

Investigação experimental da lei de Stokes em discos: uma abordagem de baixo custo por vídeo-análise de oscilações amortecidas

Experimental investigation of Stokes' law on disks: a low-cost approach by video analysis
of damped oscillations

L. O. Pereira¹, D. S. R. Ferreira¹, R. P. Freitas¹, A. R. Pimenta¹, V. S. Felix¹,
E. A. S. Gonçalves¹, R. S. Dutra^{*1}

¹Instituto Federal do Rio de Janeiro, Laboratório de Instrumentação e Simulação Computacional, Paracambi, RJ, Brasil.

Recebido em 02 de dezembro de 2020. Aceito em 15 de dezembro de 2020.

Neste trabalho apresentamos uma atividade de baixo custo que visa a investigação da força de arrasto, que atua na geometria de um disco, através das oscilações amortecidas de um sistema massa-mola. Utilizando discos de papelão de diferentes raios e controlando a massa do sistema oscilatório, mantendo-a fixa, estudamos a influência da variação exclusiva da magnitude da força de arrasto na dinâmica desse sistema, por meio da variação do raio do disco, mantendo todos os outros parâmetros acessíveis do sistema fixos. A técnica de vídeo-análise é utilizada para rastrear o movimento do sistema, levando o estudante a investigar e a extrair conclusões acerca da dependência funcional da força de atrito viscosa com o raio do disco, bem como a obter a constante elástica da mola e uma estimativa para a espessura dos discos.

Palavras-chave: Experimento de baixo custo, vídeo-análise, lei de Stokes.

In this work we present a low-cost activity that aims to investigate the drag force, which acts on the geometry of a disc, through the damped oscillations of a mass-spring system. Using cardboard disks of different radii and controlling the mass of the oscillatory system, keeping it fixed, we studied the influence of the exclusive variation of the magnitude of the drag force on the dynamics of this system, by varying the radius of the disk, keeping all the others fixed system accessible parameters. The video analysis technique is used to track the movement of the system, leading the student to investigate and draw conclusions about the functional dependence of the viscous frictional force with the radius of the disk, as well as to obtain the spring elastic constant and an estimate for the thickness of the disks.

Keywords: Low-cost experiment, video-analysis, Stokes' law.

1. Introdução

A busca de metodologias que tornem o ensino de ciências menos pragmático, mais crítico e atraente, tem sido uma das principais molas propulsoras da pesquisa em ensino de física [1]. Essa busca tem se beneficiado enormemente com o desenvolvimento científico e tecnológico da humanidade. Nas últimas décadas temos presenciado uma revolução nas Tecnologias de Informação e Comunicação (TICs) [2, 3], devido especialmente ao fato de que, no mundo atual, dados dos mais diferentes aspectos da natureza, da sociedade e de nossas vidas são largamente coletados. Associado a isto temos o crescente aumento de poderio computacional dos dispositivos e seu barateamento para a população de forma geral. Desta forma, os computadores, *smartphones*, *tablets* e similares têm sido progressivamente inseridos no contexto do ensino de física, através do seu uso na modelagem computacional

de fenômenos [4-6], utilizando, por exemplo, simulações computacionais e análises de vídeos.

A adoção de simulações computacionais interativas no ensino de física pode ter como exemplo motivador a proposta de contornar as limitações impostas na compreensão dos fenômenos pelas imagens estáticas sequenciais, presentes nos livros didáticos, para representar processos dinâmicos. Uma abordagem recente nessa linha tem sido proposta via produção de *stop motion* com o computador *Raspberry Pi* [7]. As simulações computacionais também permitem que o aluno participe de forma ativa e seja protagonista do processo de ensino-aprendizagem [8]. O uso de plataformas livres e interativas de simulação computacional, como o *PhET* e o *Modellus*, têm se popularizado cada vez mais dentro da comunidade de ensino de física. Nesse tipo de modelagem o experimento é simulado na tela do computador, onde os processos dinâmicos que governam a evolução do experimento computacional são determinados pelas leis físicas contidas nos modelos matemáticos. A simulação computacional educacional

* Endereço de correspondência: rafael.dutra@ifrj.edu.br

poder ser usada desde a reprodução de um simples fenômeno físico até a construção de concepções críticas a respeito do limite de validade de modelos físicos [9].

