

A FÍSICA NEWTONIANA É DE NEWTON?

NEWTONIAN PHYSICS IS FROM NEWTON?

Renata da Silva Trintin

Mestranda no Programa de Pós-graduação em Educação para a Ciência e a Matemática
(PCM) da Universidade Estadual de Maringá (UEM)
renatatrintin@gmail.com.

Luciano Carvalhais Gomes

Doutor em Educação para a Ciência e a Matemática pela Universidade Estadual de Maringá
(UEM), Professor Adjunto do Departamento de Física e do Programa de Pós-Graduação em
Educação para a Ciência e a Matemática (PCM) da Universidade Estadual de Maringá (UEM)
lcgomes2@uem.br.

Resumo

As conhecidas três Leis de Newton são derivadas das concepções expostas em seu Livro 1 do *Principia*, porém, a ordem estabelecida nele é, primeiramente definições e depois os axiomas ou leis do movimento. Essa organização esclarece que há diferença entre definição e lei, ou axioma. O livro expõe as definições de alguns tipos de força e não uma única definição como é adotada a Segunda Lei de Newton. O trabalho destina-se, por meio de uma pesquisa bibliográfica, a apresentação mais fiel das concepções de Newton sobre força e suas considerações com relação a inércia. Essas concepções divergem das apresentadas pelos livros didáticos e necessitam da cautela dos professores de Física, principalmente quando há exposição que o conhecimento é produzido e finalizado por uma pessoa isolada de contexto.

Palavras-chave: Leis de Newton, Ensino de Ciências, História das Ciências.

Abstract

As Newton's three Laws are known are derived from the conceptions set forth in his Book 1 of *Principia*, but a definite order, an instant and then the axioms or laws of motion. This organization clarifies that there is a difference between definition and law, or axiom. The book exposes how available some types of force and not a single definition as adopted by Newton's Second Law. The work is intended, through a bibliographical research, a more faithful presentation of Newton's conceptions of force and its considerations regarding inertia. These conceptions diverge from those presented in textbooks and require the caution of physics teachers, especially when there is a knowledge that is published and finalized by a person isolated from context.

Keywords: Newton's Laws, Science Teaching, History of Science.

1. FÍSICA NEWTONIANA

A publicação dos *Principia* de Isaac Newton, em 1687, foi um dos acontecimentos mais notáveis de toda a história da física. Nessa obra encontramos o clímax de milhares de anos de esforços para compreender o sistema de mundo, os princípios da força e do movimento e a física dos corpos em movimento através de meios diferentes. É um testemunho significativo do gênio científico de Newton o facto de, embora a física dos *Principia* tenha sido alterada, aperfeiçoada, e até contestada, ainda solucionamos hoje muitos problemas de mecânica celeste e de física dos corpos comuns procedendo, no essencial, como Newton fez a cerca de 300 anos [...] (COHEN, 1988, p. 185).

Antes de apresentarmos as leis do movimento vamos seguir a ordem estabelecida por Newton no Livro I do *Principia* iniciando com as definições. Na Definição I, a quantidade de matéria é apresentada como o produto da densidade pelo volume e assim não dependeria do lugar que fosse analisada, ela teria sempre o mesmo valor. Porém, a própria definição de densidade é passível de discussão. No apêndice histórico e explicativo, Florian Cajori (*apud* NEWTON, 1990) e Sapunaru (2006) explicam que houve divergência na interpretação do que Newton acreditava sobre o assunto quando expõem que Ernst Mach (1838-1916) criticou a Definição I por definir a quantidade de matéria relacionada ao produto da densidade e do volume enquanto a densidade é que tem a definição sendo massa de volume unitário. Mas, Crew argumenta que, diferente da concepção atual, o tratamento de densidade era sinônimo de gravidade específica e que a densidade da água era estipulada unitária na época de Newton, colocando assim, a densidade como unidade fundamental e consequentemente lógico a possibilidade de definir massa usando densidade.

Na explicação da Definição I, Newton (1990) não estabelece explicitamente que há diferenças entre os conceitos de massa e peso, porém, estabelece uma relação de proporcionalidade entre eles quando diz que a massa “[...] é conhecida através do peso de cada corpo, pois é proporcional ao peso, como descobri com experimentos com pêndulos [...]” (NEWTON, 1990, p. 1). A explícita diferenciação só será estabelecida no século seguinte por outros cientistas.

