UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
Instituto de Física
Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física
Mestrado Profissional em Ensino de Física

Jogos de Modelagem Computacional no Ensino de Física

Tarcisio Lima da Cruz

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física, Instituto de Física, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ensino de Física.

Orientador: Carlos Eduardo Aguiar

Rio de Janeiro
Setembro de 2022

Jogos de Modelagem Computacional no Ensino de Física

Tarcisio Lima da Cruz

Orientador: Carlos Eduardo Aguiar

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física, Instituto de Física, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ensino de Física.

Aprovada por:

Prof. Carlos Eduardo Aguiar (Presidente)

Prof. Thales Agricola Calixto de Azevedo

Prof. Fabrício Frizera Borghi

Prof. Germano Maioli Penello

Rio de Janeiro
Setembro de 2022

FICHA CATALOGRÁFICA

C957j Cruz, Tarcisio Lima da
Jogos de Modelagem Computacional no Ensino de Física / Tarcisio Lima da Cruz. – Rio de Janeiro: UFRJ/IF, 2022.
ix, 86 f. : il. ; 30 cm.
Orientador: Carlos Eduardo Aguiar.
Dissertação (mestrado) – UFRJ / Instituto de Física / Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física, 2022.
Referências Bibliográficas: f. 84-86.
1. Ensino de Física. 2. Jogos Digitais. 3. Programação. I. Aguiar, Carlos Eduardo. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Física, Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física. III. Jogos de Modelagem Computacional no Ensino de Física.

Dedico esta dissertação a todos aqueles, professores e alunos, que gostariam que as aulas de Física fossem mais vezes interessantes.

Agradecimentos

Ao meu orientador, Carlos, pela grande consideração que teve por mim e por este trabalho e, a meu ver, pela amizade.

A todos os professores que contribuíram na minha formação. Em especial, aos professores do Mestrado Profissional em Ensino de Física.

Aos alunos que participaram deste trabalho, principalmente àqueles que responderam aos testes.

Aos colegas do mestrado, pelas caronas, pelas conversas e pela camaradagem.

À minha família e aos meus amigos, pelos muitos momentos de diversão e alegria.

Sobretudo, à minha mãe, Zulmira, e às minhas tias, Áurea, Isabel e Inês, pelo apoio constante.

E, claro, à Mirian, minha esposa, pelo amparo e pelo amor imprescindíveis.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) - Código de Financiamento 01

RESUMO

Jogos de Modelagem Computacional no Ensino de Física

Tarcisio Lima da Cruz

Orientador: Carlos Eduardo Aguiar

Resumo da Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física, Instituto de Física, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ensino de Física.

Discutiremos a utilização de jogos digitais para o ensino de física e o emprego da programação computacional como ferramenta de modelagem científica. Nesse sentindo, apresentaremos uma proposta de jogos de modelagem computacional, na qual os jogos são regidos por leis físicas e possuem a parte do código referente a essas leis acessíveis ao aluno, que é estimulado a explorá-las e modificá-las. Dentro dessa proposta, desenvolvemos um jogo no qual o aluno deve fazer um objeto sair de um labirinto por meio da aplicação de forças. O efeito da força no movimento do objeto depende da escolha do "universo" em que o labirinto estará localizado, que pode ser regido pelos modelos dinâmicos de Aristóteles, Newton ou Einstein. O aluno pode intervir no código do jogo para modelar situações diferentes, como um labirinto vertical, ou até seu próprio "universo". O jogo pode ser executado em qualquer plataforma, de desktops a smartphones. Nós o aplicamos em turmas da Educação Básica (9a série, na maior parte) e, através de pré e pós-testes, obtivemos resultados que sugerem um efeito positivo sobre a aprendizagem de mecânica.

Palavras chave: Ensino de Física, Jogos Digitais, Programação.

Rio de Janeiro
Setembro de 2022

ABSTRACT

Computational Modelling Games in Physics Education

Tarcisio Lima da Cruz

Supervisor: Carlos Eduardo Aguiar

Abstract of master's thesis submitted to Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física, Instituto de Física, Universidade Federal do Rio de Janeiro, in partial fulfillment of the requirements for the degree Mestre em Ensino de Física.

We discuss the use of digital games in physics education and the employment of computer programming as a scientific modeling tool. A proposal for computer modeling games is presented in which the games are governed by physical laws, and the part of the code referring to these laws is accessible to the student, who is encouraged to explore and modify them. In this framework we developed a game in which the student must make an object come out of a maze through the application of forces. The effect of force on the object's motion depends on the choice of the "universe" where the labyrinth is located, which may be governed by the dynamic models of Aristotle, Newton or Einstein. The student can intervene in the game's code to model different situations, such as a vertical maze, or even their own "universe". The game can run on any platform, from desktops to smartphones. We applied it in basic education classes (mostly 9th grade) and, via pre and post-tests, obtained results that suggest a positive effect on the learning of mechanics.

Keywords: Physics Education, Computer Games, Programming.

Rio de Janeiro
Setembro de 2022

Sumário

1 Introdução **1**

2 Jogos de Modelagem Computacional **4**
- 2.1 Modelagem Científica 4
- 2.2 Jogos de Simulação e Micromundos 6
- 2.3 Programação como Forma de Raciocínio e Ferramenta de Modelagem 10

3 Jogos no Ensino de Mecânica Newtoniana **16**
- 3.1 Alguns Desafios à Aprendizagem de Mecânica Newtoniana . . 16
- 3.2 Os Jogos Newtonianos de Barbara White 18
- 3.3 O "Parquinho de Newton" de Shute, Ventura e Kim 23

4 Proposta Didática: Jogos sobre Força e Movimento **27**
- 4.1 Aspectos Gerais da Proposta 27
- 4.2 Força e Movimento em Diferentes Micromundos 28
  - 4.2.1 Aristóteles 29
  - 4.2.2 Newton 34
  - 4.2.3 Einstein 38

5 Aplicação em Sala de Aula **43**
- 5.1 Considerações Gerais 43
- 5.2 Testes de Compreensão de Mecânica Newtoniana 45
- 5.3 Resultados Principais 48
- 5.4 Efeito do Envolvimento, Programação e Ordem dos Testes . . 51
- 5.5 Comparação com os Resultados de White e Shute et al. 54

6 Comentários Finais **56**

A Jogo sobre Força e Movimento **61**

B Teorias do Movimento: Texto de Apoio **64**

C Testes de Compreensão de Mecânica Newtoniana **68**

Referências bibliográficas **84**

Capítulo 1

Introdução

Jogos digitais podem ser ferramentas interessantes para o ensino de física, pois costumam despertar interesse e cativar o aluno. Muitos jovens apresentam mais interesse por jogos do que por uma tarefa escolar tradicional. Além disso, quando o comportamento dos objetos em um jogo é regido por leis físicas, investigar o "micromundo" do jogo com o propósito de vencê-lo é também estudar os conceitos físicos que o descrevem. De fato, com essas perspectivas, diversos trabalhos já utilizaram jogos digitais para o ensino de física e alcançaram razoável sucesso (ver [1, 2], por exemplo).

Contudo, assim como as simulações, jogos digitais apenas reproduzem as leis físicas que foram programadas em seu código. Ou seja, jogos e simulações revelam o comportamento de um modelo; para avaliar a adequação do modelo é necessário analisar o quanto este se aproxima do fenômeno real. Muitas vezes, isso não fica claro para o aluno, que não tem acesso ao modelo por trás do jogo e corre o risco de confundir modelo com realidade.

Para contornar essas limitações, a modelagem do micromundo também pode ser explorada pelos alunos, através da programação computacional. A atividade de modelagem auxilia o estudante a compreender as leis físicas e seu aspecto de modelo. Argumentamos nesta dissertação que, nesse processo de aprendizagem, a programação se mostra uma poderosa ferramenta de raciocínio e representação de ideias, por permitir ao estudante expressar e reavaliar suas concepções com clareza e de maneira lógica.

Nesse sentido, este trabalho propõe a utilização de jogos de modelagem computacional para o ensino de física. Definimos jogos de modelagem computacional como jogos digitais que permitem comparar modelos científicos e que possuem a parte de seu código computacional que descreve o modelo físico separado do código geral, em poucas linhas, com as quais o aluno é encorajado a experimentar e realizar alterações. Jogos como esses foram propostos por George Marx [3–7] e Jon Ogborn [8] e estão de acordo com os estudos de Andrea diSessa sobre os benefícios do letramento computacional para o ensino de ciências [9, 10].

Dentro dessa proposta, desenvolvemos um jogo para ensino de mecânica inspirado no jogo “Momentum” de Marx [7]. O objetivo do jogo é levar um objeto até a saída de um labirinto, aplicando forças sobre ele. No entanto, o efeito da força sobre o objeto depende de uma escolha de modelo dinâmico: aristotélico, newtoniano ou relativístico. Dessa forma, o estudante pode comparar o comportamento do objeto em cada teoria e avaliar suas próprias concepções sobre movimento. Além disso, as poucas linhas de código que descrevem cada teoria estão separadas do código geral e acessíveis ao aluno, que é incentivado a examinar e experimentar com elas, inclusive construindo novos modelos.

Aplicamos nossa proposta em um colégio da rede privada da cidade do Rio de Janeiro e obtivemos resultados quantitativos, através de pré e pós-testes, que revelaram um efeito bastante satisfatório da utilização do jogo.

Esta dissertação está organizada da forma que descrevemos a seguir. No capítulo 2, discutiremos, em seções separadas: o aspecto de modelo das leis físicas; as vantagens da utilização de jogos digitais como ferramenta didática; e a programação como forma de representação e facilitadora de raciocínio na aprendizagem em física. No capítulo 3, discutiremos as principais dificuldades apresentadas por estudantes na aprendizagem de mecânica newtoniana e dois trabalhos que, com razoável sucesso, utilizaram jogos no intuito de superá-las. Ambos os trabalhos avaliaram quantitativamente o efeito dos jogos sobre a aprendizagem dos alunos. Os aspectos gerais de nossa proposta e o jogo que desenvolvemos para ensino de mecânica serão apresentados no Capítulo 4. Nele discutiremos em detalhes as características do jogo e como as leis físicas estão descritas em seu código computacional. No capítulo 5, descreveremos a aplicação da proposta, os resultados obtidos por nossos alunos e a análise dos efeitos associados à intervenção com o jogo na aprendizagem de mecânica, incluindo uma comparação com trabalhos semelhantes. Encerraremos o trabalho no capítulo 6 com nossas considerações finais e perspectivas de continuidade do estudo.

O principal produto instrucional desta dissertação, o jogo de modelagem, pode ser acessado pelo código QR disponível no apêndice A ou pela página: `https://www.if.ufrj.br/~pef/producao_academica/dissertacoes/2022_Tarcisio_Cruz/jogo/dinamica.html`. Um texto de apoio sobre os diferentes modelos mecânicos está no apêndice B. Os testes de avaliação de aprendizagem utilizados para aferir o efeito do jogo constam no apêndice C.

Capítulo 2

Jogos de Modelagem Computacional

2.1 Modelagem Científica

A Física constrói e fornece modelos que descrevem objetos e fenômenos da natureza de maneira cada vez mais precisa e consensual na comunidade científica. Nesse sentido, compreender a Física significa, também, entender como esses modelos são construídos e empregados [11].

As teorias físicas são, em certo sentido, grandes modelos, definidos pela escolha de leis e princípios capazes, dentro de certos limites, de descrever comportamentos gerais da natureza. Existem também os modelos de sistemas, que simplificam sistemas reais, extremamente complexos, e utilizam aspectos das teorias para descrevê-los.

Modelos científicos são construções humanas. Eles não representam completamente o comportamento do universo ou sistemas reais, apenas os aspectos que interessam a quem os utiliza, dentro de um domínio de validade. Além disso, diferentes modelos podem representar o mesmo objeto ou comportamento, com diferentes enfoques [12].

No sentido de envolverem idealizações ou simplificações, modelos familiares como corpo rígido, fluido incompressível ou partícula pontual demonstraram ser essenciais para a construção do conhecimento físico [3, 4]. Isso se deve ao fato do cérebro humano ou computadores analisarem melhor sistemas com um número limitado de variáveis [4]. Para que seja possível fazer previsões quantitativas sobre o comportamento dos objetos de interesse da Física, tais modelos precisam ser complexos o suficiente para representar satisfatoriamente a realidade e, concomitantemente, simples o suficiente para que a formulação matemática seja viável e compreensível [4].

Frequentemente, é desafiador reduzir a realidade ao caso idealizado e conseguir extrair dele o modelo físico que descreve e prevê a situação destituída de complicações pouco importantes. Além não ser nada simples nem intuitivo, esse procedimento não foi habitual para a humanidade por muitos séculos. É nesse sentido que os trabalhos de Galileu são considerados tão impactantes para a história da Física: Galileu propunha ignorar complexidades do mundo real e refletir sobre o caso idealizado, como a pedra e a pena que caem juntas na ausência de ar!

A outra característica, o fato de diferentes modelos científicos serem capazes de representar o mesmo sistema real, foi exemplificada por Marx e Tóth através das diferentes representações de elétrons mostradas na figura 2.1: ora o elétron é uma elipse em torno do núcleo atômico, às vezes ele é uma bolinha, noutras é uma onda ou até uma nuvem de probabilidades [4]. Nenhuma dessas representações descreve o objeto real em sua totalidade, mas são modelos complementares utilizados em diferentes contextos e com diferentes objetivos.

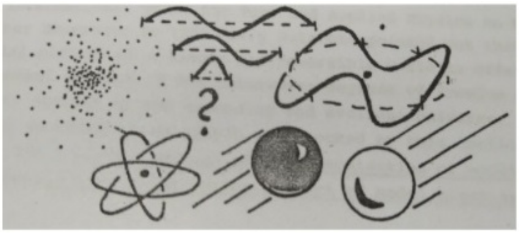


Figura 2.1: Modelos de elétron encontrados em pôsteres ou livros-texto [7, p. 4].

Essas características são evidentes também nas teorias físicas e revelam seu aspecto de modelos gerais. Como exemplo, por muito tempo a concepção dinâmica de Aristóteles foi utilizada para explicar o movimento dos objetos, ainda que baseada em princípios fundamentalmente inconciliáveis com a teoria newtoniana, pela qual foi sucedida. Mesmo a mecânica newtoniana falha em descrever o comportamento de partículas de alta velocidade, sendo substituída pela mecânica relativística nesses casos.

No intuito de descrever a natureza através da Física, diferentes modelos surgem e são confrontados entre si e com constatações empíricas. Por meio desse processo, os modelos evoluem, são alterados ou abandonados, de forma que pouco a pouco os conceitos e teorias científicas convergem para uma aproximação razoável e consensual da realidade, permitindo melhor entender a natureza, realizar previsões bem-sucedidas e resolver problemas práticos.

Contudo, a instrução tradicional comumente gera a visão equivocada de que compreender a Física se trata de coletar e memorizar fatos científicos e fórmulas matemáticas [13, cap. 1; 14] como se fossem inerentes à natureza e apenas descobertos pela humanidade. Pode ser um grande desserviço à educação científica quando, convenientemente ao professor, um conceito, lei ou modelo científico é estabelecido como "verdade absoluta" que os alunos devem aceitar ao estudar [4].

Em contraposição, atividades de modelagem científica auxiliam o estudante a compreender as leis físicas e seu aspecto de modelo, entender a natureza da ciência e familiarizar-se com o fazer científico [13, cap. 1]. Na próxima seção discutiremos como jogos de simulação podem ser meios interessantes para exploração desses modelos. Afinal, jogar é utilizar e experimentar com um modelo, assim como brinquedos e jogos de crianças são, muitas vezes, modelos de objetos e situações da vida adulta [4]!

2.2 Jogos de Simulação e Micromundos

Em uma série de artigos [5–7], Marx sugere jogos que modelam fenômenos estudados pela ciência e auxiliam na compreensão das leis que os descrevem, como radioatividade, reações químicas, crescimento populacional, caos, simetria, movimento, entre outros. Alguns são jogos analógicos, que utilizam cartas, bolinhas, dados, etc; outros são jogos digitais, programados pelo professor ou pelo próprio estudante.

Mais adiante neste trabalho, como parte da nossa proposta didática (capítulo 4), apresentaremos um jogo digital para ensino de mecânica fortemente inspirado em um desses jogos [7, p. 27], com a experimentação com código computacional do micromundo acessível e incentivada aos alunos para exercício de modelagem física. Por conseguinte, nossa discussão é centrada nos jogos de simulação digitais.

Um jogo de simulação digital é baseado em um micromundo computacional e configura um ambiente de aprendizagem bastante atraente [15]. Em um micromundo, conceitos importantes são embutidos em um universo computacional que os estudantes podem explorar [9, p. 47]. Esses conceitos estão presentes nas regras que ditam o comportamento de objetos na tela como resultado da interação dos alunos. No caso dos jogos que discutiremos, as regras dos micromundos são teorias físicas.

Em uma simulação digital (mesmo sem elementos de jogo), o micromundo pode ser simplificado o quanto for necessário para evidenciar conceitos e aspectos específicos de leis de determinada área da Física [1]. É menos desafiador identificar as principais características das leis físicas no micromundo do que no mundo real. Por exemplo, um micromundo no qual um objeto é regido pela 1ª e 2ª leis de Newton e sofre apenas a força devida à interação do jogador evidencia com mais clareza o significado dessas leis que a observação direta da natureza, onde complicações como o atrito estão presentes.

Compreendidos os aspectos essenciais das leis que regem um micromundo, é possível acrescentar ao modelo elementos que aproximem o comportamento dos objetos simulados daquele que é observado no mundo real. No exemplo anterior, sobre leis de Newton, o atrito pode ser adicionado posteriormente ao micromundo, para mostrar como a mecânica newtoniana é capaz de descrever movimentos cotidianos como o de um armário sendo empurrado ou uma bola que foi chutada.

Portanto, jogos de simulação ajudam a revelar a lógica e o significado das leis físicas, inclusive sua formulação matemática, através do comportamento visível do objeto simulado. Alterações nas variáveis ou regras do micromundo podem causar notáveis mudanças nesse comportamento (ou não causar mudança alguma!) e contribuir mais ainda para o entendimento de um modelo e sua relação com o mundo real.

Além disso, um micromundo na forma de jogo possui objetivos que, se definidos convenientemente, orientam a atenção do aluno a aspectos específicos das leis físicas [1]. Por exemplo, fazer um objeto chegar ao final de um labirinto e realizar curvas em um micromundo newtoniano direciona a atenção do aluno ao efeito de uma força na mudança de direção de um objeto já em movimento (figura 2.2).