Por sua vez, a análise de vídeos, também conhecida por vídeo-análise, tem ganho um papel de grande destaque nos últimos tempos. Esta técnica consiste em realizar uma tomada de vídeo de um fenômeno ou prática experimental e, posteriormente, a realização de uma análise detalhada deste vídeo por meio de plataformas computacionais que associem o fenômeno que se deseja estudar a grandezas físicas observáveis e suas quantificações [10–13], sendo o *software Tracker* uma das mais populares plataformas livres de vídeo-análise e que tem sido extensivamente utilizada pela comunidade de ensino de física. Do ponto de vista epistemológico, a vídeo-análise é uma poderosa ferramenta na reflexão crítica de conceitos e na construção de modelos científicos [14, 15]. Ela também tem sido aplicada a outras áreas de pesquisa em física, indo desde a análise de objetos microscópicos em movimento browniano [16] até a análise de objetos astronômicos [17].

O desenvolvimento e aplicação de novas metodologias, nos laboratórios didáticos de física, são de extrema relevância no processo de ensino e aprendizagem de conceitos e na interpretação dos fenômenos. As atividades experimentais além de trazerem os conceitos teóricos à prática, também devem permitir ao estudante questionar, propor e refletir de modo a promover um processo de aprendizagem ativa [18, 19]. Um grande aliado nesse processo, os recursos computacionais, se tornaram uma ferramenta potencializadora no ensino da física experimental, visto que é uma importante opção de fácil acesso para realização de experimentos didáticos e simulações que respondam às questões levantadas em sala de aula [20]. Para tanto as estratégias didáticas empregadas, juntamente com as características inerentes dos recursos computacionais, devem nortear a implementação da proposta da prática experimental. Também nessa linha, a utilização de simulações e modelagens computacionais integradas com experimento real propicia aos alunos maior habilidade para realizarem previsões e promoverem explicações cientificamente aceitas acerca dos fenômenos físicos [21].

Associado a isso, tem-se na construção de experimentos de baixo custo uma forma acessível de aproximar os estudantes dos temas que serão discutidos no ambiente pedagógico, amenizando assim, para muitas instituições de ensino, as dificuldades de acesso aos equipamentos didáticos para laboratórios disponíveis no mercado [22]. Nesse cenário, a vídeo-análise educacional tem desempenhado um papel de destaque como recurso de mídia associado à construção de experimentos de baixo custo para fins pedagógicos [23–26]. Isto porque a captura do vídeo pode ser realizada por meio de uma câmera de *smartphone* e a sua posterior análise por meio de um *software* livre. Sendo assim é possível, através da análise do vídeo, estudar grandezas da mecânica como posição,

velocidade, aceleração e energia de um corpo, podendo-se inferir informações sobre a dinâmica do sistema a partir de um experimento de baixo custo.

Neste trabalho desenvolvemos uma metodologia, através da construção de um experimento de baixo custo, com materiais alternativos, envolvendo a técnica de vídeo-análise, para investigar a força de arrasto sofrida por discos de papelão de diferentes raios, quando os mesmos são postos a oscilar presos a uma mola. A motivação para este trabalho surgiu na busca por uma relação entre o raio do disco e a força de arrasto sofrida pelo mesmo, questão esta originada em uma das aulas do curso de mecânica básica. Essa busca se deu inicialmente nos livros textos usuais adotados como referências para os cursos de ciências e engenharias [27–29], porém sem nenhum sucesso, encontrando apenas o caso usual de uma esfera, onde a força de arrasto sofrida pela mesma é dada pela conhecida lei de Stokes [30, 31], proporcional ao raio da esfera. Além disso, a carência de experimentos didáticos comercializados que abordassem esse tema foi outro fator que impulsionou a realização deste trabalho. Portanto este trabalho também se constitui numa proposta de prática experimental de baixo custo e de fácil reprodução, de modo a ser uma opção didática para uma prática a ser desenvolvida na disciplina de mecânica básica nos cursos de ciências e engenharias.

O presente trabalho apresenta a metodologia desenvolvida na seção 2, seguida dos resultados e discussões na seção 3 e encerramos na seção 4 com as considerações finais.

2. Arranjo e Metodologia Experimental

Iniciamos cortando discos de papelão de diferentes raios, 6,5 cm, 7,6 cm, 8,8 cm, 9,9 cm, 11,75 cm, 14,0 cm, e colando-os a pequenos cilindros plásticos preenchidos com massas aferidas, como exposto na Figura 1. Estas massas aferidas são utilizadas para equiparar a massa de cada um dos sistemas (disco + cilindro), com o objetivo de estudar o efeito exclusivo da força de arrasto na dinâmica do sistema, por meio da sua dependência funcional com o raio do disco. Esse procedimento se torna necessário para cumprir o nosso objetivo, uma vez que variar o raio do disco utilizado significa variar também a massa do sistema, fazendo necessário o uso de massas aferidas para compensar essa redução, matendo assim a massa do sistema em um valor fixo. Durante esse processo utilizamos os próprios restos de papelão dos cortes para confeccionar os diferentes discos, juntamente com massas metálicas, como massas aferidas.