Na Definição II, a quantidade de movimento é definida como o produto da velocidade pela quantidade de matéria (ou massa). Essa quantidade de movimento pode ser entendida como o termo “movimento” devido a nota explicativa sobre a tradução, ou ainda, *momentum*, da mecânica moderna. Além da quantidade de movimento total de um corpo ser a soma da quantidade de movimento de todas as suas partes (NEWTON, 1990).

O termo força foi exposto, primeiramente, na Definição III. Um tipo de força. A noção de inércia é uma força interna de inatividade que é proporcional ao corpo, justificada por Newton (1990, p.2) devido à “natureza inerte da matéria, um corpo não tem seu estado de repouso ou movimento facilmente alterado”. A visão de uma força inata (*insita*) do corpo foi defendida como, ao mesmo tempo, agente resistente ao movimento e impulsor do mesmo. Assegurando a relatividade do movimento, normalmente ocorreria da seguinte maneira:

a) Resistência:

- a. Quando o corpo está em repouso e uma força externa lhe é imprimida em busca de colocá-lo em movimento, a força interna atua como resistente para manter o repouso do corpo;
- b. Quando o corpo está em movimento e uma força externa lhe é imprimida para tentar colocá-lo em repouso, a força interna atua como um resistente para manter o movimento do corpo.

b) Impulso:

- a. Quando o corpo resiste a força de um segundo corpo, a força interna do primeiro corpo age como impulso para alterar o estado desse segundo corpo.

Na Definição IV há outro tipo de força, a força imprimida ou que é aplicada. A força imprimida está apenas na ação, e não no corpo, e tende a alterar o estado do corpo, seja repouso ou movimento uniforme em linha reta, diferente da força inata, uma vez que esta tende a manter seu estado ou novo estado permanecendo no corpo. Além disso, a ação duraria enquanto durasse essa força exercida diretamente no corpo e agiria como modificadora não somente de estado, mas também, de movimento, ou quantidade de movimento, o que podemos associar com a noção contemporânea de “impulso” devido ao tempo de exercício de uma força em um corpo (SAPUNARU, 2006). A força imprimida pode ser de três tipos: (a) percussão: força de impulso; (b) pressão: força instantânea; e (c) centrípeta: força contínua. Ambas tendem a alterar o movimento, sendo a força (a) de percussão: age em um tempo desprezível; (b) de pressão: age em um tempo muito pequeno; e (c) centrípeta: age continuamente em um dado tempo.

Jammer (2011, p. 159-160) ressalta ainda que:

A definição newtoniana de força imprimida, como aquilo que modificava o estado de repouso ou de movimento uniforme de um corpo relacionou-se de perto com seu princípio metafísico de causalidade. Toda mudança tem de ter uma causa. A mudança do movimento era um efeito; a força imprimida, a causa. Ao falar do caráter efêmero dessa força imprimida, Newton parece ter

recordado o velho ditado escolástico: *Cessante causa cessat e ectus*.

A Definição V trata da força centrípeta que é direcionada para um ponto central de com relação ao movimento de curva. Igual e oposta a força centrífuga, esta é direcionada para o sentido oposto da força centrípeta (SAPUNARU, 2006). Como exemplo, Newton fala dos planetas que são desviados de suas trajetórias retilíneas para ficarem em órbita, ou a pedra em uma funda que posta a girar faz com que a pedra tenda a escapar da mão, mas é resistida devido a força centrípeta. E seguindo o seguinte raciocínio:

[...] Se uma bola de chumbo arremessada do topo de uma montanha pelo uso de pólvora, com uma dada velocidade e em uma direção paralela ao horizonte, é levada a uma distância de duas milhas em uma linha curva, antes de cair no chão; a mesma bola, se a resistência do ar fosse removida, lançada com o dobro ou décuplo da velocidade, voaria duas vezes ou dez vezes mais longe. Aumentando a velocidade, podemos aumentar arbitrariamente a distância à qual ela poderia ser arremessada, e diminuir a curvatura da linha que ela descreveria, até que finalmente ela cairia a uma distância de 10, 30 ou 90 graus, ou mesmo poderia dar a volta ao redor da Terra antes de cair; ou finalmente, poderia nunca mais cair na Terra, mas iria penetrando nos espaços celestes, e continuaria em seu movimento *in infinitum*. Da mesma forma que um projétil, pela força da gravidade, pode ser forçado a girarem em uma órbita e contornar completamente a Terra, também a Lua, quer pela força da gravidade, se ela for dotada de gravidade, ou por qualquer outra força, que a impulsione para a Terra, pode ser continuamente desviada em direção à Terra, para fora do caminho retilíneo que, pela sua força inata, ela perseguiria; e seria forçada a girar na órbita que agora descreve [...] (NEWTON, 1990, p. 4).