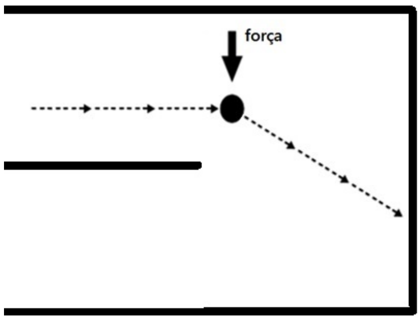


Figura 2.2: "Droga, morri!"

Tentar alcançar o objetivo do jogo é uma forma de resolução de problemas, pois exige estratégias para enfrentamento dos desafios e reflexões por parte do aluno sobre seus conhecimentos e o que acontece no jogo [1]. Os jogos evocam concepções espontâneas advindas da vida cotidiana assim como conhecimentos formalizados da Física e os confronta com o observado no micromundo do jogo. Ou seja, os estudantes têm expectativas sobre o comportamento dos objetos e, de acordo com elas, elaboram suas estratégias para vencer o jogo. O jogo dá feedback claro e imediato, possivelmente confirmando as expectativas, porém mais comumente revelando uma falha na estratégia e nas concepções do aluno, encorajando-o a modificar suas concepções e reestruturar seus conhecimentos para alcançar o objetivo [1, 16].

Na figura 2.2 está representada uma falha comum em jogos em micromundo newtoniano, baseada em concepções equivocadas: para realizar a curva, o aluno aplica uma força na expectativa de que um objeto já em movimento passe a se mover no mesmo sentido da força e se surpreende quando isso não ocorre [1, 16]. Para ter sucesso, o aluno deve compreender que a velocidade final depende não só da força mas também da velocidade anterior à sua aplicação e elaborar novas estratégias de acordo.[1]

Esse processo de pensar em como alcançar um efeito desejado, testar ideias, observar o resultado e então aprimorar essas ideias é similar em essência ao processo de construção de modelos e desenvolvimento do conhecimento científico abordado na seção 2.1.

Outra vantagem do jogo de simulação é a capacidade de despertar interesse e atenção do aluno, requisitos de uma aprendizagem significativa. Embora sejam resistentes a aulas expositivas e tarefas monótonas, crianças e adolescentes são estimulados por desafios diferentes e divertidos. De fato, muitos jovens já jogam videogames regularmente. Dessa maneira, o professor pode contar com jogos como ferramentas educativas para cativar o aluno e ajudar a compreender a natureza [4].

Entretanto, os jogos têm limitações. Eles são construídos a partir de modelos mas, na maioria das vezes, esses não estão acessíveis: apesar de poder visualizar um fenômeno virtual e experimentar com muitas das variáveis envolvidas, geralmente o aluno não pode explorar e modificar o próprio modelo [8, 12, 13]. Com isso, o aluno talvez deixe de entender mais profundamente por que um modelo difere de outro. Talvez mais grave, o aluno pode nem perceber que por trás da simulação existe um modelo e acreditar que a simulação é equivalente à realização de experiências práticas, confundindo modelo com realidade [13, cap. 1].

Por esses motivos, nossa proposta tem as características de tornar acessível a parte do código responsável pela modelagem do micromundo e estimular o aluno a reconhecer e modificar desse modelo. Discutiremos na próxima seção os benefícios da construção de modelos através da programação computacional para a aprendizagem em física.

[1] Discutiremos essa e outras concepções equivocadas sobre mecânica, assim como suas alternativas concepções newtonianas, na seção 3.1.

2.3 Programação como Forma de Raciocínio e Ferramenta de Modelagem

O trabalho científico moderno, inclusive na Física, é apoiado fortemente na programação computacional para construir modelos que simulam comportamentos observados ou esperados na natureza [8, 12]. Isso se dá pelas poderosas capacidades de cálculo, visualização e exploração possibilitadas por computadores [14].

Computadores resolvem problemas matemáticos complexos, realizam cálculos extensos com precisão e representam informações com clareza visual em diferentes formatos, como gráficos e animações [13, cap. 1]. Devido à rapidez com que realizam essas tarefas, facilitam a exploração e a experimentação: é possível analisar um problema, alterando parâmetros e testando diferentes modelos, dezenas de vezes em uma tarde!

A programação é uma forma estruturada de representação de ideias,[2] constituindo-se numa poderosa ferramenta de construção e compreensão de modelos. As mesmas vantagens que essa forma de raciocínio traz para o trabalho científico também se aplicam a outras atividades intelectuais, incluindo, naturalmente, a aprendizagem em física. Através da programação o aluno é capaz de expressar seus modelos mentais e desenvolvê-los em uma forma bem definida. O aluno cria o micromundo! Ao executar o programa, ele observa o comportamento dos objetos nesse micromundo e pode compará-lo ao sistema real que tentou representar. Essa facilidade na experimentação encoraja exploração e elaboração de explicações. Ao refletir sobre a validade de seu modelo e discutir com colegas ou com o professor, a compreensão do aluno se aproxima de uma concepção científica.

Em outras palavras, a programação computacional, mesmo nas linguagens mais simples, permite que os estudantes se engajem numa atividade de modelagem científica na qual podem perceber, desenvolver, expressar e reavaliar seus modelos mentais [12]. Alguns autores [10, 17] chegam a defender

[2] Essa característica permite considerar a programação computacional um tipo de linguagem. Para aprofundamento na discussão da programação como linguagem, recomendamos os trabalhos de A. diSessa [9, 10].

que a programação pode ter a mesma importância que (ou até suplantar) a abordagem analítica da álgebra no ensino de física. Isto é, em vez de representar leis físicas por fórmulas apenas, estudantes as representariam através de programas [17]. Os benefícios dessa mudança de paradigma na educação científica são comparáveis aos de outras mudanças de representação, como a transição dos algarismos romanos para os arábicos e o advento da própria álgebra [10], como discutiremos seguir.

Primeiro, a transição dos algarismos romanos para os arábicos gerou uma importante simplificação da aritmética. Operações simples, como multiplicação e divisão, eram extremamente trabalhosas com algarismos romanos (considere calcular MDCCXLVI $\times$ DXXV, sem converter os algarismos[3]). Os algarismos arábicos possibilitam ao profissional técnico realizar operações mais avançadas com praticidade e ao cidadão comum, com um pouco menos de instrução e muito menos esforço, realizar essas operações aritméticas: o comerciante pode mais facilmente cuidar das contas de seu negócio [10].

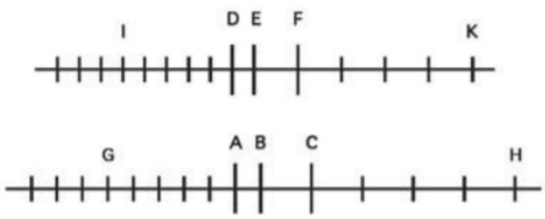
Segundo, a representação algébrica também já foi uma mudança de representação que facilitou (ao contrário do que pensam os alunos da educação básica) o raciocínio humano de maneira impactante. A formulação algébrica que conhecemos não existia na época de Galileu. Limitado às razões e proporções da geometria grega, Galileu formulou seis teoremas extensos para descrever o movimento uniforme [19]. A demonstração de cada um desses teoremas, escrita em palavras e também baseada em razões e proporções, é de uma complexidade intimidadora. Um exemplo está na figura 2.3, mostrada apenas para efeito de comparação com a demonstração algébrica do mesmo resultado ($d = vt \implies d_1/d_2 = t_1/t_2$). Com álgebra, os seis teoremas para o movimento uniforme são condensados em uma única fórmula simples: $d = vt$.

É razoável esperar que o raciocínio por programação computacional tenha um impacto similar? Nesse sentido, B. Sherin relata que o ensino de física apoiado na combinação de computação e álgebra resulta em melhor compreensão de diversos temas, por exemplo envolvendo evolução temporal [17]. Muitas vezes, a álgebra mais esconde do que revela fatos de cunho qualitativo [10].

[3]Existiam métodos para isso [18].

Theorem: If a moving particle, carried uniformly at a constant speed, traverses two distances, the time intervals required are to each other in the ratio of these distances.

Proof: Let a particle move uniformly with constant speed through two distances AB, BC, and let the time required to traverse AB be represented by DE; the time required to traverse BC, by EF; then I say that the distance AB is to the distance BC as the time DE is to the time EF. Let the distances and times be extended on both sides towards G, H and I, K; let AG be divided into any number whatever of spaces each equal to AB, and in like manner lay off in DI exactly the same number of time-intervals each equal to DE. Again lay off in CH any number whatever of distances each equal to BC; and in FK exactly the same number of time intervals each equal to EF; then will the distance BG and the time EI be equal and arbitrary multiples of the distance BA and the time ED; and likewise the distance HB and the time KE are equal and arbitrary multiples of the distance CB and the time FE.



And since DE is the time required to traverse AB, the whole time EI will be required for the whole distance BG, and when the motion is uniform there will be in EI as many time intervals each equal to DE as there are distances in BG each equal to BA; and likewise it follows that KE represents the time required to traverse HB.

Since, however, the motion is uniform, it follows that if the distance GB is equal to the distance BH, then must also the time IE be equal to the time EK; and if GB is greater than BH, then also IE will be greater than EK; and if less, less. There are then four quantities, the first AB, the second BC, the third DE, and the fourth EF; the time IE and the distance GB are arbitrary multiples of the first and the third, namely of the distance AB and the time DE.

But it has been proved that both of these latter quantities are either equal to, greater than, or less than the time EK and the space BH, which are arbitrary multiples of the second and the fourth. Therefore, the first is to the second, namely the distance AB is to the distance BC, as the third is to the fourth, namely the time DE is to the time EF. Q.E.D.

Figura 2.3: O primeiro dos seis teoremas de Galileu sobre o movimento uniforme e sua demonstração [19].

H. Abelson e A. diSessa relataram sucesso em ensinar conceitos de cálculo vetorial (Teoremas de Gauss, Stokes etc.) no ensino médio, com base em somas discretas feitas em computador [20]. Segundo diSessa, a discretização de funções permite descrever o significado de operações do cálculo, como derivadas e integrais, com mais clareza do que as habituais inclinação ou área dos respectivos gráficos [10].

O domínio da programação como forma de raciocínio [9, 10], portanto, pode ser considerado benéfico de maneira geral, em vez de um conhecimento exclusivamente profissional. É análogo aos letramentos textual e algébrico: estes são tratados como básicos e independentes de carreira profissional (mesmo que o aluno não venha a ser escritor ou engenheiro, respectivamente), por serem ferramentas de raciocínio, expressão e compartilhamento de ideias.

Vale ressaltar que propostas de utilização de programação computacional na educação científica e boa parte dos argumentos apresentados acima são apontados por pesquisadores desde a década de 1960, se não antes. Apesar disso, hoje, meio século depois, a programação ainda é uma ferramenta didática pouco utilizada. É possível entender melhor essa lacuna analisando um pouco dessa questão por uma perspectiva histórica.

Entre as décadas de 1960 e 1980, linguagens robustas como Logo [22, 23], BASIC [8] e Pascal [21] eram utilizadas em propostas de atividades de programação para o ensino e a aprendizagem em ciências, inclusive a Física. Nessa época era muito fácil e prático para os estudantes produzirem e compartilharem pequenos programas. A partir da década de 90, porém, essa atividade tornou-se mais difícil. Os sistemas operacionais em janelas tornaram a programação uma tarefa complexa e, geralmente, de cunho profissional. O Logo, BASIC e Pascal praticamente desapareceram, embora tenham deixado sucedâneos, como o Scratch [12] no caso do Logo, que, entretanto, têm sido raramente utilizados.

Como alternativa, surgiram aplicativos como o Modellus [13, cap. 2-9; 14], um ambiente de construção de modelos e simulações físicas para o ensino médio ou superior. Não obstante, mesmo esses ambientes desenvolvidos especificamente para o ensino costumam ser pouco aproveitados.

Dentre os fatores que dificultam a ampla utilização dessas ferramentas por estudantes, sobressaem o desafio de aprender uma linguagem de programação moderna e a dificuldade para compartilhar os programas que venham a desenvolver.

Uma solução para o primeiro desafio é desenvolver programas cujo código esteja dividido em uma parte geral (interface, gráficos, entrada e saída de dados etc.) e outra contendo o modelo físico do micromundo. Apenas esse último seria disponibilizado ao aluno, que poderia modificar um modelo já existente ou até fornecer um modelo completamente novo. Em geral, em uma simulação ou jogo, apenas cerca de meia dúzia de linhas de código estão relacionadas ao modelo físico e escrevê-las ou modificá-las não representaria uma dificuldade muito grande ao aluno. Isso foi proposto na década de 1980 por J. Ogborn e D. Wong [8], como mostrado na figura 2.4.

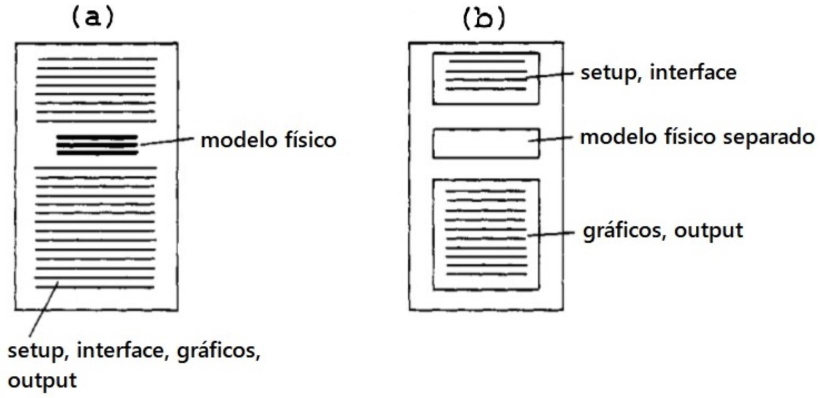


Figura 2.4: **(a)** Programa convencional, com um único bloco de código no qual a maioria das linhas não tem relação com o modelo físico. **(b)** O modelo físico é definido em um bloco de código separado (adaptado de [8]).

Quanto ao problema do compartilhamento dos programas, uma solução é desenvolvê-los na linguagem JavaScript para HTML5. Programas desse tipo são executados por quase todos os navegadores de internet atuais, inclusive os nativos aos smartphones e tablets. Tendo em vista a difusão desses dispositivos móveis e a melhor conectividade à internet atualmente, é justificado considerar que qualquer computador que a escola ou os alunos possuam já estará pronto a executar o programa simplesmente abrindo um link para a página da internet onde esse foi disponibilizado.

No próximo capítulo comentaremos alguns desafios à aprendizagem de mecânica newtoniana e discutiremos dois trabalhos que, com sucesso, utilizaram jogos (sem programação por parte do aluno) como instrumento auxiliar no ensino desse tema. A seguir, no capítulo 4, apresentaremos nossa proposta de utilizar, para o mesmo objetivo, jogos de modelagem computacional: jogos com cujo modelo físico de micromundo o aluno pode experimentar através da programação computacional.

Capítulo 3

Jogos no Ensino de Mecânica Newtoniana

3.1 Alguns Desafios à Aprendizagem de Mecânica Newtoniana

É bem conhecido que o ensino-aprendizagem de mecânica newtoniana deve superar concepções intuitivas, mas equivocadas, mantidas pelos alunos, que dificultam a compreensão da leis de Newton. Uma dessas concepções é a de que um objeto com velocidade constante deve estar sob a ação permanente de uma força. Ainda que desacertada, essa ideia não é surpreendente. As leis de Newton realmente parecem contraintuitivas num mundo onde forças resistivas não-explícitas frequentemente interferem nos movimentos [1].

Sabemos pela 1ª lei de Newton que, na ausência de forças, um objeto em movimento se mantém em movimento com velocidade constante. Entretanto, devido a força de atrito com o chão, ao empurrarmos um armário, este permanece se movendo somente enquanto empurramos. Caso contrário, se pararmos de empurrar, o armário desacelera até parar. Em alguns casos, até parece parar imediatamente!

Situações cotidianas, como a de empurrar um armário, levam o estudante a generalizar a ideia incorreta de que velocidade constante requer força constante, mesmo em situações sem atrito [24, 25]. De fato, o atrito comumente nem é considerado como uma força atuando no objeto [24].

Similarmente, o significado da 2ª lei de Newton parece igualmente contraintuitivo aos alunos. Da lei fundamental da dinâmica decorre que, quando uma força é aplicada sobre um objeto, a velocidade final desse objeto depende não só do sentido e módulo da força, mas também do sentido e módulo da velocidade anterior (figura 3.1).

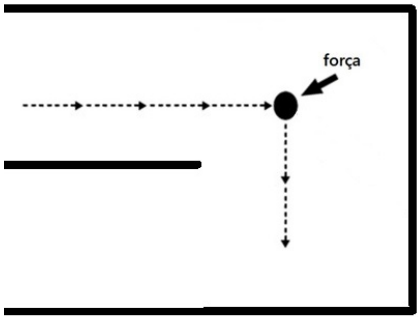


Figura 3.1: A velocidade após a aplicação de uma força é resultado de uma soma vetorial. Essa quase nunca é a primeira concepção dos alunos de física básica [1, 16].

Contudo, os alunos esperam que um objeto sempre se mova no sentido da força aplicada, mesmo se antes da força o objeto já estiver se movendo num sentido diferente [1, 16]. Nos casos em que o objeto já está se movendo, grande parte dos discentes também acreditam que o módulo da velocidade final depende apenas da força e que não tem relação com o módulo ou o sentido da velocidade anterior [1, 16, 25].

É curioso, ainda que já reconhecido em pesquisa em ensino de física [1, 2, 16, 25], que os alunos falhem em compreender o conceito de inércia e fazer previsões simples sobre o movimento de objetos, como a direção tomada por um objeto após um chute, já que empregam estratégias corretas em situações cotidianas, como uma partida de futebol, que em um estudo formal exigiriam o conceito. Caso contrário, ninguém marcaria um gol!

Entretanto, ressaltamos que não há contradição nesses casos. O mundo real é enormemente complexo e parece não satisfazer as leis de Newton à primeira vista. Voltamos a lembrar os desafios do trabalho de modelagem (seção 2.1), de reduzir um sistema complexo a seu modelo idealizado. A tarefa exige abstração e uma forma especfíca de raciocínio, que devem ser desenvolvidas pelo aluno. A instrução tradicional, no entanto, parece contribuir pouco para o desenvolvimento dessas capacidades ou para corrigir a discrepância entre as concepções dos estudantes e os conceitos newtonianos [25].

