

ALLAN KENIO MIRANDA DE FREITAS

**GELO DE SPIN MACROSCÓPICO: PROPOSTA PARA INTRODUÇÃO DE
CONCEITOS DE FÍSICA MODERNA ATRAVÉS DA NANOCIÊNCIA E
NANOTECNOLOGIA**

Dissertação apresentada à
Universidade Federal de Viçosa, como
parte das exigências do Programa de
Pós-graduação do Mestrado Nacional
Profissional em Ensino de Física, para
obtenção do título de *Magister
Scientiae*.

Orientador: Vagson Luiz de C. Santos

VIÇOSA – MINAS GERAIS

2023

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

F866g
2023

Freitas, Allan Kenio Miranda de, 1994-
Gelo de spin macroscópico: proposta para introdução de
conceitos de Física Moderna através da Nanociência e
Nanotecnologia / Allan Kenio Miranda de Freitas. – Viçosa,
MG, 2023.
1 dissertação eletrônica (87 f.): il. (algumas color.).

Inclui apêndice.
Orientador: Vagson Luiz de Carvalho Santos.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa,
Departamento de Física, 2023.
Referências bibliográficas: f. 63-69.
DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2023.780>
Modo de acesso: World Wide Web.

1. Física (Ensino médio). 2. Nanociência.
3. Nanotecnologia. 4. Spin nuclear. I. Santos, Vagson Luiz de
Carvalho, 1977-. II. Universidade Federal de Viçosa.
Departamento de Física. Programa de Pós-Graduação em Ensino
de Física. III. Título.

CDD 22. ed. 530.071

ALLAN KENIO MIRANDA DE FREITAS

**GELO DE SPIN MACROSCÓPICO: PROPOSTA PARA INTRODUÇÃO DE
CONCEITOS DE FÍSICA MODERNA ATRAVÉS DA NANOCIÊNCIA E
NANOTECNOLOGIA**

Dissertação apresentada à
Universidade Federal de Viçosa, como
parte das exigências do Programa de
Pós-graduação do Mestrado Nacional
Profissional em Ensino de Física, para
obtenção do título de *Magister
Scientiae*.

APROVADA: 23 de outubro de 2023.

Assentimento:

Documento assinado digitalmente
 **ALLAN KENIO MIRANDA DE FREITAS**
Data: 05/01/2024 13:54:57-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Allan Kenio Miranda de Freitas
Autor

Documento assinado digitalmente
 **VAGSON LUIZ DE CARVALHO SANTOS**
Data: 06/01/2024 20:43:34-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Vagson Luiz de Carvalho Santos
Orientador

A Maria Cristina Resende Miranda.

AGRADECIMENTOS

A Deus.

À minha mãe, Maria Cristina Resende Miranda, que foi um exemplo de força de vontade, que me mostrou todos os dias o significado de superação, que me deu forças e que nunca me deixou desistir. Sua memória estará para sempre em mim.

À minha esposa, Amanda Cristiny dos Passos Giarola, que esteve ao meu lado durante todo este processo, com muito amor, compreensão e carinho.

Ao meu pai, Evandro José de Freitas, e ao meu irmão, Evandro Christian Miranda de Freitas, que sempre me incentivaram e me apoiaram em todas as dificuldades.

A todos os meus familiares, que foram o alicerce desta caminhada, em especial os meus primos Gustavo Resende Miranda de Freitas, Telma Freitas de Abreu, Fábio Sanzio, Jackson de Paula Miranda e Josiney de Paula Miranda.

Às minhas tias, que levo na vida como outras mães, Marília Resende Miranda e Eny Freitas de Abreu.

Aos meus amigos, que sempre me apoiaram de forma incondicional.

Ao meu orientador, Vagson Luiz de Carvalho, por todo apoio e incentivo, pela empatia e pela humanidade nos momentos difíceis.

Ao Hamilton A. Teixeira e ao Clodoaldo I. J. Araujo por terem disponibilizado o Laboratório de Spintrônica para impressão do produto, e por todo suporte e auxílio.

Aos professores Alexandre Tadeu Gomes de Carvalho, Álvaro José Magalhães, Eduardo Nery Duarte de Araújo, Orlando Pinheiro da Fonseca Rodrigues, Regina Simplício Carvalho e Vagson Luiz de Carvalho, por todo o ensinamento. Aprendi muito com vocês e os terei como referências para sempre.

Aos colegas do mestrado, que contribuíram diretamente com a produção deste texto, além do companheirismo e laços de amizade criados.

Aos meus alunos e ex-alunos, que participaram da elaboração deste texto de forma direta e indireta, sendo vocês o principal motivo de uma busca pelo meu crescimento profissional.

À Sociedade Brasileira de Física, por disponibilizar o Mestrado Profissional, contribuindo para a capacitação e formação continuada de professores no Brasil.

À Universidade Federal de Viçosa, pela oportunidade de realizar a pós-graduação.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

RESUMO

FREITAS, A. K. M. de, M.Sc. Universidade Federal de Viçosa, outubro de 2023. **Gelo de spin macroscópico: proposta para introdução de conceitos de Física Moderna através da Nanociência e Nanotecnologia.** Orientador: Vagson Luiz de Carvalho Santos.

A busca por um eficiente ensino da Física Moderna nas escolas é um grande desafio, tendo em vista as dificuldades relatadas pelos alunos em conseguirem associar os conceitos aprendidos em aula com suas vivências do dia a dia. Com o intuito de promover a aprendizagem dessa disciplina, diversos recursos didáticos podem ser adotados pelos professores, visando a incentivar o interesse dos alunos pelos temas trabalhados. A presente dissertação apresenta um produto educacional em forma de sequência didática, elaborado com a finalidade de introduzir conceitos de Física Moderna por meio da Nanociência e Nanotecnologia no Ensino Médio. Esse produto simula gelos de spin macroscópicos em uma rede quadrada composta por ímãs dispostos em ilhas simétricas. A sequência didática foi utilizada em uma turma de Ensino Médio e teve aceitação dos alunos, além da demonstração do produto a um grupo de professores, que se mostraram entusiasmados com o trabalho. Conclui-se que o produto é viável e poderá ser usado como um recurso pedagógico de apoio por professores na educação básica, possibilitando uma aprendizagem investigativa dos alunos.

Palavras-chave: Física Moderna; Ensino de Física; Gelo de spin; Nanociência e Nanotecnologia.

ABSTRACT

FREITAS, A. K. M. de, M.Sc. Universidade Federal de Viçosa, October, 2023. **Gelo de spin macroscópico: proposta para introdução de conceitos de Física Moderna através da Nanociência e Nanotecnologia.** Adviser: Vagson Luiz de Carvalho Santos.

The search for an efficient way of teaching Modern Physics in schools is a great challenge, considering the difficulties reported by students in the ability to associate the concepts learned in the classroom with their day-to-day experiences. To enhance the learning of this discipline, several didactic resources can be adopted by teachers, aiming to conquer the students' interest in the addressed themes. This dissertation presents an educational product in the form of a didactic sequence, designed to introduce concepts of Modern Physics through Nanoscience and Nanotechnology in High School. This product simulates macroscopic spin ices on a square lattice composed of magnets arranged in symmetrical islands. The didactic sequence was used in a high school class, it was accepted by the students, in addition to demonstrating the product to a group of teachers, who were enthusiastic about the work. It is concluded that the product is viable and can be used as a support pedagogical resource by teachers in basic education, enabling investigative learning of the students.

Keywords: Modern Physics; Physics Teaching; Spin ice; Nanoscience and Nanotechnology.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	9
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	16
2.1 Ensino por analogia	16
2.2 O uso de recursos tecnológicos em aula	18
2.3 Experimento demonstrativo em aula.....	19
2.4 Introdução à Física Moderna através da Nanociência e Nanotecnologia na Educação Básica	20
3 A FÍSICA	22
3.1 Propriedades de um ímã – Teoremas de Gilbert	22
3.2 O campo magnético	23
3.3 A experiência de Oersted.....	26
3.4 Lei de Faraday	27
3.5 Lei de Biot-Savart e Lei de Ampère	29
3.6 Equações de Maxwell	30
3.7 Propriedades magnéticas da matéria.....	31
3.8 Gelos de spin	34
4 METODOLOGIA.....	41
4.1 Produto	42
4.1.1 Primeira etapa.....	42
4.1.2 Segunda etapa.....	43
4.1.3 Terceira etapa	43
4.1.4 Quarta etapa	47
5 RESULTADOS	53
5.1 Aplicação para professores.....	54
5.2 Aplicação para alunos.....	57
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	60
REFERÊNCIAS.....	63
APÊNDICE A – PRODUTO EDUCACIONAL.....	70

1 INTRODUÇÃO

Para Piaget (1999), o conhecimento não vem diretamente do sujeito e nem do objeto de estudo, sendo um produto decorrente da interação entre ambos. Desse modo, a aprendizagem pode ser entendida como um produto de interações entre o educando e o meio onde o conhecimento está sendo disseminado (FERRACIOLI, 1999).

Nesse sentido, este estudo busca compreender as possibilidades do ensino baseadas na interação com fenômenos físicos, tornando-os observáveis e palpáveis, por meio de uma sequência didática, desenvolvida para ensinar os conceitos de gelo de spin, por professores, em aulas de Física no Ensino Médio.

A Física oferece importantes contribuições para o desenvolvimento científico e tecnológico, que se refletem socialmente em consequência do alcance econômico, social e político (NASCIMENTO, 2010). Como disciplina, ela compõe o conteúdo curricular do Ensino Médio, participando do que é denominado como Ciências da Natureza. As disciplinas que compõem esse grupo apresentam características comuns: procedimentos metodológicos, linguagem, modalização, investigação sistemática da natureza e aproximação com a tecnologia. (BRASIL, 2006, p. 45). O ensino de Ciências da Natureza nas escolas brasileiras é garantido pela Lei de Diretrizes e Bases (BRASIL, 1996) no Art. 35-A, item III, de 1996, incluído pela Lei nº 13.415 (BRASIL, 2017b).

Até meados da década de 1980, a Física Clássica, enquanto conteúdo escolar, respondia bem às demandas necessárias. Até então, a inserção da Física Moderna aos alunos do Ensino Médio não era discutida (SANCHES, 2006). As descobertas da Física Moderna rompem com a tradição da Física Clássica, que, até o século XIX, era considerada imutável e capaz de explicar todos os fenômenos físicos conhecidos por meio de reformulações provenientes das descobertas realizadas por Planck (1858-1947), Einstein (1879-1955) e Niels Bohr (1885-1962). Estes e outros cientistas revolucionaram a ciência, fundando as bases do que se conhece hoje como Física Moderna (VELOSO; SOUSA; MACÊDO, 2022). Com o desenvolvimento dos estudos dessa área e a sua evidente importância para o desenvolvimento da sociedade, viu-se a necessidade de se introduzir a Física Moderna e Contemporânea nas bases curriculares das Instituições de Ensino (KOCHAN, 2022).

A sugestão de introduzir a Física Moderna nas bases curriculares é percebida, ainda que de forma tangencial, ao se analisarem as Orientações Curriculares Nacionais para o Ensino Médio (OCNEM) (BRASIL, 2006). Esse documento serve como complemento aos Parâmetros Curriculares Nacionais (PCN) (BRASIL, 1997, 2000, 2002), documentos, que propuseram uma reformulação da Educação Básica no Brasil a partir do ano de 2000 (BRASIL, 2000). As OCNEM visaram à implementação de um ensino, que incorpore as evoluções tecnológicas, como fator atuante, na vida dos jovens estudantes:

A tão falada metáfora da alfabetização científica e tecnológica aponta claramente um dos grandes objetivos do ensino das ciências no nível médio: que os alunos compreendam a predominância de aspectos técnicos e científicos na tomada de decisões sociais significativas e os conflitos gerados pela negociação política (BRASIL, 2006, p. 47).

Ao final de 2017, uma nova reformulação do ensino foi proposta pela Resolução CNE/CP nº 2, de 22 de dezembro de 2017 (BRASIL, 2017a), tendo como documento orientador a Base Nacional Comum Curricular (BNCC). A BNCC, documento base para a atual configuração do ensino no País, passou por algumas fases de elaboração (BRASIL, 2017c). Sua primeira versão foi divulgada em 16 de setembro de 2015 (BRASIL, 2015) e apresentada entre os dias 2 e 15 de dezembro de 2015. Em 3 de maio de 2016, foi disponibilizada a segunda versão do texto (BRASIL, 2016) e, de 23 de junho a 10 de agosto de 2016, aconteceram seminários estaduais para discussão do texto. Em 2 de abril de 2018, foi entregue pelo Ministério da Educação a terceira e atual versão (BRASIL, 2018), que entrou em vigor em dezembro de 2018.

Na BNCC, é proposto que, ao longo da Educação Básica, os estudantes desenvolvam competências, que são definidas como a “mobilização de conhecimentos, habilidades, atitudes e valores para resolver demandas complexas da vida cotidiana, do pleno exercício da cidadania e do mundo do trabalho” (BRASIL, 2018, p. 10). O documento define competências gerais e competências específicas de cada área do conhecimento: Ciências da Natureza e suas Tecnologias; Linguagens e suas Tecnologias; Ciências Humanas e Sociais Aplicadas; e Matemática e suas Tecnologias. A cada uma dessas competências específicas, é relacionado um conjunto de habilidades, que representam as aprendizagens essenciais a serem garantidas aos estudantes do Ensino Médio:

A BNCC da área de Ciências da Natureza e suas Tecnologias – por meio de um olhar articulado da Biologia, da Física e da Química – define competências e habilidades que permitem a ampliação e a sistematização das aprendizagens essenciais desenvolvidas no Ensino Fundamental no que se refere: aos conhecimentos conceituais da área; à contextualização social, cultural, ambiental e histórica desses conhecimentos; aos processos e práticas de investigação e às linguagens das Ciências da Natureza (BRASIL, 2018 p. 547).

A área Ciências da Natureza é composta pelas disciplinas Física, Química e Biologia em caráter indisciplinar. A área contempla 26 habilidades distribuídas em três competências. Orienta-se que a mesma habilidade deva ser alcançada com contribuições das três disciplinas.

As recomendações específicas de conteúdos a serem trabalhados encontram-se no Currículo Referência do Ensino Médio de Minas Gerais (CRMG) (MINAS GERAIS, 2018), que funciona em complementaridade à BNCC. Embora o CRMG não cite diretamente o termo Física Moderna, ele sugere a inclusão de seus conteúdos na seção referente aos objetos de conhecimento a serem desenvolvidos. O efeito fotoelétrico e a dualidade onda-partícula, por exemplo, são citados em 15 das 26 habilidades, que compõem os objetos de conhecimentos referentes à temática Tecnologia e Linguagens (MINAS GERAIS, 2018). Esses documentos demonstram uma preocupação de que a Física Moderna e outros conteúdos atuais sejam trabalhados em aulas da Educação Básica, porém de forma superficial e genérica.

O ensino de Física ministrado no Ensino Médio brasileiro privilegiou, historicamente, a Física Clássica matematizada. Esse problema é histórico e persistente atualmente, o que foi detectado por Chiquetto (2011), que relata, em seu estudo, similaridade entre os livros didáticos de 2011 e os de 1938, cujo objetivo era ser aprovado numa prova sem que os alunos pudessem compreender a importância dos fenômenos naturais em sua vida.

A versão final da BNCC foi entregue pelo MEC em 2018, com sua implementação pela Resolução CNE/CP nº 2 (BRASIL, 2017). Ocorreram esforços em debater o texto em seminários realizados entre 23 de junho e 10 de agosto de 2016, quando foram coletados relatórios de opiniões entre docentes (BRASIL, 2017d). Entretanto, a participação foi pouco representativa da totalidade de professores. Foram ouvidos 9.275 participantes (BRASIL, 2017e), de um total, que, hoje, ultrapassa dois milhões de profissionais de acordo com o Censo de 2021 (BRASIL, 2022). Esse número representa menos de 0,5% dos professores do País. A pequena inserção dos

profissionais na elaboração de um texto, que rege o ensino do País, intensifica a incoerência com a realidade educacional brasileira, problema outrora apresentado em documentos norteadores da Educação Básica.

Embora esforços de diferentes naturezas sejam feitos no sentido de superação do ensino da Física matematizado, ainda se observa que o ensino visa à aprovação em exames, o distanciando a compreensão dos fenômenos naturais e o cotidiano dos alunos. Diante desse contexto e da necessidade de uma reflexão sobre o fazer pedagógico em sala, este trabalho sugere um primeiro contato com a Física Moderna e Contemporânea, a Nanociência e Nanotecnologia por meio dos conceitos de gelo de spin. O estudo de materiais em escalas nanométricas é conhecido como Nanotecnologia, que teve avanço alinhado com as evoluções da Física Moderna durante o século XX. Nanociência é o campo, que estuda e desenvolve a Nanotecnologia, presente na atualidade, como nas indústrias têxtil e de cosméticos entre outras (TONET, 2019).

No presente trabalho, os conceitos são introduzidos por meio de uma rede composta por ímãs dispostos em ilhas simétricas. Essa rede simula gelos de spin artificiais macroscópicos, criando um análogo aos gelos de spin artificiais (GSA), propostos por Wang *et al.* (2006). Gelos de spin têm sido considerados importantes componentes para futuros dispositivos tecnológicos graças à sua desordem e à frustração geométrica (CASTELNOVO, 2008). Para os sistemas de gelo de spin, a frustração permitiu o avanço no desenvolvimento de nanomagnetos capazes de gerar excitações, cujas propriedades são semelhantes a de monopolos magnéticos, análogos às cargas elétricas e que podem ser utilizados para transmitir/armazenar dados (GARTSIDE *et al.*, 2018) ou gerar correntes magnéticas, um análogo a correntes elétricas, que foi chamado de magnetricidade por Bramwell *et al.* (2009).

Gelos de spin naturais são encontrados em materiais de terras raras, com estrutura pirocloro, como o titanato de disprósio ($\text{Dy}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$) e o titanato de hólmio ($\text{Ho}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$) (CASTELNOVO, 2008). Esses materiais possuem seus spins alinhados de forma antiparalela no vértice de tetraedros, como na formação molecular do gelo, dando nome à estrutura gelo de spin. Wang *et al.* (2006) propuseram um sistema que simula esse comportamento, denominado gelos de spin artificiais (GSA). O sistema é constituído por nanoilhas magnéticas, que podem ser consideradas ímãs em barra, com polos Norte e Sul muito bem definidos. Essas nanoilhas são dispostas em uma rede quadrada de tal forma que, dependendo das orientações dos polos de seus ímãs,

monopolos magnéticos podem emergir como partículas emergentes a partir do comportamento coletivo de quatro nanoilhas. O controle desses monopolos pode ser dado mediante aplicações de campos magnéticos externos. Dessa maneira, ao invés de partículas portadoras de carga elétrica, os portadores de informação passam a ser unidades básicas formadas por modos coletivos da magnetização, os quais respondem a campos externos (BRAMWELL *et al.*, 2009).

Buscando um possível primeiro contato dos estudantes com a Física Moderna e Contemporânea, este trabalho propõe o desenvolvimento de uma ferramenta de apoio do ensino de um conteúdo, que compõe essa área. Para isso, foi desenvolvida uma sequência didática, que tem como objetivo principal a compreensão do conceito de gelo de spin por parte dos alunos, utilizando analogias, recursos audiovisuais e um produto físico, que simula um monopolo emergente em uma rede de gelo de spin artificial macroscópica. A sequência foi elaborada de forma que os alunos consigam revisar assuntos da Física Clássica, como eletrostática e campos magnéticos, associando-os aos novos conceitos desenvolvidos.

A problematização sobre a indivisibilidade dos polos magnéticos é o fio condutor para o desenvolvimento da aula, sendo esperado que os alunos visualizem o possível comportamento de um monopolo emergente em rede. Como pré-requisito para a aula, os alunos precisam conhecer os conceitos de campo elétrico, pois, durante a sequência didática, serão construídas analogias entre campo magnético e campo elétrico.

O objetivo deste trabalho é relatar, na perspectiva do pesquisador-autor, a utilização de sequência didática em duas experiências: a primeira, em uma aula com alunos do segundo ano do Ensino Médio; e a segunda, com professores de Física, discentes da disciplina Atividades Experimentais para os Ensinos Fundamental e Médio, do programa de pós-graduação do Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física (MNPEF), polo da Universidade Federal de Viçosa (UFV). Objetiva-se, especificamente, relatar o processo de constituição do produto didático denominado gelo de spin artificial macroscópico bem como compreender as possibilidades e limites de sua replicação em outros contextos escolares.

A sequência didática é composta por quatro momentos. O primeiro, fundamentando-se na interação de Piaget (1999), se caracteriza pelo contato inicial com os ímãs e conceitos de campos magnéticos, entregando-se diferentes tipos de ímãs aos alunos para despertar o interesse pelo tema e instigar o ensino investigativo

a partir da criação de hipóteses para perguntas norteadoras. O primeiro momento encerra-se com a apresentação do vídeo denominado *Propriedades magnéticas da matéria* (BERNOULLI PLAY, 2018), recurso audiovisual, que visa a facilitar o entendimento das propriedades magnéticas da matéria. No segundo momento, recorre-se a um vídeo, que objetiva o ensino lúdico do conceito de campos, denominado *Os poderes do Super Choque* (NERDOLOGIA, 2020). Para tanto, apresenta-se o super-herói de desenho animado *Super Choque*, aproximando-o da realidade dos alunos. No terceiro momento, utiliza-se um pequeno programa, que é executado dentro de uma página da *web*, denominado *applet*. Foi utilizado “Cargas e Campos” da plataforma *Phet*, pertencente à Universidade de Colorado (PHET). O *applet* simula campos elétricos gerados por partículas portadoras de carga elétrica, que será usado como o análogo ao campo magnético gerado por ímãs em barra. A escolha pela analogia se deve ao fato de não terem sido encontrados outros programas, que possibilitem inserir vários ímãs e seus respectivos campos magnéticos. Por fim, apresenta-se a rede macroscópica, que simula gelos de spin artificiais (GSA).

