




POSSIBILIDADES NO ENSINO DA TERMODINÂMICA: EFEITO MPEMBA NO ENSINO MÉDIO

POSSIBILITIES FOR TEACHING THERMODYNAMICS: MPEMBA EFFECT IN HIGH SCHOOL

JAMILA BUNMI BERNARDO VIDAL ^{*1}, ANTÔNIO CARLOS FONTES DOS
SANTOS ^{†2}, VITOR ACIOLY ^{‡3}

¹Laboratório de Pesquisa em Ensino e Divulgação da Ciência / LAPED. Programa de Pós-graduação em Ensino de Ciências da Natureza - PPECN/UFF

²Laboratório de Pesquisa em Ensino e Divulgação da Ciência / LAPED. Instituto de Física da Universidade Federal do Rio de Janeiro- IF-UFRJ

³Laboratório de Pesquisa em Ensino e Divulgação da Ciência / LAPED. Instituto de Física da Universidade Federal Fluminense - IF-UFF. Programa de Pós-graduação em Ensino de Ciências da Natureza - PPECN/UFF. Programa Nacional de Mestrado Profissional em Ensino de Física (MNPEF) - POLO 15

Resumo

Este trabalho propõe o uso do Efeito Mpemba como situação problema de uma abordagem investigativa dos tipos de transferência de calor no Ensino Médio. O trabalho busca apresentar uma alternativa inovadora para o tratamento desse assunto, visando desenvolver o pensamento crítico dos estudantes. O Efeito Mpemba é o fenômeno em que a água quente pode congelar mais rápido que a fria, desafiando assim, a Lei de resfriamento de Newton. Erasto Mpemba levantou novamente o debate sobre esse efeito, e Denis Osborne o validou na década de 1960. O fenômeno foi analisado termodinamicamente, considerando tipos de transferência de calor entre outros fatores. No entanto, as pesquisas que buscam uma resposta definitiva sobre ele ainda estão em andamento. Este artigo sugere que o fenômeno é uma ferramenta valiosa para ser utilizada por professores no ensino dos conceitos clássicos de física, tornando o aprendizado mais interessante, através da investigação de um problema aberto.

Palavras-chave: Efeito Mpemba. Transferência de Calor. Ensino por investigação. Problemas abertos. Ensino de Física.

*jamilabunmi@id.uff.br

†toniufrrj@gmail.com

‡vitoracioly@id.uff.br

Abstract

This paper proposes the use of the Mpemba Effect as a problem situation for an investigative approach to types of heat transfer in secondary education. The work seeks to present an innovative alternative for dealing with this subject, with the aim of developing students' critical thinking. The Mpemba Effect is the phenomenon in which hot water can freeze faster than cold water, thus defying Newton's Law of Cooling. Erasto Mpemba raised the debate about this effect again, and Denis Osborne validated it in the 1960s. The phenomenon was analyzed thermodynamically, considering types of heat transfer among other factors. However, research looking for a definitive answer is still ongoing. This article suggests that the phenomenon is a valuable tool for teachers to use in teaching classical physics concepts, making learning more interesting by investigating an open problem.

Keywords: Mpemba effect. Heat transfer. Inquiry teaching. Open problems. Physics teaching.

I. INTRODUÇÃO

O ensino da Termodinâmica Clássica tem tido lugar cativo no currículo do Ensino Médio, há um tempo considerável, através da abordagem de diversos temas, dentre eles, o calor e seus tipos de transferência. Consideramos essencial o debate em sala de aula acerca dessa temática, que vai de encontro com situações cotidianas. No entanto, acreditamos que a adição de novos exemplos para problematização à discussão, podem potencializar o desenvolvimento do pensamento crítico dos estudantes. Por isso, neste artigo, apresentamos o Efeito Mpemba (EMP) como possível ferramenta para a ser utilizada no ensino dos processos de transferência de calor. Para isso, apresentamos, neste trabalho, esse fenômeno físico bem como algumas possíveis causas dele.

II. BREVE HISTÓRIA DO EFEITO MPEMBA

Efeito Mpemba é o fenômeno onde, a determinadas condições, duas massas de água idênticas com exceção de que uma está quente e a outra a temperatura ambiente, são expostas a um mesmo ambiente de temperatura negativa e a água inicialmente quente congela primeiro. Entende-se que o fato da água estar quente contribui com o seu congelamento mais rápido (Tyrovolas, 2017). O atual nome do efeito é uma homenagem a Erasto Mpemba, que, junto com Denis Osborne, trouxe novamente a atenção para o fenômeno na década de 1960, porém os primeiros registros escritos datam de 300 anos antes de Cristo.

Os primeiros registros conhecidos sobre tal efeito foram realizados por Aristóteles, no século IV a.C., em seu livro *Meteorologica*, onde trata sobre assuntos do que conhecemos como química e física para desenvolver suas teorias sobre o que compreendemos atualmente como fenômenos meteorológicos e sobre o funcionamento do planeta Terra e seus elementos (Frisinger, 1972). Em sua obra, o filósofo menciona a utilização do que conhecemos hoje

como EMP, pelos seus contemporâneos, que quando desejavam resfriar a água rapidamente, colocavam-na no Sol por um tempo antes de levá-la para um local mais frio. Além disso, também relata que na região de Pontus, atual Turquia, o Efeito Mpemba era utilizado para facilitar a pesca em lagos congelados. Para Aristóteles a explicação do que foi observado estava baseada na ideia da antiperístase (Aristóteles, 1962).

