

Verificação da conservação da energia mecânica de um sistema em rotação: um ensaio no laboratório.

Verificación de la conservación de la energía mecánica de un sistema en rotación: un ensayo en laboratorio.

Verification of the Conservation of Mechanical Energy of a System in rotation: a Laboratorial Essay.

Vinicius Machado¹, José Ricardo Galvão, Romeu Miquéias Szmoski

Resumo: O presente artigo apresenta o relato do ensaio de uma atividade experimental que foi realizada no laboratório didático de Física 1 na Universidade Tecnológica Federal do Paraná, no *Câmpus* Ponta Grossa. Desenvolveu-se, nesse trabalho, um sistema contendo um disco cilíndrico oco que, partindo do repouso, sofreu uma rotação plana, acelerada e sem atrito em torno de um eixo fixo, devido ao impulso provocado pela ação de uma força externa exercida por um peso preso ao disco. Por meio de instrumentos de medidas, entre eles, sensores de tempo, cronômetro digital, régua e balança eletrônica obtiveram-se dados que permitiram verificar a conservação de energia mecânica do sistema.

Palavras-chave: física; ensino experimental; movimento de rotação; energia mecânica.

Resumen: En este artículo se presenta el informe de la prueba de una actividad experimental realizado en el laboratorio de física 1 de la Universidad Tecnológica Federal de Paraná y en el *Câmpus* de Ponta Grossa. Hemos desarrollado un sistema que contiene un disco cilíndrico hueco, partiendo del reposo, sufrió rotación plana, rápida y sin fricción alrededor de un eje debido al impulso provocado por la acción de una fuerza externa. A través de los instrumentos de medición, incluyendo sensores, tiempo, cronómetro digital gobernante y dinamómetro arrojado datos que nos permitió verificar la conservación de la energía mecánica del sistema.

Palabras clave: física; enseñanza experimental; movimiento de rotación; energía mecánica.

Abstract: *This article presents the report of the trial of an experimental activity developed in the Didactics Physics 1 Laboratory at the Federal Technological University of Paraná, in the Câmpus from Ponta Grossa. In this work it was developed a system containing a hollow cylindrical disc that, starting from rest, suffered an accelerated and frictionless flat rotation around a fixed axis due to the momentum caused by the action of an external force exerted by a weight attached to the aforementioned disc. Through measurement instruments, including sensors of time, digital stopwatch, ruler and dynamometer it was obtained data that allowed experimentally proving the conservation of mechanical energy of the system.*

Keywords: *physics; experimental teaching; rotation movement; mechanical energy.*

¹Mestre em Ensino de Ciência e Tecnologia, docente nos cursos de Engenharia no *Câmpus* Ponta Grossa da UTFPR, e-mail: vinmac@utfpr.edu.br.

1. Introdução

O laboratório didático apresenta-se como um ambiente privilegiado para que o aluno possa, entre outras situações, por a prova seu conhecimento prévio a respeito dos fenômenos que regem a natureza e/ou validar o conhecimento anteriormente já trabalhado em aulas teóricas. Mas, para que isso possa se concretizar de fato, esse ambiente deve dispor de equipamentos e/ou aparatos e/ou dispositivos que envolvam os diferentes assuntos abordados na disciplina, o que nem sempre acontece em virtude os altos custos relacionados à sua aquisição. Além disso, esses dispositivos devem exigir do aluno mais do que um simples acionamento de uma chave proporcionando uma coleta imediata de dados do experimento.

Para contornar ou minimizar esses problemas, deparou-se com a necessidade de elaborar, construir e testar o funcionamento de equipamentos e/ou dispositivos de baixo custo que possam ser utilizados nas aulas experimentais da disciplina de Física 1 nos cursos de Engenharia, cujo ementário é basicamente voltado ao estudo dos movimentos de translação e rotação.

Dessa forma, o que se propõe nesse trabalho é apresentar os resultados de um ensaio experimental do uso de um dos dispositivos elaborados e construídos no laboratório de Física 1 do *Câmpus* Ponta Grossa da UTFPR com a finalidade de trabalhar nesse ambiente o conteúdo de Energia Mecânica no movimento rotacional.

