

Rolamento sem deslizamento: um exemplo ilustrativo capaz de mostrar muitos conflitos conceituais

(*Rolling without slipping: an illustrative example able to show many conceptual conflicts*)

Osman Rosso Nelson¹

Departamento de Física Teórica e Experimental, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN, Brasil
Recebido em 26/1/2011; Aceito em 18/6/2012; Publicado em 22/10/2012

O presente trabalho é mais um esforço no processo de identificação de erros conceituais referentes a conteúdos de mecânica clássica, identificados em alunos no nível universitário.

Palavras-chave: erros conceituais, visão Aristotélica, força de atrito.

This work is yet another effort in the identification of misconceptions concerning to contents of classical mechanics identified in students at the university level.

Keywords: conceptual errors, Aristotelian view, friction force.

1. Introdução

A pesquisa em ensino de física tem mostrado aspectos curiosos sobre a compreensão de conceitos apresentados em sala de aula. A identificação de estruturas de pensamentos, bem como de estratégias utilizadas pelos alunos para explicar situações-problema, estimula-nos a procurar as razões das divergências entre os conceitos científicos aceitos como corretos desses sistemas de crenças do senso comum. Nessa perspectiva, a mecânica clássica tem-se revelado um palco perfeito para garimparmos dificuldades conceituais [1-12].

A possibilidade de identificar distorções conceituais relativas ao papel da força de atrito no rolamento sem deslizamento serviu de estímulo para a procura de situações em que, de certa forma, é possível identificar padrões equivocados de pensamento. Esta busca permitiu mapear formas inadequadas de apresentação de certos conteúdos nos livros-textos as quais, ao longo desse trabalho, tentaremos identificar. Na tentativa de encontrar subsídios para este estudo, como ponto de partida, foi aplicado um questionário para alunos de níveis diferenciados, conforme descrito na próxima seção.

2. Metodologia

A base de dados que foi construída repousa na nossa experiência pessoal em sala de aula e na aplicação de um questionário para um total de 201 alunos

de diferentes cursos da UFRN. As turmas analisadas foram essencialmente compostas de alunos oriundos dos cursos de Ciência da Computação, Química bacharelado, Geofísica, Matemática, Geologia, diversas Engenharias (Elétrica, Mecânica, Civil, da Computação, Produção, Têxtil), matriculados nas disciplinas de Mecânica Clássica (158 alunos) e Eletromagnetismo Clássico (43 alunos). Esse estudo exploratório encontra-se, portanto, vinculado a um contexto de disciplinas de nível introdutório na universidade. O perfil das turmas escolhidas, de certa forma, assegura um nível de diversificação de alunos em termos de classificação de entrada no vestibular. A escolha dessas disciplinas foi norteada pela necessidade de compararmos o desempenho de alunos calouros que ainda não haviam estudado na universidade os conteúdos referentes ao questionário com o daqueles que já tenham estudado tais conteúdos e que, tendo sido aprovados na disciplina de Mecânica Clássica, já se encontravam cursando Eletromagnetismo Clássico. A escolha da situação a ser analisada permitiu acolher, numa só questão, possíveis dificuldades inerentes ao movimento de translação e rotação de corpos rígidos. Nesse sentido, o rolamento sem deslizamento de um objeto sobre uma superfície, como a apresentada na Fig. 1, é particularmente rico de possibilidades investigativas, dando espaço a inúmeras chances de se detectar conflitos conceituais relevantes tanto no contexto da translação, como no da rotação. A estratégia exploratória explicitada nos permite analisar os distintos perfis de candidatos, a saber: aqueles

¹E-mail: osman@dfe.ufrn.br.

que teoricamente enfrentam o questionário com os conhecimentos que adquiriram antes da sua entrada na universidade, sendo designados, a partir de agora, de *iniciantes*; e os *avançados*, aqueles que passaram por um processo de aprimoramento na universidade através da disciplina de Mecânica Clássica.

A Fig. 1 desse artigo dá suporte ao questionário. Nessa figura, encontra-se representado um corpo rígido na forma de um cilindro em dois momentos distintos, chamados de *situação inicial* e *final*. O cilindro em questão, partindo do repouso, rola sem derrapar sobre uma superfície rígida áspera que suavemente vai-se tornando horizontal.

