

FABRICAÇÃO DIGITAL PARA ENSINO DE FÍSICA QUÂNTICA*Digital Fabrication for Teaching Quantum Physics***Alvaro Galhardo Oliveira de Moura** [alvarogalhardo@alu.ufc.br]**Luiz Paulo Fernandes Lima** [luiz.lima@ifce.edu.br]**José Ricardo Barros de Lima** [dlimajrb@gmail.com]**Francisco Levi Pereira Braga** [levibraga84@alu.ufc.br]*Universidade Federal do Ceará (UFC) – Centro de Ciências
Campus do Pici – Bloco 902 – CEP 60.440-900 – Fortaleza – Ce***Gylly Peterson Fernandes Lima** [gylly.lima@prof.ce.gov.br]*Secretaria Estadual de Educação do Ceará – Sefor 3
Av. Gen. Afonso Albuquerque Lima, s/n – CEP 60.822-325 – Fortaleza – Ce***Francisco Herbert Lima Vasconcelos** [herbert@virtual.ufc.br]*Universidade Federal do Ceará (UFC) – Instituto Universidade Virtual
Campus do Pici – Bloco 901 – CEP 60.455-760 – Fortaleza – Ce**Recebido: 30/11/2025**Aceito: 02/05/2026***Resumo**

As pesquisas com q-bits mantêm o mundo na expectativa de outra revolução computacional. Sendo a abordagem da Educação Maker uma oportunidade de protagonismo na aprendizagem desta atual temática. Portanto, indagou-se, é possível ensinar Física Quântica na perspectiva ativa da fabricação digital? Para responder, objetivou-se refletir acerca do potencial da modelagem e fabricação digitais no ensino de Quântica e, secundariamente, modelar as principais representações de átomos. Para isso, adotou-se a metodologia do *Design Thinking*, cujas etapas de imersão, definição, ideação, prototipagem e teste foram seguidas durante a construção dos principais modelos atômicos. Os primeiros resultados revelaram a necessidade de um criterioso planejamento para o processo de modelagem como condição de evolução da ideia de átomo através do conjunto de situações pedagógicas e tecnológicas, associados ao conceito e de suas representações semióticas possíveis, conforme a teoria dos campos conceituais de Gérard Vergnaud. Finalmente, a natureza dos objetos em 3D, por ser incompatível com a realidade dos entes quânticos, restringe o alcance da pesquisa, todavia imagina-se que, ainda assim, seja vantajosa quando comparada ao ensino tradicional.

Palavras-chave: Modelo Atômico; Cultura *Maker*; Campo Conceitual; *Design Thinking*.**Abstract**

Research with q-bits keeps the world waiting for another computational revolution. The Maker Education approach is an opportunity to take the lead in learning about this current topic. Therefore, the question was asked: is it possible to teach quantum physics from the active perspective of digital manufacturing? To answer this question, we aimed to reflect on the potential of digital modeling and manufacturing in teaching quantum physics and, secondarily, to model the main representations of atoms. To this end, we adopted the *Design Thinking* methodology, whose stages of immersion, definition, ideation, prototyping, and testing were followed during the construction of the main atomic models. The initial results revealed the need for careful planning of the modeling process as a condition for the evolution of the idea of the atom through a set of pedagogical and technological situations associated with the concept and its possible semiotic representations, according to Gérard

Vergnaud's theory of conceptual fields. Finally, the nature of 3D objects, being incompatible with the reality of quantum entities, restricts the scope of the research, but it is still thought to be advantageous when compared to traditional teaching.

Keywords: Atomic Model; Maker Culture; Conceptual Field; Design Thinking.

1. INTRODUÇÃO

A Tomografia por Emissão de Pósitrons (PET em inglês), os relógios atômicos e o LASER (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*) são tecnologias cujo funcionamento está assentado na Física Quântica (FQ). Mas não é só isso, pesquisas realizadas em computação e criptografia quânticas conduzirão as Tecnologias da Informação (TI) a um novo patamar de processamento de dados. Essa realidade, por si só, justifica a escolha, feita pela Organização das Nações Unidas (ONU), do ano de 2025 como o Ano Internacional da Ciência e Tecnologia Quânticas (Sociedade Brasileira de Física, 2024).

O Ensino de FQ, na Educação Básica, configura-se como porta de entrada para este universo de conceitos, geralmente contraintuitivos, mas construídos por pessoas em contexto social específico de nossa história. Temática que desperta a curiosidade nos alunos e cuja relevância encontra-se em sua legitimidade cultural e social (Hoernig; Massoni & Hadjimichef, 2021) seja nas tecnologias em uso pela sociedade global ou pelas extraordinárias histórias contadas na cultura *pop*.

Muito do que se aprende em FQ vai contra o paradigma da chamada Física Clássica. Assim, a teoria cognitiva que for adotada para ensinar Física na escola deve ser capaz de prover esta transposição de temática sem a ruptura característica do contexto histórico da FQ. Pensando nisso, para esta pesquisa, tomou-se a Teoria dos Campos Conceituais (TCC) de Gérard Vergnaud (1933 – 2021) como marco teórico por se basear na conceitualização como âmago do desenvolvimento cognitivo (Vergnaud, 1996a). Esta conceitualização incide em estrutura da Física que está presente tanto classicamente quanto quanticamente: o átomo.

