

LEONARDO DA VINCI DESCOBRIU A VARIAÇÃO DA VELOCIDADE NO TEMPO, MAS NÃO O VALOR APROXIMADO DA ACELERAÇÃO DA GRAVIDADE: CONTESTANDO GHARIB, ROH & NOCA

Leonardo Da Vinci Discovered the Variation of Speed over Time but not the Approximate Value of Gravity Acceleration: Testing Gharib, Roh & Noca

Marcos Cesar Danhoni Neves [mcdneves@uem.br]

Arão Victor Rocha dos Santos [araovictorr@gmail.com]

Gabriel Costa Sartori [physis.sartori@gmail.com]

Gustavo Henrique Sahn [freitaslucas562@gmail.com]

Josie Agatha Parrilha da Silva [japsilva@uepg.br]

Lucas Freitas Bizerra [freitaslucas562@gmail.com]

Maria Clara Giacometti Paulino [mariaclaragiacometti@gmail.com]

Maria Rita Luzan Maraschi [mariarmaraschi@gmail.com]

Milena Cristina Pompilho Ferruzzi [milenaferuzzie@gmail.com]

Muriel Yasmin Jorge [ra123887@uem.br]

Nuria Criado Scarpin [ra112441@uem.br]

Pietro Giuseppe Cargnin Ferreira [pietrogcf@gmail.com]

Rafaela Lavagnoli [ra129978@uem.br]

Raphael Fernandes de Almeida [ra129978@uem.br]

Departamento de Física e PCM - Universidade Estadual de Maringá

Av. Colombo, 579, Maringá-PR, 87020-900

Recebido em: 12/08/2023

Aceito em: 19/11/2023

Resumo

O presente trabalho analisa os estudos de Leonardo da Vinci sobre o movimento de queda dos corpos, especialmente um deles presente no *Codex Arundel*. Segundo Leonardo, os corpos caem de acordo com a relação espaço-temporal: " d proporcional a $(t + t^2)/2$ " (Olenick, Apostol & Goodstein, 1989). Estudos mais recentes mencionam que Leonardo da Vinci teria desenvolvido um raciocínio geométrico que o levaria a obter um valor de aceleração da gravidade próximo a $9,8 \text{ m/s}^2$, segundo Gharib, Roh & Noca (2023). No entanto, cálculos geométricos realizados no presente artigo, com base nas próprias observações de Leonardo, demonstram que sua teoria resulta em uma queda menos acelerada, com um valor inferior (cerca da metade) ao aceito atualmente,

Palavras-chaves: Mecânica. Queda dos corpos. Leonardo da Vinci. Aceleração da gravidade. História da Arte-Ciência.

Abstract

The present work analyzes Leonardo da Vinci's studies on the motion of falling bodies, especially one of them in the *Codex Arundel*. According to Leonardo, bodies fall according to the relationship: " d proportional to $(t + t^2)/2$ " (Olenick, Apostol & Goodstein, 1989). More recent studies mention that Leonardo da Vinci developed a geometry that leads to a gravity

acceleration value close to 9.8 m/s^2 , according Gharid, Roh & Noca (2023). However, geometric calculations based on Leonardo's observations demonstrate that his theory results in a less accelerated fall, with a value lower (a half) than the currently accepted one.

Keywords: Mechanics. Falling bodies. Leonardo da Vinci. Gravity acceleration. History of Art-Science.

Introdução

Leonardo da Vinci (1452-1519) destacou-se como um dos maiores pintores do Renascimento, com sua renomada obra “Mona Lisa” (*La Gioconda*) tornando-se um ícone da cultura mundial (GALLUZZI, 2006). No entanto, sua genialidade se estendia muito além do campo da Arte. O intelecto de Da Vinci abrangeu diversos domínios do conhecimento, incluindo engenharia, arquitetura, anatomia, cartografia, astronomia e muito mais. Sem dúvidas, Leonardo foi um dos principais nomes do Renascimento, e sua obra “Homem Vitruviano” transformou-se no símbolo dessa época. Evidente a importância do polímata no avanço de diversas das áreas do conhecimento, mas que infelizmente foram relegadas de uso e estudos nas Universidades daquele período e além, num longuíssimo *intermezzo* de quase 400 anos.