Esse protótipo foi desenvolvido com o auxílio do Laboratório de Spintrônica e Nanomagnetismo (*Laboratory of Spintronics and Nanomagnetism*) – LABSPIN – da UFV, com o auxílio do aluno de doutorado Hamilton A. Teixeira, em colaboração com o professor Clodoaldo I. J. Araújo. O material possibilita a visualização das frustrações geométricas, que acontecem na rede. Com os ímãs posicionados nos vértices de ilhas simétricas bidimensionais, observa-se um sistema com frustração geométrica, simulando gelos de spin. O protótipo permite a observação dos pontos onde acontecem a violação da regra do gelo e a instabilidade do sistema, e a compreensão de como essas excitações podem se mover nessa rede a partir de uma perturbação. Estes são os análogos a monopolos magnéticos emergentes.

A abordagem do estudo se caracteriza como qualitativa, uma vez que foram coletados dados qualitativos não quantificáveis, utilizando caderno de campo. Na observação qualitativa, “o processo é descritivo, indutivo, de observação que considera a singularidade do sujeito e a subjetividade do fenômeno” (NASCIMENTO, 2016, p. 3). O método utilizado foi a observação do autor como professor e criador da sequência didática. São relatadas as dificuldades e desafios do autor como pesquisador durante a elaboração de um produto, que busca tratar de um assunto ainda não presente no Ensino Médio sem tangenciar as exigências curriculares. São

relatadas, também, as experiências do uso da sequência em aula com os alunos assim como a percepção de outros professores da área sobre o assunto.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo apresenta uma revisão bibliográfica a respeito do funcionamento do processo de aprendizagem e da busca por meios inovadores de se ensinar a Física. O intuito é promover o maior interesse e a busca pelo efetivo aprendizado de alunos do Ensino Médio sobre Física Moderna, utilizando a Nanociência e a Nanotecnologia.

2.1 Ensino por analogia

De acordo com Piaget (1999), a aprendizagem é construída em estágios, que são determinantes para que um indivíduo possa obter um conhecimento específico em consonância com a sua faixa etária e os estímulos a que tenha sido submetido no decorrer de sua vida e de seu desenvolvimento cognitivo.

Nesse sentido, as fases de aplicação do produto pedagógico para a apresentação do conceito de gelos de spin, propostas no presente trabalho, são construídas em quatro estágios em consonância com a proposta de Piaget (1999). Para proporcionar diferentes estímulos e interações entre os alunos do Ensino Médio e o conceito de gelo de spin, pertencente ao ambiente nanoscópico, buscou-se o recurso da aprendizagem por analogias referentes ao ambiente macroscópico.

As analogias são importantes recursos e ferramentas de aprendizagem largamente utilizados no âmbito do ensino das Ciências. O aprendizado dos diferentes conteúdos das Ciências, quando trabalhados a partir de analogias, desperta mecanismos de associação utilizados para o estabelecimento do sistema cognitivo humano desde seus primeiros dias de vida, auxiliando na construção do conhecimento (MARQUES, 2020).

A analogia pode ser definida como um processo de identificação de semelhanças entre dois conceitos: o primeiro, que é familiar ao destinatário; e um outro conceito, que é chamado de alvo. Assim, no ensino por analogia, busca-se demonstrar aos alunos a similaridade com algo, que já lhe é conhecido (AUBUSSON; TREAGUST; HARRISON, 2009). Conforme da Silva Rodrigues *et al.* (2015), a analogia é uma semelhança entre conceitos ou uma comparação entre dois objetos, sendo um deles já conhecido e outro ainda desconhecido, visando a que sejamos capazes de imaginar e compreender o objeto de estudo ainda desconhecido.

O uso das analogias constitui um recurso didático de construção do conhecimento a partir de situações reais e de interesse do cotidiano dos alunos (NAGEM; ARAUJO; MARCELOS, 2005). Seu uso, no Ensino Médio, amplia as possibilidades de comunicação com os alunos e torna as aulas dinâmicas e motivadoras para a faixa etária a que esse tipo de conhecimento se destina.

As analogias criam vínculos entre o conteúdo apresentado, as experiências vividas pelos alunos e a consequente aprendizagem adquirida sobre o objeto de estudo por meio da prática pedagógica em aula (MELO; PARAGUAÇU, 2021). Nesse aspecto, pode-se dizer que a utilização de ferramentas, que permitem a associação do conteúdo tratado com experimentos do cotidiano, viabiliza o aprendizado. No caso do ensino da Física, o ensino por analogia tem o potencial de contribuir para a solução de um problema na aprendizagem referente à sua impalpabilidade, queixa constante entre os alunos.

A queixa docente, por sua vez, refere-se a um ambiente marcado pela apatia da maioria dos alunos por essa disciplina. Professores relatam que, diante do ensino da Física, muitos alunos não conseguem vislumbrar a necessidade do conhecimento teórico sobre essa disciplina no seu cotidiano.

Desse modo, neste trabalho, o uso das analogias entre o ambiente impalpável e microscópio da Nanociência é trazido ao alcance das mãos dos alunos, a fim de que manuseiem e observem a movimentação dos ímãs dispostos na rede, que pode transmitir uma pequena perturbação, simulando um monopolo magnético emergente, sendo um bom análogo às frustrações presentes em gelos de spin.

Embora o uso das analogias seja promissor, existem desvantagens. É necessário que o educador esteja atento ao processo de ensino, para que não haja interpretação distorcida do que realmente se deseja ensinar. Ocorre o risco de que o estudante venha fazer analogia a algum conceito concebido anteriormente, não sendo possível garantir a genuína compreensão sobre determinado conceito (MARQUES, 2020).

Diante da complexidade dos conteúdos abordados, demonstra-se imprescindível a escolha de recursos didáticos estratégicos para o ensino da Física Moderna no Ensino Médio, sendo possível o uso de distintos recursos pedagógicos, entre eles o uso das analogias, o desenvolvimento de jogos didáticos e o uso da experimentação (NEVES; SANTOS, 2021).

2.2 O uso de recursos tecnológicos em aula

A busca por recursos didáticos, que façam as aulas mais dinâmicas e os conhecimentos mais interessantes aos olhos dos alunos, é um constante desafio para os professores de Física no Ensino Médio. Nesse aspecto, a tecnologia e o acesso à *internet* têm modificado a forma como determinados temas podem ser abordados, a fim de que sejam melhor associados pelos alunos. Desse modo, o avanço das tecnologias trouxe maior interatividade para as aulas, criando-se caminhos para a comunicação entre alunos e professores, e possibilitando a aprendizagem dos fenômenos estudados (SOUZA *et al.*, 2022).

O uso de tecnologias na educação visa a agregar recursos pedagógicos para além de metodologias tradicionais, fundamentadas na prática da escuta de aula expositiva, anotação e leitura de livros didáticos (FRANCO, 2022). Assim, o uso e a aplicação de tecnologias digitais são indicado no Currículo Referência de Minas Gerais: “Trata da mobilização dos conhecimentos científicos na resolução de situações-problema a partir de uma visão interdisciplinar e com utilização e aplicação de tecnologias digitais ao longo do processo” (MINAS GERAIS, 2018, p. 169).

Os denominados Objetos Digitais de Aprendizagem (ODA) abarcam um conjunto muito amplo de ferramentas tecnológicas, que podem ser abordados em aula para a demonstração de conteúdos de ensino, como, por exemplo: vídeos, *podcasts*¹, jogos, animações, simuladores ou videoaulas (CARVALHO *et al.*, 2019, p. 266):

No processo de ensino-aprendizagem, o uso de ODAs traz consigo diversos benefícios, visto que, em sua maioria, permitem um ensino mais independente, interativo, dinâmico e personalizado. Outra vantagem do uso de ODAs, em especial os que se enquadram na categoria de simuladores, reside no fato destes permitirem aos estudantes a familiarização com situações que na prática envolveriam risco, demandariam muito tempo, envolveriam muito custo ou que seriam impossíveis. O aspecto colaborativo também aparece em produtos de software de simulação, o que faz dessa ferramenta uma excelente oportunidade para os professores estimularem em seus alunos. Além da colaboração, também há a coletividade e as relações interpessoais.

¹ “*podcast*: uma página, *site* ou local onde os ficheiros áudio estão disponibilizados para carregamento; *podcasting*: é o acto de gravar ou divulgar os ficheiros na web” (BARCA *et al.*, 2007, p. 839).

Além disso, o uso desses objetos digitais pode mitigar uma deficiência, que ocorre nos ensinamentos de Física nas escolas públicas causadas pela ausência de laboratórios, os quais permitam que os alunos vivenciem a natureza experimental da disciplina (LOUREIRO, 2019).

O uso de recursos tecnológicos apresenta desafios quanto à falta de orçamento para sua efetivação nas escolas públicas. Entretanto, eles são, ainda, mais alcançáveis quando comparados aos recursos essenciais à montagem e equipagem de laboratórios, que permitam a realização de experimentos importantes ao ensino da Física no Ensino Médio (LOUREIRO, 2019). Os usos de plataformas gratuitas, como o *YouTube*, por exemplo, permitem aos discentes o acesso a demonstrações de incontáveis experimentos fundamentais à visualização de conteúdos abordados em aula.

Para o presente estudo, utilizou-se o recurso dos vídeos *Propriedades magnéticas da matéria* (BERNOULLI PLAY, 2018) e *Os poderes do Super Choque* (NERDOLOGIA, 2020), a fim de auxiliar na compreensão dos conceitos de campo elétrico e campo magnético assim como das propriedades existentes na matéria, que permitem a formação de ímãs. O vídeo auxiliou, significativamente, a visualização de conceitos abstratos, que, dificilmente, seriam aprendidos com a metodologia textual. Utilizou-se, também, o simulador em formato de *applet* “Cargas e Campos” (PHET), considerado um ODA, para auxiliar os alunos a compreender os conceitos de frustração geométrica em uma rede bidimensional com um análogo de cargas elétricas.

2.3 Experimento demonstrativo em aula

Tendo em vista que a Física estuda a natureza e os fenômenos ligados a ela, no processo de aprendizagem, a realização de experimentos contribui, significativamente, para a compreensão dos conteúdos (LOUREIRO, 2019). A utilização de experimentos promove analogia entre o objeto demonstrado e o conteúdo teórico, permitindo que os alunos observem o produto apresentado e compreendam os resultados a partir da experiência.

Na área de Física, a experimentação é relevante, sua ausência contribui para o desinteresse dos estudantes e promove o uso da metodologia expositiva, focada em conceitos e métodos matemáticos.

Apesar do reconhecimento do papel basilar da experimentação para o estudo da Física, professores e alunos esbarram em alguns problemas, como aulas demasiadamente teóricas (CARVALHO *et al.*, 2019, p. 264).

O uso da experimentação como abordagem de ensino torna as aulas de Física dinâmicas e interessantes, podendo promover nos alunos um aprendizado pela interação no processo investigativo. A inclusão do aluno no processo experimental demonstra-se como uma estratégia relevante para uma participação ativa, auxiliando os alunos a se tornarem mais aptos a enfrentarem a sociedade como cidadãos críticos (VERONEZ *et al.*, 2015).

As atividades experimentais devem ser ações conscientes e planejadas pelo professor, permitindo o levantamento de hipóteses e discussões coordenadas, focando em atividades investigativas e fazendo do aluno protagonista das ações (LIMA, 2012).

A importância da centralidade do aluno no processo de aprendizagem está na promoção de seu engajamento com a disciplina. Assim, a experimentação se candidata a importante aliada do professor de Física na Educação Básica. Nesse sentido, apresenta-se o produto em sequência didática, para que os alunos relacionem fenômenos físicos, em um experimento, com sua aprendizagem teórica.

2.4 Introdução à Física Moderna através da Nanociência e Nanotecnologia na Educação Básica

O ensino da Física Moderna na Educação Básica está cercado de diversos desafios, entre eles a sua ainda pequena presença nas matrizes curriculares e dificuldades apresentadas pelos alunos e professores a respeito dessa matéria. O professor ainda tem muitas dificuldades em ensinar a Física Moderna, com erros conceituais, falta de uma abordagem metodológica adequada para o tema e ausência de aulas experimentais. (PINHEIRO, 2021)

O ensino da Física Moderna requer a compreensão de uma série de fenômenos, que a Física Clássica não poderia explicar (ASSAD, 2017), como, por exemplo, a Radiação de Corpo Negro e Efeito Fotoelétrico, motivando novas teorias e avanços científicos. A quantização da energia, proposta por Planck em 1901, é considerada o marco inicial da Mecânica Quântica (PIRES, 2011) e deu origem às

evoluções científicas do século XX. Dentre as evoluções da Física Moderna, destaca-se a Nanociência, que possibilitou a criação e o manuseio de componentes em escalas nanométricas, o que é chamado de Nanotecnologia. É na nanoescala que se torna aparente a capacidade de se trabalhar no nível molecular para criar estruturas com uma organização molecular fundamentalmente nova, atingindo propriedades diferenciadas (LOOS, 2014).

O físico americano Richard Feynman é considerado como o precursor da Nanociência e Nanotecnologia. Em 1959, ele realizou uma palestra sobre a potencialidade de universo em escalas reduzidas, explorando a possibilidade de compilação de dados em compartimentos muito pequenos (TONET, 2019). O termo Nanotecnologia surgiu em 1974, cunhado pelo professor Norio Taniguchi (EDWARDS, 2006). Ainda nesse contexto histórico, a criação do Microscópio de Corrente de Tunelamento, em 1981, permitiu a visualização de um único átomo e mostrou que haveria a possibilidade do desenvolvimento de nanoestruturas com o manuseio de átomos (TONET, 2019).

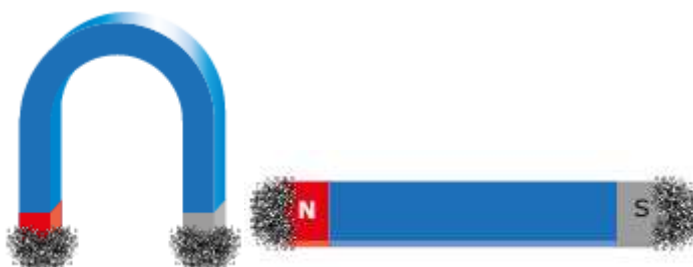
Esse assunto é relevante e possui grande potencial para um desenvolvimento crítico e científico dos jovens (LEONEL, 2010). Acredita-se que o uso de abordagens inovadoras para tratar dos conceitos da Física Moderna é essencial para tornar mais efetivo o processo de aprendizagem bem como possibilitar que o conteúdo estudado se torne tangível aos alunos. Este é o pilar deste trabalho: que o aluno conheça a Física Moderna, tangenciando conceitos relacionados à Nanociência e Nanotecnologia, com a intencionalidade de seu desenvolvimento cognitivo e crítico, para o enfrentamento dos desafios, que o mundo contemporâneo exige.

3 A FÍSICA

3.1 Propriedades de um ímã – Teoremas de Gilbert

Pode-se dizer que os ímãs são objetos, que interagem com alguns metais e outros ímãs. Os ímãs formam ao seu redor um campo magnético, que pode ser representado por linhas de campos. É possível observar na Figura 1 que as limalhas de ferro foram atraídas, principalmente, para as extremidades dos ímãs. Isso ocorre por haver maior densidade de linhas de campo magnético naquela região.

Figura 1: Limalhas de ferro sendo atraídas pelos polos de ímãs

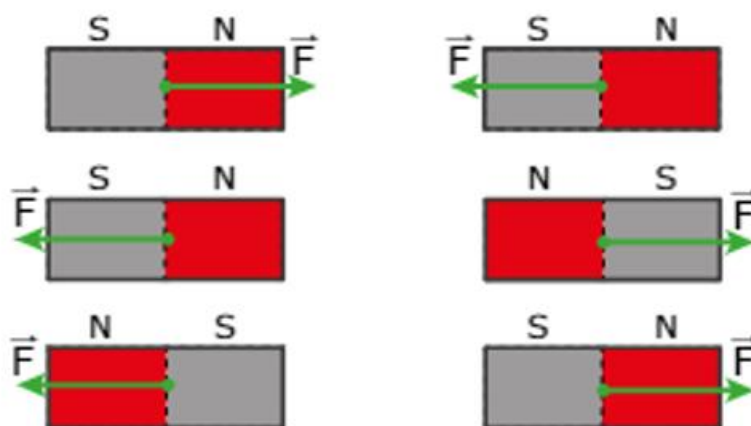


Fonte: Couto, Canto e Machado (2021, p. 93).

As propriedades magnéticas da matéria assim como a explicação de como é formado um ímã se encontram no item 3.7. Todavia, para dar continuidade, será necessário compreender que essas extremidades, onde o campo magnético é mais intenso, serão denominadas polo Norte e polo Sul do ímã. William Gilbert (1540-1603) descreve em sua obra, *De magnete, magneticisque corporibus, et de magno magnete tellure* (*Sobre o Magnetismo, Corpos magnéticos e o Grande Ímã Terra*, 1600), suas experiências e seus estudos sobre o magnetismo, explicando, através de seus postulados, que a Terra seria um ímã assim como seriam as interações entre os polos dos ímãs (PIRES, 2011).

Gilbert (1958) afirma que a forma como os ímãs interagem está relacionada com a posição onde seus polos se encontram quando aproximados. Haverá atração entre os ímãs quando se aproximar o polo Norte de um deles ao polo Sul do outro, e vice-versa. A atração ocorre, também, ao se aproximarem alguns metais de qualquer um dos polos do ímã, como visto com as limalhas de ferro na Figura 1. Já a repulsão ocorre somente quando são aproximadas as extremidades com polos de mesmo nome, Norte com Norte, Sul com Sul. O fenômeno é ilustrado na Figura 2.

Figura 2: Interação entre polos de ímãs



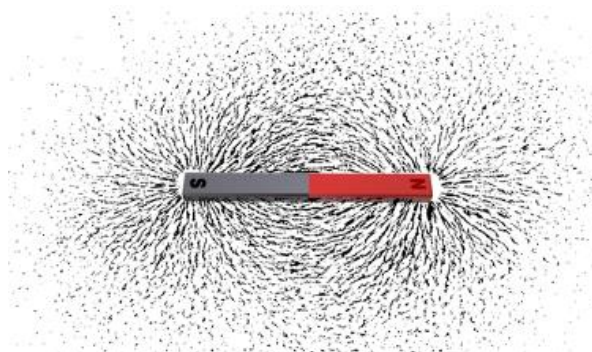
Fonte: Couto, Canto e Machado (2021, p. 93).

3.2 O campo magnético

Assim como objetos massivos são capazes de realizar forças gravitacionais a distância e cargas elétricas são capazes de realizar forças elétricas a distância, ímãs, também, são capazes de exercer forças a distância. É fácil imaginar que, da mesma forma que objetos criam um campo gravitacional devido à sua massa, objetos eletrizados criam um campo elétrico devido à sua carga elétrica e ímãs criam um campo magnético devido a alguma propriedade física em seu interior, sendo este o objeto de estudo do tópico 3.7.

Neste tópico, será caracterizado o campo magnético. O campo magnético pode ser representado por linhas de indução magnética assim como o elétrico e o gravitacional. Essas linhas definem a intensidade, direção e sentido do campo magnético. O campo magnético possui linhas de indução fechadas, podendo passar pelo interior do próprio ímã (GRIFFITHS, 2011). Ao se aproximarem limalhas de ferro de um ímã, percebe-se o formato do campo magnético formado ao seu redor, como representado na Figura 3.

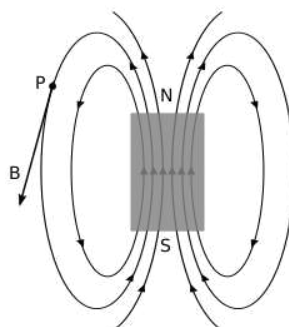
Figura 3: Limalhas de ferro mostrando o comportamento do campo magnético próximo a um ímã



Fonte: Silva (2022).

A representação desse campo pode ser feita em forma de esquema, ajudando a visualizar o comportamento do campo magnético no interior do ímã e no espaço que o envolve.

Figura 4: Representação esquemática das linhas de força de um campo magnético



Fonte: elaborado pelo autor.

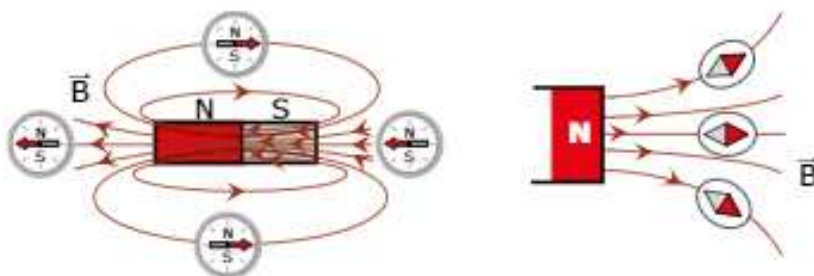
Ao observar a Figura 3, observa-se maior concentração de limalha próxima aos polos. A Figura 4 mostra como é o comportamento dessas linhas de campo no ímã. Há maior concentração de linhas de campo próximo nos polos, o que justifica a maior quantidade de limalha nessa região. Essa concentração de linhas é denominada densidade de linhas de campo (GRIFFITHS, 2011). As linhas de campo magnético sempre serão representadas saindo do polo Norte e entrando pelo polo Sul.

Amarrando um fio, ou usando uma agulha em seu centro gravitacional, é possível equilibrar um ímã em forma de barra, como o da Figura 3. Esse ímã se orienta com uma extremidade apontando seu polo Norte para o polo Norte geográfico da Terra. Essa orientação acontece, porque o ímã tende a se posicionar seguindo as

linhas de campo ao seu redor. Na ausência de outros campos mais intensos, esse ímã fica sujeito ao campo magnético terrestre (GRIFFITHS, 2011). Esse é o princípio básico de funcionamento da bússola, um instrumento de orientação muito importante, usado há séculos, para navegação marítima e trilhas em meio a matas entre outros.