Desde quando foi concebido, ainda na Grécia antiga, até meados do século XX, a conceitualização de átomo passou por metamorfoses. Uma maneira ativa de proporcionar, aos alunos, aprendizagem do conceito de átomo é por meio da modelização e fabricação digitais. Isto é possível graças ao acesso, cada vez mais fácil, a maquinários como a cortadora a *laser* e a impressora 3D que, conforme Aguiar (2016), já estão no mercado desde meados dos anos 1980. Porém, o uso sistemático destes maquinários se deve, de acordo com Marini (2019), aos avanços tecnológicos digitais e redução dos custos dos *hardwares* de ponta na virada do milênio, o que ensejou o advento do Movimento *Maker*, em 2005, com o lançamento da *Make Magazine*.

Pelo exposto acima, levantou-se o seguinte questionamento: como ensinar FQ na perspectiva ativa da modelagem e fabricação digitais? Assim, o objetivo deste trabalho é construir modelos de átomo propostos desde os gregos até meados do século XX. Para isso, adotou-se o *Design Thinking* (DT), que vem se destacando na educação, como uma metodologia ativa devido “(...) a sua efetividade no desenvolvimento de habilidades como criatividade, pensamento crítico e resolução de problemas” (Santos & Souza, 2023).

Um trabalho de pesquisa como este se justifica pelo contexto tecnológico vivenciado, de emprego da FQ e cujas consequências, para as próximas gerações, delinea a necessidade de aprendizagens numa sociedade em transformação, preparando os jovens para profissões que surgirão, tecnologias que se estabelecerão e problemas que ainda não entendem (Brasil, 2018), assemelhando-se à passagem do domínio da ficção científica para a circunstância das aplicações cotidianas. Desde 1925, quando “(...) Werner Heisenberg introduziu a ideia de ‘mecânica matricial’, marcando o início formal da mecânica quântica (...) (SBF, 2024), um século passou com incríveis avanços, como a solução do paradoxo EPR ainda nos anos 1980 (Aspect; Dalibard &

Roger, 1982), e outros mais surpreendentes como os computadores quânticos da IBM, *Google* e *Microsoft*, por exemplo, que demandam algoritmos com lógica própria e soluções quânticas em criptografia. Se não bastasse a realidade factual dos avanços computacionais, o ensino de FQ é facilmente justificado como uma proteção necessária contra a pseudociência propalada pelos *coaches* quânticos.

O presente artigo está dividido em cinco seções: a Introdução com a contextualização da temática e o esboço do trabalho; a Fundamentação teórica onde são apresentados sucintamente as estruturas básicas da TCC; o Caminho metodológico no qual a pesquisa é desenvolvida a partir dos pressupostos do *Design Thinking*; a seção de Resultados e discussão em que são descritos os produtos da modelagem e fabricação digitais bem como a argumentação acerca de sua pertinência para os objetivos da investigação e, por fim, as Considerações finais nas quais são retomados aspectos relevantes do trabalho e indicados itinerários para novas pesquisas.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

O desenvolvimento da concepção de átomo é um capítulo interessante na história da ciência. Começou como especulação filosófica, tendo o mérito de explicar racional e materialmente a constituição do mundo, sendo um contraponto às cosmogonias baseadas em mitos, próprias dos povos da antiguidade. “(...) Leucipo – como Demócrito, mais tarde – propôs que tudo é feito de partículas indivisíveis chamadas átomos. Em grego, ‘*a-tomo*’ significa ‘o que não pode ser cortado’” (Gleiser, 2008, p. 24). Esta concepção só voltaria a fazer parte do pensamento humano quase dois milênios depois e, mesmo assim, com características bem díspares das de seu advento. Entretanto, após longo hiato, o fato é que, transcorridos pouco menos de cento e cinquenta anos, a compreensão de átomo sofreu incrível metamorfose.

Tradicionalmente, na escola, o átomo é abordado na forma de modelo teórico. Por isso, a necessidade de se escolher uma teoria da aprendizagem capaz de categorizar este conceito. Assim, adotou-se a TCC, pois ela é uma teoria psicológica do processo de conceitualização do mundo real (Vergnaud, 1990). E que, nas palavras de Moreira (2002) permite melhor planejamento das atividades de aprendizagem em competências complexas a partir dos próprios conteúdos do conhecimento. E quando se trata de campo conceitual, deve-se entendê-lo como sendo “(...) um conjunto informal e heterogêneos de problemas, situações, conceitos, relações, estruturas, conteúdos e operações de pensamento, conectados uns aos outros e, provavelmente, entrelaçados durante o processo de aquisição” (Vergnaud, 1982, p. 40).

Deste modo, compreende-se que a TCC teoriza um processo complexo e cujo desenvolvimento pode levar anos, ou mesmo a vida toda, do sujeito cognoscente. Processo esse guiado pelas circunstâncias vivenciadas, pelo indivíduo, como idade, formação, interesses, motivação etc. O que influenciará, certamente, os conceitos incorporados aos seus esquemas, bem como as intrincadas relações entre conceitos e entre conceitos e teoremas. Por isso, Vergnaud (1997, p. 6) definiu conceito como uma tríade composta por: conjunto de situações a darem sentido ao conceito (Referente); conjunto de invariantes com os quais se lida com as situações (Significado); e conjunto de representações semióticas usadas para retratar invariantes, situações e procedimentos (Significante) conforme se pode observar no Quadro 1.

Quadro 1. Definição de Conceito.

Conjunto	Descrição	Denominação
S	Situações que dão sentido ao conceito.	Referente
I	Invariantes usados pelo sujeito para dominar as situações.	Significado
R	Símbolos usados para exprimir invariantes e situações.	Significante

Fonte: Vergnaud (1990, p. 145; 1993, p. 8).