Para estudar o efeito exclusivo da força de arrasto na dinâmica do sistema (disco + cilindro) suspendemos cada disco em uma mola e registramos as oscilações desse sistema ao longo do tempo. Para tal fim utilizamos o procedimento de vídeo-análise para cada um dos 6 discos quando postos a oscilar, um de cada vez, todos eles presos à mesma mola, fixando assim também a constante

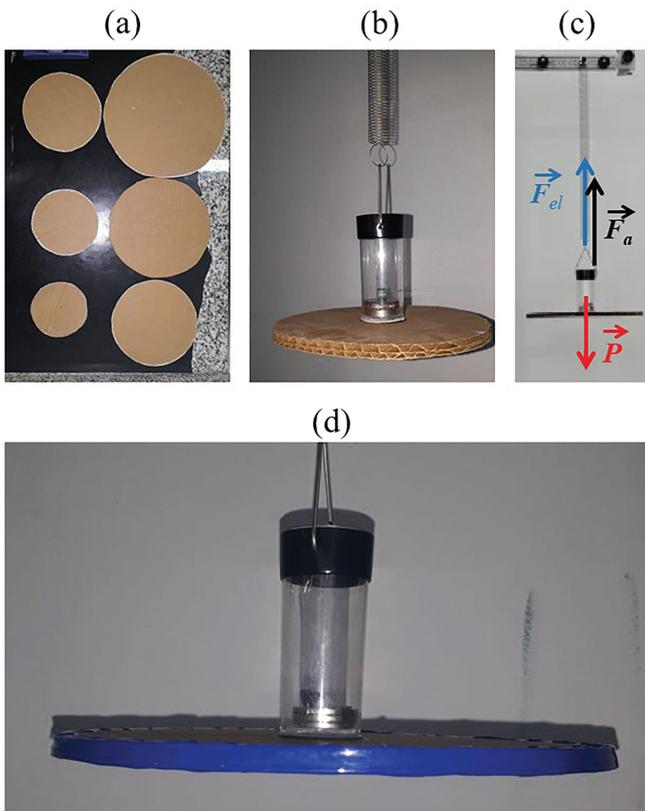


Figura 1: Preparação do experimento. (a) 6 discos de papelão cortados com diâmetros iguais a 6,5 cm, 7,6 cm, 8,8 cm, 9,9 cm, 11,75 cm e 14 cm. (b) Pequeno cilindro de plástico, preenchido com massas aferidas, colado à superfície do disco. (c) Esquema das forças atuantes no disco em uma dada realização experimental. (d) Disco com a borda selada com fita adesiva.

elástica do sistema durante todas as realizações experimentais com os diferentes discos. As filmagens são realizadas utilizando uma câmera de celular fixada em um tripé, com uma taxa de captura de 30 quadros por segundo e o processo de análise dos vídeos por meio do software gratuito *Tracker*. Para calibrar as medidas de comprimento utilizamos uma régua de 500 mm suspensa paralelamente ao plano das oscilações. Na Figura 2 apresentamos uma foto de uma realização experimental, bem como o resultado do processo de vídeo análise, com a posição $y(t)$ do sistema exibindo o comportamento de oscilações com amortecimento subcrítico.

3. Modelo Teórico

Para o estudo deste sistema, modelamos o mesmo como estando sujeito às forças devido à mola $F_{el} = k(l - l_0)$ (Lei de Hooke), ao atrito viscoso imposto pelo ar sobre disco $F_a = -bv$, sendo b a constante de arrasto, e à força peso $P = -mg$, como ilustrado na Figura 1(c). Aplicando a segunda lei de Newton $F_R = ma = m d^2y/dt^2$ ao sistema, ao longo da direção vertical y (ver