Uma bússola colocada em uma região de campo magnético se orienta sempre na direção do campo, com o vetor campo magnético tangente às linhas de campo: o polo Norte da bússola acompanha o polo Norte do campo, como representado na Figura 5.

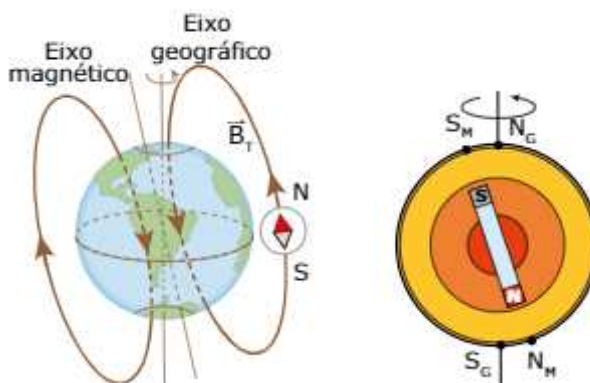
Figura 5: Orientação de uma bússola na presença de linhas de força de um campo magnético



Fonte: Couto, Canto e Machado (2021, p. 94).

Devido ao movimento de rotação e à estrutura de seu núcleo, a Terra se comporta como um gigantesco ímã. Por esse motivo, uma bússola na superfície da Terra irá se posicionar na direção norte-sul dela, como enunciado por Gilbert (1958). Já foi dito que bússolas apontam seu polo Norte para o Norte geográfico da Terra, e o polo Sul para o Sul geográfico. Porém, como visto na Figura 5, uma bússola na superfície de um ímã irá apontar seu polo Norte para o polo Sul do ímã. Isso significa que a Terra tem seus polos geográficos invertidos em relação aos seus polos magnéticos. Além de serem invertidos, possuem uma pequena inclinação, como mostrado na Figura 6, em que N_G , S_G , N_M e S_M significam, respectivamente, polo Norte geográfico, polo Sul geográfico, polo Norte magnético e polo Sul magnético.

Figura 6: Campo magnético terrestre e inclinação de seu eixo magnético



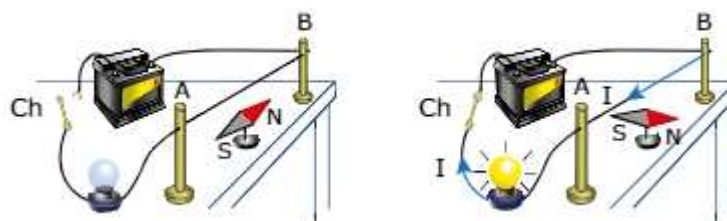
Fonte: Couto, Canto e Machado (2021, p. 98).

3.3 A experiência de Oersted

Durante muitos anos, o Magnetismo e a Eletricidade foram estudados de forma separada. Em 1820, o cientista Hans C. Oersted, enquanto trabalhava em seu laboratório, percebeu que, ao ligar um circuito elétrico que estudava, uma bússola em sua bancada sofria uma deflexão (GRIFFITHS, 2011). Naturalmente, a bússola aponta na direção Norte-Sul da Terra. Porém, na presença de outros campos magnéticos, ela irá se posicionar na direção e no sentido do campo elétrico resultante. Oersted percebeu que a presença de uma corrente elétrica criava um campo magnético ao seu redor, algo similar ao que acontecia com as bússolas ao serem aproximadas de um campo magnético formado por um ímã (GRIFFITHS, 2011). Ele concluiu que cargas elétricas em movimento se comportavam como ímãs, gerando campo magnético. No tópico 3.7, será apresentado que os ímãs possuem esse comportamento devido ao movimento de cargas elétricas (elétrons) em sua estrutura material.

Uma representação da descoberta feita por Oersted em seu laboratório é feita na Figura 7.

Figura 7: Representação do experimento de Oersted



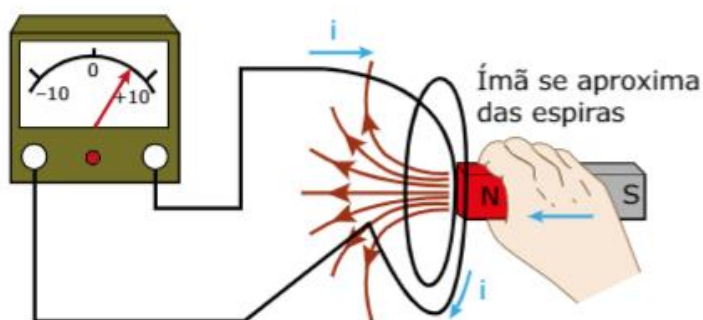
Fonte: Couto, Canto e Machado (2021, p. 94).

Observa-se, no esquema da Figura 7, que, quando o circuito se encontra desligado, chave Ch desconectada, a bússola está em sua posição natural, alinhada com o campo magnético terrestre. Quando a chave Ch é fechada, o circuito é ligado, passando corrente elétrica pelos fios e acendendo a lâmpada. A bússola, sob um dos fios pelo qual passa a corrente, sofre uma deflexão, direcionando-se de forma ortogonal ao fio e sendo uma boa representação para a experiência descrita por Oersted.

3.4 Lei de Faraday

Após a descoberta de Oersted de que cargas elétricas em movimento geram campo magnético, físicos da época investiram seus estudos para descobrir se o contrário poderia ocorrer: movimentar cargas elétricas a partir de um campo magnético. Em 1831, o físico Michael Faraday percebeu, em um de seus experimentos, que, ao movimentar uma espira de fio através de um campo magnético, uma força eletromotriz (f.e.m.) era gerada, passando uma corrente elétrica pelo fio. O mesmo acontecia quando o ímã era movimentado ou quando alterava a intensidade do campo magnético (GRIFFITHS, 2011). A Figura 8 ilustra uma das experiências realizadas por Faraday.

Figura 8: Representação de experimento realizado por Faraday



Fonte: Couto, Canto e Machado (2021, p. 91).

A partir de suas observações, Faraday enunciou que “um campo magnético que varia induz um campo elétrico”. Para entender essa variação do campo magnético, faz-se necessário entender o conceito de fluxo magnético: “O fluxo magnético (ϕ) é proporcional ao número de linhas de indução que atravessam uma determinada superfície a cada instante” (COUTO; CANTO; MACHADO, 2021, p. 91).

Quantitativamente, a força eletromotriz (ε) induzida em uma espira é igual à taxa de variação do fluxo magnético:

$$\varepsilon = \frac{-d\phi}{dt} \quad (1)$$

Nota-se que apenas a existência de uma bobina imersa em uma região onde há fluxo magnético não é suficiente para que ali seja induzida uma força eletromotriz. Existe a necessidade de variar o fluxo magnético em um intervalo de tempo. O fluxo magnético, que atravessa uma bobina, depende da área da bobina imersa no fluxo, da intensidade do campo magnético e do ângulo de inclinação da bobina em relação ao fluxo (GRIFFITHS, 2011). Essa variação do fluxo magnético pode acontecer alterando qualquer uma dessas grandezas num intervalo de tempo; ou seja, pela derivada temporal do fluxo magnético, como representado na Equação (1).

Outro fator importante da Equação (1) é o sinal negativo para a força eletromotriz. O russo Heinrich Lenz foi o físico que melhor explicou esse aspecto da Lei de Faraday (GRIFFITHS, 2011). Por esse motivo, é denominada como Lei de Lenz a regra para determinar o sentido da corrente induzida em uma bobina. É possível transcrever a Lei de Lenz: “Em um circuito fechado (espira ou bobina), a corrente

elétrica induzida apresenta um sentido que contraria a sua causa (a variação do fluxo magnético no circuito)” (COUTO; CANTO; MACHADO, 2021, p. 94).

Isso significa que, quando um fluxo magnético varia em uma espira, é gerada uma mudança no campo magnético, produzindo nela uma corrente elétrica. Essa corrente, por outro lado, produz outro campo magnético, que tenderá a conter essa variação, estando, assim, no sentido contrário à causa. Por isso, a equação de Lorentz recebe um sinal negativo para a força eletromotriz induzida.

3.5 Lei de Biot-Savart e Lei de Ampère

Oersted percebeu, em 1820, que o ímã de uma bússola era defletido na presença de uma corrente elétrica. Concorrentemente, em 1820, Jean Baptiste Biot e Félix Savart formularam, experimentalmente, a lei que permite calcular o campo magnético que correntes elétricas produzem (PIRES, 2011).

Cargas elétricas estacionárias geram em seu entorno campos elétricos constantes no tempo e dão origem ao termo eletrostática. Correntes estacionárias – fluxo contínuo, sem alterações e sem acúmulo de cargas em lugar algum – produzem campos magnéticos, que são constantes no tempo. A teoria das correntes estacionárias chama-se magnetostática (GRIFFITHS, 2011).

Cargas estacionárias → campos elétricos constantes: eletrostática
Correntes estacionárias → campos magnéticos constantes: magnetostática

A Lei de Biot-Savart calcula a intensidade do vetor campo magnético a partir da soma das contribuições que cada “pedaço” de um fio, transcorrido por uma corrente estacionária, fornece a um ponto no espaço e é dada por:

$$B(r) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int \frac{I \, d\mathbf{l}' \times \hat{r}}{r^2} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int \frac{d\mathbf{l}' \times \hat{r}}{r^2}. \quad (2)$$

A integral da Equação (2) é calculada pelo caminho da corrente, na direção do fluxo, sendo $d\mathbf{l}'$ um elemento de comprimento ao longo do fio e r é o vetor, que define a distância de uma origem de coordenadas até o ponto que deseja calcular o campo B (GRIFFITHS, 2011). A constante μ depende do meio onde o sistema se encontra,

sendo μ_0 a permeabilidade magnética no vácuo, que possui valor descrito na Equação (3):

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \frac{N}{A^2} \quad (3)$$

Em 1822, André Marie Ampère, ciente das descobertas de Oersted, focou seus estudos nesta área, enunciando a lei que leva seu nome e indica a direção do campo magnético a partir de um circuito elétrico (PIRES, 2011). Com seus estudos para indicar a direção do campo magnético gerado por um circuito, percebeu que fios paralelos eram atraídos quando percorridos por correntes de mesmo sentido e repelidos quando percorridos por correntes contrárias. Descobriu, também, que barras de ferro envoltas por um solenoide atuam como ímãs.

Ao aplicar a divergente do vetor campo magnético B , usado na Lei de Biot-Savart, o resultado é zero, o que ajuda a reforçar a não existência de uma carga magnética, como exposto nas equações de Maxwell, citadas no próximo tópico. Ao se aplicar o rotacional do campo magnético (GRIFFITHS, 2011), encontra-se a Lei de Ampère na forma diferencial:

$$\nabla \times B = \mu_0 \cdot J \quad (4)$$

Ao fazer algumas conversões matemáticas usando o Teorema de Stokes, é possível chegar à Lei de Ampère na forma integral; e determinando algumas condições de contorno, consegue-se calcular o campo magnético criado por um fio percorrido por correntes elétricas, por uma bobina ou um solenoide, levando esses conceitos até o Ensino Médio.

3.6 Equações de Maxwell

Em 1873, o físico James Clerk Maxwell uniu, em sua obra, as descobertas de Oersted e Faraday, entre outros importantes nomes para o desenvolvimento da Eletricidade e do Magnetismo, enunciando as Equações de Maxwell para o Eletromagnetismo, que são:

Quadro 1: Leis de Maxwell²

(i)	$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$	(Lei de Gauss)
(ii)	$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$	(sem nome)
(iii)	$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$	(Lei de Faraday)
(iv)	$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}$	(Lei de Ampère com a correção de Maxwell)

Fonte: Griffiths (2011, p. 226).

As equações de Maxwell, apresentadas no Quadro 1, mostram como o campo elétrico (E) e o campo magnético (B) são gerados a partir de cargas elétricas estáticas e cargas elétricas em movimento. Essas equações, quando suplementadas adequadamente com condições de contorno, juntamente com a lei de força para cargas elétricas em campos elétricos e magnéticos, são capazes de resumir toda a eletrodinâmica clássica.

Reforça que campos elétricos podem ser produzidos tanto por cargas quanto pela variação dos campos magnéticos, e os campos magnéticos podem ser produzidos tanto por correntes quanto pela variação dos campos elétricos, lembrando que essa variação do campo elétrico e do campo magnético são decorrentes de cargas e correntes elétricas (GRIFFITHS, 2011, p. 227).

Ao definir o divergente e o rotacional de E e B, é possível atribuir a existência dos campos às fontes: cargas (ρ) e corrente (J).

3.7 Propriedades magnéticas da matéria

Com base no experimento de Oersted, é possível conjecturar que o aparecimento de campos magnéticos na matéria deve estar associado a correntes elétricas em seu interior. Dessa forma, a intenção deste tópico é compreender como acontecem os fenômenos magnéticos na matéria.

As propriedades magnéticas da matéria têm sua origem na estrutura eletrônica dos átomos. Os elétrons executam os movimentos de translação em torno do átomo

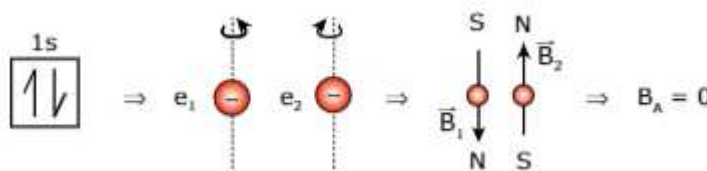
² Uma vez que o foco do presente trabalho não se constitui em aprofundamento acerca da Teoria de Maxwell, mais informações podem ser acessadas em Griffiths (2011), Oberziner (2008) e Lima (2019).

e de rotação em torno do seu próprio eixo, rotação essa, que recebe o nome de spin e é o movimento mais relevante para o magnetismo (COUTO; CANTO; MACHADO, 2021). Conforme ilustrado na Figura 9, esse giro dos elétrons em torno do seu próprio eixo pode ocorrer no sentido horário ou no sentido anti-horário, possuindo spin *up* ou spin *down*, que estão associados com os elétrons que ocupam os níveis de energia – orbitais – no átomo.

Os elétrons, que possuem spins opostos, tendem a formar pares. Quando isso ocorre, é dito que o orbital está completo, como o orbital 1s da Figura 9. Existe uma forma de representar a distribuição eletrônica dos spins através de subníveis de energia, conhecida como Diagrama de Energia, ou Diagrama de Pauling, obedecendo à regra de Hund (CHANG, 2013). O preenchimento dos orbitais acontece respeitando-se algumas regras, em que, para um mesmo nível de energia, primeiro preenchem-se todos os orbitais com spin *up* e, em seguida, os completam com spin *down* desde que haja elétrons suficientes.

Observando o orbital 1s completo, nota-se que os elétrons produzem campos magnéticos opostos e de mesmo módulo, anulando-se. Em substâncias com orbitais completos, as características magnéticas são, normalmente, desprezíveis.

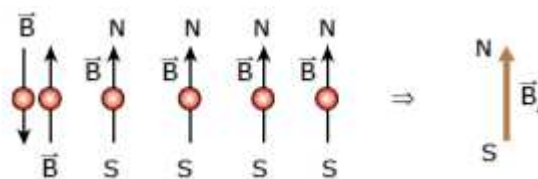
Figura 9: Orbital 1s completo com um spin *up* e um spin *down*



Fonte: Couto, Canto e Machado (2021, p. 99).

O ferro possui 26 elétrons em seu estado fundamental. A distribuição eletrônica nos seus subníveis, em ordem energética, tem a seguinte composição: $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 4s^2 3d^6$ (CHANG, 2013). Como o orbital 3d é mais energético que o orbital 4s, seu preenchimento só se dá após o 4s estar preenchido. O subnível d tem como número máximo dez elétrons e, para o átomo de ferro, restando seis elétrons para o nível 3d, essa distribuição ocorre conforme a Figura 10.

Figura 10: Último nível de energia para o átomo de ferro



Fonte: Couto, Canto e Machado (2021, p. 99).

Diferente do orbital 1s completo, o orbital 3d cria um campo magnético resultante por possuir cinco spin *up* e apenas um spin *down*. Esse desaparelhamento dos spins gera um dipolo magnético resultante de cada átomo de ferro, podendo ser chamado de dipolo magnético elementar (COUTO; CANTO; MACHADO, 2021).

Os materiais podem ser divididos de acordo com sua capacidade de magnetização (índice de permeabilidade magnética): ferromagnéticos, paramagnéticos e diamagnéticos (COUTO; CANTO; MACHADO, 2021). Os materiais paramagnéticos possuem permeabilidade magnética muito pequena, um pouco maior que a do vácuo, com seus dipolos magnéticos muito fracos. Por isso, a magnetização é quase nula. Já os materiais diamagnéticos são materiais, que possuem permeabilidade magnética um pouco menor que a do vácuo, também contribuindo pouco para sua magnetização, porém com uma característica especial: sua magnetização é oposta ao campo externo, sendo repelido ao ser aproximado de ímãs. Nos materiais ferromagnéticos, os dipolos magnéticos elementares são fortes, com índice de permeabilidade magnética muito superior à do vácuo.

Uma região de um material ferromagnético, em que os átomos produzem espontaneamente um campo magnético resultante na mesma direção e sentido, é chamada de domínio magnético (COUTO; CANTO; MACHADO, 2021). Nessas regiões, os elétrons desemparelhados de cada átomo possuem o mesmo spin. Entre um domínio e outro, existe uma interface chamada parede. Ela separa as regiões, onde o campo possui direção ou sentido contrária(o). Cada domínio se comporta como um pequeno ímã e está representado na Figura 11 com setas. Como normalmente eles estão orientados ao acaso, o caráter magnético do material acaba neutralizado.

Os domínios magnéticos podem mudar de direção se forem submetidos a um campo magnético externo, que, quando aplicado sobre o material, gradativamente,

faz com que os domínios se alinhem em sua direção (COUTO; CANTO; MACHADO, 2021). Se esse campo for suficientemente intenso, fará com que todos os domínios fiquem alinhados, como na Figura 11. Isso explica o porquê de, ao se aproximar um ímã de um prego, este se transforma em um ímã capaz de atrair outros pregos, e daí sucessivamente.

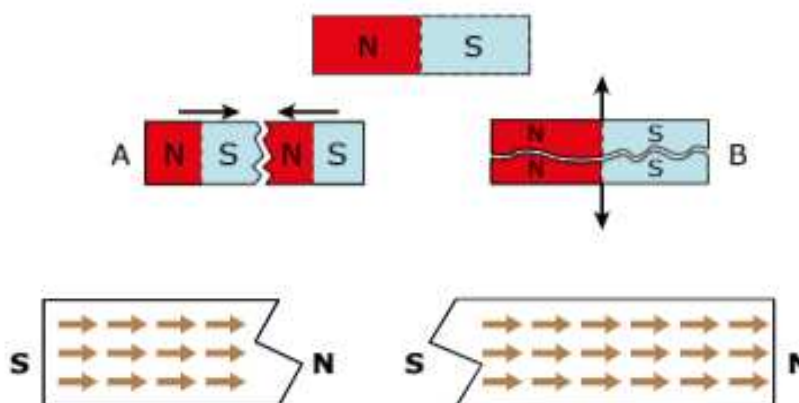
Figura 11: Comportamento dos domínios magnéticos na ausência e na presença de um campo externo



Fonte: Couto, Canto e Machado (2021, p. 99).

O entendimento do comportamento dos domínios magnéticos no interior de um ímã ajuda a entender a razão da propriedade de inseparabilidade de polos no magnetismo. Não é possível separar os polos Norte e Sul de um ímã, cortando-o ao meio. Quando feito, são criados dois novos ímãs, não existindo monopolos magnéticos (COUTO; CANTO; MACHADO, 2021), como representado na Figura 12.

Figura 12: Inseparabilidade dos polos



Fonte: Couto, Canto e Machado (2021, p. 99).

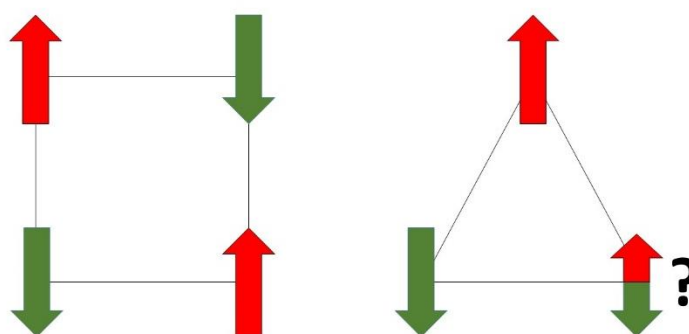
3.8 Gelos de spin

Para a compreensão do conceito de gelos de spin, faz-se necessário o entendimento do conceito de frustração geométrica. A frustração pode ser entendida

como a impossibilidade de satisfazer todas as interações magnéticas ao mesmo tempo (MENON; RAY, 2012).

Para exemplificar, supõe-se que os spins são dispostos em uma rede bidimensional quadrada e em uma rede bidimensional triangular, interagindo de forma antiferromagnética, ou seja, em que pares de spin se orientam em sentido contrário (antiparalela). É utilizado o modelo de Ising, que considera apenas as interações entre os spins vizinhos mais próximos (ASHCROFT; MERMIN, 2011). Conforme ilustrado na Figura 13, na rede quadrada, o sistema se orienta de forma antiparalela sem dificuldade, formando os pares de spins. Já na rede triangular, percebe-se que o spin do vértice superior se orienta para cima e o spin do vértice da esquerda para baixo de forma antiparalela. Porém, o spin do vértice da direita não consegue se alinhar de forma antiparalela, tendo, ali, um sistema frustrado; ou seja, alinhado paralelamente.