No séc. XIII, o padre e filósofo Roger Bacon (Bacon, 1962) ao argumentar sobre a importância da experimentação nas ciências, mencionou o EMP. Em suas palavras:

[...] acredita-se, geralmente, que a água quente congela mais rapidamente que a água fria. O argumento em favor deste fato está baseado na ideia de que contrários são estimulados por contrários, assim como em um encontro entre inimigos. Entretanto, fica evidente para qualquer que fizer o experimento, que água quente congela mais rapidamente que água fria. Esta verificação é atribuída a Aristóteles em seu livro Meteorologica. Certo é que ele não fez esta afirmação, mas uma parecida, isto é, se for despejado água quente e água fria sobre algo gelado, como gelo por exemplo, a água quente irá congelar primeiro [...]. Portanto, todas as coisas devem ser verificadas por meio de experimentos. (Bacon, 1962).

Já no século XVII, em suas obras sobre o método científico, os filósofos Francis Bacon e René Descartes escreveram sobre o efeito (Jeng, 2006). Em sua obra mais popular, Discurso sobre o Método, Descartes fala sobre a importância da experimentação, relatando que reproduziu o fenômeno em seu laboratório. O filósofo foi o primeiro a falar sobre a relação entre a temperatura e a densidade da água para esse caso.

Apesar das diversas teorias e hipóteses acerca do efeito ao longo dos séculos, nenhuma delas trazia uma resposta definitiva. Desse modo, com os diversos avanços da física este assunto foi um pouco deixado de lado. Foi então que, em 1963, Erasto Bartholomeo Mpemba, nascido em 1950 na República Unida da Tanzânia, país localizado na região central da África Oriental (Jeng, 2006), observou pela primeira vez o fenômeno descrito.



Figura 1: Erasto Mpemba (Msemo, 2018)

Enquanto cursava o equivalente ao atual 8º ano do ensino fundamental no Brasil, Mpemba, assim como seus colegas de classe, fazia sorvete depois da aula para vender. O sorvete era preparado fervendo leite e misturando com açúcar. Em seguida, esperava-se a mistura alcançar a temperatura ambiente, com a justificativa de evitar danos à máquina, para aí sim colocá-la no congelador da geladeira (Mpemba; Osborne, 1969).

Um dia, por pressa, Erasto colocou sua mistura no freezer antes que ela atingisse a temperatura ambiente. Uma hora e meia depois, quando ele e outros dois rapazes, que haviam executado a receita correta retornaram à cozinha para conferir o andamento de seus sorvetes, perceberam que a mistura de Mpemba já havia congelado, enquanto a do outro rapaz estava mais espessa mas ainda não tinha atingido o congelamento.

Mpemba na época estudava a Lei de Resfriamento de Newton, que afirma que quanto menor diferença entre a temperatura, mais rápido ocorrerá a troca de calor (Silva 2003). Por isso, resolveu perguntar aos seus professores sobre o que observou durante a confecção do sorvete. A dúvida gerada pelo episódio não foi sanada por seus professores da escola naquele ano. Porém, anos depois, a escola onde ele cursava o ensino médio recebeu a visita do professor universitário, Denis Osborne. Durante um momento de perguntas, Mpemba perguntou sobre o fenômeno observado que apresentava um comportamento contrário ao previsto pela lei de resfriamento de Newton, que o jovem havia estudado na escola. Osborne achou que a situação descrita parecia improvável, mas prometeu reproduzir o experimento em seu laboratório no Colégio Universitário de Dar es Salaam.

Sendo assim, Osborne fez como o prometido e realizou o teste, verificando exatamente o que o menino havia relatado. Intrigado, resolveu continuar reproduzindo os testes. O docente desenvolveu um projeto para os estudantes universitários do segundo ano. Nessa sequência de experimentos foi possível verificar novamente os resultados de Mpemba. A partir disso, Osborne e Mpemba publicaram juntos, em 1969, um artigo relatando a trajetória do estudante e apresentando os resultados obtidos pelos graduandos.

A publicação de 1969 fez com que muitos cientistas voltassem a pensar sobre esse problema. Assim, o Efeito Mpemba vem sendo estudado até os dias de hoje. No entanto, apesar de ser um fenômeno conhecido há um tempo considerável, o Efeito Mpemba ainda não possui explicação uniforme (Balážovič, 2012). A próxima seção apresenta possíveis explicações para o fenômeno e a relação dele com o conteúdo do Ensino Médio.

III. EFEITO MPEMBA E A LEI DE RESFRIAMENTO DE NEWTON

Embora o conceito da Lei de Resfriamento de Newton, mencionada na seção anterior, pareça familiar aos estudantes do ensino médio que já tiveram contato com o princípio da troca de calor, este não é um tema encontrado na maior parte da literatura destinada a esse segmento (Silva, 2003). Portanto, julgamos adequado conceituar essa lei, que, diferente das leis de Newton do movimento, não é fundamental, mas empírica (Hewitt, 2015).

De acordo com essa lei, quando um sistema de temperatura T é exposto a um ambiente de temperatura T_a , o fluxo de calor ocorre do mais quente para o mais frio. Dado esse fluxo de calor, a temperatura do sistema irá variar temporalmente obedecendo a seguinte relação.

$$T = T_a + (T_0 - T_a)e^{-kt} \quad (1)$$

No APÊNDICE A, apresentamos o caminho para a obtenção desta relação, que descreve como um reservatório finito cede calor para um reservatório infinito no decorrer do tempo. Portanto, o que se espera é que a água fria congele primeiro do que a quente, pois ela precisará trocar uma quantidade de calor menor com o ambiente para atingir o equilíbrio. Porém a observação feita ao reproduzir o fenômeno experimentalmente é diferente do que se espera.