O trabalho apresenta-se organizado da seguinte maneira: na seção 2, apresenta-se o aparato experimental e suas características. Em seguida, seção 3, discute-se o balanço da energia mecânica do sistema. As medidas e os cálculos das quantidades de cada forma de energia envolvida compreendem a seção 4. Finalmente, na seção 5, são apresentadas as considerações finais sobre os resultados obtidos e sobre o funcionamento do sistema.

2. O dispositivo e os dados preliminares

O dispositivo, conforme mostra a Figura 1, é constituído basicamente por um disco cilíndrico oco que, partindo do repouso, é impulsionado por um corpo acelerador preso a ele por meio de um fio inextensível e de massa desprezível, rotacionando em torno de um eixo fixo, perpendicular ao seu plano e situado no seu centro de massa.

Para a realização da atividade foi necessário o uso de outros equipamentos já disponíveis no laboratório como hastes, tripés, garras ou mangas, balança eletrônica, régua metálica, sensores de tempo e cronômetro digital.



Figura 1: a montagem do sistema.
Fonte: autoria própria.

Para construir o disco cilíndrico oco, usinou-se na oficina mecânica do *câmpus* uma placa de MDF (Medium Density Fiberboard) obtendo-se uma peça de massa 505,567 gramas, conforme mostra a Figura 2.



Figura 2: medida da massa da peça
Fonte: autoria própria.

Na superfície da linha externa desse disco, usinou-se um sulco de aproximadamente 1mm de profundidade no qual fixou-se a extremidade de um fio fino de algodão, passando o

disco a funcionar como um cordel. Na extremidade desse fio prendeu-se um corpo metálico, doravante chamado de corpo acelerador. Mediu-se a massa desse corpo acelerador, conforme mostra a Figura 3, e obteve-se o valor de 89,943 gramas.



Figura 3: medida da massa do corpo acelerador.
Fonte: autoria própria.

Mediu-se com uma régua metálica os diâmetros externo (D_e) e do furo do disco (D_f), obtendo-se os valores 221 mm e 12,9 mm, respectivamente, Figura 4.

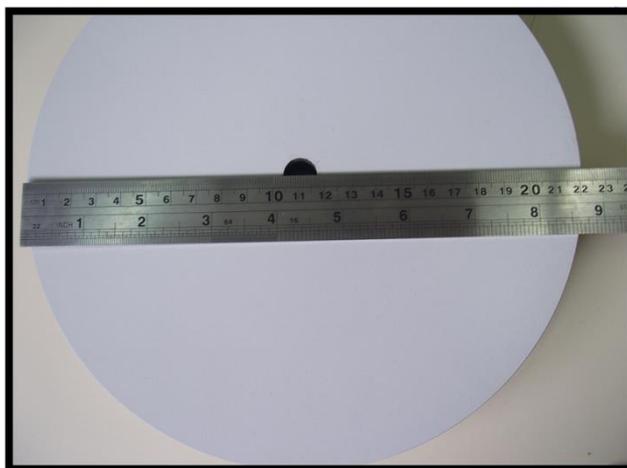


Figura 4: medidas dos diâmetros externo e interno do disco.
Fonte: autoria própria.

Para sustentar o sistema, utilizou-se de tripés, hastes cilíndricas e mangas. A fim de posicionar o eixo do sistema na direção horizontal permitindo uma rotação plana da peça de MDF, utilizou-se um nível apoiado nas duas mangas que o sustentam na haste.

A fim de determinar o tempo de rotação do disco cilíndrico, posicionou-se dois sensores acoplados a um cronômetro, alinhados verticalmente com a direção pela qual o corpo acelerador passa quando é liberado.

Com o auxílio de uma trena posicionou-se os sensores à distância de 204 mm um do outro. Trabalhou-se com o valor da aceleração da gravidade local em $9,78718\text{m/s}^2$, determinado pelo método da geodésica em outra atividade anteriormente realizada.