Figura 13: Fenômeno de frustração geométrica dos spins



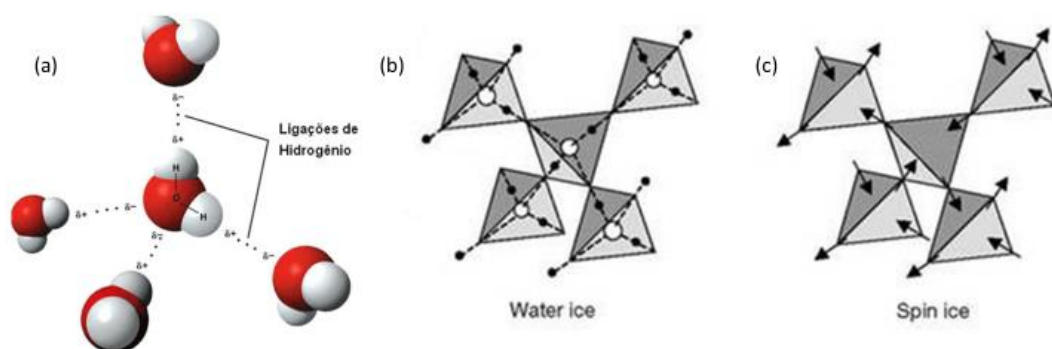
Fonte: autor

A frustração geométrica resulta em estados fundamentais degenerados, que podem gerar novos estados exóticos da matéria: líquido de spin, vidro de spin ou gelo de spin (CANOVA, 2019). Este trabalho é dedicado no estudo do gelo de spin.

A nomenclatura gelo de spin é dada a partir da posição que os spins ocupavam nos vértices de um tetraedro assim como a regra do gelo:

Cada átomo de oxigênio pode formar duas ligações de hidrogênio, ou seja, um número igual ao número de pares de elétrons isolados. Assim, as moléculas de água ficam ligadas formando uma rede tridimensional extensa na qual cada átomo de oxigênio está ligado a quatro átomos de hidrogênio por duas ligações covalentes e duas ligações de hidrogênio, adotando uma geometria aproximadamente tetraédrica (CHANG, 2013, p. 477-478).

Figura 14: (a) Estrutura cristalina do gelo; (b) estrutura expandida; (c) spins no vértice dos tetraedros



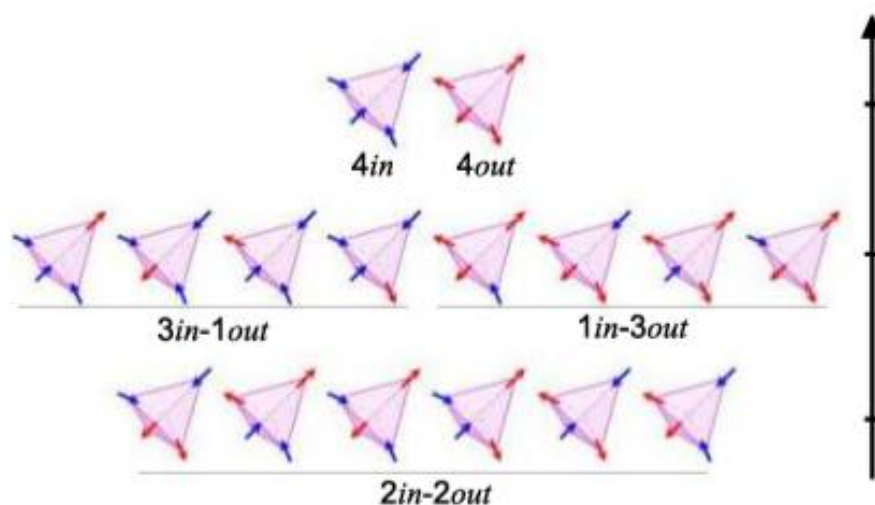
Fonte: (a) – (FOGAÇA, 2023); (b) e (c) – [<http://www.futura-sciences.us/dico/d/physics-spin-ice-50003820/>]

A Figura 14 (a) representa a estrutura tetraédrica do gelo da água, respeitando a regra do gelo citada anteriormente, a Figura 14 (b) mostra essa mesma estrutura expandida com representando a configuração de cinco tetraédricos vizinhos e a Figura 14 (c) traz mostra essa mesma configuração mapeada para o gelo de spin.

Foi descoberta a existência de um grupo de materiais pirocloros, que possuíam análogo magnético em relação ao gelo da água, como o titanato de disprosio ($\text{Ho}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$) e o titanato de hólmio ($\text{Dy}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$) (onde Dy é disprosio e Ho é hólmio) por exemplo. Esses materiais possuem suas propriedades magnéticas devido aos átomos de terras raras Dy^{3+} e Ho^{3+} e, para temperaturas inferiores a 200 K, possuem uma orientação preferencial de spins alinhados para o centro de tetraedros vizinhos (CASTELNOVO, 2008).

Gelos de spin naturais possuem frustração geométrica devido à interação ferromagnética de seus spins. Em seu estado de menor energia, obedecem à regra do gelo, como na Figura 15: dois spins apontam para dentro do tetraedro e dois apontam para fora, enquanto, em sua disposição de maior energia, possui os quatro spins apontando para dentro ou os quatro apontando para fora.

Figura 15: Possíveis configurações para os spins dispostos no tetraedro



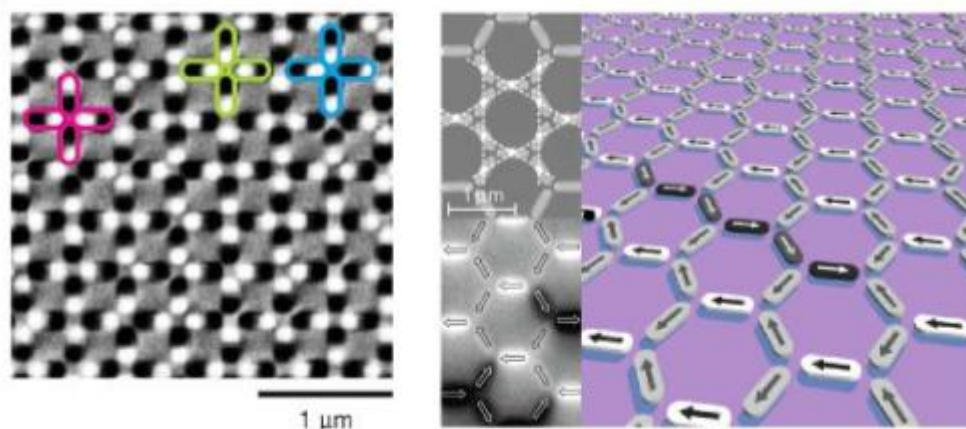
Fonte: Nascimento (2012).

Na Figura 15, são representadas as 16 configurações de posições possíveis dos spins no vértice do tetraedro. As configurações estão separadas por níveis de energia contabilizadas para interação de troca com spins ferromagnéticos (NASCIMENTO, 2012). As setas em azul representam spins apontando para dentro e as em vermelho são os spins apontando para fora do tetraedro. É possível perceber que, das 16 configurações possíveis para os spins em um tetraedro, seis obedecem à regra do gelo, *2in-2out*. As demais configurações são do tipo *3in-1out*, *1in-3out*, *4in* e *4out*. Essa última é uma configuração mais rara devido à alta energia, que seria necessária.

Foi proposto um modelo em que os dipolos magnéticos de um spin fossem considerados como duas cargas opostas e rígidas, parecido com um haltere. As configurações *3in-1out*, *1in-3out* e *4in* e *4out* violam a regra do gelo, havendo nessas regiões um comportamento de monopolo magnético emergente (CASTELNOVO, 2008).

Wang *et al.* (2006) propuseram a fracionalização de dipolos e excitações tipo monopolos magnéticos, para investigar as frustrações geométricas em sistemas que eles chamaram de gelos de spin artificiais (GSA) (WANG *et al.*, 2006). GSA são redes bidimensionais de ilhas ferromagnéticas em escalas nanométricas, fabricadas por litografia de feixe eletrônico, projetada para que sua configuração, principalmente quadrada e *kagome*, apresente frustração geométrica (NASCIMENTO, 2012).

Figura 16: imagem de gelos de spin em rede quadrática e de kagome gerada por microscopia de força magnética (MFM)



Fonte: Wang *et al.* (2006).

Analisando a Figura 16, é possível perceber a formação dessas redes através de microscopia de força magnética (MFM). A primeira imagem se trata de uma formação dos gelos de spin em rede quadrada e a segunda imagem em rede de *kagome*.

As nanoilhas, que podem ser encontradas na literatura de formas e tamanhos variáveis, possuem dimensões comuns entre 10 e 400 nm, o que justifica o termo nano. São, em sua maioria, feitas de *permalloy*, uma liga constituída de níquel e ferro.

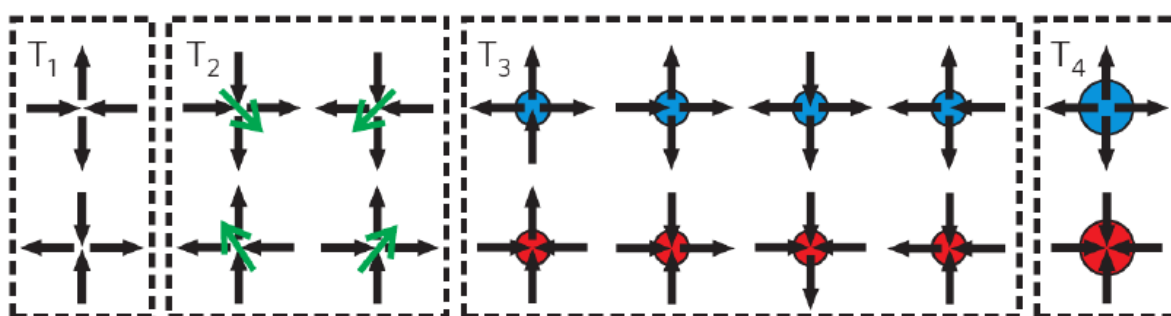
A utilização de permalloy faz com que o material apresente uma anisotropia cristalina efetivamente nula, proporcionando uma anisotropia de forma de modo que os momentos magnéticos se alinhem ao longo do eixo de maior comprimento. Com isso, podemos interpretar as nanoilhas como sendo um macro-spin tipo Ising com interação predominantemente dipolar. (DUARTE, 2022, p. 12).

Na Figura 16, é possível observar esses dipolos nos vértices da estrutura em pares de pontos claros e escuros. Outra característica do *permalloy* é a permeabilidade magnética elevada, possibilitando que as nanoilhas não sofram reversão em sua magnetização, podendo ser considerada atômica, o que auxilia para que não haja variâncias à temperatura ambiente.

Os gelos de spin artificiais (GSA) dispostos em uma rede quadrada são um excelente análogo bidimensional de um gelo de spin disposto em um tetraedro tridimensional. Ao alocar os spins em uma rede quadrada, quando dois spins apontam um para o centro e o outro para fora de uma ilha, essa será uma disposição, que

favorece a minimização de energia; e quando os dois apontam para o centro ou para fora, serão disposições, que desfavorecem a minimização de energia. Em uma estrutura quadrada, existem quatro spins em cada vértice, resultando em 16 configurações possíveis. Considerando a nanoilha como um dipolo ideal e interações dipolares entre os quatro dipolos, que compõem o vértice da rede quadrada, observa-se que as 16 configurações podem ser agrupadas em quatro topologias (NASCIMENTO, 2012), como ilustrado na Figura 17.

Figura 17: Configurações possíveis para o spin em uma rede quadrática



Fonte: Nascimento (2012).

As topologias T1 e T2 obedecem à regra do gelo *2in-2out* e são as configurações menos energéticas, sendo, ainda, T2 mais energética que T1, diferença que depende do tamanho das nanoilhas. As configurações T3 são do tipo *3in-1out* ou *1in-3out* e as configurações T4 são do tipo *4in* e *4out*. As configurações de T3 e T4 ferem a regra do gelo, gerando frustração geométrica, sendo T4 uma configuração mais energética que T3 (NASCIMENTO, 2012).

3.8.1 Monopolos emergentes

Historicamente, a indivisibilidade dos polos magnéticos sempre instigou e intrigou cientistas de todo o mundo, que se dedicaram na busca de um análogo magnético ao monopolo elétrico, que é a carga elétrica. Essa busca é em vão, visto que nunca fora encontrada uma forma de separar os polos magnéticos. Através de uma GSA, foi possível observar excitações do tipo monopolo pela primeira vez de forma experimental, sendo esse um grande avanço tecnológico. Foram investigados pares de monopolo e antimonopolo interagindo mediante interação coulombiana, podendo ser relacionado a uma excitação do tipo corda (MOL *et al*, 2009). Devido à

alta energia da corda que liga os pares, monopolos e antimonopolos são criados e destruídos, não permitindo a visualização desse monopolo se deslocando livremente pela rede. Na busca da observação desse deslocamento, pesquisadores se empenharam em encontrar condições necessárias para esse fenômeno em uma rede bidimensional. Verificou-se que a energia da corda irá diminuir em excitações acima do estado fundamental, em que haverá comportamento de polos magnéticos confinados por um fio, cuja tensão diminui à medida que o espaçamento entre as ilhas aumenta (MOL; MOURA-MELO; PEREIRA, 2010).

A fabricação dessa estrutura não tão simples foi possível após alguns anos de evolução das pesquisas no assunto. Perrin, Canals e Rougemaille (2016) relataram ter alcançado a degenerescência em gelo de spin artificial tridimensional. Farhan *et al.* (2019) caracterizaram a propagação de carga magnética como plasma de monopolo termicamente excitado. Teixeira (2021) relatou, em sistemas tridimensionais macroscópicos, o transporte de monopolos livres que se deslocam pela rede com liberdade com o controle de um campo magnético externo.

4 METODOLOGIA

Este tópico demonstra a proposta de sequência didática elaborada para a abordagem do ensino da Física Moderna em aula por meio do estudo do gelo de spin e do produto criado para essa finalidade.

O intuito inicial deste trabalho era a aplicação do produto produzido em diferentes turmas do Ensino Médio, almejando identificar a sua contribuição para o efetivo aprendizado dos alunos. No entanto, em decorrência da pandemia da Covid-19 e da suspensão das aulas presenciais, a experimentação da sequência didática teve que ser adaptada. Sem previsão do retorno de aulas presenciais, o produto foi apresentado aos alunos do curso de Mestrado Nacional Profissional em Ensino Física, da Universidade Federal de Viçosa, durante a disciplina Atividades Experimentais para Ensino Médio e Ensino Fundamental, lecionada pelo professor Eduardo Nery Duarte de Araújo no segundo semestre de 2021. A aplicação da sequência didática a alunos do professor-autor só foi possível após o fim das recomendações de isolamento social, sendo possível trabalhar apenas com uma turma do segundo ano do Ensino Médio.

Nesse aspecto, destaca-se que a sequência didática apresentada aos professores de Física, mestrandos do curso retro mencionado, e aos alunos do Ensino Médio, foi dividida em quatro etapas. O objetivo da primeira etapa foi promover o primeiro contato, de forma dinâmica, dos alunos com a temática escolhida.

Na segunda etapa, foi revisto o assunto com outra abordagem. Objetivou-se a aproximação da realidade do estudante com os conceitos de Física estudados, utilizando como estratégia didática a apresentação de um vídeo (NERDOLOGIA, 2020), que relaciona os conceitos de Física com o desenho *Super Choque*.

Na terceira etapa da sequência didática, sugere-se o estudo de gelos de spin, apresentando seus conceitos e fenômenos de forma teórica.

Por fim, na quarta etapa, o produto educacional, que embasou este trabalho, é apresentado aos alunos, complementando, de forma demonstrativa, os conceitos desenvolvidos.

4.1 Produto

4.1.1 Primeira etapa

A primeira etapa é iniciada com uma dinâmica, que visa a um primeiro contato dos alunos com o tema. Para isso, serão entregues diversos imãs de diferentes tamanhos e formatos, a fim de que eles, por meio de um processo investigativo, possam ter suas primeiras percepções sobre o material observado.

Objetivando instigar as percepções dos alunos, são realizados os questionamentos:

- “O que são esses materiais?”
- “De que eles são compostos?”
- “Eles são atraídos ou repelidos? Em quais posições? Por que isso acontece?”
- “Se cortar um deles, o que iria acontecer? Suas propriedades seriam perdidas?”
- “Em quais ferramentas ou situações os imãs são usados?”

Espera-se, com os questionamentos, despertar a curiosidade dos alunos pela busca das respostas corretas para eles, levando-os a tirar conclusões intuitivas sobre o tema, que poderão ser hipóteses confirmadas, ou não, com a devida compreensão de teoria apresentada.

Em seguida, é apresentada aos alunos uma breve explicação sobre os Teoremas de Gilbert, trazendo em aula o conceito de imã, os metais que são atraídos por ele, a formação das linhas de força e a interação entre os polos magnéticos. Busca-se, com essa explicação, que os alunos cheguem às respostas das questões levantadas anteriormente, compreendendo os fenômenos, que explicam as interações presentes naqueles materiais. Por fim, é feita uma explicação sobre a experiência de Oersted, elucidando como cargas elétricas em movimento podem gerar campos magnéticos

Complementa-se esse momento introduzindo os conceitos das propriedades magnéticas da matéria e da formação dos imãs, utilizando como meio didático a apresentação do vídeo *Propriedades magnéticas da matéria* (BERNOULLI PLAY, 2018), acessível pelo *link* <https://www.youtube.com/watch?v=wZIVAIYtlxI>.

A finalidade da primeira etapa consiste em apresentar aos alunos uma noção a respeito das propriedades dos ímãs, instigando-os a terem curiosidade para dar continuidade ao estudo deste assunto. É esperado, com esse momento, que os dois primeiros estágios de aprendizagem, segundo Piaget (1999), sejam alcançados. O estágio sensório-motor, com a interação inicial dos alunos com objetos e itens, talvez nunca vistos, e o estágio pré-operatório, marcado pela comunicação verbal, com levantamento de hipóteses e sugestões dos alunos.

4.1.2 Segunda etapa

A segunda etapa da sequência didática tem como finalidade aproximar a realidade do aluno à aplicação dos conceitos de Física trabalhados em aula. Para isso, é apresentado o vídeo *Os poderes do Super Choque* (NERDOLOGIA, 2020), narrado pelo professor Atila Lamarino. O vídeo relaciona conceitos de campos elétricos e gravitacionais com os poderes do super-herói do desenho animado *Super Choque*. O vídeo pode ser acessado através do link <https://www.youtube.com/watch?v=4Haq9OJqNrK&t=477s>.

O vídeo explica o que seria necessário para que o super-herói pudesse existir na vida real, possibilitando a analogia entre os conceitos de campo elétrico, campo gravitacional e campo magnético, compreensão que pretende ser alcançada com este trabalho. Espera-se que este momento contribua para o terceiro e quarto estágios de aprendizagem, conforme Piaget (1999): operatório-concreto e operatório-final, com os alunos revisando e concretizando assuntos da Física Clássica.

4.1.3 Terceira etapa

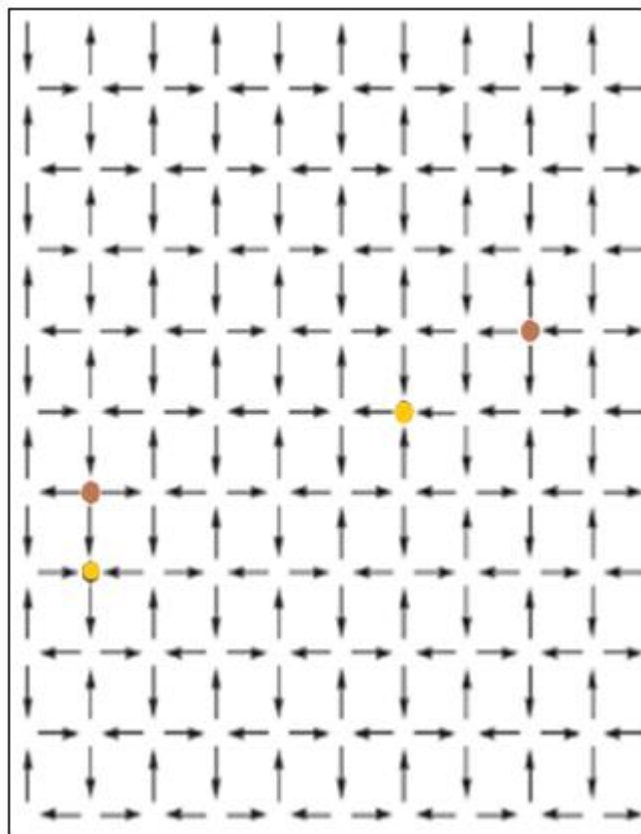
A terceira etapa da sequência didática pretende introduzir os conceitos de gelos de spin. Desse modo, é retomado o conhecimento abordado no primeiro momento para auxiliar na compreensão do comportamento dos spins e como eles se direcionam a partir do movimento dos elétrons. Em seguida, é feita uma breve explicação do conceito de frustração geométrica, esclarecendo que a sua ocorrência pode gerar novos estados exóticos da matéria, como o gelo de spin (CANOVA, 2019).

É mostrado aos alunos que os materiais denominados gelo de spin fornecem um novo estado magnético, em que os spins se localizam nos vértices de tetraedros,

obedecendo à regra do gelo, onde dois spins apontam para dentro do tetraedro e dois apontam para fora, em seu estado fundamental. Haverá frustração geométrica quando, na estrutura, acontecer a violação da regra do gelo, com três spins apontando para dentro e um para fora, ou três spins apontando para fora e um para dentro, ou, ainda, mais raramente, quatro spins apontando para dentro ou quatro spins apontando para fora.