Nota-se, nesta teoria, papel de relevância para as situações, pois são elas que darão sentido aos conceitos. Ou seja, são as circunstâncias, nas quais os sujeitos cognoscentes estejam, que lhes proporcionarão a significação conceitual, como por exemplo, situações lúdicas, de atuação ativa, de competição ou mesmo aquelas tradicionais, de memorização e passivas. Todas as situações, nas quais os indivíduos estejam inseridos, gerarão uma percepção dos conceitos nos esquemas, amplas ou limitadas. Por esse motivo, Moreira (2002) escreveu que as situações, e não os conceitos, são as verdadeiras portas de entrada dos campos conceituais. E para Vergnaud (1996a), boa parte de nossas concepções são oriundas das primeiras situações com as quais tomamos parte em nossas vidas, dominando-as ou tentando modificá-las. A partir destas considerações teóricas, entende-se a importância em se proporcionar situações que sejam instigantes e potencialmente significantes para uma abrangente conceitualização.

Diante de uma classe de situações semelhantes, a pessoa, ao ser estimulada a resolvê-las, ou interagir, adotará comportamentos parecidos. Ou seja, quando se sabe fazer algo, qualquer outra ocorrência similar despertará ações análogas. Isto se deve ao que Vergnaud (1990, p. 136) chamou de “(...) organização invariante do comportamento para uma determinada classe de situações”. Trata-se da definição de esquema, herança teórica de Jean Piaget (1896 – 1980). Gérard Vergnaud foi seu aluno e herdou a ideia de esquema em seu campo de pesquisa. Ele percebeu a amálgama entre esquemas e situações a tal ponto de falar em interação esquema-situação em vez de interação sujeito-objeto (Vergnaud, 1996b). Deste modo, o comportamento do indivíduo terá uma estrutura invariante a qual apontará para o uso de esquemas. Portanto, ao propor situações aos aprendizes, os professores devem ter em mente a tarefa de fortalecer e expandir seus esquemas cognitivos por meio de contextos significativos, reflexivos e estimulantes.

Esses invariantes nos esquemas são também conhecidos como conhecimentos-em-ação ou, simplesmente, invariantes operatórios. Por sua vez, divide-se em duas estruturas: os teoremas-em-ação que são as proposições verdadeiras da realidade e conceitos-em-ação que são os objetos, categorias, predicados pertinentes e relevantes (*ibid.*). Moreira (2002, p. 16) lembrou que “(...) existe uma relação dialética entre conceitos-em-ação e teoremas-em-ação, uma vez que conceitos são ingredientes de teoremas e teoremas são propriedades que dão aos conceitos seus conteúdos”. Apesar da nomenclatura, não são ainda conceitos e teoremas como definidos cientificamente, todavia, quando trabalhados adequadamente por meio de situações, possam vir a se tornar verdadeiros conceitos e teoremas. Embora isso leve anos para acontecer (*ibid.*).

3. CAMINHO METODOLÓGICO

A metodologia adotada neste trabalho foi a do *Design Thinking*. Nascida na década de 1960 (Santos & Souza, 2023) esta abordagem, ultimamente, tem sido utilizada na educação como destacado recurso no desenvolvimento de competências e habilidades, bem como potencialmente interessante na promoção do senso crítico e da criatividade durante o processo ativo de aprendizagem. Conforme Brown (2009), o DT é composto por cinco etapas: empatia, definição, ideação, prototipação e teste (Figura 1).

Onde, na empatia (também chamada de imersão), objetiva-se entender as necessidades dos envolvidos com o problema a ser resolvido, coletando-se informações; na definição, os dados da etapa anterior são organizados e o problema é estabelecido de forma objetiva, assim como os desafios; na ideação, busca-se gerar o maior número possível de soluções criativas para o problema; já na prototipação, a(s) melhor(es) ideia(s) é(são) transformada(s) em modelos concretos para se visualizar e ensaiar de forma rápida e prática; e, ao final, a etapa de teste onde o(s) protótipo(s) é(são) testado(s) para, a partir de *feedback*, os ajustes que se fizerem necessários serem realizados.

Uma característica poderosa do DT é sua iteração, ou seja, a possibilidade sempre aberta de retornar ao início do processo e implementar os aperfeiçoamentos necessários e identificados na etapa de teste. Conforme Lima *et al.* (2024, p. 10) salientaram que “em diversos momentos as etapas do DT foram reiniciadas com o intuito de gerar o melhor produto ao final de todo processo”.



Figura 1. Etapas do *Design Thinking*. Fonte: Hohemberger, 2020, p. 18.

Para o contexto desta pesquisa, a abordagem da Cultura *Maker* (CM) adequa-se oportunamente com a metodologia do DT. Já a CM se desenvolveu em meados do século XX baseada, principalmente, no princípio do “faça você mesmo” (que em inglês é ‘*Do It Yourself*’ ou, em sigla, DIY). Outro princípio relevante da CM é o do compartilhamento de conhecimentos, pois os *makers* (como se autodenominam os adeptos desta abordagem) acreditam que a colaboração promove a cocriação beneficiando a todos. No Ensino, tornou-se uma importante possibilidade com as chamadas metodologias ativas o que fez surgir a expressão Educação *Maker* “(...) com seu foco na implantação de atividades que combinam ciência e tecnologia (tanto com relação a espaços quanto a temas curriculares) (...)” (Blikstein; Valente & Moura, 2020, p. 525) a qual favorece o protagonismo do sujeito cognoscente o que é peça fundamental na solução de problemáticas por meio da DT e, neste trabalho, através da fabricação digital que Borges (2016) definiu como o processo de produção de objetos físicos a partir da modelagem digital, cuja fabricação ocorre em equipamentos controlados numericamente.