3. O balanço de energia mecânica do sistema

A análise do balanço de energia mecânica do sistema deu-se observando o deslocamento tendo como referência os pontos (1) e (2) de posicionamento dos sensores S_1 e S_2 respectivamente, conforme mostra a figura 5. Determinou-se a posição (1) como a de início do movimento, ou seja, posição em que a velocidade inicial do sistema é nula. Tal posicionamento deu-se de forma manual. Supondo a inexistência de forças dissipativas, ou seja, considerando o sistema como sendo conservativo, observa-se que a energia mecânica nos pontos de referência permanece constante, ou seja, $E_1 = E_2$ (SEARS, ZEMANSKY e YOUNG, 1985; BEER e JOHNSTON, 1980; RESNICK e HALLIDAY, 1979).

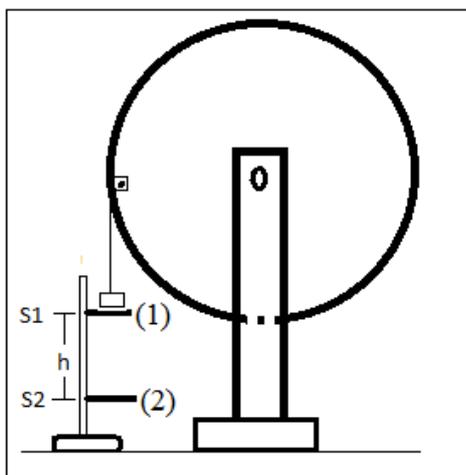


Figura 5: Corpo acelerador na eminência do movimento.
Fonte: autoria própria.

Sendo a energia mecânica total obtida a partir da soma das parcelas de energia nas modalidades cinética e potencial, ao observar-se a inexistência de energia mecânica na modalidade cinética na posição (1), verifica-se apenas a existência de energia mecânica na modalidade potencial gravitacional, tem-se que $E_1 = E_{g \text{ corpo}}$, ou seja, $E_1 = m \cdot g \cdot h_1$ (RESNICK e HALLIDAY, 1979, p. 163), em que m é a massa do corpo acelerador, g é o valor da aceleração da gravidade local e h_1 é distância entre os sensores 1 e 2.

Ao verificar a energia mecânica total do sistema na posição (2), observa-se que não haverá nesse ponto energia na modalidade potencial gravitacional já que o movimento é de (1) para (2) e (2) é o ponto final do trecho analisado, situação em que $h_2 = 0$ m. Por outro lado, vê-se que no ponto (2) haverá movimento do corpo acelerador. Dessa forma, nessa posição, Figura 6, observa-se a existência de energia mecânica na modalidade cinética do sistema. Logo, a energia mecânica total (E_2) na posição (2) é definida por $E_2 = E_{p2} + E_{c2}$, mas, como não há energia potencial em (2), nesse ponto a energia total será dada por $E_2 = E_{c2}$.

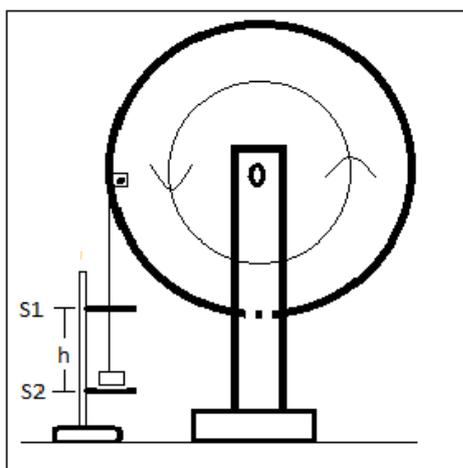


Figura 6: Corpo acelerador ao passar pelo segundo sensor.
Fonte: autoria própria.

Fazendo o corpo acelerador parte de um sistema, já que o mesmo está preso à peça de MDF por meio de um fio, observa-se que o movimento por ele descrito entre os dois sensores não é o de queda livre, logo, entende-se que a energia mecânica potencial gravitacional do corpo acelerador não é transformada da posição (1) para a posição (2) em energia cinética apenas desse corpo, mas, em energia cinética de um sistema. Dessa forma, a energia cinética (E_{c2}) no ponto (2) é calculada pela soma das energias cinéticas do corpo acelerador e a do disco de MDF, ou seja, $E_2 = E_{c \text{ corpo}} + E_{c \text{ peça}}$.