Para a melhor visualização do comportamento desses spins, será realizada sua análise, a partir de uma simulação em uma rede plana quadrada, com os spins ocupando o vértice de quadrados, apontando para o centro ou para fora deste, como mostrado na Figura 18.

Figura 18: Comportamento dos spins em rede plana



Fonte: elaborada pelo autor.

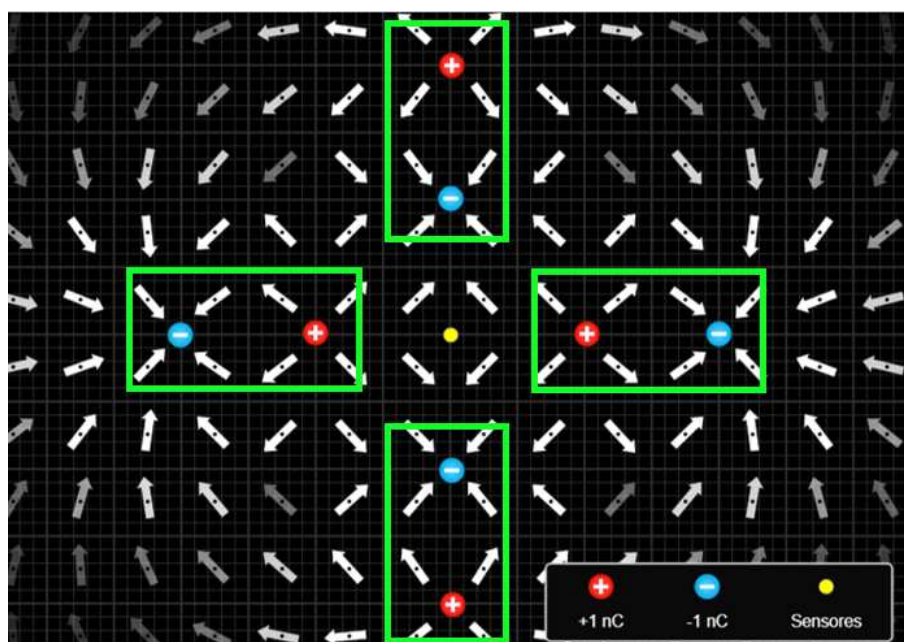
A partir da análise da Figura 18, os alunos devem perceber que, em cada vértice, os quatro spins, representados pelas setas, tendem a obedecer à regra do gelo; e quando essa regra é violada, excitações emergem – círculos amarelos e bege

–, deixando o sistema instável com a possibilidade de movimentação a partir de uma perturbação dessas excitações.

Os alunos, ainda, deverão conseguir compreender que, através da análise da Figura 18, em analogia com os conhecimentos construídos sobre frustração geométrica, demonstra-se que haveria dois spins horizontais e dois spins verticais em sentidos opostos. Logo, como no sistema existe frustração geométrica, ocorre um desequilíbrio na rede, criando-se excitação emergente, em que os spins se comportam como monopolos magnéticos.

Para a melhor visualização dessa excitação de monopolos magnéticos, propõe-se a realização de uma demonstração utilizando a simulação Cargas e Campos (PHET). É construída uma ilha quadrada simétrica, utilizando-se cargas elétricas positivas e negativas dispostas conforme a Figura 19, formando dipolos elétricos, que, por analogia, simulam os polos magnéticos de um spin.

Figura 19: Simulação de um análogo elétrico à configuração *2in-2out*



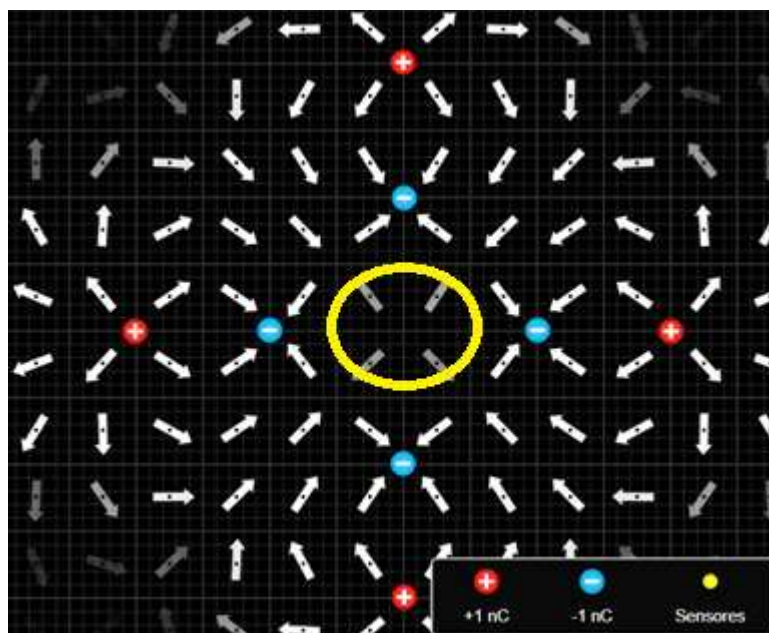
Fonte: elaborada pelo autor.

A montagem no simulador foi feita utilizando-se o recurso grade, com a intenção de preservar a simetria da ilha e mantendo as cargas equidistantes. Observa-se que, na posição em que está o sensor, representado por um ponto amarelo, o potencial é zero devido às interações entre as cargas. As cargas elétricas dispostas no sistema foram colocadas em pares e contornadas por um retângulo verde, com o

intuito de melhorar a visualização da analogia, que está sendo feita entre cargas elétricas e dipolos magnéticos. As cargas positivas funcionam como polo Norte e as cargas negativas como polo Sul. A montagem respeita a regra do gelo, com duas cargas positivas e duas cargas negativas mais próximas do centro.

Espera-se que o aluno consiga perceber a possibilidade de simular a manifestação de uma partícula emergente, que tem características de monopolo, através de uma violação da regra do gelo, invertendo os dois polos positivos, que apontavam para o centro, como observado na Figura 20. A mesma região, onde se encontra o sensor da Figura 19, foi destacada com um círculo amarelo na Figura 20. Percebe-se que, nessa região, não há cargas elétricas, mas, ainda assim, emerge um campo elétrico de um monopolo, como se ali existisse uma carga pontual positiva.

Figura 20: Simulação de um análogo elétrico à configuração *4in* ou *4out* para o surgimento de um monopolo emergente



Fonte: elaborada pelo autor.

Agora, ao fazer a mesma montagem com ímãs, será possível observar que as excitações elementares nos gelos de spin se comportam como monopolos magnéticos.

4.1.4 Quarta etapa

A quarta etapa da sequência didática apresenta aos alunos o produto, que foi reproduzido no LABSPIN da UFV, com o auxílio do aluno de pós-doutorado Hamilton Teixeira, em colaboração com o professor Clodoaldo I. J. Araújo.

Esse produto simula gelos de spin macroscópicos em uma rede quadrada, composta por ilhas simétricas, que é possível gerar um sistema frustrado, permitindo observar o análogo a um monopolo emergente. Toda a estrutura foi feita no LABSPIN utilizando-se impressão tridimensional, além de aquisições e composições de pequenas esferas de ímãs de neodímio de 5 mm de diâmetro.

O objetivo deste momento é a fixação dos conceitos estudados na sequência, com o intuito de que tudo o que foi discutido e apresentado seja visto de forma macroscópica, auxiliando no processo de aprendizagem.

Ciente da dificuldade para algumas instituições e professores em reproduzir o produto utilizando uma impressora 3D, o *site* <https://sites.google.com/view/gelodespinparaem> possui imagens e vídeos da rede em funcionamento, inclusive um guia com o passo a passo para montagem.

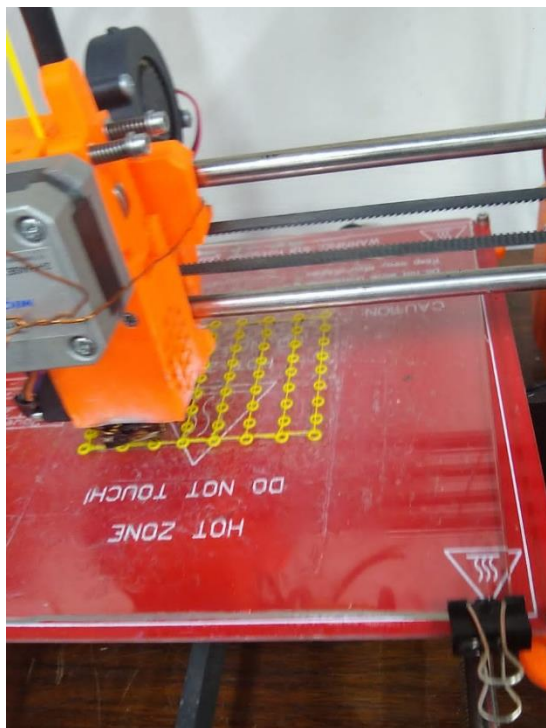
Aos que possuírem acesso e desejarem reproduzir o material, seguem os dados usados pelo Laboratório:

- Impressora tridimensional do tipo Prusa i5;
- Projeto e desenho elaborado no programa 123 designer;
- O material do filamento utilizado foi o PLA;
- Ímãs esféricos de neodímio com 5mm de diâmetro, adquiridos comercialmente.

A montagem é feita a partir de uma base, que suporta as hastes de fixação com dimensões de 3 cm de altura, 0,2 mm de espessura e 1,1 cm de largura, como mostrado na Figura 23. Nessas hastes, são fixados os suportes, que recebem os ímãs no formato, representados na Figura 25. Essas medidas podem ser adaptadas desde que sejam distantes o suficiente para permitir que os ímãs girem e próximas o suficiente para que haja interação entre eles. O custeio desprendido pelo professor-autor foi para a aquisição dos ímãs esféricos de neodímio, que, atualmente, é encontrado no mercado por R\$72,00.

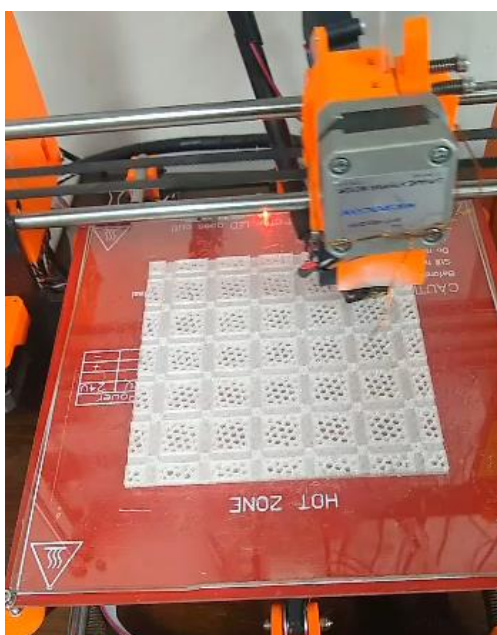
As Figuras 21 e 22 apresentam o produto em sua primeira fase de impressão no LABSPIN da UFV.

Figura 21: Imagem da reprodução do produto pela impressora 3D



Fonte: acervo do autor.

Figura 22: Imagem da reprodução do produto pela impressora 3D



Fonte: acervo do autor.

A Figura 23 mostra a estrutura da base e das hastes, e a Figura 24 mostra a base com as hastes encaixadas.

Figura 23: Base da rede GSA macroscópica



Fonte: acervo do autor.

Figura 24: Base com as hastes montadas da GSA macroscópica

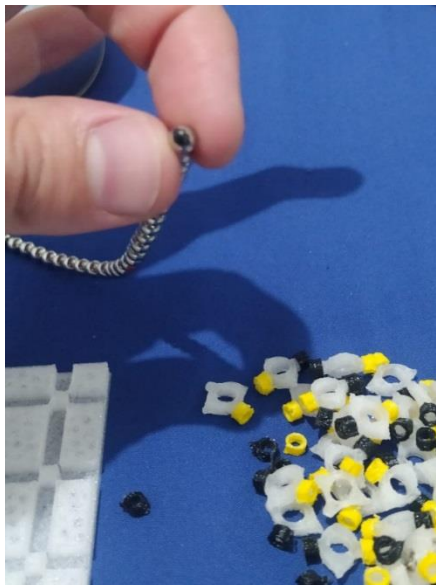


Fonte: acervo do autor.

A maior dificuldade da montagem, e na utilização, foi manter os ímãs com seus polos Norte e Sul identificados. Os ímãs utilizados foram esferas de neodímio 5 mm, que possuem seus polos em uma região da esfera. As esferas foram alocadas em um

suporte feito sob medida para elas. Para diferenciar os polos, foram utilizadas argolas com cores diferentes. Para encaixar as bolinhas dentro da argola, com seus polos no lugar exato, as esferas foram enfileiradas, com seus polos diferentes unidos. Foi feita uma marca com pincel em cada esfera, para, assim, ser ajustada dentro da argola e bem direcionados seus polos, como pode ser observado na Figura 25.

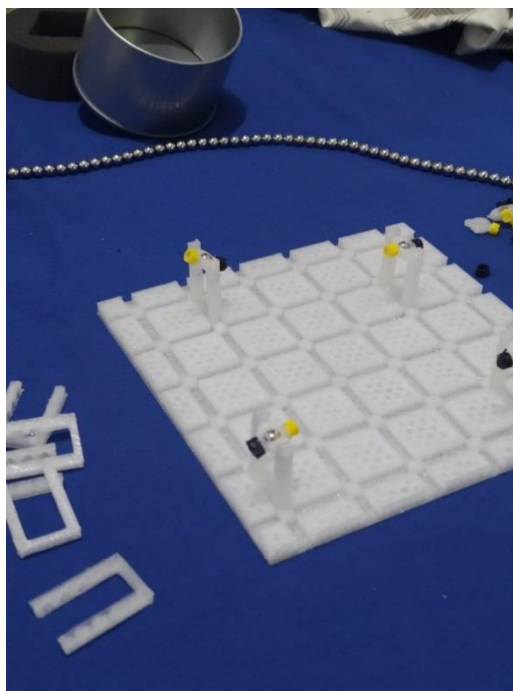
Figura 25: Demarcação dos polos do ímã esférico



Fonte: acervo do autor.

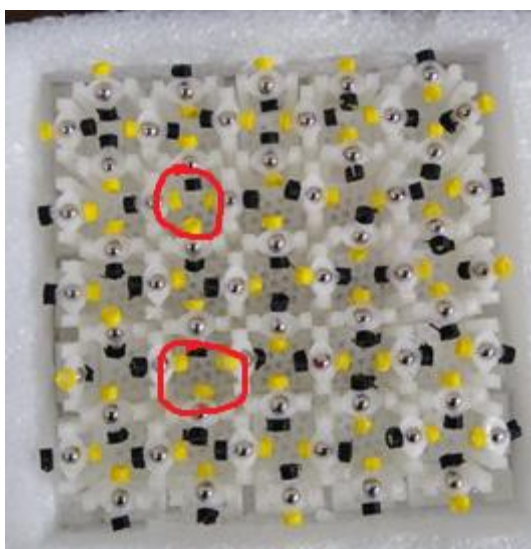
Na Figura 26, é mostrado como foram encaixadas na base cada uma das hastes já prontas, com esfera e argolas identificadoras. As Figuras 27, 28 e 29 mostram a estrutura pronta. É possível perceber que os ímãs se alinham buscando uma configuração menos energética e obedecendo à regra do gelo *2in-2out*. A intenção é observar pontos onde haverá violação dessa regra na rede. Na Figura 27, foram circulados de vermelho dois pontos, que violam a regra do gelo, havendo, ali, um comportamento de monopolo emergente. O sistema se encontra em equilíbrio instável, em que, a partir de uma perturbação externa, como o giro de um ímã próximo a esses pontos, haverá uma movimentação em toda a rede, permitindo a visualização do movimento desse monopolo emergente e aparecendo a violação em outro ponto da rede.

Figura 26: Montagem da rede macroscópica, que simula gelos de spin artificiais



Fonte: acervo do autor.

Figura 27: Vista superior da rede macroscópica, que simula gelos de spin artificiais



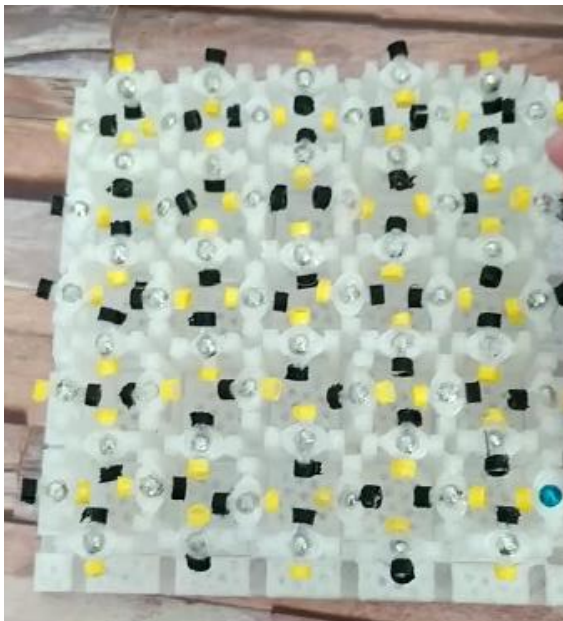
Fonte: acervo do autor.

Figura 28: Vista superior da rede macroscópica, que simula gelos de spin artificiais



Fonte: acervo do autor.

Figura 29: Vista superior da rede macroscópica, que simula gelos de spin artificiais



Fonte: acervo do autor.

5 RESULTADOS

A sequência didática foi planejada para ser aplicada em turmas de alunos já apresentados ao conceito de campo magnético e conhecedores dos conceitos de eletrostática e de campo elétrico. Essas competências são requeridas a alunos de terceiro ano do Ensino Médio, podendo ocorrer, ainda, no segundo ano (Minas Gerais, 2018). Inicialmente, foram pensadas em quatro turmas – uma turma de segundo ano e uma de terceiro ano de cada uma das duas escolas –, onde que o professor-autor ministra aulas de Física.

Entretanto, no início do ano de 2020, o mundo enfrentou a pandemia da Covid-19, um vírus contagioso, que trouxe diversos desafios para a sociedade, com escassez de recursos e necessidade que houvesse isolamento social (BRASIL, 2020). Assim, foram fundamentais adaptações nos sistemas de ensino público e privado do País, sendo regulamentada pelos Estados. Em Minas Gerais, foi regulamentado o regime especial de ensino através da Resolução nº 4.310/2020 pela Secretaria de Educação do Estado de Minas Gerais (SEE-MG):

Art. 1º Regular, no âmbito das Escolas da Rede Estadual de Ensino de Minas Gerais, as normas para a oferta de Regime Especial de Atividades Não Presenciais, nas Escolas Estaduais da Rede Pública de Educação Básica e de Educação Profissional, durante o período de emergência e de implementação das medidas de prevenção ao contágio e enfrentamento da pandemia de doença infecciosa viral respiratória causada pelo agente Coronavírus (COVID-19), para cumprimento da carga horária mínima exigida (SEE, 2020, p. 1).

Nesse contexto do ensino remoto é que o produto, o qual embasou este trabalho, foi desenvolvido e aplicado. O desenvolvimento ocorreu entre o segundo semestre de 2020 e o primeiro semestre de 2021, e a aplicação da sequência didática em uma turma de Ensino Médio foi inicialmente prejudicada. Por esse motivo, o programa do Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física (MNPEF) permitiu que a sequência fosse trabalhada em uma das disciplinas, que compõe a carga horária exigida.

O professor-autor realizou a sequência didática durante a disciplina Atividades Experimentais para os Ensinos Médio e Fundamental, ministrada pelo professor Eduardo Nery Duarte de Araújo, ofertada pelo polo da UFV, no segundo semestre de

2021, de forma remota. A aplicação do produto foi feita junto aos alunos da pós-graduação, que, também, são professores de Física na Educação Básica ou já lecionaram a disciplina em suas carreiras profissionais. Teve como foco conhecer a percepção dos colegas sobre a sequência didática e a viabilidade da utilização do produto em suas turmas. Foi utilizado caderno de campo e o relato do professor-autor sobre sua percepção dessa aplicação segue no item 5.1.

O fim da emergência sanitária global de Covid-19 foi decretado somente em maio de 2023 (BRASIL, 2023), possibilitando a aplicação da sequência didática em apenas uma turma de Ensino Médio. Os resultados foram gerados a partir da percepção do professor-autor como regente, através de suas avaliações formativas, e constam no item 5.2.

5.1 Aplicação para professores

A apresentação do produto aos discentes da disciplina obrigatória do programa teve um foco diferente da aplicação com os estudantes. Vale salientar que os discentes da disciplina são professores de Física na Educação Básica. A intenção dessa aula foi registrar as observações feitas pelo professor-autor a partir da avaliação e discussão da sequência didática na visão dos colegas enquanto professores, validando o uso dos recursos didáticos propostos no produto. Os participantes contribuíram oferecendo sugestões a partir de suas perspectivas enquanto professores, ressaltando a necessidade de possíveis adaptações pedagógicas, sendo esse um momento relevante.

Como a disciplina foi ofertada de maneira remota, a sequência didática foi apresentada por meio de *slides* através de uma reunião *online*, utilizando a ferramenta de reuniões *online Google Meet*. A apresentação foi abordada como uma sugestão de recursos didáticos, seguindo o passo a passo descrito no Capítulo 4 e dando liberdade para cada professor fazer as necessárias adaptações em suas turmas de acordo com sua realidade.

Buscou-se, inicialmente, dialogar sobre a pluralidade da prática docente e suas dificuldades através dos relatos dos colegas. Para isso, foram feitos alguns questionamentos, buscando entender e comparar se o local e a realidade que cada um leciona possibilitariam ou não a aplicação da sequência didática, além de alguns relatos sobre suas experiências pedagógicas, procurando contextualizar a realidade

educacional de cada um. Diante do disposto, foi possível constatar que todos os professores participantes da aula já lecionaram em escolas públicas. A maioria, também, já lecionou em escolas particulares. Eles possuem, em média, duas aulas por semana com cada turma, havendo algumas turmas de escola particular com quatro e até cinco aulas por semana. Assim, reforça-se a discussão promovida por Moreira (2017) no sentido de que um dos grandes desafios para lecionar Física na Educação Básica é o baixo número de aulas diante da grande quantidade de conteúdo.