Nas próximas seções discutiremos dois trabalhos que procuraram enfrentar essas dificuldades utilizando jogos como ferramenta de ensino. Ambos realizaram análises quantitativas do resultado dessas intervenções. Como veremos, os trabalhos relataram sucesso na superação de algumas das concepções equivocadas discutidas nesta seção.

3.2 Os Jogos Newtonianos de Barbara White

Com o objetivo de auxiliar alunos do ensino médio norte-americano na aprendizagem de mecânica newtoniana, B. White [1, 26] elaborou e aplicou uma sequência de jogos num micromundo computacional. Uma análise quantitativa dos resultados dos alunos em testes possibilitou mensurar os efeitos dessa intervenção didática na aprendizagem.

O micromundo computacional dos jogos de White é regido pelas 1ª e 2ª leis de Newton:

> *1. Na ausência de forças, um objeto em repouso permanece em repouso enquanto um objeto em movimento permanece em movimento retilíneo uniforme.*
>
> *2. Sob a ação de uma força, um objeto sofre aceleração.*

Cada um dos jogos possui uma condição de vitória diferente, como fazer o objeto ultrapassar uma linha de chegada com o maior valor de velocidade instantânea possível ou atingir um alvo. A dificuldade dos jogos aumenta gradativamente ao longo da sequência. Como discutido na seção 2.2, esses objetivos visam atrair a atenção do aluno para diferentes aspectos das leis físicas.

Nos jogos o estudante controla o movimento de uma espaçonave, representada na tela do computador por um triângulo. Para isso ele aplica impulsos de intensidade fixa no sentido para o qual a nave está apontado (pressionando a tecla K) ou rotaciona a nave por um ângulo fixo no sentido horário (pressionando R). Se a nave alcançar a borda da tela ou colidir com uma parede o aluno "perde" o jogo, que é reiniciado.

Para explicitar o significado das leis de Newton, o micromundo é idealizado. A única força atuante no objeto é a do impulso aplicado pelo aluno, que age momentaneamente quando a tecla é pressionada. Não existem complicadores, como atrito ou gravidade.

Os dois primeiros jogos estão representados na figura 3.2. No primeiro, o estudante deve fazer a espaçonave ultrapassar uma linha de chegada com o maior módulo possível para sua velocidade instantânea. No segundo, deve mover a nave até uma área específica, sobre a qual deve pará-la. Esses jogos focam no efeito de forças aplicadas unidimensionalmente, causando aceleração, quando no sentido do movimento, ou desaceleração, quando no sentido contrário.

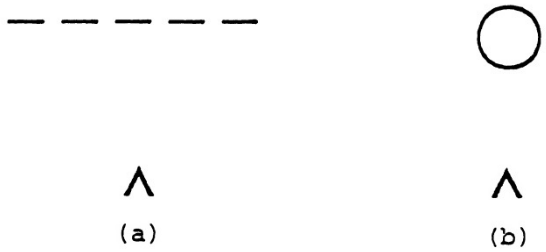


Figura 3.2: **(a) Jogo 1:** Sucessivos impulsos para cima aumentam cada vez mais a velocidade, até a espaçonave cruzar a linha; **(b) Jogo 2:** Para que a espaçonave pare sobre a área delimitada, é necessário o mesmo número de impulsos para cima e para baixo [1].

Do terceiro ao sexto jogo (figura 3.3), o aluno deve fazer a espaçonave contornar uma quina, sob condições diferentes em cada jogo: diferentes ângulos de mudança da orientação da espaçonave; velocidade inicial não-nula; e, por último, contornar a quina com um único impulso (ou dois, se contar o que inicia o movimento). Esses jogos focam no efeito de forças na mudança de direção, levando em conta o módulo e a direção da velocidade anterior, assim como a direção das próprias forças.

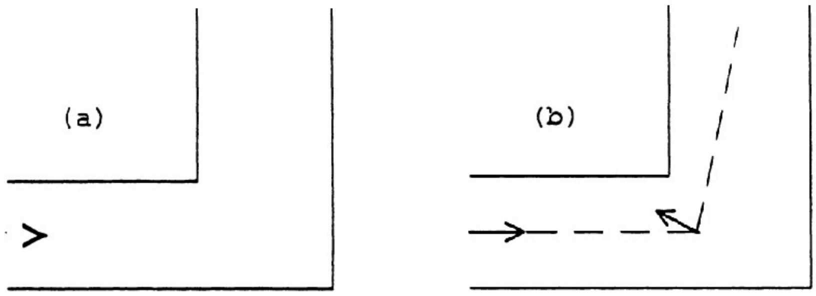


Figura 3.3: **(a)** Contornar uma quina é o desafio comum aos jogos de 3 a 6, sob diferentes condições; **(b)** Solução do jogo 6: um único impulso que forme um ângulo de 150° com a velocidade para direita é capaz de gerar na velocidade da espaçonave uma componente vertical para cima enquanto reduz significativamente a componente horizontal [1].

Do sétimo ao décimo primeiro jogo, a espaçonave deve atingir um alvo, também sob condições diferentes em cada jogo. Esses jogos são um pouco mais abertos, pois permitem uma variedade maior de estratégias vencedoras, mas que dependem da compreensão dos efeitos das forças nas mudanças tanto de valor quanto de direção da velocidade.

No estudo de White, desenvolvido em Boston, nos Estados Unidos, essa sequência de jogos foi utilizada para a instrução de 18 alunos seniores (correspondente ao último ano do ensino médio brasileiro), de idade média de 16,4 anos, que já haviam passado pela instrução formal das leis de Newton e da conservação de momento linear. Os alunos participaram das atividades voluntariamente em seu tempo livre.

A eficiência dos jogos como ferramenta didática foi avaliada por um conjunto de 16 questões[1] conceituais sobre força e movimento respondidas pelos alunos antes e depois de jogarem os jogos [26]. Segue abaixo o enunciado geral e duas questões desse teste, como exemplo (tradução nossa):

> *Tente imaginar uma espaçonave que viaja pelo espaço sideral, de forma que não haja atrito.*
>
> *A espaçonave é impulsionada por um motor especial que ir-*

[1] O questionário de White [26] possuía 13 questões, algumas com 2 ou 3 itens. Nossa discussão considera cada item como uma questão, por praticidade.

rompe numa força momentânea e depois desliga. Não é como um motor de carro em funcionamento constante, em vez disso, é como um chute ou empurrão.

Quando você ativa o motor, ele sempre fica ligado pelo mesmo intervalo de tempo e exerce a mesma intensidade de força. Isso significa que os impulsos têm sempre a mesma intensidade.

Esse impulso é dado na direção e no sentido para o qual a espaçonave está apontada. Você pode rotacionar a nave para aplicar um impulso de uma força na direção que desejar.

1. Suponha que você acione o motor duas vezes no mesmo sentido. A espaçonave se moverá mais rápido, mais devagar ou na mesma velocidade que se moveria se o motor fosse acionado apenas uma vez?

2. Suponha que a nave esteja inicialmente parada no espaço quando você aciona o motor uma vez para colocá-la em movimento. O que você pode fazer para que a nave pare?

Como os indivíduos respondiam às exatas mesmas questões antes e depois dos jogos, foi incluído no estudo um grupo de controle de 14 alunos, que, sem jogar, repetiram o teste no mesmo intervalo de tempo que o grupo experimental, para testar a hipótese de que apenas uma segunda aplicação do teste já poderia ser responsável por alguma melhora nos resultados.

Os resultados de White estão mostrados na tabela 3.1. As notas são normalizadas ao máximo de 1 e o ganho refere-se à diferença entre as médias do pós e pré-teste. Esses resultados mostram que os alunos que jogaram tiveram um ganho expressivo (0,18), muito maior que o daqueles que não jogaram (0,01). O teste-t de Student [27] mostra que esse resultado é estatisticamente significativo (t = 3,94; df = 30; p = 0,0002).

Ademais, os jogos foram especialmente bem-sucedidos em melhorar as respostas a algumas questões, como as duas indicadas na tabela 3.2. Os enunciados dessas duas questões (tradução e adaptação nossa) estão apresentados a seguir:

	Pré-teste	**Pós-teste**	**Ganho**
Grupo Experimental	0,43	0,61	0,18
Grupo de Controle	0,49	0,50	0,01

Tabela 3.1: Médias gerais e ganho no pré e pós-teste de cada grupo. As notas foram normalizadas a 1.

8. Faça um desenho e explique como você faria a espaçonave descrever uma trajetória circular.

12. Como você poderia fazer a espaçonave se mover com velocidade menor do que a gerada por um único impulso? Lembrando que você só consegue gerar impulsos de mesma intensidade.

QUESTÃO	QUANTIDADE DE ACERTOS	
	pré-teste	pós-teste
8	5	11
12	4	13

Tabela 3.2: Duas questões nas quais os jogos alcançaram grande efeito positivo e o número de estudantes do grupo experimental que responderam corretamente a essas questões no pré e pós-teste.

Entretanto, os jogos deixaram de produzir qualquer efeito positivo em outras questões, como as mostradas na tabela 3.3:

4b. Suponha que você acione o motor uma vez e, depois de algum tempo, gire a espaçonave 90°, *para então acionar o motor novamente. A espaçonave se moveria mais rápido, mais devagar ou na mesma velocidade que estava antes do segundo impulso?*

9. Faça um desenho e explique como você faria a espaçonave descrever uma trajetória quadrada.

11c. Se a espaçonave estivesse se movendo com velocidade constante em linha reta até entrar numa região do espaço com forte vento solar numa direção perpendicular à de seu movimento, como sua trajetória seria afetada?

QUESTÃO	QUANTIDADE DE ACERTOS	
	pré-teste	pós-teste
4b	10	9
9	6	5
11c	1	1

Tabela 3.3: Questões nas quais os jogos não alcançaram qualquer efeito positivo e o número de estudantes do grupo experimental que responderam corretamente essas questões no pré e pós-teste.

É importante notar que os enunciados das questões apresentadas aos alunos se referem diretamente a objetos e situações encontrados nos jogos. Elas não foram formuladas de maneira a generalizar o observado nos jogos para outros contextos, como o cotidiano.

Na próxima seção discutiremos o jogo de Shute et al. [2], intitulado "Parquinho de Newton", e seus resultados no ensino-aprendizagem de mecânica.

3.3 O "Parquinho de Newton" de Shute, Ventura e Kim

Valerie Shute, Matthew Ventura e Yoon J. Kim [2] desenvolveram e aplicaram um jogo chamado "Parquinho de Newton" ("Newton's Playground", no original) com o objetivo de melhorar a compreensão de conceitos de mecânica newtoniana por alunos dos anos finais do ensino fundamental. Os autores também analisaram quantitativamente o efeito do jogo sobre a aprendizagem.

O "parquinho" se dá num micromundo computacional regido pelas leis da mecânica newtoniana e que contempla conceitos fundamentais como equilíbrio, massa, gravidade e conservação de momento linear e energia.

O objetivo do jogo é levar uma bolinha verde até um balão vermelho, utilizando máquinas simples, como rampas, pêndulos, alavancas e molas. O jogador constrói essas máquinas desenhando-as na tela com o mouse. Por exemplo, para criar uma rampa o aluno simplesmente desenha uma reta, enquanto para criar um pêndulo o aluno pode desenhar qualquer forma presa a um pivô, de maneira que diferentes distribuições de massa transmitirão diferentes impulsos à bola. A figura 3.4 ilustra a solução de um jogador para um dos problemas do jogo, em que foi desenhado um pêndulo de formato similar ao de um taco de golfe.

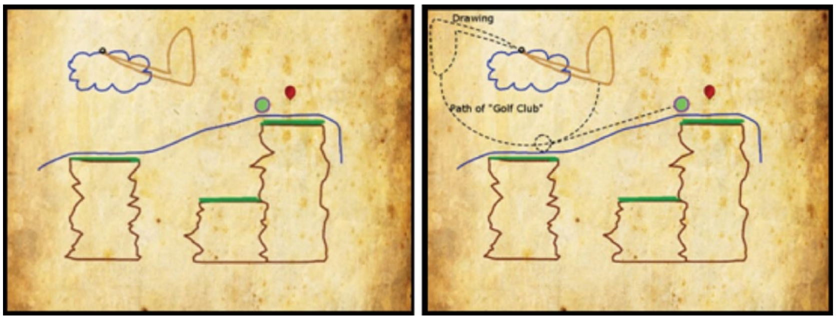


Figura 3.4: À esquerda, a solução de um dos problemas do "parquinho", utilizando um pêndulo com o formato de um taco de golfe e uma rampa. À direita, as trajetórias dos movimentos do pêndulo e da bolinha. A velocidade, o alcance e a trajetória da bola dependem da distribuição de massa do pêndulo desenhado, do ângulo em que foi abandonado e do ponto de impacto dos objetos [2].

O jogo possui 74 problemas (ou fases) similares ao da figura 3.4, que aumentam progressivamente em dificuldade. Essa dificuldade é dada por fatores como a localização inicial do balão em relação à bola, o número de obstáculos, o número de máquinas necessárias e a novidade do problema [2]. Em geral, cada problema é projetado explorar uma máquina e poucos conceitos físicos por vez.

O estudo foi desenvolvido na Flórida, Estados Unidos, e contou com 167 alunos de oitava e nona séries (correspondente às mesmas séries brasileiras), que jogaram um total de quatro horas de "Parquinho de Newton" num intervalo de uma semana e meia. Os alunos receberam um incentivo financeiro para participar das atividades.

Para mensurar o efeito do jogo na aprendizagem, foram empregados dois testes, identificados por A e B, cada qual composto de 12 questões conceituais sobre mecânica newtoniana. Um exemplo de questão, indicado pelos autores, está mostrado da figura 3.5. Essa é uma questão complexa e desafiadora, sobretudo para alunos de oitava e nona séries. É possível que o exemplo reflita a dificuldade das questões em geral e que essa dificuldade tenha relevância para a análise dos resultados.

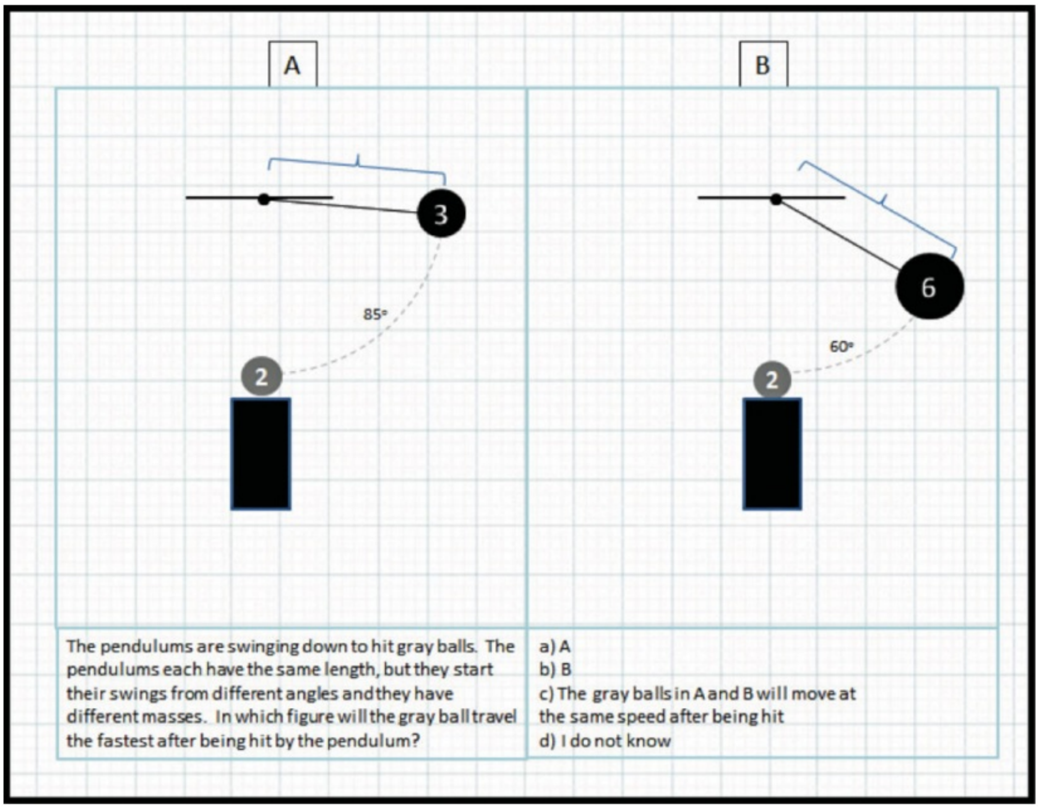


Figura 3.5: Exemplo de questão dos testes, escolhido por Shute et al.

Os alunos foram submetidos a um teste antes de jogar (pré-teste) e a outro após as quatro horas de jogo (pós-teste). Metade dos alunos respondeu ao teste A como pré-teste e ao teste B como pós-teste, enquanto a outra metade respondeu na ordem invertida.

Houve um aumento estatisticamente significativo (t = 2,12; df = 154; p < 0,05) na média geral do pré-teste para o pós-teste, indicando que jogar o “Parquinho de Newton” permitiu aos discentes aprimorarem seu entendimento conceitual sobre mecânica newtoniana [2]. Os autores classificaram os alunos de acordo com o engajamento no jogo, medido pelo número de fases jogadas, como baixo, médio ou alto. Dessa maneira, observaram que o ganho entre o pré-teste e o pós-teste foi maior para o grupo de engajamento alto e que não houve diferença estatisticamente significativa entre o pré e o pós-teste do grupo de engajamento baixo, como revela a tabela 3.4. Na impossibilidade de se formar um grupo de controle (que não jogaria), essa relação entre ganho e engajamento é evidência de uma contribuição do jogo para a melhora do desempenho no teste.

TABLE 2. Learning Gains and Engagement in Newton's Playground

Levels attempted in Newton's Playground/ Engagement	Pretest		Posttest	
	M	SD	M	SD
Low ($n = 47$)	5.77	2.39	5.81	2.55
Medium ($n = 52$)	6.52	2.17	7.00	2.11
High ($n = 55$)*	6.35	1.98	6.87	2.22

*$p < .05$.

Tabela 3.4: Médias do pré-teste e do pós-teste dos alunos agrupados conforme engajamento com o jogo: baixo, médio ou alto [2].