Há cerca de meio milênio, Leonardo embarcou em estudos relacionados ao movimento. De acordo com Gharib, Roh & Noca (2023), Leonardo possuía uma sólida compreensão da distinção entre movimento constante e acelerado, entendendo que o movimento natural de um objeto em queda é inerentemente acelerado. Isso levou Leonardo a realizar uma série de experimentos envolvendo esferas deslizando em planos inclinados, com o objetivo de estabelecer uma relação entre o grau de velocidade de queda de um corpo e a passagem do tempo. Essa abordagem era totalmente nova uma vez que imperava até então (o que perduraria ainda por quase um século ainda) a velha Física aristotélica agravada pela amarra cristã do tomismo, tornando-a ainda mais fortemente paradigmática e difícil de ser desafiada e substituída.

Estudo do movimento

Durante séculos o pensamento aristotélico dominou o entendimento acerca da queda dos corpos. Segundo Aristóteles (384-322 a.C.), todo objeto tem um “lugar natural” para o qual tende a se mover naturalmente para alcançar o seu repouso. Dessa forma, Aristóteles distinguia os objetos em corpos *graves* (pesados - sem o conceito de *Peso*, como temos hoje) e corpos com *leveza* (desprovido de *gravium*, peso). Os corpos pesados, como o próprio planeta Terra, e outros corpos em sua superfície, como rochas, madeira, minerais e animais, por exemplo, pertenciam ao elemento *terra* e *água* e, de forma natural, todo objeto do elemento *terra* tenderia a retornar ao seu “lugar natural”, que é o centro do universo. Logo, diferente da forma como explicamos hoje, não é a Terra que “puxa” os corpos para o seu centro e sim os objetos *pesados* que tendem a voltar para o seu local natural de repouso.

Já os corpos leves como o *fogo* e o *ar* tenderiam a subir naturalmente porque a parte superior do mundo sublunar era o lugar natural destes elementos. Aristóteles ainda afirmava que a velocidade de queda dos corpos pesados era diretamente proporcional ao seu peso e inversamente proporcional à densidade do meio em que se deslocavam. Assim, quando

deixássemos cair dois corpos idênticos de uma mesma altura (por exemplo, duas esferas de chumbo), ambos chegariam ao chão ao mesmo tempo, uma vez que teriam, segundo a lógica do Estagirita, a mesma quantidade de *gravium*. Entretanto, quando soltássemos um corpo com o dobro da massa do segundo corpo, mantendo a mesma altura inicial, o corpo mais pesado chegaria ao chão na metade do tempo do corpo mais leve.

De certa forma, esse pensamento é bem compreensível e ainda permeia a sociedade porque faz parte das experiências cotidianas de um mundo onde fenômenos dissipativos (ALBANESE, NEVES & VICENTINI, 1997) imperam por variantes determinantes como a resistência dos meios ou por atrito estático/cinético (NEVES & SAVI, 2000; NEVES, 2000). É, pois, bastante intuitivo concluir que quanto mais pesado é um corpo tanto mais depressa ele cai (SILVA *et al*, 2023; POLITO, 2015).

Análise de Leonardo da Vinci sobre a queda dos corpos

Em meados do século XV e XVI, Leonardo da Vinci embarcou nos estudos relacionados ao movimento, em especial o movimento de queda dos corpos, segundo Gharib, Roh e Noca (2023) presente no *Codex Arundel* (figura 1). Leonardo já entendia bem a diferença entre movimento constante e movimento acelerado e ainda compreendia que o movimento natural de queda de um corpo é um movimento do tipo acelerado. Era a total oposição à compreensão física de mundo ditada pelos peripatéticos. Portanto, Leonardo decidiu conduzir uma série de experimentos com esferas deslizando sobre planos inclinados a fim de encontrar uma relação entre o grau da velocidade de queda de um corpo e o grau de tempo dispendido. Em outras palavras, quanto a velocidade de um corpo aumentava conforme a passagem inexorável do tempo. Estes experimentos, estima-se, teriam sido conduzidos entre os anos de 1480-1518 (VINCI, 1636).