Como mencionado anteriormente, o comportamento observado na água no Efeito Mpemba vai contra o previsto por Newton, que estabelece um resfriamento por meio de uma função exponencial decrescente. Para ilustrar melhor, vamos considerar uma amostra a 80°C e uma a 40°C, ambas colocadas em um ambiente a temperatura ambiente de 0°C. Neste caso, teremos as seguintes equações para a Lei de Resfriamento de Newton:

$$T_1 = 80e^{-0.014t} \quad (2)$$

$$T_2 = 40e^{-0.014t} \quad (3)$$

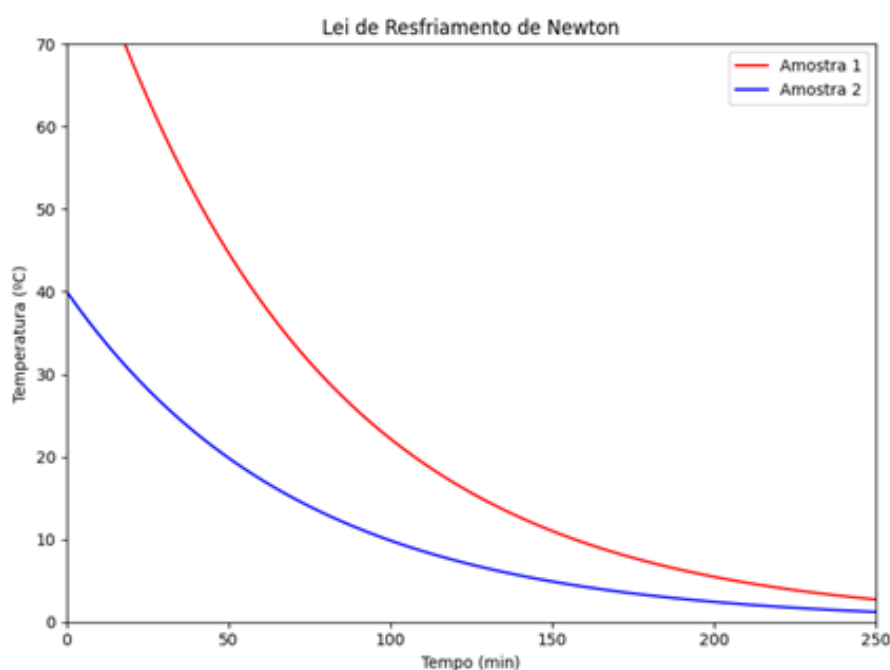


Figura 2: Lei de Resfriamento de Newton

Dessa forma, podemos ver que a amostra com a menor temperatura inicial (2), entra em equilíbrio com a temperatura ambiente antes da amostra de maior temperatura inicial (1). Evidentemente, essa análise do gráfico é mais geral, deixando de lado diversos detalhes sobre a estrutura microscópica das amostras.

Na tentativa de compreender o comportamento das variáveis da experiência, Osborne contabilizou o tempo que amostras com diferentes temperaturas iniciais levavam para começar a congelar (Mpemba; Osborne, 1969). A partir dos dados obtidos, foi feito um gráfico da temperatura inicial em graus Celsius contra o tempo para começar a congelar.

Para facilitar a compreensão, realizamos uma adaptação desse gráfico que pode ser vista abaixo.

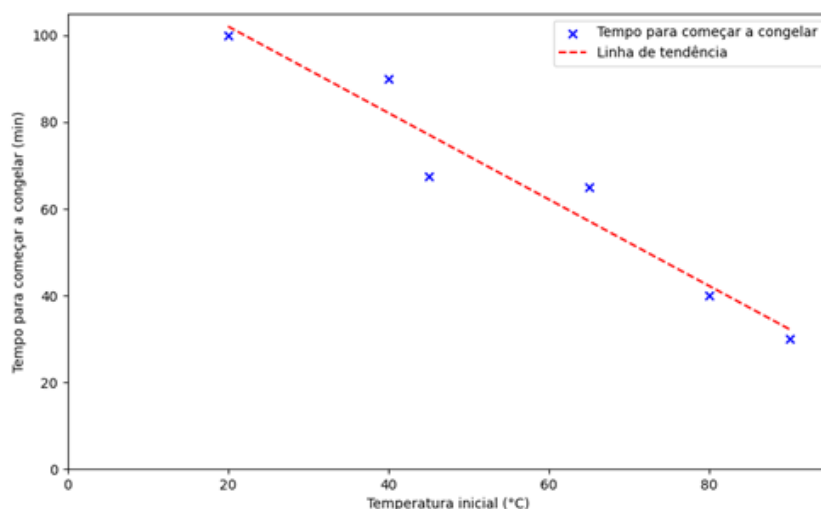


Figura 3: Tempo para a água começar a congelar para massas de água com temperaturas iniciais diferentes.

Na Figura 3, o eixo vertical se refere ao tempo que as amostras de água levaram para começar a congelar e o horizontal à temperatura inicial das amostras. A linha de tendência mostra que quanto maior a temperatura inicial da amostra, menos tempo ela leva para começar a congelar, o que é contra intuitivo pensando a luz da Lei de Resfriamento de Newton.

A fim de obter mais informações acerca da origem do fenômeno, Osborne e seus alunos decidiram analisar separadamente as temperaturas da superfície e do fundo do recipiente. No gráfico abaixo, apresentamos uma adaptação aproximada de um dos gráficos apresentados no artigo de 1969, onde podemos ver esta diferença de temperatura em uma amostra inicialmente a 93°C.