No próximo capítulo apresentaremos nossa proposta didática: jogos de modelagem computacional, nos quais o aluno pode explorar e experimentar com a modelagem do micromundo através da programação. Descreveremos a implementação dessa proposta no desenvolvimento de jogos sobre a relação entre força e movimento, sua aplicação em sala de aula e os efeitos na aprendizagem dos alunos. A discussão dos trabalhos de White e Shute et al. será retomada ainda mais à frente a título de comparação de seus resultados com os nossos.

Capítulo 4

Proposta Didática: Jogos sobre Força e Movimento

4.1 Aspectos Gerais da Proposta

Os jogos que desenvolvemos neste trabalho seguem princípios gerais que podem ser utilizados em qualquer área do ensino de física ou de outras disciplinas. Primeiramente, são jogos digitais que se passam num micromundo computacional que simula um sistema com base num conjunto simplificado de leis naturais ou concepções alternativas [5–7].

Em segundo lugar, é fundamental que o aluno consiga acessar esses jogos facilmente e possa jogá-los sem necessidade de instalar programas ou utilizar plataformas específicas. Os jogos que propomos podem ser acessados pelo navegador de internet de qualquer computador, tablet ou, principalmente, do próprio smartphone do aluno. Atualmente (2022), isso significa desenvolver os jogos na linguagem JavaScript para HTML5.

Outro aspecto importante presente em nossa proposta é que as poucas linhas de código que descrevem o modelo do micromundo são acessíveis ao aluno, separadas do código geral, como proposto por Jon Ogborn [8] (ver figura 2.4). Com isso ele pode alterar esse modelo utilizando apenas um editor de texto. É parte do que propomos que o aluno explore o código do micromundo, faça alterações e experimente com regras diferentes. Como discutido na seção 2.3, isso permite ao aluno avaliar suas concepções, comparar alternativas e compreender melhor os conceitos científicos, assim como seu aspecto de modelo.

Na seção a seguir, apresentaremos nossa implementação dessa proposta no ensino de mecânica. Descreveremos o jogo que densenvolvemos, os modelos físicos já configurados, opções extras que adicionam novos elementos aos modelos e como possibilitamos aos alunos modificarem o código.

4.2 Força e Movimento em Diferentes Micromundos

Nesta dissertação desenvolvemos um conjunto de três jogos, dos quais dois são baseados no jogo “Momentum” proposto por J. Ogborn e G. Marx [7] para explorar os modelos dinâmicos de Aristóteles e Newton, enquanto o terceiro amplia a ideia original, abordando também conceitos da relatividade restrita de Einstein. Os jogos são acessados pelo código QR disponível no apêndice A ou pelo link: `https://www.if.ufrj.br/~pef/producao_academica/dissertacoes/2022_Tarcisio_Cruz/jogo/dinamica.html`

A página inicial dos jogos é mostrada na figura 4.1. À esquerda estão instruções sucintas e à direita as opções dos “universos” nos quais o jogo pode se passar. Ao clicar em alguma das opções, o jogador é apresentado a uma breve descrição do efeito do empurrão no “universo” escolhido e pode iniciar o jogo, como no exemplo da figura 4.2.

Como objetivo comum aos três jogos, o jogador deve fazer um disco chegar ao final de um labirinto, evitando que se choque contra as paredes e dentro de um limite de tempo. Para isso, o jogador pressiona as setas do teclado ou botões de toque na tela para empurrar o disco. Empurrar significa aplicar uma força de intensidade fixa durante o tempo em que a tecla ou botão estiver sendo pressionado, resultando num impulso sobre o disco. A figura 4.3 apresenta um exemplo de labirinto.

Empurrões podem ser aplicados sobre o disco para a direita, esquerda, cima ou baixo. Empurrões simultâneos em dois sentidos diferentes se somam

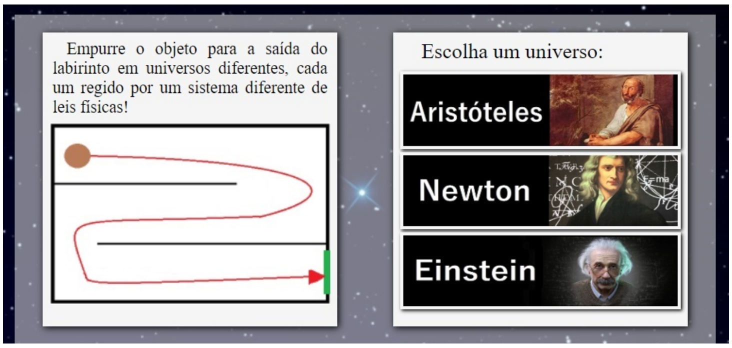


Figura 4.1: A página inicial dos jogos, tal como aparece no navegador da internet.

vetorialmente. Ou seja, empurrões simultâneos para cima e para direita resultam num empurrão inclinado de 45° e de maior intensidade.

Dependendo da escolha de universo – Aristóteles, Newton ou Einstein – os jogos se diferenciam pelo efeito que o empurrão causa sobre o movimento do disco. Em cada caso, esse efeito, ou seja, a lei de movimento do universo, é descrito por cerca de dez linhas de código que se encontram numa seção compacta e isolada do resto do programa. É nessas linhas que o aluno pode realizar alterações e experimentar para testar modelos mais complexos, modelar sistemas ou até mesmo seu próprio micromundo.

A seguir, em três subseções, discutiremos mais detalhadamente cada um dos universos. Apresentaremos como o movimento do disco se dá nos diferentes micromundos, as opções adicionais que implementamos em cada caso e as linhas de código computacional que estão acessíveis ao aluno.

4.2.1 Aristóteles

Aristóteles argumentava que a velocidade de movimento de um objeto é proporcional à força aplicada sobre ele[1] e inversamente proporcional à resistência oferecida pelo meio, na forma [28]:

[1]Estamos nos referindo aos movimentos que Aristóteles considerava como *violentos* e não daqueles tidos por ele como *naturais*, como o de uma pedra que cai ou de uma boia que sobe à superfície da água.

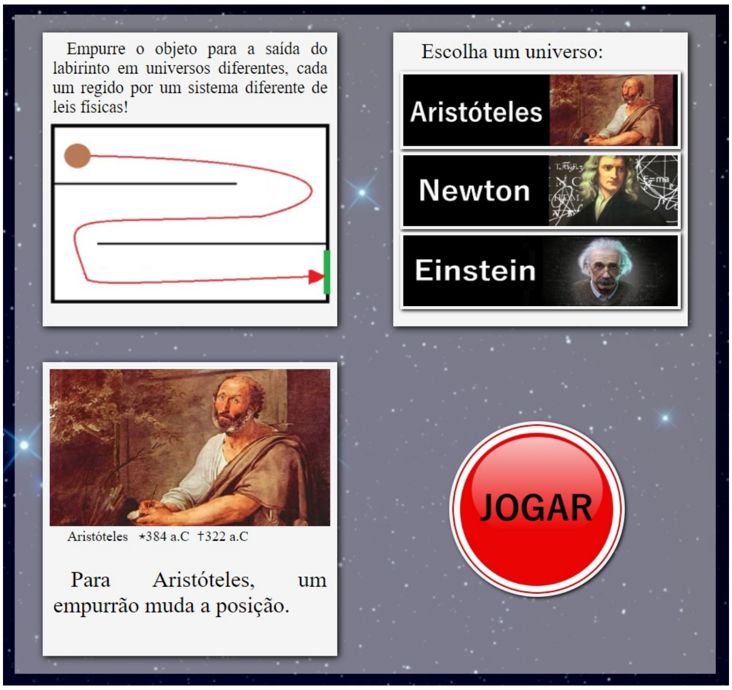


Figura 4.2: Após um clique na opção do "universo" de Artistóteles, a página apresenta a relação entre força e movimento nesse micromundo: um empurrão muda a posição. O jogo é iniciado com um clique no botão "jogar".

$$v = \frac{F}{R}$$

Dessa maneira, um objeto se moveria quando existisse força aplicada sobre ele e permaneceria ou voltaria ao repouso quando não houvesse força. Em conformidade, no universo de Aristóteles do jogo, o disco só se move enquanto estiver sob a ação de uma força. Isto é, à força está associada uma mudança na posição do disco. Como a força aplicada ao se pressionar a tecla ou botão tem intensidade fixa, o disco descreverá movimento uniforme enquanto a força estiver sendo aplicada, como ilustrado na figura 4.4. Ademais, o disco voltará ao repouso quando a força cessar.

Esse comportamento e sua explicação, ainda que equivocada, podem parecer bastante razoáveis ao aluno, pois condiz com muitas experiências cotidianas, como discutido na seção 3.1. É como empurrar um armário de um lugar a outro do quarto: o armário praticamente só se move enquanto o

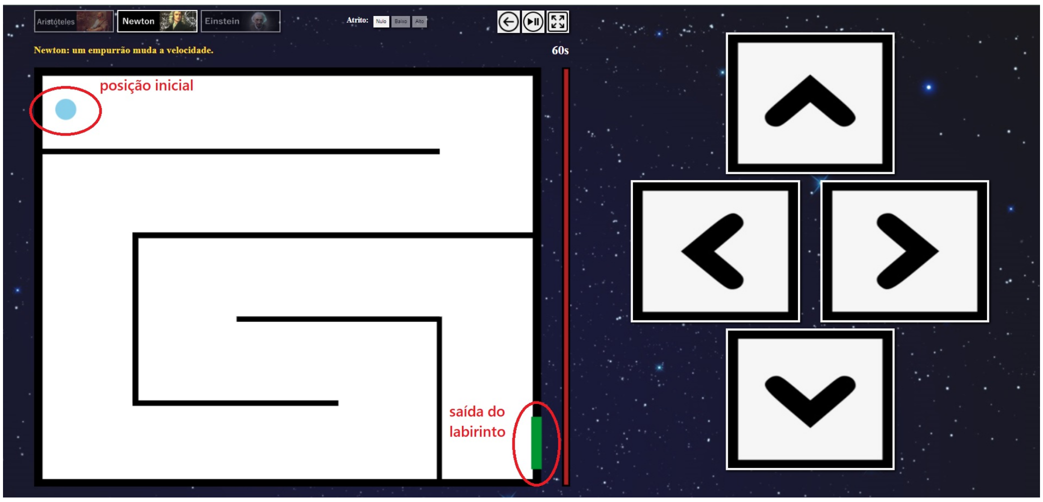


Figura 4.3: O labirinto é iniciado com o disco no canto superior esquerdo; a saída (verde) se encontra no canto inferior direito. O tempo é indicado à direita do labirinto pelo número e pela barra vermelha. As setas são botões que só aparecem em dispositivos com tela de toque, como smartphones e tablets.

empurramos; se a aplicação da força cessar, o movimento também cessa.

Também não é um desafio contornar uma quina no universo aristotélico, como ilustra a figura 4.5. Mesmo que o jogador venha pressionando continuamente para direita, se para de pressionar para direita e apenas pressiona para baixo quando chegar à quina, o movimento horizontal cessa imediatamente e o disco passa a se mover para baixo: não existe inércia!

O modelo de micromundo aristotélico está descrito pelo código computacional da figura 4.6, do qual a mera leitura é instrutiva. Nesse código, *empurrax* e *empurray* se referem às forças associadas à interação do jogador, através das teclas, enquanto *fx* e *fy* descrevem, respectivamente, as componentes horizontal e vertical da força resultante (outras forças podem ser acrescentadas aos empurrões). Tanto *empurrax* quanto *empurray* possuem intensidade fixa de uma unidade, positiva ou negativa, definida com base nas dimensões da tela.

O segundo conjunto de linhas descreve o efeito das componentes da força resultante sobre o movimento; é isso que distingue os micromundos de Aristóteles, Newton e Einstein. Também é experimentando com essa relação entre

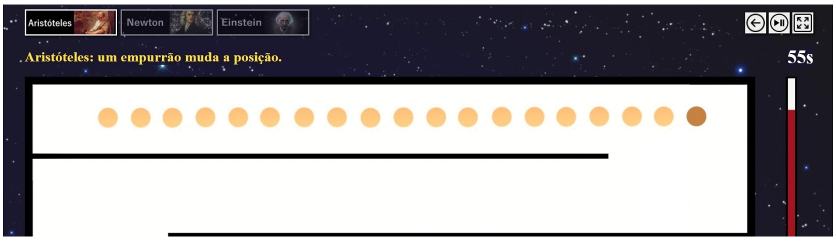


Figura 4.4: Posições sucessivas do disco quando o botão para direita é pressionado continuamente no micromundo aristotélico. Já que a intensidade do empurrão é fixa, a posição do disco tem variações iguais em intervalos de tempo iguais.

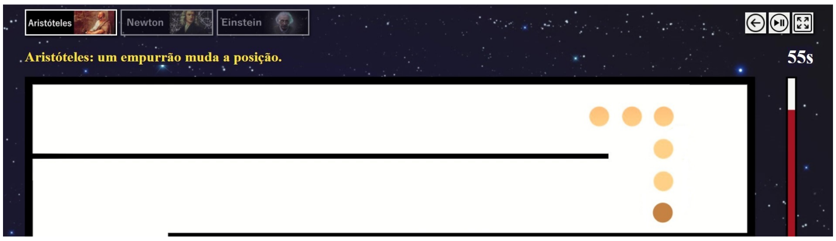


Figura 4.5: Não existe inércia no universo aristotélico. O jogador consegue contornar a quina mudando a direção do movimento disco de 90° apenas deixando de pressionar para direita e passando a pressionar para baixo.

força resultante e movimento no código do jogo que o aluno pode testar diferentes leis, criar seu próprio "universo" e praticar modelagem matemática.

No universo aristotélico, as componentes horizontal e vertical da velocidade (vx e vy) têm o valor da componente da força resultante na direção correspondente dividida pela resistência do meio (R). O valor $R = 1$ é assumido por padrão mas pode ser alterado pelo aluno nesse mesmo código. Na ausência de forças, a velocidade será nula e o disco não se moverá, enquanto sob ação de uma força constante o disco se moverá com velocidade constante.

As linhas seguintes, que definem o deslocamento em um pequeno intervalo de tempo (dt), são praticamente idênticas nos três micromundos. A variável xa é a posição horizontal no início desse intervalo de tempo. A posição horizontal xd depois de transcorrido o intervalo será igual a xa mais o deslocamento horizontal ocorrido nesse intervalo, dado pelo produto da velocidade vx por dt. As variáveis ya e yd são análogas para a direção vertical.

```
var dinamicaaristoteles = function() {

    //Força resultante
    fx = empurrax
    fy = empurray

    //O que a força resultante causa?
    //Velocidade
    vx = fx/R
    vy = fy/R



    //Deslocamento
    xd = xa + vx*dt
    yd = ya + vy*dt

    //Tempo
    td = ta + dt
}
```

Figura 4.6: As linhas de código computacional que descrevem as leis de movimento do micromundo aristótelico. O código define como força, velocidade e posição mudam em um pequeno intervalo de tempo. Nesse micromundo, a velocidade é proporcional à força resultante.

Finalmente, a última linha descreve a passagem do tempo.

Esse comportamento, no entanto, não condiz com inúmeros movimentos observados na natureza: uma flecha não altera substancialmente seu movimento horizontal enquanto está no ar, depois de deixar de sofrer força da corda do arco, assim como uma bola não para imediatamente após ser chutada. A mecânica newtoniana, por outro lado, nos permite descrever com precisão tanto o movimento do armário, considerando o atrito com o chão, quanto os movimentos da flecha e da bola. É uma teoria precisa e mais geral, portanto mais adequada, do que a aristotélica, para qualquer movimento cotidiano. A subseção a seguir tratará de como a 1ª e a 2ª leis de Newton são exploradas pelo jogo.

4.2.2 Newton

A 1ª lei de Newton elabora o conceito de inércia, primeiro proposto por Galileu, descrevendo como, na ausência de forças, um objeto em repouso permanece em repouso, enquanto um objeto em movimento permanece em movimento, em trajetória retilínea e com velocidade constante.

O efeito de uma força sobre o movimento dos corpos é dado pela 2ª lei de Newton, de forma que à força está associada uma mudança na velocidade: a aceleração é igual à força dividida pela massa, sendo essa uma medida da inércia do objeto. Ou seja, apesar de serem responsáveis por colocar em movimento um corpo que está em repouso, forças não são necessárias para manutenção desse movimento.

Desse modo, no universo newtoniano do jogo, enquanto estiver sob ação da força de intensidade fixa, o disco descreverá movimento uniformemente variado (figura 4.7). Em contrapartida, na ausência de forças, o disco seguirá em movimento uniforme. Ainda, se o disco já estiver em movimento e passar a sofrer força constante numa direção diferente, o disco passará a descrever uma trajetória curvilínea (figura 4.8).

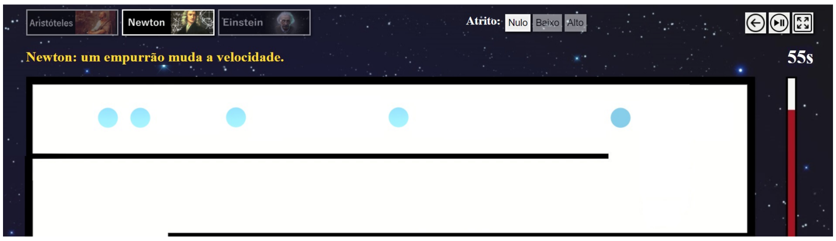


Figura 4.7: Posições sucessivas do disco quando o botão para direita é pressionado continuamente no micromundo newtoniano. Já que a intensidade do empurrão é fixa, a velocidade do disco tem variações iguais em intervalos de tempo iguais e seu deslocamento em intervalos sucessivos é cada vez maior.

O universo newtoniano é sempre iniciado, por padrão, com atrito nulo, para evidenciar o comportamento descrito nos parágrafos anteriores e explicitar o significado da 1ª e 2ª leis de Newton. Entretanto, para que o micromundo possa representar melhor algumas situações reais, o jogo conta com duas outras opções de atrito: baixo e alto. Por exemplo, a opção de

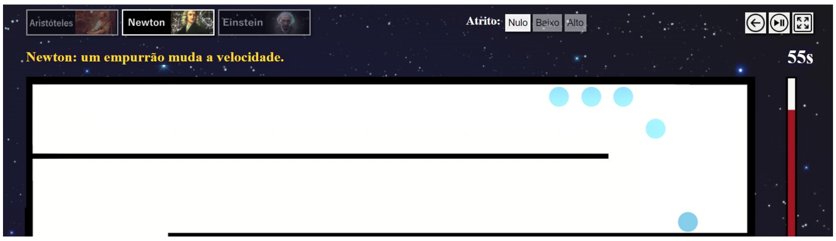


Figura 4.8: Quando o jogador deixa de pressionar o botão para direita, o movimento horizontal não cessa, mas continua com velocidade constante, por inércia. Se passar a pressionar continuamente para baixo, o disco descreverá um arco de parábola.

atrito baixo é capaz de representar movimentos como o de uma bola sobre uma superfície razoavelmente lisa, enquanto a opção de atrito alto pode representar movimentos como o de um armário sendo empurrado.