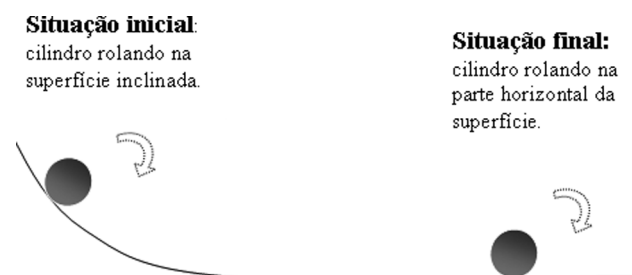


Figura 1 - Dois momentos distintos, *situação inicial* e *final*, de um cilindro rígido rolando sem deslizar sobre uma superfície rígida e áspera.

Nessas duas situações, solicitamos aos estudantes que representassem, na própria figura, as forças que atuavam no cilindro, justificando a presença dessas forças; também foi questionado se a energia mecânica do sistema se conservava. Digno de nota é lembrar que estamos dentro do contexto teórico usual em que se consideram os objetos em contato como indeformáveis. Tal procedimento permite tratar nossa questão dentro da teoria utilizada em obras básicas de cursos introdutórios, Refs. [13-17], afastando-nos das discussões mais elaboradas em que se faz necessário falar de atrito de rolamento.

O desempenho comparativo dos dois grupos, *iniciantes* e *avançados*, foram reunidos na Fig. 2.

3. Análise e discussão dos resultados

A análise da Fig. 2 permite concluir que:

- a) A percentagem de acerto do diagrama de forças na *situação inicial* é praticamente a mesma para os dois grupos (histograma 1), resultado pouco esperado para o desempenho dos alunos avançados. Nesse item específico, a disciplina Mecânica Clássica não foi capaz de ampliar a compreensão física dos alunos. Por outro lado, na *situação final*, o grupo mais avançado apresentou melhor desempenho que o grupo de iniciantes (histograma 3). Apesar do melhor desempenho a diferença percentual ainda é pequena;

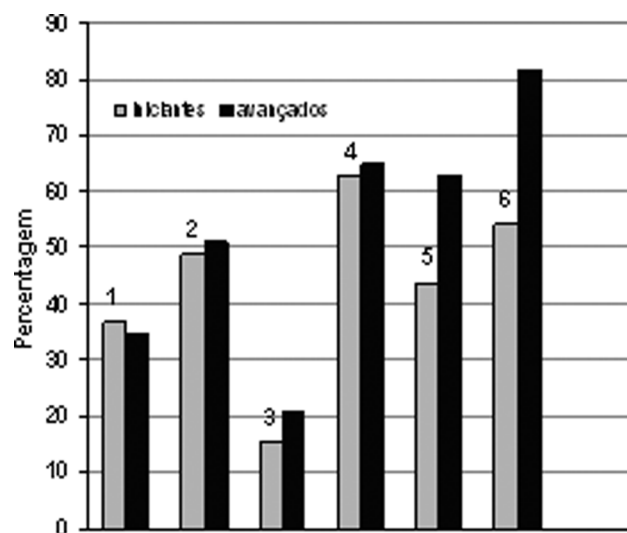


Figura 2 - Panorama do desempenho (em percentagem) dos diferentes grupos de alunos, *iniciantes* e *avançados*. *Histograma 1* - acertos do diagrama de força na *situação inicial* (independentemente da justificativa das forças que foram colocadas); *Histograma 2* - acertos no que diz respeito à força de atrito na *situação inicial*; *Histograma 3* - acertos do diagrama de força na *situação final* independentemente da justificativa; *Histograma 4* - frequência de citação da força de atrito na *situação final*; *Histograma 5* - acertos na conservação da energia; *Histograma 6* - respostas em que a força de atrito aparece como uma força dissipativa.

- b) No que concerne à força de atrito, a percentagem de acerto na *situação inicial* é maior para o grupo avançado (histograma 2). Esse resultado, apesar de ser esperado, é frustrante em face da pequena melhoria que os estudantes tiveram com o curso;
- c) No histograma 4, é semelhante o desempenho dos dois grupos, revelando um elevado número de respostas contendo força de atrito na *situação final*. Aqui talvez haja um problema mais delicado para analisar: *por que os alunos sentem tanta necessidade de dizer que existe uma força de atrito no cilindro quando este se encontra na situação final?* Uma visão mais aprofundada das respostas mostra a possibilidade de que essa necessidade esteja ancorada em resquícios aristotélicos. Em outras palavras, se na visão aristotélica um corpo em translação uniforme precisa da ação de força para manter seu movimento, o análogo rotacional, compatível com esta visão aristotélica, seria que para manter um movimento de rotação uniforme, o corpo precisaria da ação de torque. Como na *situação inicial* uma vez que uma componente do peso estimula o objeto ao movimento é fácil perceber a existência de força de atrito estático agindo no corpo. Provavelmente os estudantes sentiram desconforto em não colocar a força de atrito na *situação final*, pois, via de regra, eles fazem uma forte associação entre o atrito e superfície áspera. Sendo assim, essa força de atrito realizaria o torque desejado para a explicação desses alunos.

Se assim for, essa percepção aristotélica não foi praticamente modificada pelo curso de Mecânica Clássica;

- d) O histograma 5 nos traz um desempenho esperado, ou seja, um melhor nível de respostas para a turma avançada, demonstrando certo grau de compreensão no que diz respeito à conservação da energia mecânica total do sistema. Esse resultado nos faz crer que os alunos adquiriram uma maior compreensão da lei de conservação da energia após a disciplina de Mecânica Clássica; no entanto, o histograma 6 mostra esses alunos avançados errando mais ao afirmarem que a força de atrito, no caso analisado, é dissipativa.

Como entender esse desempenho?

Tal resultado inesperado fatalmente nos remete à possibilidade dos alunos terem recebido, durante a disciplina que teoricamente lhes dariam uma formação mais sólida, algum tipo de informação equivocada.

Considerando-se que a base de dados foi construída com estudantes que tiveram aulas com diferentes professores, é natural que se procure a origem desse desempenho como sido originada a partir de distorções conceituais ou imprecisões contidas nos livros, Refs. [13-17], normalmente adotados, quer como livros-textos ou livros de consultas. Nesse conjunto de livros mencionados, foi feita uma pesquisa tentando-se encontrar comentários que pudessem conter a idéia de que a força de atrito, sem restrições, é dissipativa.

Os trechos abaixo foram extraídos respectivamente das Refs. [13-17], a saber:

- “A força de *atrito cinético* e a força de arrasto são forças dissipativas” [13, p. 182; grifamos].

Observe que esse autor ressalta corretamente que é o atrito cinético;

- “A força de atrito é um exemplo de força não-conservativa” [14, p. 290].

Essa afirmação, isoladamente, não está correta, uma vez que passa a idéia de que qualquer força de atrito (inclusive o atrito estático) é capaz de diminuir a energia mecânica do sistema. Embora o contexto em que o autor coloca essa frase nos permite identificar facilmente que se trata do atrito cinético, por questão de precisão, caberia re-escrever a afirmativa adicionando a palavra *cinético*.

- “Freqüentemente encontramos forças na natureza que não são conservativas. *Um exemplo é o atrito*” [15, p. 216; grifamos].

Qual atrito? O atrito estático não é capaz de fazer variar a energia mecânica do sistema. Mais uma

vez não é dito o tipo de força de atrito, embora o contexto possa levar o leitor mais atento a observar que se trata da força de atrito cinético. De qualquer forma, expressões com esse conteúdo podem contribuir para formar uma idéia de que o atrito é sempre dissipativo, mesmo o atrito estático.

- “Considere o caso geral em que *uma partícula* está sob a ação de uma variedade de forças, uma das quais (*força de atrito*) é dissipativa, enquanto as outras são conservativas” [16, p. 148; grifamos].

Nessa frase, existe a afirmação que leva o leitor a concluir, independentemente do tipo de atrito, que essa força é dissipativa. Percebe-se, também, que é aplicado de forma incorreta o conceito de força de atrito para *uma partícula* [18].

- “O fato, entretanto, é que dispomos: somente as forças que de alguma forma envolvam atrito são não-conservativas. *Sempre que forças de atrito atuam sobre um sistema, a sua energia mecânica tende a diminuir*. Por essa razão as *forças de atrito* são também denominadas *forças dissipativas*” [17, p. 95; grifamos].

Observemos que, nessa seção em que o autor trata da conservação de energia, a afirmação de que toda força de atrito é dissipativa vai totalmente de encontro com soluções de problemas dinâmicos, como rolamento de corpos rígidos sem deslizamento onde se pode mostrar que a energia mecânica do sistema não é afetada, visto que o atrito estático não é capaz de realizar trabalho [19-20].

O conjunto dessas informações sinaliza para a possibilidade de ter sido repassado de forma direta (através da leitura dos textos) ou indireta (através de algum tipo de descuido na linguagem dos seus professores) a mensagem que *sempre que existir força de atrito, haverá dissipação de energia mecânica*. A análise da Fig.2 forneceu elementos para, através de entrevistas isoladas com os estudantes, ampliar a compreensão dos possíveis conflitos conceituais existentes. A estratégia adotada nessas entrevistas foi de, a partir das respostas fornecidas pelos entrevistados, gerar desconforto cognitivo capaz de impulsioná-los à reflexão sobre o conteúdo de suas respostas. Um diálogo típico está representado através das falas dos personagens Professor e Aluno, que descreveremos a seguir:

Professor – Por que você acredita que existe força de atrito na situação final ilustrada no nosso questionário?

Aluno – Porque a superfície é áspera.

Professor – Nesse caso, para onde aponta essa força de atrito?

Aluno – Para trás, como na situação inicial, ou seja, no sentido capaz de fazê-lo rolar.

Professor – Se essa sua afirmação está correta, você não esperaria que o objeto acelerasse? Não haveria existência de um torque resultante em relação ao centro de massa, que provocaria uma aceleração angular dada pela lei da rotação, $\tau_{ext} = I_{cm} \alpha$. Isto faria com que o objeto aumentasse indefinidamente sua velocidade angular, não? Seria possível ganhar energia do nada? Por outro lado, o que você teria a me dizer se em vez de analisar essa dificuldade colocada do ponto de vista da segunda lei para rotação, você pensasse em termos da translação? Na segunda lei de Newton, aplicada à translação do centro de massa, tem-se $\mathbf{F}_{ext} = m \mathbf{a}_{CM}$, onde m está designando a massa do cilindro e \mathbf{a}_{CM} a aceleração do centro de massa. Observe que a força resultante que você está dizendo existir é a força de atrito e ela está apontando de forma a frear o centro de massa, não? Você não acha que essa forma de pensar parece levar a uma conclusão oposta à anterior?

Aluno – Bem, nesse caso o atrito deve existir, afinal a superfície é áspera, mas aponta no sentido contrário ao que eu havia dito.

Professor – Façamos novamente a análise em termos das leis do movimento da rotação em torno do centro de massa do cilindro e da translação do centro de massa, certo? Se a força de atrito é como você agora está dizendo, haveria um torque freando a rotação? Assim, o cilindro pararia, certo? Mas, o que diz a segunda lei da translação? A força resultante que você agora obteve não está no sentido do movimento do centro de massa? O centro de massa não estaria acelerando e, portanto, com uma velocidade aumentando constantemente?

Isso não conflita com sua análise rotacional baseada na expressão $\tau_{ext} = I_{cm} \alpha$?

Aluno – Então, a força de atrito só pode ser nula!

Professor – Mas antes, na situação inicial, ela não era diferente de zero? Por que ela mudou de valor? Essa força de atrito é a de atrito estático, não?

Aluno – Sim, uma vez que o objeto não está derrapando na superfície temos a força de atrito estático.

Professor – Observe que, na situação inicial, ela surgiu devido ao estímulo da componente tangencial da força peso. A força de atrito estático é uma resposta a esse

estímulo na tentativa de fazer o objeto escorregar. Veja que na horizontal (situação final) não existe mais esse estímulo.

Aluno – Então, por que o corpo continua a rolar?

Professor – Ele continua a rolar com velocidade angular constante, pois só é necessário torque para modificar essa velocidade e não para mantê-la. Na verdade o momento angular que o objeto adquiriu na descida está apenas se mantendo. Você lembra as discussões sobre a visão aristotélica a respeito do movimento? Percebe alguma analogia com o que foi aqui exposto?

Esse diálogo, construído a partir das entrevistas feitas com parte dos alunos, reflete nuances do nível de dificuldades conceituais que os estudantes enfrentaram para responder ao questionário.

4. Comentários finais

À primeira vista, da análise e discussões dos resultados oriundos da Fig. 2, bem como das entrevistas realizadas, poderíamos ser tentados a questionar a eficiência da disciplina Mecânica Clássica nesse processo de construção do saber. Observemos, entretanto, que:

- Os questionários foram respondidos de forma anônima.
- A motivação de alunos que já foram aprovados na disciplina de Mecânica Clássica para responder o questionário pode não ser a mesma daqueles que ainda estão submetidos a esse curso.
- Um questionário com as características encontradas nesse estudo exploratório, não tendo a abrangência dos conteúdos vistos na disciplina de Mecânica Clássica, poderia, no máximo, detectar conflitos conceituais e/ou falhas na forma de apresentação dos conteúdos em determinados pontos.

Diante dessas observações, não parece legítimo estabelecer julgamento de valor da eficiência dessa disciplina na formação acadêmica dos nossos alunos. Apesar dessa ressalva, fazem-se presentes nesse estudo dois aspectos significativos, a saber:

- resquícios de pensamento aristotélico associados à rotação;
- possibilidade de vícios de linguagem ou mesmo distorções conceituais nos textos acadêmicos. A força de atrito sendo tratada de forma indistinta como uma força dissipativa, direta ou indiretamente, vem a interferir na compreensão das situações físicas envolvendo a força de atrito estático.

- a estratégia adotada nas entrevistas, capaz de gerar desconforto cognitivo, certamente pode servir de auxílio em sala de aula para estimular os alunos à reflexão sobre o conteúdo aqui apresentado.

Referências

- [1] A.B. Champagne, L. Klopfer and J.H. Anderson, *American Journal of Physics* **48**, 1074 (1980).
- [2] J. Clement, *American Journal of Physics* **50**, 66 (1982).
- [3] L. Viennot, *European Journal of Science Education* **1**, 205 (1979).
- [4] M. McCloskey, A. Caramazza and B. Green, *Science* **210**, 4474 (1980).
- [5] M. McCloskey, in *Mental Models*, edited by D. Gentner and A. Stevens (Lawrence Erlbaum Associates Publishers, London, 1983).
- [6] L.C. McDermott, *Physics Today* **37**, 24 (1984).
- [7] L.O. Peduzzi, A. Zylbersztajn e M.A. Moreira, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **14**, 139 (1992).
- [8] R. Whitaker, *American Journal of Physics* **51**, 352, (1983).
- [9] A. Villani, J.L.A. Pacca, R.I. Kishinami e Y. Hosoume, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **4**, 23 (1982).
- [10] A.A. diSessa, *Cognitive Science* **6**, 37 (1982).
- [11] M. McCloskey, *Scientific American* **248**, 122 (1983).
- [12] H. Caldas e M.E. Magalhães, *Cad. Cat. Ens. Fís.* **17**, 257 (2000).
- [13] D. Halliday, R. Resnick e J. Walker, *Fundamentos de Física* (Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., Rio de Janeiro, 2009), v. 1.
- [14] R. Resnick, D. Halliday. e K. S. Krane, *Física 1* (Livros Técnicos e Científicos Editora, Rio de Janeiro, 2003).
- [15] M. Alonso e E.J. Finn, *Física Um Curso Universitário* (Editora Edgard Blücher Ltda, São Paulo, 1972), v. 1.
- [16] D. Halliday e R. Resnick, *Fundamentos de Física* (Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda, Rio de Janeiro, 1988), v. 1.
- [17] A. Chaves, *Física* (Reichmann & Affonso Editores, Rio de Janeiro, 2000), v. 1.
- [18] O.R. Nelson e R. Carneiro Filho, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **33**, 2308 (2011).
- [19] H.M. Nussenzveig, *Curso de Física Básica 1 - Mecânica* (Editora Edgard Blücher Ltda, São Paulo, 1981), v. 1.
- [20] W.P. Silva, C.M.D.P.S. Silva, J.W. Precker, D.D.P. Silva e I.B. Soares, C.D.P.S. Silva, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **25**, 378 (2003).