo ao princípio de Bernoulli está apresentado no *item 4.1.1.*

O experimento “bola flutuante” também permitiu trabalhar junto ao visitante a razão pela qual a bola entrava em rotação enquanto levitava impulsionada pelo fluxo de ar do secador. Fez-se uso desse movimento de rotação da bola como forma de introduzir um novo conceito físico através do seguinte questionamento feito ao visitante: “O que ocorreria caso esse movimento de rotação da bola fosse associado a um movimento linear, como por exemplo, em um jogo de Futebol?”. Tal questionamento permitiu apresentar ao visitante o efeito Magnus, fenômeno físico que explica, por exemplo, a trajetória curva da bola quando chutada com “efeito” em alguns lances de futebol. Tal “efeito” é observado em outros esportes além do futebol, tais como beisebol e golfe, sempre que uma bola lançada é sujeita à rotação em torno do seu eixo. A partir da contextualização do fenômeno na prática de esportes com bolas, conceitos físicos relativos ao efeito Magnus presente na “Ciência do Esporte” eram explorados e apresentados ao visitante. A teoria relativa ao efeito Magnus encontra-se detalhada no *item 4.1.2.*

#### 4.1.1. Princípio de Bernoulli

O princípio de Bernoulli, descrito por Daniel Bernoulli, matemático holandês do Século XVIII, descreve o comportamento de um fluido a partir de princípios de conservação de energia. A dedução de tal princípio envolve o balanço de quantidade de movimento em um elemento de fluido e sua integração ao longo de uma corrente (ou linha de fluxo). O seu resultado pode ser interpretado como um balanço de energia mecânica (em um sistema conservativo, ou seja, desprovido de dissipação de energia) [7]. Matematicamente, pode ser expresso pela Eq. (1)

$$\frac{V^2}{2} + \frac{p}{\rho} + gz = \text{constante}, \quad (1)$$

onde  $V$  é a velocidade,  $P$ , a pressão,  $\rho$ , a massa específica do fluido,  $g$ , gravidade local e  $z$ , a altura. Cada parcela dessa equação pode ser associada a uma forma

de energia. O termo  $V^2/2$  é a parcela que representa a energia cinética ( $E_c$ ), relacionada ao movimento do fluido que se desloca com uma determinada velocidade. É o estado de energia determinado pelo movimento do fluido. O termo " $P/\rho$ " é àquele associado à energia de pressão ( $E_{pr}$ ). Essa energia corresponde ao trabalho potencial das forças de pressão que atuam no escoamento do fluido. Já o termo " $gz$ " está associado com a energia potencial do fluido ( $E_p$ ), relacionada com a sua posição no espaço. Ou seja, é o estado de energia do sistema devido à sua posição no campo de gravidade em relação a um plano horizontal de referência. Esse tipo de energia é medida pelo potencial de realização de trabalho de um sistema [8].

Tal princípio pode ser enunciado da seguinte forma: "Se a velocidade de uma partícula de um fluido estiver aumentando enquanto a mesma escoar ao longo de uma linha de corrente, a pressão desse fluido deve diminuir e se sua pressão aumenta, sua velocidade deverá diminuir". Nesse caso, quando o fluido passa por um corpo, tão maior será a velocidade, quanto menor for a diferença de pressão [9].

Para descrever o comportamento da bola no experimento "bola flutuante", é necessário fazer uma análise do perfil de velocidade do escoamento na região de saída do secador, cujo desenho é demonstrado na Fig. 3. A região central do escoamento, região A da Fig. 3, apresenta uma velocidade maior em relação às regiões da periferia, como as regiões B da Fig. 3. Sendo assim, como visto, o princípio de Bernoulli explica que nessa região A haverá, então, uma pressão menor em relação a B.

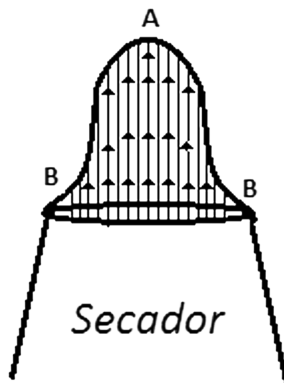


Figura 3 - Perfil de velocidade do ar na saída do secador.