Vale notar que o comportamento do micromundo newtoniano com atrito alto se aproxima bastante de um micromundo aristotélico, parecendo o último um caso particular do primeiro. Isso justifica a afirmação de que a teoria newtoniana é mais geral, além de mais precisa e, portanto, mais adequada, do que a aristótelica.

O código computacional da figura 4.9, do qual a leitura é novamente proveitosa, define a dinâmica do universo de Newton. As variáveis *fx* e *fy* continuam representando as componentes horizontal e vertical da força resultante, da mesma maneira que *empurrax* e *empurray* continuam representando as forças associadas ao controle do jogador. Agora *atritox* e *atritoy* se referem às forças de atrito em cada direção.

A principal diferença entre os universos de Aristóteles e de Newton está nos próximos dois conjuntos de linhas do código. No micromundo newtoniano, as componentes da aceleração (ax e ay) têm o valor da componente da força resultante na direção correspondente dividida pela massa (m, constante).

A variável *vxd* representa a componente horizontal da velocidade depois de um pequeno intervalo de tempo. Ela será igual à velocidade horizontal anterior (*vxa*) acrescida da variação de velocidade nesse intervalo de tempo, dada por $ax \times dt$. O procedimento para a direção vertical é análogo.

```
var dinamicanewton = function() {

    //Força resultante
    fx = empurrax + atritox
    fy = empurray + atritoy

    //O que a força resultante causa?
    //Aceleração
    ax = fx/m
    ay = fy/m


    //Variação da velocidade
    vxd = vxa + ax*dt
    vyd = vya + ay*dt


    //Deslocamento
    xd = xa + vxa*dt
    yd = ya + vya*dt

    //Tempo
    td = ta + dt
}
```

Figura 4.9: As linhas de código que representam as leis físicas do micromundo newtoniano. Diferentemente do micromundo aristotélico, no micromundo newtoniano a aceleração, e não a velocidade, é proporcional à força resultante. As linhas que descrevem a variação da posição nos dois universos são praticamente idênticas.

É importante notar que a 2ª lei de Newton, $F = ma$, é muitas vezes tomada pelos estudantes como uma relação puramente algébrica, embora seja essencialmente uma equação diferencial: $d^2x/dt^2 = F/m$. Essa equação pode ser separada em duas equações de primeira ordem,

$$\frac{dv}{dt} = \frac{F}{m} \quad , \qquad \frac{dx}{dt} = v$$

que dizem, basicamente, como a força muda a velocidade e como a velocidade muda a posição. É essa última forma que, no código computacional, define as regras de variação da velocidade posição: $a = F/m$, $dv = a\,dt$ e $dx = v\,dt$.

Assim, o código computacional do micromundo newtoniano evidencia o aspecto mais importante da 2ª lei de Newton: dada uma força, a lei mostra como a velocidade varia em um pequeno intervalo de tempo.

Os dois últimos conjuntos de linhas são praticamente iguais entre os micromundos de Aristóteles e de Newton. Os deslocamentos são dados pelas velocidades multiplicadas pelo intervalo de tempo.

Além disso, o aluno é encorajado a experimentar com o código de Newton para modelar diferentes sistemas nesse mesmo micromundo. Para isso, configuramos de antemão diversas constantes que o aluno pode pensar em usar, como gravidade ou campo elétrico, em unidades compatíveis com as dimensões do labirinto (por exemplo, $peso = 0{,}4$). Dessa maneira, o aluno pode tentar modelar o movimento de uma carga imersa em um campo elétrico uniforme ou um labirinto vertical, no qual sempre existe a ação do peso do disco, agindo como uma força constante para baixo (figura 4.10).

O estudante também pode experimentar com o efeito da força resultante sobre o movimento para criar um "universo" totalmente novo e avaliar a validade de outros modelos físicos. Por exemplo, seria adequada uma teoria dinâmica na qual $F \propto da/dt$?

Apesar de a mecânica clássica de Newton estar estabelecida como principal teoria dinâmica para descrever movimentos do cotidiano e diversas aplicações científicas e tecnológicas, ela falha em alguns casos extremos, pois não considera o limite da velocidade da luz, o qual nenhuma partícula massiva pode alcançar. Nesses casos, convém adotar a mecânica relativística de Einstein. Na subseção a seguir discutiremos brevemente alguns conceitos fundamentais da mecânica einsteiniana e como alguns aspectos dessa teoria são explorados no jogo.

```
var dinamicanewton = function() {

    //Força resultante
    fx = empurrax + atritox
    fy = empurray + atritoy + peso

    //O que a força resultante causa?
    //Aceleração
    ax = fx/m
    ay = fy/m


    //Variação da velocidade
    vxd = vxa + ax*dt
    vyd = vya + ay*dt


    //Deslocamento
    xd = xa + vxa*dt
    yd = ya + vya*dt

    //Tempo
    td = ta + dt
}
```

Figura 4.10: Código para um labirinto vertical, criado pela mudança de uma única linha do código. A componente vertical da força resultante passa a ser a força da interação do jogador, se houver, somada a uma força constante para baixo (*peso*), cujo valor está pré-programado.

4.2.3 Einstein

Einstein postulou que a velocidade da luz é a mesma para qualquer referencial inercial, o que estabelece essa velocidade como velocidade limite, o qual nenhum corpo provido de massa pode alcançar.

Conforme a velocidade do movimento de um corpo aumenta e se torna comparável à velocidade da luz, como acontece com partículas subatômicas, por exemplo, a “massa relativística” $m_r = m/\sqrt{1 - v^2/c^2}$ desse corpo também aumenta, passando a ser cada vez mais difícil continuar aumentando sua velocidade ou alterar seu movimento em qualquer medida. Nessas condições também surgem outros efeitos relativísticos, como a dilatação do tempo e a contração do espaço.

No universo de Einstein do jogo o movimento do disco, agora representando uma partícula relativística, é observado do referencial do labirinto, considerado inercial. O impulso sobre a partícula gera uma variação em seu momento linear, que, inicialmente, corresponde a uma variação de velocidade. Entretanto, quando a velocidade da partícula se torna suficientemente próxima à da luz, os impulsos passam a aumentar cada vez mais sua massa relativística e cada vez menos sua velocidade.

O tamanho do disco que representa a partícula é contraído na direção do movimento, em relação a seu comprimento próprio, por ser observado no referencial do labirinto. O tempo é considerado como sendo medido também no referencial do labirinto, em repouso em relação ao jogador.

As figuras 4.11 e 4.12 ilustram esses efeitos, tanto de aumento da massa quanto de contração relativística. Pela figura 4.11 podemos perceber que inicialmente a velocidade da partícula aumenta como resultado da aplicação da força, mas logo passa a variar cada vez menos. A figura 4.12 ilustra o desafio de se realizar uma curva no universo einsteiniano: uma velocidade suficientemente grande está vinculada a uma maior inércia e, assim, a uma maior resistência também a mudanças de direção.

Figura 4.11: Posições sucessivas do disco no labirinto einsteiniano. Nos instantes iniciais, a velocidade da partícula aumenta com a aplicação da força, entretanto a partir de uma velocidade suficientemente próxima à da luz, se torna cada vez mais difícil aumentar a velocidade. O jogo também mostra a contração relativística do disco, observada do referencial do labirinto.

Por padrão, o universo einsteiniano sempre inicia com uma escala dimensional na qual um impulso razoavelmente pequeno é capaz de colocar o disco numa velocidade comparável à da luz, de forma que os efeitos relativísticos sejam facilmente percebidos. Contudo, nesse micromundo é possível ajustar

Figura 4.12: É ainda mais difícil realizar uma curva no universo einsteiniano do que no newtoniano. Se a velocidade do disco ao chegar à curva for muito alta, sua massa relativística será enorme e, portanto, ele tenderá a continuar em linha reta, mesmo sobre ação de uma força.

a escala da velocidade da luz para que esta seja maior ou menor em relação às dimensões do labirinto e à intensidade dos impulsos. Com essa opção é possível verificar que quanto maior for a velocidade da luz na escala do labirinto, menos perceptíveis serão os efeitos relativísticos e mais o micromundo einsteiniano se assemelhará ao newtoniano, como ilustrado pela figura 4.13.

Figura 4.13: Se a velocidade da luz for um limite distante, como ocorre em situação cotidianas, os efeitos relativísticos serão pequenos, comumente imperceptíveis. Nesse caso, o movimento da partícula no universo de Einstein será similar ao movimento newtoniano.

A velocidade da luz tem um valor altíssimo em relação a quaisquer fenômenos cotidianos, de modo que efeitos relativísticos são imperceptíveis nesses casos. A mecânica clássica de Newton, portanto, permanece suficiente e precisa em situações ordinárias, assim como em muitas aplicações científicas e tecnológicas. A mecânica newtoniana pode, portanto, ser compreendida como um caso particular da mecânica relativística, embora em seu domínio de validade a primeira seja de grande importância prática.

A figura 4.14 apresenta o código computacional do micromundo einsteiniano. Apenas o segundo e o terceiro conjunto de linhas diferem em relação ao newtoniano, pois descrevem o efeito da força sobre o movimento da partícula e como é calculada sua velocidade, respectivamente.

```
var dinamicaeinstein = function() {

    //Força resultante
    fx = empurrax
    fy = empurray

    //O que a força resultante causa?
    //Variação do momento linear
    pxd = pxa + fx*dt
    pyd = pya + fy*dt

    //Energia Relativística
    E = Math.sqrt((pxd**2 + pyd**2)*c**2 + m**2*c**4)

    //Velocidade em função do momento e da energia
    vxd = pxd*c**2/E;
    vyd = pyd*c**2/E;



    //Deslocamento
    xd = xa + vxa*dt
    yd = ya + vya*dt

    //Tempo
    td = ta + dt
}
```

Figura 4.14: O código computacional que representa o movimento relativístico no micromundo einsteiniano. A variação do momento relativístico é calculada em primeiro lugar; só então a velocidade e o deslocamento são obtidos.

Na relatividade especial, a 2ª lei de Newton é generalizada na forma

$$\frac{dp}{dt} = F \tag{4.1}$$

onde o momento relativístico é dado por $p = m_r v$ (m_r é a massa relativística).

A velocidade é calculada em termos do momento pela fórmula

$$v = \frac{c^2 p}{E}\,, \tag{4.2}$$

na qual a energia relativística é dada por

$$E = \sqrt{p^2c^2 + m^2c^4}\,. \tag{4.3}$$

No programa, *pxa* e *pxd* representam a componente horizontal do momento da partícula antes e depois de um pequeno intervalo de tempo. A variação dessa componente do momento é dada pelo impulso da força horizontal nesse intervalo, que é $fx \times dt$ (ver a equação 4.1). O procedimento é análogo para a componente vertical. Em seguida, as componentes da velocidade depois do intervalo de tempo são calculadas a partir das equações 4.2 e 4.3. O deslocamento é obtido da mesma forma que nos universos de Aristóteles e Newton.

O fator de Lorentz e a contração do comprimento próprio estão descritos apenas no código geral, para evitar sobrecarregar o estudo do comportamento dinâmico no código computacional que foi separado. Vale lembrar que nosso maior interesse é que o aluno investigue e compare os efeitos de uma força no movimento do disco em cada universo.

No próximo capítulo, discutiremos os resultados da aplicação desses jogos em sala de aula. Os jogos foram utilizados como ferramenta para o ensino de mecânica a alunos do 9º ano do ensino fundamental e, em menor número, do ensino médio. Pré-testes e pós-testes conceituais foram utilizados para realizar uma análise quantitativa do efeito dos jogos na aprendizagem.

Capítulo 5

Aplicação em Sala de Aula

5.1 Considerações Gerais

Nossa proposta didática com os jogos foi aplicada a cerca de 200 alunos, majoritariamente do nono ano do ensino fundamental e, em menor número, da segunda e terceira séries do ensino médio, todos de uma rede de escolas privadas da cidade do Rio de Janeiro. As atividades ocorreram no último bimestre do ano letivo de 2021, antes das provas finais.

Logo antes da utilização dos jogos, foi solicitado aos alunos que respondessem a um pré-teste de compreensão de mecânica newtoniana, composto de questões sobre fundamentos de cinemática e a 1ª e 2ª leis de Newton. Todos os alunos já haviam tido alguma instrução formal sobre esses assuntos, menos aprofundada no caso do nono ano, em ocasiões não relacionadas com a atividade.

Não houve obrigatoriedade nem qualquer forma de recompensa pela participação ou melhor desempenho, de forma que 38 alunos (cerca de 20% do total) responderam ao teste. Desses, 27 eram de turmas de nono ano do ensino fundamental.

Os alunos jogaram em seus *smartphones* durante cerca de dois tempos de 50 minutos como atividade em aula presencial, em dias diferentes. A atividade iniciou com os alunos jogando por cerca de vinte minutos, depois dos quais ocorreu uma sucinta exposição, de no máximo dez minutos, sobre os conceitos explorados através dos "universos". Os alunos também receberam um texto de apoio, em formato digital, com o conteúdo dessa discussão (apêndice B). No restante do tempo os alunos jogaram com total liberdade, apenas com a sugestão de que dessem maior atenção à dinâmica no universo de Newton.

Em sua maioria, os alunos demonstraram interesse por jogar e por alcançar tempos menores em cada labirinto e permaneceram engajados por pelo menos trinta minutos. Em geral, os comentários foram de que o universo de Aristóteles era muito fácil e os de Newton e Einstein mais desafiadores e interessantes.

Num momento inicial, em Newton, muitos sequer conseguiam realizar a curva, por não perceberem a necessidade de força no sentido contrário ao movimento para cancelar o impulso inicial (veja a figura 3.1). Alguns poucos precisaram de orientação adicional para alcançar esse entendimento.

Depois de jogar por um tempo, quando questionados verbalmente, muitos alunos fizeram observações pertinentes e demonstraram ideias próximas aos conceitos newtonianos que esperávamos, como:

> "Em Aristóteles, não tem inércia!"
>
> "Em Newton, se você continua pressionando no mesmo sentido, o disco fica cada vez mais rápido!"
>
> "Em Newton, quando chega na curva, se você só pressionar pra baixo, o disco continua indo para a direita. Você precisa pressionar no sentido contrário pra frear!"

Cerca de quinze minutos foram utilizados para apresentar o código do programa, aberto num computador, por meio de um projetor digital, e instruir em como poderiam ser realizadas alterações no micromundo, sobretudo do universo newtoniano (figura 4.10).

Ao final da primeira aula em que os alunos tiveram contato com os jogos, foi dado incentivo para que jogassem um pouco mais em casa, durante seu tempo livre, e experimentassem com o código das leis físicas em seus computadores domésticos. Como essa era uma atividade opcional, apenas quatro alunos mostraram interesse em experimentar com o código computacional.

Cerca de três semanas depois do pré-teste e do primeiro contato com os jogos, foi solicitado que os alunos respondessem a um pós-teste similar ao primeiro, mas com questões diferentes. 40 alunos responderam ao pós-teste, embora não fossem exatamente os mesmos avaliados no pré-teste. Desses, 36 cursavam nono ano do ensino fundamental.

Com o objetivo de avaliar o engajamento dos alunos com as atividades, também foi perguntado, como parte do pós-teste, o tempo que dedicaram aos jogos e se experimentaram com o código computacional.

A comparação entre os resultados dos alunos no pré-teste e no pós-teste, assim como o engajamento com o jogo e a experiência com o código, possibilitou uma análise quantitativa do efeito do jogo na compreensão de noções básicas de dinâmica newtoniana. Na próxima seção discutiremos o formato dos testes e os conteúdos avaliados.

5.2 Testes de Compreensão de Mecânica Newtoniana

Para avaliar o desempenho dos alunos e analisar o efeito da atividades com os jogos foi elaborado um par de testes de compreensão de mecânica newtoniana, identificados como modelos A e B. A necessidade de testes diferentes é justificada pelo curto intervalo entre suas aplicações, já que a avaliação baseada em um único modelo de teste poderia ser prejudicada por efeitos de memória. Os dois testes podem ser encontrados no apêndice C.

As questões dos testes são do mesmo tipo que as do *Force Concept Inventory* (FCI) [25]. São questões objetivas que apresentam uma opção correta, segundo a concepção newtoniana, em oposição a alternativas que se referem a concepções espontâneas comuns. Assim como as do FCI, não buscam avaliar o domínio do formalismo matemático, mas focam nos aspectos conceituais da aprendizagem de mecânica.

Os testes são compostos por 8 questões cada e foram planejados para avaliar a compreensão de conceitos explorados pelos jogos. Entretanto, as questões não se referem diretamente a situações presentes nos jogos, mas buscam transpor os conhecimentos de mecânica para situações variadas, inclusive cotidianas. Nesse sentido, as questões se diferenciam das encontradas nos testes feitos por White [1], que abordavam situações quase exclusivamente relacionadas ao seu jogo (seção 3.2).

Para que seja possível avaliar o ganho de aprendizagem a partir dos dois testes, idealmente eles devem ser equivalentes tanto em conteúdo quanto em dificuldade. A equivalência dos conteúdos foi atendida fazendo com que as questões de mesmo número em cada modelo abordassem situações similares, mas não idênticas. Um exemplo de questões similares está apresentado a seguir, uma do teste A e outra do B:

Teste A:

4. Suponha que você empurra um armário, porém <u>não</u> consegue movê-lo. O que podemos afirmar sobre as forças que atuam nesse armário?

a) Existe a força do empurrão e uma força de atrito com o chão. A força de atrito é maior e opõe-se à força do empurrão, por isso o armário não se move.

b) Existe a força do empurrão e uma força de atrito com o chão. A força de atrito é igual e opõe-se à força do empurrão, por isso o armário não se move.

c) Existe apenas a força exercida do empurrão, que não é suficiente para mover o armário.

d) Existe apenas a força de atrito, que impede o movimento.

e) Não existe força nenhuma atuando no armário, já que ele permanece em repouso.