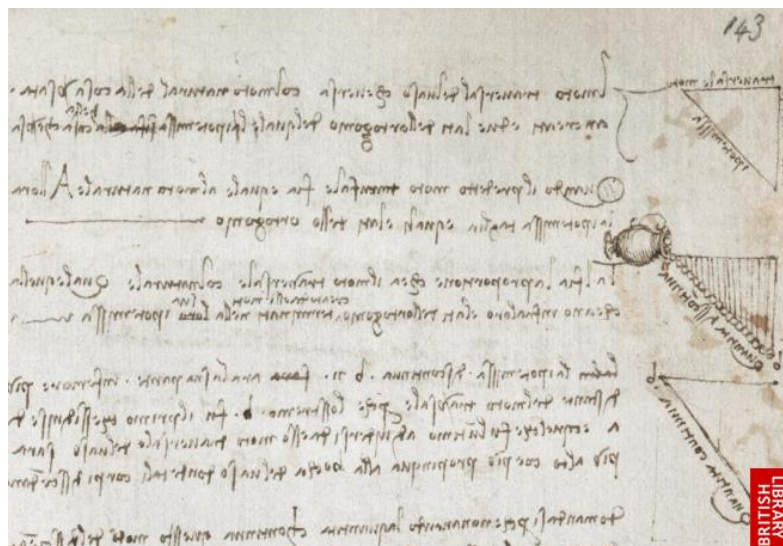


Figura 1. Folha 143 do *Codex Arundel*. Fonte: British Library, VINCI, 1636.

Observando o movimento de uma nuvem que produzia granizo sob fortes ventos, Leonardo supôs que se a compreensão aristotélica acerca do movimento estivesse correta a distância percorrida pela nuvem (na horizontal) deveria ser igual a distância percorrida pelo granizo (na vertical). Para simular esse evento, Da Vinci propôs um experimento mental (figuras 2 a,b,c) com um jarro (com aceleração constante) derramando areia ou água, onde o

jarro simularia o movimento da nuvem enquanto o conteúdo do jarro simularia o granizo (figura 1-b) [VINCI, 1636; GHARIB, ROH & NOCA, 2023].

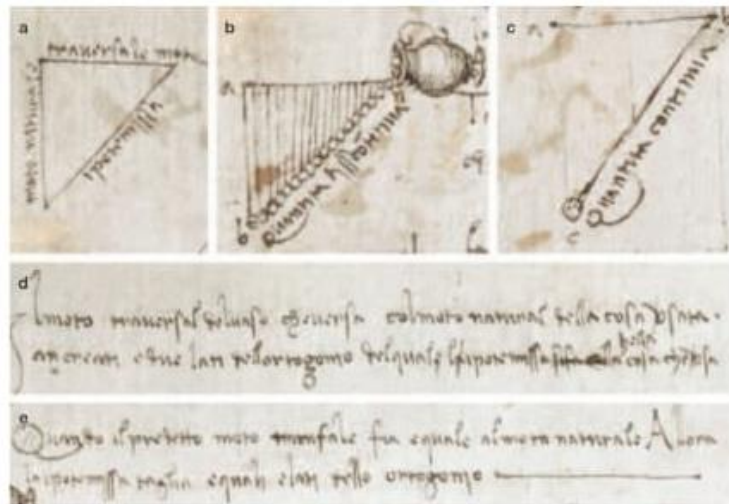


Figura 2 - a) Esboços do experimento proposto por Leonardo Da Vinci sobre a relação entre aceleração e gravidade. b) Experimento de Leonardo usando areia. c) Experimento de Leonardo usando água. d) Notas de Leonardo sobre a formação do triângulo retângulo isósceles. e) Descrições de Leonardo das condições necessárias para o movimento direcionado seja equivalente ao movimento natural.

fonte: GHARIB, ROH & NOCA, 2023.