Figura 2), obtém-se a seguinte equação diferencial:

$$-mg + k(l - l_0) - bv = m \frac{d^2y}{dt^2}, \tag{1}$$

sendo m a massa total do sistema (cilindro + disco), k a constante elástica da mola, g a gravidade local, l_0 o comprimento da mola relaxada e l seu comprimento quando deformada. O modelo da força de arrasto, proporcional à velocidade v (lei de Stokes), é compatível com as baixas velocidades atingidas no experimento, situação em que temos o regime de fluxo laminar de ar através da geometria do disco [32]. A equação (1) contém tanto a posição y como a variável l que descreve o comprimento da mola a cada instante. Para escrevermos esta equação em termos apenas da posição y e de suas derivadas, devemos expressar as deformações da mola $\Delta l = l - l_0$ com variações de posição $\Delta y = y - y_0$ no referencial adotado. Por meio da Figura 2 temos que $H = y(t) + l(t)$ é uma altura constante, onde esta relação impõe o seguinte vínculo $\Delta l = l - l_0 = -\Delta y = -(y - y_0)$, que substituído na equação (1), logo após algumas manipulações e escrevendo a velocidade como a derivada da posição $v = dy/dt$, obtemos

$$\frac{d^2y}{dt^2} + \gamma \frac{dy}{dt} + \omega_0^2 y = \omega_0^2 y_0 - g, \tag{2}$$

sendo $\omega_0 = \sqrt{k/m}$ a frequência angular natural de oscilação do sistema na ausência de amortecimento e y_0 a altura inicial do sistema medida em relação à origem. Sabe-se que a equação (2) admite três tipos de soluções, dependendo do tipo de amortecimento presente (definido pela relação entre ω_0 e a constante de amortecimento $\gamma = b/m$) [33, 34]:

- amortecimento subcrítico: quando a frequência natural de oscilação é maior que a metade da constante de amortecimento ($\omega_0 > \gamma/2$)
- crítico: quando a frequência natural de oscilação é igual à metade da constante de amortecimento ($\omega_0 = \gamma/2$)
- super crítico: quando a frequência natural de oscilação é menor que a metade da constante de amortecimento ($\omega_0 < \gamma/2$).

Na situação de amortecimento subcrítico, como a exibida em nosso experimento, temos as conhecidas soluções oscilatórias amortecidas, em que o objeto executa diversas oscilações com a amplitude modulada por uma exponencial decrescente com constante de tempo $2/\gamma$, expostas na Figura 2 e representada pela seguinte solução da equação (2)

$$y = Ae^{-\frac{\gamma}{2}t} \cos(\omega t + \phi) + C, \tag{3}$$

sendo A a amplitude inicial, $C = (\omega_0^2 y_0 - g)/\omega_0^2$ e ϕ a fase inicial. A constante C representa a posição do sistema medida em relação à origem após um intervalo de tempo muito grande ($t \gg 1/\gamma$), quando o mesmo