Newton (1990) faz uma extrapolação na comparação de um projétil lançado paralelamente ao horizonte para explicar como a Lua pode estar girando ao redor da Terra segundo o efeito que a força centrípeta causa, e conclui em seu Livro III do *Principia* quando trata da gravitação. E na sequência, Newton (1990), descreve três tipos de medidas de quantidades para qualquer força centrípeta: (a) quantidade absoluta; (b) quantidade acelerativa e (c) quantidade motora; respectivamente nas Definições VI, VII e VIII.

Para exemplificar, Sapunarú (2006) e Jammer (2011) retratam as semelhanças com a concepção moderna de “campo” uniformemente difundido no entorno da causa desse campo e que tende para o centro. Para a (a) quantidade absoluta seria como a força do “campo”, sua fonte de força, ou seja, a “eficácia da causa” dita na Definição VI. Assim como o Sol para a gravidade e a carga para a eletrostática. Já a (b) quantidade acelerativa seria a própria aceleração do corpo. E a (c) quantidade motora é a ação no corpo. No caso da gravidade, a quantidade motora da força centrípeta em um corpo é o seu peso e em uma carga, para a eletrostática, é sua força elétrica.

Após a apresentação dessas oito definições que, de modo geral, tratam de diversas forças, segundo Newton, que possuem uma caracterização quantitativa da força que estudamos atualmente no Ensino Médio e que trata dos movimentos unindo os corpos celestes e terrestres, constituem as bases para a construção lógica que se segue no *Principia* precedendo as famosas leis de Newton. A saber, os três axiomas ou as três leis que Newton (1990) apresenta são:

Lei I: Todo corpo continua em seu estado de repouso ou de movimento uniforme em uma linha reta, a menos que ele seja forçado a mudar aquele estado por forças imprimidas sobre ele (NEWTON, 1990, p. 15).

Lei II: A mudança de movimento é proporcional à força motora imprimida, e é produzida na direção da linha reta na qual aquela força é imprimida (NEWTON, 1990, p. 15-16).

Lei III: A toda ação há sempre oposta uma reação igual, ou, as ações mútuas de dois corpos um sobre o outro são sempre iguais e dirigidas a partes opostas (NEWTON, 1990, p. 16).

Apesar dessa definição da Lei I ser o que reconhecemos como “Lei da Inércia” ou “Primeira Lei do Movimento”, Newton, anteriormente, usou a *vis insita*, força inata da matéria, para enuncia-la. A referência a uma força intrínseca a matéria para justificar uma natureza inerte sempre foi mantida, visto que é explicitada na Definição III. Barra (1994) menciona que a modificação posterior da Lei I retirando a menção à *vis insita* não levou a interpretação da concepção de Newton como mais próxima a concepção de Descartes. A dupla interpretação de resistência e impulso da *vis insita* faz com que esta segunda interpretação recaia na definição de força imprimida estabelecida na Definição IV, o que não está exposto na Lei I.

Nos termos modernos há interpretações que tratam da Lei II, Segunda Lei ou Lei Fundamental da Dinâmica, como a definição da força de Newton, porém, o *Principia* está organizado de maneira que há uma distinção clara entre as definições e os axiomas (ou leis de movimento). Portanto, Newton não compreendia a referida Lei como a definição de força, uma vez que essa era obtida a priori e convém à analogia da força muscular intuitivamente (JAMMER, 2011). Além de que se analisarmos a interpretação das definições em conjunto com a Segunda Lei como uma noção quantitativa da força, podemos construir uma exposição matemática em termos modernos.

Primeiro estipulamos o movimento ou, como já comentado, a quantidade de movimento apresentado na Definição II como o produto da quantidade de matéria (ou massa) da Definição I pela velocidade (mv) e como há a proporcionalidade da variação desse termo com a força imprimida (F), então

$$F \propto \Delta(mv) \quad (3)$$

Como não há menção ao intervalo de tempo na aplicação dessa força imprimida a equação moderna de força igual a taxa de variação da quantidade de movimento em relação ao tempo não se aplica. Barra (1994) explica que a Segunda Lei omite o tempo devido a intenção de se referir apenas para as forças imediatas como impulsos, dado o contexto de estudos sobre as colisões e impactos. Porém, Jammer (2011, p. 164) diz que “o estudo das leis de impactos dos corpos sólidos pode ter levado Newton a expressar a força como a taxa temporal da variação do momento linear [...]”.