Traduzindo os textos de Da Vinci (presente no *Codex Arundel*, 1636 - hoje disponível na British Library) presentes nas figuras 2-d e 2-e teríamos:

2-d: O movimento transversal do vaso que derrama, com o movimento natural da substância a ser derramada, criaram os dois lados do triângulo, dos quais a substância vertida é a hipotenusa.

2-e: Quando o referido movimento transversal é igual ao movimento natural, então a hipotenusa corta os lados do triângulo igualmente.

O experimento funcionaria da seguinte maneira: o conteúdo do jarro, ou seja, as gotas d'água (*grani d'acqua*) se movimentam para baixo, no sentido vertical em direção ao centro da Terra, sob ação do “*moto naturale*” (movimento natural), enquanto que o jarro se movimenta ortogonalmente ao eixo vertical, denominado “*moto diretto*” ou movimento direcionado. Segundo Leonardo, quando ele consegue equalizar a aceleração do “*moto naturale*” com a aceleração do jarro, as “partículas” (Galileo diria *grani di acqua*) que caem do jarro se alinhariam formando um triângulo retângulo isósceles (figura 3-b), onde a hipotenusa seria a “*equalizzazione del moto*” ou equalização do movimento.

De acordo com o pensamento de Da Vinci, podemos desenvolver o seguinte, segundo Gharib, Roh & Noca (2023):

$$x = \text{posição horizontal}, v = \text{velocidade de queda} \quad t = \text{tempo de queda}$$

$$z = \text{posição vertical}$$

$$x(t, t_i) = v_{x,0} * (t - t_i) + x_0(t_i) = v_{x,0} * (t - t_i) + v_{x,0} * t_i \quad \text{com} \quad t \geq t_i$$

$$z(t, t_i) = -\frac{1}{2}g(t - t_i)^2 \quad \text{com} \quad t \geq t_i$$

Vale acrescentar que como o Leonardo não dispunha de um relógio ou meios precisos para mensurar o tempo transcorrido, ele precisou supor que todas as partículas, sob a ação do “*moto naturale*” atingiriam o solo num mesmo intervalo de tempo t ; logo, ele poderia usar a altura para marcar o tempo, tanto para o eixo vertical como para o eixo horizontal (VINCI, 1636; GHARIB, ROH & NOCA, 2023). A aproximação que faz os autores Gharib, Roh & Noca (2023) levam, inexoravelmente (e erroneamente), as afirmações de Da Vinci à uma perspectiva de descoberta do valor da aceleração da gravidade de uma forma muito similar a de Galileo Galilei, mas muitos e muitos anos antes do físico de Pisa. O que o artigo mostra, corretamente, é que Da Vinci intuiu a queda acelerada de um corpo em queda livre, de forma contraditória à crença aristotélica de época, onde os corpos graves caíam com velocidades determinadas pelos seus pesos.

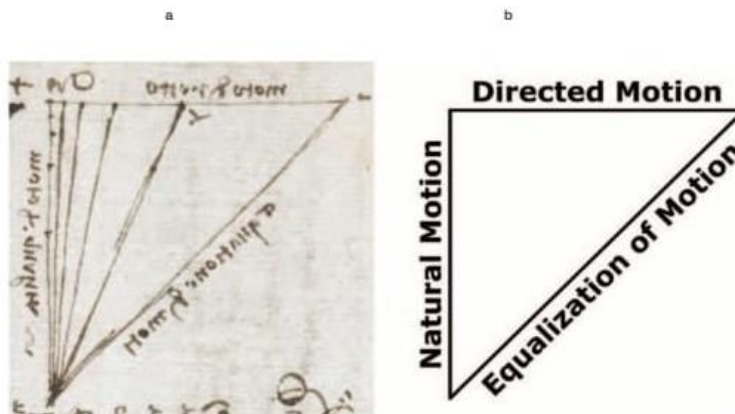


Figura 3 - a) Notas do experimento de Leonardo Da Vinci. b) Triângulo retângulo isósceles formado a partir do experimento do jarro. A tradução da escrita leonardesca na figura seria: MOTO DIRETTO, MOTO NATURALE, EQUALIZAZIONE DEL MOTO (movimento direto, movimento natural e equalização do movimento)

Fonte: GHARIB, ROH & NOCA, 2023.