Ainda no experimento "bola flutuante", quando o secador era inclinado, notava-se que a bola adquiria sustentação suficiente para não cair e manter-se na região de escoamento. Isto se deve ao gradiente de pressão existente entre as regiões A e B, que faz com que a bola se desloque no sentido da região de maior pressão para a de menor (sentido B  $\rightarrow$  A), mantendo-se próxima à posição central do escoamento (Posição A). Outro fato observado foi que a bola girava mais rápido ao passo que o secador era inclinado. Quando a bola se encontra na posição A, com o secador na posição vertical,

o momento gerado em pontos diametralmente opostos é igual ocasionando uma resultante nula que faz com a bola fique estacionária na posição A, sem sofrer rotação (não há velocidade angular). Como o experimento não é ideal, a posição da bola no escoamento de ar está sujeita a flutuações ocasionadas pelo movimento do secador na mão do usuário e pela não idealidade do escoamento de ar, isto causa pequenas rotações na bola que são provenientes destes pequenos desvios experimentais. Quando o secador é inclinado, a bola é direcionada para a região mais periférica de escoamento (região B) devido à ação da força peso, que sempre aponta para baixo. Uma vez que o perfil de escoamento de ar no secador é semelhante ao indicado na Fig. 3, quando a bola alcança a região B o gradiente de velocidades nos extremos diametralmente opostos da bola nesta situação é superior àquele observado quando a bola se encontra na região A, o que causa o surgimento de uma resultante de momento diferente de zero, como demonstrado na Fig. 4. Nessa condição, observa-se uma velocidade angular, que leva a bola a girar mais rápido.

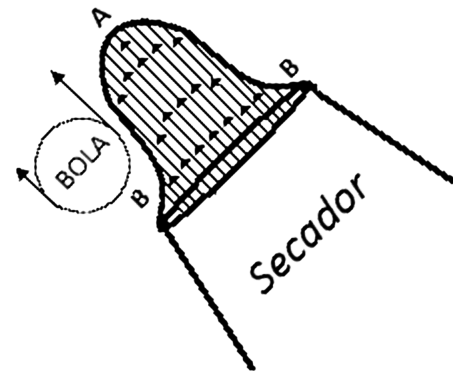


Figura 4 - Posição da bola no escoamento.

O princípio de Bernoulli também explica a sustentação em uma asa de avião, indicando que onde quer que a velocidade seja relativamente alta, a pressão deve ser relativamente baixa e onde quer que a velocidade seja relativamente baixa, a pressão deverá ser relativamente alta gerando uma substancial sustentação [10]. Também foram discutidas com o visitante da exposição temática "Ciência do Esporte", as aplicações práticas de tal princípio em estudos aerodinâmicos na indústria aeronáutica e automobilística.

#### 4.1.2. Efeito Magnus

O outro conceito abordado no experimento "bola flutuante" que também está relacionado ao movimento de rotação da bola é o efeito Magnus. Qualquer corpo que gira em torno do seu centro, estando sujeito a um escoamento, é afetado por uma força perpendicular à direção do movimento e ao eixo de rotação [11]. Esse efeito de desvio da trajetória do corpo é conhecido como efeito Magnus e tal força pode ser calculada pela Eq. (2).

$$\mathbf{F}_m = \frac{1}{2} C_s \rho A V^2 \frac{\mathbf{w} \times \mathbf{V}}{|\mathbf{w} \times \mathbf{V}|}, \quad (2)$$

onde  $W$  é a velocidade angular,  $C_s$ , o coeficiente de sustentação - grandeza adimensional -,  $\rho$ , massa específica,  $A$ , a área característica e  $v$ , a velocidade. Sendo assim, através da análise da equação, notam-se os parâmetros envolvidos que influenciam a magnitude da força Magnus. Além disso, é possível perceber que a direção desta força será dada pelo produto vetorial da velocidade angular com a velocidade de deslocamento linear da bola, dada pela regra da mão direita, como demonstrado na Fig. 5.