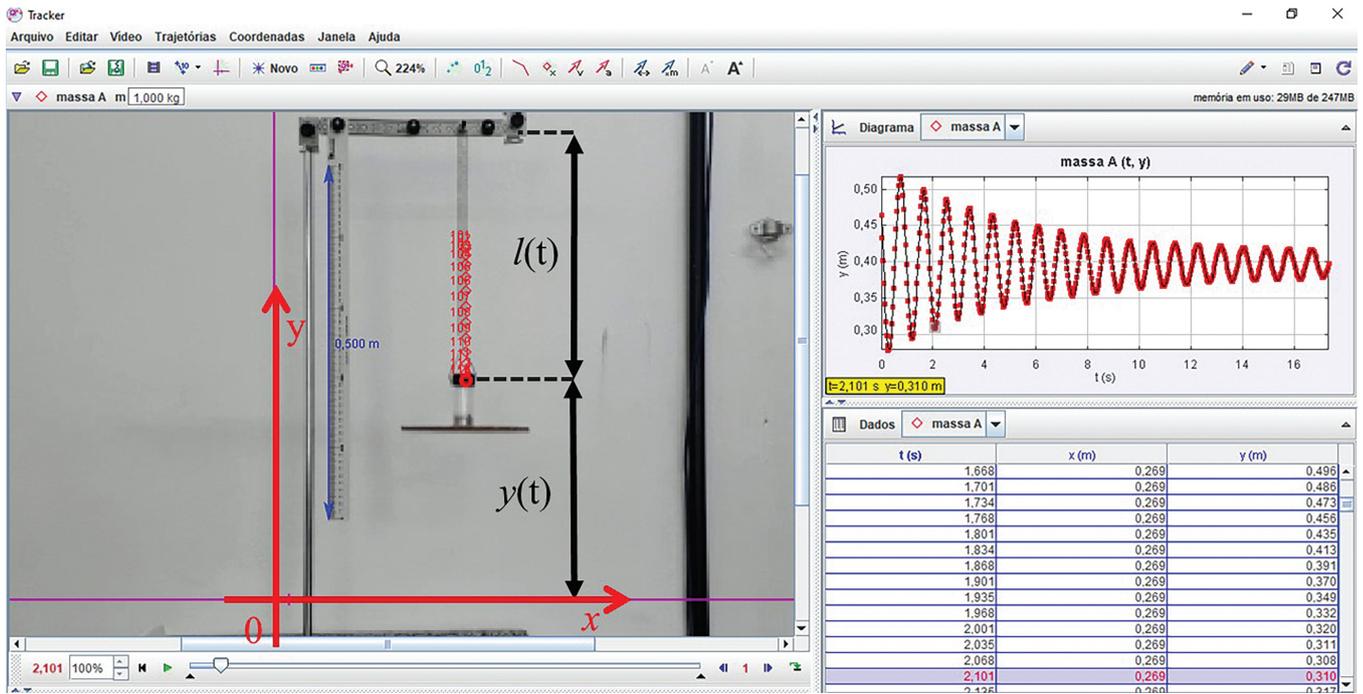


Figura 2: Interface gráfica do programa Tracker, contendo uma foto do experimento em análise, para um disco de raio 8,8 cm, juntamente com os dados referentes à posição y em função do tempo t obtidos ao longo do processo de vídeo análise, representados pelos quadrados vermelhos.

entra em repouso. A frequência angular de oscilação $\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \gamma^2/4}$ é obtida impondo que a equação (3) satisfaça a equação (2). Em nossa proposta de atividade investigamos o efeito do raio do disco na dinâmica do sistema, raio este presente implicitamente na constante de arrasto hidrodinâmico b contido na força de arrasto, mantendo todos os outros parâmetros de entrada do sistema fixos. A massa de cada um dos seis sistemas (disco + cilindro), controlada por meio das massas aferidas, é fixada em $m = 73,0 \pm 0,1$ g. Essa metodologia nos permite investigar a dependência funcional exclusiva da força de arrasto e do coeficiente de amortecimento $\gamma = b/m$ com o raio do disco, e ao mesmo tempo refletir sobre a importância dos modelos na compreensão das relações entre as grandezas físicas envolvidas em um experimento e de como podemos usar essas relações para estudar de maneira individual uma determinada grandeza.

4. Resultados e Discussão

Cada parâmetro γ , referente a cada disco, é obtido ajustando o modelo dado pela equação (3) aos dados de posição (y) e tempo (t), obtendo também os parâmetros A , ω , ϕ e C , para cada um dos 6 discos com diferentes raios. Na Figura 3 apresentamos um exemplo de ajuste para obtenção do parâmetro γ para o disco de raio 8,8 cm, nos fornecendo como resultado $\gamma = 0,29 \text{ s}^{-1}$ e $\omega = 7,06 \text{ rad/s}$.

Na Figura 4 expomos a dependência explícita e exclusiva, do coeficiente de amortecimento γ do sistema, com

os raios dos diferentes discos, uma vez que a massa total de cada um dos sistemas (cilindro + disco) foi controlada por meio do uso de massas aferidas. Para obtermos a dependência funcional do coeficiente de amortecimento com o raio r , ajustamos uma função do tipo $\gamma = cr^d$ aos dados experimentais da Figura 4, obtendo $c = 51,1 \pm 6,3 \text{ s}^{-1}\text{m}^{-d}$, $d = 2,15 \pm 0,06$ e um bom ajuste com os dados experimentais ($R^2 = 0,998$). O valor do parâmetro d encontrado, próximo de 2, leva-nos a concluir que a força

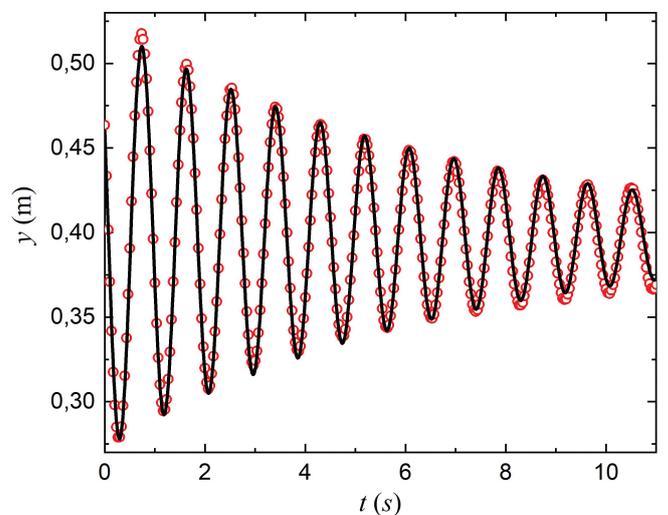


Figura 3: Posição em função do tempo para o disco de raio 8,8 cm. Pontos vermelhos: experimento. Linha sólida: modelo ajustado.