Dito isto, e percebendo as similitudes entre o DT e a CM, planejou-se esta pesquisa refletindo, inicialmente, que a FQ é uma das teorias mais bem elaboradas, dando respostas aos vários fenômenos do microcosmo e base de muitas novas tecnologias e que, ao mesmo tempo, foge de muitos entendimentos do senso comum. Por isso, para evitar desinteresse em abstrações ou caminhada pelo calvário matemático, alheio às competências e habilidades previstas para os estudantes da Educação Básica, experienciou-se a fase de empatia da DT, colocando-se no lugar do outro e refletindo sobre as possibilidades de abordagens alternativas para o estudo dos modelos atômicos. Vieram à mente propostas como a caixa com o gato de Schrödinger, robôs movidos a efeito fotoelétrico (placas solares) e modelagem/fabricação de átomos. Na fase de definição, avaliou-se todas as informações e chegou-se à problemática a ser trabalhada de forma clara e objetiva. Na ideação, em auxílio à criatividade, aditou-se o princípio de compartilhamento de conhecimentos para a exploração dos modelos atômicos. Neste caso, averiguou-se projetos nos sítios <<http://www.thingiverse.com>> e <<https://3axis.co>>. Já na prototipação, foi a vez de produzir os modelos tanto na impressora 3D quanto na cortadora a *laser*. E na fase de testes a viabilidade dos objetos para o ensino, com a solução de problemas surgidos durante a fabricação ou *feedback* oriundo do manuseio prático dos produtos fabricados digitalmente.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir do marco teórico de campo conceitual, buscou-se uma maneira de se trabalhar, por meio da fabricação digital, as características dos principais modelos atômicos propostos em momentos específicos da história: como a concepção pioneira dos filósofos gregos, a ideia de Dalton, de J. J. Thomson, a formulação de Rutherford, a de Bohr e culminando com o modelo mais atual dada pela FQ.

Seguindo as etapas do DT, o processo de modelagem e fabricação digitais dos modelos atômicos, ocorreu no Laboratório de Fabricação (Fablab) da Universidade Federal do Ceará (UFC), onde se realizam pesquisas em Ensino com Cultura *Maker*, localizado no 4º andar, bloco 918 do Centro de Excelência em Políticas Educacionais (CEnPE). *campus* do Pici, Fortaleza, Ceará. O Fablab dispõe de 4 (quatro) impressoras 3D, 1 (uma) máquina de corte a *laser* e *kits* de eletrônica básica, Arduino e Robótica. Também dispõe de móveis adaptados ao ensino e aprendizagem ativos, projetor multimídia, sistema de som, ferramentas para trabalhos manuais e *laptops* (Figura 2).



Figura 2: Laboratório de fabricação (UFC). Fonte: os autores.

A primeira modelagem de átomo nesta pesquisa, por sugestão de um dos autores deste trabalho, foi com a máquina de corte a *laser* e tratou do modelo proposto por J. J. Thomson (1856 – 1940). Conforme Hewitt (2002, pp. 201-202), Thomson, em 1897, mostrou por meio de experimentos que os raios catódicos eram compostos por partículas aparentemente idênticas, menores e bem mais leves que os átomos, as quais chamou de elétrons. Assim, a concepção de átomo indivisível de Dalton dava lugar a ideia de átomo composto por partículas que podiam ser expelidas de sua estrutura. O modelo proposto por Thomson ficou conhecido como modelo de “pudim com passas”.

Para isso, modelou-se este tipo de átomo com o *software* Due Studio 4¹. O processo de confecção visual do átomo de Thomson é relativamente fácil. O *software* segue o paradigma dos principais programas de criação e edição de imagens como o Inkscape. Primeiramente, desenhou-se o átomo e, em seguida, a representação circular do que viriam a ser as partículas eletricamente carregadas e componentes dos raios catódicos. Um dos aspectos da modelização é o cuidado com as dimensões do que será produzido, pois não poderá ser demasiado grande e nem muito pequeno que dificulte a manipulação por parte dos alunos.

1 Este *software* pode ser baixado pelo link <<https://duelaser.zendesk.com/hc/pt-br/articles/4421456877581-V-Due-Studio-download>>.

O *software* da máquina cortadora a *laser* possui funções de preenchimento, corte e contorno. Por questões de tempo, optou-se pelo contorno e corte que, na primeira tentativa, realizou-se num tempo aproximado de dois minutos e meio. Na fase de prototipagem da DT, decidiu-se pela possibilidade dos elétrons poderem ser tirados de suas posições como peças de um quebra-cabeças. Entretanto, na fase de testes, percebeu-se que elas caíam facilmente com possibilidade de perda no piso da sala entre os pés das pessoas, cadeiras e mesas. Daí a importância do *feedback* para se reavaliar o processo. Após refletir, chegou-se a uma solução que foi a de colocar outra peça retangular sob a peça do modelo como suporte. Neste novo formato, o tempo de corte passou para pouco menos de 4 minutos. Ainda assim, razoável para uma atividade didática e em comparação com o tempo de modelagem no *software*.

Cabe salientar que a relação entre as dimensões, das peças representantes dos elétrons com a peça correspondente ao átomo como um todo, está fora de escala quando comparadas ao que J. J. Thomson calculou. E o aluno deve ser levado a refletir sobre esse fato e compreendê-lo. Que essa representação foi um marco, uma quebra no paradigma da indivisibilidade do átomo até então e que, nos esquemas dos aprendizes, são analogias e, até mesmo, mal-entendidos entre situações, conceitos, teoremas e significantes (Vergnaud, 1983). A Figura 3 mostra o produto final.