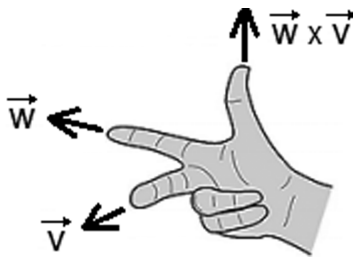


Figura 5 - Direção da Força Magnus dada pela regra da mão direita.

A explicação para tal fenômeno, sobretudo em bolas de futebol, se dá pelo seguinte: o movimento de rotação da bola faz com que ocorra o arrasto do ar ao redor da bola. Aliado a esse movimento, a bola também se desloca em relação ao gol, fazendo com que o ar também passe ao redor da mesma. Onde a bola e o ar se movimentam na mesma direção (Região A da Fig. 6), a velocidade é maior, portanto, a partir do princípio de Bernoulli, a pressão nessa região será menor. No outro extremo da bola, o ar está se movendo contrário ao movimento da bola (Região B da Fig. 6), sendo assim, nessa região a velocidade será menor, enquanto que a pressão será maior. Dessa maneira, tal composição de movimentos gera uma situação em que há uma região de maior pressão onde a velocidade é baixa e outra de baixa pressão onde a velocidade é alta, conforme enunciado no princípio de Bernoulli. No caso da bola futebol, o efeito Magnus diz que irá surgir essa força apontando da região de maior pressão para a de menor pressão que, consequentemente, irá acarretar na mudança da trajetória da bola.

A força de Magnus sempre será perpendicular ao movimento da bola e perpendicular à força de arrasto. Por ser uma força que irá apontar para o centro de uma trajetória curvilínea, tal força pode ser encarada como uma força centrípeta cujos direção e sentido apontam para o centro da trajetória.

Logo, chutar a bola “com efeito” significa, na verdade, bater na bola imprimindo-lhe um movimento de rotação. Esse movimento, aliado ao movimento que a bola faz num chute em direção ao gol, faz surgir uma força capaz de direcionar a bola para dentro do

gol. Logo, se o jogador decide contornar a barreira pela direita, ele deve chutar a bola de tal forma que a mesma gire no sentido anti-horário, enquanto que pela esquerda, no sentido horário.

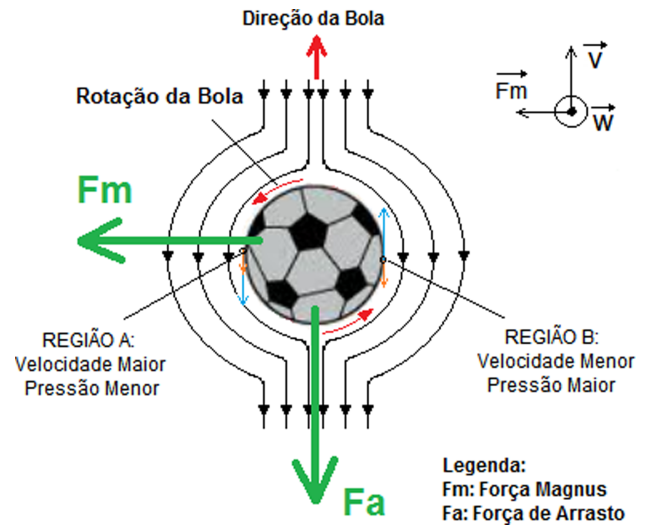


Figura 6 - Efeito Magnus em uma bola de futebol.

#### 4.2. Experimento “bola de futebol versus bola de futebol americano”

Tal experimento buscou discutir a diferença de comportamento entre uma bola de futebol e uma bola de futebol americano, quando ambas estão sujeitas à passagem de uma corrente de ar. Para aproximar o comportamento de uma bola de futebol, utilizou-se uma bola de isopor, enquanto que para simular uma bola de futebol americano, utilizou-se a parte superior de duas garrafas pet unidas entre si em direções opostas. As bolas foram calibradas para apresentarem a mesma massa.

O experimento consistiu em induzir uma corrente de ar, através do uso de um secador de cabelo, em cada uma das bolas. Cada bola foi fixada em uma base móvel construída com um carrinho de brinquedo. Os dois carrinhos utilizados eram do mesmo modelo. Quando o secador era ligado e direcionado para cada bola, uma de cada vez, essa bola se deslocava na mesma direção de incidência do ar sobre uma mesa de dois metros. Nesse caso, a questão levantada ao observador/visitante era: “Qual das bolas irá chegar mais rápido ao final da mesa?”. A explicação para o fenômeno apresentado relacionava-se ao arrasto, cujos detalhes teóricos são discutidos a seguir.