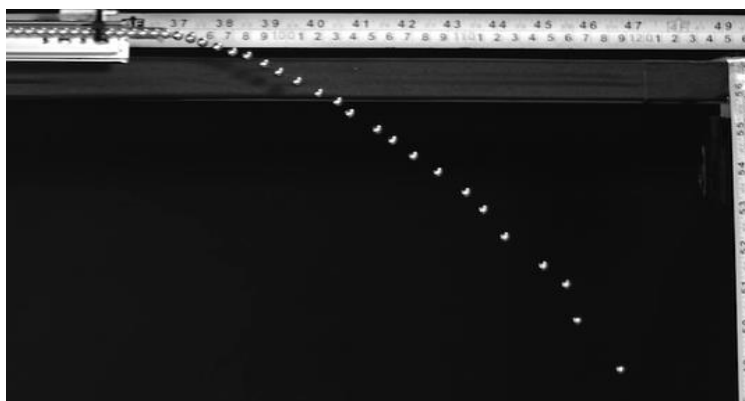


Figura 4 - experimento de queda de um corpo (esferinha de aço) usando a técnica de filmagem estroboscópica.

Fonte: BROAD, 2023

O experimento imaginado por Leonardo assemelha-se, pois, àqueles realizados em laboratórios didáticos de Física hoje, como mostrado na figura 4: a queda de um corpo filmada de forma estroboscópica (RUTHERFORD, HOLTON & WATON, 1979; BROAD, 2023).

Análise de Galileo Galilei sobre a queda dos corpos

Este experimento segue o raciocínio de Galileo Galilei (1564-1642), que seria exposto mais de um século depois da ideia original de Leonardo da Vinci. Galileo provavelmente foi

um dos pensadores mais versáteis em realizar experimentos sistemáticos a fim de descrever matematicamente os fenômenos físicos observados. Em seus estudos sobre cinemática, Galileo realizou uma série de experimentos de Mecânica envolvendo corpos deslizando sobre planos inclinados, pêndulos, etc.

Os experimentos de corpos movendo-se em planos inclinados provavelmente ocorreram não somente por questões arquimedianas, mas, provavelmente, porque Galileo “diluía” o tempo de queda (rolagem da esfera), para poder marcar os tempos despendidos (via *grani di acqua* ou batidas de seu pulso cardíaco). Nesses experimentos ele podia controlar as variáveis para testar todas as possibilidades que poderiam influenciar nos fenômenos, a partir dos experimentos com pêndulos simples (NEVES *et al*, 2008)

Galileo percebeu, ao observar as oscilações de uma massa pendular que, quando o ângulo de soltura era mantido constante, as oscilações dependiam apenas do comprimento do fio e não dependiam da massa utilizada (depois descobre que não dependem, também, da amplitude da oscilação - *isocronismo*). Dessa forma, ele concluiu que o mesmo deveria ser válido para corpos em queda livre ou deslizando sobre planos inclinados em ângulos menores que 90 graus, ou seja, os corpos caem com a mesma aceleração, sendo ela independente da sua massa. Para a descrição geométrica e matemática do movimento acelerado, Galileo usou a sequência dos números ímpares consecutivos, ou seja, na primeira unidade de tempo, o corpo rolava 1 unidade de distância; na segunda, $1 + 3 = 4$ unidades de distância; na terceira, $1 + 3 + 5 = 9$ unidades de distância, e assim por diante. Essa sequência conduz naturalmente a uma relação quadrática em distância d e tempo t : $d = (\text{constante}) \cdot t^2$. Essa *protoequação* é, naturalmente a equação do movimento retilíneo uniformemente variado ($d = d_0 + v_0 \cdot t + a \cdot t^2/2$).