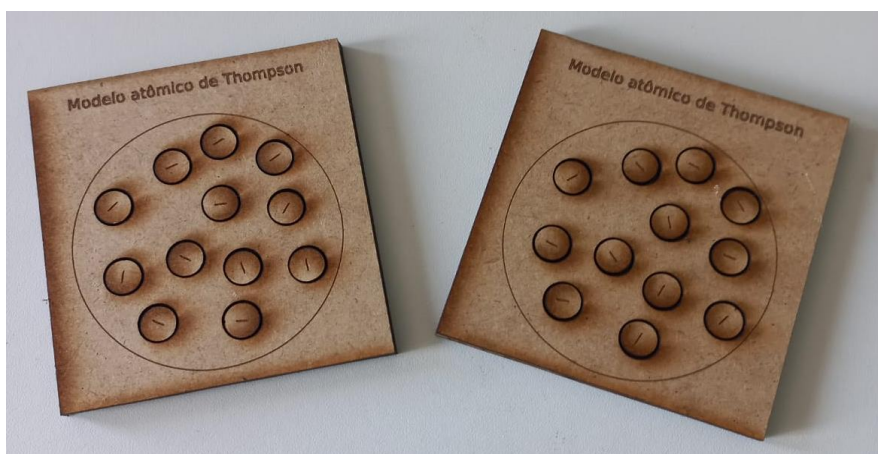


Figura 3. Modelo de átomo "pudim com passas". Fonte: os autores.

A segunda concepção de átomo a ser modelada, desta vez no ambiente virtual Tinkercad, foi a de John Dalton (1766 – 1844). Segundo Caruso e Oguri (2016), Dalton concebeu um modelo científico de átomo capaz de explicar vários fenômenos químicos de forma quantitativa devido ao paradigma newtoniano. Isto porque seu modelo de átomo se assemelhava a uma esfera maciça (Figura 4).



Figura 4. Modelo atômico de Dalton. Fonte: os autores.

O processo de modelagem deste átomo foi mais simples, pois ao acessar o site Thingiverse, encontram-se muitos modelos prontos de projetos que os *makers* compartilham por princípio. Fez-se *download* de um arquivo de átomo, mais especificamente em <https://www.thingiverse.com/thing:6845045>, depois de visualizado no programa Ultimaker

Cura², onde é possível manipular o arquivo do objeto 3D, antecipar o tempo de impressão e redimensionar se necessário, o objeto foi produzido na impressora 3D. Como a peça levaria pouco mais de 3 horas e meia para estar pronta, pois tinha grandes dimensões, optou-se por tamanho menor, proporcional ao de bolas de gude por exemplo. Assim, reduziu-se o tempo para cerca de 25 min. Com a impressão 3D, tem-se a possibilidade de fazer a peça toda com o uso de suportes automaticamente gerados pelo *software*, contudo, dada a simetria do átomo de Dalton, optou-se por imprimir duas calotas e depois colá-las (Figura 5).



Figura 5. Modelagem do átomo de Dalton. Fonte: os autores.

A simetria do átomo de Dalton permite aos alunos modelá-lo diretamente a partir das formas básicas que o ambiente de trabalho do Tinkercad dispõe para criação. Assim, torna-se, junto às formas atômicas dos filósofos gregos, uma boa opção para o desenvolvimento das habilidades de modelagem digital. Além disso, cabe salientar, durante a atividade de ensino, que a simplicidade do modelo de Dalton, para o átomo, representou um resgate, após cerca de milênio e meio, das concepções materialistas dos sábios gregos e que, naquele momento do nascimento da Química moderna explicava muito das reações químicas.

O terceiro modelo de átomo seguiu os mesmos caminhos procedimentais do modelo anterior. Ou seja, o modelo de Rutherford foi também escolhido no sítio <<https://www.thingiverse.com/thing:3392656>>, aberto no Ultimaker Cura e, dadas as suas dimensões, seu tempo de impressão ficou em 19 min. Nesta peça é possível ver o núcleo com suas partículas componentes e os elétrons em suas órbitas (Figura 6). Cabe destacar que tanto o átomo e seus constituintes estão fora de escala. Contudo, já é uma diferenciação conceitual dos modelos anteriores (de Dalton e de Thomson) e que o professor deve ajudar os alunos a refletirem sobre esses detalhes, proporcionando uma melhor conceitualização de átomo e como a evolução desta ideia atendia aos experimentos da época.

2 Este software pode ser baixado pelo link <<https://ultimaker.com/software/ultimaker-cura/>>.

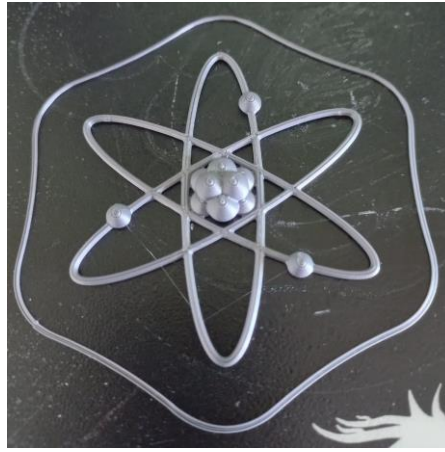


Figura 6. Modelo atômico de Rutherford. Fonte: os autores.