##### 4.2.1. Arrasto

Sempre que há movimento relativo entre um corpo sólido e um fluido viscoso que o circunda, tal corpo estará sujeito a uma força resultante. A intensidade dessa força depende de inúmeros fatores, dentre os quais: velocidade relativa, forma e tamanho do corpo e propriedades dos fluidos. A explicação para o surgimento des-

sas forças está no fato de que, quando o fluido escoar sobre um corpo, ele gera tensões superficiais que são compostas por tensões tangenciais, devido à ação viscosa e tensões normais devido à pressão local [12].

Para efeitos de análise, é comum dividir a força resultante sobre o corpo em uma força de arrasto,  $F_a$ , e uma força de sustentação,  $F_s$ . A força de arrasto é aquela paralela à direção do movimento e a de sustentação, perpendicular ao movimento. No presente artigo, buscou-se analisar apenas a componente de arrasto, uma vez que a mesma é a mais significativa no experimento. A força de arrasto pode ser dada pela Eq. (3)

$$F_a = \frac{1}{2} C_a \rho A V^2, \quad (3)$$

onde  $\rho$  representa a massa específica do fluido,  $A$ , a área,  $V$ , a velocidade e  $C_a$ , o coeficiente de arrasto, que é uma grandeza adimensional e depende unicamente da geometria do corpo e das características do fluido. Em mecânica dos fluidos há outro parâmetro muito importante que representa a razão entre as forças de inércia e as forças viscosas, tal parâmetro é denominado número de Reynolds e sua fórmula é dada pela Eq. (4)

$$Re = \frac{\rho V L}{\mu}, \quad (4)$$

onde  $P$  é a massa específica,  $V$ , a velocidade,  $L$ , um comprimento característico e  $\mu$ , a viscosidade do fluido. Esse número dá uma ideia para estimar se as forças viscosas serão desprezíveis em comparação com as forças de pressão [13]. Outros dois conceitos que são necessários para o melhor entendimento do fenômeno físico que ocorre no escoamento em corpos são o ponto de estagnação e a camada limite. O ponto de estagnação é aquele em que a velocidade do fluido que escoar sobre o corpo é zero. Já a camada limite pode ser entendida como a região do escoamento dentro da qual os efeitos viscosos são significativos. Ela também pode ser entendida como a região do escoamento que é mais intensamente perturbada pela presença de um corpo. A camada limite pode ser identificada, por exemplo, nas interações de um aerofólio com o ar (Fig. 7).



Figura 7 - Escoamento ao redor de um aerofólio.

Há uma relação direta entre a força de arrasto e o número de Reynolds. A Fig. 8 apresenta o gráfico que mostra a variação do coeficiente de arrasto ( $C_a$ ) de uma esfera lisa em função do número de Reynolds ( $Re$ ).

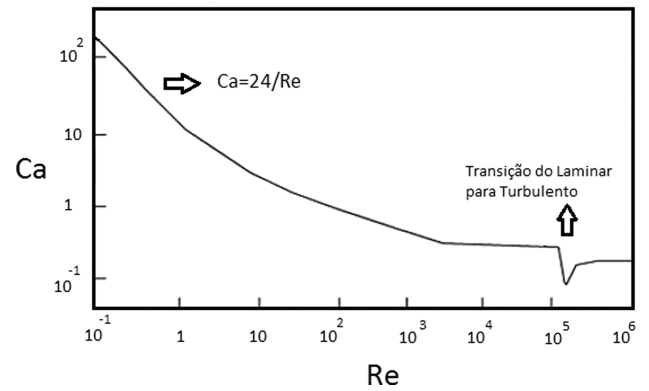


Figura 8 - Relação entre  $C_a$  e o número de Reynolds.

Brunetti fez uma análise de cada região do gráfico [14]. Tal análise é de fundamental importância para compreender o porquê do formato de certos objetos, como um avião, ou mesmo uma bola de futebol americano, fazer com que tais objetos tenham um comportamento particular quando submetidos à passagem de uma corrente de ar. Ele analisou:

Para uma região de  $Re < 1$ , o escoamento é dito 'lento', e o  $C_a$  varia linearmente com o número de Reynolds (Fig. 9). Nessa situação, a força de arrasto é praticamente devida somente às tensões cisalhantes.

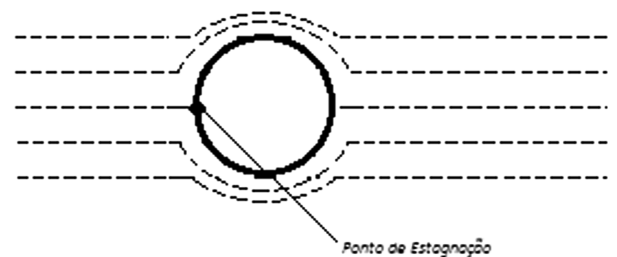


Figura 9 - Escoamento na esfera lisa em  $Re < 1$ .

Para  $Re > 1$ , a camada limite começa a descolar na traseira do corpo e o arrasto começa a crescer de importância. Ao aumentar o  $Re$ , o deslocamento vai se estendendo para a parte dianteira da esfera, até que, em  $Re = 1000$ , o ponto de separação fixa-se a aproximadamente a  $80^\circ$  do ponto de estagnação (Fig. 10).

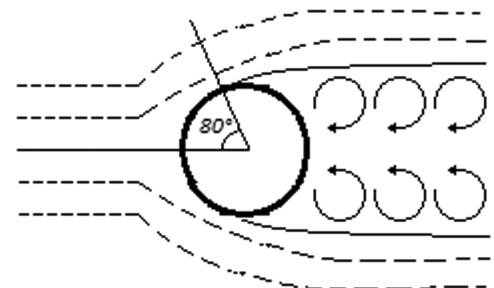


Figura 10 - Escoamento na esfera lisa em  $Re > 1$ .

Para  $10^3 < Re < 3,5 \times 10^5$ , o ponto de deslocamento mantém-se aproximadamente fixo e  $C_a$  será constante, valendo aproximadamente 0,45.

Para  $Re \cong 3,5 \times 10^5$ , nota-se uma queda brusca do  $Ca$ . A explicação é a passagem da camada limite laminar para turbulenta e há um salto do ponto de deslocamento da parte dianteira para a parte traseira da esfera. O ponto de deslocamento irá se localizar aproximadamente a  $115^\circ$  do ponto de estagnação (Fig. 11).

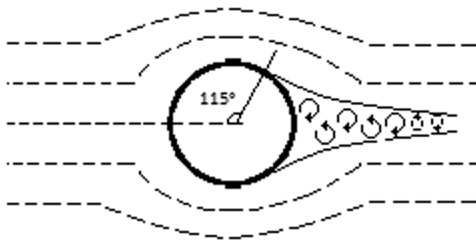


Figura 11 - Escoamento na esfera lisa em  $Re \cong 3,5 \times 10^5$ .

A partir da análise desses resultados, entende-se melhor o porquê de corpos aerodinâmicos com forma alongada serem mais aerodinâmicos que os demais. Isso ocorre porque esse formato faz com que a camada limite e as trajetórias das partículas contornem com mais facilidade o corpo, não causando acelerações muito bruscas que criariam um elevado gradiente adverso de pressões e um grande deslocamento [15].

Sendo assim, quanto mais aerodinâmico é um corpo, menor será a força de arrasto agindo sobre este. Pode-se pensar que quanto mais alongado é o corpo, maior será o arrasto, uma vez que haverá uma maior área de interação entre o corpo e o fluido, e de fato há, entretanto, tal arrasto é o chamado arrasto de superfície e no experimento “bola de futebol *versus* bola de futebol americano” não é o principal responsável pela mudança de comportamento entre as bolas, e sim o arrasto de forma. Logo, o chamado “corpo aerodinâmico” é aquele que causa a menor soma dos efeitos de forma e superfície.

No caso do experimento, a bola de futebol americano é mais aerodinâmica que a bola de futebol. Isso porque se trata de um corpo mais alongado, em que sua geometria favorece a diminuição do arrasto, ou seja, os efeitos que o escoamento têm sobre o corpo são minimizados. Pode-se entender também, a grosso modo, que as linhas de corrente do escoamento incidindo sobre a bola de futebol sofrem um desvio muito maior do que a de futebol americano, o que acaba gerando um arrasto, devido à forma, maior. Já na bola de futebol americano essas linhas contornam mais suavemente o corpo (Fig. 12).

Sendo assim, é possível perceber que a geometria de um corpo influencia diretamente no comportamento que esse terá quando submetido a um escoamento. No caso do experimento, respondendo à pergunta feita inicialmente (“Qual das bolas irá chegar mais rápido ao final da mesa?”), a bola de futebol terá uma aceleração maior do que a bola de futebol americano, já que a força de arrasto à qual está submetida, devido ao formato dessa, tem intensidade superior à da bola de fu-

tebol americano, o que garante que ela se desloque com maior aceleração.

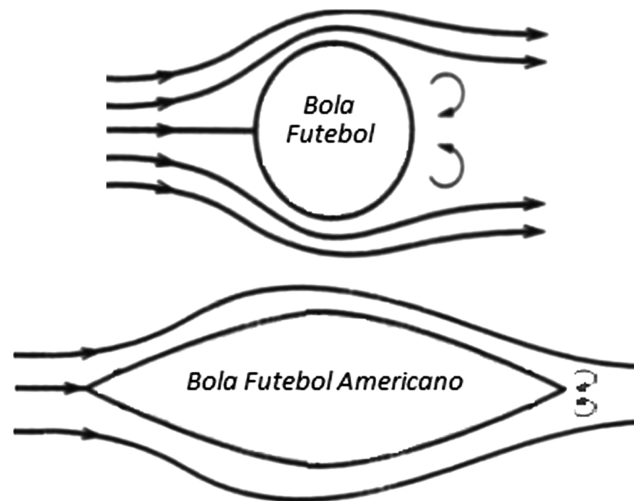


Figura 12 - Linhas de corrente para uma bola de futebol e de futebol americano.

Como demonstrado, a força de arrasto na bola de futebol é maior do que na bola de futebol americano. Sendo assim, em uma situação onde ambas as bolas são arremessadas, considerando como únicos efeitos resistivos os efeitos devido ao arrasto na bola, a bola de futebol americano atingirá uma maior distância. Isso se deve ao fato de que a força de arrasto na bola de futebol é maior, logo, haverá uma maior resistência imposta ao movimento da bola após a mesma ser arremessada, fazendo-a frear mais rapidamente e atingindo, conseqüentemente, uma distância menor. Já para a bola de futebol americano, como o arrasto imposto à mesma é menor (devido à sua geometria), haverá uma menor resistência ao seu movimento posteriormente ao seu lançamento, fazendo-a atingir maiores distâncias.

## 5. Análise do impacto dos experimento para o ensino em diferentes níveis escolares e para a divulgação científica

Ressalta-se que a oficina de “aerodinâmica de bolas” foi pensada e desenvolvida com o intuito de agir sobre e impactar o público de diferentes níveis escolares. Como percebido no evento “Ciência do Esporte”, os experimentos “bola flutuante” e “bola de futebol *versus* bola de futebol americano” despertam a curiosidade de alunos de ensino fundamental e, através de observação pura, esses alunos podem compreender que objetos de diferentes formatos apresentam comportamentos diferentes quando submetidos a uma corrente de ar. Já alunos de Ensino Médio, além da observação do comportamento diferenciado das bolas nas situações apresentadas, podem explorar os efeitos que determinam que uma mesma corrente de ar possa imprimir forças de diferentes magnitudes nos corpos de mesma massa e que

possa acelerar de maneira diferente cada um dos corpos. Ressalta-se que massa, força e aceleração são tópicos bastante discutidos em currículos de Ensino Médio. Já alunos de ensino superior podem se apropriar dos experimentos propostos neste artigo como motivação para explorar e aprofundar conceitos teóricos da física como arrasto, sustentação, escoamentos, entre outros que fazem parte do currículo da graduação de cursos da área exata.