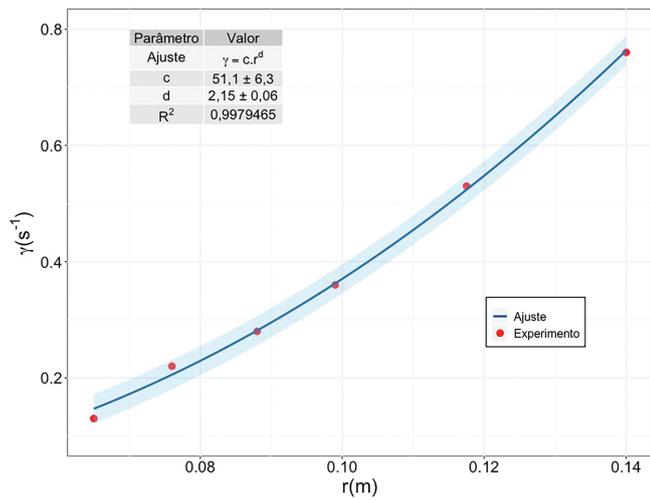


Figura 4: Coeficiente de amortecimento γ em função do raio do disco. Pontos vermelhos: experimento. Linha sólida: ajuste. Região sombreada: limite de confiança do ajuste.

de Stokes atuante no disco deverá ser proporcional à área do mesmo, diferindo do caso usual da esfera, cuja força é proporcional ao raio da mesma. Este resultado pode ser deduzido por meio da força de arrasto [32]

$$F_a = \frac{C_a \rho A v^2}{2} \tag{4}$$

que age sobre um objeto que se desloca com velocidade v imerso em um fluido de densidade ρ (no nosso caso o ar), sendo A a área da seção transversal do objeto e C_a o chamado coeficiente de arrasto. Por sua vez o coeficiente de arrasto depende da velocidade através do número de Reynolds $Re = \rho L v / \eta$, sendo L o comprimento característico do objeto e η a viscosidade dinâmica do fluido. Para pequenos valores do número de Reynolds, no regime de baixas velocidades, como as obtidas em nosso experimento, o coeficiente de arrasto é inversamente proporcional ao número de Reynolds [35] $C_a \sim 20,4 / Re = 20,4 \eta / \rho L v$, que substituído na equação (4), obtém-se

$$F_a = \frac{10,2 \eta A v}{L}, \tag{5}$$

sendo $A = \pi r^2$ a área da seção transversal do disco. A proporcionalidade da força de arrasto com a área do disco também pode ser fisicamente intuída, uma vez que durante o movimento do disco ocorre um bloqueio do fluxo de ar na direção perpendicular às duas faces do mesmo, durante as oscilações.

O comportamento parabólico do coeficiente de amortecimento γ com o raio do disco na Figura 4 indica que o comprimento característico L ao longo dos experimentos permanece constante, inferindo assim que o mesmo será determinado pela espessura dos discos (espessura da folha de papelão utilizada para confeccionar os discos), que foi a mesma em todas as repetições. Tal escolha

é justificada com o fato do transporte de ar ao longo das oscilações acontecer através das bordas do disco, ao longo da sua espessura. A constante $c = 51,1 \text{ s}^{-1} \text{ m}^{-2}$, obtida por meio do ajuste da Figura 4, é multiplicada pela massa $m = 73,0 \text{ g}$, e logo em seguida igualada à constante $10,2 \pi \eta / L$, advinda da equação (5), estimando $L \approx 0,15 \text{ mm}$ para a espessura do disco, onde consideramos $\eta = 18 \cdot 10^{-6} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ para a viscosidade do ar a temperatura ambiente [33].

Partindo da hipótese de que o pequeno valor estimado para a espessura do disco, muito aquém do valor real, aproximadamente uma ordem de grandeza abaixo, pode estar associado ao fato de estarmos utilizando um modelo simples que não contempla o escoamento de ar ao longo de superfícies irregulares e com furos, como a que está presente nas bordas dos discos de papelão utilizados em nossos experimentos, como exposto na Figura 1(b). Já que os furos na borda do disco permitem a entrada de ar no interior do mesmo, promovendo um efeito de aumento acentuado da força de arrasto. E tendo em vista que o parâmetro c está associado ao coeficiente de amortecimento γ , se os furos não existissem ou se os mesmos fossem fechados, presumimos uma redução do parâmetro c ajustado, e um conseqüente aumento do comprimento característico L , mais próximo da espessura real do disco. Desta forma resolvemos repetir o experimento com a lateral do disco selada com fita adesiva (ver Figura 1(c)). Para isso escolhemos o disco de raio 8,8 cm e repetimos todo o procedimento anterior, obtendo $c = 29,7 \text{ s}^{-1} \text{ m}^{-2}$ e comprimento característico $L = 0,27 \text{ mm}$, associado à espessura do disco, um pouco maior do que o valor de 0,15 mm encontrado quando a borda está aberta, estando esse resultado de acordo com a nossa hipótese, se aproximando da espessura real do disco, mas ainda assim aquém do valor real.