Os professores foram questionados, também, sobre as condições de infraestrutura dos locais onde lecionam ou já lecionaram, entendendo que, para o uso da sequência didática, será primordial, no mínimo, uma sala de vídeo com acesso à *internet*. Foi possível perceber que as realidades escolares são muito distintas, em que algumas das escolas mencionadas pelos professores possuíam boa infraestrutura, com salas ventiladas e arejadas, e salas de informática com acesso à *internet*. Já outras escolas se encontravam em situações precárias, sem acesso à *internet* e com espaços pequenos para a quantidade de alunos. Mesmo em escolas descritas com boa infraestrutura, poucas eram as que possuíam um laboratório de Ciências. Houve consenso de que a infraestrutura do ensino público vem recebendo melhorias ao longo dos anos, porém, ainda, conta com diversos problemas e realidades heterogêneas. Ficou, pois, constatado que as dificuldades relacionadas à infraestrutura das escolas podem inviabilizar o uso dessa sequência didática por parte dos professores.

A sequência didática culmina na demonstração de um produto, que simula gelos de spin artificiais macroscópicos. Os conceitos de gelos de spin são abordados em Física Moderna, e o desenvolvimento de gelos de spin artificiais só foi possível com os avanços em Nanociência e Nanotecnologia. Reforçando o disposto no Capítulo 1, as orientações curriculares do Ensino Médio apenas citam o termo Nanotecnologia nas Orientações Curriculares Nacionais para Ensino Médio (OCNEM) de 2006 e não tratam do assunto diretamente nas novas recomendações da BNCC de 2018, o que seria um dos motivos para que o assunto não seja apresentado aos alunos do Ensino Médio. Ainda assim, acredita-se na importância de os alunos concluírem a Educação Básica conhecendo o que seria essa “nova Física” e como ela caminha junto com atuais e futuras evoluções tecnológicas, sendo essencial para a formação do jovem enquanto ser crítico (TERRAZZAN, 1994).

Foi discutido com os professores se eles abordam ou já abordaram em suas aulas assuntos relacionados à Física Moderna e Contemporânea. Novamente, as respostas foram bem plurais, com a maioria não conseguindo desenvolver o assunto em suas aulas. Houve professor que citou a construção, com frequência, de um espectroscópio caseiro, experimento de Óptica, que ajuda a visualizar o espectro da luz, obtendo resultado de seus alunos. Já outro disse tratar sobre a relatividade, utilizando *slides* e vídeos, o que ajuda a despertar a curiosidade dos alunos. Ainda assim, a maioria diz não conseguir abordar o assunto, principalmente por falta de tempo. Segundo relatos desses professores, não é possível abordar esse conteúdo, porque o número de aulas é incompatível com a quantidade de conteúdo cobrado de Física no Ensino Médio. Como não são conceitos vistos como prioridades pela grade curricular exigida nas escolas e, também, por não serem cobrados em provas externas, optam por não trabalhar o conteúdo.

Ainda sobre a Física Moderna no Ensino Médio, quando questionados sobre o quanto consideravam importante a abordagem do assunto, houve unanimidade a favor, o que destoa das respostas anteriores. Os professores acreditam na importância do ensino de Física Moderna no Ensino Médio, mas não conseguem executar o que acreditam em suas aulas devido, principalmente, à reduzida carga horária e ao excesso de conteúdos exigidos em Física no Ensino Médio. Além disso, outras dificuldades relatadas foram: falta de pré-requisitos dos alunos; ausência de oferta de formação continuada; conteúdos abstratos e de difícil compreensão; inexistência de espaços físicos adequados; e grade curricular limitada. Os professores acreditam que os alunos deveriam alinhar o conhecimento que recebem na escola com a evolução tecnológica e atualidades do mundo moderno, ajudando-os a se tornarem seres com pensamento crítico para o efetivo desenvolvimento pessoal, o que, ainda, se encontra no mundo ideal, não sendo a realidade para a maioria dos presentes.

Buscou-se, também, saber qual seria o posicionamento dos professores com relação aos recursos, que fundamentam este trabalho: uso de analogias para conceitos de Física e uso de vídeos em suas aulas. Todos os professores relataram utilizar analogias como ferramenta pedagógica, citando alguns conteúdos, como resistência elétrica, mecânica clássica e campos elétrico e magnético. A discussão mostrou que os professores creem que as analogias facilitam o entendimento do aluno se baseada em algo que seja do conhecimento e vivência deles. Quanto aos vídeos

e outros recursos audiovisuais, como *slides* e simuladores, alguns professores relataram que fazem uso deles, sendo uma ferramenta, que auxilia em suas aulas, enquanto outros disseram que não os utilizam com tanta frequência devido à dificuldade das instalações da escola, havendo, ainda, os que disseram que, apesar de não os usarem com tanta frequência, pretendiam utilizá-los mais quando a infraestrutura escolar permitir.

Essa percepção dos professores, relatando suas experiências profissionais, agregou bastante, pois foram condizentes com o x didática. A discussão foi finalizada pedindo a opinião dos professores sobre a sequência didática com a seguinte pergunta: “Você julga que o produto, que simula gelos de spin artificiais macroscópicos, seja capaz de auxiliar o estudante a compreender o conceito de campo, além de associar conceitos de Física Clássica com Física Contemporânea?” A maioria dos professores se posicionou a favor, acreditando no potencial do produto por se tratar de algo visível, palpável e que possibilita aos alunos enxergarem o que estão estudando na prática. Houve, também, professores ponderados, que disseram ver possibilidade no uso, mas que seria preciso tomar cuidado com a abordagem em sala, necessitando de alguns pré-requisitos por parte dos alunos. Ainda houve um comentário que achou interessante a sequência didática como um todo, passando por vários conceitos de Física Clássica até chegar a gelos de spin, agregando conhecimento em vários tópicos de Física, não somente de Física Moderna.

5.2 Aplicação para alunos

A sequência didática foi trabalhada junto a uma turma de segundo ano de Ensino Médio, de uma escola particular, do município de São João del-Rei, onde o professor-autor é regente de aulas de Matemática. Para trabalhar a sequência didática, ele contou com a autorização e o auxílio da professora regente de Física e da coordenação da escola. Essa turma é composta por nove alunos, com suas aulas concentradas no período matutino. A turma consegue manter uma rotina de estudos no contraturno em suas residências, sem grandes dificuldades no acesso a dispositivos conectados à *internet*. A escola é parceira de uma rede de ensino nacional, que dispõe de material didático em formatos físico e digital. Esse material, fornecido pela rede, propõe todo o conteúdo do Ensino Médio concentrado nos dois primeiros anos, ficando o terceiro ano inteiro como revisão. A sequência didática foi

trabalhada em agosto de 2023, e o conteúdo estudado naquele momento pelos alunos era eletrodinâmica, com conceitos de campo elétrico e corrente elétrica já vistos, pré-requisito essencial para o fluxo da aula. O foco deste item será descrever as análises e percepções feitas pelo professor-autor durante a utilização do produto educacional.

No primeiro momento, os alunos ficaram interessados quando foram entregues a eles os ímãs, enxergando-os como brinquedos, e interagiram bastante com eles, o que era desejado nesse primeiro contato. Alguns alunos relataram que nunca haviam visto ímãs, que não fossem os de geladeiras, com pequenas forças de interação magnética. Aproveitando o engajamento criado e o interesse dos alunos, foram feitos os questionamentos sugeridos sobre a composição daqueles materiais. Os alunos conseguiram reconhecer que eram ímãs, sabiam dizer algumas aplicações, mas se contradiziam e não sabiam explicar quando perguntados de que eram feitos os materiais e o que aconteceria se cortássemos um ímã ao meio, questões que aguçaram bastante a curiosidade deles. Aproveitando as explanações e sugestões feitas pelos alunos, o professor-autor apresentou, por meio de *slides*, a explicação dos fenômenos magnéticos. Os estudantes, ainda, não haviam estudado o assunto, o que, para muitos, foi o primeiro contato com o magnetismo.

A apresentação dos ímãs ajudou a despertar a curiosidade dos alunos, porém o não recolhimento dos ímãs ao final do primeiro momento deixou alguns alunos dispersos e desconcentrados, percebendo-se a necessidade de fazê-lo antes de iniciar a explicação do conteúdo. Quando da explicação de fenômenos magnéticos, outro assunto que despertou o interesse dos alunos foi o campo magnético terrestre e o funcionamento de bússolas. Os alunos usaram a bússola de seus aparelhos celulares para testar se haveria interações destas com os ímãs ali presentes. O momento foi finalizado com o vídeo, que explica a propriedade magnética dos materiais, elogiado pelos alunos, que disseram ter sido possível visualizar o que seriam os spins e os domínios magnéticos.

No segundo momento, os alunos assistiram ao vídeo *Os poderes do Super-Choque* (NERDOLOGIA, 2020). Esse momento, também, despertou o interesse dos alunos, que vislumbraram uma aproximação de seus gostos e hábitos com o conteúdo aprendido ao utilizarem um super-herói de desenho animado como contexto. Foi um momento produtivo, principalmente por que o vídeo explica conceitos de eletrostática, funcionando como revisão e complementação de um assunto já estudado por eles e facilitando o uso de analogia entre o campo elétrico e o campo magnético.

O uso do simulador “Cargas e Campos” (PHET), para fazer analogia à violação à regra do gelo, auxiliou na compreensão do que é a frustração geométrica em uma rede de spins. A analogia foi facilitada, pois os alunos conheciam a regra do gelo e sua formação tetraédrica. Eles conseguiram perceber no simulador o comportamento de um campo elétrico de um monopolo elétrico emergindo em uma região onde não existiam cargas elétricas. A analogia foi feita usando cargas elétricas positivas e negativas dispostas de tal forma, que simulam os polos magnéticos de um ímã. A fluidez desse momento assim como a compreensão dos estudantes só foram possíveis por que os alunos possuíam os pré-requisitos necessários: sabiam diferenciar o comportamento do campo elétrico gerado por cargas positivas e negativas assim como as interações vetoriais destes.

A sequência didática foi finalizada com o produto, que simula, em uma rede macroscópica, gelos de spin artificiais (GSA). Esse foi o momento de maior engajamento. Como eram poucos alunos, foi possível deixar que cada um interagisse com a rede. A curiosidade, ao ver o movimento dos ímãs, incentivou a explicação do que seria o citado gelo de spin e como seria possível o surgimento de monopolos magnéticos emergentes numa rede como essa. Algumas perguntas e discussões importantes foram levantadas: se haveria interação dos ímãs da rede na presença de um campo magnético externo; a possibilidade do surgimento de fluxos contínuos e controlados desses monopolos magnéticos emergentes; e quais os benefícios de uma possível corrente magnética.

Foi perceptível como os alunos demonstraram interesse por uma aula diversificada, com o uso de recursos diferentes do que costumam ver no cotidiano, fugindo de aulas tradicionais, em que o aluno é um agente passivo de seu aprendizado (MAZUR, 2015). Eles se mostraram entusiasmados com o novo e o desconhecido, atuando como protagonistas da sua própria aprendizagem, sem se aterem apenas no que será cobrado em provas externas e na grade curricular, e sim visando ao crescimento pessoal, para acompanhar os avanços tecnológicos do mundo moderno. O uso de recursos audiovisuais, analogias e produto físico palpável e visível se mostrou aliado ao processo de ensino-aprendizagem com potencial de utilização em aulas, possibilitando e criando pontes para uma aprendizagem ativa e significativa. O professor-autor utilizou como metodologia a observação qualitativa, avaliando o grau de interação, participação, interesse e possíveis ganhos na aprendizagem dos estudantes.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A presente dissertação baseou-se na criação de um produto em forma de sequência didática, com o objetivo de introduzir a Física Moderna e Contemporânea em aulas do Ensino Médio através dos conceitos de gelo de spin.

Na elaboração do produto, buscou-se uma sequência didática, que levasse aos alunos um primeiro contato com a Física Moderna e Contemporânea, tangenciando em assuntos atuais e tecnológicos, como gelos de spin. Objetivou-se apresentar Nanociência e Nanotecnologia, tecnologia atual, que, embora faça parte do cotidiano de alunos, são desconhecidas por muitos deles. Nesse contexto, pretendeu-se proporcionar, por meio da sequência didática, o estudo e a revisão dos conteúdos do currículo da Física Clássica aprendidos no ano letivo. Para a reprodução do produto físico, o professor-autor contou com a colaboração do aluno de pós-doutorado Hamilton Teixeira, que fez a impressão do produto no LABSPIN com recursos da UFV.

Um dos objetivos deste trabalho foi relatar a percepção do professor-autor ao fazer uso dessa sequência didática em aula. Para tanto, utilizou-se do caderno de campo para descrever as impressões e avaliações sobre a aplicação da sequência. Nesse caderno, foram relatados os pontos positivos e as dificuldades encontradas. Inicialmente, foi realizada uma apresentação do produto junto a um grupo de professores de Física na busca por uma validação do produto na concepção do educador. Em um segundo momento, a apresentação ocorreu junto a uma turma de alunos do Ensino Médio, quando foram descritas suas percepções e impressões no caderno de campo.

O grupo de professores é composto por discentes do programa de pós-graduação Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física (MNPEF) pertencente ao polo UFV. A apresentação ocorreu durante a disciplina denominada Atividades Experimentais para os Ensinos Fundamental e Médio, que é um componente obrigatório da grade curricular desse programa. Este trabalho permitiu que fossem coletadas informações acerca da percepção dos participantes sobre a sequência didática.

Com a aula ministrada aos professores, o produto foi experimentado de forma que estes pudessem expor concepções acerca da possibilidade do uso do produto em suas aulas, relatando suas considerações e percepções. Os professores assistiram a todos os momentos da sequência didática e a consideraram viável nos três primeiros,

exaltando os vídeos e a analogia feita no simulador. Todavia, ponderaram sobre a reprodução do produto que aparece no quarto momento, visto que a maioria das escolas não possui impressoras 3D para a viabilidade do produto. A sugestão da alternativa de apresentação de vídeos e imagens do produto funcionando foi aceita, porém ponderada, pois acreditou-se que a experiência e o contato com o produto físico seriam fatores estimulantes.

Uma vez que a experimentação do produto ocorrera simulando-se uma aula para alunos do Ensino Médio, houve discussões atinentes ao fazer docente diante da experimentação. Foram abordados assuntos relacionados à prática pedagógica proposta nesta sequência didática: uso de analogias e recursos audiovisuais, que foram consideradas importantes ferramentas de apoio. Houve, também, uma discussão sobre os conteúdos lecionados, buscando-se observar se conceitos da Física Moderna e Contemporânea são ensinados no Ensino Médio. Chamou a atenção do autor que todos os professores acreditam ser imprescindível que os alunos terminem a Educação Básica com um mínimo de contato com essa área da Física, no entanto a maioria relatou não conseguir ensinar esse conteúdo.

Notou-se semelhança entre as realidades educacionais experimentadas pela trajetória profissional de cada um. Com esse compartilhamento de ideias, foi perceptível que as dificuldades em lecionar Física são comuns: jornada exaustiva de trabalho; desvalorização financeira; alunos sem pré-requisitos e, muitas vezes, desinteressados; problemas em infraestrutura; e currículo incoerente com a realidade escolar. Dentre esses temas, discutiram-se, neste trabalho, os principais problemas, que podem dificultar a aplicação desta sequência didática: problemas em infraestrutura, como escassez de investimentos em laboratórios; ausência ou dificuldades para a utilização de recursos audiovisuais e ausência de dispositivos com acesso à *internet* bem como problemas de incompatibilidade entre a carga horária disponível para as aulas de Física e a extensa quantidade de conteúdo exigido pelo currículo do Ensino Médio.

Acredita-se que a sequência didática possa contribuir para minimizar tais problemas apresentados. O produto reproduzido é pensado como uma extensão de conhecimentos relacionados a campos elétricos e magnéticos, que pode auxiliar os professores no ensino desses conteúdos por meio de metodologias ativas, diferente da tradicional, sem se distanciar das maiores exigências feitas no currículo básico. Quanto ao problema do espaço físico e de recursos, a sequência foi adaptada para

que a demonstração da rede macroscópica possa ser feita através de vídeo, entendendo as dificuldades em reproduzir o produto, visto que a impressão tridimensional, ainda, é uma realidade distante da Educação Básica

O segundo momento se deu com o fim do isolamento social e o retorno das aulas presenciais, quando o produto foi trabalhado junto a uma turma do segundo ano do Ensino Médio, na qual o autor é regente de aulas de Matemática, contando com a autorização e o apoio da professora regente de Física. Por meio dessa aula, foi possível avaliar o comportamento, a participação e o interesse dos alunos na sequência didática a partir da percepção do professor-autor. A aplicação é avaliada de forma positiva, pois conseguiu despertar a curiosidade e o envolvimento dos alunos em busca de respostas e explicações para o material visto e tocado. De maneira lúdica, o material foi manuseado e experimentado, tornando-se palpável o abstrato. Esse interesse mostrou que, quanto mais dinâmica e interativa for uma aula, mais engajamento haverá e que é possível compreender alunos como protagonistas de seu aprendizado.

Como este trabalho é baseado em analogias, acredita-se que foi indispensável a apresentação prévia aos conceitos como cargas elétricas, campo elétrico e propriedades vetoriais de um campo, sem os quais os alunos encontrariam dificuldades de acompanhar a sequência didática. Por fim, esta mostrou-se eficaz ferramenta de auxílio em aula, possibilitando uma aprendizagem investigativa, em que o aluno não se torna apenas ouvinte, mas um sujeito de seu processo de ensino, interpassando por todos os estágios da aprendizagem (PIAGET, 1999). O acesso aos sentidos da visão e do tato, por meio de objeto análogo a um fenômeno físico, despertaram interesse e engajamento de alunos e professores. Para além das dificuldades encontradas em suas realidades discentes e docentes, o produto apresentado aponta possibilidades e desejos de realidades diferentes, em que alunos e professores das redes pública e privada da educação brasileira possam ter acesso a mais possibilidades do que dificuldades. É preciso que as inúmeras e invisíveis futuras descobertas da Física Moderna estejam visíveis, palpáveis e presentes, e que sejam garantidas pelas futuras normativas da educação brasileira e possíveis de serem aplicadas a todos os alunos da Educação Básica.

REFERÊNCIAS

- ASHCROFT, Neil W.; MERMIN, N. David. **Física do estado sólido**. [S.l.]: Cengage Learning, 2011.
- ASSAD, Gustavo Elia. **Física Moderna para Ensino Médio**. João Pessoa: Ed. da IFPB, 2017.
- AUBUSSON, Peter J.; TREAGUST, David; HARRISON, A. Learning and teaching science with analogies and metaphors. RITCHIE, Stephen M. *The World a/Science Education: Handbook of Research in Australasia*, Sense Publishers, Online Publication, p. 199-216, 2009.
- BARCA, A. *et al.* **Congreso Internacional Galego-Portugués de Psicopedagogía**: libro de actas. A Coruña: Universidade, 2007. p. 837-846.
- BERNOULLI PLAY. Propriedades magnéticas da matéria. **YouTube**, 5 de janeiro de 2018. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?app=desktop&v=wZIVAIYtlxI>. Acesso em: 6 maio 2021.
- BRAMWELL, S. T. *et al.* Measurement of the charge and current of magnetic monopoles in spin ice. **Nature, Nature Publishing Group**, v. 461, n. 7266, p. 956, 2009.
- BRASIL. **Lei nº 9.394, de 20 de dezembro de 1996**. Brasília, 1996. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l9394.htm#:~:text=L9394&text=Estabelece%20as%20diretrizes%20e%20bases%20da%20educa%C3%A7%C3%A3o%20nacional.&text=Art.%201%C2%BA%20A%20educa%C3%A7%C3%A3o%20abrange,civil%20e%20nas%20manifesta%C3%A7%C3%B5es%20culturais. Acesso em: 10 mar. 2023.
- BRASIL. **Orientações curriculares para o ensino médio**: volume 2 – Ciências da natureza, matemática e suas tecnologias. Brasília: MEC/SEMTEC, 2006.
- BRASIL. **PCN + Ensino Médio**: orientações educacionais complementares aos Parâmetros Curriculares Nacionais. Ciências da Natureza, Matemática e suas Tecnologias. Brasília: MEC/SEMTEC, 2002.
- BRASIL. Câmara dos Senadores. **Decreto fim pandemia**. 8 de maio de 2023. Disponível em: <https://www12.senado.leg.br/radio/1/noticia/2023/05/08/decretado-fim-da-emergencia-sanitaria-global-de-covid-19>. Acesso em: 10 jul. 2023.
- BRASIL. Conselho Nacional de Educação. Conselho Pleno. **Resolução CNE/CP nº 2, de 22 de dezembro de 2017**. Brasília, 2017a. Disponível em: http://portal.mec.gov.br/index.php?option=com_docman&view=download&alias=79631-rcp002-17-pdf&category_slug=dezembro-2017-pdf&Itemid=30192. Acesso em: 20 jul. 2023.
- BRASIL. Lei de Diretrizes e Bases da Educação Nacional. **Lei nº 13.415/2017, de 13 de fevereiro de 2017**. Brasília, 2017b. Disponível em:

http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2015-2018/2017/lei/L13415.htm. Acesso em 10 fev. 2023

BRASIL. Ministério da Educação. **Base Nacional Comum Curricular** – 1ª versão. Brasília, 16 de setembro de 2015. Disponível em: <http://basenacionalcomum.mec.gov.br/images/relatorios-analiticos/BNCC-APRESENTACAO.pdf>. Acesso em: 10 mar. 2023.