Porém, as forças contínuas são tratadas como as forças centrípetas nas Definições VI, VII, VIII em termos de quantidades: absoluta, acelerativa e motora, e as forças de pressão que não agem com tempo desprezível. Estas podem ser relacionadas com a variação da “quantidade de movimento” ou até podem ser aplicadas na Segunda Lei devido ao trecho que se encontra na Proposição XXIV, Teorema XIX, do Livro II, do *Principia*, onde Newton (1999 *apud* SAPUNARU, 2006, p. 148) diz:

A velocidade que uma dada força pode gerar num dado tempo numa dada quantidade de matéria está para a força e para o tempo diretamente e para a matéria inversamente. Quanto maior for a força, ou quanto maior for o tempo [de duração da força sobre a massa], ou quanto menor for a matéria, maior a velocidade que será gerada. Isto será expresso a partir da segunda lei do movimento.

Em termos matemáticos, a velocidade (v) deve agir em uma quantidade de matéria (m) e será inversamente proporcional a ela, além de ser proporcional a força (F) e ao tempo de duração dessa força (Δt)

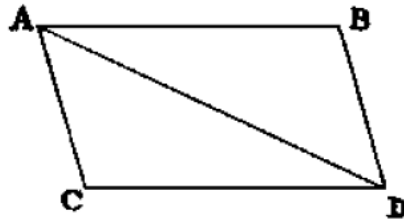
$$v \propto \frac{F\Delta t}{m} \quad (4)$$

Sapunaru (2006) explica, segundo as análises de Cohen sobre Newton, que este último objetivava dar ênfase na relação entre as forças de percussão e pressão, que não expressavam tempo significativo, com a variação da quantidade de movimento. E não havia tanta preocupação de Newton sobre essa distinção das forças com relação a Segunda Lei devido a citada ênfase não prejudicar sua aplicabilidade nas forças contínuas, uma vez que se incluísse o tempo, recairíamos na Definição VIII.

Cabe aqui a apresentação da noção de composição de forças como grandezas vetoriais, como modernamente há o tratamento. O Corolário I, do Volume I, ou Teorema do Paralelogramo de forças diz que “Um corpo, submetido a duas forças simultaneamente,

descreverá a diagonal do paralelogramo no mesmo tempo que descreveria os lados, sob estas forças separadamente” (NEWTON, 1990, p. 17).

Figura 1: Representação do paralelogramo composto pelo conjunto de forças que levam um corpo de A até D.



Fonte: Newton (1990, p. 17).

Se um corpo estiver no ponto A e sofrer a ação da força imprimida que o leve até o ponto B e, ao mesmo tempo, sofra a ação de uma segunda força que o leve ao ponto C, como poderia o corpo percorrer o trajeto AB e AC ao mesmo tempo? Ou melhor, Qual trajeto seria o mais adequado? Newton responde com a nítida influência de composição de movimentos gerados de impulsos diferentes de Descartes, que “[...] por ambas as forças agindo juntas, o corpo será levado, no mesmo tempo, na diagonal de A para D [...]” (NEWTON, 1990, p. 17). Diferente das forças contínuas como a gravidade que sugerem influência de Galileu para conclusão do trajeto parabólico.

No Corolário I apresentando a cima foi reforçada a aplicabilidade da Segunda Lei para as forças de impulsos sem a consideração de tempo. Porém, há possibilidade de Newton ter considerado as forças contínuas como uma série de impulsos consecutivos com uma enorme frequência. Assim, podemos compreender a força de impulso como “gradual e sucessivamente”. Apesar de Newton não ter exposto a passagem do impulso para algo contínuo, mas, escreve no Escólio das Leis do Movimento que

Quando um corpo está caindo, a força uniforme da sua gravidade, agindo igualmente, imprime em intervalos de tempos iguais, forças iguais sobre aquele corpo, e, portanto, gera velocidades iguais; e no tempo total, imprime uma força total e gera uma velocidade total proporcional ao tempo (NEWTON, 1990, p. 24).