Teste B:

4. Suponha que você empurra um armário e ele se move com <u>velocidade constante</u>. O que podemos afirmar sobre as forças que *atuam nesse armário?*

a) Existe apenas a força do empurrão, que move o armário.

b) Existe a força do empurrão e uma força de atrito com o chão. A força de atrito é igual e opõe-se à força do empurrão, por isso o armário permanece em movimento uniforme.

c) Existe a força do empurrão e uma força de atrito com o chão. A força de atrito opõe-se à força do empurrão, porém é menor, de forma que não é suficiente para impedir o movimento.

d) Existe a força do empurrão e uma força de atrito com o chão. Ambas têm o mesmo sentido do movimento, de forma que o armário consegue permanecer em movimento.

e) Não existe força nenhuma atuando no armário, já que ele permanece em movimento uniforme.

Garantir a equivalência do grau de dificuldade dos testes é mais complicado. Para minimizar o efeito global de uma possível diferença de nível de dificuldade, procedemos como Shute et al. [2] e dividimos nossos alunos em grupos que responderam ao pré-teste e pós-teste em modelos alternados. Dessa maneira, na ordem alfabética dos nomes dos alunos de cada turma, a primeira metade dos alunos recebeu o modelo A como pré-teste e o modelo B como pós-teste, enquanto a outra metade dos alunos fez os testes na ordem inversa. Com isso, tornou-se também possível avaliar a posteriori a equivalência da dificuldade dos dois testes, comparando os resultados dos dois subgrupos.

Na próxima seção apresentaremos os resultados dos alunos em cada teste e analisaremos o efeito da utilização dos jogos na aprendizagem de mecânica e o papel desempenhado por fatores específicos, como o engajamento e a experiência com o código computacional.

5.3 Resultados Principais

Dentre todos os alunos que jogaram e participaram das atividades em aula, 38 responderam ao pré-teste. Desses, 21 alunos responderam ao pré-teste no modelo A e 17 responderam ao modelo B. Já como pós-teste, 17 alunos responderam ao modelo B e 23 ao modelo A, totalizando 40 respostas. Apenas 19 alunos responderam tanto ao pré-teste quanto ao pós-teste. Nesse grupo, que chamaremos "pareado", 9 alunos responderam na ordem A-B e 10 na ordem B-A. O restante dos alunos respondeu somente ao pré ou ao pós-teste.

A tabela 5.1 apresenta as pontuações médias dos alunos em cada modelo e a média geral, no pré e pós-teste, em relação a uma pontuação máxima de 1. Os intervalos de confiança das médias, correspondentes a 95%, estão indicados entre parênteses. Devido ao tamanho de nossa amostra, empregamos a distribuição-t de Student para calcular esses intervalos[1].

	Pré-teste	**Pós-teste**
A-B	0,238 (0,182; 0,294)	0,316 (0,243; 0,389)
B-A	0,191 (0,104; 0,278)	0,272 (0,217; 0,327)
Geral	0,217 (0,168; 0,267)	0,291 (0,246; 0,335)

Tabela 5.1: Pontuações médias, normalizadas ao máximo de 1, no pré e pós-teste para cada ordem de modelos. As médias gerais correspondem a todos os alunos, independentemente da ordem. Entre parênteses é dado o intervalo de confiança de 95% de cada média.

As médias gerais que constam na tabela 5.1 estão apresentadas no gráfico na figura 5.1, no qual as barras de erro correspondem ao intervalo de confiança. Esses resultados apontam um aumento na média dos alunos do pré para o pós-teste, sugerindo que o uso do jogo teve um efeito positivo na aprendizagem.

Para verificar se efeito encontrado não foi fruto do acaso, é importante analisar a significância estatística da diferença entre as médias do pré e pós-teste. Há, entretanto, uma dificuldade nisso. Idealmente, gostaríamos que

[1] Uma discussão acessível sobre o tratamento estatístico de dados, e da distribuição-t de Student em particular, está no capítulo 5 do livro *Experimentation and Measurement*, de W. Youden [27].

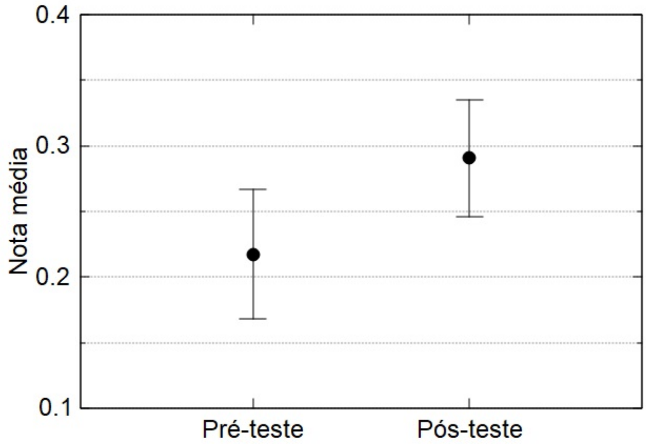


Figura 5.1: Média geral dos alunos no pré e no pós-teste. As barras de erro representam o intervalo de confiança de 95%. A diferença entre as médias é de 0,074.

fossem avaliados exatamente os mesmos alunos em ambos os testes, ou seja, que todos fossem pareados, o que resultaria em maior precisão estatística. Na prática, porém, mais da metade dos avaliados respondeu somente a um dos testes.

Essa situação leva a duas possibilidades: restringir a comparação apenas aos alunos pareados, o que tem a desvantagem de ignorar grande parte da amostra e, portanto, prejudicar a precisão da análise estatística; ou analisar todos os resultados como se fossem independentes, o que também ignora parte da informação colhida e prejudica, portanto, a precisão.

Comparar grupos "mistos", ou seja, com elementos pareados e não pareados, é um problema conhecido e, felizmente, diversos trabalhos propõem métodos para enfrentá-lo. Dentre as possíveis soluções, escolhemos a proposta por B. Derrick, D. Toher e P. White [29], que desenvolveram um procedimento que pode ser empregado nessas circunstâncias. Além disso, produziram e disponibilizaram uma biblioteca na linguagem *R* para realizar os cálculos de forma prática. Utilizamos essa biblioteca em nosso estudo.

A tabela 5.2 indica os valores do ganho (pós-teste menos pré-teste) na média geral de nossos alunos, com o intervalo de confiança de 95% entre parênteses, e o valor-p associado[2], obtido pelo teste-t de Student [27] em cada método de análise: (i) apenas as amostras pareadas, (ii) as amostras consideradas como totalmente independentes, e (iii) o método proposto por Derrick et al. para amostras mistas. Esses resultados também estão representados no gráfico da figura 5.2.

Método	**Ganho**	**Valor-p**
Pareado	0,059 (-0,017; 0,135)	0,120
Independente	0,074 (0,006; 0,141)	0,033
Misto	0,074 (0,017; 0,130)	0,012

Tabela 5.2: Ganho nos testes, com o intervalo de confiança de 95%, e o valor-p associado, para cada método de teste-t. O método misto apresenta maior precisão, com boa significância estatística (p = 0,012).

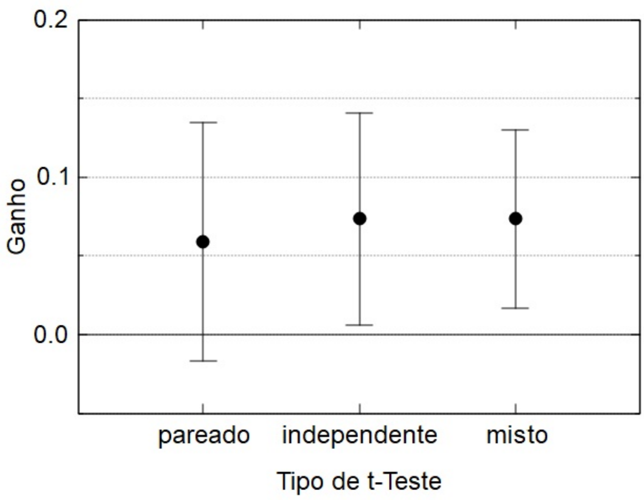


Figura 5.2: Ganho nos testes, com barras de erro representando o intervalo de confiança de 95%. Da esquerda para a direita no gráfico estão: (i) apenas as amostras pareadas, (ii) as amostras consideradas como totalmente independentes, (iii) amostras mistas.

Tomaremos como representação mais adequada dos nossos resultados aqueles auferidos pelo método misto. Esses resultados indicam um ganho

[2]O valor-p é a probabilidade da diferença encontrada ser uma flutuação estatística, para a hipótese nula de nenhuma diferença.

positivo e estatisticamente significativo no desempenho nos testes e, em alguma medida, na aprendizagem em mecânica.

5.4 Efeito do Envolvimento, Programação e Ordem dos Testes

Outras perspectivas interessante surgem da análise da relação entre o ganho e dois fatores: o envolvimento com o jogo e a experimentação com o código. Discutiremos essas relações nesta subseção. Verificaremos também que a ordem dos testes (*A*-*B* ou *B*-*A*) não teve influência sobre os resultados.

O gráfico da figura 5.3 apresenta o ganho nos testes em função do envolvimento dos alunos com o jogo. Alunos que responderam no pós-teste que jogaram cerca de 30 minutos ou menos (16 alunos) foram classificados como de engajamento baixo; aqueles que dedicaram mais tempo do que isso ao jogo (24 alunos) foram classificados como de engajamento alto.

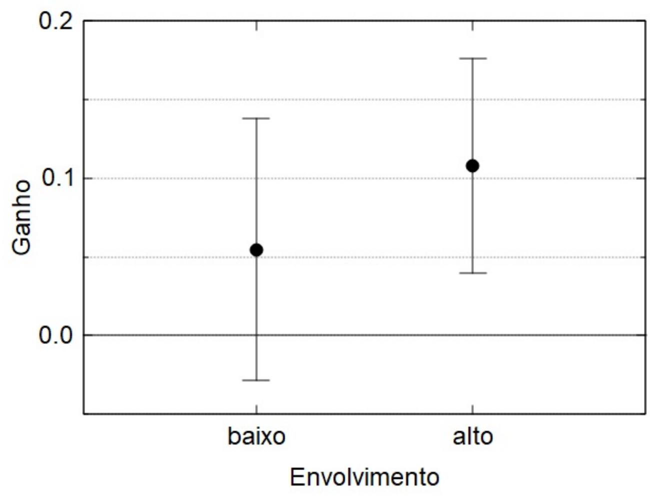


Figura 5.3: Ganho nos testes de acordo com nível de engajamento com o jogo. As barras de erro correspondem ao intervalo de confiança de 95%. Aqueles que dedicaram mais tempo ao jogo tiveram ganho estatisticamente significativo (p = 0,003). O ganho do grupo de baixo engajamento não é estatisticamente diferente de zero (p = 0.19).

Os resultados da figura 5.3 mostram que o grupo de envolvimento alto teve um ganho positivo estatisticamente significativo (p = 0,003). Já grupo o de envolvimento baixo não apresentou ganho estatisticamente diferente de zero (p = 0,18). Na ausência de um grupo de controle, essa relação entre ganho e engajamento é um bom indicador do efeito positivo do jogo sobre o desempenho nos testes.

Com relação à programação computacional do micromundo, apenas quatro alunos afirmaram em resposta ao pós-teste terem experimentado com código do jogo. O gráfico da figura 5.4 apresenta o ganho desses alunos em comparação ao daqueles que não experimentaram com o código computacional. O resultado sugere, embora com significância estatística modesta (p = 0,07), que experimentar com o programa teve um efeito maior que o de apenas jogar . Ainda que promissor, esse resultado requer maior investigação.

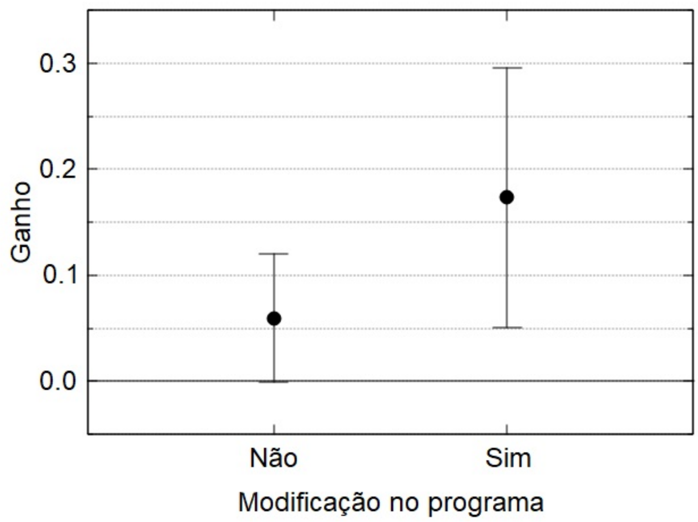


Figura 5.4: Ganho entre os testes dos alunos que experimentaram com o código e dos alunos que não o fizeram. Existe um ganho maior entre os alunos que modificaram o programa computacional em relação aos que não o fizeram, com significância p = 0,07.

Lembramos que a atividade de experimentação com o código foi totalmente opcional, a ser realizada em casa durante o tempo livre. Isso talvez explique porque poucos alunos tiveram interesse espontâneo pela programação, o que permitiria a análise mais conclusiva de uma amostra maior.

Por fim, podemos utilizar os resultados nos testes para avaliar a equivalência dos modelos A e B. Para isso, comparamos o ganho entre as médias dos alunos que realizaram pré e pós-teste na ordem de modelos A-B com as dos que seguiram a ordem B-A. O gráfico da figura 5.5 ilustra essa comparação. Dadas as barras de erro e a proximidade dos ganhos, não há qualquer evidência estatística de que os modelos de teste não sejam equivalentes.

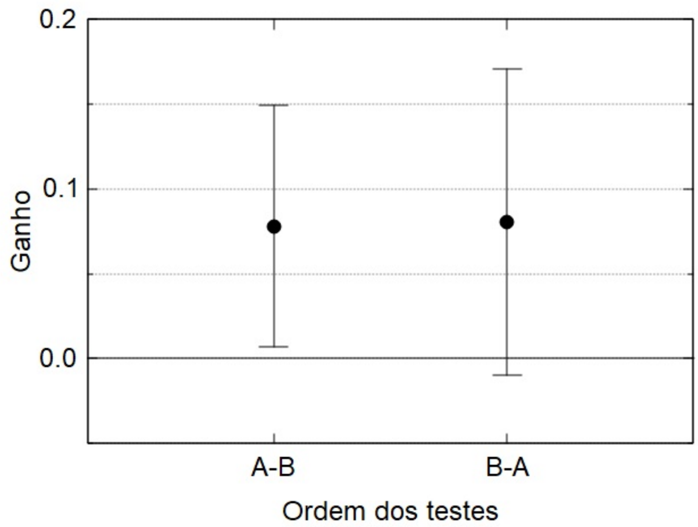


Figura 5.5: Ganho entre as médias no pré-teste e no pós-teste de acordo com a ordem dos modelos, A-B ou B-A. Não há qualquer evidência sugerindo que os modelos sejam discrepantes.

Apesar de nossos resultados indicarem o sucesso do jogo na promoção da aprendizagem de mecânica, a pontuação dos alunos, de maneira geral, foi bastante baixa, tanto no pré quanto no pós-teste. Isso possivelmente tem relação com o fato de que a maior parte dos alunos que responderam aos testes eram de turmas de nono ano do ensino fundamental e haviam tido apenas uma instrução inicial em leis de Newton.

Na próxima seção compararemos nossos resultados com os de trabalhos semelhantes, como os de White [1] e Shute et al. [2].

5.5 Comparação com os Resultados de White e Shute et al.

Os trabalhos de White e Shute, discutidos nas seções 3.2 e 3.3, respectivamente, também utilizaram jogos digitais para promover a aprendizagem de mecânica newtoniana, porém sem explorar a programação computacional. Ambos os trabalhos avalariam quantitativamente seus resultados por meio de testes, que indicaram um razoável progresso na aprendizagem associado aos jogos.

O gráfico da figura 5.6 apresenta o ganho de nossos alunos em comparação ao dos alunos de Shute e White em seus respectivos testes. Todas as pontuações foram normalizadas ao máximo de 1 ponto. Observa-se, pelas barras de erro, que nossos alunos alcançaram um ganho estatisticamente semelhante aos de Shute, e menor que os de White.

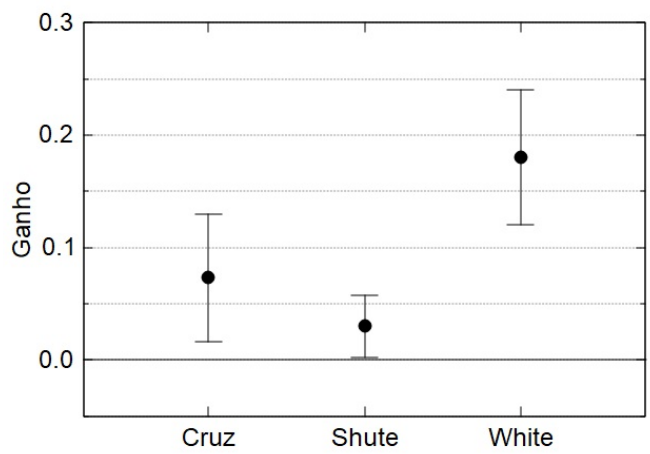


Figura 5.6: Ganhos encontrados neste trabalho (Cruz), comparados aos relatados por Shute et al. e White. As barras de erro representam os intervalos de confiança de 95%.

Vários aspectos devem ser considerados nessa comparação. O primeiro é a diferença no nível de dificuldade dos testes. É possível que os testes empregados por Shute sejam os mais difíceis entre os três trabalhos, tendo em mente o exemplo de questão que apresentaram (figura 3.5). Outro ponto é que White propôs questões que se relacionavam diretamente a situações encontradas em seu jogo. Ao contrário, as nossas buscavam transpor os conceitos explorados para situações variadas, inclusive cotidianas, independentes do jogo. Por fim, a maioria de nossos alunos não dedicou mais do que duas horas ao jogo, ao passo que a intervenção de Shute levou quatro horas e a de White, ainda que não especificado pela autora, provavelmente levou um tempo maior do que o nosso, tendo em vista o número de fases em seu jogo e a extensão de seu teste.

Outra comparação interessante entre nosso trabalho e o de Shute está ilustrada na figura 5.7, com relação ao engajamento com as atividades. Ambos os trabalhos encontraram ganho maior entre os alunos mais envolvidos que os menos envolvidos, embora com baixa significância estatística. Entretanto, no nosso caso os alunos de engajamento alto alcançaram um ganho positivo com alta significância estatística (p = 0,003), enquanto para Shute, nos grupos de engajamento médio e alto, a significância foi menor (p ≈ 0,05).