Como o movimento do corpo acelerador é de translação tem-se que a energia cinética do sistema é dada por $E_{c \text{ corpo}} = m.v^2/2$, sendo m é a massa do corpo acelerador e v a velocidade linear do corpo acelerador ao passar pelo segundo sensor, a ser calculada (SEARS, ZEMANSKY e YOUNG, 1985, p.53). Já a peça MDF realiza movimento de rotação e, portanto, sua energia cinética é dada por $E_{c \text{ peça}} = I.\omega^2 / 2$ (RESNICK e HALLIDAY, 1979, p. 274), em que I é o momento de inércia da peça de MDF e ω é a velocidade angular da peça de MDF no instante em que o corpo acelerador passa pelo sensor 2. Logo, se $E_2 = E_{c \text{ corpo}} + E_{c \text{ peça}}$, tem-se: $E_2 = m.v^2/2 + I.\omega^2/2$.

Dessa forma, para que se possa afirmar que ocorreu ou não a conservação de energia mecânica no sistema, a aplicação das medidas obtidas no laboratório nas equações de energia nos pontos (1) e (2), respectivamente E_1 e E_2 , devem resultar em valores iguais ou, levando em consideração os eventuais erros sistemáticos e acidentais, em valores muito próximos.

4. As medidas e os cálculos

Os critérios adotados para o tratamento dos dados foram o de converter todas as medidas encontradas para o Sistema Internacional de Medidas e fazer o arredondamento dos algarismos significativos apenas no resultado final das medidas indiretas com a limitação determinada pelo número de algarismos significativos da medida que apresentar a menor precisão.

A fim de que se possa verificar a conservação da energia mecânica no movimento do sistema da posição (1) para a posição (2), utilizou-se os valores já indicados anteriormente: da massa do corpo acelerador, da aceleração da gravidade local, da distância entre os sensores, massa e diâmetros externo e do furo do disco cilíndrico oco. Além desses valores, observou-se ainda a necessidade de calcular outros valores importantes como o do momento de inércia do disco cilíndrico oco e das velocidades linear e angular do sistema na posição (2).

O momento de inércia de um disco cilíndrico oco é determinado pela equação $I = M.(R_e^2 + R_f^2)/2$ (SEARS, ZEMANSKY e YOUNG, 1985, p.24), sendo M a massa do disco, R_e e R_f respectivamente os raios externo e do furo do disco de MDF. Contudo, se a medida do raio é a metade da medida do seu respectivo diâmetro, entende-se que a equação do momento de inércia da peça pode ser descrita por $I = M.(D_e^2 + D_f^2)/8$.

Utilizando-se dos dados encontrados: $M = 0,505567$ kg, $D_e = 0,221$ m e $D_f = 0,0129$ m, obteve-se como valor do momento de inércia do disco: $I = 0,00309712129$ kgm², limitado a três algarismos significativos obtém-se $I = 0,00310$ kgm².

A fim de determinar as correspondentes velocidades linear da peça aceleradora e angular do disco cilíndrico oco, utilizou-se dos tempos obtidos na passagem da peça aceleradora pelos sensores acoplados ao cronômetro. Tomou-se o tempo em cinco amostras, obtendo-se os seguintes valores: $t_1=0,386$ s; $t_2=0,396$ s; $t_3=0,401$ s; $t_4=0,399$ s e $t_5=0,396$ s. Para definir o tempo do movimento entre S_1 e S_2 , trabalhou-se com o valor mais provável das cinco medidas, ou seja, a média dos tempos da amostra obtendo-se o valor de 0,3956 segundos. Para determinar a velocidade instantânea do corpo acelerador na posição (2), trabalhou-se com as equações do deslocamento $\Delta y = v_o.\Delta t \pm a.\Delta t^2/2$ e da velocidade $v = v_o \pm$

a. Δt (RESNICK e HALLIDAY, 1979, p.46) . Como o movimento deu-se da posição (1) para a

posição (2) e a velocidade é nula em (1), a velocidade do corpo acelerador na posição (2) pode ser determinada por $v_2 = 2. \Delta y / \Delta t$. Sendo $\Delta y = h$ (altura entre os sensores) = 0,204 m e $\Delta t = 0,3956$ s, obteve-se o valor de $v_2 = 1,031344793$ m/s.