Essa uniformidade da ação da gravidade com forças iguais em tempos iguais que age no corpo em queda pode ser interpretada como uma sequência de impulsos quando as forças são tão fragmentadas em tempos tão pequenos que possam tender a valores muito próximos de zero, ou ainda, como no tratamento moderno, em termos infinitesimais. Então, para cada tempo

infinitesimal há a ação da gravidade como instantânea, igual a força de impulso, imprimida, da Segunda Lei¹.

Já para a Terceira Lei, Sapunaru (2006) introduziu-a comentando que segundo Mach a referida Lei diferenciava-se da Primeira e da Segunda, nas quais havia vestígios, ou escritos explícitos, com a influência de Descartes e Galileu. Dizia que a Terceira Lei foi considerada como a ideia mais original e o mais importante trabalho de Newton. Apesar de Cohen comentar sobre as possíveis influências dos experimentos, mesmo que mentais, de Descartes.

Após o enunciado da Terceira Lei, Newton esclarece-a com o seguinte texto:

Seja o que for que puxe ou empurre alguma coisa, é da mesma forma, puxado ou empurrado por ela. Se você empurra uma pedra com seu dedo, o dedo é também empurrado pela pedra. Se um cavalo puxa uma pedra amarrada a uma corda, o cavalo (se posso dizer assim) vai ser igualmente puxado de volta na direção da pedra, pois a corda distendida, pela mesma tendência a relaxar ou distorcer-se, puxará o cavalo na direção da pedra [...]. Se um corpo choca-se com outro, e pela sua força muda o movimento desse, aquele corpo também (por causa da igualdade da pressão mútua) sofrerá uma mudança igual no seu próprio movimento, em direção à parte contrária. As mudanças feitas por essas ações são iguais não nas velocidades, mas nos movimentos dos corpos, quer dizer, se os corpos não são obstruídos por quaisquer outros impedimentos. Pois, porque os movimentos são igualmente alterados, as mudanças de velocidades feitas em direções a partes contrárias são inversamente proporcionais aos corpos. Essa lei também ocorre em atrações, como será provado no próximo Escólio (NEWTON, 1990, p. 16).

Então, se um corpo A exercer uma força F_A em um corpo B, o corpo B deve exercer também uma força igual, mas contrária, F_B no corpo A. Ressaltamos que a descrição está dividida em duas partes, a primeira que trata de forças de contato e a segunda das atrações, isto é, “forças que agem a distância”, seja lá qual for a causa.

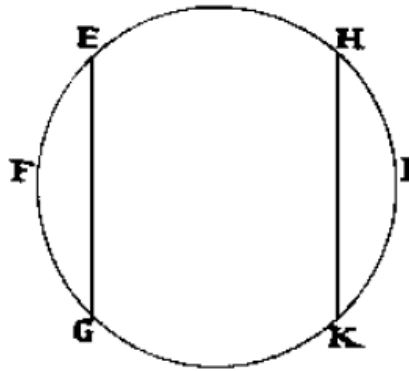
A “prova” da Terceira Lei está no Escólio com citado. Para as forças que necessitam de contato como as de percussão, Newton refaz os experimentos de Wren de pêndulos diversos colidindo e diz que “[...] pela teoria de Wren e Huygens, corpos absolutamente duros retornam logo após o choque com a mesma velocidade com que se encontraram [...]” (NEWTON, 1990, p. 27). E ainda discute que essa conclusão só se refere aos corpos perfeitamente elásticos, porque nos corpos que não são perfeitamente elásticos deve se perceber uma velocidade e uma força elástica menor. Após suas considerações dos experimentos e com o uso da geometria,

¹ Essa sucessão de ações pode ser discutida, também, quando Newton apresenta os Lemas II, III e IV. Há aproximações de curvas com diversas porções de seguimentos retilíneos. Veja mais em Barra (1994).

Newton (1990, p. 28) conclui que, “[...] a Terceira Lei, na medida em que se refere a percussões e reflexões, está provada por uma teoria que concorda exatamente com a experiência”.