Enquanto espaços de educação formal, como salas de aulas, muitas vezes, prezam pelo formalismo e, em sua grande maioria, não conseguem apresentar ludicamente os conceitos científicos, espaços de educação não formal permitem ao visitante a oportunidade de compreender, seguindo seu próprio tempo, os assuntos explorados nas atividades. Como analisado por Rubini e cols. [18] “(...) nos museus os conceitos, ao invés de serem transmitidos, são verdadeiramente percebidos pelo visitante enquanto este realiza as atividades propostas por monitores”. Os experimentos apresentados neste artigo foram desenvolvidos para o público geral do museu de ciências Espaço Ciência Viva. O visitante pôde interagir diretamente com os experimentos, o que oportunizou real envolvimento com o conteúdo apresentado. Experiência desta natureza corrobora a ideia de que espaços de educação não formal só tem a incrementar no processo de aprendizagem e podem servir como um meio de compartilhamento do conhecimento.

Centros de divulgação científica podem contribuir para que setores ampliados da sociedade não só tenham acesso ao conhecimento, como possam obtê-lo de forma desmistificada. Segundo Falk e Storksdieck [16] “(...) os museus de ciências são particularmente úteis para facilitar o aprendizado em ciências por parte dos cidadãos com menos conhecimentos”. Na mesma linha de raciocínio, Lins de Barros pontuou que [17] “(...) a necessidade de divulgar conceitos científicos para um público mais amplo é cada vez mais imperiosa, pois a ciência aparece como um dos mais importantes aspectos da sociedade moderna”. Sendo assim, torna-se imprescindível a valorização de tais centros como instituições educacionais que contribuem para a formação do cidadão.

## 6. Considerações finais

Em ano de Copa do Mundo no Brasil, o evento “Ciência do Esporte” teve boa receptividade por parte dos visitantes do museu de ciências Espaço Ciência Viva, entre eles grupos de alunos do ensino fundamental e médio, famílias e curiosos em geral no assunto. Seguindo a tradição do museu, os experimentos especialmente desenvolvidos para o evento buscaram apresentar o conhecimento científico de forma lúdica, participativa e criativa.

Especificamente, a oficina “aerodinâmica de bolas” primou pela interatividade e pela relação dialógica en-

tre monitor e visitante. Foi permitido ao visitante tocar livremente os módulos experimentais, prever possíveis resultados antes mesmo da experiência ter sido executada, realizar a experiência propriamente dita, discutir resultados e buscar significados científicos. Atividades desta natureza deveriam ser valorizadas e disseminadas, particularmente considerando que centros de ciência contribuem para a melhoria da educação de um cidadão. Entretanto, é preciso antes que seja facilitado o acesso da sociedade como um todo aos centros de ciências já existentes. O alerta de Moreira e Massarani é relevante para que se possa melhor dimensionar esta problemática [19]: “(...) apesar do crescimento expressivo dos últimos anos, um número muito pequeno de brasileiros, cerca de 1,5 milhão (menos de 1% da população) visitam algum centro ou museu de ciências a cada ano”.

A aproximação de museus e centros de divulgação de ciências com universidades e centros de pesquisa é bastante produtiva para organização e desenvolvimento de exposições científicas, tal como vêm sendo promovidas pelo museu de ciências Espaço Ciência Viva, no Rio de Janeiro. Alunos e professores universitários, bem como pesquisadores, podem contribuir com desenvolvimento de estratégias de apresentação e abordagem de conteúdos específicos que permitam aos visitantes melhorar sua percepção da ciência em relação ao tema apresentado [20].

Finalmente, vale relembrar que os experimentos da oficina “aerodinâmica de bolas” foram construídos a um baixo custo e cumpriram o objetivo de apresentar e explorar conceitos físicos, tais como princípio de Bernoulli, efeito Magnus e arrasto. A fundamentação teórica apresentada e relativa aos fenômenos explorados pelos experimentos pode instrumentalizar professores e alunos interessados em aprofundar o assunto. Dessa forma, os experimentos desenvolvidos na oficina podem ser facilmente reproduzidos, com clara aplicação para o ensino em sala de aula em seus diferentes níveis, o que aponta para a relevância de se valorizar estratégias de integração entre espaços de educação formal e centros de divulgação científica, particularmente museus de ciências.