A fim de determinar a velocidade angular (ω) da peça de MDF no instante em que a peça aceleradora passa pelo ponto (2), observa-se que o corpo acelerador está “acoplado em linha” à peça, por isso, nesse instante, a velocidade tangencial da peça de MDF é igual à velocidade linear do corpo acelerador. Sabendo-se que as velocidades tangencial e angular de um corpo em rotação relacionam-se por $v = \omega.R$ (SEARS, ZEMANSKY e YOUNG, 1985, p.204) , onde R é o raio do disco sobre o qual o corpo acelerador está acoplado, no caso, o raio externo, calculado por $R_e = D_e/2$. Calculou-se, dessa forma, a velocidade angular do disco no instante em que o corpo acelerador passou pelo segundo sensor pela equação $\omega = 2.v_2 / D_e$, obtendo-se o valor de 9,333437041 rad/s.

Aplicando os valores anteriormente descritos na equação da energia mecânica nos pontos (1) e (2), respectivamente $E_1 = m.g.h$ e $E_2 = m.v^2/2 + I.\omega^2/2$, obteve-se os valores $E_1 = 0,179578819$ J, arredondado para 0,180J no limite de precisão e $E_2 = 0,182734765$ J, arredondado para $E_2 = 0,183$ J. O erro absoluto encontrado entre esses valores – módulo da diferença entre os dois valores – foi de três milésimos de Joule.

5. Considerações finais

Levando-se em consideração a pequena variação da energia mecânica encontrada entre os pontos (1) e (2), o baixo custo para reproduzir o dispositivo proposto e as diversas aplicações de conhecimentos físicos que a atividade proporciona, entende-se como viável o seu uso nas aulas experimentais de Física 1 junto a acadêmicos dos cursos de Engenharia.

Observa-se, contudo, a despeito do resultado encontrado, a necessidade de alguns ajustes. Entre esses ajustes entende-se pela necessidade de elaborar um sistema eletromagnético a fim de melhor ajustar a posição do corpo acelerador no início do seu movimento, prestes a passar pelo sensor 1.

Na atividade descrita o ajuste foi manual, por isso a variação nos valores do tempo apresentada nas amostras. Um ajuste eletromagnético, utilizando um eletroímã, provavelmente permitirá a obtenção de um resultado final ainda mais apurado. No ensaio acima descrito, com o intuito de diminuir as ações do atrito entre o disco e o eixo fixo, trabalhou-se com um eixo metálico cromado liso e lubrificando com óleo. Sugere-se que, para

buscar um resultado ainda melhor, monte-se a peça cilíndrica com um rolamento em seu centro a fim de reduzir ainda mais o efeito do atrito na rotação do disco com o eixo sobre o qual sofre rotação.

Vislumbra-se ainda, com o uso do mesmo dispositivo, a possibilidade de sua aplicação em outras atividades experimentais para, por exemplo, determinar o momento de inércia de uma peça, realizar estudos sobre torque e impulso angular, variação do momento angular e cinemática da rotação, entre outros.

6. Referências bibliográficas

BEER, F.P.; JOHNSTON Jr, E.R. **Mecânica Vetorial para Engenheiros**. Rio de Janeiro: McGraw-Hill, 1980.

RESNICK, R.; HALLIDAY, D. **Fundamentos de Física**. Rio de Janeiro: LTC, 1979.

SEARS, F.; ZEMANSKY, M.W.; YOUNG, H.D. **Mecânica da partícula e dos corpos rígidos**, 2.ed. Rio de Janeiro: LTC, 1985.

Agradecimentos:

Os autores gostariam de agradecer ao Sr. Marcos Antonio Hrentchechen, servidor que atua como técnico na oficina mecânica do *Câmpus* Ponta Grossa da UTFPR, por ter usinado a peça de MDF.

Informações complementares dos autores:

Dr. José Ricardo Galvão: Docente no Departamento Acadêmico de Física no *Câmpus* Ponta Grossa da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, *e-mail*: jrgalvao@utfpr.edu.br

Dr. Romeu Miquéias Szmoski: Docente no Departamento Acadêmico de Física no *Câmpus* Ponta Grossa da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, *e-mail*: rmszmoski@utfpr.edu.br