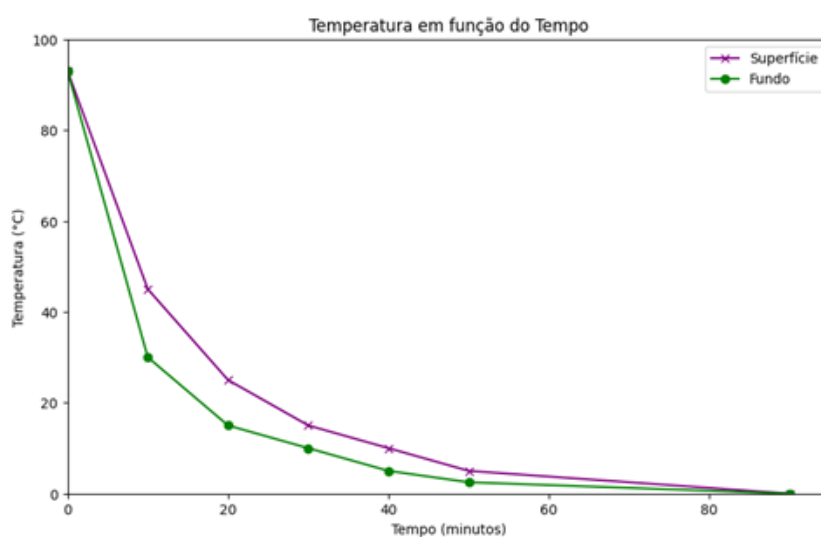


Figura 4: Taxa de variação da temperatura no fundo e na superfície do recipiente

A curva roxa da Figura 4 indica a taxa de variação da temperatura na superfície do recipiente e a curva verde a do fundo. O gráfico mostra que a massa de água localizada no fundo do recipiente resfria mais rapidamente. Isto ocorre porque a água quente tem menor densidade, por isso as moléculas de maior temperatura se posicionam na parte superior e as mais densas na parte inferior.

Ainda pensando nas particularidades das partes de cima e de baixo das amostras, foi analisada a diferença entre as temperaturas nas regiões do fundo e da superfície do recipiente em relação ao tempo. Na Figura 5 podemos ver o gráfico do artigo de 1969 que mostra essa relação para amostras com temperatura inicial 47°C e 70°C .

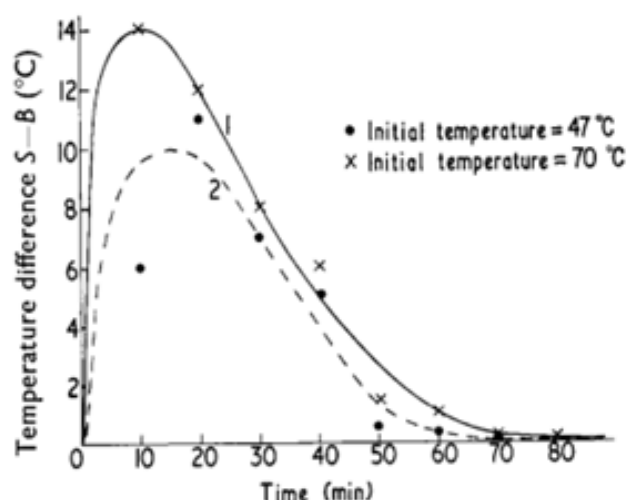


Figura 5: Diferença das temperaturas em função do tempo nas partes superior e inferior (Mpemba; Osborne, 1969)

Nele, a curva pontilhada, intitulada B, se refere ao fundo da amostra e a curva contínua, intitulada S, a parte superior. Os gráficos apresentados, não possuem correlação, pois os dados foram coletados em condições diferentes.

Osborne e seus alunos realizaram diversas modificações nas condições iniciais para observar o comportamento da água, dessa forma, constataram que ao colocar uma película de óleo na superfície da água o congelamento é retardado por horas, pois ela dificulta que a água perca calor (Mpemba; Osborne, 1969). Também pôde se conferir que ao colocar uma base isolante térmica embaixo dos recipientes com água, há uma diminuição na diferença das curvas de temperatura em função do tempo, isso porque a água quente demora mais para congelar.

Pensando sobre a possibilidade de que a água quente congela mais rápido pois tem menor volume como consequência da evaporação, os acadêmicos verificaram que o "calor latente de vaporização não pode ser responsável por mais de 30% do arrefecimento e não pode, por si só, ser responsável pelo congelamento rápido de sistemas com temperaturas iniciais elevadas" (Mpemba; Osborne, 1969). A conclusão final do professor universitário e seus alunos foi de que seriam necessários experimentos mais sofisticados para a obtenção de uma explicação confiável. Apesar de não terem chegado a resultados satisfatórios e

concretos acerca do fenômeno, a experiência relatada na segunda seção deste artigo e as conclusões mostradas nesta seção, serviram para levantar novamente a discussão sobre o efeito, que a partir daí passou a ser conhecido como Mpemba.

IV. EFEITO MPEMBA E A FÍSICA DO ENSINO MÉDIO

Uma das principais dificuldades, na análise do EMP, é que ao se alterar a temperatura da água, outras variáveis relativas a sua estrutura molecular também se alteram. Sendo assim, o processo de arrefecimento da água pode ser mais complexo do que parece. Isso pois a água dá abertura para diversas variáveis, listadas por Bechhoefer (2021) e Balážovič (2012) em seus artigos:

1. Evaporação; A água quente evapora mais rápido do que a água a temperatura ambiente, como consequência, seu volume é reduzido mais rápido. Assim, a amostra de água fria tem maior massa e precisa ceder uma quantidade de calor maior para congelar.
2. Dissolução dos gases; Ao aquecer a água, gases dissolvidos são liberados, como consequência sólidos têm sua concentração reduzida, o que pode alterar sua condutividade térmica e ponto de congelamento.
3. Correntes de convecção; Quando a primeira amostra de água é aquecida, são desenvolvidas correntes de convecção. A inércia dessas correntes pode manter um fluxo significativo durante todo o processo de resfriamento, contribuindo para a dissipação mais rápida do calor na amostra em questão.
4. Contato com o refrigerador; A forma como o experimento é realizado também pode influenciar no resultado, por exemplo, ao se utilizar refrigerador revestido de gelo, a amostra quente pode acabar derretendo a superfície de gelo abaixo dela, se aproximando assim, do refrigerador. Dessa forma, como o gelo não é um bom condutor de calor, a amostra quente eliminaria calor mais rapidamente.
5. Microestrutura da água; A formação de gelo é dificultada por aglomerados moleculares, chamados de clusters, que impedem a organização das moléculas na estrutura cristalina do gelo. Ao aquecer a água, esses aglomerados se rompem, permitindo que as moléculas se organizem com mais facilidade e por isso água quente congela mais rápido do que a fria, que tem uma estrutura mais complexa.