Uma característica da Cultura *Maker* é o compartilhamento de projetos. Facilita a tarefa de obter os arquivos para o que se deseja produzir. Mesmo aqui, a imitação deve seguir a lógica do ateliê de projetos cujas ações são reflexivas como a de um artista que ao copiar os clássicos acaba por desenvolver estilo próprio e originalidade, ou seja, o espaço de criação é o local de liberdade, desejo de aprender e reaprender (Andrade, 2014). Embora a tarefa de modelar a partir de formas básicas, em outros *softwares* de CAD³ dedicados a área de engenharia, não deixa de ser desafiador e excelente atividade no desenvolvimento de competências, pois são situações que obrigam a um tempo de reflexão, exploração, tentativas e erros, levando o sujeito ao fracasso ou sucesso (Vergnaud, 1993).

O quarto modelo produzido nesta pesquisa foi o do átomo de Bohr. Por sugestão de um dos autores, a modelagem didática ocorreu de forma mista, ou seja, parte do modelo, representando o núcleo e as níveis de energia, foi projetado no Due Studio 4 e executados na cortadora Due Flow. Já a representação dos elétrons aconteceu no Tinkercad e depois impressa em 3D para se ter a mobilidade necessária ao movimento das peças pelas marcas dos orbitais (Figura 7). Isto porque, segundo Young & Freedman (2016) uma característica explicativa do modelo de Bohr é que um átomo excitado pode fazer a transição energética de um nível a outro através do fóton, ou seja, os elétrons são capazes de “saltarem” entre órbitas da eletrosfera por meio da absorção, ou emissão, de energia que se dá por intermédio do fóton em frequências bem específicas. Este por outro lado, foi modelado como sendo uma pequena ondulação com seta no próprio Tinkercad.

3 Sigla que significa “Desenho Assistido por Computador” que no inglês é *Computer-Aided Design* (CAD).



Figura 7: Modelo atômico de Bohr.
Fonte: os autores.

O modelo de Bohr representa uma oportunidade didática de se trabalhar alguns conceitos que levaram à ampliação da concepção atômica. Assim sendo, o professor pode explorar a relação entre luz e matéria dada pelas linhas espectrais. E que, na tentativa de explicar o espectro atômico, o dinamarquês Niels Bohr (1885 – 1962) elaborou seu modelo atômico de acordo com quatro postulados, numa explicação mista em que “(...) o elétron obedeça a uma propriedade da teoria clássica do eletromagnetismo (lei de Coulomb) e que ao mesmo tempo não obedeça a outra propriedade (emissão da radiação por um corpo carregado acelerado)” (Eisberg, 1979, p.102). Assim, o que acontece na eletrosfera, sob explicação clássica e não clássica, envolve a interação entre fótons e elétrons onde a energia absorvida (ou emitida) por estes era quantizada o que os levam a ir de um nível de energia a outro na eletrosfera.

O penúltimo modelo de átomo construído nesta pesquisa foi o racionalizado pelos gregos Leucipo e Demócrito no século V antes da Era Comum. Embora o tenhamos abordado somente agora, sugere-se iniciar o treinamento de alunos com ele, pois as características desta ideia a torna conveniente para trabalhar modelagem digital. Isto porque “Demócrito, ao atribuir aos átomos duas propriedades capazes de diferenciá-los, tamanho e formato, imaginava-os como indivisíveis apenas fisicamente, mas não conceitualmente, uma vez que estes podiam, pelo menos em princípio, diferir em tamanho” (Caruso & Oguri, 2016, p. 9).

Assim sendo, o primeiro conceito de átomo admitia inúmeras formas e tamanhos o que favorece a criatividade e entusiasmo dos aprendizes quando da criação de seus próprios “átomos” numa atividade de ensino-aprendizagem. Além disso, conforme Porto (2013), para Leucipo e Demócrito o mundo material forma-se da combinação desses átomos ao se moverem incessantemente e chocando-se entre si. Deste modo, modelaram-se alguns exemplos de possíveis “átomos” segundo esta lógica (Figura 8).



Figura 8. Exemplos de átomos do modelo racional dos filósofos gregos. Fonte: os autores.

Valeu-se das formas básicas na área de trabalho do Tinkercad. Cinco formas simples foram escolhidas para iniciar a discussão de como os filósofos da escola atomista entendiam essas

estruturas, qual propósito de sua existência e a contribuição de Epicuro à concepção original de átomo acrescentando o peso como característica essencial e irreduzível à outrora forma e tamanho (Porto, 2013; Caruso & Oguri, 2016).

Por derradeiro, o modelo atômico moderno com seus orbitais do tipo *s*, *p*, *d* e *f*. Os elétrons já não são entendidos como partículas apenas, mas possuindo uma natureza ondulatória. Assim, a partir do princípio da incerteza de Heisenberg (Einsberg, 1979; Caruso & Oguri, 2016), a posição e velocidade do elétron no átomo é uma questão de probabilidade. Deste modo, os orbitais representariam as regiões de maior probabilidade em se encontrar os elétrons. Obviamente não é algo de natureza material, contudo a modelagem digital propicia uma impressão 3D que auxilia na visualização e entendimento dos orbitais, favorecendo a evolução conceitual dos alunos. Dada a limitação da representação, em linguagem natural, para as ideias como orbital, probabilidade etc., Moreira (2002, p. 24) nos lembrou que “(...) há representações simbólicas mais potentes do que outras (...)”, ou seja, depreende-se que os objetos impressos tridimensionalmente são capazes de fornecer uma compreensão mais direta, embora imperfeita, da conceitualização que se deseja obter para uma classe de situações.



Figura 9. Modelo atômico com orbitais.
Fonte: os autores.