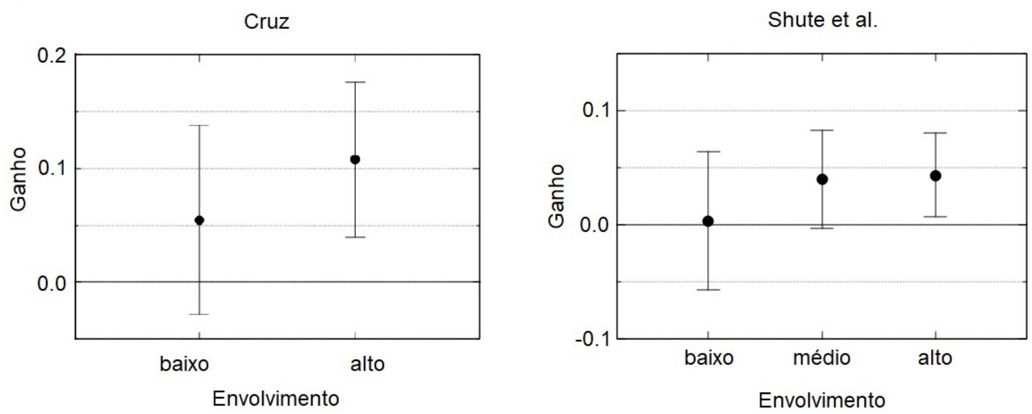


Figura 5.7: Ganho em função do envolvimento com os jogos. À esquerda, o presente trabalho. À direita, o trabalho de Shute.

Essas comparações mostram que nossa proposta tem resultados similares a trabalhos tidos como bem sucedidos no ensino de mecânica newtoniana. Alguns aspectos, entretanto, requerem uma investigação continuada. Sobretudo, um aprofundamento nas atividades de experimentação com programação computacional é promissor.

Capítulo 6

Comentários Finais

Jogos digitais são instrumentos de grande utilidade para o ensino da Física. Eles despertam o interesse do aluno e são capazes de evidenciar os principais aspectos das leis físicas num ambiente controlado. Seus objetivos, quando escolhidos convenientemente, promovem no aluno reflexões sobre suas concepções, espontâneas ou científicas. Diversos trabalhos relatados na literatura empregaram jogos como ferramenta didática e alcançaram resultados expressivos.

Porém, jogos geralmente têm seus modelos físicos escondidos. Às vezes, o jogador pode modificar alguns parâmetros, mas quase nunca pode alterar como eles se relacionam. Isso não deixa claro para o aluno que os micromundos de jogos digitais, com seus objetos e leis físicas, são modelos que podem ou não representar o mundo natural.

Uma forma de resolver esse problema é facilitar o acesso ao código computacional, principalmente à parte onde o modelo de micromundo é definido. Com isso o modelo escolhido se torna explícito, podendo ser comparado claramente a outros modelos ou teorias. Só assim é possível saber exatamente o que está sendo colocado a teste quando comparamos o comportamento do jogo ao de sistemas físicos. No fundo, o acesso ao programa torna o jogo uma atividade de modelagem científica.

Outro aspecto importante é que programação é uma espécie de linguagem, que se revela uma poderosa ferramenta de raciocínio e representação de ideias. Ela não apenas permite o exercício de modelagem científica, mas o facilita: o estudante expressa e desenvolve seus modelos mentais de uma forma algorítmica que pode ser muito reveladora.

Nesse sentido, propusemos a utilização de jogos de modelagem computacional para o ensino de física. Esses são jogos digitais que expõem seus modelos físicos, tanto permitindo a comparação entre diferentes modelos quanto a experiência com a programação computacional do código em si por parte do estudante. Também era parte importante da proposta que os jogos pudessem ser acessados e compartilhados facilmente, como ocorria antes da década de 1990. Isso voltou a ser possível, na forma de programas desenvolvidos na linguagem JavaScript para HTML5, que são executados em navegadores de internet.

Implementamos essa proposta no contexto da mecânica, com o propósito de enfrentar algumas das conhecidas dificuldades em sua aprendizagem. No jogo que desenvolvemos, o estudante deve mover um objeto para a saída de um labirinto, aplicando forças sobre ele. O efeito da força, por sua vez, depende do “universo” em que o jogo se passa, podendo seguir as teorias de Aristóteles, de Newton ou da relatividade restrita de Einstein.

No universo aristotélico, a força está associada à velocidade, de forma que um objeto sob ação de força constante descreverá movimento uniforme, enquanto na ausência de força o movimento cessa imediatamente. Ao comparar com fenômenos reais, o aluno pode perceber que esse modelo dinâmico é razoável para descrever o movimento de um armário sendo empurrado, mas incompatível com muitos outros movimentos cotidianos, como o de uma bola após um chute. O universo newtoniano é regido pela 1ª e 2ª leis de Newton: na ausência de forças, um objeto mantém seu estado de repouso ou de movimento uniforme; sob ação de força resultante, o objeto sofre aceleração. No jogo, esse universo também conta com diferentes opções de atrito, elemento presente em sistemas reais, de forma que o universo newtoniano é capaz de descrever o movimento da bola, do armário e de muitos outros objetos cotidianos. Além disso, o estudante pode perceber como o universo aristotélico se assemelha a um universo newtoniano em condições de atrito elevado, o que justifica o segundo como uma teoria dinâmica mais ampla e adequada.

No universo einsteniano, existe um limite para a velocidade do objeto. Esse limite coincide com a velocidade da luz no vácuo. Além disso, conforme sua velocidade se aproxima desse limite, ocorrem efeitos como o aumento da massa relativística e a contração de Lorentz. Nesse universo também há uma opção para alterar quão grande é a velocidade da luz em relação às dimensões do labirinto. Quando a velocidade da luz é muito grande, os efeitos relativísticos são muito pequenos. Dessa vez, o aluno pode compreender a mecânica newtoniana como um caso particular da mecânica relativística, com um domínio de validade de muita importância prática.

Os códigos que descrevem cada um desses três modos de jogo estão separados do resto do programa e acessíveis ao jogador. São cerca de uma dezena de linhas de código que podem ser exploradas pelo aluno. O estudo desse código auxilia na compreensão do principal significado das leis do movimento. No caso do universo newtoniano, as leis do micromundo são escritas de uma maneira que mais se assemelha à forma diferencial da 2ª lei de Newton. Ou seja, a programação é capaz de descrever o movimento dividindo a passagem do tempo em pequenos intervalos e, desse modo, revelar como evoluem a velocidade e a posição em razão de determinada força.

O estudo das linhas de código pode ser ainda mais aprofundado, uma vez que o aluno consegue modificá-las para modelar sistemas, como um labirinto vertical, na qual a força constante da gravidade está sempre presente ou até mesmo modelar um novo "universo", que respeite uma dinâmica diferente das três configuradas.

Aplicamos nossa atividade com o jogo em uma rede de colégios privados do Rio de Janeiro no final do ano letivo de 2021. Parte dos alunos respondeu voluntariamente a um pré-teste e a um pós-teste com questões conceituais e suas pontuações permitiram uma análise quantitativa dos efeito do jogo na aprendizagem de mecânica newtoniana.

Encontramos um desafio para realizar essa análise, pois grande parte dos alunos avaliados não eram os mesmos no pré e no pré-teste. Para não desperdiçar parte das informações coletadas – ao considerar os dois grupos como totalmente independentes ou comparar apenas o alunos que fizeram ambos os testes – utilizamos um método estatístico desenvolvido recentemente [29] que permite analisar observações pareadas e não pareadas em conjunto.

A análise revelou um ganho estatisticamente significativo entre as médias de nossos alunos no pré e no pós-teste. Ou seja, a utilização do jogo produziu um resultado positivo na aprendizagem dos alunos, sem que esses tivessem instrução específica em mecânica no período entre os testes.

O ganho foi comparável ao obtido por outros trabalhos considerados exitosos, como os de White [1] e Shute et al. [2]. Ainda, vale considerar a duração das intervenções e o tipo de questões avaliadoras. A maioria de nossos alunos não dedicou mais do que uma hora ao jogo, enquanto os alunos de Shute jogaram por cerca de quatro horas e os de White provavelmente um tempo ainda maior. Com relação às questões, as dos testes de White se referiam apenas a situações encontradas nos jogos, ao contrário das nossas, que transpunham os conceitos para situações variadas, inclusive cotidianas. Levando em conta esses fatores, nossos resultados talvez possam ser interpretados de maneira ainda mais otimista.

Encontramos também relação entre o tempo dedicado ao jogo, que consideramos como medida de engajamento, e o ganho nos testes, reforçando a conclusão de que há efeito devido exclusivamente ao jogo na melhora no desempenho dos alunos.

Ainda, analisamos o efeito da exploração do código computacional no ganho entre os testes. Contrariando nossas expectativas, poucos alunos se interessaram espontaneamente pela experimentação com o código, que foi sugerida, mas tratada como totalmente opcional. Os alunos que afirmaram terem explorado e realizado alterações com o código apresentaram maior ganho entre os testes, com modesta significância estatística.

Em futuras aplicações da proposta, planejamos dedicar mais tempo à atividade com programação durante aulas presenciais e buscar maneiras de estimular ainda mais a programação por parte do aluno em seu tempo livre. Dessa forma, será possível estudar o efeito da programação computacional na aprendizagem com maior precisão. Também consideramos a possibilidade de analisar o efeito do jogo na compreensão de conceitos específicos, com base no número de acertos em determinadas questões dos testes.

De maneira geral, nossos resultados são promissores. Esperamos que este trabalho inspire o desenvolvimento de novas propostas de utilização de jogos e programação no ensino ou, ao menos, tenha apresentado ao leitor possibilidades interessantes que ele talvez ainda não houvesse considerado.

Apêndice A

Jogo sobre Força e Movimento

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
Instituto de Física
Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física
Mestrado Profissional em Ensino de Física

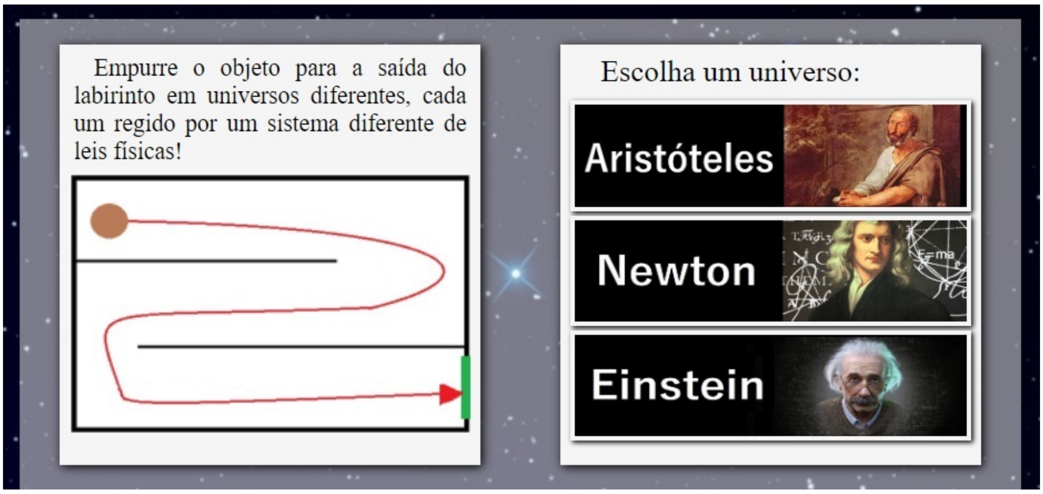
Jogo sobre Força e Movimento

Tarcisio Lima da Cruz

Carlos Eduardo Aguiar

Material instrucional associado à dissertação de mestrado de Tarcisio Lima da Cruz, apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física da Universidade Federal do Rio de Janeiro.

Rio de Janeiro
Setembro de 2022



Link para o jogo:

`https://www.if.ufrj.br/~pef/producao_academica/dissertacoes/2022_Tarcisio_Cruz/jogo/dinamica.html`

Código QR:

Apêndice B

Teorias do Movimento: Texto de Apoio

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
Instituto de Física
Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física
Mestrado Profissional em Ensino de Física

Teorias do Movimento:
Texto de Apoio

Tarcisio Lima da Cruz

Carlos Eduardo Aguiar

Material instrucional associado à dissertação de mestrado de Tarcisio Lima da Cruz, apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física da Universidade Federal do Rio de Janeiro.

Rio de Janeiro
Setembro de 2022

As teorias do movimento

Desde a antiguidade, o movimento é um dos principais temas no estudo da natureza. Entretanto, por mais estranho que pareça, as noções atuais da maioria das pessoas a respeito do movimento são partes de um esquema da física que foi proposto há mais de 2000 anos – e demonstrado ser inexato e insuficiente há pelo menos 1400 anos.[1]

Aristóteles

Esse esquema seria a teoria dinâmica proposta por Aristóteles, um dos mais importantes filósofos da Grécia Antiga. Segundo essa teoria, sem força não há movimento.

Uma ideia como essa condiz com muitas experiências cotidianas, como empurrar um armário de um lugar a outro do quarto: O armário só se move enquanto empurramos; se a aplicação da força cessar, o movimento também cessa.

Newton

Por outro lado, outras experiências, igualmente cotidianas, demonstram que essa teoria é inexata: imagine um chute dado numa bola de futebol. Pensando no movimento horizontal da bola, esta é posta em movimento pela força do chute e, mesmo depois de perder contato com o pé do jogador e sem nada mais a empurrando, continua se movendo.

De fato, Aristóteles estava errado! Na ausência de forças, um objeto em movimento se mantém em movimento. Essa é a ideia central do importantíssimo conceito de inércia proposto por Galileu Galilei e desenvolvido por Isaac Newton, dois dos cientistas mais importantes da Idade Moderna e os responsáveis por muitas das bases da Física atual.

Também segundo Newton, as forças são responsáveis por mudanças de velocidade: pondo em movimento um corpo que está parado; aumentando ou diminuindo a velocidade de um corpo em movimento; ou alterando a direção do movimento.

Contudo, como isso poderia estar de acordo com o armário que só se move enquanto empurramos?

Em muitos casos, existem outras forças além das que fazemos ao empurrar um armário ou chutar uma bola. Nesses casos, por exemplo, agem forças como o atrito com o chão ou a resistência do ar. Essas forças podem ser mais intensas, como no caso do armário, e fazer parar o movimento quase imediatamente ou

[1] De acordo com I. Bernard Cohen em “O Nascimento de uma Nova Física”. Excelente livro, disponível em português.

podem ser mais fracas, como no caso da bola, que também vai parar, depois de um tempo maior.

Einstein

A teoria de Newton falha em alguns casos extremos, como quando a velocidade do movimento se aproxima da velocidade da luz, o que pode ocorrer com partículas subatômicas.

Einstein mostrou que nenhum corpo com massa pode alcançar a velocidade da luz no vácuo. Por causa desse limite, conforme o corpo se aproxima da velocidade da luz, torna-se cada vez mais difícil alterar sua velocidade.

Nenhum objeto cotidiano, porém, alcança sequer um milésimo da velocidade da luz, de forma que esses efeitos são desprezíveis no nosso dia a dia. Portanto, a teoria de Newton é suficiente e precisa em situações cotidianas e em muitas aplicações científicas e tecnológicas.

Apêndice C

Testes de Compreensão de Mecânica Newtoniana

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
Instituto de Física
Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física
Mestrado Profissional em Ensino de Física

Testes de Compreensão de Mecânica Newtoniana

Tarcisio Lima da Cruz

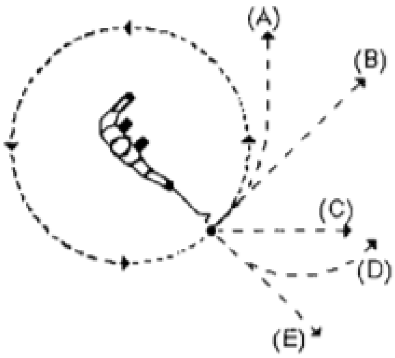
Carlos Eduardo Aguiar

Material instrucional associado à dissertação de mestrado de Tarcisio Lima da Cruz, apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física da Universidade Federal do Rio de Janeiro.

Rio de Janeiro
Setembro de 2022

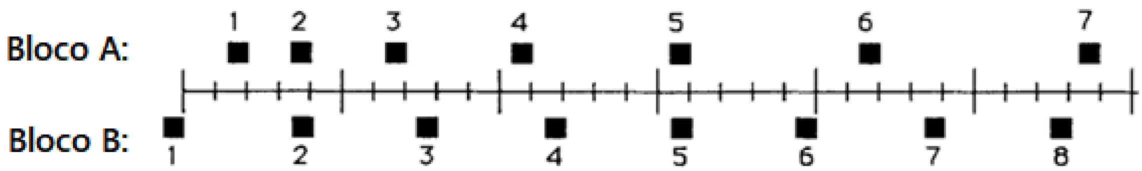
Teste A

1. Você amarra uma pedra com barbante e a gira horizontalmente sobre sua cabeça. O diagrama a seguir representa essa situação como vista de cima. Quando a pedra passa pelo ponto indicado no diagrama o barbante se rompe. Qual alternativa melhor representa a trajetória da pedra após o rompimento do barbante?



Considere o enunciado e a figura a seguir para responder as próximas duas questões:

As posições de dois blocos, A e B, em intervalos de tempo iguais e sucessivos, estão representadas nos quadrados numerados da figura a seguir. Os blocos estão se movendo da esquerda para a direita.



2. O que podemos afirmar sobre o movimento dos blocos?

a) Ambos os blocos realizam movimento uniforme.
b) Ambos os blocos realizam movimento variado.
c) O bloco A realiza movimento uniforme, enquanto o bloco B realiza movimento variado.
d) O bloco A realiza movimento variado, enquanto o bloco B realiza movimento uniforme.
e) Não há dados suficientes para classificar o movimento dos blocos.

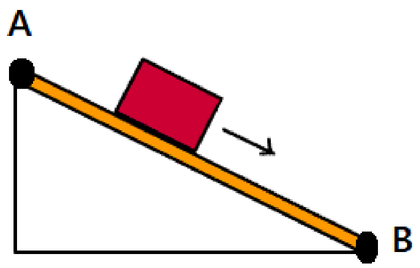
3. Em algum instante os blocos têm a mesma velocidade?

a) Não.
b) Sim, nos instantes 2 e 5.
c) Sim, apenas no instante 5.
d) Sim, em algum instante dentro do intervalo de 3 até 4.
e) Sim, em algum instante dentro do intervalo de 4 até 5.