A partir da análise das possíveis motivações para a ocorrência do efeito Mpemba, podemos verificar que a discussão sobre esse assunto atravessa o tema Calor e seus tipos de transferência. Sendo assim, utilização do EMP na abordagem desse tema, trabalhado no Ensino Médio de acordo com o estabelecido pela BNCC de Ciências da Natureza, na unidade temática Matéria e Energia e no objeto de conhecimento Estrutura da Matéria, possibilita a inovação didática no ensino da Termodinâmica.

Além disso, o fenômeno oferece uma oportunidade para contrastar o comportamento térmico estabelecido pela Lei de Resfriamento de Newton, apresentada na seção anterior. Enquanto a lei prevê um resfriamento exponencial onde a amostra inicialmente mais quente

levaria mais tempo para congelar, o fenômeno observado desafia essa previsão, permitindo uma discussão sobre a limitação de modelos teóricos quando novas variáveis, como as listadas por Bechhoefer (2021) e Balážovič (2012), são levadas em consideração. Essa discrepância entre teoria e evidência experimental mostra como o método científico opera na prática, refinando hipóteses a partir de dados conflitantes.

Dessa forma, concordamos com Girotto (2017, p. 2652), ao defender que

“Além de permitir o ensino de conceitos de Termodinâmica a partir de uma proposta investigativa, o Efeito Mpemba é um problema interessante, com uma rica história, que contraria o senso comum e permite discussões sobre a natureza da ciência, tais como: o ceticismo dos cientistas em relação a propostas feitas por leigos, a dificuldade de teste e refutação de teorias com base em testes experimentais, a importância de se selecionar variáveis definidas e bem controladas para abordar um problema complexo, etc.” (Girotto, 2000, p.2652)

Sendo assim consideramos o Efeito Mpemba uma excelente ferramenta para a abordagem investigativa dos tipos de transferência de calor no Ensino Médio. Pois além de ter uma relação direta com o assunto, o fenômeno possibilita a inovação no ensino da termodinâmica clássica. As tabelas 1 e 2, a seguir, apresentam um recorte da BNCC que dialoga com a proposta.

Tabela 1: *Competências*

COMPETÊNCIAS	
Geral	2. Exercitar a curiosidade intelectual e recorrer à abordagem própria das ciências, incluindo a investigação, a reflexão, a análise crítica, a imaginação e a criatividade, para investigar causas, elaborar e testar hipóteses, formular e resolver problemas e criar soluções (inclusive tecnológicas) com base nos conhecimentos das diferentes áreas.
Específica	3. Analisar situações-problema e avaliar aplicações do conhecimento científico e tecnológico e suas implicações no mundo, utilizando procedimentos e linguagens próprios das Ciências da Natureza, para propor soluções que considerem demandas locais, regionais e/ou globais, e comunicar suas descobertas e conclusões a públicos variados, em diversos contextos e por meio de diferentes mídias e tecnologias digitais de informação e comunicação (TDIC).

Fonte: Os autores

Tabela 2: *Habilidade*

UNIDADE TEMÁTICA	OBJETO DE CONHECIMENTO	HABILIDADE
Matéria e energia	Estrutura da matéria	(EM13CNT301) Construir questões, elaborar hipóteses, previsões e estimativas, empregar instrumentos de medição e representar e interpretar modelos explicativos, dados e/ou resultados experimentais para construir, avaliar e justificar conclusões no enfrentamento de situações-problema sob uma perspectiva científica.

Fonte: Os autores

V. ENSINO POR INVESTIGAÇÃO

O Ensino por investigação é uma metodologia ativa de ensino objetiva a aprendizagem através de projetos. Dessa forma, os estudantes são instigados a solucionar problemas do cotidiano. Durante a resolução do problema, o professor tem o papel de direcionar os alunos a reflexões que têm como consequência a construção dos conceitos desejados (Vidal, 2023). Sobre essa metodologia, Zômpero e Laburú (2011) explicam que “A perspectiva do ensino com base na investigação possibilita o aprimoramento do raciocínio e das habilidades cognitivas dos alunos, e também a cooperação entre eles, além de possibilitar que compreendam a natureza do trabalho científico” (p. 68).

Sendo assim, além de promover a aprendizagem do conteúdo, o Ensino por Investigação possibilita o contato com etapas procedimentais do método científico (Zômpero, 2011). Dessa forma, acreditamos que, através de uma proposta didática investigativa, os estudantes podem ter um maior aproveitamento sobre o conteúdo Transferência de Calor ao explorar, se questionar e desenvolver hipóteses acerca do fenômeno físico estudado a partir de uma abordagem investigativa.

VI. PROPOSTA DIDÁTICA

A proposta de aplicação didática apresentada neste trabalho tem como base o estudo de Vidal (2023) e se fundamenta no Ensino por Investigação. A atividade apresenta uma estrutura que serve como sugestão para os docentes do ensino médio, podendo ser alterada por cada docente a fim de adequar ao seu contexto e as suas demandas.

O objetivo da sequência didática é a construção do conhecimento dos tipos de transferência de calor através de uma investigação sobre o Efeito Mpemba. A tabela abaixo apresenta a estrutura da sequência didática.

Tabela 3: Detalhamento da sequência didática

DETALHAMENTO DA SEQUÊNCIA DIDÁTICA		
Momento	Etapa do Ensino por investigação	Descrição
1	<ul style="list-style-type: none"> • Apresentação do objeto de estudo • Levantamento de hipóteses • Planejamento da investigação 	Apresentação do Efeito Mpemba
2	Atividade Experimental	Reprodução experimental do EMP
3	Expressão e comunicação dos resultados	Discussão sobre os resultados e hipóteses

Fonte: Os autores

1º Momento: Apresentação do Efeito Mpemba



Figura 6: Artigo Cool? de 1969. (Mpemba; Osborne, 1969)

No primeiro momento da sequência o objeto de estudo é apresentado aos estudantes através da leitura da primeira seção do artigo Cool? de Mpemba e Osborne, onde o jovem

Erasto Mpemba relata a sua experiência com o sorvete e suas inquietações acerca da relação de oposição entre o fenômeno e a Lei de resfriamento de Newton.