Embora a modelagem dos orbitais fosse possível, optou-se por realizar o *download* dos arquivos da página <<https://www.thingiverse.com/thing:1194700>>, na qual havia uma atividade didática com estas estruturas do modelo moderno de átomo. Entretanto, dadas as dimensões e tempo de impressão que se aproximava de 3 horas, decidiu-se redimensionar o tamanho dos orbitais do tipo *p* (que foram os primeiros orbitais a serem impressos) em 50% do original. Isto fez o tempo cair para 44 min apenas. Em seguida, os orbitais do tipo *f* (cuja forma se assemelha a de lóbulos) que, originalmente, demorariam 1h42 para ficar prontos, foram redimensionados em 50% chegando ao tempo de impressão de 24 min. Por fim, imprimiu-se um modelo com orbitais híbridos *sp*⁴ de <<https://www.thingiverse.com/thing:1239504>> no qual estava para concluir em 1h53, que fora redimensionado para metade do tamanho o que fez o tempo de impressão ficar em 26 min. Contudo, essa decisão trouxe o inconveniente de fragilidade da peça, onde um dos orbitais *p* acabou danificado, provavelmente repuxado pelo PLA (ácido polilático – termoplástico biodegradável usado como matéria-prima dos objetos 3D impressos) que saía do bico extrusor da impressora. Então, seguindo os passos da DT, no Ultimaker Cura, providenciou-se redimensionamento para 80% da peça original que fez o tempo de impressão ir para 1h12 (Figura 9).

Essa atual concepção para o átomo está assentada na equação de Schrödinger, cuja solução leva a função de onda que, conforme Atkins & Paula (2018), contém todas as informações sobre a dinâmica do sistema descrito por ela bem como a localização da partícula. Embora a impressão 3D gere estruturas sólidas, cabe ao professor explorar com seus alunos que os orbitais são abstrações cuja interpretação, dada por Born, do quadrado de tais funções leva ao conceito de

probabilidade, o que significa a chance de uma partícula estar nas imediações do ponto analisado (Einsberg, 1979; Caruso & Oguri, 2016; Atkins & Paula, 2018). Para o caso dos elétrons, tem-se as regiões de probabilidade de encontrá-lo por meio de sua função de onda.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Após um século do estabelecimento da Mecânica Quântica, muitos foram os seus avanços teóricos e tecnológicos. Ao designar 2025 como o Ano Internacional da Ciência e Tecnologia Quânticas, a ONU ensejou a reflexão acerca do que já é realidade bem como para as perspectivas futuras em FQ. E nada mais oportuno que proporcionar um ensino de Quântica alinhado às novas tecnologias digitais, em boa parte oriundas dos avanços práticos em FQ, para aproximar as novas gerações daquilo que lhes será cotidiano e que há bem pouco tempo fazia parte de livros de ficção científica, ou como formalismo matemático em livros didáticos.

O átomo talvez seja a estrutura que melhor represente o progresso por meio da razão, ciência e tecnologias ligadas à FQ. Por isso, optou-se por explorá-lo no ensino através da modelagem e fabricação digitais. Proporcionando uma aprendizagem que, além da cognição pura, pudesse acrescentar o uso de outros sentidos e o planejamento prévio durante o processo de modelagem tornando mais significativa a apreensão do conceito de átomo. Daí porque a TCC de Gérard Vergnaud ter sido a teoria adotada para explorar a evolução conceitual de átomo. Assim sendo, combinada com a metodologia do DT e suas etapas, pesquisou-se como ensinar FQ a partir do uso da impressora 3D e máquina de corte a *laser*.

Deste modo, foram escolhidos, para este estudo os modelos atômicos dos filósofos gregos, de Dalton, o “pudim de passas”, de Rutherford, de Bohr e a concepção moderna da mecânica quântica. Concepções que, muitas das vezes são aprendidas de modo restrito à ilustrações nos livros didáticos ou, através de formalismo matemática. Portanto, valendo-se das fases de imersão, definição, ideação, prototipação e teste do *Design Thinking*, outras dimensões da ideia de átomo foram utilizadas, proporcionando novas possibilidades de cognição além da correção de erros, defeitos, decisões equivocadas para uma melhor proposta de ensino e análise da viabilidade desta investigação.

Como resultado, atingiu-se parcialmente os objetivos da pesquisa devido às suas limitações inerentes, como a dos modelos nas formas de objetos tridimensionais para visualização, manipulação e aprendizagem de um ente físico incapaz de ser captado pelos sentidos humanos. Contudo, o potencial deste trabalho é o de apontar caminhos na modelagem de átomos para as mais variadas aplicações didáticas, em sala de aula, capazes de explorar outras dimensões de aprendizagem e que auxiliem no processo de compreensão de átomo e, fora a Física, contribuir com outras disciplinas como Química e Biologia. Assim, além de proporcionar o desenvolvimento de habilidades e competências, auxilia no fortalecimento do pensamento computacional tanto de professores quanto alunos.

Não obstante o potencial que pode ser antevisto qualitativamente, a presente pesquisa carece ainda de uma aplicação com alunos, ou mesmo professores em formação, para aferir quantitativamente seu alcance. Assim, delineia-se, como futura investigação, explorar a ideia de átomo por meio da abordagem STEAM (*Science, Technology, Engineering, Art and Mathematic*) onde as várias áreas do saber poderão colaborar interdisciplinarmente, tanto teórica quanto de modo aplicado, na evolução da concepção de átomo que foi, é e continuará sendo relevante para a humanidade.