Embora Galileo tenha chegado àquilo que hoje denominamos de equação horária do movimento retilíneo e uniformemente variado, em nenhum momento, ele chegou a propor um valor para a aceleração do corpo e sua extrapolação, no caso da queda livre, para a aceleração da gravidade que hoje sabemos ser em torno de $9,80 \text{ m/s}^2$.

Será somente em 1851 que um físico da Escola de Metz, em Paris, General Jules Morin conseguirá inventar um aparato para o registro da queda acelerada de um corpo em queda livre, de forma direta (sem o subterfúgio da diluição do tempo usando um plano inclinado). O *aparelho de Morin*, ilustrado na figura 5, mostra o esquema de como o aparelho foi idealizado e construído. Num cilindro que gira a velocidade constante (graças ao “motor” que coloca o cilindro em movimento devido à queda vinculada do corpo Q - a constância da velocidade de rotação se dá pelo mecanismo de aletas x e x' - de forma semelhante aos motores de caixinhas musicais) é colado um papel gráfico. Quando o corpo P (que tem uma caneta atrelada a si) cai em queda livre, a parábola da função horária é traçada naturalmente e, do resultado gráfico obtido, é possível calcular o valor da aceleração da gravidade com bastante precisão (CANATTA; NEVES; ALBANESE, 1995).

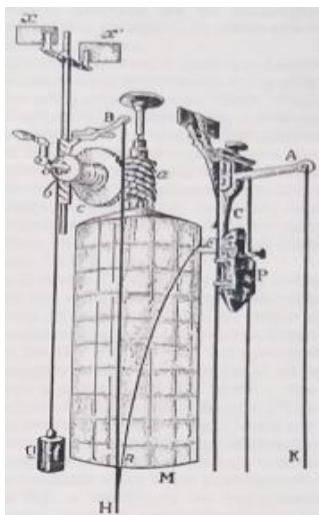


Figura 5. O aparelho de Morin que ajuda a determinar a parábola de um corpo em queda livre e a aceleração da gravidade (CANATTA, NEVES & ALBANESE, 1995).

Resultados de Leonardo da Vinci como aceleração da gravidade

Retornando ao experimento de Leonardo exposto do *Codex Arundel* pelo recente trabalho de Gharib, Roh & Noca (2023), contrapomos o resultado obtido por estes autores citando o trabalho de Olenick, Apostol & Goodstein (1989). Estes três últimos autores citam a concepção que animava a ideia da queda acelerada de um corpo, segundo o pensamento matemático-geométrico de Leonardo. Aparentemente há uma similaridade entre o raciocínio de Da Vinci e aquele de Galileo para a descrição de um corpo em queda. No entanto, a relação fornecida por Da Vinci conduzirá a uma queda menos acelerada e, extrapolando, a um valor menor para a aceleração da gravidade, diferente, portanto, do que concluíram Gharib, Roh & Noca.

A queda acelerada de Leonardo era consideravelmente mais lenta (figura 6 – notar as linhas verticais em vermelho) que a de Galileo Galilei porque aquele imaginara um movimento que fosse descrito pela sequência dos números inteiros consecutivos (diferente, portanto, de Galileo, que descrevia a queda segundo a sequência dos números ímpares, ou ímpares, consecutivos). Na descrição leonardesca, na primeira unidade de tempo decorrido de seu experimento imaginário, o corpo cairia uma unidade de distância; na segunda unidade de tempo, cairia $1 + 2 = 3$ unidades de distância; na terceira, $1 + 2 + 3 = 6$ unidades; na quarta, $1 + 2 + 3 + 4 = 10$ unidades, e assim por diante (ver figura 6).

Essa sequência conduziria à seguinte equação: **d proporcional a $[(t + t^2) / 2]$** . Com essa relação, o valor para a aceleração da gravidade cairia para cerca da metade do valor aceito hoje.

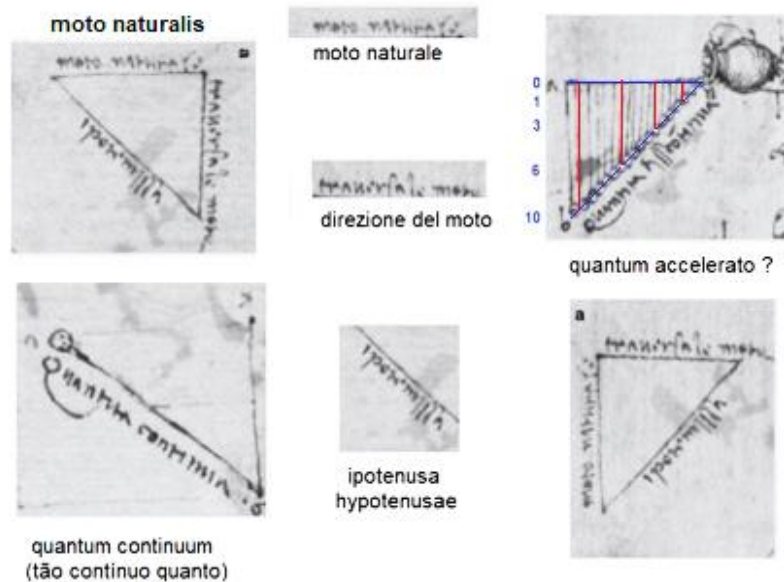


Figura 6 - Queda de gotas d'água (*grani d'acqua*) imaginada por Da Vinci: vê-se claramente a proporção da sequência do somatório dos números inteiros consecutivos, em vermelho, na figura no alto à direita. Fonte: adaptado de GHARIB, ROH & NOCA, 2023.

Conclusões e Desdobramentos

Do exposto concluímos que há um equívoco presente no artigo de Gharib, Roh & Noca (2023), uma vez que a conclusão de que o valor da aceleração da gravidade esteja próximo dos $9,8 \text{ m/s}^2$ é inconsistente com os dados históricos e com a própria ilustração realizada por Leonardo no manuscrito (presente no *Codex Arundel*) apresentado no artigo citado (figuras 1 e 6). É importante ressaltar que, muito provavelmente, Leonardo jamais realizou seu experimento de pensamento (*gedankenexperiment*). O artigo citado demonstra, ainda, por meio de filmagem estroboscópica (ver figura 4) o experimento de queda. No entanto, o experimento demonstra a regra galileana e não a leonardesca. O experimento é, pois, “interpretado” pelos três autores do artigo citado com uma leitura errada dos dados históricos, uma vez que a queda é descrita de forma pré-conceitual pela relação dos números *dis pares* (ímpares) consecutivos, à maneira galileana.

Analisando as duas descrições: o somatório dos **números inteiros consecutivos** (Leonardo) e o somatório dos **números ímpares consecutivos** (Galileo) é evidente que o valor da aceleração da gravidade imaginado por Leonardo, e que sequer foi calculado por Galileo, jamais poderia se aproximar do valor médio conhecido: $9,8 \text{ m/s}^2$.

O trabalho aqui descrito ressalta a importância da contextualização histórica e da epistemologia dos conceitos na educação científica. Analisa, também, os estudos de Leonardo da Vinci sobre o movimento de queda dos corpos, mostrando sua interpretação em contraste com os princípios aristotélicos. Além da realização da pesquisa histórica e das relações encontradas tanto para um (Leonardo) quanto para outro pensador (Galileo), também analisamos a escrita de Leonardo, como pode se ver pela figura 6, invertendo seu sentido de escrita e tentando compreender as legendas de suas figuras e detalhes gráficos presentes em seus desenhos/esboços.

Finalmente, frisamos que é necessário destacar a necessidade de compreender o contexto histórico da ciência ainda que ela não favoreça a uma previsão corretíssima (no caso

aqui o valor de g). Sabemos, por exemplo, que o grande físico pisano, Galileo Galilei, errou sobre a natureza dos cometas, o conceito de inércia e a teoria das marés. No entanto, esse é o caminho da ciência: encontrar novas trilhas num caminho que conduzirá à ruptura de velhas ideias, como realmente ocorreu da ciência ordinária de Aristóteles para a ciência extraordinária advinda com a Revolução Copernicana (KUHN, 1985).

Uma última palavra: Galileo é contemporâneo de Leonardo, mas ambos guardavam os mesmos sentimentos e a mesma paixão pela indissociabilidade entre Arte e Ciência, ao ponto de Galileo ter cursado a *Accademia del Disegno*, fundada por Giorgio Vasari e Michelangelo Buonarroti.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq, CAPES, SESu e ARAUCÁRIA pelo apoio financeiro às nossas pesquisas nos últimos anos, e homenageiam a figura do Prof. Dr. Carlos Alfredo Argüello que nos deixou em 08 de agosto de 2020.

Referências

ALBANESE, A.; NEVES, M.C.D.; VICENTINI, M. (1997). Models in science and in education: a critical review of research on students' ideas about the earth and its place in the universe. **Science & Education** 6(6), p. 573-590.

BROAD, W. (2023). A doodle reveals Da Vinci's early deconstruction of gravity. New York. **The New York Times**. Disponível em <https://www.nytimes.com/2023/02/17/science/leonard-da-vinci-gravity.html> . Acesso em 12/08/2023.

CANATTA, I.; NEVES, M.C.D.; ALBANESE, A. (1995) L'Apparato di Morin nell'insegnamento della Meccanica. **Didattica delle Scienze**. Roma, p. 22-27.

GALLUZZI, P. (2006). **La mente di Leonardo: nel laboratorio del genio universale**. Roma: Giunti Editore.

GHARIB, M.; ROH, C.; NOCA, F. (2023). **Leonardo da Vinci's Visualization of Gravity as a Form of Acceleration**. Massachusetts: MIT Press Direct, 21-27.

KUHN, T.S. (1985). **A Revolução Copernicana: a Astronomia planetária e o desenvolvimento do pensamento ocidental**. Belo Horizonte: Itatiaia.

NEVES, M.C.D.; SAVI, A.A. (2000) A sobrevivência do alternativo: uma pequena digressão sobre mudanças conceituais que não ocorrem no ensino de Física. **Ciência & Educação**, 6(1), p. 11-20.

NEVES, M.C.D. (2000). Uma Investigação sobre a natureza do Movimento ou sobre uma história para a noção do conceito de Força. **Revista Brasileira de Ensino de Física**. 22(4), p. 543-556.

NEVES, M.C.D. *et al* (2008). Galileo fez o experimento do plano inclinado? **Revista Electrónica de Enseñanza de las Ciencias**. 7(1), p. 226-242.

OLENICK, R. P.; APOSTOL, T. M.; GOODSTEIN, D. L. (1989). **The Mechanical Universe**. Cambridge: Cambridge University Press.

POLITO, A. M. M. (2015). **Galileu, Descartes e uma Breve História do Princípio de Inércia**. *Physicae Organum - Revista dos Estudantes de Física da UnB*. In: <https://periodicos.unb.br/index.php/physicae/article/view/12624>. Acesso em: 10/08/2023.

RUTHERFORD, F.J.; HOLTON, G; WATSON, F.J. *PROJECTO FISICA (Harvard Project Physics)* [1979]. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian.

SILVA, J.A.P.; NEVES, M.C.D. **O Codex Cigoli-Galileo: Ciência, Arte e Religião num enigma copernicano**. Maringá, EDUEM, 2015.

SILVA, C. M.; NORONHA, L. T.; SILVA, L. F.; BARROS, M. N. (2018). **Visão aristotélica em queda livre, até quando?**. *Anais V CONEDU*. In: <https://editorarealize.com.br/artigo/visualizar/49319>. Acesso em: 10 ago, 2023.

VINCI, L. da. (1636). **Codex Arundel**. London: British Library. In: http://web.archive.org/web/20221207085408/https://bl.uk/manuscripts/FullDisplay.aspx?ref=Arundel_MS_531 . Acesso em 12/08/2023.