Após a leitura, o professor deve levantar um debate entre os alunos acerca das possíveis motivações do fenômeno descrito no texto. Partindo do pressuposto de que os estudantes já têm conhecimento sobre temperatura e mudanças de estado físico da água, sugerimos que o professor introduza a conversa incentivando os alunos a pensar no experimento com a utilização de água ao invés de sorvete. Algumas possíveis perguntas para a condução do debate são:

- O vapor que sai da amostra quente pode influenciar no seu congelamento mais rápido? Como?
- Sabemos que as moléculas da amostra quente estão mais agitadas. O movimento das moléculas pode acelerar o seu congelamento?
- O material do recipiente que contém a água pode influenciar na ocorrência do Efeito Mpemba?
- Se as amostras forem tampadas o efeito ainda será observado?

A partir dessas perguntas o professor deve estimular a turma a pensar acerca da influência da montagem experimental no resultado observado. Espera-se que a reflexão e o debate, toquem em pontos diretamente ligados aos tipos de transferência de calor. Durante o debate deve se tomar nota das hipóteses levantadas, para uma posterior comparação com os resultados. Por fim, o docente apresenta o planejamento e as orientações para a investigação, que será realizada em uma reprodução experimental, que é o segundo momento da sequência didática.

2º Momento: Atividade Experimental O segundo momento da proposta didática consiste na reprodução do experimento de Mpemba utilizando água no lugar da mistura para sorvete. Essa etapa será realizada em grupo pelos estudantes em um horário extracurricular e tem como objetivo a análise crítica do fenômeno. Cada grupo deve realizar o experimento alterando um parâmetro O quadro abaixo apresenta uma sugestão de guia ser entregue aos alunos para auxiliar na execução da atividade.

Quadro 1 – Sugestão de guia experimental

Objetivo
Reproduzir o experimento de Erasto Mpemba 4 vezes alterando os parâmetros em cada reprodução.
Alteração dos parâmetros
<p>Grupos 1 e 2: Usar recipientes de materiais diferentes em cada repetição do experimento (sugestões: vidro, plástico, metal, cerâmica. . .)</p> <p>Grupo 3 e 4: Cobrir a amostra fria e depois repetir fazendo o mesmo com a amostra quente</p> <p>Grupo 5 e 6: Realizar o experimento com as duas amostras cobertas e depois descobertas</p>
Materiais
<ul style="list-style-type: none"> • Recipientes que suportem água quente e que possam ir para o congelador • Fita isolante • Panela • 2 termômetros culinários
Procedimentos
<ol style="list-style-type: none"> 1. Encha dois recipientes, de mesmo material, com 200 mL de água da torneira cada (use uma medida de referência para garantir a mesma quantidade de água nas amostras). 2. Marque o recipiente da amostra de água fria com fita isolante para conseguir diferenciar durante a análise. (A fita deve ser colocada na ponta do copo, acima do nível da água.) 3. Ferva a água, retire da panela, coloque no recipiente e deixe ela esfriar de 3–5 minutos à temperatura ambiente. 4. Registre a temperatura inicial das duas amostras e posicione os termômetros dentro dos recipientes. 5. Coloque as duas amostras no congelador. 6. Prepare os copos para o congelador. 7. Monitore o congelamento a cada 20 minutos. Verifique o estado da água sem retirar as amostras do congelador e registre no relatório experimental a temperatura da água em cada uma das verificações.

Fonte: Os autores

Durante a atividade os estudantes devem tomar nota dos procedimentos realizados e preencher o relatório apresentado no quadro abaixo para que possam compartilhar com a turma no 3º momento da sequência.

Quadro 2 – Sugestão de relatório experimental

Relatório experimental

Registro de dados

Registre nos quadros abaixo a variação da temperatura em $^{\circ}\text{C}$ das amostras em função do tempo em minutos.

1) Amostra quente:

Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)																	
Tempo (min)																	

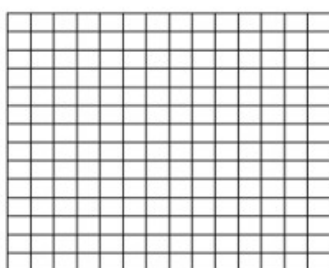
2) Amostra fria:

Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)																	
Tempo (min)																	

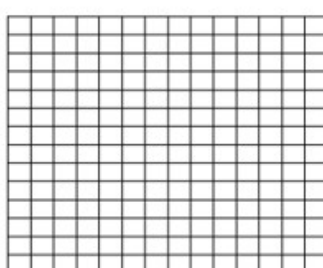
Representação gráfica

Construa, a partir dos dados registrados nos quadros acima, um gráfico da temperatura em função do tempo para cada uma das amostras.

1) Amostra quente:



2) Amostra fria:



Análise de resultados

- 1) Qual amostra atingiu 0°C primeiro: a quente ou a fria?

- 2) Qual amostra solidificou completamente primeiro? Indique o tempo total decorrido para o congelamento de cada uma.
- 3) Com base nos dados coletados, a água que iniciou o experimento em temperatura mais elevada congelou mais rapidamente que a água em temperatura ambiente?
() SIM () NÃO
- 4) Compare seus resultados com o que é previsto pela Lei de Resfriamento de Newton. Seus dados experimentais estão de acordo com a lei? Justifique com base nas observações.

Vale ressaltar com os estudantes, em um momento prévio, que por se tratar de um experimento que ocorre em um intervalo de temperaturas é possível e provável que se a água quente estiver uma temperatura muito elevada ou muito próxima da amostra fria ele não será observado.

3º Momento: Expressão e comunicação dos resultados

O terceiro momento, assim como o primeiro, ocorre na sala de aula com a presença dos estudantes. Nesse encontro, em uma roda de conversa, os grupos compartilham com a turma os seus relatos de experiência. O docente deve fomentar um debate comparando as observações obtidas com as hipóteses levantadas no primeiro momento.

Após o debate o docente apresenta para a turma algumas possíveis causas do fenômeno (descritas na seção III deste trabalho). Nessa apresentação, utilizando preferencialmente as causas 1, 3 e 4, Evaporação, Correntes de Convecção e Contato com o Refrigerador, o professor pode conceituar os tipos de transmissão de calor irradiação, condução e convecção. Vale ressaltar que essas variáveis não são consideradas no modelo simplificado de Newton, o que explica a divergência entre a previsão teórica e os resultados experimentais de Mpemba. Depois de definir esses conceitos se discute novamente com a turma sobre o efeito. Dessa vez, analisando como a montagem da reprodução experimental pode interferir na forma como o calor é transmitido e por consequência no processo de congelamento.

VII. O EFEITO MPEMBA QUÂNTICO E NOVAS FRONTEIRAS DA TERMODINÂMICA

Nos últimos anos, o efeito Mpemba tem ultrapassado os limites do mundo macroscópico e inspirado investigações no domínio da física quântica. Nessa escala, pesquisadores têm observado comportamentos análogos em sistemas de partículas e íons aprisionados, revelando que, sob determinadas condições, um sistema quântico inicialmente mais “quente” (ou mais distante do equilíbrio) pode atingir o equilíbrio térmico mais rapidamente do que outro que parte de um estado mais frio — um fenômeno que passou a ser conhecido como efeito Mpemba quântico (Warring, 2024).

Em sistemas abertos, observou-se um efeito Mpemba quântico inverso, em que o spin de um íon frio, acoplado a um ambiente quente, alcançou o equilíbrio mais rapidamente do que quando estava inicialmente mais excitado. Já em sistemas fechados, compostos por cadeias de íons interagentes, verificou-se que o grau inicial de quebra de simetria de um subsistema está relacionado à velocidade de sua restauração, com papel crucial do emaranhamento e das flutuações quânticas. Tais resultados demonstram que os processos de relaxamento em sistemas quânticos são fortemente influenciados pelas condições iniciais e pelas correlações entre partículas, indicando que o efeito Mpemba pode ser uma manifestação mais geral de uma classe de fenômenos de relaxação anômala (Joshi *et al.*, 2024).

Essas descobertas não apenas ampliam a compreensão da termodinâmica quântica de não equilíbrio, mas também apontam para potenciais aplicações tecnológicas, como otimização de processadores quânticos, motores quânticos e sistemas de armazenamento de energia baseados em recursos quânticos. Assim, o antigo enigma de por que a água quente pode congelar antes da fria ganha uma nova dimensão: ele se transforma em um paradigma que conecta o comportamento da matéria nas escalas clássica e quântica, iluminando caminhos para uma física mais unificada e abrangente.

VIII. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A utilização do Efeito Mpemba como recurso didático investigativo mostrou-se uma estratégia promissora para o ensino dos conceitos de transferência de calor no Ensino Médio. Ao propor uma situação-problema real, não trivial e historicamente discutida, o fenômeno rompe com práticas tradicionais de ensino centradas na exposição teórica e promove o engajamento dos estudantes na formulação de hipóteses, realização de experimentos e análise crítica de resultados. Essa abordagem favorece o desenvolvimento de competências como a curiosidade intelectual, o raciocínio científico e a argumentação fundamentada.

A proposta apresentada neste trabalho evidencia que é possível inovar na abordagem da termodinâmica clássica sem romper com as diretrizes curriculares estabelecidas. O Efeito Mpemba, ao oferecer uma situação instigante e aberta à investigação, contribui para uma aprendizagem mais significativa e contextualizada, permitindo que os estudantes compreendam os processos de condução, convecção e irradiação de forma integrada à prática experimental. A sequência didática elaborada valoriza o protagonismo discente, oportunizando a construção coletiva do conhecimento.

O contraste entre os resultados experimentais e a previsão teórica da Lei de Resfriamento de Newton, que estabelece um decaimento exponencial da temperatura onde a amostra inicialmente mais quente não congelaria primeiro, serve como um elemento central para essa construção. A discrepância observada pelos alunos não invalida a lei, mas a contextualiza, demonstrando que modelos físicos muitas vezes descrevem sistemas ideais, e que a complexidade do mundo real, pode levar a comportamentos inesperados. Essa discussão eleva a compreensão dos estudantes para além da aplicação matemática, levando-os a refletir sobre a natureza e as limitações dos modelos científicos.

Adicionalmente, a atividade possibilita reflexões sobre a natureza da ciência, como o papel da experimentação, a revisão de teorias consolidadas e a valorização da observação empírica, mesmo quando proveniente de contextos não acadêmicos. A trajetória de Erasto

Mpemba, posteriormente validada por Denis Osborne, ilustra a importância da escuta ativa, da curiosidade e da persistência na construção do saber científico. Esses aspectos ampliam o alcance pedagógico da proposta ao integrar aspectos conceituais, procedimentais e atitudinais.

Por fim, a atividade didática proposta está alinhada às diretrizes da Base Nacional Comum Curricular (BNCC), contemplando a competência geral 2, a competência específica 3 da área de Ciências da Natureza e a habilidade EM13CNT301. Ao trabalhar com problemas abertos, contextualizados e experimentais, a proposta favorece a construção do conhecimento científico em consonância com os princípios do ensino por investigação. Conclui-se, portanto, que o Efeito Mpemba constitui um recurso didático relevante, capaz de promover uma formação científica mais crítica, reflexiva e integrada às demandas contemporâneas da educação em Física.

Editora Responsável: Maria de Fátima da Silva Verdeaux

REFERÊNCIAS

- ARISTOTLE. *Meteorologica*. London: Harvard University Press, 1962. Traduzido por H. D. P. Lee, Book I, Chap. XII, p. 85–87. Disponível em: <<https://ia804505.us.archive.org/6/items/L397AristotleMeteorologica/L397-Aristotle%20Meteorologica.pdf>>
- BACON, R. *The Opus Majus of Roger Bacon*. Traduzido por Robert Belle Burke. New York: Russel and Russel, 1962. Vol. II, Part 6, p. 584. Disponível em: <[the-opus-majus-of-roger-bacon](#)>.
- BALÁŽOVIČ, M.; TOMÁŠIK, B. The Mpemba effect, Shechtman's quasicrystals and student exploration activities. *Physics Education*, v. 47, n. 5, p. 568–573, 2012. doi: <<https://doi.org/10.48550/arXiv.1205.3858>>.
- BECHHOEFER, B. A fresh understanding of the Mpemba effect. *Nature*, v. 3, p. 534–535, 2021. doi: <<http://dx.doi.org/10.1038/s42254-021-00349-8>>.
- BRASIL. *Base Nacional Comum Curricular (BNCC)*. Brasília, DF: MEC, 2017. Disponível em: <https://basenacionalcomum.mec.gov.br/images/historico/BNCC_EnsinoMedio_embaixa_site_110518.pdf>.
- GIROTTI-JÚNIOR, G.; *et al.* Efeito Mpemba: desafios para o ensino de termodinâmica a partir de problemas abertos. *Enseñanza de las Ciencias: revista de investigación y experiencias didácticas*, n. esp., p. 2651–2656, 2017. Disponível em: <<https://raco.cat/index.php/Ensenanza/article/view/339255>>.
- HEWITT, P. *Física Conceitual*. 12. ed. [S.l.]: Bookman Editora, 2015.
- JENG, M. Hot water can freeze faster than cold?!? *American Journal of Physics*, n. 74, p.

514–522, 2006. Disponível em: <<https://arxiv.org/abs/physics>>.

JOSHI, L. K.; *et al.* Observing the Quantum Mpemba Effect in Quantum Simulations. *Physical Review Letters*, v. 133, p. 010402, 1 jul. 2024. Disponível em: <<https://physics.aps.org/featured-article-pdf/10.1103/PhysRevLett.133.010402>>.

MPEMBA, E.; OSBORNE, D. Cool?. *Physics Education*, v. 4, n. 3, p. 172–175, 1969. doi: <<https://doi.org/10.1088/0031-9120/4/3/312>>.

MSEMO, M. The Mpemba Effect: A Tanzanian student's 1963 scientific discovery that remains a conundrum to the world. [S.l.], 2019. Disponível em: <https://face2faceafrica.com/article/the-mpemba-effect-a-tanzanian-students-1963-scientific-discovery-that-remains-a-conundrum-to-the-world>.

SILVA, W. Medida de Calor Específico e Lei de Resfriamento de Newton: Um Refinamento na Análise dos Dados Experimentais. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 25, n. 4, p. 392–398, dez. 2003. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/rbef/a/CdVLM6q5L3JHmRGjLcRY96C/>>.

TYROVOLAS, I. Explanation for the Mpemba Effect. *Journal of Modern Physics*, v. 8, n. 12, 2017. doi: <<https://doi.org/10.4236/jmp.2017.812121>>.

VIDAL, J. *Análise do Efeito Mpemba sob uma Perspectiva Decolonial: uma aplicação da Lei 10.639/03 no ensino de Física*. Trabalho de Conclusão de Curso (Licenciatura em Física) – Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2023.

WARRING, U. Exploring Quantum Mpemba Effects. *Physics*, v. 17, n. 105, 1 jul. 2024. Disponível em: <<https://physics.aps.org/articles/v17/105>>.

ZÔMPERO, A. F.; LABURÚ, C. E. Atividades investigativas no ensino de ciências: aspectos históricos e diferentes abordagens. *Revista Ensaio*, v. 13, n. 3, p. 67–80, set.–dez. 2011. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/epec/a/LQnxWqSrmzNsrRzHh3KJYbQ/?lang=pt&format=pdf>>.

APÊNDICE A

Lei de Resfriamento de Newton

A Lei de Resfriamento de Newton estabelece que, para um sistema onde a temperatura em todos os pontos é T , ao considerarmos que ele é exposto a um ambiente de temperatura inferior T_a , haverá um fluxo de calor do mais quente para o mais frio. Segundo observações experimentais a quantidade de calor que é transferida do sistema mais quente para o mais frio é proporcional a diferença entre as temperaturas:

$$\frac{dQ}{dt} = hA(T - T_a) \quad (1)$$

Onde h é uma constante relativa à natureza do sistema em questão e A a área de contato entre o sistema e o meio. No caso em que o sistema é considerado um reservatório finito de calor e o ambiente um reservatório infinito, apesar da temperatura do sistema variar com o tempo, a temperatura do ambiente não varia. Sabendo que a transferência de uma quantidade infinitesimal de calor dQ do sistema para o ambiente é igual a $-CdT$. Onde C é a capacidade calorífica do sistema e dT a variação infinitesimal da temperatura como consequência da transferência. Assim, definindo $\tau = C/hA$, é possível reescrever a Eq. 1 da seguinte forma:

$$\frac{dT}{(T - T_a)} = -\left(\frac{1}{\tau}\right)dt \quad (2)$$

Assumindo que no instante $t=t_0$ a temperatura do sistema é T_0 , resolvendo a equação diferencial de t_0 a t e de T_0 a T temos que

$$T = T_a + (T_0 - T_a)e^{-(t-t_0)/\tau} \quad (3)$$

Por fim, definindo $k = 1/\tau$ e $t_0 = 0$, temos

$$T = T_a + (T_0 - T_a)e^{-kt} \quad (4)$$