Concluído a primeira parte descrita da Terceira Lei, resta tratar da Terceira Lei para as “atrações”. Destas, Newton (1990) argumenta sobre dois casos. No primeiro ele supõe um obstáculo entre dois corpos que se atraem. Ambos corpos devem igualmente se atrair e, ainda, pressionar o obstáculo igualmente. Caso contrário, se, por exemplo, o corpo A atraísse mais do que o corpo B haveria uma alteração no sistema cuja movimentação do corpo B, que seria mais atraído, em direção ao corpo A violaria a Primeira Lei, as atrações internas do sistema agiriam como forças imprimidas. No segundo caso, Newton aborda a gravitação entre a Terra e suas partes como uma ação mútua seguindo a representação da Terra como na figura abaixo:

Figura 2: Representação da Terra como a esfera FI e cortada pelos planos EG e HK.



Fonte: Newton (1990, p. 29).

A hipótese é de que se cortasse a esfera no plano EG, as partes EFG e EGI se atrairão mutuamente. Para tanto, divide-se a parte EGI pelo plano HK e claramente a parte central EGKH, já que HKI é igual a EFG, então, permanecerá em repouso já que não tenderá para nenhum dos lados. Somente a parte HKI pressionará a parte central em direção a terceira parte. Logo, o “peso” que pressiona EFG, o da parte EGI, é o mesmo peso de HKI, concluindo que os pesos de EFG e EGI são iguais, se atraem mutuamente com pesos iguais um em direção ao outro (NEWTON, 1990).

2. CONSIDERAÇÕES

Por mais que houve a superação de muitas concepções de força e movimento ao longo da história na busca pela causa do movimento as considerações de Newton ainda carregaram concepções que a comunidade científica atualmente trata como superadas. Assim como a noção de força como uma propriedade intrínseca do corpo, ou um *impetus* medieval.

Segundo Neves (2000), os livros didáticos propagam as noções de força cronologicamente anteriores a Newton como erradas e até absurdas, além de considerar as concepções de Newton como as estruturadas pelos seus predecessores ou seus críticos póstumos (Bernoulli, Euler, Mach, Kirchhoff, Hertz, etc.). E, apesar das pesquisas no Ensino de Ciências apontarem uma proximidade de concepções dos alunos com as dos filósofos e cientistas ao longo história, o Ensino de Ciências não mudou (NEVES, 2000).

A exposição aqui feita corresponde como um auxílio no entendimento da História da Ciência e propõe uma visão de natureza da ciência que não é propagada pelos livros didáticos. Ressaltamos a importância desse conteúdo devido a sua construção lógica e teórica que se destaca como um marco no desenvolvimento científico, mesmo que a concepção não corresponda as dos dias atuais, e principalmente por isso, uma vez que o pressuposto assumido pelos autores é a ciência como não linear para combater o ensino dogmatizador e desprovido de contexto histórico.

REFERÊNCIAS

BARRA, E. S. O. **Omnis Philosophiæ Difficultas**: o conceito de força na filosofia natural de Newton. São Paulo, 1994. 193 f. Dissertação (Mestrado em Filosofia) – Faculdade de Filosofia, Ciências Humanas e Letras, Universidade de São Paulo, 1994.

COHEN, B. **Nascimento de uma nova física**. Lisboa: Gradiva, 1988.

JAMMER, M. **Conceitos de força**: estudo sobre os fundamentos da dinâmica. Tradução: Vera Ribeiro. Revisão técnica: Waldemar Monteiro da Silva Junior. Tradução das passagens em latim: Antônio Mattoso. Rio de Janeiro: Contraponto: Ed. PUC-Rio, 2011.

NEVES, M. C. D. Uma investigação sobre a natureza do movimento ou sobre uma história para a noção do conceito de força. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 22, n. 4, dez. 2000. Disponível em: <http://www.sbfisica.org.br/rbef/pdf/v22_543.pdf>. Acesso em: 12 de abr. 2017.

NEWTON, I. **Princípios**: princípios matemáticos de filosofia natural. Tradução: Trieste Ricci, Leonardo Gregory Brunet, Sônia Terezinha Gehring e Maria Helena Curcio Célio. São Paulo: Nova Stella/Edusp, 1990. Livro I: O Movimento dos Corpos.

SAPUNARU, R. A. **O “Estilo Newtoniano”, o espaço, o tempo e o movimento “absolutos”: controvérsias entre cartesianos e newtonianos**. Rio de Janeiro, 2006. 178 f. Dissertação (Mestrado em Filosofia) – Faculdade de Filosofia, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2006. Disponível em: <http://www2.dbd.puc-rio.br/pergamum/biblioteca/php/mostrateses.php?open=1&arqtese=0410642_06_Indice.html>. Acesso em: 27 de abr. 2017.