BRASIL. Ministério da Educação. **Base Nacional Comum Curricular** – 2ª versão. Brasília, 3 de maio de 2016. Disponível em: <http://basenacionalcomum.mec.gov.br/images/relatorios-analiticos/bncc-2versao.revista.pdf>. Acesso em: 10 mar. 2023.

BRASIL. Ministério da Educação. **Base Nacional Comum Curricular** – 3ª versão. Brasília, 2 de abril de 2018. Disponível em: http://basenacionalcomum.mec.gov.br/images/historico/BNCC_EnsinoMedio_embaixa_site_110518.pdf. Acesso em :10 mar. 2023.

BRASIL. Ministério da Educação. **Base Nacional Comum Curricular (BNCC)** – Histórico. Brasília, dez. 2017c. Disponível em: <http://basenacionalcomum.mec.gov.br/historico>. Acesso em: 15 jul. 2023.

BRASIL. Ministério da Educação. **Base Nacional Comum Curricular (BNCC)** – Números dos seminários. Brasília, dez. 2017d. Disponível em: <http://basenacionalcomum.mec.gov.br/numeros-dos-seminarios>. Acesso em 15/07/2023.

BRASIL. Ministério da Educação. **Base Nacional Comum Curricular (BNCC)** – Relatórios. Brasília, dez. 2017e. Disponível em: <http://basenacionalcomum.mec.gov.br/relatorios>. Acesso em: 15 jul. 2023.

BRASIL. Ministério da Educação. **Parâmetros Curriculares Nacionais: Ciências Naturais**. Brasília: MEC, 1997.

BRASIL, Ministério da Educação. **Parâmetros Curriculares Nacionais para o Ensino Médio**. Brasília: MEC/SEF, 2000. Disponível em: http://portal.mec.gov.br/seb/arquivos/pdf/14_24.pdf. Acesso em: 10 mar. 2023.

BRASIL. Ministério da Saúde. **Recomendação nº 036, 11 de maio de 2020**. Brasília, 2020. Disponível em: <https://conselho.saude.gov.br/recomendacoes-cns/1163-recomendac-a-o-n-036-de-11-de-maio-de-2020>. Acesso em: 10 maio 2023.

BRASIL. INEP. Assessoria de Comunicação Social do Inep. **Dados revelam perfil dos professores brasileiros**. Brasília, 14 de outubro de 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/inep/pt-br/assuntos/noticias/institucional/dados-revelam-perfil-dos-professores-brasileiros#:~:text=Neste%20s%C3%A1bado%2C%2015%20de%20outubro%2C%20celebra%2Dse%20o%20Dia,Censo%20da%20Educa%C3%A7%C3%A3o%20Superior%202020>. Acesso em: 15 jul. 2023.

CANOVA, Julio Cesar. **Sistemas magnéticos frustrados e desordenados: do experimento à teoria**. 2019. 47 p. Monografia (Trabalho de Graduação) – Escola de Engenharia de Lorena, Universidade de São Paulo, Lorena, 2019.

CARVALHO, Arley *et al.* Objetos Digitais de Aprendizagem no Ensino de Física Básica: Um estudo de caso com simuladores virtuais em uma escola de ensino público estadual. **RENOTE**, v. 17, n. 3, p. 263-272, 2019.

CASTELNOVO, Claudio; MOESSNER, Roderich; SONDHI, S. L. Magnetic monopoles in spin ice. **Nature**, v. 451, n. 42-45, 2008.

CHANG, Raymond. **Química geral**. 11. ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.

CHIQUELTO, Marcos José. O currículo de física do ensino médio no Brasil: discussão retrospectiva. **Revista e-curriculum**, v. 7, n. 1-16, 2011.

COUTO, Francisco Pazzini; CANTO, Lívio Ribeiro; MACHADO, Luiz. **Coleção 6V: Bernoulli Sistema de Ensino – Física para ensino médio**. Belo Horizonte: DRP Ltda 2021

DA SILVA RODRIGUES, Eriverton; SAMPAIO, Thiago Alves de Sá Muniz; DE MORAIS SOUZA, Cicero Jailton. **Ensino de Física: experimentação com analogia entre a eletrização do canudo e o circuito RC**. Revista Semiárido De Visu, v. 3, n. 2, p. 92-97, 2015.

DUARTE, Daniel Gouveia. **Nanofabricação e caracterização de heteroestruturas de gelos de Spin artificiais**. 2022. Qualificação (Doutorado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2022.

EDWARDS, Steven. Who invented nano? **The Nanotech Pioneers**, US, v. 1, n. 1, p. 87-87, nov. 2006. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/nnano.2006.115.pdf>. Acesso em: 20 maio 2023

FARHAN, Alan *et al.* Emergent magnetic monopole dynamics in macroscopically degenerate artificial spin ice. **Science advances**, v. 5, n. 2, p. eaav6380, 2019.

FERRACIOLI, Laércio. Aprendizagem, desenvolvimento e conhecimento na obra de Jean Piaget: uma análise do processo de ensino-aprendizagem em Ciências. **Revista Brasileira de Estudos Pedagógicos**, v. 80, n. 194, p. 5-18, 1999.

FOGAÇA, Jennifer Rocha Vargas. **Ligações de Hidrogênio**. Brasil Escola. 2023. Disponível em: <https://brasilecola.uol.com.br/quimica/ligacoes-hidrogenio.htm>. Acesso em: 02 ago. 2023.

FRANCO, D. L. O uso de metodologias adequadas no ensino de Física. **Ensino em Perspectivas**, [S. l.], v. 3, n. 1, p. 1-9, 2022. Disponível em: <https://revistas.uece.br/index.php/ensinoemperspectivas/article/view/8814>. Acesso em: 19 jun. 2023.

GARTSIDE, Jack C. *et al.* Realization of ground state in artificial kagome spin ice via topological defect-driven magnetic writing. **Nature nanotechnology**, Nature Publishing Group, v. 13, n. 1, p. 53-58, 2018.

GILBERT, William. **De magnete**. Tradução P. Fleury Mottelay. New York, Courier Corporation, 1958.

GRIFFITHS, David Jeffrey. **Eletrodinâmica**. 3. ed. Pearson, São Paulo, 2011.

KOCHAN, Keity Alesandra. **Dificuldades de aprendizagem em Física**. Curitiba. 2022. Disponível em: <https://repositorio.uninter.com/handle/1/1128>. Acesso em: 13 mar. 2023.

LEONEL, André Ary. **Nanociência e Nanotecnologia**: Uma proposta de ilha interdisciplinar de racionalidade para o ensino de Física moderna e contemporânea no Ensino Médio. 2010. 215 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/94571/276442.pdf>. Acesso em: 10 mar. 2023.

LIMA, Inácio Mamede de. **Experiments demonstrating and teaching of physics: an experience in the classroom**. 2012. 141 f. Dissertação (Mestrado em Ensino de Física) – Universidade Estadual da Paraíba, Campina Grande, 2012.

LIMA, Marcelo Costa de. Sobre o surgimento das equações de Maxwell. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 41, nº4, e20190079 (1-18), 2019.

LOOS, Marcio Rodrigo. **Nanociência e Nanotecnologia**: Compósitos Termofixos Reforçados com Nanotubos de Carbono. 1. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2014.

LOUREIRO, Bruna Cristina Oliveira. O uso das tecnologias da informação e comunicação como recursos didáticos no ensino de Física. **Revista do Professor de Física**, v. 3, n. 2, p. 93-102, 2019.

MARQUES, Júlio César Júnior. **O ensino dos circuitos elétricos na educação básica em uma abordagem investigativa usando de analogias**. 2020. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2020.

MAZUR, Eric. **Peer instruction**: a revolução da aprendizagem ativa. Penso Editora, Porto Alegre, 2015.

MELO, Magali Santos; PARAGUAÇU, Fábio. Uma revisão de literatura sobre o uso das analogias no ensino de Ciência e Matemática. **Revista de Ensino de Ciências e Matemática**, v. 12, n. 4, p. 1-19, 2021.

MENON, Guatam I.; RAY, Purusattam. **The physics of disordered systems**. New Delhi: Hindustan Book Agency, 2012.

MINAS GERAIS. Secretaria de Estado da Educação. **Currículo Referência de Minas Gerais** – CRMG. Belo Horizonte, dez. 2018. Disponível em:

http://basenacionalcomum.mec.gov.br/images/implementacao/curriculos_estados/documento_curricular_mg.pdf. Acesso em: 10 maio 2023.

MOL, L. A. S.; MOURA-MELO, W. A.; PEREIRA, A. R. Conditions for free magnetic monopoles in nanoscale square arrays of dipolar spin ice. **Physical Review. B, Condensed Matter and Materials Physics**, v. 82, 054434, 2010.

MOL, L. A. S.; SILVA, R. L.; SILVA, R.C.; PEREIRA, A. R.; MOURA-MELO, W. A.; COSTA, B. V. Magnetic monopole and string excitations in two-dimensional spin ice. **Journal of Applied Physics**, v. 106, 1/063913-5, 2009.

MOREIRA, Marco Antonio. Grandes desafios para o ensino da Física na educação contemporânea. **Revista do Professor de Física**, [S. l.], v. 1, n. 1, p. 1-13, 2017. DOI: 10.26512/rpf.v1i1.7074.

NAGEM, Ronaldo Luiz; ARAUJO, Siane Paula de; MARCELOS, Maria de Fátima. Analogias e metáforas no ensino de biologia: a árvore da vida nos livros didáticos. *In: ENCONTRO NACIONAL DE PESQUISADORES EM EDUCAÇÃO EM CIÊNCIA*, 5., 2005, Águas de Lindoia. **Anais...** Águas de Lindoia, SP, 2005. p. 1-13. Disponível em: <http://abrapecnet.org.br/enpec/venpec/conteudo/artigos/3/pdf/p206.pdf>. Acesso em: 8 maio 2023.

NASCIMENTO, Francisco Paulo do; SOUSA, Flávio Luís Sousa. **Classificação da Pesquisa**. Natureza, método ou abordagem metodológica, objetivos e procedimentos. Metodologia da Pesquisa Científica: teoria e prática – como elaborar TCC. Brasília: Thesaurus, 2016.

NASCIMENTO, Francisco S. *et al.* From confinement to deconfinement of magnetic monopoles in artificial rectangular spin ices. **New Journal of Physics**, v. 14, n. 115019, 2012.

NASCIMENTO, Tiago Lessa. **Repensando o ensino da Física no ensino médio**. Universidade Estadual do Ceará, Fortaleza, 2010.

NERDOLOGIA. Os poderes do Super Choque. **YouTube**, 9 de julho de 2020. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?app=desktop&v=4Haq9OJqNr&t=477s>. Acesso em: 10 jul. 2021.

NEVES, Natália Nascimento; SANTOS, Adriana Ramos dos. O uso das tecnologias digitais da informação e comunicação para a experimentação no ensino de química: uma proposta usando sequências didáticas. **Scientia Naturalis**, v. 3, n. 1, p. 1-18, 2021.

OBERZINER, Ana Paula Bertoldi *et al.* **As equações de Maxwell e aplicações**. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

PERRIN, Yann; CANALS, Benjamin; ROUGEMAILLE, Nicolas. Extensive degeneracy, coulomb phase and magnetic monopoles in artificial square ice. **Nature**, v. 540, p. 410-413, 2016.

PHET INTERACTIVE SIMULATION. Disponível em: https://phet.colorado.edu/pt_BR/simulations/charges-and-fields/about. Acesso em: 20 mar. 2021.

PIAGET, Jean. **A linguagem e o pensamento da criança**. 7. ed. São Paulo: Martins Fontes, 1999.

PINHEIRO, Carla Mariana Silva *et al.* Modelos didáticos para ensino inclusivo de Física Nuclear. **Em Extensão**, v. 20, n. 2, p. 2013-227, 2021.

PIRES, Antônio Sergio Teixeira. **Evolução das Ideias da Física**. 2. ed. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2011.

SANCHES, Mônica Bodim. **A Física Moderna e Contemporânea no Ensino Médio**: Qual sua presença em sala de aula? 2006. 108 f. Dissertação (Mestrado em Educação para a Ciência e a Matemática) – Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2006.

SEE-MG. **Resolução SEE nº4.310/2020**. Governo do estado de Minas Gerais. 2020. Disponível em: https://www2.educacao.mg.gov.br/images/documentos/Resolucao%20SEE_N__4310.pdf. Acesso em: 10 set. 2022

SILVA, Paulo Soares da. **Magnetismo**. 2022. Brasil Escola. Disponível em: <https://brasilecola.uol.com.br/fisica/magnetismo.htm>. Acesso em: 10 nov.2022

SOUZA, D. C. de; CONDE, I. B.; FLORÊNCIO, T. de S.; OLIVEIRA, F. das C. R. de; GOMES, M. de F. C.; SILVA, P. R. C.; CAVALCANTE, M. M. D. Percepções de docentes quanto a usabilidade das Tecnologias Digitais de Informação e Comunicação na sala de aula. **Research, Society and Development**, [S. l.], v. 11, n. 9, p. e14811931683, 2022. DOI: 10.33448/rsd-v11i9.31683. Disponível em: <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/31683>. Acesso em: 18 jul. 2023.

TEIXEIRA, Hamilton A. *et al.* Macroscopic magnetic monopoles in a 3D-printed mechano-magnet. **arXiv preprint arXiv:2112.06058**, Viçosa, 2021.

TERRAZZAN, Eduardo Adolfo. **Perspectivas para a inserção da física moderna na escola média**. 1994. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 1994. Disponível em: <https://repositorio.usp.br/item/000742484>. Acesso em: 15 jul. 2023.

TONET, Michele Duarte; LEONEL, André Ary. Nanociência e Nanotecnologia: uma revisão bibliográfica acerca das contribuições e desafios para o ensino de Física. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 36, n. 2, p. 431-456, 2019.

VELOSO, Jardel de Carvalho; SOUSA, Maura Vieira dos Santos; MACÊDO, Haroldo Reis Alves de. Sobre o ensino de física moderna e contemporânea no ensino médio: uma breve revisão bibliográfica. **EDUCA – Revista Multidisciplinar em Educação**, v. 9, p. 1-27, 2022.

VERONEZ, Dilvani *et al.* A utilização das TICs no ensino de Física para trabalhar conceitos de MRU e MRUV. **Ensino & Pesquisa**, v. 13, n. 1, p. 152-165, 2015.

WANG, R. F. *et al.* Artificial 'spin ice' in a geometrically frustrated lattice of nanoscale ferromagnetic islands. **Nature**, v. 439, n. 7074, p. 303-306, 2006.

APÊNDICE A – PRODUTO EDUCACIONAL

GELO DE SPIN: PROPOSTA PARA INTRODUÇÃO DE CONCEITOS DE FÍSICA MODERNA ATRAVÉS DA NANOCIÊNCIA E NANOTECNOLOGIA



Allan Kenio Miranda de Freitas

Orientador: Vagson Luiz de Carvalho
Santos

VIÇOSA – MINAS GERAIS

2023

APRESENTAÇÃO

Caro(a) professor(a).

Este produto educacional foi desenvolvido como parte da dissertação de mestrado *Gelo de spin: proposta para introdução de conceitos de Física Moderna através da nanociência e nanotecnologia*. O produto consiste em uma sequência didática, que tem como objetivo um primeiro contato, por parte dos alunos, com a Física Moderna através do conceito de gelos de spin. Além disso, é esperado que a sequência os auxilie numa melhor compreensão dos conceitos de campo elétrico e campo magnético, usando, principalmente, analogias; que entendam as propriedades magnéticas dos materiais e o conceito de inseparabilidade dos polos magnéticos; e que saibam diferenciar e comparar os campos elétricos e magnéticos, e como seriam formados os monopolos emergentes em uma rede quadrática macroscópica.

O atual convívio dos alunos com a nanotecnologia é uma realidade constante embora, muitas vezes, inconsciente: “A miniaturização de componentes tem qualificado produtos e vem trazendo bons rendimentos para a indústria. As nanopartículas já compõem diversos produtos, como roupas, cosméticos e calçados” (ROTTA, 2018, *online*). Por esse motivo, o conhecimento sobre nanociência e nanotecnologia assume, cada vez mais, relevância atualmente, especialmente para os adolescentes.

A Física Moderna representa um avanço no entendimento da natureza fundamental da matéria e das interações fundamentais do universo, abrindo novas perspectivas para os estudantes explorarem conceitos, como mecânica quântica, relatividade e física de partículas. Acredita-se que a compreensão desses temas pode despertar a curiosidade dos alunos, estimulando o desenvolvimento da criatividade e da capacidade de abordar problemas mais complexos e, principalmente, apresentar as evoluções científicas, que ocorreram e ocorrem desde o final do século XIX até os dias atuais (KOCHAN, 2022).

Entretanto, adolescentes brasileiros, em geral, concluem o Ensino Médio sem terem sido apresentados à Física Moderna (FRANCO, 2018) e, conseqüentemente, aos conhecimentos referentes à nanociência e nanotecnologia. Essa defasagem significativa pode se dar por diferentes motivos: baixo número de aulas semanais de

Física no Ensino Médio e oferta predominante da Física Clássica para atender à exigência dos exames de seleção para o ensino superior.

Um importante conteúdo da Física Moderna e, relativamente novo, com grande potencial de crescimento, desenvolvimento e melhorias tecnológicas, é o conceito de gelo de spin. Gelos de spin naturais são encontrados em materiais de terras raras, com estrutura pirocloro, como o Titanato de Disprósio ($\text{Dy}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$) e o Titanato de Hólmio ($\text{Ho}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$) (CASTELNOVO; MOESSNER; SONDEHI, 2008). Esses materiais possuem seus spins alinhados de forma antiparalela no vértice de tetraedros, como na formação molecular do gelo, dando nome à estrutura gelo de spin. Wang *et al.* (2006) propuseram um sistema, que simulasse esse comportamento, denominado gelos de spin artificiais (GSA), constituído por nanoilhas magnéticas, que podem ser consideradas como ímãs em barra, com polos norte e sul muito bem definidos. Essas nanoilhas são dispostas em uma rede quadrada de tal forma que, dependendo das orientações dos polos de seus ímãs, monopolos magnéticos podem aparecer como partículas emergentes a partir do comportamento coletivo de quatro nanoilhas. O controle desses monopolos pode ser dado mediante aplicações de campos magnéticos externos. Dessa forma, ao invés de partículas portadoras de carga elétrica, os portadores de informação passariam a ser unidades básicas formadas por modos coletivos da magnetização, os quais responderiam a campos externos (BRAMWELL *et al.*, 2009).

Essa manifestação de um monopolo magnético emergente foi simulada, de forma análoga, neste trabalho. No terceiro momento, fez-se um sistema análogo elétrico, em um simulador de cargas elétricas, podendo observar que em uma determinada região, mesmo não havendo cargas, aparecerá o campo de um monopolo, como se ali existisse uma carga pontual positiva emergente. No quarto momento, é mostrado o processo de reprodução de uma rede, que simula gelos de spin artificiais macroscópicos, composto por ilhas simétricas com ímãs alocados nos vértices dessa ilha. Este produto permitirá que o aluno visualize o comportamento de um monopolo emergindo e se movimentando em uma rede.

A inclusão da aprendizagem sobre o gelo de spin no Ensino Médio pode proporcionar aos estudantes uma visão mais ampla e atualizada do mundo científico. Além disso, o estudo do gelo de spin pode trazer uma abordagem mais prática e aplicada da Física Moderna, permitindo que os estudantes compreendam como a teoria pode ser utilizada para desvendar fenômenos complexos e relevantes do

mundo atual, como comportamentos magnéticos e propriedades dos materiais. Portanto, incorporar este tema no Ensino Médio contribui para formar uma base sólida de conhecimento científico.

Essa é, pois, a justificativa do desenvolvimento deste produto: que o aluno consiga ter contato com algo atual e tecnológico, amarrando conceitos aprendidos entre o segundo e o terceiro anos do Ensino Médio.

A sequência didática é formada por quatro momentos, que podem ser distribuídos e adaptados de acordo com a realidade de cada turma. Todo material, inclusive um guia para montagem do produto, está disponibilizado no seguinte endereço eletrônico: <https://sites.google.com/view/gelodespinparaem>

PRIMEIRO MOMENTO

Tempo previsto: 3 horas/aulas

O primeiro momento começa com uma dinâmica, visando ao contato inicial dos alunos com o tema. A eles, são distribuídos diversos imãs de diferentes tamanhos e formatos, a fim de que eles, por meio de um processo investigativo, possam ter suas primeiras percepções sobre o material observado.

Com o objetivo de instigar as percepções dos alunos, serão realizados questionamentos, conforme o que se sugere a seguir:

- “O que são esses materiais?”
- “Do que eles são compostos?”
- “Eles são atraídos ou repelidos? Em quais posições? Por que isso acontece?”
- “Se cortar um deles, o que iria acontecer? Suas propriedades seriam perdidas?”
- “Em quais ferramentas ou situações os imãs são usados?”

A finalidade desses questionamentos é despertar a curiosidade dos alunos a respeito das respostas corretas para tais, levando-os a tirar conclusões intuitivas sobre o tema, que poderão ser hipóteses confirmadas ou não com a devida compreensão dos conceitos, que serão apresentados a seguir

Em seguida, é sugestivo que o professor traga aos alunos as respostas para os questionamentos feitos através dos Teoremas de Gilbert, explicando, em sala de aula, o conceito de imã, os metais que são atraídos por ele, a formação das linhas de força e a interação entre os polos magnéticos. A metodologia utilizada para explicação desses conceitos é livre para que cada professor a faça da forma como melhor se enquadre com seu perfil e o de sua turma. Sugere-se, também, que o professor apresente aos alunos o experimento de Oersted e mostre como aconteceu, historicamente, a junção entre a Eletricidade e o Magnetismo.