Por meio do coeficiente de amortecimento γ e da frequência angular ω , ajustados, para cada disco utilizado, também obtemos a frequência angular natural ω_0 , para cada um dos sistemas, com massa fixada em 73,0 g, usando a relação $\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \gamma^2 / 4}$. Uma vez que a frequência angular natural depende somente da constante elástica da mola utilizada e da massa do sistema, ambos fixos em todas as realizações, obtemos a sua medida por meio da média dos valores representados na Tabela 1. Tomando a média dos 6 valores obtidos, encontramos $\omega_0 = 7,0 \pm 0,3 \text{ rad/s}$ para a

Tabela 1: Valores obtidos para a frequência angular de oscilação ω_0 , para cada um dos discos.

r (cm)	ω_0 (rad/s)
6,5	7,21
7,6	7,17
8,8	7,06
9,9	7,01
11,8	6,85
14,0	6,70

frequência angular natural do sistema, onde a barra de erro foi estimada tomando a metade da diferença entre os valores máximo e mínimo medidos. Utilizando a relação $\omega_0 = \sqrt{k/m}$ obtemos $k = 3,6 \pm 0,3 \text{ N/m}$ para a constante elástica da mola, sendo a barra de erro estimada por meio da propagação $\delta k = 2m\omega_0\delta\omega_0$.

Para validar a prática proposta, calibramos a mola determinando a sua constante elástica pelo método estático usual [36], onde mede-se o comprimento da mola para cada massa aferida suspensa na mesma. No final obtemos a constante elástica extraíndo o coeficiente angular da reta, referente à curva de calibração, e multiplicando-o pela gravidade local $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ para obter $k = 3,99 \text{ N/m}$. Valor este muito próximo do limite superior de $3,9 \text{ N/m}$ obtido por meio da prática realizada, com um desvio percentual de 2%.

5. Considerações Finais

Por meio da técnica de vídeo-análise propomos e realizamos uma atividade de baixo custo que permite estudar a influência da força de arrasto na dinâmica de discos de papelão de diferentes raios, todos eles com massas iguais por meio de massas aferidas, que oscilam em um movimento amortecido. A reprodução das oscilações amortecidas representadas na Figura 2, por meio do experimento de baixo custo desenvolvido neste trabalho, afirma e demonstra a eficiência desse tipo de abordagem em situações onde os recursos são escassos. Expomos como esta prática pode ser utilizada para investigar a Lei de Stokes na geometria não usual de um disco, comumente apresentada nos livros didáticos para uma geometria esférica. Através deste estudo demonstramos a proporcionalidade quadrática da força de arrasto com o raio do disco, e conseqüentemente com a área do mesmo, diferindo da geometria esférica em que a força de arrasto é proporcional ao raio. Também estimamos um valor para a espessura do disco, associando o mesmo ao comprimento característico, advindo do escoamento de ar através da sua espessura, durante o movimento oscilatório. Por meio da espessura estimada, uma ordem de grandeza abaixo do valor real, discutimos a fragilidade do modelo apresentado, um importante aspecto a sempre ser discutido nas aulas de física, os limites de validade dos modelos físicos e os seus possíveis aprimoramentos como uma tentativa de aproximá-lo da realidade. Em suma apresentamos um exemplo de como a utilização de materiais alternativos de baixo custo, em um laboratório de física básica, podem promover a discussão e a contextualização de diversos conceitos de mecânica clássica e de dinâmica dos fluidos, levando a construção e a compreensão de modelos, melhorando assim o processo de ensino-aprendizagem.

REFERÊNCIAS

[1] T.C.S. Leal e A.A. Oliveira, Revista Brasileira de Ensino de Física **41**, e20180354 (2019).