## Agradecimentos

Gostaríamos de agradecer aos professores Daniel Onofre de Almeida Cruz (Departamento de Engenharia Mecânica / UFRJ) e Gabriela Bevilacqua (Escola Pedro II e Espaço Ciência Viva) pela revisão e sugestões de mudanças no manuscrito. Este trabalho teve apoio financeiro da Fundação de Amparo a Pesquisa no Estado do Rio de Janeiro, FAPERJ.



## Referências

- [1] J. Wagensberg, *Alambique: Didáctica de las Ciencias Experimentales* **26**, 15 (2000).
- [2] G. Gouvêa e M.C. Leal, in: *Educação e Museu: A Construção Social do Caráter Educativo dos Museus de Ciências*, editado por G. Gouvêa, M. Marandino e M.C. Leal (Editora Access/Faperj, Rio de Janeiro, 2003), p. 221-236.
- [3] G. Queiroz, S. Krapas, M.E. Valente, E. David, E. Damas e F. Freire, *Revista Brasileira de Pesquisa em Ensino de Ciências* **2**, 2 (2002).
- [4] M.L.P. Basba, *Os Serviços Educativos e de Popularização de Ciência nos Museus e Centros de Ciência e Tecnologia: A Visão do Explora*. Disponível vem <http://www.comciencia.br/reportagens/2005/12/14.shtml>.
- [5] V. Vieira, M.L. Bianconi e M. Dias, *Ciência e Cultura* **57**, 4 (2005).
- [6] M.E. Valente, S. Cazelli e F. Alvez, *História, Ciências, Saúde* **12**, 183 (2005).
- [7] M. Gobbi, N.L. Dias, F. Macarenhas e E. Valente, *Introdução à Mecânica dos Fluidos e aos Fenômenos de Transporte* (Editora da UFPR, Curitiba, 2006).
- [8] F. Brunetti, *Mecânica dos Fluidos* (Pearson, São Paulo, 2008), p. 85-86.
- [9] H.D. Young e R.A. Freedman, *Física II – Termodinâmica e Ondas* (Pearson, São Paulo, 2008), p. 85.
- [10] R.W. Fox, A.T. McDonald, P.J. Pritchard e J.C. Leylegian, *Introdução à Mecânica dos Fluidos* (LTC, São Paulo, 2014), p. 241.
- [11] R.W. Fox, A.T. McDonald, P.J. Pritchard, J.C. Leylegian, *Introdução à Mecânica dos Fluidos* (LTC, São Paulo, 2014), 8ª ed. , p. 241.
- [12] R.W. Fox, A.T. McDonald, P.J. Pritchard e J. C. Leylegian, *Introdução à Mecânica dos Fluidos* (LTC, São Paulo, 2014), p. 444.
- [13] R.W. Fox, A.T. McDonald, P.J. Pritchard e J.C. Leylegian, *Introdução à Mecânica dos Fluidos* (LTC, São Paulo, 2014), p. 303.
- [14] F. Brunetti, *Mecânica dos Fluidos* (Pearsons, São Paulo, 2008), p. 234.
- [15] F. Brunetti, *Mecânica dos Fluidos* (Pearsons, São Paulo, 2008), p. 235
- [16] J.H. Falk e M. Storksdiech, *História, Ciências, Saúde* **12**, 140 (2005).
- [17] H.G.P. Lins de Barros, *Ciência e Público* (Editora da UFRJ, Rio de Janeiro, 2002), p. 34.
- [18] G. Rubini, E. Kutenbach e R. Coutinho-Silva, in: *Anais do XVI Simpósio Nacional do Ensino de Física* (Rio de Janeiro, 2005), p. 20.
- [19] I.C. Moreira e F. Massarani, *Ciência e Público* (Editora da UFRJ, Rio de Janeiro, 2002), p. 61.
- [20] R. Coutinho-Silva, P.M. Persechini, M. Masuda e E. Kutenbach, *Ciência e Cultura* **57**, 24 (2005).