4. Suponha que você empurra um armário, porém não consegue movê-lo. O que podemos afirmar sobre as forças que atuam nesse armário?

a) Existe a força do empurrão e uma força de atrito com o chão. A força de atrito é maior e opõe-se à força do empurrão, por isso o armário não se move.
b) Existe a força do empurrão e uma força de atrito com o chão. A força de atrito é igual e opõe-se à força do empurrão, por isso o armário não se move.
c) Existe apenas a força exercida do empurrão, que não é suficiente para mover o armário.
d) Existe apenas a força de atrito, que impede o movimento.
e) Não existe força nenhuma atuando no armário, já que ele permanece em repouso.

5. Uma caixa desce deslizando sobre uma rampa do ponto A ao ponto B, como representado na figura a seguir. Sua velocidade aumenta uniformemente com o tempo.



Sobre essa situação e as forças que atuam sobre a caixa, analise as afirmativas a seguir:

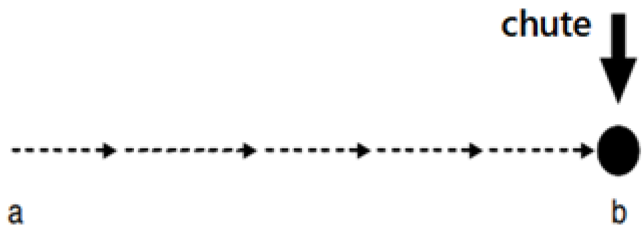
I. A resultante das forças é não nula e tem sentido de A para B.
II. A resultante das forças aumenta com o tempo.

Estão corretas as afirmativas:

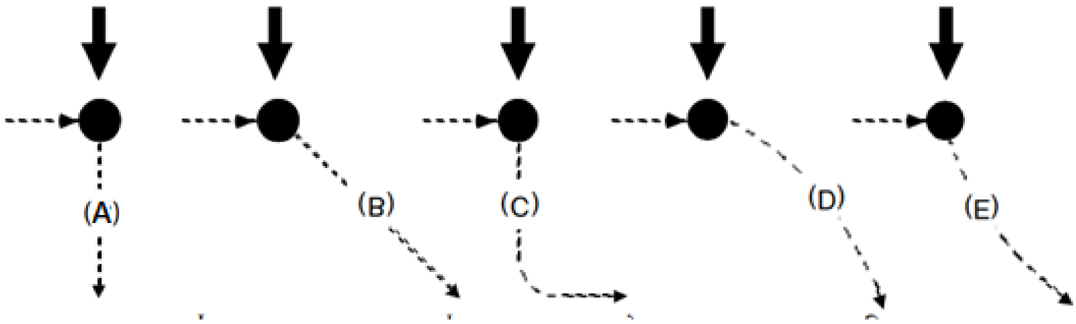
a) I, apenas.
b) II, apenas.
c) I e II.
d) Nenhuma.
e) Não há informações suficientes para avaliar a afirmativa II.

Considere o enunciado e a figura a seguir para responder as próximas três questões:

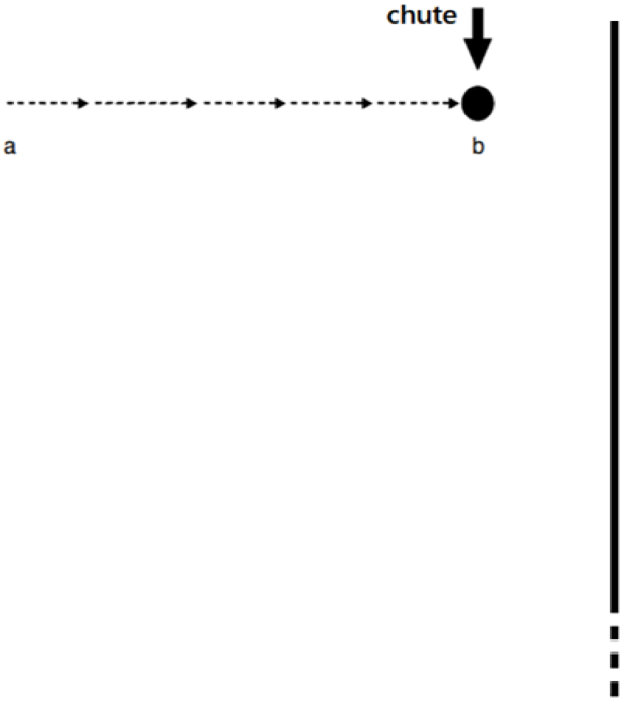
A figura a seguir representa um disco que se move no chão sem atrito e com velocidade constante do ponto A ao ponto B. Você está no ponto B. Quando o disco passa por você, você o chuta no sentido indicado, perpendicular a AB.



6. Qual alternativa melhor representa a trajetória do disco depois do seu chute?



7. Um muro muito extenso está à direita e perpendicularmente à trajetória anterior ao chute, como representado na figura a seguir.



Se você não desse o chute, o disco atingiria o muro 2 segundos depois de passar por você. Com o chute, o disco:

a) Atingirá o muro nos mesmos 2 segundos.
b) Atingirá o muro em menos de 2 segundos.
c) Atingirá o muro em mais de 2 segundos.
d) Não atingirá o muro.
e) Sem saber a intensidade do chute, é impossível dizer se o disco atingirá o muro ou o tempo para que isso ocorra.

8. A partir do instante em que o disco perde contato com seu chute, a velocidade do disco:

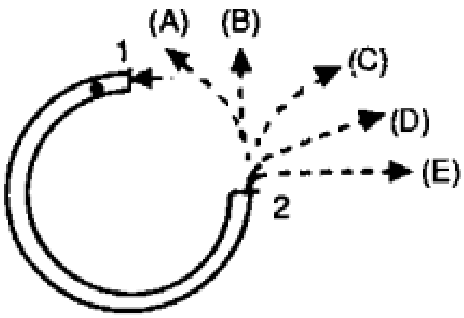
a) Aumenta continuamente.
b) Diminui continuamente.
c) Permanece constante.
d) Aumenta por alguns instantes, depois começa a diminuir.
e) Permanece constante por alguns instantes, depois começa a diminuir.

Gabarito do Teste A:

1. B
2. D
3. D
4. B
5. A
6. B
7. A
8. C

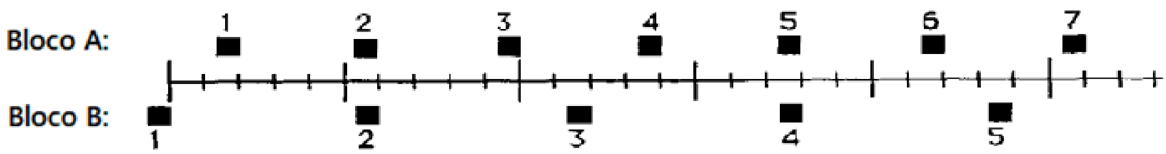
Teste B

1. A figura a seguir representa um trilho semicircular fixado numa mesa horizontal. Uma bolinha entra pelo ponto 1 e sai pelo ponto 2. Qual alternativa melhor representa a trajetória da bolinha ao sair por 2 e rolar pela mesa?



Considere o enunciado e a figura a seguir para responder as próximas duas questões:

As posições de dois blocos, A e B, em intervalos de tempo iguais e sucessivos, estão representadas nos quadrados numerados da figura a seguir. Os blocos estão se movendo da esquerda para a direita.



2. O que podemos afirmar sobre o movimento dos blocos?

a) Ambos os blocos realizam movimento uniforme.
b) Ambos os blocos realizam movimento variado.
c) O bloco A realiza movimento uniforme, enquanto o bloco B realiza movimento variado.
d) O bloco A realiza movimento variado, enquanto o bloco B realiza movimento uniforme.
e) Não há dados suficientes para classificar o movimento dos blocos.

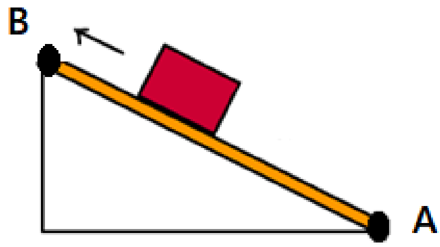
3. Em algum instante os blocos têm a mesma velocidade?

a) Não.
b) Sim, em todos os instantes
c) Sim, apenas no instante 2.
d) Sim, em algum instante dentro do intervalo de 2 até 3.
e) Sim, em algum instante dentro do intervalo de 4 até 5.

4. Suponha que você empurra um armário e ele se move com velocidade constante. O que podemos afirmar sobre as forças que atuam nesse armário?

a) Existe apenas a força do empurrão, que move o armário.
b) Existe a força do empurrão e uma força de atrito com o chão. A força de atrito é igual e opõe-se à força do empurrão, por isso o armário permanece em movimento uniforme.
c) Existe a força do empurrão e uma força de atrito com o chão. A força de atrito opõe-se à força do empurrão, porém é menor, de forma que não é suficiente para impedir o movimento.
d) Existe a força do empurrão e uma força de atrito com o chão. Ambas têm o mesmo sentido do movimento, de forma que o armário consegue permanecer em movimento.
e) Não existe força nenhuma atuando no armário, já que ele permanece em movimento uniforme.

5. Uma caixa sobe uma rampa, deslizando do ponto A ao ponto B, como representado na figura a seguir. Sua velocidade diminui uniformemente com o tempo.



Sobre essa situação e as forças que atuam sobre a caixa, analise as afirmativas a seguir:

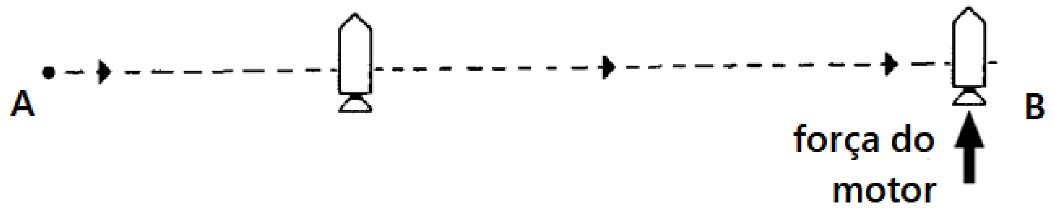
I. A resultante das forças é não nula e tem sentido de A para B.
II. A resultante das forças diminui com o tempo.

Estão corretas as afirmativas:

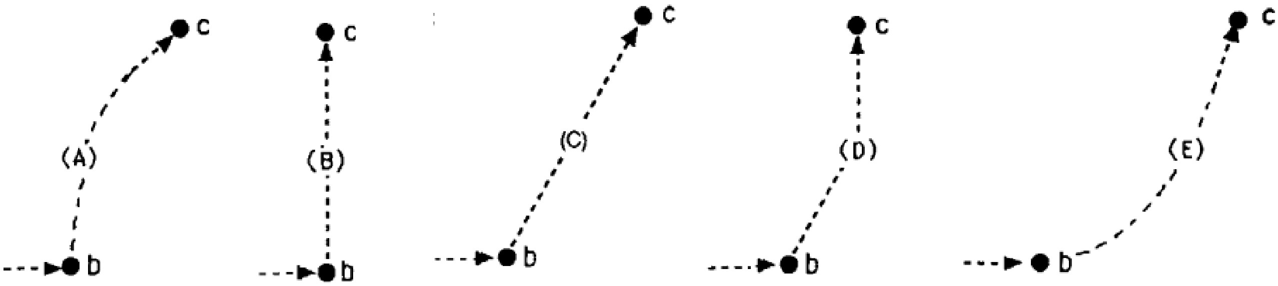
a) I, apenas.
b) II, apenas.
c) I e II.
d) Nenhuma.
e) Não há informações suficientes para avaliar a afirmativa II.

Considere o enunciado e a figura a seguir para responder as próximas três questões:

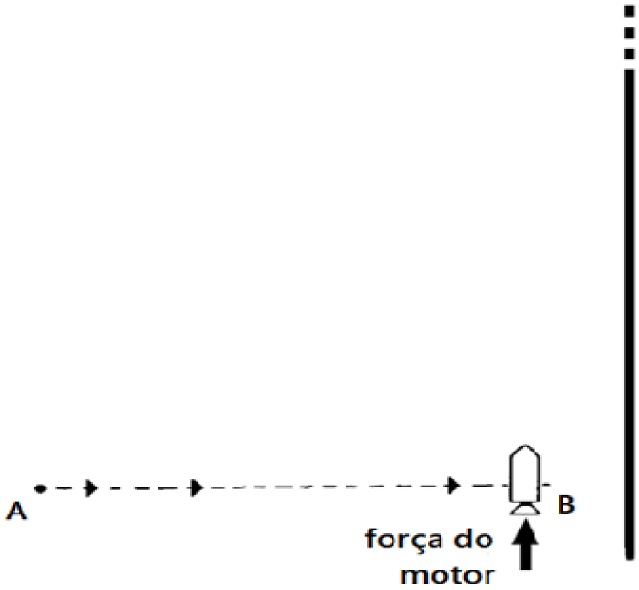
A figura a seguir representa um foguete que se move lateralmente no espaço do ponto A ao ponto B com velocidade constante e seus motores desligados. No ponto B os motores são acionados de forma a produzir sobre o foguete uma força constante perpendicular a AB, como indicado na figura.



6. Qual alternativa melhor representa a trajetória do foguete até um ponto C, enquanto os motores permanecem ligados?



7. O foguete está aproximando de um dos anéis de Saturno, representado na figura pela linha à direita, perpendicular à trajetória AB.



Se os motores permanecessem desligados, o foguete alcançaria o anel de Saturno 1 minuto depois de passar por B. Com o acionamento dos motores o foguete:

a) Alcançará o anel no mesmo 1 minuto.
b) Alcançará o anel em menos de 1 minuto.
c) Alcançará o anel em mais de 1 minuto.
d) Não alcançará o anel.
e) Sem saber a intensidade da propulsão dos motores, é impossível dizer se o foguete alcançará o anel de Saturno ou o tempo para que isso ocorra.

8. Se os motores forem desligados novamente, a partir desse momento a velocidade do foguete:

a) Aumentará continuamente.
b) Diminuirá continuamente.
c) Permanecerá constante.
d) Aumentará por alguns instantes, depois permanecerá constante.
e) Permanecerá constante por alguns instantes, depois começará a diminuir.

Gabarito do Teste B:

1. B
2. A
3. A
4. B
5. D
6. E
7. A
8. C

Referências Bibliográficas

[1] B. White, *Designing Computer Games to Help Physics Students Understand Newton's Laws of Motion*, Cognition and Instruction, v. 1, n. 1, p. 69 (1984).

[2] V. Shute, M. Ventura, Y. Kim, *Assessment and Learning of Qualitative Physics in Newton's Playground*, The Journal of Educational Research, v. 106, p. 423 (2013).

[3] G. Marx, *Simulation games in science education*, European Journal of Science Education, v. 6, n. 1, p. 31 (1984).

[4] G. Marx, E. Tóth, *Models in science education*, Impact of science on society, v. 31, n. 4, p. 389 (1981).

[5] G. Marx, *Some simulations of science – part 1*, Physics Education, v. 16, p. 152 (1981).

[6] G. Marx, *Some simulations of science – part 2*, Physics Education, v. 16, p. 212 (1981).

[7] G. Marx, *Games Nature Plays* (Eötvös University, 1984).

[8] J. Ogborn, D. Wong, *A microcomputer dynamical modelling system*, Physics Education, v. 19, p. 138 (1984).

[9] A. diSessa, *Changing Minds: Computers, Learning, and Literacy* (MIT Press, 2000).

[10] A. diSessa, *Computational Literacy and "The Big Picture" Concerning Computers in Mathematics Education*, Mathematical Thinking and Learning, v. 20, n. 1, p. 3 (2018).

[11] D. Hestenes, *Modeling Games in the Newtonian World*, American Journal of Physics, v. 60, n. 8, p. 732 (1992).

[12] V. López, M. Hernández, *Scratch as a computational modelling tool for teaching physics*, Physics Education, v. 50, n. 3, p. 310 (2015).

[13] C. Aguiar, *Informática para o ensino de física* (Fundação CECIERJ, 2009).

[14] V. Teodoro, R. Neves, *Mathematical modelling in science and mathematics education*, Computer Physics Communications, v. 182, p. 8 (2011).

[15] B. Wilson, *Metaphors for instruction: Why we talk about learning environments*, Educational Technology, v. 35, n. 5, p. 25 (1995).

[16] S. Papert, D. Watt, A. diSessa, S. Weir, *Final report of the Brookline Logo Project: Part II*, cap. 6 (MIT Artificial Intelligence Laboratory, 1979).

[17] B. Sherin, *A Comparison of Programming Languages and Algebraic Notation as Expressive Languages for Physics*, International Journal of Computers for Mathematical Learning, v. 6, p. 1 (2001).

[18] D. Stern, *A Different Kind of Multiplication*, Welcome to my World, 2007. Disponível em: `http://www.phy6.org/outreach/edu/roman.htm`. Acesso em: 24/01/2022.

[19] Galileu, *Dialogues Concerning Two New Sciences*, traduzido para inglês por H. Crew, A. de Salvio (Northwestern University, 1939).

[20] H. Abelson, A. diSessa, *Turtle Geometry: The Computer as a Medium for Exploring Mathematics* (MIT Press, 1980).

[21] E. Redish, J. Wilson, *Student programming in the introductory physics course: M.U.P.P.E.T*, American Journal of Physics, v. 61, p. 222 (1993).

[22] S. Papert, *Teaching Children Thinking*, Innovations in Education & Training International, v. 9, n. 5, p. 245 (1972).

[23] S. Papert, *Mindstorms: children, computers, and powerful ideas* (Basic Books, 1980)

[24] J. Clement, *Students' preconceptions in introductory mechanics*, American Journal of Physics, v. 50, p. 66 (1982).

[25] D. Hestenes, M. Wells, G. Swackhamer, *Force Concept Inventory*, The Physics Teacher, v. 30, p. 141 (1992).

[26] B. White, *Designing computer games to facilitate learning* (MIT Artificial Intelligence Laboratory, 1981)

[27] W. Youden, *Experimentation and Measurement*, cap. 5 (National Bureau of Standards, 1984).

[28] I. Cohen, *o nascimento de uma nova física*, traduzido para português por G. Silva (EDART - SÃO PAULO, 1967).

[29] B. Derrick, D. Toher, P. White, *How to compare the means of two samples that include paired observations and independent observations: A companion to Derrick, Russ, Toher and White*, The Quantitative Methods for Psychology, v. 13, n. 2, p. 120 (2017).