Propõe-se que este momento seja finalizado com o vídeo *Propriedades magnéticas da matéria* (BERNOULLI PLAY, 2018), acessível pelo link <https://www.youtube.com/watch?v=wZIVAIYtlxI>. A proposta do vídeo é para que sirva

como ferramenta de apoio no ensino das propriedades magnéticas da matéria através de simulações animadas.

SEGUNDO MOMENTO

Tempo previsto: 1 hora/aula

A segunda etapa da sequência didática proposta tem como finalidade aproximar a realidade do aluno à aplicação dos conceitos de Física trabalhados em aula. Para isso, é apresentado o vídeo *Os poderes do Super Choque* (NERDOLOGIA, 2020), narrado pelo professor Atila Iamarino, que relaciona conceitos sobre campos elétricos e gravitacionais com os poderes do super-herói do desenho animado Super Choque. O vídeo pode ser acessado através do *link* <https://www.youtube.com/watch?v=4Haq9OJqNr&t=477s>.

O vídeo mencionado explica o que seria necessário para que o super-herói pudesse existir na vida real, no qual é possível se criar uma analogia entre o conceito de campo elétrico, campo gravitacional e campo magnético. É esperado que este momento contribua para o reforço desses conteúdos e que os alunos saibam definir suas semelhanças e diferenças, o que será essencial para o próximo momento.

TERCEIRO MOMENTO

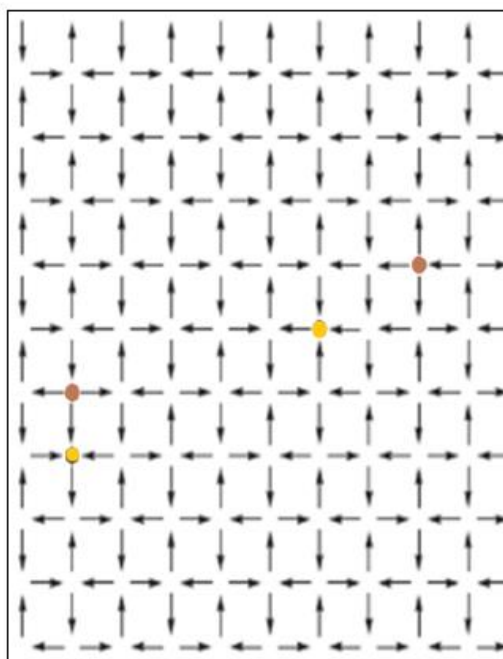
Tempo previsto: 3 horas/aulas

A intenção deste momento na sequência didática é introduzir os conceitos de gelos de spin. Assim, é retomado com os estudantes o conhecimento abordado no primeiro momento no que tange ao comportamento dos spins e como eles se direcionam a partir do movimento dos elétrons. Em seguida, sugere-se que seja feita uma breve explicação do conceito de frustração geométrica, esclarecendo que a sua ocorrência pode gerar novos estados exóticos da matéria, entre eles o gelo de spin (CANOVA, 2019).

Logo após, é mostrado aos alunos que os materiais denominados gelos de spin fornecem um novo estado magnético, em que os spins se localizam nos vértices de tetraedros, obedecendo à regra do gelo, onde dois spins apontam para dentro do tetraedro e dois apontam para fora, em seu estado fundamental.

Para a melhor visualização do comportamento desses spins, é feita sua análise, a partir de uma simulação em uma rede plana quadrada, em que os spins ocupam o vértice de quadrados e apontam para o centro ou para fora deste, como mostrado na Figura 30:

Figura 30 – Comportamento dos spins em rede plana



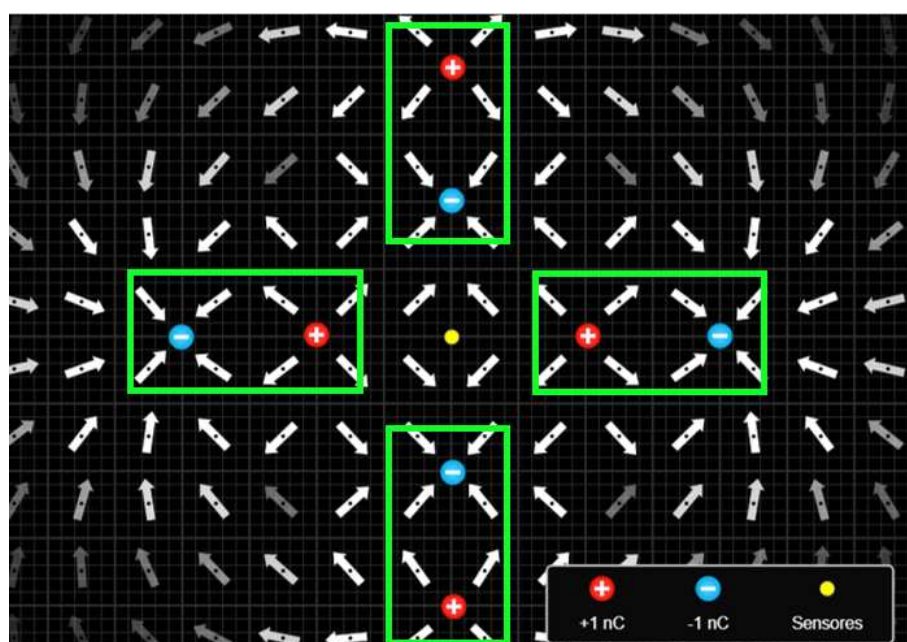
Fonte: elaborada pelo autor.

A partir da análise da Figura 30, os alunos devem perceber que, em cada vértice, os quatro spins (representados pelas setas) tendem a obedecer à regra do gelo (dois apontam para o centro do vértice enquanto os outros dois apontam para fora) e que, quando essa regra é violada, excitações emergem (círculos amarelos e beges), deixando o sistema instável com a possibilidade de movimentação a partir de uma perturbação dessas excitações.

Os alunos, ainda, deverão conseguir compreender que, através da análise da figura, em analogia com os conhecimentos construídos sobre frustração geométrica, demonstra-se que haveria dois spins horizontais e dois spins verticais em sentidos opostos. Logo, como o sistema é frustrado, ocorre um desequilíbrio na rede, criando-se excitação emergente, no qual os spins se comportam como monopolos magnéticos.

Para a melhor visualização da ocorrência desses monopolos magnéticos, propõe-se a realização de uma demonstração utilizando-se a simulação Cargas e Campos do PHET (https://phet.colorado.edu/pt_BR/simulations/charges-and-fields). Trata-se de um applet, programa que é executado dentro de uma página da web. Será construído um sistema quadrado, utilizando-se cargas elétricas positivas e negativas dispostas conforme a Figura 31, formando dipolos elétricos, que, por analogia, simulam os polos magnéticos de um spin:

Figura 31 – Simulação dos polos magnéticos de um spin

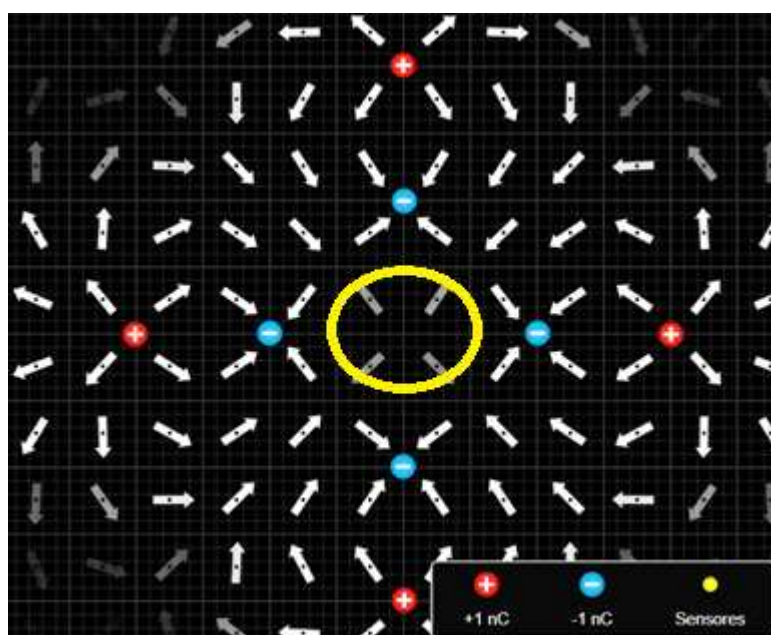


Fonte: elaborada pelo autor.

A montagem no simulador foi feita utilizando-se o recurso grade, com a intenção de criar uma ilha simétrica, mantendo as cargas equidistantes. É possível observar que, na posição em que está o sensor (ponto amarelo), o potencial é zero devido às interações entre as cargas. As cargas elétricas dispostas no sistema foram colocadas em pares e contornadas por um retângulo verde, com o intuito de melhor visualizar a analogia, que está sendo feita entre cargas elétricas e dipolos magnéticos, em que as cargas positivas funcionam como polo norte e as cargas negativas como polo sul. A montagem é feita respeitando-se a regra do gelo, com duas cargas positivas e duas cargas negativas mais próximas do centro.

É esperado que o aluno consiga perceber que é possível simular a manifestação de uma partícula emergente, que tem características de monopolo através de uma violação da regra do gelo, invertendo os dois polos positivos, que apontavam para o centro, como observado na Figura 32. Percebe-se que, nesse centro, destacado com um círculo amarelo e mesmo local onde se encontrava o sensor da Figura 31, mesmo sendo uma região onde não há cargas, aparecerá o campo de um monopolo, como se ali existisse uma carga pontual positiva emergente, fenômeno, que é facilmente observado na natureza, pois é sabido que existem monopolos elétricos.

Figura 32 – Simulação de um análogo elétrico à configuração 4in ou 4out para o surgimento de um monopolo emergente



Fonte: elaborada pelo autor.

Agora, se for feita a mesma montagem com imãs, será possível observar que as excitações elementares nos gelos de spin se comportam como monopolos magnéticos, algo que não é encontrado na natureza.

QUARTO MOMENTO

Tempo previsto: 1 hora/aula

A quarta etapa da sequência didática proposta apresenta aos alunos o produto, que foi reproduzido no *Laboratory of Spintronics and Nanomagnetism* (LABSPIN) da UFV, com o auxílio do aluno de doutorado Hamilton Teixeira, em colaboração com o professor Clodoaldo I. J. Araújo.

Esse produto simula gelos de spin macroscópicos, em uma rede quadrada, composta por ilhas simétricas, em que é possível gerar um sistema frustrado e permite observar o análogo a um monopolo emergente. Toda a estrutura foi feita no LABSPIN utilizando-se impressão tridimensional, além de aquisições e composições de pequenas esferas de ímãs de neodímio de 5 mm de diâmetro.

O objetivo deste momento é a fixação dos conceitos visualizados por parte dos alunos, com o intuito de que tudo o que foi discutido e apresentado seja visto de forma macroscópica e, assim, melhor compreendido.

Ciente da dificuldade para algumas instituições e professores em reproduzir o produto utilizando-se uma impressora 3D, há, no *site*, imagens e vídeos da rede em funcionamento.

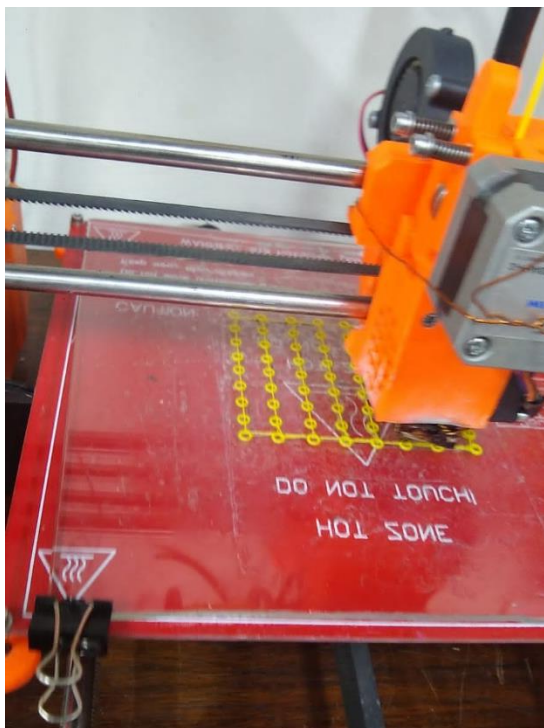
Aos que possuem acesso e desejarem reproduzir o material, seguem os dados usados pelo Laboratório:

- impressora tridimensional do tipo Prusa i5;
- projeto e desenho elaborado no programa 123 designer;
- o material do filamento utilizado foi o PLA;
- ímãs esféricos de neodímio com 5 mm de diâmetro adquiridos comercialmente;

A montagem é feita a partir de uma base, que suporta as hastes de fixação com dimensões de 3 cm de altura, 0,2 mm de espessura e 1,1 cm de largura, como mostrado na Figura 35. Nessas hastes, são fixados os suportes, que recebem os ímãs no formato, representados na Figura 37. Essas medidas podem ser adaptadas desde que estejam distantes o suficiente para permitir que os ímãs girem e próximas o suficiente para que haja interação entre eles.

As Figuras 33 e 34 apresentam o produto em sua primeira fase de impressão no LABSPIN da UFV:

Figura 33 – Imagem da reprodução do produto pela impressora 3D



Fonte: acervo do autor.

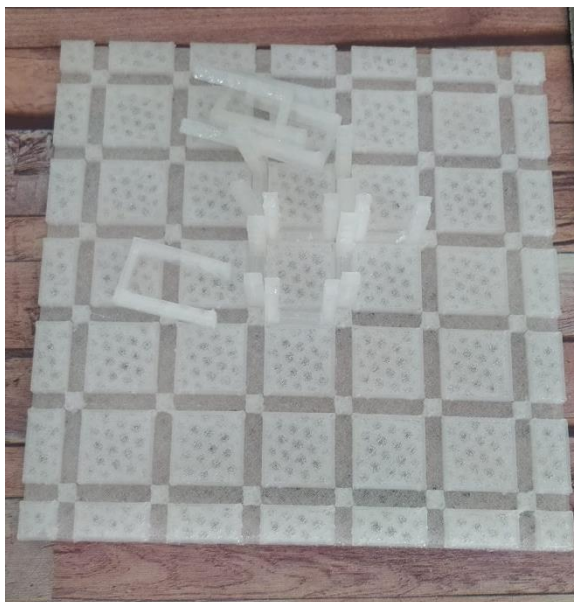
Figura 34 – Imagem da reprodução do produto pela impressora 3D



Fonte: acervo do autor.

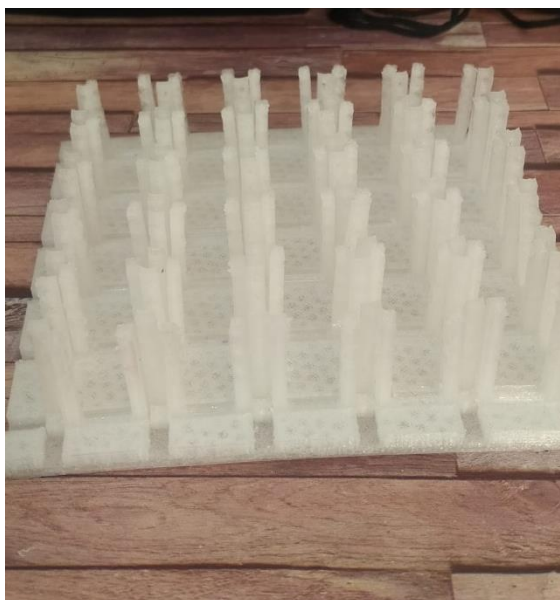
A Figura 35 mostra a estrutura da base e das hastes, e a Figura 36 mostra a base com as hastes encaixadas:

Figura 35 – Base da rede GSA macroscópica



Fonte: acervo do autor.

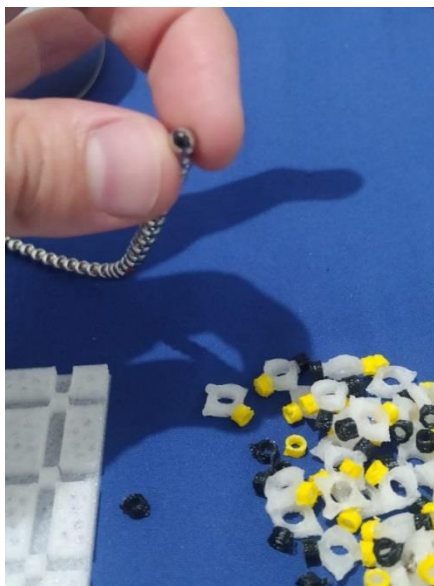
Figura 36 – Base com as hastes montadas da GSA macroscópica



Fonte: acervo do autor.

A maior dificuldade da montagem, e na utilização, foi manter os ímãs com seus polos norte e sul identificados. Os ímãs esféricos, que possuem seus polos em uma região não demarcada dessa esfera, se assemelham a uma esfera comum. As esferas foram alocadas em um suporte feito sob medida para elas. Para diferenciar os polos, foi utilizada uma argolinha com cores diferentes. Para encaixar as bolinhas dentro da argola, com seus polos no lugar exato, as esferas foram enfileiradas, com seus polos diferentes unidos. Foi feita uma marca com pincel em cada esfera, para, assim, ser ajustada dentro da argola, e bem direcionados seus polos, como pode ser observado na Figura 37.

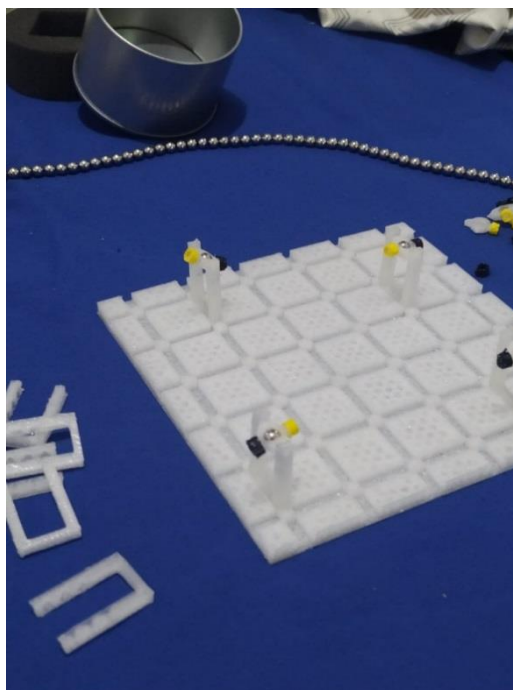
Figura 37 – Demarcação dos polos do ímã esférico



Fonte: acervo do autor.

Na Figura 38, é mostrado como foram encaixadas na base cada uma das hastes já prontas, com esfera e argolas identificadoras. As Figuras 39, 40 e 41 mostram a estrutura pronta. É possível perceber que os ímãs se alinham, buscando uma configuração menos energética e obedecendo à regra do gelo 2in-2out. A intenção é observar pontos em que haverá violação dessa regra na rede, aparecendo, ali, uma excitação do tipo monopolo. Ao mudar a configuração de um dos ímãs, que se encontram ao redor desse ponto, é possível perceber a propagação dessa perturbação. Outros ímãs próximos irão se movimentar, sugerindo a movimentação desse monopolo emergente.

Figura 38 – Montagem da rede macroscópica, que simula gelos de spin artificiais



Fonte: acervo do autor.

Figura 39 – Vista superior da rede macroscópica, que simula gelos de spin artificiais



Fonte: acervo do autor.

Figura 40 – Vista superior da rede macroscópica, que simula gelos de spin artificiais



Fonte: acervo do autor.

Figura 41 – Vista superior da rede macroscópica, que simula gelos de spin artificiais



Fonte: acervo do autor.

REFERÊNCIAS

- BERNOULLI PLAY. Propriedades magnéticas da matéria. **YouTube**, 5 de janeiro de 2018. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?app=desktop&v=wZIVAIYtlxI>. Acesso em: 6 maio 2021.
- BRAMWELL, S. T. *et al.* Measurement of the charge and current of magnetic monopoles in spin ice. **Nature, Nature Publishing Group**, v. 461, n. 7266, p. 956-959, 2009.
- CANOVA, Julio Cesar. **Sistemas magnéticos frustrados e desordenados: do experimento à teoria**. 2019. 47 p. Monografia (Trabalho de Graduação) – Escola de Engenharia de Lorena, Universidade de São Paulo, Lorena, 2019.
- CASTELNOVO, Claudio; MOESSNER, Roderich; SONDHI, S. L. Magnetic monopoles in spin ice. **Nature**, v. 451, p. 42-45, 2008.
- FRANCO, D. L. A importância da sequência didática como metodologia no ensino da disciplina de Física moderna no Ensino Médio. **Revista Triângulo**, Uberaba – MG, v. 11, n. 1, p. 151-162, 2018. DOI: 10.18554/rt.v0i0.2664. Disponível em: <https://seer.uftm.edu.br/revistaeletronica/index.php/revistatriangulo/article/view/2664>. Acesso em: 1º ago. 2023.
- KOCHAN, Keity Alesandra. **Dificuldades de aprendizagem em Física**. Curitiba, 2022. Disponível em: <<https://repositorio.uninter.com/handle/1/1128>> Acesso em: 13 mar. 2023.
- NERDOLOGIA. Os poderes do Super Choque. **YouTube**, 9 de julho de 2020. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?app=desktop&v=4Haq9OJqNrK&t=477s>. Acesso em: 10 jul. 2021.
- PhET Interactive Simulation. Disponível em: https://phet.colorado.edu/pt_BR/simulations/charges-and-fields/about. Acesso em: 20 mar. 2021.
- ROTTA, Fernando. **Quanto menor, melhor**. Brasília: Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial (ABDI). 2018. Disponível em: <https://old.abdi.com.br/postagem/quanto-menor-melhor>. Acesso em: 9 ago. 2023.
- WANG, R. F. *et al.* Artificial ‘spin ice’ in a geometrically frustrated lattice of nanoscale ferromagnetic islands. **Nature**, v. 439, n. 7074, p. 303-306, 2006.