- [2] M.A. Pires e E.A. Veit, Revista Brasileira de ensino de Física **28**, 241 (2006).
- [3] J.A. Lenz, N.C.S. Filho e A.G.B. Júnior, Abakós **2**, 24 (2014).
- [4] J.F. Mendes, I.F. Costa e C. MSG. Sousa, Revista Brasileira de Ensino de Física **34**, 1 (2012).
- [5] J.C. Santos e A.G. Dickman, Revista Brasileira de Ensino de Física **41**, e20180161 (2019).
- [6] A.C.P. Fernandes, L.T.S. Auler, J.A.O. Huguenin e W.F. Balthazar, Revista Brasileira de Ensino de Física **38**, e3504 (2016).
- [7] E.V. Rodrigues e D. Lavino, Revista Brasileira de Ensino de Física **42** e20190012 (2020).
- [8] C. Fiolhais e J. Trindade, Revista Brasileira de Ensino de Física **25**, 259 (2003).
- [9] J. Richards, W. Barowy e D. Levin, Journal of Science Education and Technology **1**, 67 (1992).
- [10] L.K. Wee, C. Chew, G.H. Goh, S. Tan e T.L. Lee, Physics Education **47**, 448 (2012).
- [11] P. Klein, S. Gröber, J. Kuhn e A. Müller, Physics Education **49**, 37 (2014).
- [12] V.L.B. de Jesus e D.G.G. Sasaki, Revista Brasileira de Ensino de Física **36**, 3503 (2014).
- [13] V.L.B. Jesus e D.G.G. Sasaki, Revista Brasileira de Ensino de Física **37**, 1507 (2015).
- [14] P. Hockicko, B. Trpišová e J. Ondruš, Journal of science education and technology, 10.1007/s10956-014-9510-z (2014).
- [15] J.R. Beichner, American Journal of Physics **64**, 1272 (1996).
- [16] P. Nakroshis, M. Amoroso, J. Legere e C. Smith, American Journal of Physics **71**, 568 (2003).
- [17] P. Brown, Z. Cepelcha, R.L. Hawkes, G. Wetherill, M. Beech e K. Mossman, Nature **367**, 624 (1994).
- [18] M.S.T. Araújo e M.L.V.S. Abib, Revista Brasileira de Ensino de Física **25**, 176 (2003).
- [19] C.W. Rosa, Ensaio Pesquisa em Educação em Ciências **5**, 94 (2003).
- [20] I.S. Araujo e E.A. Veit, em *14ª Jornada Nacional de Educação: A Educação na Sociedade dos Meios Virtuais* (Santa Maria, 2008).
- [21] L.I. Leitão, P.F.D. Teixeira e F.S. Rocha, Revista Electrónica de Investigación en Educación en Ciencias **6**, 18 (2011).
- [22] S.E. Duarte, Caderno Brasileiro de Ensino de Física **29**nspp **1**, 525 (2012).
- [23] V.L.B. de Jesus, *Experiments and Video Analysis in Classical Mechanics* (Springer, New York, 2017).
- [24] D.G.G. Sasaki e V.L.B. Jesus, Revista Brasileira de Ensino de Física **42** e20190223 (2020).
- [25] E.A. Lima, R.S. Dutra e P.V.S. Souza, Physics Education **55**, 0550224 (2020).
- [26] F.S. Neto e P.V.S. Souza, Physics Education **53**, 5 (2018).
- [27] D. Halliday, R. Resnick e J. Walker, *Fundamentos de física: mecânica* (Livros Técnicos e Científicos, Rio de Janeiro, 2009).
- [28] P.A. Tipler e G. Mosca, *Física para cientistas e engenheiros. Vol. 1: mecânica, oscilações e ondas, termodinâmica* (Grupo Gen-LTC, São Paulo, 2000).

- [29] H.D. Young e R.A. Freedman, *Física I* (Pearson Educação, Londres, 2009).
- [30] A. Finn e M. Alonso, *Física—Um curso Universitário* (Edgar Blücher, São Paulo, 2000).
- [31] E.J. Vasques, P. Menegasso e M. Souza, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **38**, 1307 (2016).
- [32] M.S.D. Cattani, *Elementos de Mecânica dos Fluidos* (Edgard Blücher, São Paulo, 2005).
- [33] H.M. Nussenzveig, *Curso de Física Básica: fluidos, oscilações e ondas, calor* (Editora Blucher, São Paulo, 2018).
- [34] E.M. Diniz, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **42** e20190195 (2020).
- [35] B.R. Munson, T.H. Okiishi, W.W. Huebsch e A.P. Rothmayer, *Fundamentals of fluid mechanics* (John Wiley & Sons, New York, 2006).
- [36] W. Bauer, G.D. Westfall e H. Dias, *Física para Universitários – Mecânica* (AMGH, Porto Alegre, 2012).