REFERÊNCIAS

- Aguiar, L. C. D. (2016) *Um processo para utilizar a tecnologia de impressão 3D na construção de Instrumentos Didáticos*. 2016. 226 f. Dissertação. (Mestrado em Educação para Ciências). Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho. Bauru, São Paulo.
- Andrade, M. W. A. S. T. (2014) *Reflexividade e prática educativa: uma análise das contribuições de Rousseau e Schön*. 2014. 100 f. Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica de Goiás, Programa de Mestrado em Educação, Goiânia, Goiás.
- Aspect, A.; Dalibard, J. & Roger, G. (1982). Experimental test of Bell's inequalities using time-varying analyzers. *Physical Review Letters*, v. 49, n. 25, p. 1804-1807, 20 dez. 1982. Disponível em: <https://www.drchinese.com/David/EPR_Bell_Aspect.htm](https://www.drchinese.com/David/EPR_Bell_Aspect.htm)>. Acesso em: 04 mar. 2025.
- Atkins, P. & Paula, J. (2018). *Físico-Química*. 10. ed. Rio de Janeiro: LTC.
- Blikstein, P.; Valente, J. A. & Moura, É. M. (2020). Educação maker: onde está o currículo? *Revista e-Curriculum*, 18(2), 523-544.
- Borges, M. F. (2016). Fabricação digital no Brasil e as possibilidades de mudança de paradigma no setor da construção civil. *Ambiente Construído*, 16(4), 79-91.
- Brown, T. (2019). *Change by design: how design thinking transforms organizations and inspires innovation*. Harper Business.
- Caruso, F. & Oguri, V. (2016). *Física Moderna: Origens e Fundamentos Quânticos*. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC.
- Eisberg, R. M. (1979). *Fundamentos da Física Moderna*. Rio de Janeiro: Guanabara Dois.
- Gleiser, M. (2008). *Mundos invisíveis*. Texto de apoio Frederico Neves. São Paulo: Globo.
- Hewitt, P. G. (2002). *Física conceitual*. Trad. Trieste Freire Ricci e Maria Helena Gravina. 9 ed. Porto Alegre: Bookman.
- Hoernig, A. F.; Massoni, N. T. & Hadjimichef, D. (2021). Física Quântica na Escola Básica: investigações para a promoção de uma Aprendizagem Conceitual, Histórica e Epistemológica. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 43, p. e20210044.
- HOHEMBERGER, D. A. *Guia Didático do Design Thinking: uma metodologia ativa para estimular a criatividade, a inovação e o empreendedorismo em sala de aula*. Produto Educacional. 36f. Mestrado Profissional em Educação Profissional e Tecnológica. Instituto Federal de Farroupilha (IFFAR). Jaguaribe, 2020.
- Lima, L. P. F.; Lima, G. P. F.; Braga, F. L. P.; Menezes, D. B. & Vasconcelos, F. H. L. (2024). O design thinking e a fabricação em 3D de experimentos físicos. *Revista Foco*, 17(2) e4489-e4489.
- Marini, E. (2019). Entenda o que é o Movimento Maker e como ele chegou à educação. *Revista Educação*, 255. Disponível em: <<https://revistaeducacao.com.br/2019/02/22/movimento-maker-educacao>>. Acesso em: 04 março 2025.

Moreira, M. A. (2002). A teoria dos campos conceituais de Vergnaud, o ensino de ciências e a pesquisa nesta área. *Investigações em ensino de ciências*. Porto Alegre, 7(1), 7-29.

Porto, C. M. (2013). O atomismo grego e a formação do pensamento físico moderno. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 35, 1-11.

Santos, D. O. & Souza, J. C. S. (2023). *Design thinking* na Educação. *Revista Educação Pública*, Rio de Janeiro, 23(21). Disponível em: <<https://educacaopublica.cecierj.edu.br/artigos/23/21/design-thinking-na-educacao>>. Acesso em: 04 mar. 2025.

Sociedade Brasileira de Física. (2024). *ONU declara 2025 Ano Internacional da Ciência e Tecnologia Quânticas*. Sociedade Brasileira de Física, São Paulo. Disponível em: <<https://www.sbfisica.org.br/v1/sbf/onu-declara-2025-ano-internacional-da-ciencia-e-tecnologia-quanticas/>>. Acesso em: 2 mar. 2025.

Vergnaud, G. (1982). A classification of cognitive tasks and operations of thought involved in addition and subtraction problems. In: Carpenter, T.; Moser, J. & Romberg, T. *Addition and subtraction. A cognitive perspective*. Hillsdale, N. J.: Lawrence Erlbaum.

Vergnaud, G. (1983). Quelques problèmes théoriques de la didactique a propos d'un exemple: les structures additives. *Atelier International d'Eté: Recherche en Didactique de la Physique*, 26.

Vergnaud, G. (1990). Epistemology and psychology of mathematics education. In: Nesher, P. & Kilpatrick, J. (Eds.). *Mathematics and cognition: A research synthesis by International Group for the Psychology of Mathematics Education*. Cambridge: Cambridge University Press.

Vergnaud, G. (1993). Teoria dos campos conceituais. In: Nasser, L. (Org.). *Anais do 1º Seminário Internacional de Educação Matemática do Rio de Janeiro*. 1-26. Rio de Janeiro.

Vergnaud, G. (1996a). Education, the best portion of Piaget's heritage. *Swiss Journal of Psychology*. 55 (2-3), 112-118.

Vergnaud, G. (1996b). Algunas ideas fundamentales de Piaget em torno a la didáctica. *Perspectivas*, 26(10), 195-207.

Vergnaud, G. (1997). The nature of mathematical concepts. In: Nunes, T. & Bryant, P. (Eds.). *Learning and Teaching Mathematics: An International Perspective*. Hove (East Sussex): Psychology Press.

Young, H. D. & Freedman, R. A. (2016). *Sears e Zemansky Física IV: ótica e física moderna*. 14. ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil.