

**MNPEF**  
Mestrado Nacional  
Profissional em  
Ensino de Física

**MNPEF** Mestrado Nacional  
Profissional em  
Ensino de Física  
Polo **ufscar** Sorocaba



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS**

CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIAS PARA A SUSTENTABILIDADE

DEPARTAMENTO DE FÍSICA, QUÍMICA E MATEMÁTICA

**INTRODUÇÃO DE TÓPICOS DE FÍSICA TÉRMICA E  
CRISTALOGRAFIA NO ENSINO MÉDIO  
UTILIZANDO UM SIMULADOR MECÂNICO**

**WESLEY MOURA BORACCHI CRISTINO**

**ORIENTADOR: PROF. DR. JAMES ALVES DE SOUZA**

Sorocaba - SP  
Fevereiro de 2022

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS**  
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIAS PARA A SUSTENTABILIDADE  
DEPARTAMENTO DE FÍSICA, QUÍMICA E MATEMÁTICA

**INTRODUÇÃO DE TÓPICOS DE FÍSICA TÉRMICA E  
CRISTALOGRAFIA NO ENSINO MÉDIO  
UTILIZANDO UM SIMULADOR MECÂNICO**

**WESLEY MOURA BORACCHI CRISTINO**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação de Mestrado Profissional em Ensino de Física (PROFIS-So) da Universidade Federal de São Carlos, *campus* Sorocaba, no Curso de Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física (MNPEF), para obtenção do título de Mestre em Ensino de Física.

Área de concentração: Física no Ensino Médio.  
Orientador: Prof. Dr. James Alves de Souza.

Sorocaba - SP  
Fevereiro de 2022

Cristino, Wesley Moura Boracchi

Introdução de tópicos de física térmica e cristalografia  
no ensino médio utilizando um simulador mecânico /  
Wesley Moura Boracchi Cristino -- 2022.  
178f.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de São  
Carlos, campus Sorocaba, Sorocaba  
Orientador (a): James Alves de Souza  
Banca Examinadora: Rafael Henriques Longaresi, Fábio  
Luis Zabotto, Alexandre Cacheffo  
Bibliografia

1. Simulador mecânico. 2. Cristalografia. 3. Física  
térmica. I. Cristino, Wesley Moura Boracchi. II. Título.

Ficha catalográfica desenvolvida pela Secretaria Geral de Informática  
(SIn)

DADOS FORNECIDOS PELO AUTOR

Bibliotecário responsável: Maria Aparecida de Lourdes Mariano -  
CRB/8 6979



# UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

Centro de Ciências e Tecnologias Para a Sustentabilidade  
Programa de Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física

---

## Folha de Aprovação

---

Defesa de Dissertação de Mestrado do candidato Wesley Moura Boracchi Cristino, realizada em 22/02/2022.

### Comissão Julgadora:

Prof. Dr. James Alves de Souza (UFSCar)

Prof. Dr. Rafael Henriques Longaresi (UFSCar)

Prof. Dr. Fabio Luis Zabotto (UFSCar)

Prof. Dr. Alexandre Cacheffo (UFU)

O Relatório de Defesa assinado pelos membros da Comissão Julgadora encontra-se arquivado junto ao Programa de Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física.

## **DEDICATÓRIA**

*Dedico esta dissertação ao senhor Deus e à minha família que me apoiou e me incentivou ao longo de minha formação. À minha mãe Noemia Costa Moura por todo seu amor e carinho. Aos meus queridos amigos. Á minha futura, com amor.*

# AGRADECIMENTO

Agradeço a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo fomento ao Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física (MNPEF) durante todo o período de formação.

Aos meus pais, Noemia Costa Moura e Hugo Boracchi Cristino, por esses anos de dedicação e incentivo acadêmico.

Ao meu irmão Willian de Moura Boracchi e meu amigo Erick da Silva Otávio por seus apoios, motivações e conselhos valiosos.

Aos meus amigos de turma deste curso de mestrado, pelas conversas proveitosas, trabalhos realizados juntos e pelos momentos alegres que compartilhamos ao longo destes anos.

Agradeço com carinho aos meus professores do PROFIS-So, que com dedicação e empenho, nos transmitiram preciosos conhecimentos que nos permitiram evoluir pessoal e profissionalmente.

Ao meu orientador, Prof. Dr. James Alves de Souza, que desde os anos da graduação tem sido um grande incentivador de minha progressão acadêmica. Por suas valiosas contribuições, correções e liberdade de inovação que foram essenciais em meu desenvolvimento profissional. Por sua amizade e companheirismo ao longo destes tantos anos, meus sinceros e profundos agradecimentos.

*“A mente que se abre a uma nova ideia, jamais voltará ao seu tamanho original.”*

**ALBERT EINSTEIN**

# RESUMO

CRISTINO, Wesley M. B. Introdução de tópicos de Física Térmica e Cristalografia no ensino médio utilizando um simulador mecânico. 2022. Dissertação (Mestrado em Ensino de Física) – Universidade Federal de São Carlos, *campus* Sorocaba, Sorocaba, 2022.

Nas últimas décadas a pesquisa em ensino de Física tem apontado para dificuldades e obstáculos que estudantes e professores encontram para a concretização da aprendizagem de Física. Em resposta a isso, uma grande variedade de métodos, modelos, softwares, simulações computacionais, experimentos, entre outros, têm sido colocados à disposição dos mesmos na tentativa de amenizar o problema. Neste trabalho apresentamos o desenvolvimento e aplicação de uma Unidade de Ensino Potencialmente Significativa (UEPS) com o objetivo de introduzir conceitos de Física Térmica e Cristalografia no Ensino Médio. Nossa UEPS é fundamentada na construção de um simulador mecânico motorizado, elaborado para representar átomos de uma rede cristalina de um sólido. Este dispositivo foi concebido principalmente para facilitar a abstração sobre o movimento térmico da rede cristalina. Nossa proposta é baseada na Teoria da Aprendizagem Significativa de David Ausubel, cujos elementos mais importantes são os conhecimentos prévios dos estudantes e a predisposição dos mesmos para aprender. Nosso produto educacional consiste de uma sequência didática elaborada na forma de apostilas (cadernos) para o professor e o aluno, tutoriais para a construção do simulador mecânico e um dispositivo de medição, denominado por nós de “vibrômetro”, e um site para a disponibilização do material elaborado e para estabelecer melhor o contato entre o professor e os alunos remotamente através de fóruns, discussões e para a entrega das atividades propostas. O Caderno do Professor foi elaborado com as respostas dos problemas propostos, além de recomendações e sugestões pedagógicas para uso e desenvolvimento das atividades em sala de aula. O Caderno do Aluno é uma versão simplificada do primeiro. Ambos são elaborados no formato de *e-book* para facilitar a impressão e utilização individualizada. Nossa UEPS foi aplicada em uma turma do segundo ano do Ensino Médio de uma escola privada do município de São Roque, São Paulo. Devido à pandemia de COVID-19, a aplicação do produto foi realizada quase totalmente na modalidade remota. Nossa proposta foi muito bem recebida em sala de aula pelos alunos, que se engajaram de maneira bastante satisfatória no desenvolvimento das atividades, possibilitando uma melhor abstração sobre o comportamento microscópico de sistemas sólidos.

**Palavras-chave:** Simulador Mecânico. Cristalografia. Física Térmica. Ensino de Física. Ensino Médio.



# ABSTRACT

CRISTINO, Wesley M. B. Introducing concepts of Thermal Physics and Crystallography in high school using a mechanical simulator. 2022. Dissertation (Master in Physics Teaching) - Federal University of São Carlos, Sorocaba *campus*, Sorocaba, 2022.

In the last decades, physics education research has shed light on the difficulties and obstacles that students and teachers encounter in learning physics. In response, a wide variety of new methods and models of physics instruction, software, computer simulations, experiments, among others, have become available as a remedial course to the problem. In this work we present the development and application of a Potentially Meaningful Teaching Unit (PMTU), aiming to introduce Thermal Physics and Crystallography concepts in high school. Our PMTU is based on the construction of a motorized mechanical simulator designed to represent atoms from a crystal lattice of a solid material. The device was primarily designed to facilitate the abstraction on the thermal motion of a crystal lattice. Our proposal is based on David Ausubel's theory of meaningful learning, whose most important elements are the students' prior knowledge and their predisposition to learn. Our educational product consists of a didactic sequence elaborated in the form of handouts (ebook) for the teacher and for the student, tutorials for the construction of the mechanical simulator and a measuring device, named as *vibrometer*, and a website for the availability of the elaborated material and also to establish a centralized remote channel of communication between the teacher and the students through forums, discussions and for delivering the proposed activities. The Teacher Ebook was prepared with the answers to the proposed problems, as well as pedagogical recommendations and suggestions for developing the activities in the classroom. The Student Ebook is a simplified version of that. The ebook format is established to facilitate printing and to individualize their use. Our PMTU was applied to students of a high school class, at a private school in the city of São Roque, municipality of Sao Paulo, Brazil. Owing the COVID-19 pandemic, the application of the product was carried out almost entirely online. Our proposal was hugely successful in the classroom. The students engaged in a very satisfactory way in the development of the activities, allowing a better abstraction on the microscopic behavior of solid systems.

**Keywords:** Mechanical Simulator. Crystallography. Thermal Physics. Physics teaching. High school.

# LISTA DE FIGURAS

- Figura 3.1** – Em (a) os corpos A, B e C estão isolados termicamente através de paredes adiabáticas (parte hachurada). Em (b), os corpos A e B estão isolados termicamente, mas estão em equilíbrio térmico entre si através do corpo C. Neste caso A e B estão em contato com C através de paredes diatérmicas. .... 24
- Figura 3.2** – Sólidos formados por sílica ( $\text{SiO}_2$ ). Em (a) é mostrada esquematicamente de forma plana a estrutura cristalina do quartzo. Em (b) é mostrada a estrutura amorfa do vidro. Em ambas as ilustrações os átomos de silício são representados pelas esferas pretas e os átomos de oxigênio pelas esferas brancas. .... 26
- Figura 3.3** – Ilustração da estrutura cristalina do sólido iônico, cloreto de sódio ( $\text{NaCl}$ ). Cada átomo de sódio (em amarelo) é rodeado por seis átomos de cloro (em verde), da mesma forma que cada átomo de cloro é rodeado por seis átomos de sódio. .... 27
- Figura 3.4** – Ilustração da estrutura cristalina dos sólidos metálicos. As linhas curvilíneas representam as trajetórias dos elétrons livres do material. .... 28
- Figura 3.5** – Potencial harmônico, dado pela equação (3.2), em função da posição  $x$ . A posição de equilíbrio estável do sistema  $x = x_0$  é caracterizada pelo potencial  $V_0 = kx_0^2/2$ . .... 29
- Figura 3.6** – Potencial anarmônico (curva sólida vermelha), dado pela equação (3.5), em comparação com o potencial harmônico (curva azul tracejada), obtido através da equação (3.2). .... 31
- Figura 3.7** – Potencial de pares de Lennard-Jones descrito pela equação (3.6), mostrando a distância de equilíbrio dada pelo mínimo do potencial, a energia de dissociação  $U' = -\varepsilon$  da molécula diatômica, representada por duas esferas, e a distância mínima  $\sigma$  caracterizada por  $U' = 0$ . A área sombreada corresponde a região de repulsão e a área restante a de atração do potencial. A energia negativa significa que o sistema está em um estado ligado. .... 32
- Figura 3.8** – Redes de Bravais em duas dimensões, sendo (a) rede oblíqua, (b) rede retangular, (c) rede retangular de face centrada, (d) rede hexagonal e (e) rede quadrada. Em cada rede as relações dos comprimentos dos vetores  $a$  e  $b$  e os ângulos entre eles estão especificadas. .... 39
- Figura 3.9** – Estrutura hexagonal do grafeno. .... 39
- Figura 3.10** – Estruturas cristalinas de sólidos bidimensionais. Em (a) é mostrada a estrutura semelhante tanto do  $\beta$ -siliceno quanto do  $\beta$ -germaneno. Em (b) é representada a estrutura do nitreto de boro hexagonal (h-BN). Em (c) é mostrada a estrutura de um TMC. Esferas douradas representam átomos de silício e de germânio, em rosa

de boro, em azul de metais, em amarelo calcogenetos e carbono em cinza. As células cristalinas são indicadas em vermelho. ....	39
<b>Figura 3.11</b> – Representação dos eixos e dos respectivos ângulos que formam entre si no espaço tridimensional. Os módulos de $a$ , $b$ e $c$ são chamados parâmetros de rede. ....	40
<b>Figura 3.12</b> – As catorze redes de Bravais em três dimensões. Estas são agrupadas em sete sistemas cristalinos (cúbico, tetragonal, ortorrômbico, hexagonal, monoclínica, triclínica e trigonal. ....	41
<b>Figura 4.1</b> – Simulador mecânico construído para introdução de conceitos de física térmica e cristalografia. A rede cristalina simulada contém 63 átomos representados por bolinhas de isopor ligadas por elásticos, para representar as interações entre pares. A estrutura do sistema é cúbica de face centrada. O painel de controle contendo dois botões é mostrado na parte inferior à esquerda e é utilizado para estimular a esfera (em preto) mais próxima deste mesmo painel. ....	49
<b>Figura 4.2</b> – Dispositivo desenvolvido e construído para quantificar a amplitude de oscilação das esferas na rede simulada, chamado de vibrômetro. Em (a) é mostrado um vibrômetro completo acoplado em sua base. Em (b) é ilustrado o dispositivo aumentado. À medida que a vareta vertical se movimenta (seta vertical), um filete de papel no interior do mesmo se enrola (desenrola) em um disco, fazendo girar o ponteiro (seta curvada). ....	51
<b>Figura 4.3</b> – Página inicial do site de apoio intitulado “ <i>Movimento Térmico em Redes Cristalinas</i> ”. Este site faz parte de nosso produto educacional.....	53
<b>Figura 4.4</b> – Exemplos de mapas conceituais elaborados pelos estudantes. ....	56
<b>Figura 4.5</b> – Exemplo de resposta formalizada por um dos grupos de alunos, referente às questões apresentadas no primeiro momento da Situação 1 da Atividade 4.....	63
<b>Figura 4.6</b> – Exemplo de resposta formalizada por um dos grupos de alunos, referente às questões apresentadas no segundo momento da Situação 1 da Atividade 4. ....	64
<b>Figura 4.7</b> – Reprodução dos gráficos dos potenciais de Lennard-Jones, à esquerda, e harmônico, à direita, e questões relacionadas apresentadas na página 10 do Caderno do Aluno. ....	66
<b>Figura 4.8</b> – Ilustração da estrutura cristalina do simulador mecânico mostrando a identificação numérica das esferas situadas nas arestas das células representadas (vermelho) para a aferição de suas respectivas posições, conforme apresentado na página 13 do Caderno do Aluno. ....	68
<b>Figura 4.9</b> – Escala de cores adotada para a representação da amplitude de oscilação dos átomos da rede cristalina simulada. Cada cor é estabelecida em intervalos de oscilação de 0,6 mm, conforme apresentado na página 15 do Caderno do Aluno. ....	69
<b>Figura 4.10</b> – Escala de cores adotada para a representação da amplitude de oscilação dos átomos da rede cristalina simulada. Cada cor é estabelecida em intervalos de	

oscilação de 0,6 mm, conforme apresentado na página 15 do Caderno do Aluno. .....	70
<b>Figura 4.11</b> – Gráfico da intensidade de oscilação $I$ das esferas 1, 14 e 27 da rede simulada em função da distância $d$ das mesmas em relação à esfera primária. A curva pontilhada descreve o ajuste de uma função quadrática do tipo $I = 0,0077 d^2 - 0,3982 d + 5$ . .....	72
<b>Figura 4.12</b> – Gráfico da intensidade de oscilação $I$ das esferas 1, 14 e 27 da rede simulada em função da distância $d$ das mesmas em relação à esfera primária. A curva sólida descreve o ajuste de uma função exponencial negativa dada por $I = 3,8159 e^{-0,083d}$ . .....	73
<b>Figura 4.13</b> – Gráfico da intensidade de oscilação $I$ das esferas 1, 14 e 27 da rede simulada em função da distância $d$ das mesmas em relação à esfera primária. A curva sólida descreve o ajuste de uma função exponencial negativa dada por $I = 4,71834e^{-0,01657d} + 0,28166$ . .....	74
<b>Figura 4.14</b> – Ilustração referente à questão 1, mostrando três pregos A, B e C presos a uma haste metálica com parafina. A haste é aquecida em uma das extremidades e o processo de condução térmica faz com que os pregos caiam de C para A à medida que a parafina derrete. ....	75
<b>Figura 4.15</b> – Exemplos de respostas dos estudantes referente à questão 1 da atividade 6. ...	76
<b>Figura 4.16</b> – Exemplos de respostas dos estudantes referente à questão 2 da atividade 6. ...	77
<b>Figura 4.17</b> – Exemplos de respostas dos estudantes referente à questão 3 da atividade 6. ...	78
<b>Figura 4.18</b> – Exemplos de respostas dos estudantes referente à questão 4 da atividade 6. ...	79
<b>Figura 4.19</b> – Exemplos de respostas dos estudantes referente à questão 5 da atividade 6. ...	80

# LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 4.1</b> – Descrição geral das atividades propostas nos Cadernos do Professor e do Aluno. .....	48
<b>Tabela 4.2</b> – Descrição geral das atividades propostas nos Cadernos do Professor e do Aluno. .....	52
<b>Tabela 4.3</b> – Valores das medidas das distâncias e das amplitudes de oscilação das esferas das arestas das células que configuram a rede cristalina representada no simulador mecânico.....	69
<b>Tabela 4.4</b> – Porcentagem de acertos das questões referentes à avaliação final da nossa UEPS apresentada na atividade 6.....	81

# LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

**UEPS** – *Unidade de Ensino Potencialmente Significativa.*

**UFSCar** – *Universidade Federal de São Carlos.*

**MNPEF** – *Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física.*

**PROFIS-So** – *Programa de Mestrado Profissional em Ensino de Física da Universidade Federal de São Carlos, campus Sorocaba.*

**PSSC** – *Physical Science Study Committee.*

**S.I.** – *Sistema Internacional de Unidades.*

# SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
1.1 MOTIVAÇÃO E OBJETIVOS .....	3
1.2 JUSTIFICATIVA .....	4
1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO .....	5
<b>CAPÍTULO 2 - REFERENCIAL TEÓRICO EM ENSINO E APRENDIZAGEM</b> .....	<b>6</b>
2.1 A TEORIA DA APRENDIZAGEM SIGNIFICATIVA DE DAVID P. AUSUBEL .....	6
2.2 REFERENCIAL TEÓRICO EM ENSINO .....	10
<b>2.2.1 A experimentação no ensino de Física</b> .....	<b>10</b>
<b>2.2.2 Tipos de atividades experimentais</b> .....	<b>16</b>
<b>2.2.3 Simulações experimentais no ensino de Física</b> .....	<b>18</b>
<b>CAPÍTULO 3 - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA EM FÍSICA</b> .....	<b>20</b>
3.1 FÍSICA TÉRMICA .....	20
<b>3.1.1 Calor e temperatura</b> .....	<b>22</b>
<b>3.1.2 Estados da matéria</b> .....	<b>25</b>
<b>3.1.3 Condução térmica</b> .....	<b>33</b>
3.2 CRISTALOGRAFIA .....	35
<b>3.2.1 Sólidos Cristalinos</b> .....	<b>36</b>
<b>3.2.2 Células Cristalinas e Redes de Bravais</b> .....	<b>38</b>
<b>CAPÍTULO 4 - DESCRIÇÃO E APLICAÇÃO DO PRODUTO EDUCACIONAL</b> .....	<b>43</b>
4.1 DESCRIÇÃO GERAL DO PRODUTO EDUCACIONAL.....	43
4.2 DESCRIÇÃO DO CADERNO DO PROFESSOR E DO ALUNO .....	45
4.3 DESCRIÇÃO DO SIMULADOR MECÂNICO E DO VIBRÔMETRO .....	49
4.4 DESCRIÇÃO DO SITE .....	52
4.5 APLICAÇÃO DO PRODUTO EDUCACIONAL.....	54
<b>4.5.1 Atividade 1</b> .....	<b>55</b>
<b>4.5.2 Atividade 2</b> .....	<b>57</b>
<b>4.5.3 Atividade 3</b> .....	<b>61</b>
<b>4.5.4 Atividade 4</b> .....	<b>62</b>

<b>4.5.5 Atividade 5 .....</b>	<b>67</b>
<b>4.5.6 Atividade 6 .....</b>	<b>75</b>
<b>CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>82</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>85</b>
<b>APÊNDICE: PRODUTO EDUCACIONAL.....</b>	<b>90</b>



# Capítulo 1

## INTRODUÇÃO

---

A Física é uma vasta área do conhecimento humano acerca da natureza, buscando a compreensão da constituição e comportamento das menores partículas da matéria, como os átomos e seus constituintes, até as maiores estruturas do universo, como galáxias e aglomerados galácticos. Apesar de constituir-se em um campo amplo e muito rico, não obstante, o ensino de Física na educação básica enfrenta muitos desafios que perpassam por diversos problemas, como a precariedade das condições de trabalho dos professores e a má formação acadêmica de uma parcela dos docentes (MOREIRA, 2017).

Vários esforços têm sido empreendidos para enfrentar os desafios do ensino da Física escolar ao longo das últimas décadas, como reformulações curriculares, implementação de materiais e metodologias novas, a exemplo do projeto de ensino *Physical Science Study Committee* (PSSC) (QUEIROZ; HOSSOUME, 2016), criado nos Estados Unidos e introduzido no Brasil na década de 1960. Outro esforço para a melhoria do ensino de Física são as simulações virtuais de fenômenos físicos e de experimentos surgidos com o advento da computação e da internet.

O ensino da Física dispõe de variadas estratégias e metodologias. Por ser uma ciência natural, a metodologia da experimentação possui efetiva importância e reconhecimento entre os educadores (MOREIRA, *et al.* 2006). Aliado às potencialidades da experimentação, as simulações mecânicas e computacionais possuem a capacidade de ilustrar fenômenos cujas escalas de tamanho e tempo são imperceptíveis por nossos sentidos. Além disso, estas podem constituir-se de modelos simplificados que facilitam a compreensão de diversos fenômenos da natureza.

A Física Térmica muitas vezes requer grande necessidade de abstração, uma vez que lida com sistemas físicos com um número muito elevado de partículas constituintes. O próprio significado microscópico do movimento térmico e do conceito de temperatura exigem certa abstração por parte dos estudantes, uma vez que o primeiro se refere à ação combinada desse grande número de partículas constituintes se movendo caoticamente e o segundo é uma

grandeza termodinâmica diretamente relacionada com a energia cinética destas partículas, caracterizando a intensidade do movimento térmico. Este movimento microscópico das partículas nem sempre é facilmente imaginado pelos alunos, embora seja essencial para a interpretação e entendimento de fenômenos térmicos, elétricos e magnéticos.

O ensino das estruturas e do comportamento microscópico da matéria pode ser beneficiado significativamente através do uso de simulações e construção de modelos representativos. Em relação aos sólidos, a Física do Ensino Médio, geralmente se restringe à descrição da agregação das partículas e de suas relativas baixas agitações em relação aos demais estados da matéria. Neste presente trabalho nos propomos a fornecer, de maneira introdutória, um pouco mais de detalhes sobre a descrição dos sólidos, sobretudo os sólidos cristalinos, fazendo uso de conceitos da cristalografia.

A cristalografia é uma área da Física cuja origem remonta da prática experimental da descrição estrutural de cristais com o uso da difração de raios-X, a partir da segunda década do século XX. A cristalografia mostrou-se uma área abrangente e multidisciplinar, tendo aplicações muito importantes, como o desenvolvimento de microprocessadores utilizados em computadores e dispositivos portáteis, indispensáveis para a sociedade moderna. Dada sua importância, a área da cristalografia permitiu descobrimentos que já renderam 29 prêmios Nobel nas áreas de Física e Química (TORRIANI, 2014). No ensino básico, entretanto, conceitos de cristalografia são pouco explorados, fato evidenciado nos currículos e documentos oficiais.

Neste trabalho discutimos o principal foco de estudo da Física Térmica, dado pelo movimento térmico, através de uma rede cristalina simulada em uma escala aumentada o suficiente para analisar o movimento a olho nu, utilizando um dispositivo mecânico. Este dispositivo foi construído por nós mesmos a partir de materiais de baixo custo e facilmente encontrados no comércio. Além de representar o movimento térmico, nosso dispositivo tem um grande potencial para discutir conceitos como calor, temperatura, dilatação térmica dos sólidos, condução térmica e introduzir conceitos básicos relacionados à cristalografia, como célula unitária, redes de Bravais, as diferentes propriedades dos sólidos decorrentes de diferentes estruturas cristalinas, entre outros. Utilizamos a Teoria da Aprendizagem Significativa de David P. Ausubel como referencial norteador para a preparação da nossa sequência didática para aplicar o produto educacional em sala de aula. Nossa proposta foi aplicada remotamente, devido à pandemia do novo coronavírus, em uma escola particular do município de São Roque e foi muito bem recebida pelos alunos da escola. Nosso produto educacional consiste de um tutorial

detalhado para a montagem do simulador e uma Unidade de Ensino Potencialmente Significativa.

## 1.1 MOTIVAÇÃO E OBJETIVOS

A experiência acadêmica, obtida pelo convívio com outros professores de Física e com os estudantes, nos levou a concluir que o ensino de determinados conceitos de Física Térmica não são de fácil entendimento pelos estudantes, devido à necessidade de abstração com relação ao que ocorre microscopicamente nos sistemas. O tipo de movimento que é estudado em Física Térmica está entre as principais dificuldades, assim como os conceitos de calor e temperatura e a diferença entre estes.

A dificuldade em entender o movimento térmico como um movimento coletivo e aleatório das partículas e o conceito de temperatura, relacionado à intensidade desse movimento, se intensifica principalmente quando trabalhamos apenas o livro texto com os alunos ou o quadro branco, exibindo imagens estáticas.

A principal motivação para a construção de um simulador mecânico foi tentar facilitar a imaginação e a abstração destes fenômenos que ocorrem na escala microscópica. Nossos objetivos específicos com este trabalho são:

1. Facilitar a compreensão dos processos dinâmicos microscópicos da matéria, sobretudo o movimento térmico;
2. Demonstrar de maneira ilustrativa, por meio da observação do experimento simulado, a propagação da energia no sistema sólido através do mecanismo de condução;
3. Introduzir conceitos de cristalografia no Ensino Médio, por meio de transposição didática e modelos simplificados;
4. Demonstrar a diferença nas estruturas microscópicas de sistemas no estado sólido, diferenciando sólidos amorfos de cristalinos, além dos estados líquido e gasoso;
5. Por fim, apresentar uma alternativa de material didático para enriquecer as aulas de Física através de uma simulação mecânica, que permita a experimentação e a manipulação real.

Estes objetivos delinham e definem a finalidade central do produto educacional desenvolvido e apresentado nesta dissertação. Nosso objetivo geral é conceber um material potencialmente significativo na tentativa de promover uma efetiva aprendizagem significativa dos educandos.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

Além do que já foi exposto, a construção de nosso produto educacional justifica-se por este representar uma alternativa ao ensino tradicional, visando a ocorrência da aprendizagem significativa nos alunos acerca dos conceitos de Física Térmica e cristalografia. O produto educacional desenvolvido introduz um tema que não é usualmente abordado no Ensino Médio, que é o estudo das redes cristalinas. Isto pode contribuir para o enriquecimento das aulas de Física e propiciar um aprofundamento acerca do estudo dos materiais, mesmo na educação básica.

A abordagem de conceitos de cristalografia no Ensino Médio revela-se importante, uma vez que muitos avanços tecnológicos baseiam-se neles e podem ser facilmente encontrados e contextualizados a partir do cotidiano dos estudantes. As aplicações da cristalografia permeiam muitas áreas básicas, como a matemática, a química, a geologia, a biologia, as ciências dos materiais e a medicina (TORRIANI, 2014). A introdução da cristalografia e exemplos de suas aplicações no Ensino Médio podem permitir ao professor explorar outras áreas e tornar sua aula interdisciplinar. Exemplos de aplicações cotidianas que o professor pode citar em sala de aula para contextualizar o tema juntamente com o produto educacional são as telas de cristal líquido, facilmente encontradas em calculadoras simples, celulares e televisores. Além disso, a cristalografia abre possibilidades de se estudar posteriormente os minerais, levando os estudantes à compreensão acerca dos minérios e rochas, aprofundando temas também vistos na disciplina escolar de geografia.

Outra vantagem de nosso produto educacional é o fato de que o simulador mecânico permite uma interação real com a analogia representada. Essa interação se dá por meio da tomada de medições com instrumentos reais, o que não é possível realizar em um simulador virtual. Além disso, um simulador mecânico constitui-se como um instrumento didático permanente do laboratório de ciências da escola, sendo um item que pode ser reutilizado diversas vezes com turmas diferentes, não necessitando de computadores ou internet para

funcionar. Esta última vantagem pode ser especialmente proveitosa para utilização em escolas com poucos ou ausência de computadores com internet, como escolas de áreas rurais ou em estado precário de recursos.

### 1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Esta dissertação foi dividida em cinco capítulos, subdivididos em subcapítulos. No Capítulo 2, apresentamos os referenciais teóricos acerca da Teoria da Aprendizagem Significativa de David Ausubel. Neste tópico definimos os conceitos de subsunção, organizador prévio, Unidade de Ensino Potencialmente Significativa (UEPS) e outros importantes tópicos desta teoria de aprendizagem. Neste capítulo apresentamos também os referenciais acerca da metodologia da experimentação, onde explanamos de maneira histórica como esta metodologia se desenvolveu no ensino da Física no Brasil. Adicionalmente, apresentamos os tipos de experimentos existentes e suas diferentes concepções, e finalizamos com a apresentação do referencial teórico acerca do uso de simulações no ensino da Física.

No Capítulo 3, apresentamos o referencial teórico sobre Física Térmica, onde definimos movimento térmico, calor e temperatura, a Lei Zero da Termodinâmica, estados da matéria, o conceito de condução térmica, entre outros. Abordamos também um pouco sobre a área da cristalografia, onde apresentamos de maneira introdutória o conceito de sólidos cristalinos, sistemas cristalinos e redes de Bravais.

O Capítulo 4 é destinado à apresentação do produto educacional, a metodologia empregada para a concepção do produto e uma breve explicação acerca das atividades elaboradas para constituir-se em uma UEPS.

Por fim, o capítulo 5 é destinado à apresentação da conclusão referente aos resultados obtidos durante a aplicação da nossa proposta em sala de aula. Estes sugerem que nossa UEPS tem um excelente potencial para a discussão e melhor entendimento dos tópicos propostos.

# Capítulo 2

## REFERENCIAL TEÓRICO EM ENSINO E APRENDIZAGEM

---

---

Neste capítulo são abordados alguns aspectos teóricos sobre a Teoria da Aprendizagem Significativa de David P. Ausubel, cujos fundamentos nortearam a construção de nosso produto educacional. A sequência de atividades que constituem o material didático que produzimos tem como pilares mais importantes o conhecimento prévio dos estudantes e a predisposição que possuem para aprender.

Nosso material didático produzido elenca as atividades de modo a progredir com o aprofundamento dos conteúdos selecionados, culminando por fim, na utilização da parte experimental do simulador mecânico que construímos. A metodologia da experimentação é uma das principais estratégias empregadas no ensino de Física e foi adotada na principal atividade de nosso material didático.

Neste capítulo apresentamos também uma revisão teórica relacionada à experimentação e ao uso de simulações no ensino da Física.

### 2.1 A TEORIA DA APRENDIZAGEM SIGNIFICATIVA DE DAVID P. AUSUBEL

A Teoria da Aprendizagem Significativa foi desenvolvida pelo psicólogo estadunidense David Paul Ausubel. Nascido em 1918, filho de imigrantes judeus, Ausubel sofreu uma experiência negativa em sua vida escolar. Formou-se em medicina psiquiátrica, mas voltou sua atenção à psicologia educacional, lançando sua teoria em 1963, em pleno predomínio das

teorias behavioristas (FERNANDES, 2011). Ausubel faleceu em 2008, deixando o que se tornou uma das mais conhecidas teorias cognitivistas do século XX. A Teoria da Aprendizagem Significativa de Ausubel se baseia na obtenção de novos conhecimentos aos quais são conferidos novos significados pelo aprendiz, ou nas palavras de Ausubel: “A ‘aprendizagem significativa’, por definição, envolve a aquisição de novos significados. Estes são, por sua vez os produtos da aprendizagem significativa. Ou seja, o surgimento de novos significados no aprendiz reflete a ação e a finalização anteriores do processo de aprendizagem significativa.” (AUSUBEL, 2003, p.71).

Para adquirir novos conhecimentos, de acordo com Ausubel, é necessário que estes se apoiem nas ideias já existentes na estrutura cognitiva do aprendiz. Estes conhecimentos preexistentes, já estabelecidos, são chamados de subsunçores. Os subsunçores são fundamentais para a ocorrência da aprendizagem significativa, pois servem de âncoras nas quais os novos conhecimentos são alicerçados na estrutura cognitiva. Deste modo, os subsunçores não são estáticos, mas vão sofrendo modificações, enriquecendo-se e ampliando-se à medida que novos significados são incorporados através dos novos conhecimentos adquiridos (MOREIRA, 1999). A esse processo, Ausubel chama de ancoragem (AUSUBEL, 2003).

Por outro lado, a existência de subsunçores não garante que a ideia existente esteja cientificamente correta (MOREIRA, 2010), mas apenas que está presente de forma estável na estrutura cognitiva mediante a um significado adquirido pelo aprendente. Para a aquisição de novos conhecimentos nem sempre há subsunçores adequados na estrutura cognitiva do aprendiz. A inexistência de subsunçores relevantes ou a presença de subsunçores deficientes traz a necessidade de materiais de aprendizagem que os construam para servirem de âncora aos outros novos conhecimentos. Esses materiais de aprendizagem, que podem ser um experimento, vídeo, simulação, entre outros, são chamados de organizadores prévios (MOREIRA, p. 11, 2010).

A teoria da aprendizagem significativa assume que há três tipos de aprendizagem (AUSUBEL, 2003). A primeira, e mais comum, a aprendizagem subordinada, é aquela em que o novo conhecimento é subordinado por um subsunçor bem estabelecido na estrutura cognitiva. A segunda, a aprendizagem superordenada, é aquela em que o novo conhecimento subordina o subsunçor, geralmente isso ocorre quando a se aprende um conceito mais universal que abrange os subsunçores, como o aprendizado de uma lei física geral, por exemplo a conservação da energia, que subordina todos os subsunçores sobre energia (MOREIRA, 2010). Por último, temos a aprendizagem combinatória, onde a interrelação não se dá com subsunçores específicos, mas com o campo mais amplo de conhecimentos dos aprendizes.

Para Ausubel, a aprendizagem significativa faz parte de outro processo mais amplo chamado assimilação (AUSUBEL, 2003, p. 8). Esse processo de assimilação na fase da aprendizagem significativa se dá em três fases. A primeira fase é o da ancoragem seletiva, onde os conhecimentos prévios relevantes são selecionados para se ligarem àquele novo conhecimento. A segunda fase refere-se à construção do significado que surge da interação entre o conhecimento recém-chegado ao conhecimento prévio. A terceira fase refere-se à ligação propriamente dita destes novos significados aos conhecimentos prévios no intervalo de memória, o que o autor chama de retenção. Esses processos, de acordo com Ausubel (2003), ocorrem na estrutura cognitiva do aprendiz quando há aprendizagem significativa.

Outro aspecto a se considerar é que o conhecimento aprendido significativamente também está sujeito ao esquecimento, como afirma Moreira (2010): “Portanto, aprendizagem significativa não é, como se possa pensar, aquela que o indivíduo nunca esquece. A assimilação obliteradora é uma continuidade natural da aprendizagem significativa, porém não é um esquecimento total” (MOREIRA, p. 4, 2010).

O esquecimento também pode ocorrer e faz parte do processo da aprendizagem significativa, o que não quer dizer que o aprendiz perdeu o conhecimento por completo, pois o significado não é perdido, e assim aquele conhecimento pode ser rapidamente resgatado mediante sua rerepresentação ao aprendiz (MOREIRA, 2010).

A aprendizagem significativa opõe-se ao que Ausubel (2003) chama de aprendizagem mecânica. Esta por sua vez é aquela que se estabelece via memorização em que os conhecimentos novos não se vinculam aos subsunçores, isto é, as relações são arbitrárias, o que resulta em esquecimento mais acelerado. Em contraposição, a aprendizagem significativa é não literal: o estudante pode reproduzir o conhecimento de várias formas diferentes, sem necessitar da simples decoração.

De acordo com Ausubel (2003), a aprendizagem significativa se dá sobretudo de modo receptivo. Este tipo de aprendizagem receptiva é aquele em que o conhecimento é exposto ao aprendiz de modo praticamente finalizado e pronto. De fato, em sala de aula é o tipo principal de aprendizagem que se estabelece, parte disso pode dever-se ao extenso conteúdo a ser ensinado que estão presentes nos currículos oficiais, as aulas expositivas predominam, sobretudo no ensino tradicional. Entretanto mesmo neste caso, Ausubel destaca que a aprendizagem receptiva é ativa, isto é, o aprendiz atua ativamente sobre o material para construir sua aprendizagem (AUSUBEL, p. 6, 2003). Essa atividade do aprendiz se expressa na análise cognitiva que realiza para selecionar seus conhecimentos prévios relevantes,



reconciliação entre as ideias novas com as pré-existentes, reformulação do material de aprendizagem, mediante a construção de novos significados, e de seu próprio vocabulário.

Para Ausubel, como vimos, a principal variável da aprendizagem significativa é o conhecimento prévio dos aprendizes. Isto destaca o papel que o estudante tem sobre seu próprio aprendizado. Existe necessariamente a predisposição do aluno a aprender para haver aprendizagem significativa (MOREIRA, p. 8, 2010). Essa predisposição está relacionada a existência ou não de subsunçores adequados na estrutura cognitiva do aprendiz. Outra dependência para a ocorrência da aprendizagem significativa é a necessidade do material ser potencialmente significativo. Ausubel (2003) não confere significado ao material de aprendizagem, pois os significados estão nas pessoas. Logo o material apenas pode ser potencialmente significativo, isto é, ele deve se relacionar com os conhecimentos prévios dos alunos para lhe conferir sentido. Em outras palavras, o material deve ser não-literal e não arbitrário.

É interessante ressaltar que o ambiente escolar da sala de aula é um espaço onde convivem diferentes sujeitos, cada um com seus próprios subsunçores, o que pode resultar em diferentes significados construídos acerca dos mesmos materiais potencialmente significativos. Daí a importância da implementação de organizadores prévios para promover subsunçores adequados para a aplicação de um determinado material potencialmente significativo que seja utilizado para todos na abordagem de um determinado assunto.

Há também na teoria ausubeliana, em contraposição à aprendizagem receptiva, a aprendizagem por descoberta, condição em que o aprendiz primeiro descobre o que vai aprender, para depois efetuar-la. Mas, para a ocorrência da aprendizagem significativa todos os outros aspectos, como a existência de subsunçores relevantes e adequados no aprendiz e a existência de material potencialmente significativo devem ser igualmente considerados (AUSUBEL, p. 6, 2003). Partindo destas considerações, promover uma sequência de atividades que visem a aprendizagem significativa é uma proposta interessante e tem aplicação prática em sala de aula. Essa sequência na teoria ausubeliana é a Unidade de Ensino Potencialmente Significativa (UEPS) (MOREIRA, 2011).

Para a concepção desta UEPS deve-se considerar sumariamente os conhecimentos prévios dos alunos. Dessa forma é desejável, portanto, que a aplicação desta proposta seja iniciada com uma atividade de levantamento de ideias prévias. A identificação de subsunçores gerais dos alunos será o ponto de partida para a implementação de novos conhecimentos acerca da Física Térmica. Conhecendo-se os subsunçores gerais é necessário adequá-los aos próximos conhecimentos a serem considerados, de tal forma que o aparelho simulador proposto pode ser

útil como recurso para detalhar e ilustrar os novos conceitos. Nas atividades experimentais desenvolvidas com o simulador consideramos a aprendizagem por descoberta. Sob a ótica ausubeliana, o aparelho simulador nos permitiu observar tanto a ocorrência da diferenciação progressiva, quanto da reconciliação integrativa, constituindo-se como um material potencialmente significativo.

## 2.2 REFERENCIAL TEÓRICO EM ENSINO

Neste subcapítulo são apresentados os referenciais teóricos acerca da experimentação enquanto estratégia de ensino de Física, os tipos de atividades experimentais e as simulações experimentais. No subitem sobre a experimentação no ensino de Física, inicialmente é apresentado uma breve contextualização histórica deste método, seguido de um arcabouço teórico que o fundamenta. No subitem tipos de atividades experimentais são apresentados as principais modalidades baseadas na concepção e definição de Araújo e Abib (2003). Por fim, no subitem simulações experimentais, é apresentado de forma breve os aspectos fundamentais da teoria dos modelos mentais e de sua aplicação na concepção deste tipo de prática experimental.

### 2.2.1 A experimentação no ensino de Física

O conhecimento científico foi sendo construído e reformulado ao longo dos séculos. Desde os primeiros conhecimentos adquiridos pelas sociedades mais primitivas, até o estabelecimento do método científico nos séculos XVI e XVII, e das revoluções científicas por ele propiciadas (CERVO e BERVIAN, 2002). Dentro deste contexto, a Física consolidou-se historicamente como uma ciência experimental. No âmbito do ensino, há um consenso entre os professores e a comunidade científica, quanto a experimentação ser reconhecida como uma metodologia de ensino efetivamente importante (MOREIRA, *et al.* 2006).

Em primeira análise, torna-se interessante a realização de uma breve abordagem histórica acerca desta estratégia de ensino, já que a experimentação mantém íntima relação com o próprio contexto da história do ensino da Física. Esta iniciou-se no Brasil no período colonial (BEZERRA, 2009), sendo praticada pelos jesuítas. Este ensino de Física primitivo no Brasil, apesar de fazer uso da observação no levantamento de hipóteses, não realizava experimentações

para a checagem destas (ALMEIDA JÚNIOR, 1979). A chegada da família real ao Brasil em 1808, trouxe uma efervescência cultural e educacional, porém a Física e a experimentação estavam muito mais a serviço de outras áreas do conhecimento, como a medicina. No fim do século XVIII, durante o Brasil império, o ensino de Física no país sofreu forte influência da Alemanha ante às necessidades da Revolução Industrial. Iniciou-se então no país um novo tipo de ensino secundário, mais científico, onde a experimentação e as demonstrações práticas fizeram-se mais necessárias no ensino. Entretanto, o ensino médio do Brasil império focava na preparação do estudante para o ensino superior, não havendo qualquer inovação no ensino das ciências experimentais (ALMEIDA JÚNIOR, 1979).

No início do Brasil república, o nível médio era dividido em sete anos. Entretanto, a Física era excessivamente matematizada, essencialmente sem abordagens experimentais. Por outro lado, no início do século XX, o Congresso Nacional promulgou leis que obrigavam os institutos oficiais de ensino a possuírem laboratórios para as práticas experimentais, embora a qualidade de ensino desenvolvido nestas instituições fosse conhecidamente precária. Dentre estas leis, havia aquelas que obrigavam a aplicação de métodos experimentais no ensino das ciências físicas, tanto pela necessidade de criação de uma consciência científica, quanto pelas demandas originadas da industrialização e do pretendido fortalecimento da tecnologia nacional (ALMEIDA JÚNIOR, 1980).

Na década de 1950, o advento da guerra fria, a crescente corrida espacial, a falta de profissionais nas áreas científicas, aliados ao desânimo dos jovens em relação à carreira científica, fizeram com que os Estados Unidos investissem em um projeto de reforma no ensino da Física. Esse projeto chamou-se *Physical Science Study Committee*, PSSC, e sua finalidade era buscar o interesse dos jovens em Física a partir da participação ativa do aluno (QUEIROZ; HOSSOUNE, 2016). Este projeto se baseou em três pilares, dentre eles, as experiências de laboratório. Criticado inicialmente por não se adequar às realidades do país, o PSSC gerou outros projetos de caráter nacionais, o Projeto de Ensino de Física (PEF) e o Física Auto-Instrutivo (FAI). O PSSC foi fortemente pautado no método experimental, onde os experimentos buscavam o interesse dos alunos que visava a redescoberta das leis Físicas. O PEF também enfatizou o método experimental, atribuindo importância à análise de dados. Por sua vez, o FAI possuiu enfoque teórico e atribuiu à experimentação um papel secundário de comprovação dos conceitos (QUEIROZ; HOSSOUNE, 2016).

Na década de 1980, a experimentação no ensino de Física modelou-se à tendência de um ensino pautado na relação entre ciência, tecnologia e sociedade. Nesta perspectiva, os jovens deveriam experimentar a avaliação de evidências, não apenas aquelas encontradas em

laboratório, mas nas informações também disponíveis ao público, como nas mídias e livrarias (DA ROSA; DA ROSA, 2012). Ao final do século XX, a promulgação da nova Lei de Diretrizes e Bases (LDB) de 1996, reorientou as finalidades do Ensino Médio, incluindo agora uma formação mais pautada para o exercício da cidadania.

A Base Nacional Comum Curricular (BNCC) embora não evidencie a ideia de experimento de maneira tão formal, elenca habilidades que apontam para atividades práticas (MACEDO, 2018). Neste documento da BNCC, a palavra experimento aparece apenas três vezes, enquanto a palavra experiência aparece somente seis vezes (MACEDO, 2018). Entretanto, como apontam os especialistas, não significa que esta estratégia de ensino esteja sendo negligenciada, mas que cabe aos professores fazerem bom uso dela e sempre a incluírem desde que possível em suas práticas docentes.

A partir de uma análise metodológica, embora vista de modo geral, como uma estratégia essencial no ensino da Física, Hodson (1994) destaca a importância de um olhar criterioso quanto à aplicação da experimentação e de sua eficácia na aprendizagem dos conhecimentos científicos. A partir da análise deste autor, os professores elencam cinco diferentes objetivos que justifiquem a utilização da experimentação em suas aulas. Esses objetivos indicados por Hodson (1994), são: promover a motivação, ensinar técnicas de laboratório, intensificar a aprendizagem de conhecimentos científicos, proporcionar uma ideia sobre o método científico e desenvolver determinadas atitudes científicas, como considerar ideias e sugestões de outras pessoas, a objetividade e a boa disposição para não emitir julgamentos apressados.

Como indica o autor, um dos grandes objetivos do emprego da experimentação é a promoção da motivação, sendo este um objetivo recorrente entre as justificativas dos professores de ciências que justificam o emprego desta metodologia no ensino de ciências. Como aponta Bzuneck e Guimarães (2007, p.415), “ter alunos intrinsecamente motivados no contexto escolar é um sonho acalentado por todo professor que conheça a descrição e as consequências desse estado motivacional”. Entretanto, manter os alunos motivados é um desafio a ser empreendido pelos docentes, pois isto influencia diretamente em seus envolvimento no processo de ensino-aprendizagem (LOURENÇO; PAIVA, 2010). De fato, para a promoção de uma aprendizagem significativa há a condição do aluno querer relacionar os novos conhecimentos com os que já possui em sua estrutura cognitiva (MOREIRA, 2012). Esse desejo de querer aprender, embora, segundo Moreira (2012), não se trate exatamente de motivação, influência de modo determinante em uma aprendizagem efetivamente significativa.

Em contrapartida, em relação ao caráter motivacional atribuído geralmente à experimentação, não se pode desconsiderar a aversão apresentada ante a realização de

atividades práticas, mesmo que por parte de uma minoria de estudantes (HODSON, 1994). Esta dificuldade pode ser trabalhada pelos docentes, a fim de demonstrarem a importância da prática experimental na aquisição de novos conhecimentos e no entendimento de como a ciência é construída, e desta forma, gerar o interesse necessário nestes alunos.

Quanto ao aspecto de um ensino voltado à aprendizagem de técnicas de laboratório, não há muitos argumentos favoráveis que sustentem sua viabilidade no contexto da experimentação no ensino de ciências, e, portanto, também da física escolar. Ainda, segundo Hodson (1994), o posicionamento favorável deste emprego implica em concepções errôneas que devem ser evitadas. Entre os argumentos destacados pelo autor, não há evidências de que os conhecimentos técnicos aprendidos em laboratório sejam transferidos à outras áreas do conhecimento, nem que tenham aplicação na vida diária. Outra ideia a ser evitada, é a de que todos os estudantes serão futuros cientistas ou técnicos e, portanto, precisam ser preparados para o mercado de trabalho. Para Hodson (1990), a aquisição de tais conhecimentos técnicos de laboratórios tem pouco valor em si mesmos.

A adoção de práticas experimentais pautadas em uma aprendizagem tecnicista, puramente destinada ao mundo do trabalho, desvia-se dos objetivos atuais do Ensino Médio, que incluem a formação de cidadãos críticos e socialmente atuantes (BRASIL, 1996). Este posicionamento tecnicista fundamenta-se na promoção de mão-de-obra, o que por sua vez tende somente ao fortalecimento da ordem social vigente (CAMPOS, *et al.*, 2011), e não para uma educação libertadora, provedora de transformação social (FREIRE, 1999). Deste modo, a aprendizagem de técnicas de laboratório não deve constituir-se como o foco da prática experimental no ensino da Física.

Embora também seja de ampla aceitação de que a prática experimental proporcione a possibilidade de uma aprendizagem de conhecimentos científicos, não se pode dizer que ela seja superior a outros métodos de ensino (HODSON, 1994). Por outro lado, dada sua natureza intrínseca de relacionar teoria e prática, a experimentação pode ser uma estratégia de ensino que proporcione um aumento da compreensão dos fenômenos que ocorrem no mundo (TAHA, 2016). Neste aspecto, o emprego da experimentação no ensino de Física no Ensino Médio, pode ser amparado pela finalidade desta referida etapa da educação básica, definida pelo inciso IV, do artigo 35 da LDB:

IV - a compreensão dos fundamentos científico-tecnológicos dos processos produtivos, relacionando a teoria com a prática, no ensino de cada disciplina (BRASIL, 1996).

O ensino de Física ainda sofre com a prática de uma aprendizagem mecânica, que é a que mais ocorre nas escolas (MOREIRA, 2012). No modelo de ensino tradicional, amplamente difundido nas escolas brasileiras, o conhecimento é baseado em informações e estas são simplesmente transmitidas aos estudantes, o que não resulta em uma aprendizagem efetiva (BATISTA, *et al.*, 2009). É justamente o fato desta informação constituir-se em um produto acabado, que ocorre a desmotivação e a inibição da possibilidade da experiência e da descoberta. Como aponta Bondía:

A informação não é experiência. E mais, a informação não deixa lugar para a experiência, ela é quase o contrário da experiência, quase uma antiexperiência. Por isso a ênfase contemporânea na informação, em estar informados, e toda a retórica destinada a constituirnos como sujeitos informantes e informados; a informação não faz outra coisa que cancelar nossas possibilidades de experiência. (BONDIA, 2002, p. 21-22).

Desta forma, o método de transmissão de informação típico do ensino tradicional empobrece a prática da experimentação ao passo que perde sentido para os alunos, uma vez que já se apoderaram de um conhecimento pronto e acabado, mas que não lhes conferem uma efetiva aprendizagem. Por causa deste aspecto, como aponta Batista, *et al.* (2009), o aluno não é capaz de relacionar os conhecimentos teóricos absorvidos em sala de aula com a realidade que o cerca. Isto cria um desmembramento entre teoria e prática, aumentando a não compreensão, ao mesmo tempo que afasta o aprendiz do entendimento da forma que a Física se constitui enquanto ciência. Visto isto, a utilização da experimentação é fundamental para o enfrentamento destas dificuldades, como aponta Batista, *et al.* (2009, p.44), “é ferramenta para que o aluno estabeleça a dinâmica e indissociável relação entre teoria e prática a realização de experimentos, em Física”.

Araújo e Abib (2003), destacam que nas últimas décadas a experimentação apresentou-se enquanto estratégia de ensino de diversas formas e tendências. A principal tendência encontrada pelos autores nos trabalhos pesquisados, foi àquela voltada a aspectos qualitativos, isto é, da abordagem conceitual sobrepondo-se a abordagem matemática. Este tipo de enfoque experimental, pode permitir aos estudantes uma maior possibilidade de reflexão e de estabelecer relações mais compreensíveis entre teoria e realidade.

Experimentos com ênfase conceitual “podem ser relacionados com a verificação de conceitos espontâneos, teste de hipóteses e mudanças conceituais” (ARAÚJO; ABIB, 2003, p.179). Além disso, experimentos com enfoque conceitual podem servir como abordagem inicial para um determinado assunto, pois podem se relacionar de modo mais direto com o

conhecimento advindo da observação diária dos aprendizes. Por outro lado, a experimentação com ênfase matemática permite comparação com valores teóricos, além de possibilitar a verificação de leis físicas. Ainda, segundo os autores, outro aspecto importante relacionado com atividades experimentais quantitativas é a possibilidade de se introduzir conceitos relativos ao tratamento estatístico de dados, fornecendo-se noções sobre procedimentos que devem ser adotados na etapa de medições, o uso adequado de diferentes instrumentos de medida, bem como a existência de erros estatísticos e sistemáticos nessas medidas (ARAÚJO; ABIB, 2003, p.179).

Deste modo, a adoção de atividades experimentais quantitativas permite uma exploração do conteúdo de modo mais acurado, valendo-se do ferramental da estatística para conceber resultados e modelos mais passíveis de comparação e verificação. Além disso, a aproximação dos aprendizes com o objeto de estudo através da utilização de instrumentos de medidas e a realização da própria medição, facilita a compreensão da influência das variáveis físicas pertinentes ao fenômeno estudado.

Independente da ênfase empregada, a estratégia da experimentação enfrenta uma dificuldade que é já bem conhecida dentre os professores de Física, sobretudo os que lecionam no ensino público, que é a disponibilidade de espaço e materiais adequados. Este problema, segundo especialistas, pode ser minimizado através do emprego de materiais baratos e de fácil aquisição para ser empregados nas aulas (MACEDO, 2018). Segundo Santos, Piassi e Ferreira (2004), quando a experimentação é realizada com materiais simples, onde os alunos podem controlar e manipular, a aprendizagem dos conceitos é facilitada, além de despertar o interesse dos estudantes.

De maneira geral, a experimentação no ensino de Física é uma das metodologias mais significativas para promover a aprendizagem de conceitos físicos. A Física, por ser uma ciência natural, necessita da experimentação, de maneira que é muito importante que esta metodologia esteja presente de alguma forma em sala de aula. A experimentação pode promover maior engajamento dos estudantes e conferir sentido aos conceitos teóricos apresentados. Os experimentos aproximam os estudantes do método científico e da forma como o conhecimento científico é construído, podendo estimular a curiosidade e permitir que os estudantes tenham autonomia para verificar os conhecimentos teóricos que lhes são apresentados. A possibilidade da verificação e da descoberta são aspectos importantes da experimentação e podem fazer com que os estudantes adquiram gosto pela ciência.

Com a nossa UEPS foi possível elaborar atividades teóricas que culminam na abordagem experimental, através do dispositivo simulador. Este, por sua vez, foi construído a

partir de materiais de baixo custo que podem ser facilmente adquiridos. Apesar de utilizarmos uma simulação, a atividade experimental que idealizamos permite a realização de medidas reais, como a distância entre os átomos simulados e a amplitude de oscilação dos mesmos. Esta abordagem pode auxiliar os estudantes na construção de relações físicas reais entre as grandezas medidas e, por analogia, levar ao entendimento acerca do comportamento térmico dos sólidos na escala microscópica.

### 2.2.2 Tipos de atividades experimentais

As atividades experimentais podem enfatizar diferentes aspectos e serem utilizadas para diferentes finalidades no ensino de Física (SÈRÈ, 2003). Araújo e Abib (2003), classificam as atividades experimentais em três categorias: demonstração, verificação e investigação.

Segundo estes autores, os experimentos de demonstração é a modalidade mais utilizada. Trata-se de experimentos que visam sumariamente a demonstração e observação por parte dos alunos de aspectos de fenômenos físicos. Este tipo de experimento pode ainda ser classificado em dois tipos, o fechado e o aberto (ARAÚJO; ABIB, 2003). Os experimentos demonstrativos fechados são aqueles realizados pelos professores e, portanto, são centradas nele. Este tipo de experimento serve para ilustrar o conceito e torná-lo mais compreensível aos estudantes. Por outro lado, os experimentos demonstrativos abertos são aqueles que possibilitam uma maior abertura, permitindo discussões, levantamento de hipóteses e uma reflexão mais crítica. Esta segunda modalidade de experimento demonstrativo permite uma abordagem mais aprofundada do assunto.

Os experimentos de verificação, por sua vez, são aqueles cuja finalidade é proporcionar uma verificação da validade ou limitação de alguma lei física. As atividades experimentais de verificação são importantes, pois os alunos compreendem a influência dos parâmetros que modelam o fenômeno. Como afirmam os autores:

A importância destas atividades pode ser destacada, entre outros fatores, pela sua capacidade de facilitar a interpretação dos parâmetros que determinam o comportamento dos sistemas físicos estudados, sendo, segundo alguns autores, um recurso valioso para tornar o ensino estimulante e a aprendizagem significativa, promovendo uma maior participação dos alunos (ARAÚJO; ABIB, 2003, p. 183).

Além disso, os experimentos de verificação possibilitam que os estudantes extrapolem os limites do próprio experimento e façam generalizações. Em última análise, segundo Araújo e Abib (2003), os experimentos de verificação podem promover um ensino mais realista,



possibilitando a correção de conceitos equivocados que possam aparecer em materiais didáticos.

Por fim, os experimentos de investigação são caracterizados pela maior participação dos alunos e incluem obrigatoriamente o levantamento de hipóteses e experimentos para testá-las (CAMPOS; NIGROS, 1999). Segundo Bassoli (2014), este tipo de atividade estimula intensamente a interatividade entre os alunos e promove a formação de conceitos. Além disso, Campos e Nigros (1999), destacam que os experimentos investigativos devem favorecer a diversidade de opiniões, conflito de ideias e o trabalho cooperativo. Nesta perspectiva, ao permitir esses aspectos, a modalidade de experimento demonstrativo aberto pode se caracterizar como uma atividade também investigativa (ARAÚJO; ABIB, 2003).

Laburú e Zômpero (2011) destacam que o ensino por investigação, e por consequência, os experimentos investigativos, não tem o objetivo de formar cientistas, como era aquele pretendido na década de 1960, mas sim de desenvolver habilidades cognitivas e capacidade de argumentação. Para os autores, os experimentos investigativos realizados pelos alunos diferem das outras modalidades experimentais, justamente pelo “papel intelectual mais ativo durante as aulas” (LABURÚ; ZÔMPERO, 2011, p. 178 – 179), desde que estes estejam devidamente engajados. Esse grau de maior envolvimento dos alunos, necessário para a realização deste tipo de experimento, aliado ao desenvolvimento de capacidades críticas e reflexivas (LIMA, 2017), aproxima essa prática às metodologias ativas.

Gil e Castro (1996), elencam alguns aspectos que consideram essenciais em atividades experimentais investigativas. Esses aspectos visam apresentar situações-problema abertas, favorecer a reflexão e o estudo contextualizado, potencializar a análise qualitativa, a emissão de hipóteses e a elaboração de desenhos pelos próprios alunos. Além disso, os autores elencam outros aspectos importantes das atividades experimentais investigativas, como a potencialidade de análise dos resultados encontrados, do trabalho coletivo e de estabelecer relações com perspectiva em Ciência, Tecnologia e Sociedade (CTS).

Fica evidente na concepção de Gil e Castro (1996), que a realização de atividades experimentais requer efetiva participação ativa dos estudantes, ao passo de que o professor deve deixar sua postura de mero transmissor do conhecimento, característico do ensino tradicional, para tornar-se um professor argumentador, questionador e desafiador (Pereira, 2010).

A abordagem experimental de nossa UEPS, através do simulador, pode ser utilizada de duas maneiras. Inicialmente, o simulador pode ser utilizado para a realização de uma atividade experimental demonstrativa, cujo objetivo é a observação da estrutura microscópica representada e do comportamento térmico simulado. A segunda prática experimental com o

simulador possui uma abordagem com enfoque investigativo. Nesta, os estudantes são incentivados a realizar medições para explicar o comportamento do sistema através de modelos gráficos e matemáticos.

### 2.2.3 Simulações experimentais no ensino de Física

De acordo com Giordan (1999), a experimentação deve cumprir a função de alimentar o processo de significação do mundo, por meio da simulação da realidade. Esse processo de significação indicado pelo autor refere-se à construção de modelos mentais, teoria proposta por Philip Nicholas Johnson-Laird. Segundo este último autor, as pessoas raciocinam através de modelos mentais. De acordo com Moreira (1996, p.195) “Um modelo mental é uma representação interna de informações que corresponde analogamente com aquilo que está sendo representado.”

A partir de uma informação fornecida ou percebida de uma dada situação, os sujeitos podem construir mentalmente uma representação analógica daquele conhecimento. Com esta representação interna, isto é, com o modelo mental construído, os indivíduos conseguem inferir novas informações. Ainda, segundo Moreira:

[...] modelo mental é uma representação interna de informações que corresponde, analogamente, ao estado de coisas que estiver sendo representado, seja qual for ele. Modelos mentais são análogos estruturais do mundo (MOREIRA, 1996, p. 197).

O referido estado de coisas é, muitas vezes, descrito por conceitos (MOREIRA, 1996). Logo, de forma simplificada, os modelos mentais são representações mentais de conceitos. Através de modelos mentais já construídos, os indivíduos podem construir outros modelos e, por consequência, conceber novos conceitos, ou pelo menos expandi-los.

Tendo em vista a experimentação, a ideia de modelos mentais abre caminho para a adoção de simulações. Uma simulação nada mais é que uma representação de um sistema físico ou fenômeno. A partir desta representação externa ao sujeito (simulação), o aprendiz constrói, ou amplia, sua própria representação interna, isto é, seu modelo mental sobre aquele conceito. Como aponta Giordan (1999):

É nesse palco de simulações que podem se formar ambientes estimuladores para a criação de modelos mentais pelo sujeito, que passa a reconhecer nos modelos ora simulados a primeira instância de representação analógica da

realidade. Nessas situações, o sujeito se percebe diante de uma representação da realidade, obrigando-se a formular a sua própria, que venha a se ajustar àquela em simulação. Trata-se, portanto de determinar à experimentação o novo papel de estruturadora de uma realidade simulada, etapa intermediária entre o fenômeno, que também é acessado pelo prisma da experimentação, e a representação que o sujeito lhe confere (GIORDAN, 1999, p. 47).

Estas concepções indicam uma potencialidade de aprendizagem que se pode atribuir às simulações experimentais. Estas por sua vez, possuem a vantagem de permitir a abordagem com caráter experimental de situações ou fenômenos que são inacessíveis na sala de aula, seja pela escala de tamanho que não pode ser diretamente visualizada, seja pela velocidade ou efemeridade que determinados fenômenos ocorrem. Por isso, em última análise, as simulações experimentais são alternativas complementares importantes que podem complementar o estudo de certos conceitos e torná-los mais compreensíveis aos alunos.

O conceito da temperatura e do mecanismo da condução térmica envolvem escalas dimensionais e fenômenos microscópicos que não podem ser observados diretamente. Nosso simulador mecânico permite trabalhar exatamente estes conceitos, a fim de conferir sentido aos mesmos de modo a propiciar a realização de uma aprendizagem significativa .

# Capítulo 3

## FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA EM FÍSICA

---

---

Neste capítulo apresentamos os conceitos de Física que podem ser explorados e trabalhados teoricamente em nossa UEPS e experimentalmente com o auxílio do simulador mecânico.

### 3.1 FÍSICA TÉRMICA

Os processos térmicos ocorrem continuamente na natureza e estão intimamente relacionados com a energia e a própria estrutura da matéria. Desde os tempos pré-históricos, o ser humano buscou produzir e controlar processos térmicos para garantir sua própria subsistência, como o desenvolvimento de vestimentas para proteção contra condições climáticas adversas, ou mesmo a produção de fogo para preparo dos alimentos, proteção e iluminação noturna (OLIVEIRA, 2010). Mais que isso, a compreensão do calor e da temperatura nos permitiu entender também as condições da existência da vida e da possibilidade de sua ocorrência nas mais diversas condições no universo (ORNELLAS, 2006).

As primeiras sistematizações do conhecimento humano acerca do calor remontam da antiguidade. Para os gregos antigos, no século V a.C., o fogo era considerado um dos quatro elementos que, em conjunto com os demais, constituiria todos os objetos materiais (ORNELLAS, 2006). Desde estas primeiras concepções acerca da constituição da natureza e da energia, um longo processo de descobertas foi se realizando com o passar dos séculos. No âmbito da Física, sobretudo a partir do século XVII, a sistematização da Mecânica e de outros

campos emergentes trouxeram transformações profundas no modo de entender a natureza. A expansão do mercantilismo no século XVII e a necessidade da produção e transporte de bens em massa, fez culminar na Revolução Industrial, em meados do século XVIII (MENEZES, 2005).

A Revolução Industrial ampliou a necessidade de se entender a natureza do calor e de sua relação com o trabalho mecânico, para a concepção de máquinas térmicas cada vez mais eficientes e produtivas. Esse cenário propiciou o desenvolvimento da Termodinâmica, cujo ápice se deu no século XIX com o estabelecimento de suas leis. As leis da Termodinâmica surgiram historicamente de maneira empírica. A busca pela explicação das mesmas, a partir da estrutura microscópica dos sistemas físicos, surgiu com o advento da Teoria Cinética dos Gases. A busca pelas relações entre os fenômenos térmicos macroscópicos e o comportamento microscópico da matéria fez surgir a Mecânica Estatística, principalmente a partir dos trabalhos dos físicos James C. Maxwell (1831 – 1879) e Ludwig E. Boltzmann (1844 – 1906), no século XIX (NUSENZVEIG, 1997).

A Física Térmica é o ramo que engloba tanto a Termodinâmica, quanto a Mecânica Estatística. Nestas áreas da Física são analisados fenômenos causados pela ação combinada de um número muito grande de moléculas ou outras partículas se movendo continuamente de maneira desordenada. Todos os corpos que estão a nossa volta são compostos por pequenas partículas e várias de suas propriedades físicas tem origem neste movimento coletivo desordenado. Ou seja, a ação coletiva das partículas fornece novas qualidades para o sistema que as mesmas compõem. Dessa forma, quando aumentamos o número de partículas se movendo mecanicamente em um corpo aparece um novo tipo de movimento, chamado de *movimento térmico*.

Na Termodinâmica e na Física Estatística estudamos o movimento térmico da matéria com suas respectivas leis e métodos específicos. Apesar de classificarmos este novo tipo de movimento como térmico, isso não significa que estudamos apenas fenômenos térmicos com estas duas ciências. Estudamos também fenômenos elétricos, magnéticos, quânticos, entre outros. O objeto de estudo da Termodinâmica e da Física Estatística é basicamente o mesmo. A diferença essencial entre as duas ciências consiste na metodologia de investigação de cada uma.

Nesta seção, abordamos os conceitos de calor, temperatura, condução térmica e a estrutura microscópica dos três estados da matéria (sólido, líquido e gasoso). Estes conceitos são fundamentais para a compreensão de fenômenos térmicos mais complexos e são abordados de maneira adaptada para o Ensino Médio através do produto educacional que construímos.

### 3.1.1 Calor e temperatura

As concepções acerca do conceito de calor foram sendo modificadas ao longo da história da Física à medida que novas observações e descobertas foram realizadas. Até o final do século XVIII existiam duas teorias sobre a natureza do calor. A mais aceita na época, considerava o calor como uma substância fluida que estava presente no interior dos poros dos corpos. Essa substância foi chamada pelo químico francês Antoine-Laurent de Lavoisier (1643 – 1794) de calórico e tinha a propriedade de ser indestrutível, além de poder ser transferida de corpos de maior temperatura para os de menor temperatura (NUSSENZVEIG, 1997).

Na teoria do calórico, a quantidade de calórico cedida por um corpo de maior temperatura deveria ser exatamente a quantidade recebida pelo outro corpo de menor temperatura. Esta hipótese, embora incorreta em relação à atual concepção científica do conceito de calor, trazia a ideia da conservação do calórico, concepção que se aproxima do conceito correto da conservação de energia.

A outra teoria vigente no final do século XVIII, porém menos aceita, considerava o calor como um “minúsculo movimento de vibração das partículas dos corpos”, como definiu o influente físico inglês Isaac Newton (1643 – 1627) em 1704. Além de Newton, esta ideia era defendida por outros pensadores importantes como o físico Robert Hooke (1635 – 1703) e o filósofo Francis Bacon (1561 – 1626).

A teoria do calórico encontrou grande objeção, sobretudo devido às observações do físico e inventor anglo-americano Benjamin Thompson (1753 – 1814), também conhecido como Conde de Rumford da Bavária. Rumford observou que o processo de perfuração de canhões liberava uma quantidade ilimitada de calórico durante o movimento relativo da broca. Além disso, após medições precisas realizadas por Rumford, não foi possível detectar qualquer variação da massa dos corpos que cederam ou absorveram o hipotético calórico. Além de conferir a necessidade de o calórico ser uma substância imponderável, as observações de Rumford contrariaram a lei de conservação do calórico, pois era possível extrair uma quantidade ilimitada de calórico do sistema por atrito. Estas observações fizeram Rumford concluir sumariamente que o calórico não existia e que o calor estava associado ao movimento dos corpos, corroborando para o fortalecimento da teoria sustentada por Newton (NUSSENZVEIG, 1997).

Esta concepção antiga de que o calor é o “movimento das partículas” foi reconstruída, pois se confunde com o conceito atual de temperatura. A atual concepção científica acerca do calor é que este é um processo físico de transferência de energia entre dois corpos que ocorre

exclusivamente devido à diferença de temperatura entre os mesmos. Neste processo, o fluxo natural da energia ocorre do corpo de maior temperatura para o de menor temperatura.

Como o calor está associado a um processo, este não pode ser considerado como uma propriedade da matéria. Portanto, a afirmação de que os corpos possuem ou transferem calor está incorreta. Esta concepção ainda pode ser encontrada em muitos livros didáticos tanto do Ensino Médio quanto do Superior (NOGUEIRA, 2020). Contudo, essa terminologia deve ser necessariamente evitada e corrigida sempre que possível para evitar retrocessos às ideias científicas antigas e comprovadamente inadequadas.

A quantidade de energia transferida de um corpo para outro através de calor é usualmente chamada quantidade de calor e denotada por  $Q$ . Sendo esta grandeza uma quantidade de energia, ela é medida no Sistema Internacional de Unidades (S.I.) em Joules, cujo símbolo é  $J$ . Existem outras unidades para expressar a quantidade de calor e que ainda são utilizadas atualmente, a caloria e a Unidade Térmica Britânica, do inglês *British Thermal Unit*, cujos símbolos são descritos, respectivamente, por *cal* e *BTU*. A relação entre ambas as unidades é estabelecida através do equivalente mecânico do calor, dada por  $1 \text{ cal} \approx 4,18 \text{ J}$  (NUSSENZVEIG, 1997).

Para os gases ideais, que são sistemas físicos particularmente simples, em que as interações entre as partículas constituintes são negligenciadas, a energia interna ( $U$ ) do sistema descreve apenas a energia cinética das partículas. Neste caso particular, a energia interna do gás depende apenas de sua temperatura  $T$ , ou seja,

$$U = U(T). \quad (3.1)$$

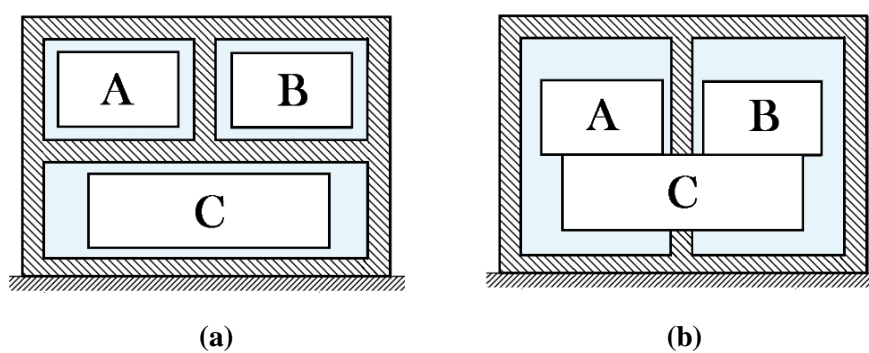
A partir disso, podemos inferir que a temperatura é uma grandeza que está diretamente relacionada com a energia cinética das partículas. Por isso, dizemos que a temperatura é uma grandeza intensiva, isto é, independente do volume e da massa dos corpos. Já a energia interna depende da quantidade de partículas que constituem os corpos, sendo, portanto, uma grandeza extensiva. Para sistemas nos estados líquido e sólido, entretanto, suas partículas constituintes estão em um estado de agregação maior, ou seja, as forças interatômicas às quais as mesmas estão sujeitas são maiores. Nestes sistemas, tais forças de interação devem ser consideradas para o cálculo da energia interna  $U$ .

Experimentalmente, observa-se que em sistemas isolados, as grandezas termodinâmicas correspondentes, como a energia interna  $U$ , a pressão  $P$ , o volume  $V$ , a temperatura  $T$ , entre outras, permanecem inalteradas com o passar do tempo, pois o sistema não troca energia e nem

matéria com sua vizinhança. Nestas condições dizemos que o sistema está em um estado de equilíbrio termodinâmico. Este é um estado de equilíbrio geral, de maneira que o sistema encontra-se em equilíbrio térmico, químico e mecânico (NUSSENZVEIG, 1997).

É observado também que, se um sistema A estiver em equilíbrio térmico com um sistema C, e o sistema C estiver em equilíbrio térmico com um sistema B, então os sistemas A e B também estão em equilíbrio térmico entre si, conforme ilustrado na figura 3.1.

**Figura 3.1** – Em (a) os corpos A, B e C estão isolados termicamente através de paredes adiabáticas (parte hachurada). Em (b), os corpos A e B estão isolados termicamente, mas estão em equilíbrio térmico entre si através do corpo C. Neste caso A e B estão em contato com C através de paredes diatérmicas.



**Fonte:** Elaborado pelo autor.

Esta observação experimental independe das composições dos corpos e é conhecida como Lei Zero da Termodinâmica, a qual pode ser enunciada como: “Dois sistemas termodinâmicos que estejam em equilíbrio térmico com um terceiro sistema, também estão em equilíbrio térmico entre si.” (NUSSENZVEIG, p.158, 1997).

De maneira intuitiva, já que as grandezas macroscópicas permanecem inalteradas, podemos inferir que a temperatura de sistemas em equilíbrio térmico entre si é a mesma. Este fato torna possível o uso de instrumentos que medem a temperatura, como os termômetros (HEWITT, 2002). Para medir a temperatura de outro corpo, colocamos o termômetro em contato térmico com este, a fim de estabelecer o equilíbrio térmico entre ambos. Neste processo, o corpo cede ou absorve energia do termômetro. Ao se estabelecer o equilíbrio térmico, a temperatura indicada pelo termômetro é a mesma do corpo medido, conforme estabelecido pela Lei Zero da Termodinâmica (YOUNG & FREEDMAN, 2015).

A medida da temperatura é aferida através do estabelecimento de escalas termométricas. Atualmente três escalas termométricas são empregadas com mais frequência, Celsius, Fahrenheit e Kelvin. A escala Celsius foi criada pelo astrônomo e físico sueco Anders Celsius



(1701 – 1744) através da escolha de dois valores arbitrários para constituir os pontos fixos da escala. Esses pontos referem-se às temperaturas de fusão ( $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) e ebulição ( $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) da água pura à pressão de 1 atm. Esta escala de temperatura é dividida em 100 partes iguais, sendo cada uma equivalente a  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$  (NUSSENZVEIG, 1997).

A escala Fahrenheit é muito empregada especialmente em países de influência inglesa. Ela foi criada pelo físico alemão Daniel Gabriel Fahrenheit (1686 – 1736), tendo como pontos fixos os valores de  $32\text{ }^{\circ}\text{F}$  e  $212\text{ }^{\circ}\text{F}$ , respectivamente, para a fusão e ebulição da água a 1 atm. Esta é dividida em 180 graus, de maneira que cada parte equivale a  $1,8\text{ }^{\circ}\text{F}$ .

A escala Kelvin, também conhecida como escala absoluta de temperatura, é amplamente empregada nos meios científicos e é baseada na temperatura do ponto triplo da água e da temperatura correspondente ao zero absoluto, definidos por  $273,16\text{ K}$  e  $0\text{ K}$ , respectivamente.

Os conceitos de calor e temperatura foram fundamentais para o desenvolvimento das atividades de nosso produto educacional. Esses conceitos foram abordados tanto de maneira teórica, através de textos e situações-problema, quanto de maneira experimental, por meio do simulador mecânico proposto para a utilização em sala de aula. Este simulador foi idealizado para ilustrar o movimento térmico através de uma rede motorizada de esferas interligadas por elásticos, representando a estrutura microscópica de um sólido.

A agitação mecânica das esferas do simulador é importante para representar o conceito de temperatura, enquanto que a transmissão de tal agitação (energia cinética) de uma esfera para outra representa o processo de transmissão de energia através de calor, estabelecido pelo mecanismo da condução térmica. Nas próximas seções discutimos com maiores detalhes sobre os estados da matéria, o conceito da condução térmica e a descrição dos sólidos cristalinos.

### 3.1.2 Estados da matéria

As substâncias podem ser encontradas na natureza em diferentes estados de agregação em relação às suas partículas constituintes. Até onde sabemos, a matéria constituída por átomos pode ser encontrada em cinco estados físicos diferentes, sendo eles sólido, líquido, gasoso, plasma e condensado de Bose-Einstein. Para a concepção do produto educacional e os objetivos deste trabalho, descrevemos apenas os três primeiros estados físicos citados.

Os estados sólido e líquido são denominados genericamente de matéria condensada. Nestes estados físicos os átomos e moléculas interagem fortemente entre si, o que lhes conferem um volume definido. Na matéria condensada, a atração entre os átomos vizinhos faz com que

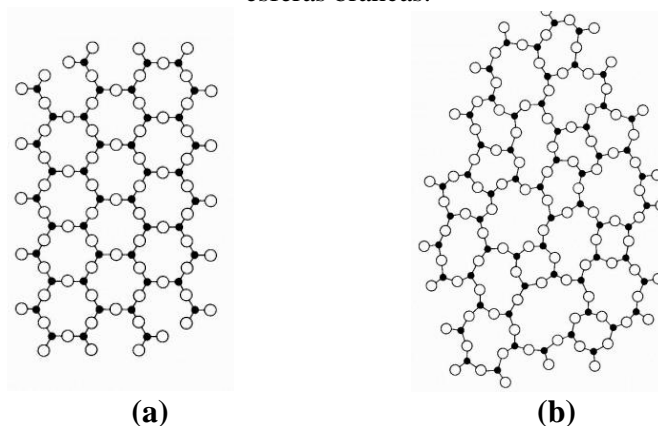
suas nuvens eletrônicas se superponham, resultando em distâncias interatômicas da ordem do próprio diâmetro dos átomos, entre 0,1 e 0,5 nm (YOUNG & FREEDMAN, 2015).

Os sólidos, diferentemente dos líquidos, possuem forma definida. Os líquidos, por sua vez, são caracterizados pela capacidade de poder fluir. Além disso, os sólidos possuem uma propriedade chamada rigidez que varia de acordo com a substância (NUSSENZVEIG, 1997).

Quando uma substância se encontra no estado sólido, seus átomos se encontram unidos por forças interatômicas muito intensas, de natureza elétrica, fazendo com que assumam posições estáveis e fiquem muito próximos entre si. A energia cinética dos átomos, relacionada com a concepção microscópica da temperatura do sistema, faz com que os mesmos oscilem em torno destas posições, conhecidas como pontos de equilíbrio estáveis. Assim um sólido pode ser definido como o estado em que a substância possui moléculas que oscilam em torno de posições fixas nas três dimensões (AMARAL, 2014).

Os sólidos que apresentam uma organização interna de seus átomos são chamados de sólidos cristalinos. Estes são caracterizados por apresentar uma configuração de posições atômicas que se repetem ao longo de sua extensão. Este padrão ordenado e repetitivo é chamado de estrutura cristalina (AMARAL, 2014). Os sólidos que não possuem estrutura cristalina são chamados de amorfos. Um exemplo interessante é a sílica ( $\text{SiO}_2$ ), que no estado sólido pode se apresentar tanto na forma cristalina, quanto na amorfa. A sílica cristalina ocorre na constituição do mineral quartzo, sendo este um dos minerais mais abundantes da crosta terrestre (LUZ; LINS, 2008). Na forma amorfa, a sílica constitui o vidro comum (ZACHARIASEN, 1932). A Figura 3.2 mostra a distinção da estrutura atômica entre o quartzo e o vidro.

**Figura 3.2** – Sólidos formados por sílica ( $\text{SiO}_2$ ). Em (a) é mostrada esquematicamente de forma plana a estrutura cristalina do quartzo. Em (b) é mostrada a estrutura amorfa do vidro. Em ambas as ilustrações os átomos de silício são representados pelas esferas pretas e os átomos de oxigênio pelas esferas brancas.

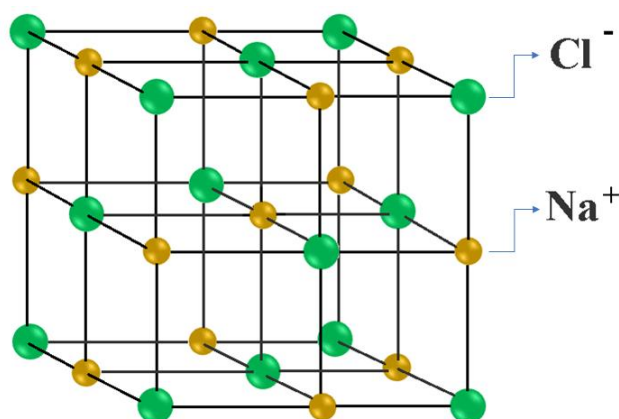


**Fonte:** Figuras extraídas de Zachariasen (p. 3845-3846, 1932).

Os sólidos ainda podem ser classificados de acordo com os tipos de ligação que existem entre seus átomos constituintes, podendo ser iônicos, covalentes, metálicos, moleculares e com ligação de hidrogênio. Sólidos com diferentes tipos de ligação química apresentam diferenças quanto às suas propriedades físicas e químicas.

Os sólidos iônicos são aqueles formados por íons de cargas opostas que se alternam espacialmente em suas posições, originando redes cristalinas. Como não possuem elétrons livres, os sólidos iônicos são maus condutores térmicos e elétricos (MUNIZ, 2012). Um exemplo típico deste tipo de sólido é o cloreto de sódio (NaCl), cuja estrutura cristalina é ilustrada na Figura 3.3.

**Figura 3.3** – Ilustração da estrutura cristalina do sólido iônico, cloreto de sódio (NaCl). Cada átomo de sódio (em amarelo) é rodeado por seis átomos de cloro (em verde), da mesma forma que cada átomo de cloro é rodeado por seis átomos de sódio.



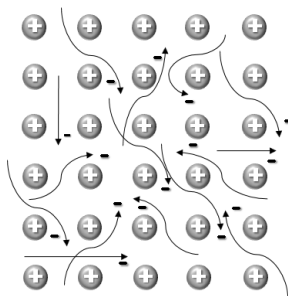
**Fonte:** Elaborado pelo autor.

Os sólidos covalentes são aqueles formados por ligações covalentes, ou seja, através do compartilhamento de elétrons de valência entre os átomos ligados. Tais ligações são direcionais, determinando o arranjo geométrico dos átomos que constituem a rede cristalina (MUNIZ, 2012). A ligação covalente confere aos sólidos deste tipo maior dureza, elevado ponto de fusão e os tornam, de modo geral, maus condutores térmicos e elétricos. O diamante, o germânio (Ge,  $Z = 32$ ) e o silício (Si,  $Z = 14$ ), são exemplos de sólidos covalentes. Em alguns casos, como o germânio e o silício, a condutividade elétrica apresenta valores intermediários, classificando-os como semicondutores (MUNIZ, 2012). Os semicondutores, possuem grande aplicação tecnológica, sobretudo o silício que é utilizado para a confecção de circuitos integrados que compõem inúmeros aparelhos eletrônicos.

Os sólidos metálicos são formados por estruturas cristalinas mantidas por ligações metálicas. Este tipo de sólido apresenta elétrons livres em sua estrutura, que são compartilhados

por todos os íons positivos da rede cristalina, sendo por isto, considerado um caso limite da ligação covalente (MUNIZ, 2012). A presença de elétrons livres torna os sólidos metálicos bons condutores térmicos e elétricos. Todos os metais e suas ligas são exemplos de sólidos metálicos. Na figura 3.4 apresentamos uma ilustração da estrutura interna dos sólidos metálicos.

**Figura 3.4** – Ilustração da estrutura cristalina dos sólidos metálicos. As linhas curvilíneas representam as trajetórias dos elétrons livres do material.



**Fonte:** Elaborado pelo autor.

Os sólidos moleculares são formados pela interação de moléculas altamente estáveis cuja ligação se dá geralmente por meio de forças de van der Waals. Desta forma, os dipolos moleculares, permanentes ou flutuantes, dão origem a fracas interações eletrostáticas. São exemplos deste tipo de sólido, cristais de gases inertes e comuns, como o oxigênio ( $O_2$ ), nitrogênio ( $N_2$ ) e hidrogênio ( $H_2$ ) (MUNIZ, 2012).

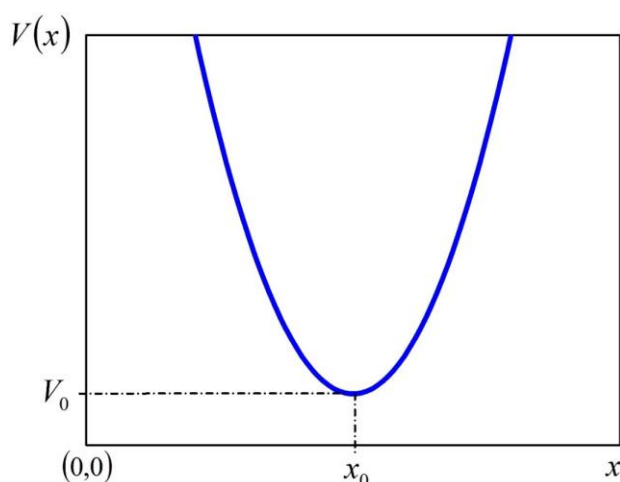
Por sua vez, os sólidos com ligação de hidrogênio são aqueles formados por moléculas polares cujo polo positivo é sempre o hidrogênio e o polo negativo pode ser formado pelo flúor, oxigênio ou nitrogênio. Dentre as forças intermoleculares, a ligação de hidrogênio é a mais intensa. São exemplos de sólidos com ligação de hidrogênio o fluoreto de hidrogênio (HF) e o gelo ( $H_2O$ ). No caso do gelo, cada molécula de água se liga a outras quatro por meio de ligações de hidrogênio (MACHADO, 1995).

Em todos os tipos de sólidos, como já exposto, a interação é de natureza elétrica e os átomos oscilam em torno de posições estáveis. O modelo mais simples para descrever seus movimentos é considerar a analogia mecânica de osciladores executando um movimento harmônico simples (MHS). Neste modelo simplificado, os átomos são representados por esferas rígidas e suas interações por molas. O potencial  $V(x)$  para este tipo de movimento é chamado de potencial harmônico e é dado por,

$$V(x) = \frac{1}{2}kx^2, \quad (3.2)$$

sendo  $k$  a constante que representa uma interação ou um acoplamento no sistema e  $x$  o deslocamento do átomo em relação à sua posição de equilíbrio estável, dada neste caso pela origem  $x = x_0 = 0$ . Em nosso dispositivo, a interação entre os átomos simulados é estabelecida através de elásticos que interligam as esferas que compõem a rede do sistema. Desta forma, o potencial apresentado na equação (3.2) descreve a interação mecânica real do sistema que construímos para pequenas oscilações e seu gráfico é apresentado na figura 3.5. Note que consideramos o ponto de equilíbrio estável do átomo em uma posição arbitrária,  $x = x_0$ .

**Figura 3.5** – Potencial harmônico, dado pela equação (3.2), em função da posição  $x$ . A posição de equilíbrio estável do sistema  $x = x_0$  é caracterizada pelo potencial  $V_0 = kx_0^2/2$ .



**Fonte:** Elaborado pelo autor.

A justificativa para considerarmos o potencial harmônico dado pela equação (3.2), como sendo válido para pequenas oscilações  $x \approx x_0$ , surge da análise do comportamento de um potencial arbitrário geral  $V(x)$  em torno do mínimo  $x_0$ . Isso é feito através da expansão de  $V(x)$  em série de Taylor, dada por:

$$\begin{aligned}
 V(x) = & V_0 + \left(\frac{dV}{dl}\right)_{x=x_0} (x - x_0) + \frac{1}{2!} \left(\frac{d^2V}{dl^2}\right)_{x=x_0} (x - x_0)^2 + \frac{1}{3!} \left(\frac{d^3V}{dl^3}\right)_{x=x_0} (x - x_0)^3 \\
 & + \dots + \frac{1}{n!} \left(\frac{d^nV}{dl^n}\right)_{x=x_0} (x - x_0)^n
 \end{aligned} \tag{3.3}$$

O termo  $V_0$  é irrelevante porque ele apenas desloca o potencial por uma constante e, portanto, não muda a física do sistema. Isso significa que este termo desloca o potencial apresentado na figura 3.5 como um todo sem mudar a forma do mesmo. Logo, podemos

considerar  $V_0 = 0$  sem perda de generalidade. O segundo termo da expansão é nulo, porque  $\left(\frac{dV}{dx}\right)_{x=x_0} = 0$ , uma vez que  $x_0$  é um mínimo do potencial. Como estamos considerando pequenas oscilações  $x \approx x_0$ , os termos de ordem maior ou igual a três podem ser negligenciados. Diante dessas considerações e aproximações e considerando  $x_0 = 0$ , o potencial geral dado pela equação (3.3) adquire a forma,

$$V(x) = \frac{1}{2} \left(\frac{d^2V}{dx^2}\right)_{x=0} x^2, \quad (3.4)$$

que é a mesma apresentada na equação (3.2), em que a constante  $k$  é dada por  $k = \left(\frac{d^2V}{dx^2}\right)_{x=0}$ .

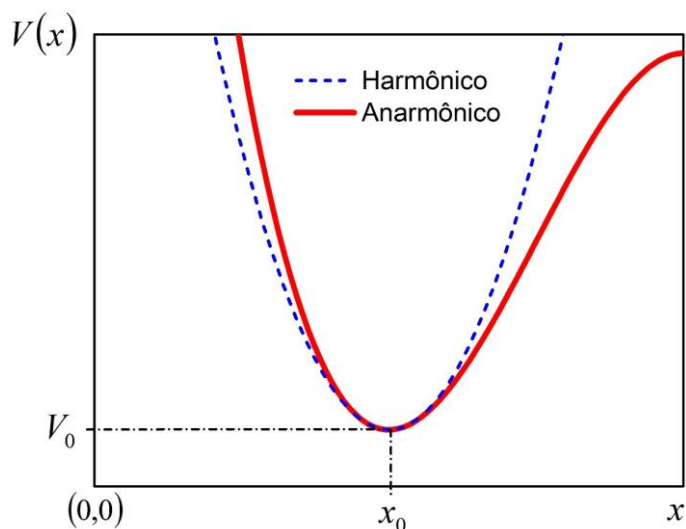
Dependendo das condições energéticas em que o sistema é considerado, o limite de pequenas oscilações não é uma boa aproximação, sendo necessário considerar termos de ordem superior na equação (3.3). Isso faz com que o potencial seja anarmônico. É possível descrever interações moleculares (ROBINETT, 1996) em condições reais para um potencial anarmônico dado por,

$$V(x) = \frac{1}{2} k_1 x^2 - \frac{1}{6} k_2 x^3. \quad (3.5)$$

Note que esta expressão leva em conta até o termo de terceira ordem da equação (3.3), sendo  $k_1 = \left(\frac{d^2V}{dx^2}\right)_{x=x_0}$  e  $k_2 = \left(\frac{d^3V}{dx^3}\right)_{x=x_0}$ . O sinal negativo é inserido para atender às convenções de sinal considerados em espectroscopia molecular, de maneira que a expressão (3.5) é suficiente para explicar a maioria das propriedades que são observadas a partir dos espectros de moléculas diatômicas (VISWANATHAN, 1957). Na figura 3.6 apresentamos o potencial anarmônico, dada pela equação (3.5), em comparação com o potencial harmônico dado por (3.2). Note que para  $x \approx x_0$  as curvas de ambos potenciais coincidem.

Para o caso particular dos sólidos cristalinos de gases inertes, a coesão entre os átomos é devido à interação induzida dipolo-dipolo. Quando dois átomos de gases inertes se aproximam, os dipolos induzidos fazem surgir um potencial atrativo de longo alcance. À medida que estes se aproximam mais, as nuvens eletrônicas de seus átomos se sobrepõem, de maneira que um potencial repulsivo aparece devido ao princípio de exclusão de Pauli.

**Figura 3.6** – Potencial anarmônico (curva sólida vermelha), dado pela equação (3.5), em comparação com o potencial harmônico (curva azul tracejada), obtido através da equação (3.2).



**Fonte:** Elaborado pelo autor.

O potencial interatômico de pares que modela atrações e repulsões fracas, características em gases inertes, é chamado de potencial de Lennard-Jones  $U'(r)$ . Este é descrito pela expressão,

$$U'(r) = 4\epsilon \left[ \left(\frac{\sigma}{r}\right)^{12} - \left(\frac{\sigma}{r}\right)^6 \right], \quad (3.6)$$

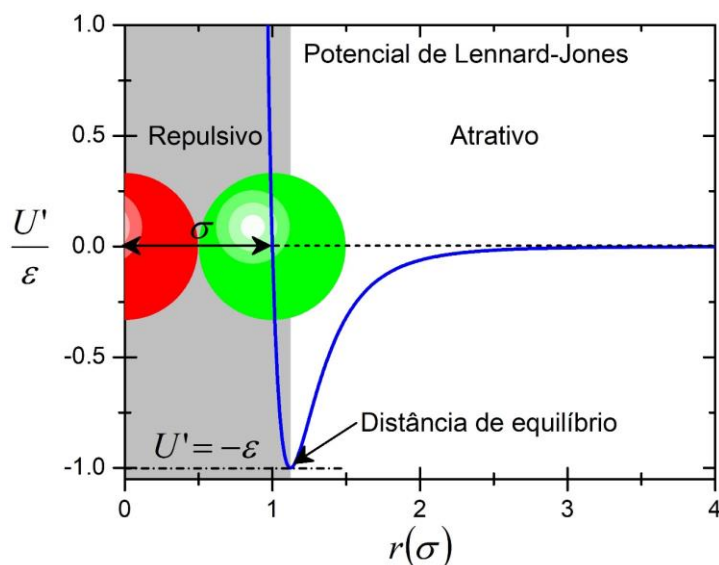
em que  $r$  é a distância entre os átomos,  $U' = -\epsilon$  caracteriza a profundidade do poço do potencial no ponto de equilíbrio estável e  $\sigma$  é a distância que caracteriza o tamanho dos átomos  $U' = 0$  (AMARAL, 2014), como ilustrado no gráfico da figura 3.7.

Como já discutido anteriormente, qualquer potencial arbitrário, mesmo o de Lennard-Jones, pode ser descrito por um potencial harmônico no limite de pequenas oscilações. No caso da figura 3.7, o átomo representado pela esfera verde estaria oscilando, nesta situação, em torno de sua distância de equilíbrio em relação à esfera vermelha.

O estado líquido caracteriza-se por possuir moléculas que podem se movimentar livremente entre si, caracterizando sua fluidez. Essa característica microscópica impede que os líquidos assumam uma forma fixa como os sólidos. As forças intermoleculares presentes nos líquidos permitem que as moléculas se atraiam mutuamente, conferindo propriedades como a tensão superficial e a viscosidade (AMARAL, 2014). As partículas que compõem uma

determinada substância no estado líquido possuem mais graus de liberdade do que a mesma em seu estado sólido.

**Figura 3.7** – Potencial de pares de Lennard-Jones descrito pela equação (3.6), mostrando a distância de equilíbrio dada pelo mínimo do potencial, a energia de dissociação  $U' = -\varepsilon$  da molécula diatômica, representada por duas esferas, e a distância mínima  $\sigma$  caracterizada por  $U' = 0$ . A área sombreada corresponde a região de repulsão e a área restante a de atração do potencial. A energia negativa significa que o sistema está em um estado ligado.



Fonte: Elaborado pelo autor.

O estado gasoso caracteriza-se pela liberdade de suas partículas nas três dimensões espaciais e por estas interagirem fracamente entre si. As partículas constituintes dos gases possuem mais graus de liberdade que as mesmas em seu estado líquido, colidindo entre si e com as paredes do recipiente que as contém. Os gases também são fluidos, assim como os líquidos, entretanto não possuem volume fixo. No tratamento termodinâmico, os gases possuem o comportamento mais simples. O modelo dos gases ideais é particularmente útil para a descrição do comportamento de gases reais na maioria dos casos, especialmente nas condições de rarefações extremas e temperaturas distantes de seus pontos de liquefação (NUSSENZVEIG, 1997). A equação de estado térmica que permite a descrição termodinâmica de um gás ideal é,

$$PV = nRT \quad (3.7)$$

em que  $P$  é a pressão,  $V$  o volume,  $n$  o número de mols,  $R$  a constante universal dos gases ideais e  $T$  a temperatura do gás (NUSSENZVEIG, 1997).



Para uma melhor descrição dos gases reais, as forças de atração intermoleculares devem ser consideradas. A equação de estado de Van der Waals, elaborada empiricamente pelo físico holandês Johannes Diederik Van der Waals (1837 – 1923), considera o tamanho das partículas constituintes dos gases reais, além das forças de atração entre suas partículas,

$$\left(P + \frac{n^2 a}{V^2}\right)(V - nb) = nRT, \quad (3.8)$$

sendo  $a$  e  $b$  constantes empíricas relacionadas, respectivamente, com as forças de atração intermoleculares e com o tamanho molecular (AMARAL, 2014).

Com o nosso produto educacional é possível abordar conceitualmente as características microscópicas dos estados sólido, líquido e gasoso. Contudo, o dispositivo simulador foi utilizado principalmente para representar o movimento térmico de sistemas sólidos e suas características principais, sobretudo os sólidos cristalinos para a introdução de conceitos de cristalografia no Ensino Médio. A representação da rede cristalina simulada se baseia no modelo da esfera rígida, que será brevemente descrito na seção 3.2.1, com os átomos sendo representados por esferas e suas ligações através de elásticos, não incluindo elementos que possam descrever o movimento livre dos elétrons, por exemplo, como no caso dos metais. Portanto, utilizando o simulador o professor pode abordar de forma ilustrativa e experimental uma estrutura cristalina específica, definida previamente durante a montagem do dispositivo. Contudo, este permite demonstrar de forma geral o mecanismo da condução térmica, conceito que pode ser estendido a todos os materiais sólidos.

### 3.1.3 Condução térmica

Existem três mecanismos que podem resultar em uma mudança na energia interna de um sistema físico. Estes são conhecidos como condução, convecção e irradiação (HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, 2007). Em cada um desses mecanismos a energia interna do sistema é modificada, ou transmitida, de maneira diferente, podendo ocorrer em estados físicos específicos, como é o caso da convecção.

A irradiação é o método pelo qual energia é transferida entre os corpos através de ondas eletromagnéticas. A convecção, por sua vez, ocorre em fluidos, como líquidos e gases. Neste mecanismo, a energia é transmitida via correntes de convecção causadas pela variação de densidade da substância, como consequência da diferença de temperatura na mesma. O

processo de condução se dá de maneira mais eficiente em sólidos devido à pequena distância entre as partículas, mas também ocorre em líquidos e gases. Como já discutido, este é o principal mecanismo de transmissão de energia explorado através do nosso simulador mecânico.

A condução térmica é caracterizada microscopicamente pela transferência espontânea de energia via colisões entre as partículas vizinhas que constituem a substância, sempre a partir de um ponto de maior temperatura para outro ponto de menor temperatura ao longo do material.

A quantidade de energia  $Q$  transferida através de calor durante um intervalo de tempo  $\Delta t$  é diretamente proporcional à diferença de temperatura  $\Delta T$  entre os pontos considerados e inversamente proporcional à espessura do material  $\Delta x$ . Desta forma,  $Q$  é proporcional à  $\Delta T/\Delta x$ . Esta última expressão é chamada de gradiente de temperatura.

A quantidade de energia  $Q$  também é proporcional à área  $A$  através da qual a energia está fluindo. A equação que descreve a condução térmica em sólidos em relação à uma espessura e intervalo de tempo infinitesimais, é dada por,

$$\frac{\delta Q}{dt} = -Ak \frac{dT}{dx}, \quad (3.9)$$

sendo  $k$  uma constante de proporcionalidade positiva, denominada de condutividade térmica da substância (NUSSENZVEIG, 1997). A variação de energia no tempo dada pela razão  $\delta Q/dt$  exprime a potência térmica (YOUNG & FREEDMAN, 2015) e é medida em Watts (W) no S.I. O sinal negativo indica que a energia flui no interior do material a partir de regiões de maior temperatura para as de menor temperatura. Os valores da condutividade térmica indicam se a substância é boa condutora térmica ou isolante. Quanto maior o valor de  $k$ , relativamente melhor condutora térmica é uma substância.

A variação de energia através de calor apresentada na equação (3.9) é descrita por uma diferencial inexata  $\delta Q$ , pois esta variação depende do processo que é realizado no sistema para mudar o seu estado. Ou seja, para determinar tal variação não basta sabermos apenas os estados inicial e final de equilíbrio do sistema, é necessário saber o processo realizado, pois este pode ser mais ou menos eficaz.

Os metais, de modo geral, são bons condutores térmicos, do mesmo modo que são bons condutores elétricos (NUSSENZVEIG, 1997). Essas propriedades são explicadas devido a existência de elétrons livres presentes nas estruturas cristalinas metálicas e que contribuem para a propagação do movimento térmico, além de permitirem a formação de corrente elétrica quando submetidos a uma diferença de potencial elétrico. Exemplos de sólidos metálicos bons

condutores térmicos e elétricos são a prata, o ouro e o cobre. Por outro lado, sólidos que possuem elétrons fortemente ligados aos seus núcleos atômicos, isto é, não apresentam portadores de cargas livres são, de maneira geral, maus condutores térmicos e elétricos. Como exemplo tem-se a madeira, a borracha e o vidro.

Os líquidos por sua vez, podem ser considerados maus condutores térmicos, embora possam transferir energia por convecção. Em última análise, podemos considerar os gases como bons isolantes térmicos, como o ar que é uma mistura gasosa (NUSSENZVEIG, 1997). O ar contribui significativamente com a capacidade de isolamento térmico de vários materiais, como os tecidos de cobertores e roupas, a neve e o poliestireno expandido (EPS), sendo este último utilizado amplamente na confecção de recipientes térmicos para alimentos e experimentos científicos.

Como já descrito, a condução térmica será o principal mecanismo de transmissão de energia abordado em nosso produto educacional. Na nossa representação os aspectos internos da estrutura atômica não são considerados e a propagação do movimento térmico é simulada apenas via colisões atômicas. Com o simulador não é possível mostrar o papel das cargas elétricas livres na promoção da propagação do movimento térmico nos metais e em sólidos cristalinos não metálicos. Entretanto, caberá ao professor apresentar o conceito de elétrons livres durante a utilização do simulador, a fim de aprofundar e enriquecer sua aula.

## 3.2 CRISTALOGRAFIA

A cristalografia é a área da ciência que estuda a disposição e ligação dos átomos em sólidos cristalinos e a estrutura geométrica de redes cristalinas. Esta é uma das ciências mais multidisciplinares que existe, ligando diferentes áreas de pesquisa e tem contribuído significativamente para o avanço da ciência e da tecnologia. Sua origem remonta da descoberta da difração de raios-X no início do século XX e, mesmo atualmente, a técnica que utiliza esse fenômeno ainda é empregada para a realização de diversos estudos sobre a estrutura dos materiais (TORRIANI, 2014).

Os raios X foram descobertos pelo físico alemão Wilhelm Conrad Röntgen (1845 – 1923) em 1895. Desde sua descoberta, esse tipo de radiação foi rapidamente aplicado para a realização de diagnósticos médicos. A utilização dos raios X para a caracterização microscópica de cristais ocorreu com o trabalho do físico alemão Max von Laue (1879 – 1960).

Em 1912, Laue descobriu que um feixe de raios X sofria difração ao atravessar cristais, demonstrando com isso, a existência de simetria e organização dos átomos nestes tipos de sólidos. Essa descoberta permitiu, desde então, o estudo da estrutura de diversas substâncias, rendendo o prêmio Nobel de Física a Max von Laue em 1914 (TORRIANI, 2014).

Uma das principais descobertas possibilitadas pela cristalografia no século XX, foi a identificação da estrutura dupla helicoidal da molécula de ácido desoxirribonucleico (DNA - *deoxyribonucleic acid*), realizada pioneiramente pela química inglesa Rosalind Elsie Franklin (1920 – 1958). Entretanto, a cientista britânica não recebeu o devido reconhecimento e essa importante descoberta foi creditada aos pesquisadores James Dewey Watson (nascido em 1928), Francis H. C. Crick (1916 – 2004) e Maurice H. F. Wilkins (1916 – 2004), que receberam o prêmio Nobel de Medicina em 1962. Ao todo, as descobertas possibilitadas pela cristalografia já renderam 29 prêmios Nobel em diversas áreas da ciência (TORRIANI, 2014).

Devido ao grande número de descobrimentos importantes possibilitados por essa área, a Organização das Nações Unidas para a Educação e Cultura (UNESCO), instituiu o ano de 2014 como o Ano Internacional da Cristalografia. Com o nosso produto educacional é possível introduzir alguns conceitos básicos dessa importante ciência multidisciplinar para auxiliar no entendimento sobre a organização microscópica dos materiais e de sua importância para o desenvolvimento da ciência contemporânea.

### 3.2.1 Sólidos Cristalinos

As substâncias sólidas são classificadas de acordo com a organização de suas partículas constituintes, átomos ou íons, podendo ser cristalinos ou amorfos. Os sólidos cristalinos caracterizam-se pela ordem de longo alcance, isto é, pela repetição de arranjos tridimensionais que se estabelecem ao longo de grandes distâncias atômicas. Chamamos de estrutura cristalina a maneira que os átomos e íons estão ordenados espacialmente. Sob condições normais de solidificação, são sólidos cristalinos todos os metais e muitos polímeros (CALLISTER JR, 2000). O ferro (Fe,  $Z= 26$ ), o alumínio (Al,  $Z = 13$ ) e o cobre (Cu,  $Z = 29$ ) são exemplos bem conhecidos de metais. Exemplos de minerais são o quartzo ( $\text{SiO}_2$ ), o coríndon ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) e a fluorita ( $\text{CaF}_2$ ) (NASCIMENTO; MACHADO, 2018).

A descrição dos sólidos cristalinos utiliza o modelo da esfera rígida atômica, onde cada átomo é representado por uma esfera rígida e maciça. Nesta descrição, os átomos vizinhos estão em contato entre si. Chama-se de cristal ideal, o sólido cristalino constituído por uma estrutura atômica que se repete infinitas vezes ao longo da extensão do material. Nos metais alcalinos, a

unidade estrutural básica é um único átomo, enquanto para certas proteínas a unidade básica chega a possuir 10.000 átomos (KITTEL, 1978).

O agrupamento periódico e regular de pontos no espaço é chamado de rede. O grupo de átomos que formam uma rede e estão ligados a cada ponto desta rede é chamado de base. Esta base se repete periodicamente formando a estrutura cristalina. Para o cristal ideal, a rede é definida por três vetores fundamentais de translação  $\vec{a}$ ,  $\vec{b}$  e  $\vec{c}$ , de modo que as configurações atômicas da rede parecem ser idênticas, quer sejam observadas a partir de qualquer ponto  $r$  ou de um ponto dado por,

$$\vec{r}' = \vec{r} + u\vec{a} + v\vec{b} + w\vec{c}, \quad (3.10)$$

sendo  $u$ ,  $v$  e  $w$  números inteiros arbitrários. Uma rede é definida pelo conjunto de pontos  $\vec{r}'$ , dado pela equação (3.10), para todos os valores dos inteiros  $u$ ,  $v$  e  $w$ . A estrutura cristalina é formada quando uma base de átomos é ligada identicamente a cada ponto da rede (KITTEL, 1978). De maneira simplificada, temos:

$$rede + base = estrutura\ cristalina. \quad (3.11)$$

Os sólidos cristalinos que apresentam ordem de longo alcance, se estendendo até as dimensões macroscópicas são chamados de monocristais. Estes são concebidos na natureza em condições especiais de temperatura e pressão e podem ser obtidos também em laboratório (AMARAL, 2014). Os minerais, de modo geral, podem se apresentar na forma de monocristal na natureza. Entretanto, a ocorrência de exemplares de grandes dimensões é muito rara. Em laboratório além da temperatura e pressão, a fabricação de monocristais exige controle rigoroso de outros parâmetros como concentração e pureza dos reagentes e tempo de síntese (WANG *et al.*, 2009). A obtenção de monocristais artificiais possui amplas aplicações tecnológicas, como a construção de dispositivos lasers a partir de rubi sintético ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) e a confecção de circuitos integrados a partir do silício monocristalino. Outros exemplos de materiais monocristalinos utilizados em aplicações tecnológicas são o arsenieto de gálio (GaAs), o óxido de alumínio e ítrio ( $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ ), também conhecido como YAG, para a confecção de lasers de estado sólido, o niobato de lítio ( $\text{LiNbO}_3$ ) e o tantalato de lítio ( $\text{LiTaO}_3$ ) para a confecção de circuitos integrados, entre outros (AZEVEDO, 2013).

Por outro lado, sólidos cristalinos cuja ordem de alcance se restringe à escala micrométrica são chamados de policristais. Os metais e as cerâmicas, em geral, são tipicamente

policristalinos. Há ainda sólidos que possuem ordens de alcance nanométricas, sendo chamados de nanocristais (AMARAL, 2014).

Nanocristais são partículas com estrutura cristalina com pelo menos uma das dimensões na ordem de até 100 nm. Esses materiais possuem diferentes aplicações tecnológicas, como nanocristais semicondutores de CdSe para a confecção de lasers (KLIMOV, 2003) e produção de nanocristais de fármacos que atuam de maneira mais eficiente como ibuprofeno, budesonida e insulina (DURÁN; *et al.*, 2010).

### 3.2.2 Células Cristalinas e Redes de Bravais

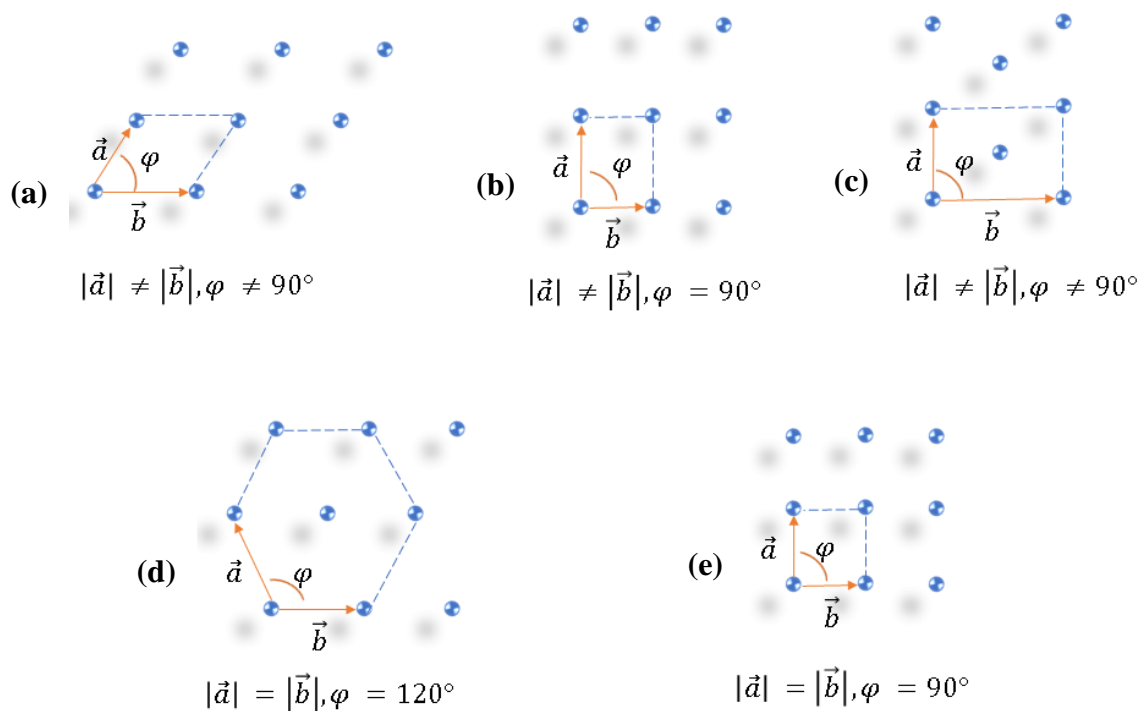
Em duas dimensões, adotamos somente dois vetores de translação  $\vec{a}$  e  $\vec{b}$ . Neste caso, não existe um número ilimitado de redes possíveis, pois os valores dos comprimentos destes vetores e os ângulos entre eles podem ser arbitrários. Porém, existem cinco tipos de redes específicas, chamadas de redes de Bravais em duas dimensões (KITTEL, 1978), as quais são descritas por: rede oblíqua e as quatro redes especiais bidimensionais, quadrada, hexagonal, rede retangular e rede retangular centrada. As menores entidades estruturais que se repetem e formam o cristal são chamadas de células unitárias. Estas são apresentadas na Figura 3.8.

O grafeno é um importante exemplo de sólido bidimensional, veja figura 3.9. Este material é constituído apenas por átomos de carbono ligados covalentemente entre si, apresentando estrutura hexagonal e espessura de apenas um átomo (CAMARGOS; *et al.*, 2017). O grafeno possui diversas aplicações tecnológicas devido às suas excelentes propriedades mecânicas, químicas e elétricas (MARION; HASAN, 2016).

Outros exemplos de sólidos bidimensionais são o  $\beta$ -siliceno,  $\beta$ -germaneno, carboneto de silício (SiC), nitreto de boro hexagonal (h-BN) e os calcogenetos de metais de transição (TMC) (MIRÓ, *et al.*, 2014). As estruturas cristalinas destes materiais são mostradas na Figura 3.10.

Em três dimensões as células unitárias são constituídas por prismas formados por três pares de faces paralelas ou paralelepípedos (NUSSENZVEIG, 1997). Os grupos de simetria dos pontos em três dimensões possibilitam a existência de catorze redes de Bravais distintas, uma geral e outras 13 especiais. A rede de Bravais tridimensional geral é chamada triclínica. Essas redes de Bravais são definidas a partir de três eixos,  $a$ ,  $b$  e  $c$  e dos ângulos  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\gamma$  que os eixos formam entre si. Os valores de  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  e os módulos dos eixos  $a$ ,  $b$  e  $c$  são chamados de parâmetros de rede (KITTEL, 1978). Estes eixos e seus respectivos ângulos são mostrados na Figura 3.11.

**Figura 3.8** – Redes de Bravais em duas dimensões, sendo (a) rede oblíqua, (b) rede retangular, (c) rede retangular de face centrada, (d) rede hexagonal e (e) rede quadrada. Em cada rede as relações dos comprimentos dos vetores  $a$  e  $b$  e os ângulos entre eles estão especificadas.



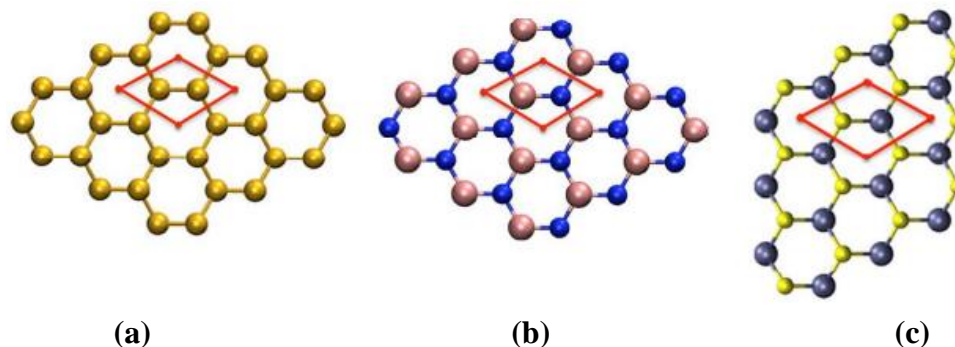
Fonte: Elaborado pelo autor.

**Figura 3.9** – Estrutura hexagonal do grafeno.



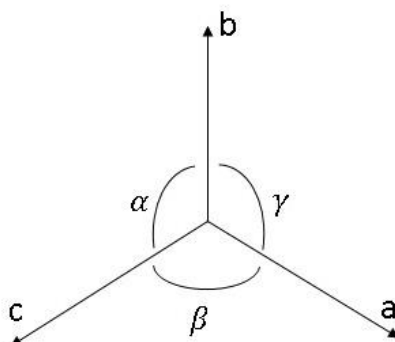
Fonte: Figura extraída de Miró (p. 6537, 2014.).

**Figura 3.10** – Estruturas cristalinas de sólidos bidimensionais. Em (a) é mostrada a estrutura semelhante tanto do  $\beta$ -siliceno quanto do  $\beta$ -germaneno. Em (b) é representada a estrutura do nitreto de boro hexagonal (h-BN). Em (c) é mostrada a estrutura de um TMC. Esferas douradas representam átomos de silício e de germânio, em rosa de boro, em azul de metais, em amarelo calcogenetos e carbono em cinza. As células cristalinas são indicadas em vermelho.



Fonte: Figura extraída de Miró (p. 6540, 2014.).

**Figura 3.11** – Representação dos eixos e dos respectivos ângulos que formam entre si no espaço tridimensional. Os módulos de  $a$ ,  $b$  e  $c$  são chamados parâmetros de rede.



**Fonte:** Elaborado pelo autor.

As catorze redes de Bravais em três dimensões são agrupadas em sete sistemas cristalinos que representam as sete células unitárias convencionais. Esses sistemas cristalinos são o cúbico, tetragonal, ortorrômbico, hexagonal, monoclínico, triclínico e trigonal (KITTEL, 1978). As diferentes posições dos átomos presentes nas redes geram diferentes configurações. Essas configurações podem ser classificadas como simples ou primitiva (P), face centrada (F) e corpo centrado (I).

O sistema cristalino cúbico abriga três redes de Bravais que são oriundas das diferentes configurações dos átomos presentes. Na rede cúbica simples ou primitiva (P), os átomos apenas ocupam os vértices do cubo. A rede cúbica de face centrada (F) é caracterizada pela presença de um átomo no centro de cada face do cubo. Por fim, a rede cúbica de corpo centrado é caracterizada pela presença de um átomo na posição central e interior do cubo.

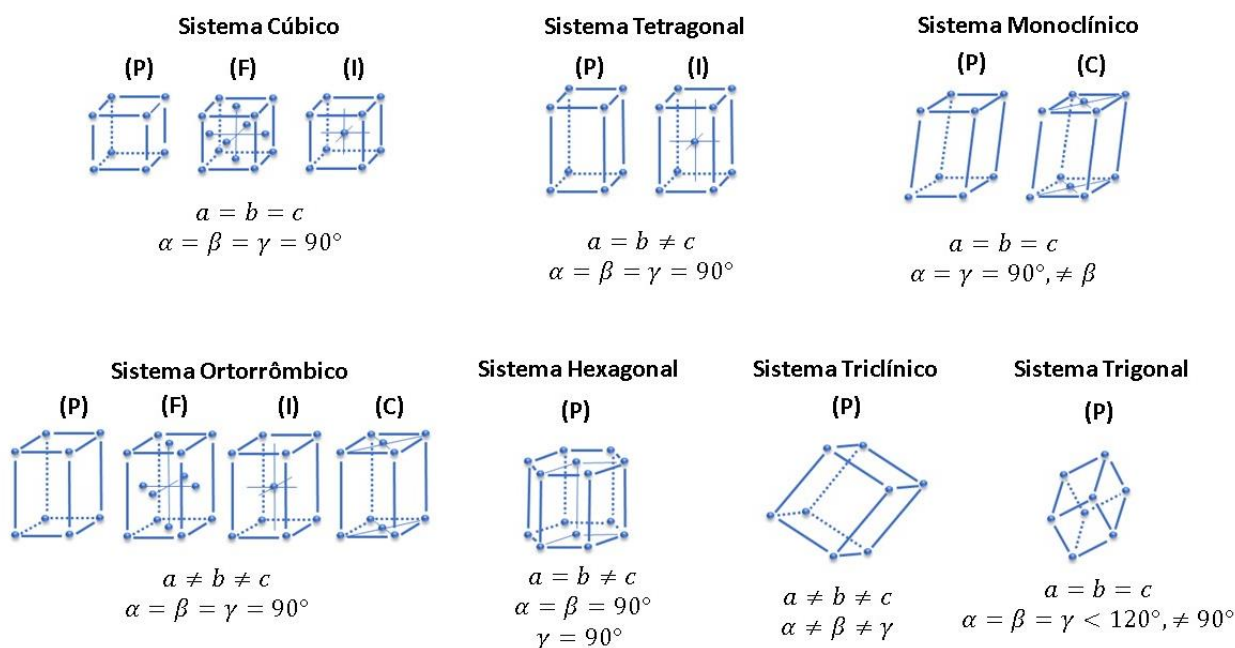
O sistema tetragonal apresenta duas redes, a tetragonal simples (P) e a tetragonal de corpo central (I). O sistema cristalino ortorrômbico abriga quatro redes de Bravais: simples (P), de face centrada (F), de corpo centrado (I) e ainda a rede caracterizada pela presença de um átomo central nas faces superior e inferior, configuração denotada pela letra (C). O sistema monoclínico abriga a rede monoclínica simples e a rede definida pela configuração C. Os sistemas cristalinos hexagonal, triclínico e trigonal apresentam apenas uma rede na configuração simples. As catorze redes de Bravais são apresentadas na Figura 3.12.

Em torno de 90% dos elementos metálicos se apresentam sob estruturas altamente densas quando se solidificam, sendo estas a cúbica de corpo centrado, cúbica de face centrada e hexagonal compacta (CARAM, 2000). Os metais não assumem a estrutura cúbica simples,



pois apresenta baixo índice de ocupação dos átomos. O polônio é uma exceção e um exemplo de material que se apresenta sob estrutura cúbica simples (CARAM, 2000).

**Figura 3.12** – As catorze redes de Bravais em três dimensões. Estas são agrupadas em sete sistemas cristalinos (cúbico, tetragonal, ortorrômbico, hexagonal, monoclinica, triclínica e trigonal).



**Fonte:** Elaborado pelo autor.

A estrutura cúbica de corpo centrado é encontrada por exemplo no tântalo, tungstênio, vanádio, cromo, lítio e potássio. Já a estrutura cúbica de face centrada é encontrada por exemplo no alumínio, prata, ouro, platina, chumbo e em cristais de argônio. O selênio, telúrio, berílio, magnésio, cádmio e cobalto são exemplos de substâncias que apresentam a estrutura hexagonal. Um mesmo metal pode se apresentar sob diferentes estruturas, dependendo da pressão e temperatura de cristalização (CARAM, 2000). O ferro, por exemplo, pode ser encontrado tanto na estrutura cúbica de corpo centrado, quanto na estrutura cúbica de face centrada, dependendo da temperatura de cristalização (CARAM, 2000).

Dentre os minerais conhecidos, cerca de 30,8% se apresentam sob o sistema monoclinico, enquanto 28,6% ocorrem na forma do sistema ortorrômbico. O ortoclásio ( $\text{KAlSi}_3\text{O}_8$ ), jadeíta ( $\text{Na}(\text{Al}, \text{Fe}^{3+})\text{Si}_2\text{O}_6$ ) e o talco ( $\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ ) são exemplos de minerais que se apresentam sob o sistema monoclinico (BRANCO, 2014). O topázio ( $\text{Al}_2\text{SiO}_4(\text{F}, \text{OH})_2$ ) e o crisoberílio ( $\text{BeAl}_2\text{O}_4$ ), por exemplo, se apresentam sob o sistema ortorrômbico. O sistema trigonal aparece em 10,1%, como o coríndon ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) e a turmalina ( $(\text{Na}, \text{Ca})(\text{Fe}^{2+}, \text{Fe}^{3+}, \text{Mg}, \text{Al}, \text{Li})_3(\text{Al}, \text{Fe}^{3+}, \text{Cr}^{3+}, \text{Mg})_6(\text{BO}_3)_3\text{Si}_6\text{O}_{18}(\text{O}, \text{OH}, \text{F})_4$ ). O sistema triclínico ocorre

em 9%, dos minerais, sendo o microclínio ( $\text{KAlSi}_3\text{O}_8$ ) e a rodonita ( $(\text{Mn}^{2+}, \text{Fe}^{2+}, \text{Mg}, \text{Ca}) \text{SiO}_3$ ) alguns exemplos (BRANCO, 2014).

O sistema cúbico ocorre em 7,8% dos minerais, como por exemplo o diamante (C), a pirita ( $\text{FeS}_2$ ) e a sodalita ( $\text{Na}_8\text{Al}_6\text{Si}_6\text{O}_{24}\text{Cl}_{12}$ ). O sistema hexagonal ocorre em 7%, como a apatita ( $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{F}, \text{Cl}, \text{OH})$ ) e o quartzo ( $\text{SiO}_2$ ). Por fim, o sistema cristalino tetragonal ocorre em 6,4% dos minerais catalogados, como o rutilo ( $\text{TiO}_2$ ) e a cassiterita ( $\text{SnO}_2$ ) (BRANCO, 2014).

O produto educacional que desenvolvemos também tem como foco de ensino alguns conceitos introdutórios sobre redes cristalinas em três dimensões, como células unitárias e redes de Bravais, por exemplo. O simulador mecânico que integra nosso produto educacional representa uma estrutura cristalina composta por oito células unitárias cúbicas de face centrada. Buscamos através disso, simular tanto a estrutura ordenada de uma porção de um cristal, quanto o comportamento térmico dos átomos constituintes.

Este dispositivo é capaz de simular apenas de forma qualitativa e ilustrativa o movimento térmico de uma rede cristalina. Apesar da estrutura apresentada na motagem possuir a forma de células cúbicas de face centrada, observada em materiais como o argônio sólido, ouro, prata, platina e alumínio, não é possível diferenciar tais materiais com o simulador ou estabelecer uma relação direta com dados experimentais sobre a vibração de cada plano cristalino, pois assumimos o mesmo tipo de ligação em todas as direções (elásticos).

Além disso, como o simulador é baseado no modelo de esfera rígida, os aspectos internos dos átomos e da rede, como elétrons livres, não são considerados. Assim, o simulador também não é capaz de explicar a diferença da capacidade de condução térmica entre materiais que se cristalizam na forma da estrutura cúbica de face centrada. Ou seja, não é possível ilustrar porquê o ouro é um bom condutor térmico e o argônio sólido não. Apesar disso, é possível ilustrar e discutir com os alunos o processo da condução térmica de forma geral. A discussão destes aspectos específicos pode ser realizada pelo professor a fim de aprofundar e enriquecer a aula no momento da aplicação de nosso produto educacional em sala de aula.

# Capítulo 4

## DESCRIÇÃO E APLICAÇÃO DO PRODUTO EDUCACIONAL

---

---

Neste capítulo, descrevemos as principais considerações para a elaboração do produto educacional e das atividades elencadas para compor a UEPS, construída e aplicada em sala de aula. Adicionalmente, apresentamos em detalhes a metodologia adotada para a aplicação do produto e discutimos as respostas dos alunos diante das atividades realizadas.

### 4.1 DESCRIÇÃO GERAL DO PRODUTO EDUCACIONAL

O produto educacional elaborado consiste de uma UEPS concebida na forma de uma apostila no formato *e-book* intitulada Caderno do Professor, em que conceitos de física térmica e cristalografia são trabalhados com o auxílio de um simulador mecânico, que pode ser construído tanto pelo professor quanto pelos alunos. Adicionalmente, foi feito um material exclusivo para o aluno, intitulado Caderno do Aluno, para o professor poder acompanhar a evolução do aluno nos temas propostos através de atividades e questionários. Os dois cadernos são apresentados integralmente no Apêndice desta dissertação.

O Caderno do Professor é um material didático digital no formato PDF que contém os assuntos abordados, as respostas dos problemas propostos no Caderno do Aluno, os manuais de construção dos dispositivos propostos e as recomendações e sugestões pedagógicas para uso e desenvolvimento das atividades em sala de aula. Este material pode ser impresso livremente pelos professores de Física do Ensino Médio para possibilitar a aplicação em suas turmas. O público-alvo da UEPS que compõe o Caderno do Professor são os estudantes do primeiro ou

segundo ano do Ensino Médio, onde estes conceitos são abordados geralmente na disciplina de Física.

O Caderno do Aluno, destinado aos estudantes, foi também elaborado no formato de *e-book*, mas sem as respostas dos problemas propostas, as recomendações pedagógicas e os manuais de construção. Este material é disponibilizado independentemente para ser impresso para cada aluno.

O simulador mecânico construído é também parte integrante do produto educacional, consistindo de um dispositivo proposto para representar, por meio de analogia, a estrutura interna de um sólido cristalino e, concomitantemente, o movimento térmico das suas partículas constituintes. Tal dispositivo foi idealizado para ser construído preferencialmente pelo professor, para otimizar o tempo em sala de aula. O manual da construção do simulador mecânico está contido no Caderno do Professor sob o título “Manual de Construção: Simulador Mecânico”. Além do simulador mecânico, outro dispositivo foi construído para medir o movimento oscilatório das partículas do sólido cristalino simulado. Este dispositivo consiste de um instrumento de medida e o denominamos sugestivamente de “vibrômetro”, cujo manual de construção também está disponível no Caderno do Professor, sendo intitulado como “Manual de Construção: Vibrômetro”. Apesar de ambos os manuais de construção estarem contidos no Caderno do Professor apenas, estes poderão ser utilizados e disponibilizados independentemente pelos professores para permitir que os alunos construam os dispositivos em suas casas ou mesmo na escola em atividades fora do horário da aula..

Para facilitar a disponibilização e aquisição dos Cadernos do Professor e do Aluno e dos manuais de construção, foi construído, como parte do produto educacional, um site que denominamos “Movimento Térmico em Redes Cristalinas”, disponível no endereço eletrônico:

<https://fisicatermica.wixsite.com/simulador>

Além de permitir o *download* dos arquivos citados, o site permite a interação dos alunos entre si e com o professor por meio de fóruns e *chats*.

Portanto, o nosso produto educacional tem como parte central o Caderno do Professor, mas também inclui outros elementos que derivam dele, sendo estes o simulador mecânico, o vibrômetro, os manuais de construção, o Caderno do Aluno e o site, os quais podem ser utilizados independentemente para o caso do professor ou os alunos desejarem trabalhar com apenas alguma parte do mesmo.

## 4.2 DESCRIÇÃO DO CADERNO DO PROFESSOR E DO ALUNO

O Caderno do Professor traz uma sequência didática pautada na Teoria da Aprendizagem Significativa de David Ausubel. O Caderno do Professor e o do Aluno são idênticos quanto aos conteúdos e aos problemas. Entretanto, o Caderno do Aluno não apresenta qualquer resposta ou dicas de resolução. Ambos os cadernos possuem seis atividades que devem ser desenvolvidas em sala de aula. Cada atividade foi concebida para atender as etapas próprias de uma UEPS e possuem tempo de aplicação sugestivo independentemente, variando entre duas e quatro aulas de cinquenta minutos.

A Atividade 1, intitulada “Para Começar a pensar...”, foi concebida para a realização de um mapeamento inicial para que o professor entenda quais são os conhecimentos prévios dos estudantes. A exploração do conhecimento prévio dos estudantes tem papel fundamental para se iniciar nossa UEPS, uma vez que se trata da variável que mais influencia a aprendizagem significativa (MOREIRA, 2011).

Esse mapeamento pode ser realizado através da elaboração individual pelos alunos de um mapa conceitual pautado em questões norteadoras acerca dos conceitos de calor, temperatura e estrutura interna da matéria. Esse mapa conceitual foi idealizado para ser construído durante uma aula de 50 minutos. Durante a nossa aplicação, os mapas conceituais construídos foram úteis para avaliar os conhecimentos prévios dos estudantes, de maneira que, nenhuma nota numérica foi atribuída para esta atividade. Sugerimos que os conceitos cientificamente incorretos ou inadequados que eventualmente possam aparecer nos mapas elaborados pelos estudantes não sejam corrigidos imediatamente, pois a proposta é que os assuntos sejam abordados e sistematizados posteriormente.

Para facilitar a explicação do professor acerca da elaboração de mapas conceituais, sugerimos a utilização de um vídeo explicativo do *Youtube*, intitulado como: “Aprenda mais sobre os mapas conceituais”. Este está disponível em:

<https://www.youtube.com/watch?v=mhQIAv8Av1s>

Os links de acesso são disponibilizados tanto no Caderno do Professor, quanto no do Aluno. A Atividade 1 é descrita na página 1 do Caderno do Professor e do Caderno do Aluno.

A Atividade 2 foi idealizada para ser realizada no tempo de 4 aulas de 50 minutos e está dividida em duas partes. A primeira parte, a ser realizada em 2 aulas de 50 minutos, é destinada para a resolução de um questionário contendo 6 situações-problema. Esse questionário foi proposto para servir como um organizador prévio, onde os conceitos são apresentados na forma

de problemas que envolvem o cotidiano. Os estudantes devem utilizar apenas seus conhecimentos prévios para a resolução destes problemas, não sendo permitidas consultas a livros didáticos ou à internet para respondê-los. O objetivo desta primeira parte da Atividade 2 é apresentar os conceitos a serem aprendidos pelos alunos, ao passo que permite realizar uma ponte entre seus conhecimentos prévios e o que deveriam saber para solucionar os problemas. As situações-problema referidas acima seguem nas páginas 2, 3 e 4 do Caderno do Professor e nas páginas 2 e 3 do Caderno do Aluno.

A segunda parte da Atividade 2 também foi idealizada para ser realizada em 2 aulas de 50 minutos. O objetivo desta segunda parte é apresentar o conhecimento a ser aprendido de maneira mais geral, fornecendo uma visão inicial de conceitos de Física Térmica e estruturas cristalinas. O primeiro tema abordado é o conceito de calor, apresentado através de um vídeo explicativo elaborado pelo autor deste trabalho. Como o vídeo é de curta duração, este pode ser assistido durante a própria aula. O vídeo pode também ser indicado pelo professor na aula anterior para que os alunos assistam em casa e depois possa ser debatido em sala de aula, ou seja, poderá ser empregado para a realização de uma aula invertida.

Depois da apresentação do vídeo, no Caderno do Aluno são apresentados dois textos, 1 e 2, para leitura. O texto 1 discute a caracterização dos estados físicos da matéria e o texto 2 explica a diferença estrutural entre o quartzo e o vidro. A atividade proposta para esta parte é a resolução de uma situação-problema que deve ser realizada em grupos de 5 alunos. A resolução deve tomar por base o vídeo apresentado e os textos 1 e 2 lidos pela turma. Após a resolução, cada grupo deve apresentar a solução encontrada para os demais grupos da sala, promovendo assim um compartilhamento de ideias entre os grupos da sala.

A Atividade 3 foi idealizada para promover a diferenciação progressiva inicial dos estudantes à medida que as discussões sobre a estrutura cristalina é aprofundada com os mesmos. Esse aprofundamento é promovido através da leitura de um texto que aborda as células unitárias e as redes de Bravais em três dimensões. Após a leitura do texto, é proposta a resolução de três atividades que exploram a compreensão dos alunos acerca do texto.

A Atividade 4 foi desenvolvida para ser realizada em 2 aulas de 50 minutos cada. Ela objetiva dar continuidade ao aprofundamento do conteúdo, promovendo diferenciação progressiva, ao passo que possibilita a reconciliação integrativa ao retomar alguns conceitos já estudados. Em relação ao conteúdo, a Atividade 4 foi concebida para unir o conceito de movimento térmico e condução térmica ao conceito de estrutura cristalina. É nesta parte que os estudantes poderão associar os conceitos aprendidos pertencentes à Física Térmica e à cristalografia.

Nesta atividade os estudantes podem utilizar o simulador mecânico construído para realizar observações que podem auxiliar significativamente no entendimento dos conteúdos indicados. Deste modo, a Atividade 4 teve importância central durante a aplicação do nosso produto, possuindo um caráter essencialmente experimental. O tipo de experimentação empregada nesta atividade foi a demonstrativa. Esta atividade foi proposta para ser realizada em duas etapas distintas, a Situação 1 e a Situação 2. Na primeira situação, os estudantes deverão, em grupos de 5 integrantes ou outra configuração que atenda melhor as necessidades do professor em sala de aula, observar o funcionamento do simulador, responder algumas questões e apresentar a análise realizada à turma em forma de roda de conversa. Na Situação 2, os alunos deverão, também em grupos de 5 integrantes, tentar compreender o que ocorre no processo de condução térmica microscopicamente, associar o potencial de Lennard-Jones à simulação apresentada e compartilhar as conclusões com os colegas da turma.

Para a execução da Atividade 5, sugerimos 4 aulas de 50 minutos para dar seguimento no aprofundamento do conteúdo através da prática experimental. Nesta atividade, os estudantes deverão realizar medições das amplitudes de vibração dos átomos representados utilizando o vibrômetro. O objetivo desta atividade é a construção pelos alunos de um modelo matemático que relacione a amplitude de oscilação dos átomos representados na simulação com suas respectivas posições na rede cristalina. Sob este aspecto, o tipo de experimentação empregado nesta atividade será a investigativa. Os alunos deverão também construir um modelo tridimensional da rede simulada, indicando as amplitudes de oscilação dos átomos representados.

Por fim, a Atividade 6 foi idealizada para servir de avaliação final. Nesta, os alunos deverão responder a um questionário que traz situações-problema um pouco mais elaboradas, associando os conceitos aprendidos através da utilização do simulador mecânico. Esta atividade permite a realização de uma reconciliação integrativa final entre os estudantes. O professor, se desejar, pode realizar posteriormente uma análise dos resultados a fim de fazer um levantamento sobre a viabilidade do desenvolvimento das atividades com relação ao conteúdo e ao tempo necessário para a realização delas, o que pode fornecer parâmetros importantes para a otimização em aplicações futuras.

Na Tabela 4.1 apresentamos um resumo das atividades que compõem os Cadernos do Professor e do Aluno.

**Tabela 4.1** – Descrição geral das atividades propostas nos Cadernos do Professor e do Aluno.

<i>Atividade do Caderno</i>	<i>Tempo Estimado (aula de 50 minutos)</i>	<i>Objetivo de Ensino e Aprendizagem</i>	<i>Atividade Proposta</i>
1	1 aula	Explorar o conhecimento prévio dos estudantes.	Elaboração de um mapa conceitual.
2	4 aulas	Propor um organizador prévio e introduzir o conhecimento a ser ensinado.	Assistir vídeo, leitura de textos e resolução de problemas.
3	2 aulas	Aprofundar o conhecimento de forma teórica.	Leitura de texto e resolução de problemas.
4	2 aulas	Aprofundar o conhecimento de forma experimental.	Observação e análise de simulação e resolução de problemas.
5	4 aulas.	Aprofundar o conhecimento por meio de modelos gráficos e matemáticos.	Construir um mapa tridimensional da rede cristalina simulada e descrever o comportamento através de uma função matemática.
6	2 aulas.	Promover a reconciliação integrativa final e permitir a análise das evidências de aprendizagem.	Realizar uma prova com problemas que abordam todos os assuntos estudados.

**Fonte:** Elaborado pelo autor.



### 4.3 DESCRIÇÃO DO SIMULADOR MECÂNICO E DO VIBRÔMETRO

As aulas 4 e 5 apresentadas nos Cadernos do Professor e do Aluno têm por foco a utilização do simulador mecânico que idealizamos. A construção deste dispositivo se deu através de materiais de relativo baixo custo e segue explicada de maneira detalhada no Caderno do Professor, disponível no Apêndice.

A prática experimental de nossa sequência didática é concentrada na utilização do simulador mecânico. Como já mencionado, o simulador consiste de um modelo de uma rede cristalina cúbica de face centrada. Nossa rede cristalina contém 8 células acopladas, totalizando a representação de 63 átomos. Uma foto do dispositivo é apresentada na figura 4.1.

Enfatizamos que o modelo atômico adotado é o da esfera rígida, sendo os átomos representados por esferas de poliestireno expandido (EPS). As ligações entre os átomos de nossa rede simulada são representadas por elásticos. Cada átomo representado se conecta aos vizinhos, simulando assim, as ligações químicas ou interações interatômicas, ambas de natureza elétrica.

**Figura 4.1** – Simulador mecânico construído para introdução de conceitos de física térmica e cristalografia. A rede cristalina simulada contém 63 átomos representados por bolinhas de isopor ligadas por elásticos, para representar as interações entre pares. A estrutura do sistema é cúbica de face centrada. O painel de controle contendo dois botões é mostrado na parte inferior à esquerda e é utilizado para estimular a esfera (em preto) mais próxima deste mesmo painel.



**Fonte:** Elaborado pelo autor.

A utilização de elásticos para representar as ligações atômicas possui ainda a vantagem de exercer uma força restauradora nas bolinhas, de maneira que as mesmas vibram em torno de uma posição de equilíbrio estável. Esta vantagem se traduz na possibilidade de utilizar um potencial harmônico para a descrição teórica do sistema e facilitar a introdução de potenciais mais complexos como o de Lennard-Jones.

Uma das vantagens do nosso aparato em relação à modelos didáticos similares já existentes é a motorização que implementamos no sistema. A rede cristalina simulada tem a capacidade de ilustrar o movimento térmico através da impressão de movimento nas esferas realizada por um motor vibrador. Apenas uma única esfera é motorizada e o movimento é transferido às outras por meio dos elásticos. Por originar o movimento na rede, chamamos a esfera motorizada de esfera primária. Assim, nosso simulador é capaz de simular a propagação de energia, traduzida pela transmissão do movimento entre as esferas, em uma rede cristalina.

Na parte inferior à esquerda da figura 4.1 é mostrado o painel de controle do simulador mecânico. Este abriga uma bateria de 9V que alimenta o motor e dois botões de controle. Um dos botões é o acionamento do modo contínuo, utilizado para ativar a agitação das esferas na rede de modo ininterrupto. Com este modo podemos simular um sólido cristalino com diferentes temperaturas ao longo de sua extensão, uma vez que a amplitude de vibração das esferas diminui em relação à distância da esfera primária. É possível verificar visualmente a diferença de vibração ao longo da rede, possibilitando assim a comparação das regiões de maior temperatura e menor temperatura. Fisicamente, o modo contínuo representa o comportamento microscópico de um sólido cristalino num dado instante em que ele está sendo aquecido a partir de uma de suas extremidades. Devido à esta configuração, não é possível representar um sólido cristalino em equilíbrio térmico com nosso dispositivo, sendo esta, uma de suas limitações.

O segundo botão do painel aciona o modo pulso. Quando este botão é pressionado, a esfera motorizada é ligada e desligada, imprimindo movimento nas demais na forma de um único pulso. Esta função foi idealizada para ilustrar a propagação do estímulo vibracional da esfera primária para as demais, para facilitar a discussão e o entendimento de conceitos relacionados à propagação de energia ao longo da rede cristalina, condução térmica, aumento ou diminuição de temperatura no sistema, entre outros.

Como discutido na descrição da Atividade 5, a abordagem experimental conduzida com o uso do simulador permite a realização de medidas que podem ser utilizadas para modelar o comportamento do sistema real e, por analogia, auxiliar na compreensão simplificada do comportamento de cristais reais. A grandeza medida é a amplitude de oscilação das esferas da

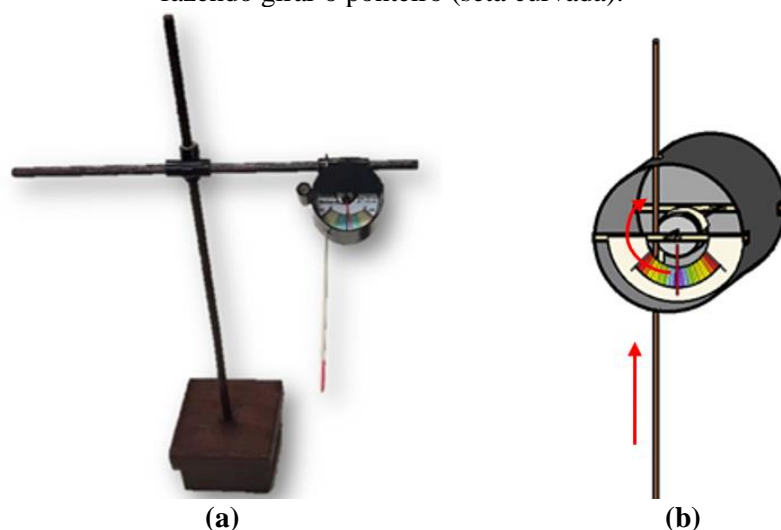
rede e esta é possibilitada com o uso do vibrômetro, que consiste em um dispositivo desenvolvido e construído por nós mesmos a partir de materiais de baixo custo.

A construção do vibrômetro foi baseada em um instrumento de medida chamado relógio comparador. Este instrumento possui uma haste que, ao ser movimentada para baixo ou para cima, faz mover um ponteiro que indica o deslocamento que pode ser lido através de uma escala graduada. Analogamente, o vibrômetro possui uma haste que chamamos de vareta de medição, capaz de deslocar-se verticalmente. Basicamente, o movimento da vareta de medição faz um filete de papel se enrolar em um pequeno disco, que por sua vez faz girar um ponteiro que indica o deslocamento através de uma escala graduada.

Como mostrado na figura 4.2, desenvolvemos também uma base de sustentação com uma haste, para que o vibrômetro possa ser deslocado e permitir que as medições sejam realizadas em diferentes posições. A medição é realizada introduzindo-se a ponta da vareta de medição em uma esfera da rede, quando a mesma está em repouso. Ao acionar o simulador é possível ler o valor indicado pelo ponteiro na escala graduada, correspondente à amplitude de oscilação da esfera naquela posição.

Apesar de ser um instrumento simples e de fácil montagem, nosso vibrômetro possui uma resolução de 0,3 mm, suficiente para quantificar as pequenas oscilações das esferas mais afastadas em relação à esfera primária. Maiores detalhes sobre a montagem e utilização do vibrômetro são apresentados na Atividade 5 do Caderno do Professor, disponível no Apêndice.

**Figura 4.2** – Dispositivo desenvolvido e construído para quantificar a amplitude de oscilação das esferas na rede simulada, chamado de vibrômetro. Em (a) é mostrado um vibrômetro completo acoplado em sua base. Em (b) é ilustrado o dispositivo aumentado. À medida que a vareta vertical se movimenta (seta vertical), um filete de papel no interior do mesmo se enrola (desenrola) em um disco, fazendo girar o ponteiro (seta curvada).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na tabela 4.2 apresentamos uma síntese sobre as possibilidades e limitações do nosso simulador mecânico.

**Tabela 4.2** – Descrição geral das atividades propostas nos Cadernos do Professor e do Aluno.

<i>Possibilidades</i>	<i>Limitações</i>
Simula uma estrutura cristalina com 8 células unitárias e 63 átomos.	Não permite diferenciar materiais reais com diferentes estruturas cristalinas.
Simula o movimento térmico e a propagação de energia de vibração na rede.	Não possibilita variações da intensidade de vibração da rede.
Permite o reconhecimento de regiões de temperaturas diferentes no cristal.	Não simula o equilíbrio térmico.
Permite a medição da vibração das esferas para construir modelos explicativos.	Não permite distinguir a condução térmica de diferentes substâncias de mesma estrutura cristalina.
Permite descrever as ligações químicas e interatômicas através de um potencial harmônico.	Não permite uma abordagem direta de sistemas mais complexos, descritos por potenciais anarmônicos.

**Fonte:** Elaborado pelo autor.

#### 4.4 DESCRIÇÃO DO SITE

Para facilitar a disponibilização dos Cadernos do Professor e do Aluno e promover uma melhor interação entre os estudantes e os professores à distância, foi criado o site “*Movimento Térmico em Redes Cristalinas*”. Este está disponibilizado no endereço eletrônico <https://fisicatermica.wixsite.com/simulador> (CRISTINO, 2021), e foi construído pelo autor deste trabalho através da plataforma de construção de sites *Wix*. A página inicial do site é apresentada na figura 4.3.

**Figura 4.3** – Página inicial do site de apoio intitulado “*Movimento Térmico em Redes Cristalinas*”. Este site faz parte de nosso produto educacional.



**Fonte:** Elaborado pelo autor.

Os Cadernos do Aluno e do Professor podem ser baixados através dos links “*Baixar nossa apostila*” e “*Para Professores*”, respectivamente, na página inicial. Ambas as opções são mostradas na Figura 4.3. O download da apostila do professor é protegido por uma senha, facilmente deduzível através da dica disponibilizada na página. A senha é a palavra “*Professor*”. Embora simples, a senha foi introduzida para evitar que alunos acessem o documento de forma livre e adquiram as respostas dos problemas propostos.

Para a utilização do site, tanto os alunos quanto os professores, devem se inscrever na opção “*log in*”, no menu superior direito. Os inscritos podem construir perfis, inserir fotos e criar fóruns de discussão, além de interagir com outros usuários na aba “*Interaja!*” do menu superior. A interação pode ser na forma de mensagens via *chat* entre os alunos e os professores.

No link “*Apostila On-line*”, encontra-se uma versão do Caderno do Aluno com atividades possuindo campos de resposta on-line, além dos vídeos indicados nas atividades. Contudo, as respostas dos estudantes ficam armazenadas no banco de dados do site e podem ser visualizadas apenas pelo administrador do mesmo (autor deste trabalho).

O site também possui arquivos auxiliares disponíveis para *downloads*, como os manuais de construção do simulador mecânico e do vibrômetro, disponíveis nos links “*Construa o Simulador*” e “*Construa o Vibrômetro*”, respectivamente. São disponibilizados também arquivos contendo a escala graduada colorida para a construção dos vibrômetros e o mapa tridimensional da rede cristalina simulada, pronta para edição.

A utilização do site é totalmente livre e gratuita. Sua função é centralizar os arquivos a serem disponibilizados aos alunos e professores, além de permitir interação entre os usuários na modalidade remota. Essa última característica foi especialmente importante para a aplicação do produto educacional durante a pandemia de COVID-19 em meados do ano de 2021.

#### 4.5 APLICAÇÃO DO PRODUTO EDUCACIONAL

O produto educacional foi aplicado no ano de 2021 em uma turma regular de 2º ano do Ensino Médio do período da manhã de uma escola particular da cidade de São Roque, estado de São Paulo. Os estudantes desta turma possuíam idade entre 15 e 17 anos, sendo a turma composta por 33 alunos. O produto educacional foi utilizado nas aulas de Física, servindo como material alternativo ao material didático da instituição de ensino.

Os conceitos envolvidos estão enquadrados nas expectativas de ensino e aprendizagem da rede de ensino desta escola, que por sua vez estão em consonância com a BNCC. A aplicação do produto educacional foi autorizada pela coordenação escolar, o material e a proposta geral foram apresentados aos estudantes para que ficassem cientes de suas participações nas atividades.

Como apresentado nas seções anteriores, nosso produto educacional é uma UEPS composta por 6 atividades. A UEPS foi desenvolvida ao longo de 15 aulas, com as 5 primeiras atividades realizadas de maneira remota devido à pandemia de COVID-19. As aulas remotas foram desenvolvidas de maneira on-line por meio de videoconferência e as atividades foram entregues via e-mail e através do site “*Movimento térmico em Redes Cristalinas*” que integra este produto educacional. Apenas a Atividade 6, correspondente à avaliação final, foi realizada presencialmente com o retorno dos estudantes às atividades escolares normais. Todas as atividades de nossa UEPS foram aplicadas utilizando o Caderno do Aluno, corrigidas e devolvidas aos estudantes.

Nesta seção analisamos e discutimos a aplicação do produto educacional e suas potencialidades para auxiliar o professor no tratamento dos conceitos propostos.

#### 4.5.1 Atividade 1

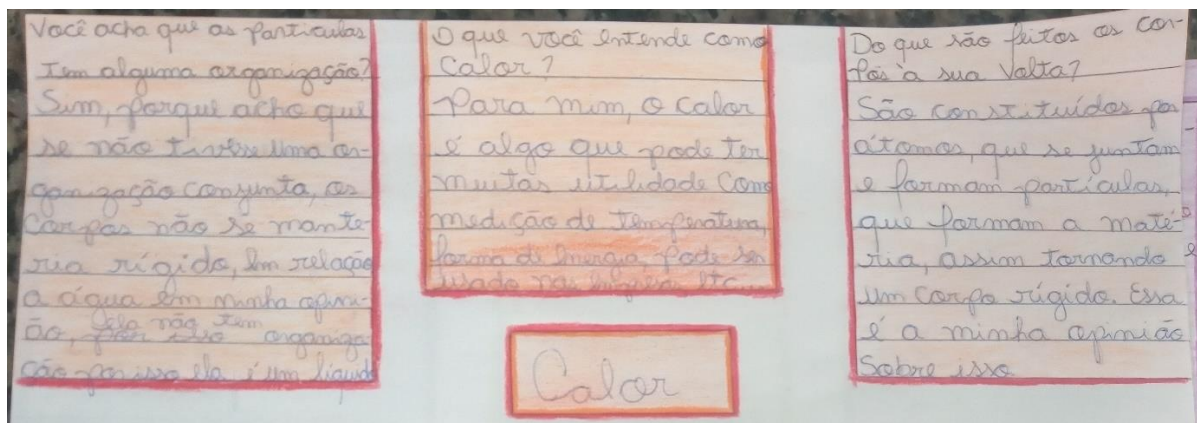
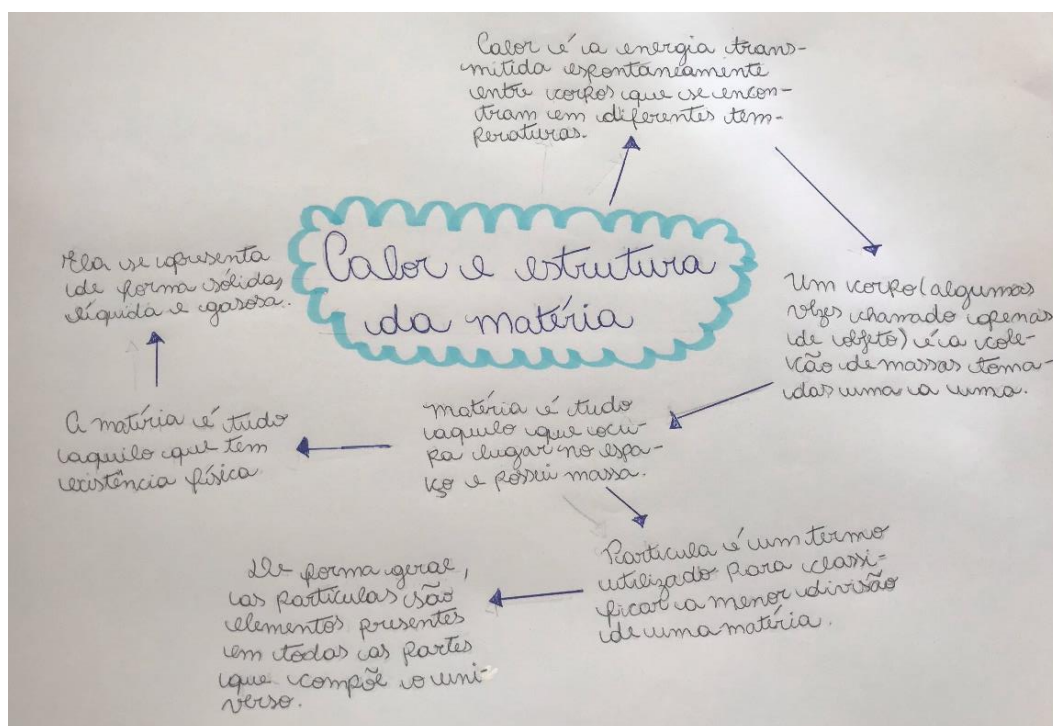
A Atividade 1, intitulada “*Para começar a pensar*”, apresentada na página 1 dos Cadernos do Professor e do Aluno, tem como proposta levantar os conhecimentos prévios dos estudantes através da elaboração de um mapa conceitual. A explicação de como um mapa conceitual deve ser elaborado foi feita pelo professor e complementada por um vídeo explicativo enviado aos estudantes.

No enunciado da atividade foi solicitado aos estudantes que construíssem mapas conceituais individuais e sem consulta sobre o tema “*Calor e Estrutura da Matéria*”. Para auxiliar os estudantes em suas elaborações foram fornecidas algumas questões norteadoras que precisavam estar presentes nos mapas conceituais: O que você entende por calor? Do que são feitos os corpos à sua volta? Você acha que as partículas que formam os corpos possuem alguma forma de organização? Você acha que elas estão paradas?

Na figura 4.4 apresentamos dois exemplos de mapas conceituais elaborados pelos estudantes, que expressam a maioria das respostas dos mesmos. No mapa apresentado na parte superior da figura 4.4 é possível notar que o estudante adicionou informações que provavelmente foram extraídas de alguma fonte de consulta, contrariando a solicitação do professor. Essa atitude foi observada em cerca de 50% da turma. Como os mapas foram elaborados pelos estudantes em casa, não foi possível ter controle sobre a atividade. Isso dificultou o mapeamento sobre o que os estudantes realmente pensam ou sabem sobre as perguntas norteadoras. Contudo, ainda foi possível fazer uma análise crítica às respostas fornecidas pelos alunos. Como mostrado no mapa superior da figura 4.4, o calor é considerado como energia e a massa é utilizada para definir matéria. Conduzimos a discussão sobre estes dois pontos dando ênfase que o calor é o método pelo qual energia é transferida de um corpo para outro devido à diferença de temperatura entre eles, ou seja, está relacionado a um processo. A maioria dos livros didáticos, tanto de graduação quanto do ensino básico, trata o calor de maneira incorreta o definindo como energia em trânsito. A energia é uma propriedade do sistema e o calor não é. Na segunda observação, definir matéria como aquilo que possui massa ou massa como a quantidade de matéria de um sistema físico é o conceito newtoniano de massa, que também é inadequado, pois existe matéria sem massa, como as ondas eletromagnéticas.

Já o mapa apresentado na parte inferior da figura 4.4 possui uma sequência de conceitos que retrata de maneira mais fidedigna os conhecimentos prévios do estudante, devido a informalidade das respostas, fornecidas através de concepções alternativas, e a ausência de termos técnico-científicos. Mapear as concepções alternativas dos estudantes é muito importante para dar um melhor direcionamento nas aulas, pois estas retratam conhecimentos que já estão presentes na estrutura cognitiva dos alunos. Isso se faz ainda mais necessário quando tais concepções envolvem conceitos que podem ser tratados de maneira inconsistente até mesmo nos livros didáticos, como calor e energia, por exemplo.

**Figura 4.4** – Exemplos de mapas conceituais elaborados pelos estudantes.



Fonte: Elaborado pelo Autor.



### 4.5.2 Atividade 2

A Atividade 2 foi dividida em dois momentos. O primeiro foi a utilização de um questionário como organizador prévio, onde foram consideradas 6 questões conceituais com situações-problema do cotidiano. As questões foram apresentadas para os alunos e novamente foi solicitado que as respostas fossem fornecidas sem o auxílio de nenhuma fonte de pesquisa. As respostas foram enviadas através do site criado para esta finalidade. A seguir apresentamos as questões com algumas respostas enviadas pelos estudantes que retratam de maneira geral a forma que eles analisaram os problemas.

**Questão 1:** Se você estivesse em uma praça, durante um dia ensolarado de Verão, e avistasse dois bancos, um feito de ferro e outro de madeira. Qual deles você escolheria para sentar-se? Por quê?

- *“No de madeira, pois o de ferro estaria quente, por conta que ele armazenou o aquecimento.”*
- *“Madeira, porque a capacidade de armazenar temperatura é menor.”*

Todos os alunos escolheram o banco de madeira, pois pela experiência cotidiana eles sabem que este estaria mais confortável para sentar-se do que o banco de ferro. Contudo, a forma que eles tentaram explicar isso é inadequada do ponto de vista científico. De maneira geral, os estudantes consideraram que o ferro armazena mais “alguma coisa”, como temperatura ou aquecimento, e que a sensação de quente é sinônimo de alta temperatura.

A partir desta questão foi possível estabelecer uma discussão sobre o armazenamento de energia em sistemas com calores específicos diferentes, materiais que são bons condutores e isolantes térmicos, equilíbrio térmico, sensação térmica e o uso das terminologias quente e frio. A terminologia calor específico foi introduzida pela primeira vez nesta atividade, de maneira que era esperado que a mesma não surgiria nas respostas dos estudantes.

**Questão 2:** O diamante e o grafite são feitos exclusivamente de átomos de carbono e, apesar disso, possuem características macroscópicas muito diferentes, como cor, dureza e densidade. Se ambos os materiais são formados exatamente pelos mesmos átomos, como você explicaria essas diferenças? Registre suas ideias como resposta!

- *“Eles são sim formados pelos mesmos átomos, mas de maneira diferente e em quantidades diferentes.”*
- *“Digamos que o diamante tenha uma ligação mais intensa com os átomos de carbono, tornando ele com uma durabilidade bem maior. Já o grafite tem uma ligação bem mais fraca tornando ele frágil.”*

O propósito desta questão foi relacionar as diferentes características e propriedades de dois materiais que possuem o mesmo elemento constituinte, mas com configurações atômicas diferentes. De maneira geral os estudantes atribuíram tais diferenças às características internas dos materiais.

**Questão 3:** Durante um churrasco, não é muito aconselhável manipular a brasa por um longo intervalo de tempo com um objeto inteiramente metálico. Imagine que você ignore essa recomendação e introduza a extremidade de um objeto metálico na brasa enquanto segura a outra extremidade com uma das mãos e aguarda por alguns minutos. Se sua mão não entra em contato direto com a brasa, por que, mesmo assim, é possível queimá-la? Como a energia foi transmitida até a sua mão?

- *“Em minha opinião, a pessoa irá se queimar pelo calor da brasa, pois como o objeto é metálico, então ele aquece com facilidade, assim se transformando em uma ‘ponte’ para a passagem do calor”.*

- *“É possível queimar a mão através dos condutores presente no objeto metálico, facilitando a passagem de energia.”*

Nesta questão tentamos verificar o conhecimento prévio dos estudantes sobre o conceito de condução térmica. A maioria dos alunos indicaram que o objeto metálico é capaz de conduzir a energia até a mão da pessoa. Contudo, nota-se a forma inadequada de abordar o calor como sinônimo de energia na maioria das respostas dos alunos, ou seja, como se fosse uma substância que pode ser conduzida de um corpo quente para um corpo frio.

A segunda resposta fornecida como exemplo é muito interessante, pois o estudante tentou descrever o comportamento interno do sistema para o estabelecimento do fenômeno da condução térmica. Ele atribuiu a ocorrência da mesma à existência de “condutores” presentes na estrutura do objeto metálico. Esta ideia se aproxima do conceito de elétrons livres presentes em todos os metais e que são justamente os responsáveis por torná-los bons condutores térmicos.

**Questão 4:** Analise a seguinte afirmação cientificamente verdadeira: “À medida que aquecemos um corpo, suas partículas constituintes se movimentam com velocidades cada vez maiores”. A partir dessa informação, e por meio da reflexão, responda:

a) Você acha que existe relação entre a temperatura de um corpo e o movimento molecular?

- *“Sim, pois com a agitação das moléculas que um corpo começa a aumentar e ganhar calor a partir dessas agitações”.*

- *“Sim, a temperatura agita as moléculas quando aquecidas.”*

b) Você acha que existe algum limite para a intensidade da agitação molecular? E para a temperatura?

- *“Sim, acredito que se as moléculas se agitarem muito rapidamente elas alcançarão um limite em que não poderão mais se agitar.”*

- *“Sim, quanto maior a temperatura, mais as moléculas ficam velozes. Sem temperatura entrará em repouso.”*

Nosso propósito com a questão a) foi avaliar a compreensão dos estudantes a partir de conclusões lógicas obtidas pela afirmação verdadeira indicada. Levando-se em consideração somente a afirmação, pode-se concluir que o aquecimento tem uma relação direta com o aumento da temperatura, de maneira a tornar o movimento das partículas mais frenético, já que a velocidade dessas partículas aumenta. Todos os alunos responderam corretamente que existe uma relação entre a temperatura e o movimento molecular, mas não explicaram de maneira adequada como esta relação é estabelecida. Novamente, os estudantes consideraram o calor como uma propriedade física do sistema.

Na questão b) os alunos foram levados a refletir sobre a existência de algum limite para a temperatura. Interpretando esta grandeza de forma microscópica, os estudantes de forma geral alegaram haver limites para a temperatura, inferior ou superior. Esta questão é muito interessante porque a temperatura termodinâmica pode ser encarada de certa forma, como a medida da intensidade do movimento térmico, ou seja, é uma propriedade que existe a partir do comportamento coletivo do sistema. É por isso que não faz sentido atribuir uma temperatura termodinâmica a um único átomo. O limite inferior na natureza para a temperatura é o zero absoluto, mas mesmo a esta temperatura existe atividade na matéria devido à energia de ponto zero. Com relação a um limite superior, nenhum valor numérico é estabelecido. A coroa solar, por exemplo, é formada por plasma a uma temperatura de milhões de graus. Plasmas a esta temperatura também são requeridos para criar condições de fusão. Como não existe nenhum material para suportar tais temperaturas até o momento, os cientistas e engenheiros utilizam campos magnéticos para conter o plasma, sendo um verdadeiro desafio tecnológico.

Discutimos um pouco mais esta questão para mostrar para o professor o quanto a discussão das respostas dos alunos ou a própria questão em si, podem se tornar enriquecedoras para introduzir outros assuntos relacionados com o conteúdo que está sendo trabalhado. Nesta perspectiva, o professor poderia abordar o que é plasma, utilizando como exemplo uma lâmpada fluorescente ou um letreiro de neon, e os desafios tecnológicos para controlar tal estado da matéria. E a imaginação do professor poderia ir além, ao questionar se seria possível, por exemplo, conceber um gás em que a maioria das partículas estivessem se movendo com velocidades próximas a da velocidade da luz, que é o limite superior para a velocidade de um corpo na natureza. Pensando no movimento térmico, seria este o limite superior para a temperatura termodinâmica?

**Questão 5:** Em um dia de verão, Maria escreve em uma mensagem "estou com calor!" e a envia para você. Curioso, você pede para ela explicar melhor o que está acontecendo. Ela então lhe responde: "Minha casa tem muito calor, por isso está muito quente". Você acha que a forma que Maria utiliza a palavra calor está correta? Para você, calor e temperatura são a mesma coisa? - *"Sim, acredito que Maria está utilizando corretamente a palavra. Não, temperatura e calor não são a mesma coisa, calor é a transferência de energia para outro corpo e temperatura é a sensação causada pelo calor."* - *"Calor é só uma forma de dizer que a temperatura do local está alta. Agora se eu digo 'nossa aqui na minha casa tá frio' assim estou dizendo que a temperatura está baixa."*

Nesta questão tentamos avaliar as concepções alternativas dos estudantes com relação aos conceitos de temperatura e calor. Como estas concepções são provenientes das experiências e vocabulários cotidianos, e calor e temperatura estão muito presentes no nosso dia a dia, de modo geral, os estudantes consideram calor e temperatura como sinônimos, mesmo afirmando que não o estão fazendo como na primeira resposta. Pelas respostas, tanto calor quanto temperatura foram associados à sensação térmica de quente e frio.

**Questão 6:** Observando um cubo de gelo e uma pequena poça d'água, em qual destes corpos você considera haver maior organização molecular? Por quê? - *"Creio que o gelo. Pois, as partículas estão organizadas de uma forma rígida, assim dando consistência ao corpo do gelo. Já na água as partículas estão totalmente bagunçadas, assim não dando rigidez ao corpo."* - *"Na água líquida, pois estarão mais espalhadas."*

A maioria dos estudantes atribuíram corretamente ao gelo maior organização interna que a água líquida. Os estudantes se utilizaram, de modo geral, da observação de que o gelo é capaz de assumir uma forma definida e rígida, implicando em uma organização interna latente. O exemplo da resposta 1 exprime essa ideia. A segunda resposta foi a única resposta contrária e equivocada, com o estudante atribuindo maior organização à água líquida por apresentar maior espalhamento de suas partículas.

As respostas deste questionário não foram corrigidas de modo a apontar os erros conceituais dos estudantes. Nosso objetivo foi conhecer suas concepções prévias e fazê-los refletir sobre o tema para permitir o debate de ideias. O questionário foi posteriormente corrigido junto com os estudantes. A aplicação do primeiro momento da Atividade 2 foi realizada em duas aulas.

Após o desenvolvimento do organizador prévio no primeiro momento, iniciou-se a abordagem de modo geral e introdutória dos conceitos de calor e temperatura. Esta sistematização inicial dos conceitos foi realizada no segundo momento da Atividade 2. Os conceitos de calor e temperatura foram abordados e definidos a partir do vídeo *"Conceito de*

*Calor – Física Térmica*”, elaborado pelo próprio autor deste trabalho e indicado no caderno do aluno na página 4. O vídeo foi assistido pelos alunos em casa e discutido durante a aula remota via videoconferência. Depois foram realizadas as leituras do Texto 1 (Estados da Matéria) e do Texto 2 (O quartzo e o vidro) presentes nas páginas 4 e 5 do Caderno do Aluno.

A atividade deste segundo momento foi realizada em grupo de cinco alunos cada, para resolver o seguinte problema:

“O quartzo na natureza pode formar espontaneamente belos cristais prismáticos com um formato próprio e específico. Entretanto, se derretida em um forno, a sílica que o constitui passa a assumir o formato do molde onde se resfria. Como uma mesma substância pode assumir formatos tão diferentes?”

- **Grupo:** *“Pois a organização das partículas do quartzo, estavam organizadas rigidamente e tendo um movimento térmico das partículas muito intenso, assim a sua temperatura, estava sendo conservada. E quando se derrete, o movimento térmico das partículas vai ser ameno. Então acreditamos, o que define o formato da substância é o movimento térmico das partículas.”*

- **Grupo:** *“Quando você aumenta a temperatura, os átomos do quartzo vão entrar em atrito e por consequência se separando. Assim entrando num estado líquido. Quando você volta a diminuir essa temperatura, esses átomos voltam a se organizar, retornando ao estado sólido. Com isso, assumindo a forma do molde.”*

Com este problema tentamos avaliar a compreensão dos estudantes acerca do estado sólido e de sua organização interna. Como pode se observar pelas respostas acima, os grupos tiveram muita dificuldade em relacionar as propriedades do sistema com conceitos como o de temperatura, movimento térmico, organização estrutural, entre outros, para explicar que o vidro não possui organização interna ao se solidificar como o quartzo, e portanto, não pode assumir um formato definido como o dele. A turma revelou ter bastante dificuldade de entender o conceito de estrutura cristalina, mostrando a importância do nosso trabalho para a introdução deste tema. O problema foi corrigido junto com os alunos em sala de aula. Este segundo momento da Atividade 2 foi realizado em 2 aulas.

### 4.5.3 Atividade 3

A Atividade 3 foi concebida para abordar o conceito de sólidos cristalinos de forma mais sistematizada e aprofundada. Realizamos a leitura e a explicação do Texto 1 intitulado *“Células unitárias e redes de Bravais”* disponível na página 6 do Caderno do Aluno. Após a leitura, foi proposto o questionário presente na página 7 do Caderno do Aluno. Este questionário

é chamado de atividade em nosso material formulado e as questões e respostas seguem comentadas a seguir.

A atividade 1 consistiu em se associar os termos “*Célula Unitária*”, “*Rede Cristalina*”, “*Redes de Bravais*” e “*Sistema Cristalino*” às suas respectivas definições. A associação foi indicada por meio das letras A, B, C e D. Os estudantes realizaram esta atividade sem muita dificuldade, já que necessitou apenas da interpretação de texto.

Na atividade 2 é apresentada uma imagem ilustrativa de uma rede cúbica de corpo centrado. Foi solicitado aos estudantes que respondessem as seguintes questões:

**Questão a)** Qual é a rede de Bravais que está discriminada na figura?

*- Pelo texto lido anteriormente, este item foi respondido sem grande dificuldade pela turma. Os estudantes, em geral, souberam indicar corretamente que se tratava de uma rede cúbica de corpo centrado.*

**Questão b)** Quantos átomos compõem essa rede de Bravais? Por quê?

*- Os estudantes tiveram dificuldade de entender que a quantidade de átomos presentes em uma célula unitária não corresponde à soma de átomos inteiros, mas à soma de suas frações limitadas à região cúbica da célula unitária. Depois da realização de ilustrações durante a aula, os alunos conseguiram chegar à resposta correta de 2 átomos.*

A parte conceitual e os questionamentos da Atividade 3 foram semelhantes àqueles abordados na Atividade 2, sendo contextualizada através da ilustração da célula unitária do argônio sólido. Esta substância cristaliza-se na forma da rede cúbica de face centrada. Os estudantes responderam corretamente que se tratava de uma célula unitária da rede cúbica de face centrada. Mais uma vez, apresentaram dificuldade de somar a quantidade de átomos que compõem este tipo de célula unitária. Após breve explicação por desenhos, a maioria dos estudantes chegaram à resposta correta de 4 átomos. A Atividade 3 foi realizada juntamente com os estudantes no período de 2 aulas de 50 minutos.

#### 4.5.4 Atividade 4

Nesta atividade aprofundamos o conhecimento desenvolvido anteriormente de maneira experimental utilizando o simulador mecânico. Este dispositivo foi construído previamente pelo professor e seu funcionamento foi gravado. O vídeo foi disponibilizado aos estudantes pela plataforma digital da escola e exibido durante as explicações durante a aula via videoconferência. Esta atividade foi realizada em grupos de 5 estudantes cada e foi dividida em duas partes denominadas de Situação 1 e Situação 2.

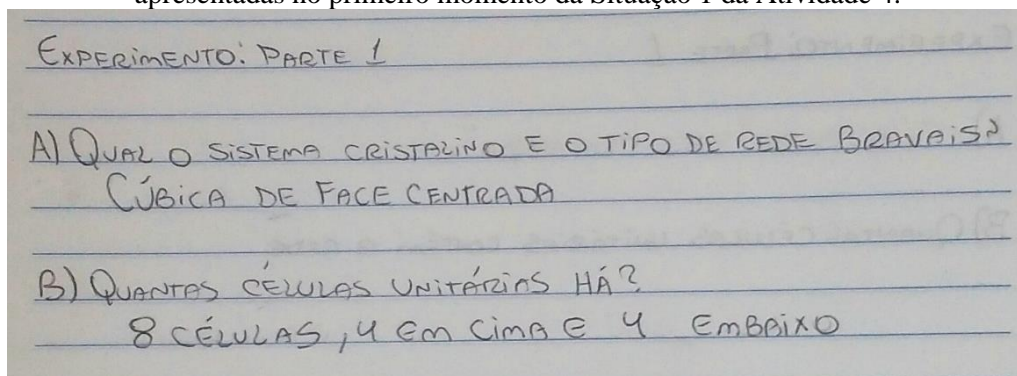
A Situação 1 consistiu na realização do experimento e reconhecimento visual da rede cristalina representada no simulador mecânico, a qual foi dividida em três momentos. Na Parte 1 trabalhamos a compreensão visual dos estudantes e o reconhecimento das estruturas cristalinas estudadas anteriormente de forma teórica. Esta foi conduzida com o simulador mecânico desligado, conforme indicado no enunciado do Caderno do Aluno na página 8.

Após a visualização por vídeo da estrutura cristalina representada, foram apresentadas as seguintes questões presentes na página 8 do Caderno do Aluno:

**Parte 1:** *Sem ligar o simulador, observem o tipo de rede cristalina representada nele e respondam: a) Qual é o sistema cristalino e o tipo de rede de Bravais que constitui a rede simulada? b) Quantas células unitárias contém a rede simulada?*

Na figura 4.5 apresentamos uma das respostas encaminhadas ao professor por meio de fotos via e-mail.

**Figura 4.5** – Exemplo de resposta formalizada por um dos grupos de alunos, referente às questões apresentadas no primeiro momento da Situação 1 da Atividade 4.



**Fonte:** Elaborado pelo autor.

Todos os grupos indicaram corretamente que o tipo de rede de Bravais representada no simulador era a cúbica de face centrada. Após a repetição do vídeo enviado durante as aulas, os grupos puderam perceber a existência de 8 células unitárias na rede cristalina simulada.

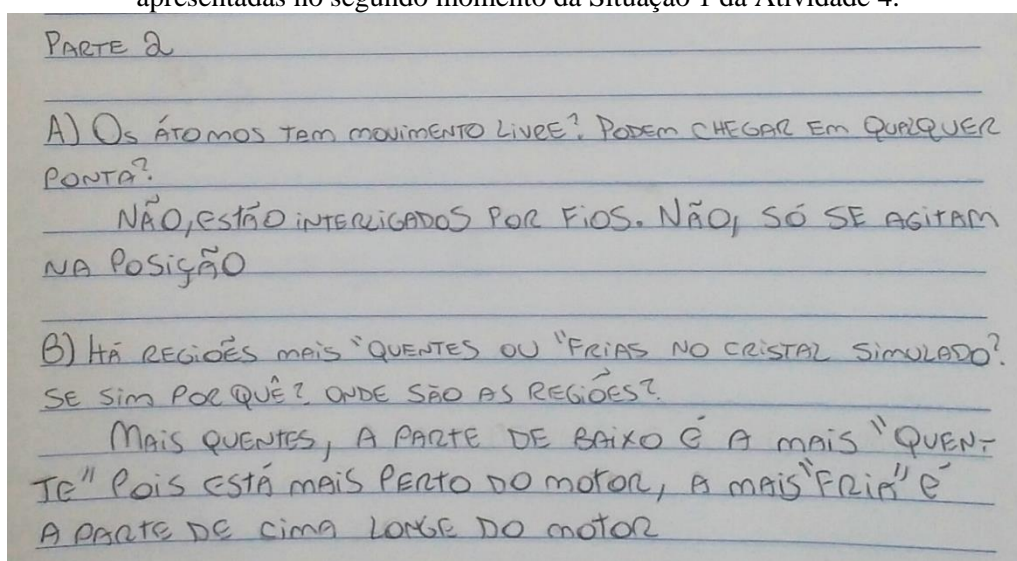
A Parte 2 do experimento foi também realizada utilizando-se o simulador, mas desta vez com o dispositivo acionado, conforme indicado na página 9 do Caderno do Aluno. Após a exibição do vídeo, os estudantes tiveram que responder as seguintes perguntas presentes na página 9 do Caderno do Aluno:

**Parte 2:** *Agora, o professor acionará o simulador através do botão "contínuo". Observe atentamente o comportamento da rede cristalina simulada. Em grupo, responda: a) Os átomos simulados têm movimento plenamente livre? Eles podem alcançar qualquer ponto da rede? b)*

*Há regiões com maior ou menor temperatura no cristal simulado? Se sim, por quê? Onde estão essas regiões?*

Os estudantes focaram suas observações no movimento térmico simulado na rede cristalina representada no simulador mecânico. Este foi estabelecido pela transmissão da agitação da esfera primária para as demais bolinhas da rede através dos elásticos. A resposta das questões da Parte 2 de um dos grupos é apresentada na figura 4.6.

**Figura 4.6** – Exemplo de resposta formalizada por um dos grupos de alunos, referente às questões apresentadas no segundo momento da Situação 1 da Atividade 4.



**Fonte:** Elaborado pelo autor.

Os alunos compreenderam de forma geral que, embora os átomos representados tenham movimento, eles não podem se deslocar para qualquer ponto da rede cristalina modelada. Os estudantes puderam observar que o movimento dos átomos representados estava limitado pelos elásticos que os ligavam, passando a se agitar apenas em torno de suas posições de repouso. Esta observação foi importante, pois permitiu compreender o conceito de posição de equilíbrio estável dos átomos em estruturas cristalinas reais.

A analogia entre a força elástica do modelo e a força elétrica de um cristal real foi comentada com os estudantes quando esta atividade foi corrigida pelo professor. Essa consideração é interessante porque aproxima nosso sistema simulado da descrição de sistemas simplificados reais. Todas as discussões foram estabelecidas remotamente.

Outro aspecto interessante observado pelos estudantes nesta parte do experimento foi o reconhecimento da existência de regiões de maior e menor temperatura no cristal simulado.



Essa compreensão se deu justamente quando os estudantes associaram corretamente a magnitude da temperatura com a intensidade da agitação das partículas do sistema.

A Parte 3 da Situação 1 consistiu na apresentação das respostas de cada grupo para os demais grupos, a fim de socializar as ideias elaboradas. Essa socialização foi mediada pelo professor de modo que as ideias dos alunos fossem complementadas pelos conceitos corretos referentes às estruturas cristalinas. Todo o desenvolvimento da Situação 1 foi feito remotamente em uma aula de 50 minutos.

A Situação 2 também foi dividida em 3 momentos e desenvolvida remotamente em uma aula de 50 minutos. A Parte 1 foi referente à observação da simulação da condução térmica. Os estudantes analisaram um experimento mental concebido a partir do simulador, que consistiu em considerar a rede cristalina simulada como um cristal de argônio na temperatura correspondente ao zero absoluto (0K).

A ideia do experimento baseado nesta observação foi demonstrar como o movimento térmico se propaga em uma rede cristalina que esteja inicialmente em repouso. A simulação desta condição hipotética foi realizada através do acionamento do simulador no modo pulso. Embora a analogia proposta esteja distante de situações cotidianas reais, consideramos que a propagação do movimento térmico em uma rede hipoteticamente estática é de mais fácil compreensão em relação ao sistema dinâmico. Ou seja, a compreensão do comportamento de sistemas mais simples pode permitir o entendimento de sistemas mais complexos, de maneira que, se os estudantes entenderem como se dá a transmissão do movimento térmico em um sistema inicialmente em repouso, é possível que a compreensão sobre o que ocorre em um sistema com partículas em constante agitação seja facilitada.

Assim como na Situação 1, foi produzido um vídeo do simulador mecânico em funcionamento e mostrado aos alunos remotamente. As questões referentes à Parte 1 da Situação 2 foram as seguintes:

**Parte 1:** *O professor irá acionar o simulador através do botão "pulso", prestem muita atenção no comportamento da rede. Responda: a) Na simulação, se apenas um átomo possui movimento, como os outros átomos adquirem movimento? Como esse movimento se propaga na rede? b) Qual o papel dos elásticos na propagação do movimento na rede cristalina representada? Com a ajuda do professor, explique o que esses elásticos representam em um sistema físico real.*

As respostas de um dos grupos da turma seguem transcritas abaixo para exemplificar a compreensão dos alunos:

“a) Conforme uma maior agitação molecular de 1 átomo, o movimento é transmitido às outras moléculas mais próximas. No caso da simulação, através do elástico.”

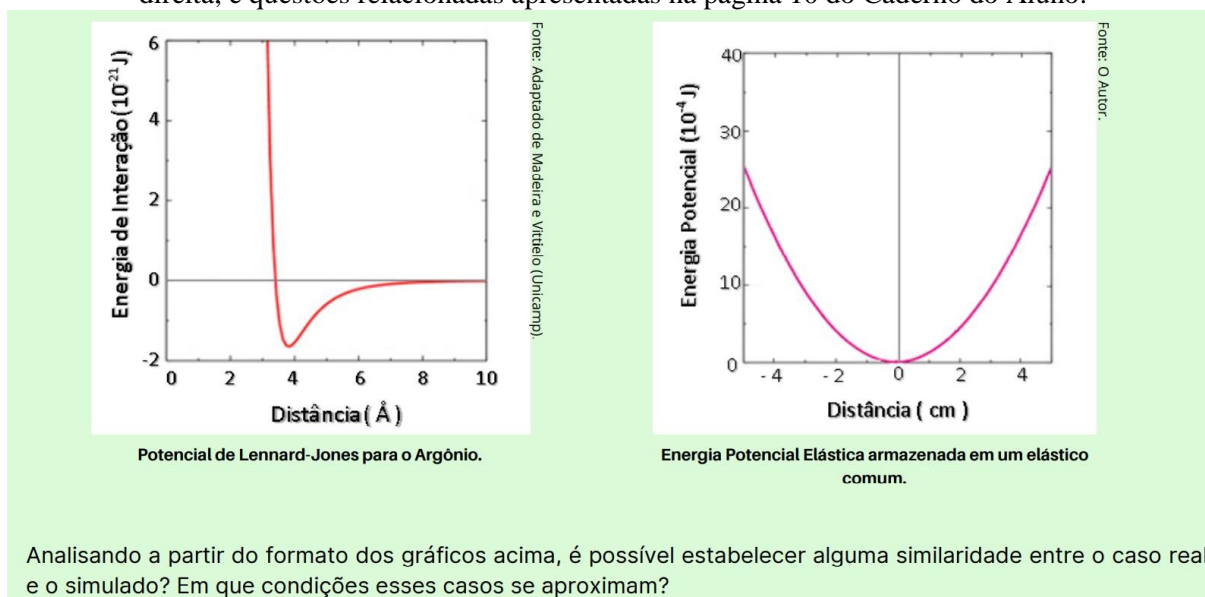
“b) O elástico é o canal de transmissão do movimento. Já na realidade, é a força elétrica que atua na atração entre os átomos.”

De modo geral, os estudantes de todos os grupos puderam perceber que a propagação do movimento térmico se dá em virtude da transmissão da oscilação entre os átomos vizinhos representados na rede através dos elásticos.

Os alunos puderam compreender o papel dos elásticos na transmissão do movimento e na ligação entre os átomos representados. Essa compreensão pôde ser estendida a sistemas reais, onde a coesão entre as partículas é desempenhada pela força elétrica. A analogia que desenvolvemos por meio do simulador mostrou-se ser interessante para o entendimento das interações entre as partículas reais em um sólido cristalino.

A Parte 2 da Situação 2 consistiu na resolução do problema apresentado na página 10 do Caderno do Aluno, cujo objetivo foi associar as curvas do potencial de Lennard-Jones com o potencial harmônico. A maioria dos estudantes apresentaram dificuldades em estabelecer alguma semelhança entre as curvas gráficas. Após uma breve explicação do professor sobre a aproximação de pequenas oscilações, os estudantes puderam perceber que as curvas dos gráficos dos potenciais apresentados eram semelhantes em intervalos próximos das posições de equilíbrio das partículas. Os gráficos apresentados na página 10 do Caderno do Aluno juntos com as questões sobre os mesmos são reproduzidos na figura 4.7.

**Figura 4.7** – Reprodução dos gráficos dos potenciais de Lennard-Jones, à esquerda, e harmônico, à direita, e questões relacionadas apresentadas na página 10 do Caderno do Aluno.



**Fonte:** Elaborado pelo autor.

As respostas de dois grupos para a pergunta apresentada na figura 4.7 são transcritas abaixo:

- *“Sim, apresentam comportamento parecido apenas quando há pequenas oscilações, pois assim, a tendência é do átomo voltar a posição original como indicada no pequeno "U" do gráfico.”*
- *“Sim, os átomos de verdade em pequenas vibrações parecem que estão ligados por elásticos como na simulação.”*

Os exemplos das respostas apresentadas para o problema mostram que os estudantes assimilaram essencialmente a relação entre os gráficos, embora só o tenham compreendido adequadamente após a explicação do professor.

Na Parte 3 da Situação 2 os grupos apresentaram suas respostas e conclusões e a socialização foi realizada de maneira remota e mediada pelo professor durante a aula. As partes 2 e 3 foram realizadas em uma aula de 50 minutos.

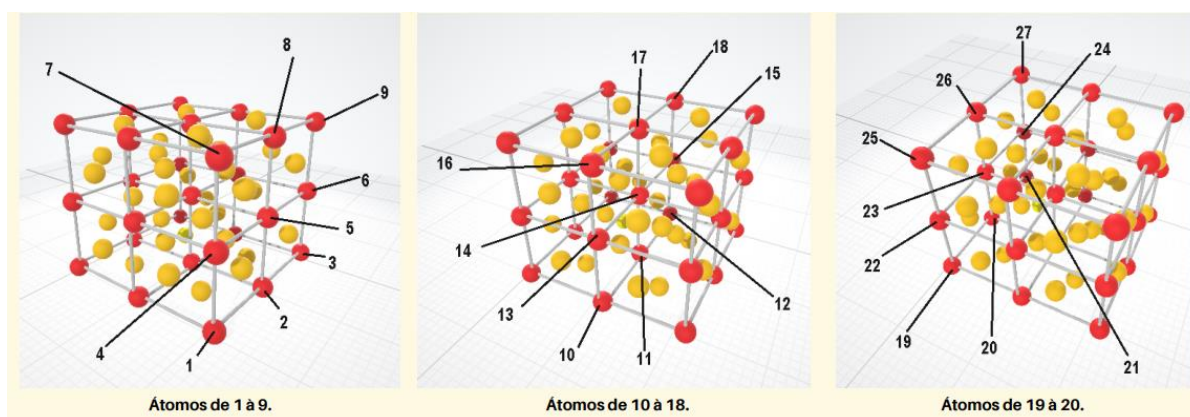
#### **4.5.5 Atividade 5**

A Atividade 5 foi estabelecida para aprofundar um pouco mais os conceitos desenvolvidos anteriormente. A abordagem nesta atividade foi experimental, para a realização das medições das posições e da amplitude de oscilação das partículas. Para isso, a atividade teve que ser dividida em três partes.

Na Parte 1 foram feitas as medidas das distâncias entre cada esfera e a esfera primária e de suas amplitudes de oscilação quando o simulador é acionado no modo contínuo. A medição da amplitude de oscilação foi realizada utilizando o vibrômetro, dispositivo desenvolvido por nós mesmos cujo funcionamento é descrito na seção 4.3. Como existe um número muito grande de esferas na rede, optamos por realizar a medição apenas nas esferas que estão situadas nas arestas das células da rede, pois estas já fornecem uma visão satisfatória sobre a vibração da rede como um todo. Devido ao ensino remoto adotado por causa da pandemia de COVID-19 durante a aplicação do produto educacional, os estudantes não puderam realizar as medições diretamente no simulador. Devido a isso, as medições tiveram que ser realizadas pelo professor e encaminhadas aos estudantes no formato de uma tabela.

Na figura 4.8 apresentamos uma ilustração da rede simulada identificando, através de números, os 27 átomos representados nas arestas das células, conforme mostrado na página 13 do Caderno do Aluno.

**Figura 4.8** – Ilustração da estrutura cristalina do simulador mecânico mostrando a identificação numérica das esferas situadas nas arestas das células representadas (vermelho) para a aferição de suas respectivas posições, conforme apresentado na página 13 do Caderno do Aluno.



**Fonte:** Elaborado pelo autor.

Na Tabela 4.3 apresentamos os valores das medidas das distâncias e das amplitudes de oscilação das esferas aferidas pelo professor. Esta tabela foi disponibilizada aos estudantes para que eles pudessem analisar os resultados.

Portanto, a Parte 1 da Atividade 5 foi realizada pelo professor e não pelos alunos, a fim de possibilitar a continuação da sequência didática que idealizamos para esta atividade.

A Parte 2 da atividade consistiu na criação de um mapa tridimensional da rede cristalina simulada, com cada átomo das arestas das células representado por uma cor correspondente à sua respectiva amplitude de oscilação. Para isso foi utilizada uma escala de cores, disponível na página 15 do Caderno do Aluno e reproduzida na figura 4.9. A relação da amplitude de oscilação com a cor correspondente é estabelecida em intervalos de 0,6 mm. Portanto, cada cor representa um intervalo de oscilação e não um valor específico para cada amplitude aferida. Note que a cor azul é sugestivamente utilizada para representar oscilações menores e portanto, temperaturas menores, enquanto que para as temperaturas maiores (oscilações maiores) utilizamos a cor vermelha.

Para facilitar e padronizar a elaboração da rede cristalina tridimensional foi fornecido aos estudantes um arquivo com um modelo da rede já montado e pronto para ser pintado. O link para o *download* deste arquivo e o enunciado da atividade são apresentados na página 14 do Caderno do Aluno. Os alunos se organizaram em grupos de 5 integrantes e realizaram a atividade em casa através do programa de edição *Paint 3D* disponibilizado pela *Microsoft*. Na figura 4.10 apresentamos um mapa pronto, com os átomos das arestas das células coloridos

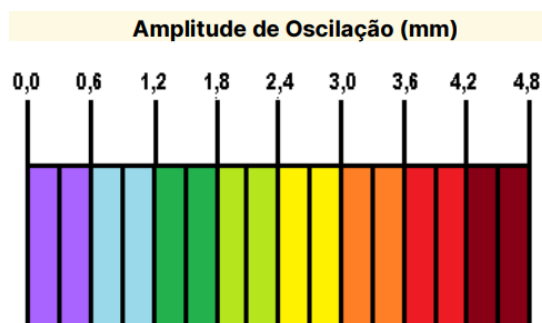
conforme os valores da amplitude de oscilação e a identificação de cada átomo apresentados na Tabela 4.3, por um dos grupos.

**Tabela 4.3** – Valores das medidas das distâncias e das amplitudes de oscilação das esferas das arestas das células que configuram a rede cristalina representada no simulador mecânico.

<i>Esfera</i>	<i>Distância a partir da esfera primária (cm)</i>	<i>Amplitude de oscilação (mm)</i>
1	0,0	5,0
2	9,5	3,3
3	18,0	1,5
4	11,0	1,8
5	14,0	0,9
6	21,0	0,6
7	21,0	0,6
8	23,0	0,6
9	28,0	0,9
10	9,5	1,8
11	14,0	1,5
12	20,0	1,2
13	15,0	1,2
14	16,0	0,6
15	23,0	0,3
16	23,0	0,6
17	25,0	0,9
18	29,0	0,6
19	18,0	1,2
20	20,0	2,4
21	25,5	1,5
22	21,5	0,6
23	22,5	0,9
24	27,0	0,6
25	28,0	0,6
26	29,0	0,6
27	33,5	0,3

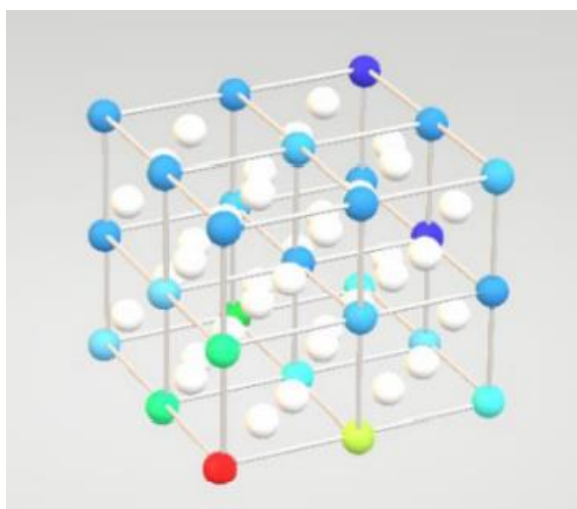
**Fonte:** Elaborado pelo autor.

**Figura 4.9** – Escala de cores adotada para a representação da amplitude de oscilação dos átomos da rede cristalina simulada. Cada cor é estabelecida em intervalos de oscilação de 0,6 mm, conforme apresentado na página 15 do Caderno do Aluno.



**Fonte:** Elaborado pelo autor.

**Figura 4.10** – Escala de cores adotada para a representação da amplitude de oscilação dos átomos da rede cristalina simulada. Cada cor é estabelecida em intervalos de oscilação de 0,6 mm, conforme apresentado na página 15 do Caderno do Aluno.



**Fonte:** Elaborado pelo autor.

O mapa tridimensional da rede representa de maneira bastante satisfatória a intensidade de vibração da rede cristalina simulada. Este foi muito útil para os estudantes visualizar e até compreender melhor a vibração da rede. Na Figura 4.10 é possível notar que a amplitude de oscilação das esferas é maior na região mais próxima da esfera motorizada (em vermelho), pois é onde ocorre o fornecimento de energia ao sistema, e vai diminuindo para as esferas mais afastadas. Note que a menor amplitude de oscilação é medida na esfera mais distante da esfera primária, na extremidade oposta da diagonal da rede cristalina, destacada em azul escuro. A diferença de cores observadas no diagrama foi muito útil para os alunos identificarem as regiões do sistema de maior e menor temperatura na rede simulada, reforçando a ideia sobre a existência de uma relação entre temperatura e intensidade da agitação das partículas de um corpo.

Adicionalmente, a realização de medidas tornou ainda mais evidente o que os estudantes observaram visualmente na Atividade 4. Ou seja, ficou constatado de maneira inequívoca que a região mais próxima da esfera primária (motorizada) é a que apresenta as esferas mais agitadas. O procedimento de aferição das posições e amplitudes de oscilação também foi útil para reforçar a importância das medidas na Física para a descrição de fenômenos de maneira mais precisa, além de possibilitar a construção de modelos matemáticos explicativos.

Na Parte 3 da Atividade 5 discutimos sobre a possibilidade de elaborar um modelo matemático para descrever o comportamento do sistema utilizando os dados fornecidos. A tarefa dos alunos foi descrever a relação entre as duas grandezas medidas: a distância das esferas em relação à esfera primária e suas respectivas amplitudes de oscilação. Os mapas

tridimensionais construídos pelos grupos já indicavam que a amplitude de oscilação das esferas decrescia com o aumento da distância das mesmas em relação à esfera primária, de maneira que estas são grandezas inversamente proporcionais. Nosso objetivo neste momento foi fazer com que os grupos encontrassem uma expressão matemática que comprovasse tal relação através da construção de um gráfico. Para simplificar essa tarefa, apenas três esferas da diagonal principal da estrutura cristalina foram escolhidas. Essas esferas são as das extremidades desta diagonal, sendo uma delas a esfera primária, e a esfera que ocupa o ponto médio desta diagonal, ou seja, as esferas 1, 14 e 27, conforme a identificação das mesmas apresentada na figura 4.8.

Os principais detalhes sobre a construção de gráficos a partir de uma tabela foram abordados durante a aula utilizando o software *Excel* da *Microsoft*. Em seguida, explicamos como realizar o ajuste de uma curva para encontrar a melhor equação possível para a distribuição dos pontos obtidos experimentalmente no gráfico. Para isso, analisamos a importância de se avaliar o valor do coeficiente de determinação, também chamado de R-quadrado, fornecido pelo *Excel* para mensurar a qualidade do ajuste realizado. Nesta etapa tentamos deixar claro que o melhor ajuste possível é aquele em que R-quadrado está mais próximo do valor 1.

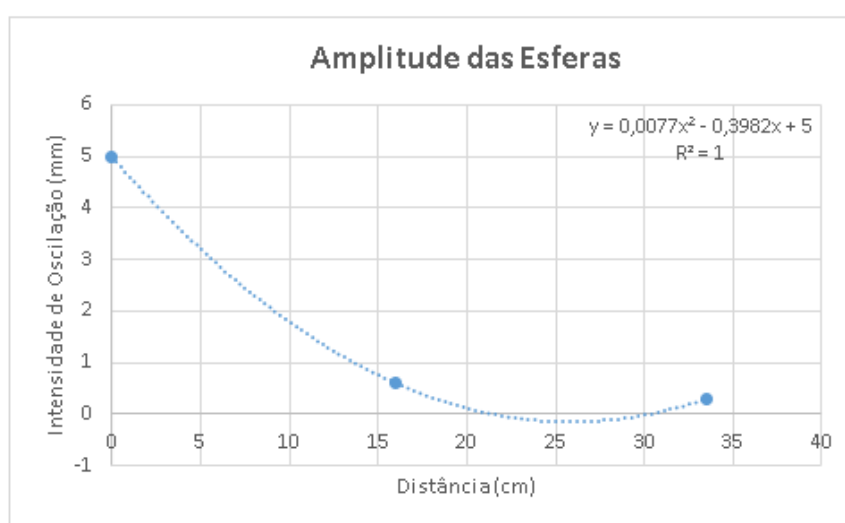
Dessa forma, os estudantes trabalharam para obter uma equação que expressasse a relação entre a amplitude ou intensidade de oscilação ( $I$ ) em função da distância ( $d$ ) de cada esfera em relação à esfera primária, ou seja, eles tinham que obter um gráfico de  $I \times d$  e realizar o ajuste dos pontos experimentais. Eles plotaram os gráficos em casa e apresentaram seus resultados em grupo na aula seguinte. Na figura 4.11 apresentamos um dos gráficos feito por um dos grupos.

A maioria dos grupos utilizou um ajuste polinomial como a função quadrática apresentada na figura 4.11. É interessante notar que o valor de R-quadrado foi igual a 1, mostrando um ajuste perfeito da curva com os pontos experimentais. Diante desse resultado os estudantes concluíram que, matematicamente, a expressão que descreve a relação entre  $I$  e  $d$  no sistema simulado é quadrática e não inversamente proporcional, como esperado.

Entretanto, fisicamente este ajuste utilizado pelos estudantes apresentou dois grandes problemas conceituais. Primeiro, porque um ajuste quadrático indicaria que existe uma vibração mínima com valor negativo de intensidade, como se pode verificar no vértice da parábola esboçada na figura 4.11. Obviamente, oscilação negativa não tem significado físico, portanto, este argumento é suficiente para afirmar que o resultado dos estudantes está incorreto. O segundo problema físico apresentado ao estabelecer uma relação quadrática para os pontos experimentais reside no fato de que a partir da distância igual a 25 cm, a amplitude de oscilação

aumentaria com o aumento da distância, o que não condiz com a realidade observada pelos estudantes no experimento. Em última análise, este segundo problema contrariaria a lei de conservação de energia, pois as esferas adquiririam cada vez mais energia a partir da distância de 25 cm, ao passo que, na realidade, a energia fornecida deveria diminuir a cada transferência entre as esferas com o aumento da distância.

**Figura 4.11** – Gráfico da intensidade de oscilação  $I$  das esferas 1, 14 e 27 da rede simulada em função da distância  $d$  das mesmas em relação à esfera primária. A curva pontilhada descreve o ajuste de uma função quadrática do tipo  $I = 0,0077 d^2 - 0,3982 d + 5$ .



**Fonte:** Elaborado pelos estudantes.

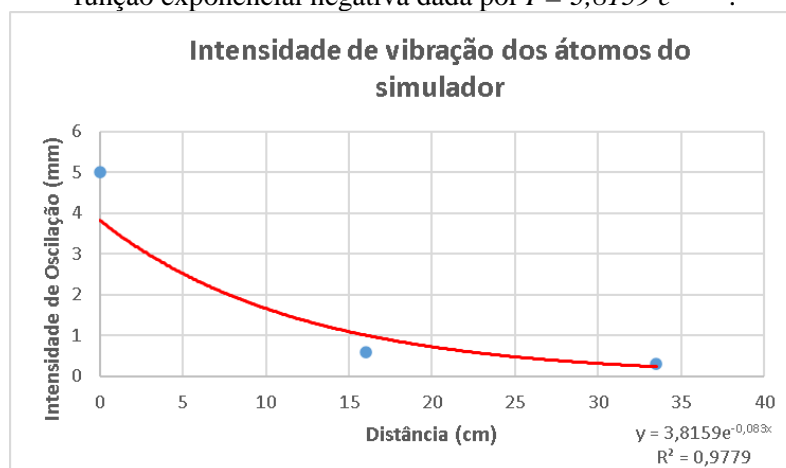
Na aula de apresentação dos gráficos expomos estes problemas conceituais aos estudantes e corrigimos os gráficos durante a aula remota. Esta correção foi promovida por outros ajustes na tentativa de estabelecer uma relação matemática entre  $I$  e  $d$  que fosse compatível com as observações realizadas no experimento e corroboradas com os mapas tridimensionais construídos por eles. O melhor ajuste obtido foi através de uma função exponencial negativa, ou seja,  $I \propto 1/e^d = e^{-d}$ , como o mostrado na figura 4.12.

Como se pode verificar na figura 4.12 o ajuste com uma função exponencial negativa expressa melhor a realidade do experimento, isto é, a intensidade de vibração é inversamente proporcional à distância. Contudo, a função proposta não ajusta muito bem o primeiro e o segundo pontos experimentais. Apesar disso, o R-quadrado deste ajuste é próximo de 1, dado aproximadamente por 0,98. Um ajuste considerando a relação inversamente proporcional entre  $I$  e  $d$ , ou seja,  $I \propto 1/d$ , foi realizado durante a correção. Entretanto, tal ajuste foi desconsiderado por apresentar um valor de R-quadrático de aproximadamente 0,78, inferior ao obtido no ajuste



exponencial. A correção dos gráficos e as explicações acima foram realizadas em 1 aula de 50 minutos.

**Figura 4.12** – Gráfico da intensidade de oscilação  $I$  das esferas 1, 14 e 27 da rede simulada em função da distância  $d$  das mesmas em relação à esfera primária. A curva sólida descreve o ajuste de uma função exponencial negativa dada por  $I = 3,8159 e^{-0,083d}$ .



**Fonte:** Elaborado pelo autor.

Na aula seguinte, visando uma melhor explanação, foi apresentado aos estudantes um outro ajuste exponencial que melhor correspondeu aos dados coletados, veja figura 4.12. Este ajuste foi realizado com um software de edição de gráficos estatísticos chamado *Origin*, porque ele permite que inúmeras iterações sejam realizadas automaticamente com a variação dos parâmetros da equação até que o melhor ajuste seja obtido. Para este ajuste consideramos três parâmetros  $A$ ,  $B$  e  $C$  para a equação exponencial, ou seja,

$$I = Ae^{-Bd} + C. \quad (4.1)$$

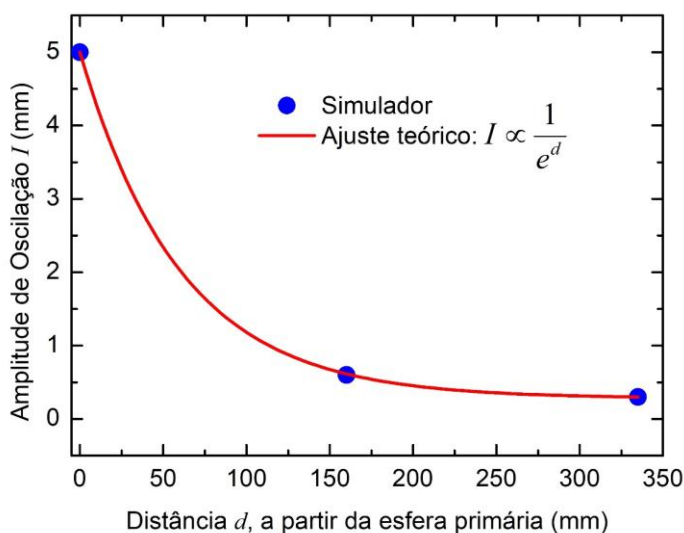
Ao final das iterações o software retornou os valores para os três parâmetros dados por  $A = 4,71834$ ,  $B = 0,01657$  e  $C = 0,28166$ . Neste ajuste foi possível obter perfeito acordo entre a curva teórica e os pontos experimentais com R-quadrado igual a 1. Note que tivemos que considerar o parâmetro  $C$  no ajuste, correspondente à intensidade de oscilação mínima para os três pontos considerados. Na figura 4.12 assumimos  $C = 0$ , que é equivalente a  $I = 0$  para uma distância muito grande, ou seja,  $d \rightarrow \infty$ . Portanto, ao considerar o parâmetro  $C \neq 0$  estamos truncando a amplitude de oscilação em um valor mínimo dado por  $C = I_{min} \approx 0,3 \text{ mm}$ , corresponde à amplitude de oscilação da esfera 27 que está no limite da nossa rede simulada, veja Tabela 4.3. Dessa forma, a amplitude máxima de oscilação ( $d = 0$ ) é descrita pela equação obtida por,

$$I_{max} = A + C = 4,71834 + 0,28166 = 5 \text{ mm},$$

conforme apresentado na Tabela 4.3 para a esfera primária e não por  $I_{max} = 3,8159 \text{ mm}$ , que é o valor obtido pelo ajuste apresentado na figura 4.12. O parâmetro  $B$  representa a taxa de decaimento da amplitude de oscilação, a qual pode ser maior ou menor dependendo dos elásticos utilizados.

A apresentação do gráfico da figura 4.13 foi feita para finalizar a discussão acerca do modelo matemático que descreveria melhor o comportamento da rede cristalina de nosso simulador.

**Figura 4.13** – Gráfico da intensidade de oscilação  $I$  das esferas 1, 14 e 27 da rede simulada em função da distância  $d$  das mesmas em relação à esfera primária. A curva sólida descreve o ajuste de uma função exponencial negativa dada por  $I = 4,71834 e^{-0,01657d} + 0,28166$ .



**Fonte:** Elaborado pelo autor.

Ao todo foram necessárias 3 aulas de 50 minutos para desenvolver a Atividade 5. Esta por sua vez, potencializou o entendimento dos estudantes acerca dos conceitos de temperatura e movimento térmico, ao passo que também contribuiu para o ensino sobre a elaboração de gráficos, funções matemáticas, sobretudo a função exponencial e o ajuste de curvas. A Atividade 5 foi a última atividade de aprofundamento sobre o movimento térmico em uma rede cristalina, servindo para promover tanto a diferenciação progressiva final de nossa UEPS, quanto para propiciar uma conciliação integrativa simultânea.

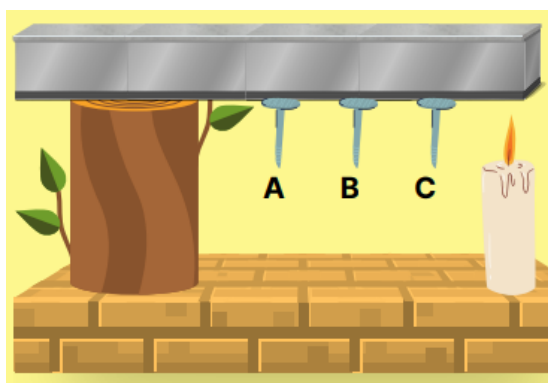
### 4.5.6 Atividade 6

Esta atividade 6 foi elaborada para realizarmos a avaliação final de nossa UEPS. A avaliação foi impressa e entregue a cada um dos 27 estudantes que participaram da atividade, mas eles puderam trabalhar em grupos de até 5 integrantes para debaterem sobre as questões da prova. Contudo, solicitamos que eles entregassem a avaliação individualmente para a correção final.

As questões foram concebidas para verificarmos se houve alguma evolução dos estudantes acerca dos conceitos de calor e temperatura, diante das concepções alternativas apresentadas por eles durante as atividades, e se houve algum tipo de assimilação dos conceitos novos referente a estrutura cristalina dos sólidos. As questões desta avaliação seguem transcritas e comentadas a seguir:

**Questão 1:** Três pregos, A, B e C, são fixados por meio de parafina de vela a uma haste metálica que está apoiada sobre um tronco. A haste é aquecida por uma das extremidades através da chama de uma vela, conforme a figura 4.14. Qual será a ordem da queda dos pregos? Explique por que isso acontece do ponto de vista microscópico e classifique esse tipo de transferência de energia.

**Figura 4.14** – Ilustração referente à questão 1, mostrando três pregos A, B e C presos a uma haste metálica com parafina. A haste é aquecida em uma das extremidades e o processo de condução térmica faz com que os pregos caiam de C para A à medida que a parafina derrete.

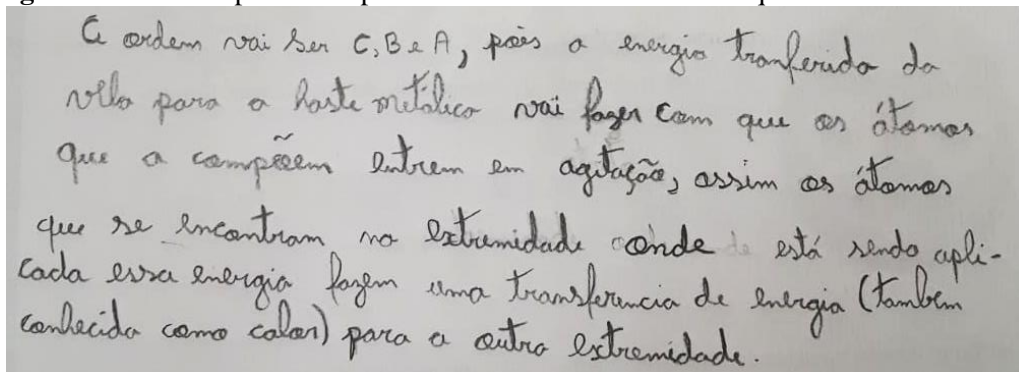


**Fonte:** Elaborado pelo autor.

Na figura 4.15 apresentamos dois exemplos de respostas para a questão 1 para exemplificação. A maioria dos estudantes (78%) responderam esta questão corretamente. A resposta superior da figura 4.15, por exemplo, mostra claramente que o aluno compreendeu que a chama transfere energia ao metal e que esta energia se propaga ao longo da barra aumentando a agitação das partículas do sistema. O conceito de calor também foi abordado corretamente

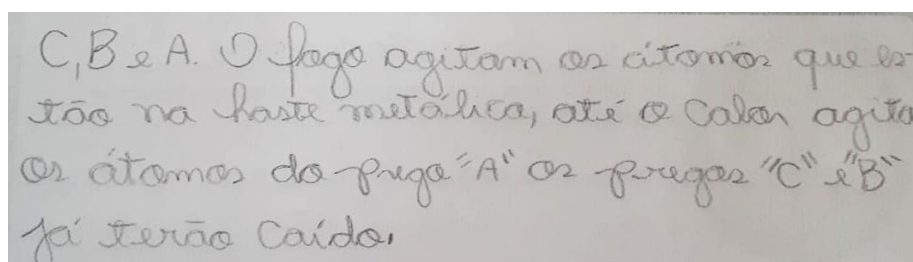
como um processo de transferência de energia. Contudo, é possível notar pela resposta inferior da figura 4.15 que o conceito de calor ainda não foi assimilado por alguns deles, pois estes continuam não conseguindo diferenciar calor e energia.

**Figura 4.15** – Exemplos de respostas dos estudantes referente à questão 1 da atividade 6.



A ordem vai ser C, B e A, pois a energia transferida da vela para a haste metálica vai fazer com que os átomos que a compõem entrem em agitação, assim os átomos que se encontram na extremidade onde está sendo aplicada essa energia fazem uma transferência de energia (também conhecida como calor) para a outra extremidade.

“A ordem vai ser C, B e A, pois a energia transferida da vela para a haste metálica vai fazer com que os átomos que a compõem entrem em agitação, assim os átomos que se encontram na extremidade onde está sendo aplicada essa energia fazem uma transferência de energia (também conhecida como calor) para a outra extremidade.”



C, B e A. O fogo agita os átomos que estão na haste metálica, até o calor agitar os átomos do prego “A” os pregos “C” e “B” já terão caído.

“C, B e A. O fogo agita os átomos que estão na haste metálica, até o calor agitar os átomos do prego ‘A’ os pregos ‘C’ e ‘B’ já terão caído.”

**Fonte:** Elaborado pelo autor.

Também foi possível constatar que em algumas respostas houve a prevalência da ideia de que as moléculas estavam inicialmente em repouso antes do aquecimento, o que não é correto. Estes não conseguiram assimilar que o fornecimento de energia faz aumentar mais ainda a intensidade da agitação das partículas. A existência deste tipo de concepção equivocada apresentada por alguns alunos pode ter sido desencadeada pelo fato da rede cristalina simulada estar inicialmente em repouso em alguns experimentos realizados. Naqueles casos, estávamos simulando a rede cristalina de acordo com a visão clássica da temperatura no zero absoluto e não a temperatura ambiente. Aparentemente, isso não ficou claro para alguns estudantes. Uma melhoria que poderia ser feita no dispositivo para evitar tais concepções é colocar um potenciômetro no motor para ajustar diferentes velocidades de agitação na rede simulada e representar diferentes temperaturas.

A questão 2 foi proposta para verificar como os alunos assimilaram os conceitos básicos utilizados para a introdução da cristalografia.

**Questão 2:** Analise a célula unitária do sólido ao lado (figura 4.16). Responda:

- Qual é a rede de Bravais representada?
- Quantos átomos compõem essa célula unitária?
- Qual(is) é(são) o(s) átomo(s) mais próximo(s) do átomo "a"? Qual é o átomo mais distante?

A maioria dos estudantes apresentou um bom desempenho nesta questão, com 68% de acertos para a questão 2.a), 100% para a questão 2.b) e 89% para 2.c). Na figura 4.16 apresentamos dois exemplos de respostas. Pela resposta superior desta figura é possível notar que alguns estudantes não conseguiram classificar a célula cristalina ilustrada de maneira completa. Já no exemplo inferior, o aluno não soube identificar que o átomo mais próximo do átomo "a" é o átomo "e".

**Figura 4.16** – Exemplos de respostas dos estudantes referente à questão 2 da atividade 6.

Questão 2- Analise a célula unitária do sólido ao lado.  
Responda:

a) Qual é a rede de Bravais representada?

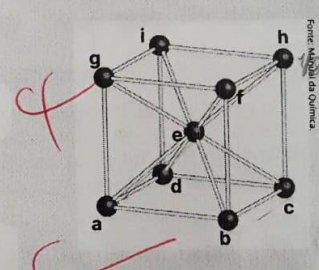
Rede cubica.

b) Quantos átomos compõem essa célula unitária?

2 átomos.

c) Qual(is) é(são) o(s) átomos mais próximo(s) do átomo "a"? Qual é o átomo mais distante?

O mais próximo é o átomo e (E); o mais distante é o átomo h (H).



Fonte: Manual de Química

Folha

Questão 2- Analise a célula unitária do sólido ao lado.  
Responda:

a) Qual é a rede de Bravais representada?

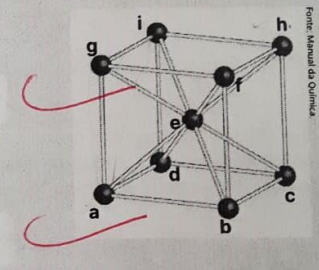
Cúbica de corpo centrado

b) Quantos átomos compõem essa célula unitária?

2 átomos

c) Qual(is) é(são) o(s) átomos mais próximo(s) do átomo "a"? Qual é o átomo mais distante?

Mais próximas: B, d e g  
Mais distantes: h



Fonte: Manual de Química

Folha

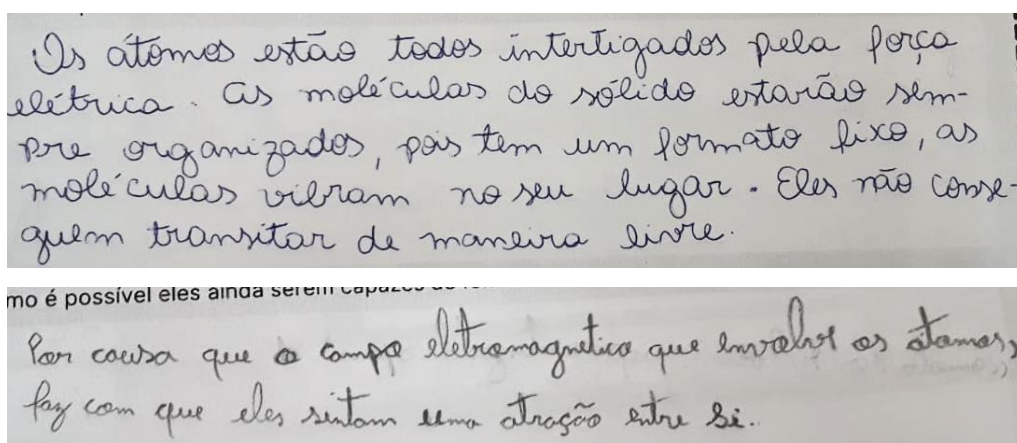
**Fonte:** Elaborado pelo autor.

Na questão 3 abordamos sobre a coesão e possibilidade de organização dos átomos na estrutura interna dos sólidos cristalinos, mesmo que estes estejam em constante movimento.

**Questão 3:** Se os átomos, mesmo em um sólido cristalino, estão em constante movimento térmico, como é possível eles ainda serem capazes de formar estruturas cristalinas tão ordenadas?

Aparentemente, esta questão foi a que os alunos apresentaram maior dificuldade, pois é a que teve a menor taxa de acerto da atividade. Dos 27 alunos que participaram da atividade, 15 responderam de maneira satisfatória, como mostrado no exemplo superior da figura 4.17, e 12 apresentaram respostas incompletas ou confusas, como no exemplo inferior da mesma figura.

**Figura 4.17** – Exemplos de respostas dos estudantes referente à questão 3 da atividade 6.



**Fonte:** Elaborado pelo autor.

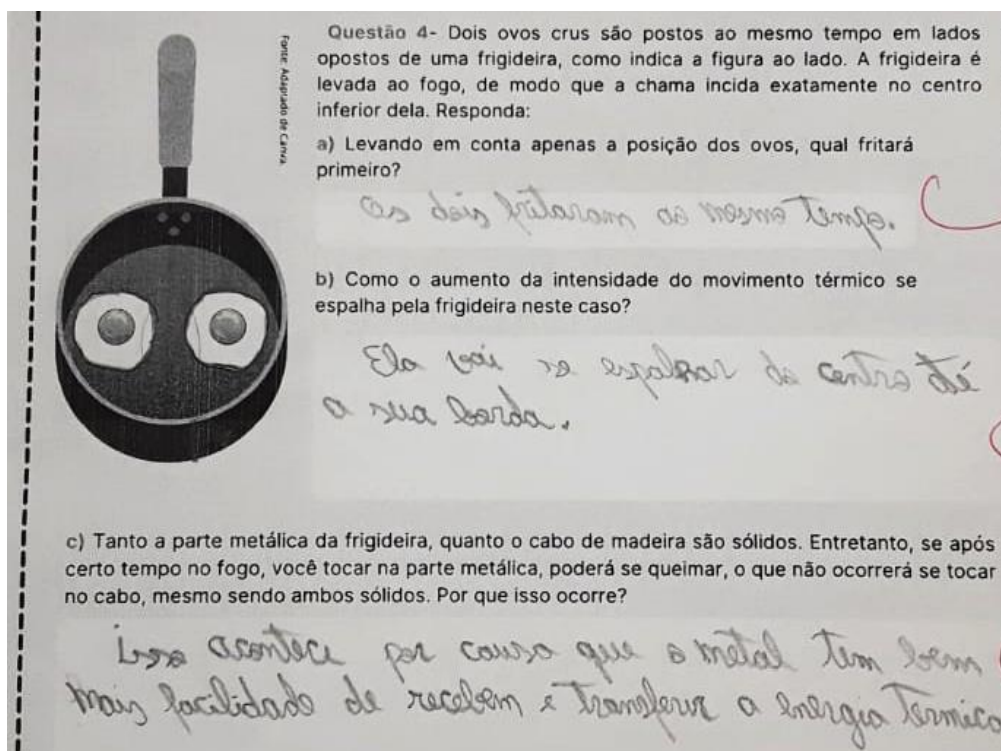
Na questão 4 abordamos os conceitos de temperatura, movimento térmico e condutividade térmica.

**Questão 4:** Dois ovos crus são postos ao mesmo tempo em lados opostos de uma frigideira, como mostrado na figura ao lado (figura 4.18). A frigideira é levada ao fogo, de modo que a chama incida exatamente no centro inferior dela. Responda:

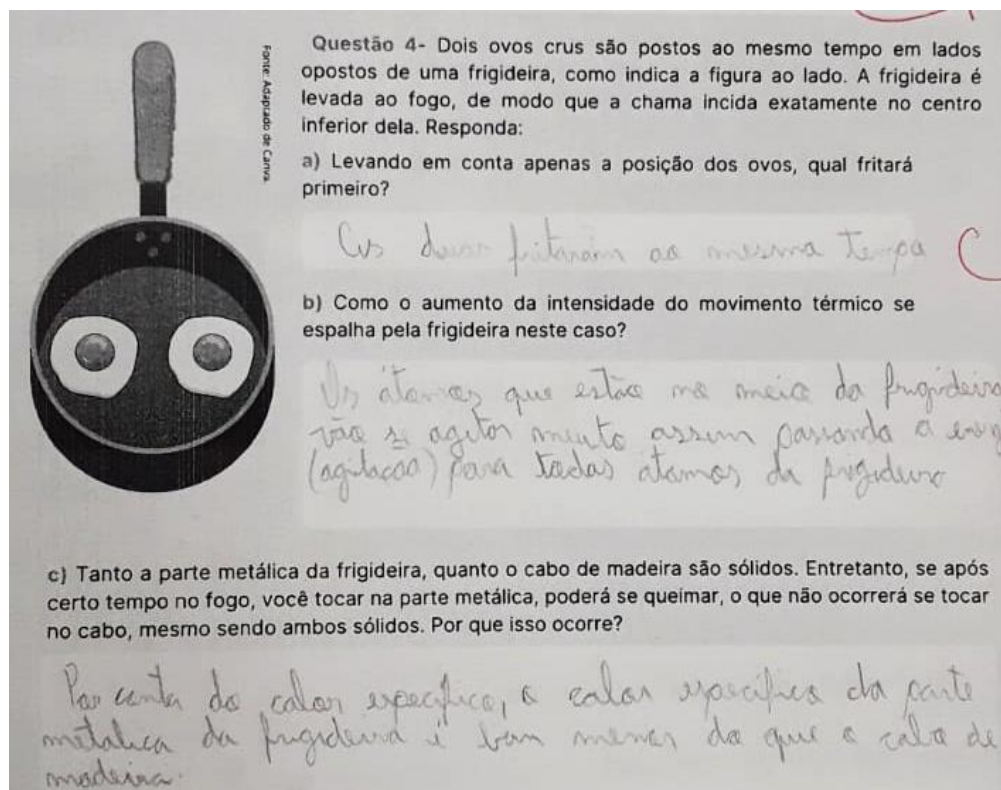
- Levando em conta apenas a posição dos ovos, qual fritará primeiro?
- Como o aumento da intensidade do movimento térmico se propaga pela frigideira neste caso?
- Tanto a parte metálica da frigideira, quanto o cabo de madeira são sólidos. Entretanto, se após certo tempo no fogo, você tocar na parte metálica, poderá se queimar, o que não ocorrerá se tocar no cabo. Por que isso ocorre?

Dois exemplos de respostas são apresentados na figura 4.18.

Figura 4.18 – Exemplos de respostas dos estudantes referente à questão 4 da atividade 6.



“a) Os dois fritaram ao mesmo tempo. b) Ela vai se espalhar do centro até a sua borda. c) Isso acontece por causa que o metal tem bem facilidade de receber e transferir a energia térmica.



“a) Os dois fritaram ao mesmo tempo. b) Os átomos que estão no meio da frigideira vão se agitar muito, assim passando a energia (agitação) para todos átomos da frigideira. c) Por conta do calor específico, o calor específico da parte metálica da frigideira é bem menor do que o cabo de madeira.”

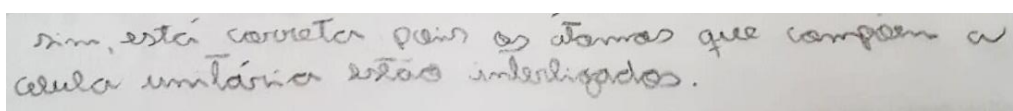
Fonte: Elaborado pelo autor.

Todos os estudantes responderam corretamente o item 4.a), os dois ovos fritariam simultaneamente, já que estavam à mesma distância da fonte de energia. O item 4.b) teve 67% de acertos. É interessante notar as respostas dadas nos exemplos da figura 4.18 para o item 4.c), o qual 59% dos estudantes responderam corretamente. Ambos alunos responderam basicamente a mesma coisa, descrevendo a inércia térmica do sistema, mas na resposta superior da figura 4.18 o aluno coloca de uma forma mais simplificada sem o uso da terminologia científica, enquanto que no exemplo inferior o aluno fala sobre o calor específico dos materiais do sistema. Apesar da diferença entre os calores específicos da madeira e da parte metálica da frigideira fazerem com que estes corpos se aqueçam de maneira diferente, a queima da mão está associada à capacidade que estes materiais possuem em transferir a energia que possuem, ou seja, a propriedade que deveria ser elencada na questão é a condutividade térmica dos materiais.

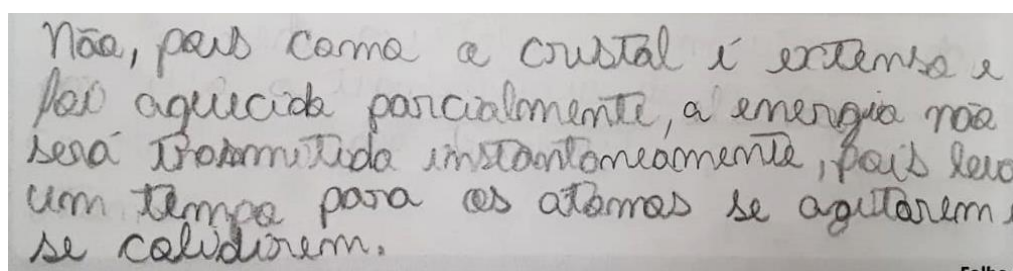
Por fim, na questão 5 abordamos a propagação da energia através do mecanismo da condução. Na figura 4.19 apresentamos dois exemplos de respostas.

**Questão 5:** “Quando um cristal extenso é aquecido em uma extremidade, a energia é transmitida instantaneamente a todos os átomos de toda a rede cristalina, independente da distância da porção diretamente aquecida.” Esta afirmação está correta? Explique!

**Figura 4.19** – Exemplos de respostas dos estudantes referente à questão 5 da atividade 6.



“Sim, está correta pois os átomos que compõem a célula unitária estão interligados.”



“Não, pois como o cristal é extenso e foi aquecido parcialmente, a energia não será transmitida instantaneamente, pois leva um tempo para os átomos se agitarem e se colidirem.”

**Fonte:** Elaborado pelo autor.

O exemplo de resposta apresentado na parte superior da figura 4.19 pertence ao único estudante da turma que considerou, de maneira incorreta, que o aquecimento de um cristal extenso é instantâneo. Alguns alunos responderam corretamente que o aquecimento não é instantâneo, mas não souberam explicar adequadamente o porquê. Cerca de 85% dos estudantes



souberam responder de maneira satisfatória esta questão, como no exemplo inferior da figura 4.19.

Na Tabela 4.3 apresentamos resumidamente a porcentagem de acertos para cada questão da atividade 6.

**Tabela 4.4** – Porcentagem de acertos das questões referentes à avaliação final da nossa UEPS apresentada na atividade 6.

<i>Questão</i>	<i>Acertos</i>
1	78%
2.a)	81%
2.b)	100%
2.c)	89%
3	56%
4.a)	100%
4.b)	67%
4.c)	59%
5	85%

**Fonte:** Elaborado pelo autor.

Diante do esforço e engajamento dos alunos para o desenvolvimento das atividades de nossa UEPS, consideramos que a mesma foi muito bem sucedida em sala de aula para auxiliar na discussão e apresentação de tópicos de física térmica e para a introdução de conceitos referentes à cristalografia.

# Capítulo 5

## CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

---

---

A aplicação do nosso produto educacional nos permitiu analisar as potencialidades do material desenvolvido para a introdução de conceitos de física térmica e cristalografia no ensino médio. Consideramos que o ensino de conceitos de cristalografia já no nível básico é relevante e útil ante à enorme contribuição desta área da ciência para o progresso científico e tecnológico alcançado neste último século.

As observações feitas durante a aplicação da proposta sugerem que a transposição didática que realizamos acerca dos tópicos sobre cristalografia para a descrição das propriedades de sólidos foi proveitosa para a criação de textos explicativos e atividades motivadoras para a construção de significados para os estudantes.

A Atividade 1 mostrou-se muito importante e útil para entendermos as concepções e os conhecimentos prévios dos estudantes. Os mapas conceituais desenvolvidos nesta atividade foram úteis para compararmos as concepções alternativas dos alunos diante da definição de calor, temperatura e da estrutura da matéria antes e após a aplicação das atividades. A comparação entre as ideias apresentadas nos mapas conceituais desta atividade e as respostas da avaliação final da UEPS nos permitiram identificar algumas mudanças de conceitos e possíveis melhorias que podem ser realizadas no nosso produto educacional.

O primeiro momento da Atividade 2 foi importante para aproximar os estudantes dos assuntos a serem aprendidos, servindo como um organizador prévio interessante, já que se constituiu em situações-problema do cotidiano. No segundo momento da Atividade 2, os estudantes puderam explorar melhor a diferença entre os sólidos cristalinos e amorfos para entender o comportamento e as propriedades da matéria a partir da estrutura dos materiais estudados.

A Atividade 3 foi idealizada para ensinar conceitos básicos acerca das redes cristalinas. Essa atividade teve um caráter importante em nossa proposta, pois propiciou a introdução e o tratamento de conceitos de Física do Estado Sólido junto a alunos da educação básica. As redes de Bravais em três dimensões, por exemplo, são estudadas geralmente em disciplinas de cursos universitários. Com a identificação do tipo de rede de Bravais pelos estudantes em problemas teóricos e no simulador construído demonstramos que tais temas podem ser trabalhados de forma adaptada e contextualizada mesmo na educação básica.

A Atividade 4, desenvolvida por meio do simulador mecânico, foi fundamental para a construção de significados importantes para auxiliar no entendimento dos conceitos de temperatura, condução térmica e estrutura dos sólidos cristalinos. Nesta atividade os estudantes puderam compreender de forma prática, mesmo que através de representações, os conceitos indicados. O simulador foi essencial para a ilustração microscópica do movimento térmico e da propagação da energia no interior dos sólidos.

Adicionalmente, a criação e a utilização do vibrômetro foi muito importante para demonstrar a importância da realização de medições na ciência e como os dados experimentais podem ser utilizados para a construção de modelos matemáticos descritivos de nossa rede cristalina simulada. Isto permitiu também demonstrar aos estudantes que a matemática é um método essencial na Física para a descrição e melhor entendimento de fenômenos. Esta construção foi realizada na Atividade 5, que serviu como aprofundamento final dos assuntos estudados. Na Atividade 6, constituída pela avaliação final, foi possível verificar que os alunos puderam assimilar em um primeiro momento, de maneira motivada, os conceitos trabalhados em nossa UEPS.

Devido à simplicidade e praticidade do Caderno do Professor e do Caderno do Aluno, acreditamos que a nossa UEPS possa ser implementada em qualquer turma de estudantes de Ensino Médio, tanto de escolas públicas quanto privadas. Além disso, consideramos que o site que integra nosso produto educacional pode contribuir grandemente como um apoio ao desenvolvimento da UEPS, além de permitir a interação entre alunos e professores de maneira remota. A utilização deste site e das ferramentas de comunicação digitais já existentes foram fundamentais para a aplicação deste produto educacional durante o distanciamento social devido à pandemia de COVID-19. Em última análise, consideramos que os prejuízos de aprendizagem devido ao ensino remoto foram amenizados através da efetiva interação através dos canais de comunicação que dispúnhamos durante a aplicação de nosso produto educacional.

De modo geral, consideramos que os Cadernos do Professor e do Aluno, o simulador mecânico e o vibrômetro, que constituem nosso produto educacional, possam ser uma

alternativa ao ensino tradicional como um material potencialmente significativo e que sejam utilizados e construídos pelos docentes e alunos a fim de tornar a Física ensinada em sala de aula mais compreensiva, desafiadora, enriquecedora e diversificada.

# REFERÊNCIAS

---

ALMEIDA JÚNIOR, J. B. A evolução do ensino de Física no Brasil. Revista de Ensino de Física, v.1, n. 2, p. 45-58, 1979.

ALMEIDA JÚNIOR, J. B. A evolução do ensino de Física no Brasil – 2ª. parte. Revista de Ensino de Física, v. 2, n. 1, p. 55 – 73, 1980.

AMARAL, L.Q. do. Entre Sólidos e Líquidos: uma Visão Contemporânea e Multidisciplinar. São Paulo: Livraria da Física, 2014.

ARANTES, A. R., MIRANDA, M. S., STUDART, N. Objetos de Aprendizagem no ensino de Física: Usando simulações do PhET. Física na Escola, vol. 11, n. 1, 2010, p. 27.

ARAÚJO, M. S. T. de.; ABIB, M. L. V. dos S. Atividades Experimentais no Ensino de Física: Diferentes Enfoques, Diferentes Finalidades. Revista Brasileira de Ensino de Física, vol. 25, n. 2, junho, 2003.

AUSUBEL, D. P. Aquisição e retenção de conhecimentos: uma perspectiva cognitiva. 1ª edição. Lisboa: Plátano, 2003.

AZEVEDO, A. G. S. Monocristais e policristais: Uma avaliação dos métodos de obtenção e caracterização. Revista da Universidade Vale do Rio Verde, Três Corações, v. 11, n. 2, p. 442-454, 2013.

BASSOLI, F. Atividades práticas e o ensino-aprendizagem de ciência(s): mitos, tendências e distorções. Ciênc. Educ., Bauru, v. 20, n. 3, p. 579-593, 2014.

BATISTA, M. C., *et al.* Reflexões sobre a importância da experimentação no ensino de física. Acta Scientiarum. Human and Social Sciences, vol. 31, n.1, p.43-49. Disponível em: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=3073/307325328006>. Acesso em: 10 de janeiro de 2021.

BEZERA, D. P.; *et al.* A evolução do ensino da Física- perspectiva docente. Scientia Plena, v. 5, n. 9, 2009.

BONDIA, J. L. Notas sobre a experiência e o saber de experiência. Revista Brasileira de Educação, v. 19, p. 20-28, 2002.

BRANCO, P de M. Dicionário de Mineralogia e Gemologia. São Paulo: Oficina de Textos, 2ª edição, 2014.

BRASIL. Base Nacional Comum Curricular (BNCC). Brasília: MEC. 2017. Disponível em: [http://basenacionalcomum.mec.gov.br/images/BNCC\\_20dez\\_site.pdf](http://basenacionalcomum.mec.gov.br/images/BNCC_20dez_site.pdf). Acesso em: 20 de junho 2019.

BRASIL. Base Nacional Comum Curricular (BNCC). Brasília: MEC. 2017. Disponível em: [http://basenacionalcomum.mec.gov.br/images/BNCC\\_20dez\\_site.pdf](http://basenacionalcomum.mec.gov.br/images/BNCC_20dez_site.pdf). Acesso em: 20 de junho 2019.

BRASIL. Lei de Diretrizes e Bases da Educação Nacional, LDB. 9394/1996.

BZUNECK, J. A.; GUIMARÃES, S. E. R. Estilos de Professores na Promoção da Motivação Intrínseca: Reformulação e Validação de Instrumento. Psicologia: Teoria e Pesquisa, Brasília, v. 23, n. 4, 415-422, out/dez de 2007.

CALLISTER, William D. Jr. Ciência e engenharia de materiais: uma introdução. 5ª edição. Rio de Janeiro: LTC, 2000.

CAMARGOS, J. S. F.; *et al.* Características e propriedades do grafeno e do óxido de grafeno e as principais rotas para síntese. The Journal of Engineering and Exact Sciences, v. 3, n. 8, p. 1118-1130, 2017.

CAMPOS, G.; *et al.* Tecnicismo e Prática Pedagógica na Escola Contemporânea. Revista Científica Eletrônica de Pedagogia. Disponível em: [http://faef.revista.inf.br/imagens\\_arquivos/arquivos\\_destaque/XdNUukCctbM9ZA\\_2013-7-10-15-6-55.pdf](http://faef.revista.inf.br/imagens_arquivos/arquivos_destaque/XdNUukCctbM9ZA_2013-7-10-15-6-55.pdf). Acesso em: 11 de janeiro de 2021.

CAMPOS, M. C. C.; NIGRO, R. G. Didática de ciências: o ensino-aprendizagem como investigação. São Paulo: FTD, 1999.

CARAM JR, R. Estrutura e propriedades dos materiais. Campinas: Unicamp, 2000. Disponível em: <http://www.fem.unicamp.br/~caram/capitulo3.pdf>. Acessado em 10 de janeiro de 2022.

CERVO, A. L.; BERVIAN, P. A. Metodologia científica. 5. ed. São Paulo: Prentice Hall, 2002.

DA ROSA, C. W.; DA ROSA, A. B. O ensino de ciências (Física) no Brasil: da história às novas orientações educacionais. Revista Iberoamericana de Educación, p. 1- 24, 2012.

DURÁN, N.; *et al.* Tecnologia de nanocristais em fármacos. Revista Química Nova, v. 33, n. 1, p. 151-158, 2010.

FERNANDES, E. David Ausubel e a Aprendizagem Significativa. Revista Nova Escola, ed. 248, 2011. Disponível em: <https://novaescola.org.br/conteudo/262/davidausubel-e-a-aprendizagem-significativa>. Acesso em: 01 de julho de 2019.

FREIRE, Paulo. Educação como prática da liberdade. 23ª edição. Rio de Janeiro: Paz e Terra. 1999.

GIL PEREZ, D. e CASTRO, P. V. La orientacion de las practicas de laboratorio como investigación: un ejemplo ilustrativo. Enseñanza de las Ciencias, Barcelona, v.14, n.2, 155-163. 1996.

- GIORDAN, M. O papel da experimentação no ensino de ciências. Química Nova na Escola, n. 10, p. 43 – 49, 1999.
- HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. Fundamentals of Physics. Extended 8th Edition. Wiley, 2007.
- HEWITT, P. Física Conceitual. 9ª edição. Porto Alegre: Bookman, 2002.
- HODSON, D. A critical look at practical work in school Science. School Science Review, p. 33 -40, 1990.
- HODSON, D. Hacia um Enfoque más Crítico del Trabajo de Laboratorio. Enseñanza de las Ciencias, Barcelona, v. 12, n.3, p. 299-313. 1994.
- KITTEL, C. Introdução à física do estado sólido. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1978.
- KLIMOV, V. I. Nanocrystal quantum dots: from fundamental photophysics to multicolor lasing. Los Alamos Science. Los Alamos, US, n.28, p.214-220, 2003. Disponível em: <https://permalink.lanl.gov/object/tr?what=info:lanl-repo/lareport/LA-UR-03-4459>. Acesso em: 10 de janeiro de 2022.
- LABURÚ, C. A.; ZÔMPERO, A. F. Atividades investigativas no ensino de ciências: aspectos históricos e diferentes abordagens. Rev. Ensaio, v. 13. n. 3, p. 67 -80, Belo Horizonte, 2011.
- LIMA, V. V. Espiral construtivista: uma metodologia ativa de ensino aprendizagem. Interface, p. 421 – 434, Botucatu, 2017.
- LOURENÇO, A. F; PAIVA, M. O. A. De. A Motivação Escolar e o Processo de Aprendizagem. Ciência & Cognição, Rio de Janeiro, v. 15, n. 2, p. 132-141, ago. 2010. Disponível em: [http://pepsic.bvsalud.org/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1806-58212010000200012&lng=pt&nrm=iso](http://pepsic.bvsalud.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1806-58212010000200012&lng=pt&nrm=iso). Acesso em: 10 de janeiro de 2021.
- MACEDO, L. A favor da experimentação. Revista Nova Escola, n. 309, 2018. Disponível em: <https://novaescola.org.br/conteudo/10061/a-favor-da-experimentacao/>. Acesso em: 12 de janeiro de 2021.
- MACHADO, A. A. S. C. A estrutura da água: A estrutura da água determina as suas características. Revista Indústria da Água, v. 4, n. 14, p. 61-66, 1995.
- MADEIRA, L.; VITIELLO, S. A. A função radial de distribuição de pares para sistemas Lennard-Jones bidimensionais. Revista Brasileira de Ensino Física, v. 34, n. 4, p. 4303, 2013.
- MARION, B.; HASAN, N. Grafeno: Inovações, Aplicações e Comercialização. Interfaces Científicas – Exatas e Tecnológicas, v. 2, n. 1, p. 29-40, 2016.
- MENEZES, L. C. de. A matéria: Uma aventura do espírito. São Paulo: Livraria da Física., 2005.

MIRÓ, P.; *et al.* An Atlas of Two-Dimensional Materials. Chemical Society Reviews, v. 43, p. 6537-6554, 2014.

MOREIRA, M. A. *et al.* Repensando o papel do trabalho experimental, na aprendizagem da física, em sala de aula- um estudo exploratório. Investigações no Ensino de Ciências. Porto Alegre, v. 11(3), p.383-401, 2006.

MOREIRA, M. A. O que é afinal aprendizagem significativa? Cuiabá: Instituto de Física, Universidade Federal de Mato Grosso, 2010. Disponível em: <https://www.if.ufrgs.br/~moreira/oqueefinal.pdf>. Acesso em: 25 de julho de 2019.

MOREIRA, M. A. Unidade de ensino potencialmente significativas-UEPS. Porto Alegre: Instituto de Física, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2011. Disponível em: <https://www.if.ufrgs.br/~moreira/UEPSport.pdf>. Acesso em: 01 de julho de 2019.

MOREIRA, M. A., Teorias de Aprendizagem. São Paulo: E.P.U., 1999.

MOREIRA, M.A. Modelos Mentais. Investigações em Ensino de Ciências, v. 1, n. 3, p. 193 – 232, 1996.

MOREIRA, M.A. Grandes Desafios para o Ensino da Física na Educação Contemporânea. Revista do Professor de Física, v. 1, n. 1, p. 1 – 13, 2017.

MUNIZ, S. R. Estrutura da Matéria. São Paulo: USP/UNIVESP, 2012.

NASCIMENTO, R.; MACHADO, J. Matéria Cristalina: Minerais, Cristais e Sistemas Cristalinos. Belém: UFPA, 2018.

NUSSENZVEIG, H.M. Curso de Física Básica 2: Fluídos, Oscilações e Ondas, Calor. São Paulo: Edgard Blücher, 1997.

OLIVEIRA, A. de. A descoberta que mudou a Humanidade. Instituto Ciência Hoje, 2010. Disponível em: <https://cienciahoje.org.br/coluna/a-descoberta-que-mudou-a-humanidade/>. Acesso em: 10 de novembro de 2021.

ORNELLAS, A. A energia: Dos tempos antigos aos dias atuais. Alagoas: Edufal, 2006.

PEREIRA, B. B. Experimentação no ensino de ciências e o papel do professor na construção do conhecimento. Cadernos da Fucamp, v.9, n. 10, 2010. Disponível em: <https://www.fucamp.edu.br/editora/index.php/cadernos/article/view/176/170>. Acesso em: 12 de janeiro de 2021.

QUEIROZ, M. N. A.; HOSOUME, Y. Ensino de Física no Brasil nas décadas de 1960-1979 na perspectiva dos projetos inovadores PSSC, PEF e FAI. XVI Encontro de Pesquisa de Ensino de Física, Natal, 2016.



- ROBINETT, R. W. Average value of position for the anharmonic oscillator: Classical versus quantum results. American Journal of Physics v. 65, n. 3, p. 190-194, 1997.
- SANTOS, E. I. dos.; PIASSI, L. P. C.; FERREIRA, N. C. Atividades Experimentais de Baixo Custo como Estratégia de Construção da Autonomia de Professores de Física: uma Experiência em Formação Continuada. IX Encontro Nacional de Pesquisa em Ensino de Física. Jaboticatubas, MG, out. 2004.
- SÃO PAULO. Secretaria de Estado da Educação. Proposta Curricular do Estado de São Paulo. São Paulo: São Paulo SEE, 2008.
- SÈRÈ, M. G; *et al.* O papel da experimentação no ensino da física. Caderno Brasileiro de Ensino de Física, v.20, n.1, p. 30-42, 2003.
- SUSSUCHI, E. M.; SANTOS, D. O. Química inorgânica I. São Cristóvão: Universidade Federal de Sergipe / CESAD, 2017.
- TAHA, M. S.; *et al.* Experimentação como Ferramenta Pedagógica no Ensino de Ciências. Experiencias no Ensino de Ciências, v. 11, n. 1, p. 138 – 154, 2016.
- TORRIANI, I. L. Cristalografia: Uma ciência interdisciplinar. Revista Ciência e Cultura, v. 66, n.3, p. 4- 5, 2014.
- VINSWANATHAN, K. S. The theory of the anharmonic oscillator. Bangalore: Raman Research Institute, 1957.
- WANG, Y. *et al.* Hydrothermal synthesis of single-crystal BaTiO<sub>3</sub> dendrites. Materials Letters, v. 63, n. 2, p. 239–241, jan. 2009.
- YOUNG, H. D., FREEDMAN, R. A. Física II, Sears e Zemansky: Termodinâmica e Ondas. 14ª edição. São Paulo: Pearson, 2015.
- ZACHARIASEN, W. H. The atomic arrangement in glass. Journal of the American Chemical Society, v. 54, p. 3841 – 3851, 1932.

# Apêndice

## PRODUTO EDUCACIONAL

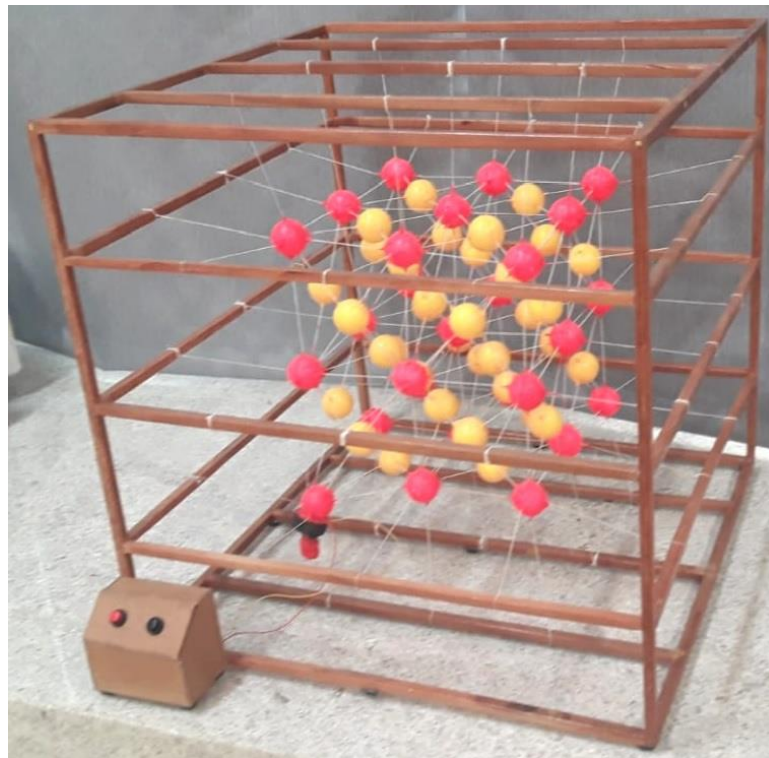
---

**MNPEF**  
Mestrado Nacional  
Profissional em  
Ensino de Física

**MNPEF** Mestrado Nacional  
Profissional em  
Ensino de Física  
Polo **ufisf** Sorocaba



*UNIDADE DE ENSINO POTENCIALMENTE SIGNIFICATIVA  
PARA A INTRODUÇÃO DE CONCEITOS DE FÍSICA TÉRMICA  
E CRISTALOGRAFIA*



Cristino, W. M. B. e J. A. Souza

Sorocaba – SP  
Fevereiro de 2022

# PREFÁCIO

Nosso produto educacional consiste de uma Unidade de Ensino Potencialmente Significativa (UEPS) elaborada em uma linguagem acessível para o(a) professor(a) do ensino médio no formato de uma apostila (e-book) intitulada *Caderno do Professor*, em que conceitos de física térmica e cristalografia são trabalhados com o auxílio de um simulador mecânico, que pode ser construído tanto pelo professor quanto pelos alunos. Adicionalmente, foi feito um material exclusivo para o aluno, intitulado *Caderno do Aluno*, para o professor poder acompanhar a evolução do aluno nos temas propostos através de atividades e questionários.

O Caderno do Professor é um material mais completo contendo, além dos assuntos abordados, as respostas dos problemas propostos no Caderno do Aluno, os manuais de construção dos dispositivos propostos e as recomendações e sugestões pedagógicas para uso e desenvolvimento das atividades em sala de aula. O Caderno do Aluno é destinado aos estudantes e é idêntico ao Caderno do Professor em relação aos conteúdos e aos problemas, mas não apresenta qualquer resposta ou dicas de resolução. Ambos os cadernos possuem seis atividades que devem ser desenvolvidas em sala de aula. Cada atividade foi concebida para atender as etapas próprias de uma UEPS e possuem tempo de aplicação sugestivo, variando entre duas e quatro aulas de cinquenta minutos.

O simulador mecânico proposto é um dispositivo utilizado para representar, por meio de analogia, a estrutura interna de um sólido cristalino e fornecer uma melhor abstração sobre o movimento térmico das suas partículas constituintes. Tal dispositivo foi idealizado para ser construído preferencialmente pelo professor, para otimizar o tempo em sala de aula. O manual de construção do simulador mecânico está contido no Caderno do Professor sob o título “*Manual de Construção: Simulador Mecânico*”. Além do simulador mecânico, um dispositivo chamado de “*vibrômetro*” foi construído para medir o movimento oscilatório das partículas do sólido cristalino simulado. O manual de construção do vibrômetro também está disponível no Caderno do Professor, intitulado como “*Manual de Construção: Vibrômetro*”. Apesar de ambos os manuais de construção estarem contidos no Caderno do Professor apenas, estes podem ser utilizados e disponibilizados independentemente pelos professores para permitir que os alunos construam os dispositivos em suas casas ou na escola em atividades fora do horário da aula.

Para facilitar a disponibilização e aquisição dos Cadernos do Professor e do Aluno e dos manuais de construção, foi construído um site que denominamos “*Movimento Térmico em Redes Cristalinas*”, disponível no endereço eletrônico:

<https://fisicatermica.wixsite.com/simulador>

Além de permitir o download dos arquivos citados, o site permite a interação dos alunos entre si e com o professor por meio de fóruns e discussões. Os Cadernos do Professor e do Aluno são apresentados neste produto de maneira independente para que possam ser utilizados individualmente pelos alunos e professores.

Para dúvidas ou informações adicionais, envie um e-mail para  
[wesleyboracchi@hotmail.com](mailto:wesleyboracchi@hotmail.com)

Os autores.

Este material foi produzido no Programa de Mestrado Profissional em Ensino de Física da Universidade Federal de São Carlos, *campus* Sorocaba (PROFIS-So)  
Sorocaba, fevereiro de 2022.

Unidade de Ensino Potencialmente  
Significativa (UEPS)

# Movimento Térmico

em

# Redes Cristalinas

Conceitos, Atividades &  
Simulação Experimental

**Caderno do Professor**



Wesley Boracchi | James Souza

Física - Ensino Médio

Unidade de Ensino potencialmente  
Significativa (UEPS)

**Movimento Térmico**

**em**

**Redes Cristalinas**

Conceitos, Atividades &  
Simulação Experimental

**Caderno do Professor**



1ª Edição

Sorocaba - SP

Edição do Autor

2021

Este material foi concebido para subsidiar atividades da disciplina de Física para o Ensino Médio e pode ser reproduzido livremente, incluindo as imagens autorais, desde que devidamente citadas as fontes.

Este documento é veiculado gratuitamente, sem fins lucrativos ou comerciais para os autores, objetivando somente a divulgação de práticas para o enriquecimento e diversificação do ensino da Física escolar.

## *Apresentação*

Caro Professor, este caderno traz a proposta de abordagem de conteúdos de Física Térmica, com enfoque no estudo de sólidos cristalinos para o Ensino Médio. Buscamos, assim, a implementação de noções introdutórias de Física do Estado Sólido na educação básica, na intenção de diversificá-la e enriquecê-la. A sequência de atividades e aulas elencadas neste material foi idealizada segundo a Teoria da Aprendizagem Significativa de Ausubel. Desta forma, este material foi concebido para constituir-se numa Unidade de Ensino Potencialmente Significativa (UEPS).

A proposta central desta sequência de atividades é a construção e a utilização de um simulador mecânico para o estudo da condução da energia térmica em sólidos cristalinos. Este caderno de atividades trata-se do produto educacional desenvolvido sob orientação do Prof. Dr. James Alves de Souza para o Mestrado Profissional em Ensino de Física, realizado na Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), campus de Sorocaba. Esse programa de mestrado é mantido pela Sociedade Brasileira de Física (SBF) e tem abrangência nacional.

A utilização deste material é livre, assim como a versão para o estudante intitulada "Caderno do Aluno". Neste presente Caderno do Professor, encontram-se todos os textos do Caderno do Aluno, as recomendações pedagógicas e as respostas dos problemas elencados, além dos manuais de construção dos dispositivos propostos. Esperamos animosamente, contribuir, através deste material, com o desenvolvimento de boas práticas no ensino da Física escolar, possibilitando uma aprendizagem significativa e enriquecedora a todos os nossos estudantes. Tenham um excelente trabalho!

Prof. Wesley Boracchi,  
O Autor

# Sumário

<b>Atividade 1: Para começar a pensar</b> .....	<b>1</b>
● Explorando o Conhecimento Prévio	
<b>Atividade 2: Calor, temperatura e estrutura de sólidos</b> .....	<b>2</b>
● Situações-Problema como Organizador Prévio	
● Apresentando o Conhecimento a ser Ensinado	
<b>Atividade 3: Redes cristalinas</b> .....	<b>8</b>
● Aprofundando o Conhecimento I- Abordagem Teórica.	
<b>Atividade 4: Experimento: Movimento térmico em redes cristalinas</b> .....	<b>11</b>
● Aprofundando o Conhecimento II - Abordagem Experimental	
<b>Atividade 5: Construindo um Modelo Explicativo</b> .....	<b>24</b>
● Aprofundando o Conhecimento III - Construindo Modelos	
<b>Atividade 6: Avaliação Final</b> .....	<b>38</b>
● Promovendo a Reconciliação Integradora Final	
<b>Referências</b> .....	<b>40</b>



Este ícone indica resposta de uma questão, comentários ou recomendações didáticas.



# Atividade 1: Para começar a pensar

## Explorando o Conhecimento Prévio

**TEMPO ESTIMADO:** 1 aula de 50 minutos.  
**OBJETIVO:** Explorar o Conhecimento Prévio.  
**ATIVIDADE PROPOSTA:** Mapa Conceitual.

Nesta primeira aula será proposta uma atividade para entender o conhecimento prévio que os alunos já detêm, da vida diária ou das etapas anteriores de escolarização, sobre os temas centrais dessa sequência didática: o **calor** e a **estrutura da matéria**. Para isso, a atividade proposta para esta aula é a construção de um **MAPA CONCEITUAL** sobre os temas elencados. Sugere-se que esta atividade inicial seja realizada individualmente pelos estudantes e que, depois, as principais ideias levantadas pelos estudantes seja discutida, com a participação de toda a turma. Abaixo segue a atividade como mostrada no Caderno do Aluno.

### Caderno do Aluno

#### Página 1

O calor está presente em praticamente todos os fenômenos naturais. A compreensão acerca da energia térmica e seu emprego trouxe uma verdadeira revolução para a sociedade humana. Mais que isso, os processos térmicos estão presentes nos seres vivos. Calor traz vida. Não obstante, a compreensão da estrutura da matéria também permitiu ao homem conhecer um pouco mais a natureza, e a partir daí, conceber materiais cada vez mais sofisticados, culminando em diversos avanços tecnológicos. Nesta aula, você explorará o conhecimento que já possui sobre o tema.



Fonte: Canvas.

Uma fogueira é uma fonte de energia térmica.

### Atividade

Para iniciar nosso estudo acerca do calor, vamos expor o que já sabemos sobre o assunto? Para isso, construa no espaço abaixo um **Mapa Conceitual** sobre *Calor e Estrutura da Matéria*. Para entender o que é um mapa conceitual, assista ao vídeo de 6 minutos e 17 segundos do *Youtube*, indicado a seguir:

COLLAR, L. Aprenda mais sobre os mapas conceituais. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=mhQIAv8Av1s>. Acesso em: 17/05/2021.

. Use as **questões norteadoras** abaixo para lhe ajudar a construir seu mapa (ele deve contemplar os assuntos elencados).

- O que você entende por calor ?
- Do que são feitos os corpos à sua volta ?
- Você acha que as partículas que formam os corpos possuem alguma forma de organização? Você acha que elas estão paradas?



Peça aos alunos que construam os mapas conceituais neste espaço. Explique aos alunos que as questões acima não devem ser respondidas diretamente, mas têm a função de instigar a reflexão dos alunos sobre os temas e, assim, auxiliar a construção dos mapas conceituais.



É importante que você, professor, oriente os alunos a não realizar consultas em qualquer fonte de pesquisa para a construção do mapa, pois trata-se de uma atividade de levantamento de conhecimentos prévios. Não há problema se surgirem explicações cientificamente incorretas nos mapas dos alunos. A correção dos conceitos e suas formalizações será realizada nas próximas atividades.

# Atividade 2: Calor, Temperatura e Estrutura de Sólidos

Situações-Problema como Organizador Prévio ● Apresentando o Conhecimento a ser Ensinado

**TEMPO ESTIMADO:** 4 aulas de 50 minutos cada.  
**OBJETIVO:** Propor um Organizador Prévio e Introduzir o Conhecimento a ser ensinado.  
**ATIVIDADE PROPOSTA:** Questões-problema, vídeos e leitura de textos.

Esta atividade foi idealizada para ser desenvolvida em 4 aulas e tem como foco a resolução de situações-problema. Porém ela é dividida em dois momentos diferentes.

No **primeiro momento** são propostas 6 **situações-problema** que devem ser respondidas tomando por base apenas o conhecimento que o aluno já possui em sua estrutura cognitiva. O objetivo deste primeiro momento é fazer com que o aluno externalize seu conhecimento prévio sobre os assuntos elencados. A ideia aqui adotada é fazer com que o estudante crie modelos mentais para resolver os problemas indicados. Desta forma, é imprescindível que o professor deixe os estudantes resolverem os problemas por conta própria, não fornecendo respostas prontas e não permitindo que consultem alguma fonte de pesquisa. O objetivo destes problemas é de servir como um organizador prévio. Essa atividade segue mostrada como aparece no Caderno do Aluno, abaixo:

## Caderno do Aluno

### Página 2

O calor é um processo natural que está fortemente presente em várias situações à nossa volta. Seja no aquecimento provocado pelo Sol, no esfriamento de uma xícara de café ou na escolha de um casaco apropriado em um dia frio. A energia térmica está intimamente relacionada com alguns comportamentos internos da matéria, sobretudo àqueles relacionados à sua propagação nos materiais. Nesta aula, você refletirá sobre algumas dessas situações e também sobre o comportamento térmico dos sólidos.




Fonte: Canvas.

O derretimento do gelo está intimamente relacionado com o calor.

## Problemas

Para pensar, com **base em seus conhecimentos**, responda as seguintes questões propostas:

**Questão 1:** Se você estivesse em uma praça, durante um dia ensolarado de Verão e avistasse dois bancos, um de ferro e outro de madeira, qual deles você escolheria para sentar-se? Por quê?

Resposta:  **Resposta pessoal do aluno. Embora**

**a resolução correta seja baseada em conceitos científicos,**

**a intenção deste problema é fazer com que o aluno**

**tente construir explicações a partir de seus próprios**

**conhecimentos. O conhecimento científico por trás**

**deste problema é o do calor específico: o banco de ferro**

**será evitado, pois tem "maior facilidade" (menor calor específico) de**

**ser aquecido em relação à madeira, mesmo ambos sendo aquecidos pela mesma fonte térmica (Sol).**



Fonte: Adaptado do Canvas.

Praça no verão.

**Questão 2:** O diamante e o grafite são feitos exclusivamente de átomos de carbono e, apesar disso, possuem características macroscópicas muito diferentes, como cor, dureza e densidade. Se ambos materiais são formados exatamente pelos mesmos átomos, como você explicaria essas diferenças? Registre suas ideias como resposta!

Resposta:  **Resposta pessoal do aluno. O objetivo aqui**

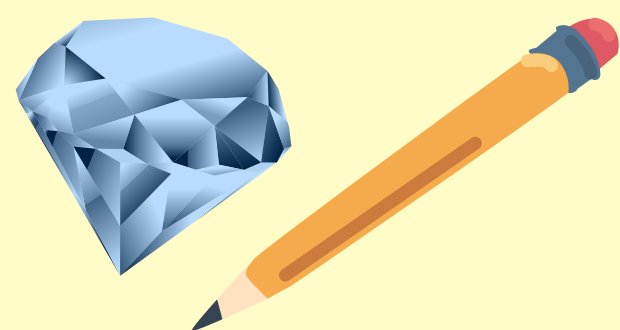
**é fazer com que o aluno reflita sobre a constituição dos materiais.**

**Os estudantes podem conjecturar que as diferenças nos aspectos**

**externos podem estar relacionadas aos internos. Como os átomos que**

**que formam ambos materiais são os mesmos, os alunos poderão**


**inferir que pode haver alguma diferença no modo como estas partículas estão ligadas.**



Fonte: Canvas.

O diamante e o grafite de um lápis de escrever são feitos apenas de carbono.

**Questão 3:** Durante um churrasco, não é muito aconselhável manipular a brasa por longo tempo com um objeto inteiramente metálico. Imagine que você ignore essa recomendação e introduza a extremidade de um objeto metálico na brasa enquanto segura a outra extremidade com uma das mãos e aguarda por alguns minutos. Se sua mão não entra em contato direto com a brasa, por que, mesmo assim, é possível queimá-la? Como a energia térmica foi transmitida até a sua mão?

Resposta:  **Resposta pessoal do aluno. Espera-se que o estudante conclua que a energia térmica, que provavelmente o aluno vá se referir de maneira incorreta como "calor", só pode ter sido transmitida internamente, através do material metálico.**




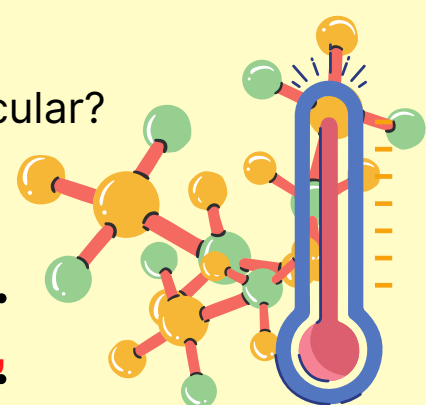
Fonte: Adaptado do Canvas.

Churrasco.

**Questão 4:** Analise a seguinte afirmação cientificamente verdadeira: "À medida que aquecemos um corpo, suas partículas constituintes se movimentam com velocidades cada vez maiores". A partir dessa informação, e por meio da reflexão, responda:


**a)** Você acha que existe relação entre a temperatura de um corpo e o movimento molecular?

Resposta:  **Resposta pessoal do aluno. Espera-se que o estudante chegue à conclusão de que o aquecimento leva ao aumento da temperatura. Logo, a partir desta afirmação, o aumento da temperatura faz aumentar o movimento das partículas. Assim, por dedução, a temperatura e o movimento molecular estão relacionados.**



Fonte: Adaptado do Canvas.


**b)** Você acha que existe algum limite inferior para a intensidade da agitação molecular? E para a temperatura?

Resposta:  **Resposta pessoal do aluno. O estudante pode chegar à conclusão de que um dos limites de todo movimento é o repouso. Assim, a partir da afirmação do enunciado, se, a priori, as partículas pudessem atingir o repouso, a agitação das partículas, cessaria e a temperatura seria a menor possível. Vale salientar que estas podem ser as respostas levantadas pelos alunos. Posteriormente, essas mesmas questões serão corrigidas com os estudantes e o professor poderá indicar que, na realidade, os átomos nunca atingem o repouso absoluto, uma vez que a temperatura equivale - lente ao "zero absoluto" seja fisicamente inatingível.**



Quando um corpo se aquece suas moléculas se agitam mais.

**Questão 5:** Em um dia de verão, Maria escreve em uma mensagem "estou com calor!" e a envia a você. Curioso, você pede para ela explicar melhor o que está acontecendo. Ela então lhe responde: "Minha casa tem muito calor, por isso está muito quente". Você acha que a forma que Maria utiliza a palavra *calor* está correta? Para você, calor e temperatura são a mesma coisa?

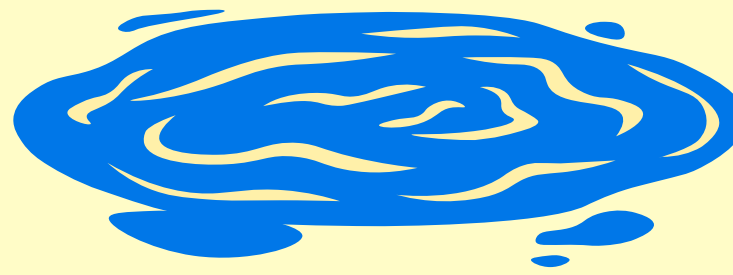
Resposta:  **Resposta pessoal do aluno. Provavelmente os estudantes considerem o calor e a temperatura como sinônimos. Essa distinção será realizada no segundo momento desta aula.**



Fonte: Canvas.


Maria está correta?

**Questão 6:** Observando um cubo de gelo e uma pequena poça d'água, em qual destes corpos você considera haver maior organização molecular? Por quê ?



Fonte: Canvas.

Um cubo de gelo e uma poça d'água: em qual desses corpos as partículas estão mais organizadas?

Resposta:  **Resposta pessoal do aluno. Espera-se que os estudantes associem o estado líquido à maior liberdade do movimento das moléculas, já que o líquido é capaz de fluir e adquirir qualquer formato, diferentemente do gelo que é sólido. Assim, o aluno pode inferir que as moléculas da água no gelo tenderiam a estar espacialmente mais organizadas que na água líquida. Esse problema exige alto grau de abstração para que o aluno construa um modelo mental mais coerente com a realidade.**

O **segundo momento** desta aula foi idealizado para colocar o estudante em um **primeiro contato com o conhecimento científico a ser ensinado**. Esse primeiro contato se dará na forma de vídeos e textos propostos para uma abordagem inicial essencialmente conceitual e introdutória. A partir desta parte, os novos conhecimentos a serem aprendidos pelos estudantes começarão a ser ancorados sobre aqueles já existentes na estrutura cognitiva dos aprendizes. Este segundo momento segue exposto a seguir, conforme o Caderno do Aluno.

Agora, vamos investigar esses assuntos com um pouco mais de detalhe. Nesta segunda parte da aula, você começará a entender microscopicamente o que diferencia um estado físico de outro e a diferença interna dos sólidos. Assista ao vídeo indicado e leia os textos 1 e 2, abaixo:

**Vídeos** Assista ao vídeo indicado do Youtube:

- **"Conceito de Calor- Física Térmica."** [https://www.youtube.com/watch?v=h4lpkl\\_qmJA](https://www.youtube.com/watch?v=h4lpkl_qmJA). Vídeo do Canal Wesley Boracchi. **Duração:** 12 min. e 46 seg.



**O vídeo, "Conceito de Calor- Física Térmica", faz a diferenciação conceitual entre calor e temperatura. O mais interessante deste vídeo é que se faz uma distinção correta e importante entre calor e energia térmica. Poucos livros didáticos de Física fazem o correto uso do conceito do calor! A discussão destes conceitos pode ser intensificada por você, professor, após o vídeo ser assistido.**

Após assistir ao vídeo indicado, são apresentados os Textos 1 e 2, no Caderno do Aluno, conforme mostrado a seguir. Sugere-se que estes textos sejam lidos juntos com os estudantes, na forma de leitura compartilhada.

## Texto 1 Os Estados Físicos da Matéria

A matéria pode se apresentar, basicamente, em **três estados físicos** diferentes. Estes estados refletem o estado de agregação das partículas (moléculas, átomos ou íons) de um corpo, isto é, o quanto essas partículas estão próximas, ou afastadas umas das outras. As partículas que constituem os corpos possuem energia cinética e, portanto, se movimentam constantemente (YOUNG & FREEDMAN, 2015). A ação combinada do movimento das partículas é denominada de **movimento térmico**. Assim, quanto maior a intensidade da agitação molecular, mais espaço cada partícula necessita para realizar seu movimento, o que causa uma maior separação entre elas. A grandeza associada diretamente à agitação molecular é a **temperatura** (HEWITT, 2002). Deste modo, quanto mais agitadas estiverem as partículas de um corpo, maior será sua temperatura.

O estado de menor agitação molecular, e conseqüente maior agregação das partículas, é o estado **sólido**. Neste estado, as moléculas de um corpo estão se movimentando em todas as direções, mas no entorno de posições fixas (AMARAL, 2014). Isto permite que as partículas ocupem uma posição média definida, o que confere aos corpos neste estado, um formato fixo e bem definido também. Um bom exemplo é o gelo. As moléculas de água se agitam em torno de posições fixas o que permite ao gelo possuir uma estrutura molecular organizada. É por isso que o gelo possui um formato rígido e definido antes de derreter.



O gelo possui um formato definido: é um sólido.



A água, assim como todos os líquidos, assume o formato do recipiente que a contém.

Ao aumentar a agitação molecular, isto é, a temperatura, as moléculas se afastam mais umas das outras, até chegar ao ponto em que as moléculas passam a se mover mais livremente. Macroscopicamente, essa maior separação causa a fusão do corpo e obtemos o estado **líquido** do sistema. Neste estado, as moléculas estão mais desagregadas e deixam de se movimentar no entorno de posições definidas, mas ainda permanecem ligadas às suas vizinhas (AMARAL, 2014). A água líquida é um exemplo clássico. Suas moléculas possuem certa liberdade de movimento e ao mesmo tempo estão unidas umas às outras. Este fato permite à água, e a todos os líquidos, a capacidade de fluir e não assumir um formato próprio definido.

Fornecendo mais energia ao sistema, conseqüentemente, aumentamos mais ainda a agitação molecular. As moléculas que estavam no estado líquido se afastam ainda mais entre si, e passam a se mover praticamente de forma livre. Essa transição de estado é chamada vaporização e após ela, obtemos o estado **gasoso**. Os gases são formados por moléculas que possuem grande energia cinética (NUSSENZVEIG, 2002). Exemplo disso é o vapor d'água. Outro exemplo interessante é o ar, que é uma mistura gasosa. Essa grande liberdade das partículas de um gás permite a ele se espalhar por todo o recipiente que os contém, ocupando todo o volume disponível. É por isso que você nunca correrá o risco de sufocar-se em um cômodo aberto, pois o ar sempre vai ocupar todo o espaço disponível nele.



Os gases possuem partículas livres e ocupam todo o volume dos recipientes que os encerram.

Elaborado pelo Autor.

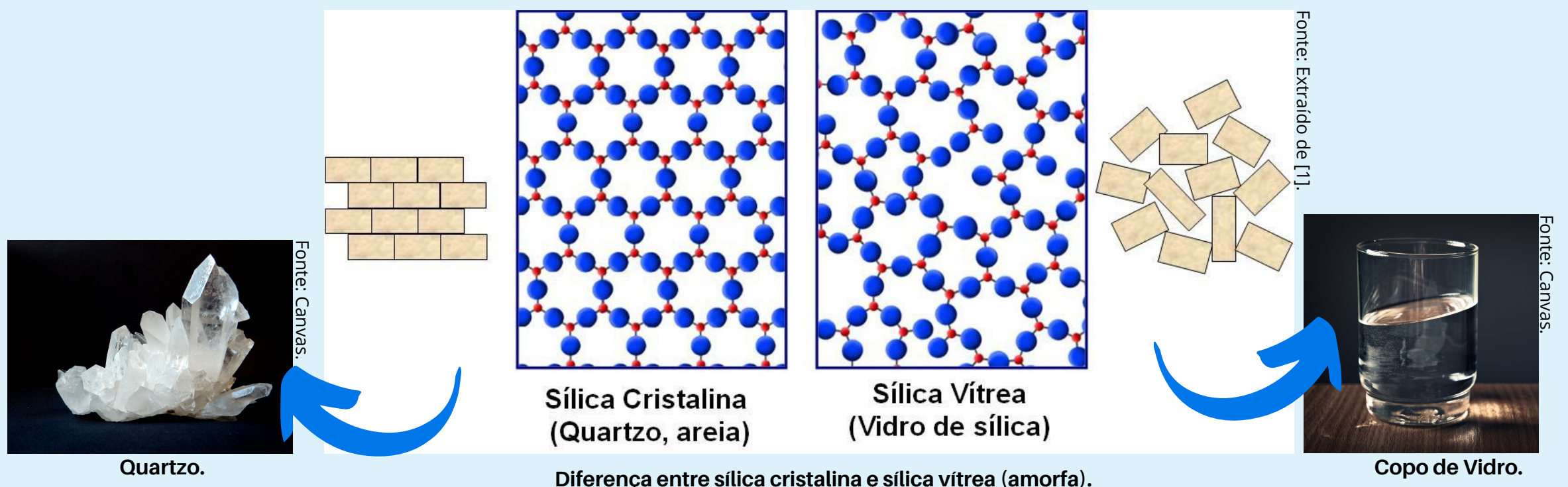
## Texto 2 O Quartzo e o Vidro

Provavelmente você já ouviu falar que o vidro é fabricado a partir da areia. O vidro e o quartzo tem a mesma composição química, ambos são formados por sílica ( $\text{SiO}_2$ ) (ZACHARIASEN, 1932). A areia nada mais é que pequenos fragmentos de quartzo. Este, por sua vez, é um mineral muito abundante na crosta terrestre, formando diversas rochas, como o granito e o arenito (LUZ; LINS, 2008). Acontece que, embora visualmente muito parecidos, o vidro comum e o quartzo tem algumas propriedades diferentes. Uma delas é a dureza!

O quartzo é capaz de riscar o vidro, o que indica que sua dureza é superior. Mas, se ambos são feitos de sílica, por que são diferentes? A resposta envolve a estrutura interna destes materiais. Embora sejam feitos da mesma substância, a forma como os átomos estão organizados é diferente.

O quartzo possui uma estrutura interna organizada, isto é, seus átomos estão em posições ordenadas, formando um padrão repetitivo. Em outras palavras, o quartzo é um **crystal**. Aliás, todos os minerais são cristais! Essa estrutura organizada é chamada de **estrutura cristalina** (CALLISTER JR, 2000). No caso do quartzo, essa estrutura adquire esse padrão ordenado porque os átomos se combinam lentamente para formar a rede, isto é, a cristalização é lenta.

Já no caso do vidro, ocorre um rápido resfriamento, não permitindo que a estrutura atômica fique organizada. O que obtemos então é uma estrutura atômica irregular e sem um padrão repetitivo. Dizemos, por isso, então que o vidro é um sólido **amorfo**. Veja nas figuras abaixo a diferença entre a sílica que forma o quartzo (sílica cristalina) e a que forma o vidro comum (sílica vítrea):



Diferença entre sílica cristalina e sílica vítrea (amorfa).

Como você já deve ter percebido a partir da figura acima, na sílica cristalina os "blocos" (átomos) que formam a rede estão organizados entre si, o que não ocorre na sílica vítrea.

Elaborado pelo Autor.

O Texto 2 foca na estrutura dos sólidos, especificando mais ainda a organização interna deste estado físico revelada no Texto 1. Esse nível crescente de especificidades contribui para a **diferenciação progressiva**, característica das UEPS. Este segundo momento será concluído através de um último problema, que em relação aos primeiros desta aula, é mais específico e com grau um pouco maior de dificuldade. Este problema segue a seguir, no Caderno do Aluno:

### Problemas

Reúnam-se em grupos de cinco colegas, baseando-se no vídeo indicado e, principalmente nos Textos 1 e 2, para resolver a seguinte **situação-problema**:

"O quartzo na natureza pode formar espontaneamente belos cristais prismáticos com um formato próprio e específico. Entretanto, se derretida em um forno, a sílica que o constitui passa a assumir o formato do molde onde se resfria. Como pode a mesma substância assumir formatos tão diferentes?"

Registre a resposta de seu grupo nas linhas indicadas abaixo. O professor irá organizar a aula para que cada grupo apresente a resposta elaborada para uma discussão geral com a turma.

**Esta atividade servirá também para promover a reconciliação integradora, uma vez que os estudantes deverão, a partir das similaridades e diferenças da estrutura interna dos sólidos (cristalinos e amorfos), construir uma explicação cuja recombinação dos conceitos gere novos significados (a explicação de como uma mesma substância pode se tornar um sólido cristalino ou amorfo). As informações chave para o entendimento deste problema estão claramente presentes no Texto 2, cuja resposta pode ser enriquecida pelo Texto 1 e através do vídeo assistido.**

.....

.....

.....

.....

Em última análise, o professor poderá ler opcionalmente com os alunos o tema "Minerais" na seção "**Curiosidades**" desta aula e enriquecer mais ainda o conhecimento acerca dos sólidos cristalinos. Essa seção segue a seguir:

## Curiosidade

### Os minerais

Os minerais são **sólidos cristalinos** formados em ambiente natural. Essas substâncias formam a crosta terrestre e existem em uma enorme variedade. Os minerais mais abundantes da superfície da crosta terrestre são os do grupo do feldspato e o quartzo (SGB, 2021).

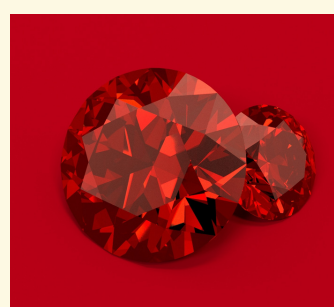
Existem minerais exóticos, como o rutilo, e muito valiosos como o coríndon que, em sua forma vermelha é chamado de rubi, e na forma azul é conhecido como safira. Neste caso, os minerais são chamados de gemas ou simplesmente de "pedras preciosas". Outros exemplos é o mineral berilo que forma a água-marinha e a valiosa esmeralda. Em contrapartida, há ainda aqueles que são muito perigosos por serem venenosos como a galena, ou radioativos, como a uraninita. Foi justamente com a variedade deste último mineral, chamada *pechblenda*, que a química física Marie Curie (1867 - 1934), com ajuda de seu marido, descobriu os elementos radioativos rádio e polônio no início do século XX.

*Elaborado pelo Autor.*



Uraninita.

Fonte: Wikimedia Commons.



O valioso rubi lapidado.

Fonte: Canvas.



Galena.

Fonte: Wikimedia Commons.



Água-marinha com turmalina negra.

Fonte: Wikimedia Commons.

# Atividade 3: Redes Cristalinas

**Aprofundando o Conhecimento I- Abordagem Teórica.**

**TEMPO ESTIMADO:** 2 aulas de 50 minutos cada.  
**OBJETIVO:** Aprofundar teoricamente os conceitos.  
**ATIVIDADE PROPOSTA:** Atividade na forma de questionário.

O objetivo desta aula é prosseguir com a **diferenciação progressiva** e **aprofundar** os principais conceitos teóricos acerca do estudo dos sólidos. Nesta atividade, serão abordados conceitos um pouco mais específicos acerca da Física do Estado Sólido, o que normalmente não é visto na disciplina de Física do Ensino Médio. A principal ideia desta unidade de ensino baseia-se justamente na proposta de trazer conceitos da Física Moderna para a sala de aula, a fim de enriquecê-la. Desta forma, os textos e os exercícios desta atividade necessitaram de uma breve transposição didática para atingir este objetivo.

A seguir, são apresentados o texto e as atividades propostas no Caderno do Aluno:

## Caderno do Aluno

### Página 6

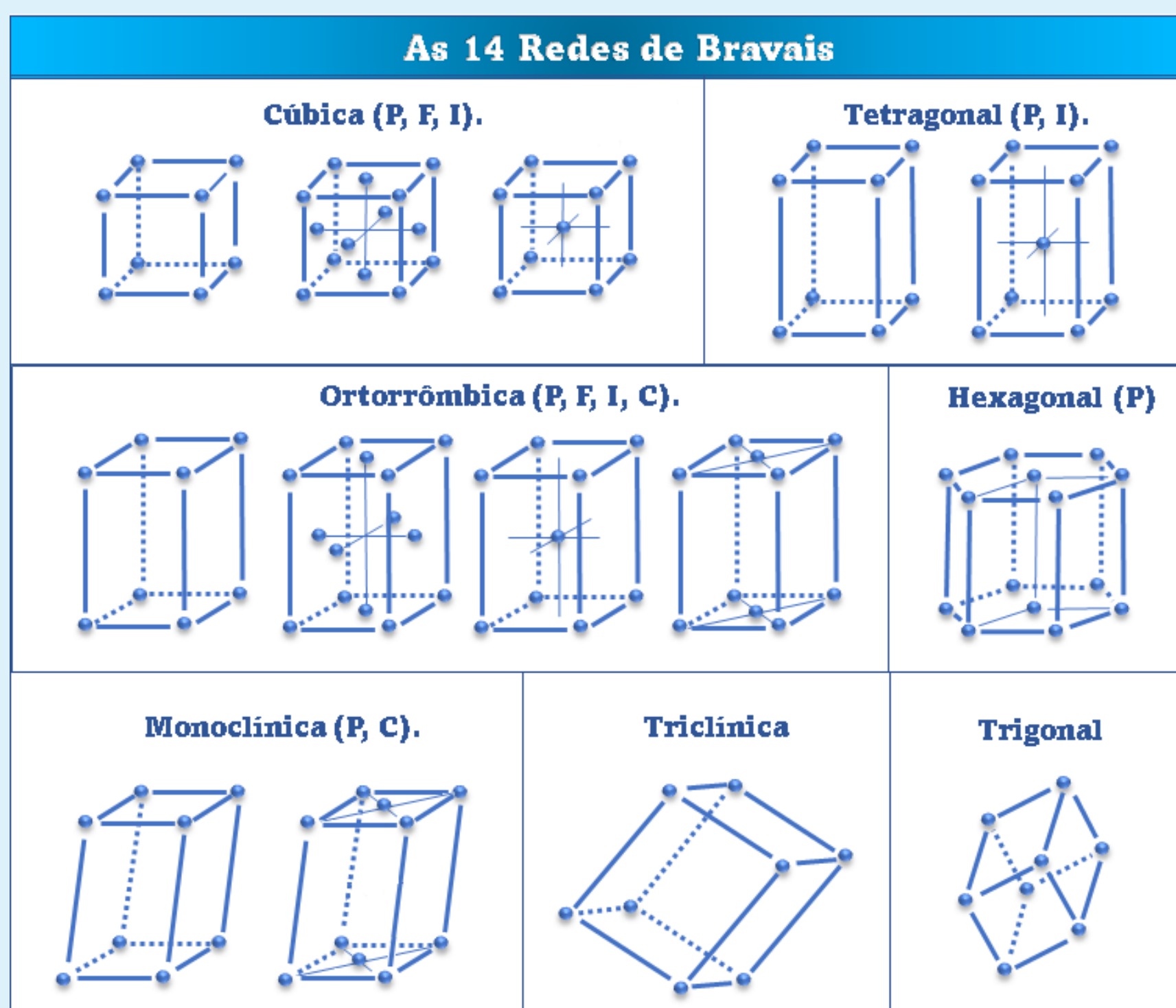
Agora que você já sabe que os sólidos podem se organizar microscopicamente através de uma estrutura cristalina, chegou a hora de conhecer um pouco mais sobre estas estruturas especiais. Leia atentamente o texto 1, abaixo:

#### Texto 1

### Células Unitárias e Redes de Bravais

Os sólidos cristalinos tem a propriedade de possuir uma estrutura atômica interna organizada. Assim, cada átomo se liga aos seus vizinhos de modo a formar um padrão geométrico regular. Este padrão se repete inúmeras vezes, formando o que chamamos de **rede cristalina** (KITTEL, 1978).

As redes cristalinas formam o cristal como um todo, mas nada mais são que repetições de partes menores chamadas **células unitárias**. Denominamos **sistema cristalino** a maneira que essas células unitárias se arranjam no espaço, em relação aos seus comprimentos e aos ângulos formados entre as ligações dos átomos constituintes do sistema (KITTEL, 1978). Existem sete sistemas cristalinos possíveis: cúbico, tetragonal, ortorrômbico, hexagonal, trigonal, monoclinico e triclínico. Entretanto, devido às possíveis localizações das partículas nestes sistemas cristalinos, é possível obter novas configurações a partir dos mesmos. Assim, é possível obter 14 tipos de células unitárias diferentes, chamadas de **redes de Bravais** (KITTEL, 1978), em homenagem ao físico francês Auguste Bravais (1811 - 1863) que as propôs em 1850. Veja abaixo, todas as redes de Bravais:



Fonte: O Autor.

As catorze redes de Bravais em três dimensões.



Você deve ter reparado na figura acima, as denominações **P**, **I**, **F** e **C**. Essas letras representam a configuração de cada sistema cristalino. Se uma célula for simples, com átomos apenas em seus vértices, ela é chamada de **primitiva (P)** ou **simples**. Caso exista um átomo central em cada face da célula, ela é chamada de "**face centrada**" (**F**). Existe ainda a rede de face centrada, mas que ocorre apenas nas faces ao longo do eixo vertical (na "base" e na "tampa" da célula cristalina), como no quarto exemplo da rede ortorrômbica e no segundo da rede monoclinica da figura anterior. Nestes casos, as redes são indicadas com a letra **C**. Por fim, existe a rede que abriga um átomo no ponto central de seu interior. Esta é chamada de "**corpo centrado**" e indicada pela letra **I** (KITTEL, 1978).

Agora fica muito mais fácil de entender cada rede! Por exemplo, o sistema cristalino cúbico abrange três redes de Bravais: a cúbica primitiva (P), a cúbica de face centrada (F) e a cúbica de corpo centrado (I).

As redes de Bravais descrevem todos os sólidos cristalinos conhecidos e são importantes para a descrição microscópica destes tipos de materiais. Um bom exemplo são os metais: todos os metais cristalizam-se quando se solidificam. Outro exemplo são os minerais (leia a seção "*Curiosidade*" da aula anterior e saiba mais!); estes são, por definição, sólidos cristalinos. O conhecimento da estrutura interna da matéria nos permite confeccionar materiais para aplicações cada vez mais avançadas. Mais que produzir materiais para aplicações importantes, o conhecimento da organização microscópica da matéria é fascinante. Este é o maravilhoso universo dos sólidos, estudado em um ramo da Física surgido a partir da década de 1940, a Física do Estado Sólido, que por sua vez é o principal ramo de outro maior, o da Física da Matéria Condensada!

*Elaborado pelo Autor.*

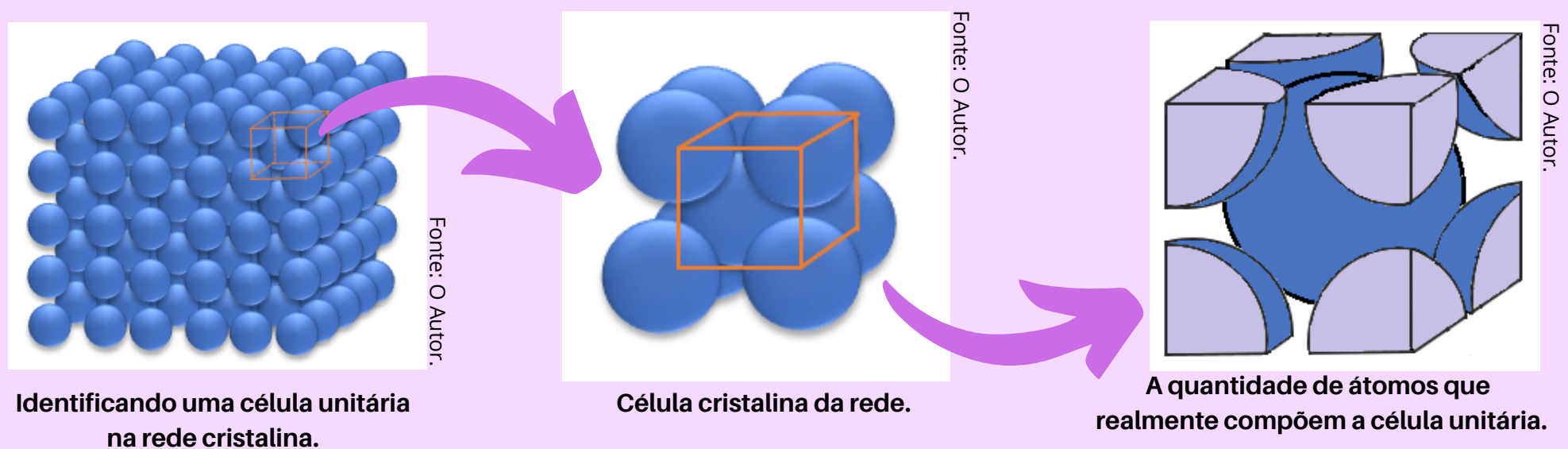
Após a leitura do Texto 1, faça as atividades propostas a seguir:

### Atividade

**Atividade 1:** Associe corretamente:

<b>Célula Unitária (A)</b>	<b>(C)</b>	Configurações básicas que resultam da combinação dos sistemas cristalinos com a posição das partículas em cada uma das células unitárias.
<b>Sistema Cristalino (B)</b>	<b>(D)</b>	Conjunto de um enorme número de células unitárias interligadas.
<b>Redes de Bravais (C)</b>	<b>(A)</b>	Menor unidade que se repete e reproduz a rede cristalina.
<b>Rede Cristalina (D)</b>	<b>(B)</b>	Classificação que leva em conta os comprimentos e ângulos das células unitárias.

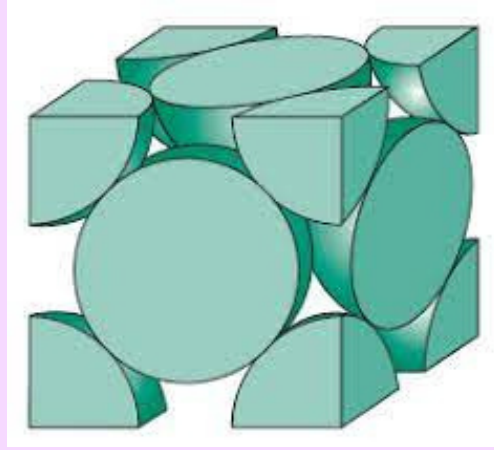
**Atividade 2:** Para sabermos a quantidade de átomos que compõem uma célula unitária, não basta simplesmente contá-los. Na verdade, a quantidade de átomos presentes na célula unitária é obtida somando-se os "pedaços" de átomos que foram "partidos" para isolar a célula. Para entender melhor, veja a figura abaixo:



Analise as figuras acima e responda:

- a) Qual é a rede de Bravais que está discriminada na figura?  
**(C) Cúbica de corpo centrado (I).**
- b) Quantos átomos compõem essa rede de Bravais? Por quê?  
**(I) 2 átomos: 1 átomo inteiro (átomo central) mais 8 "fragmentos" de 1/8 de cada átomo do vértice do cubo.**

**Atividade 3:** O argônio é o gás nobre mais abundante da Terra, compondo aproximadamente 1% do ar que respiramos. Este gás foi muito utilizado na fabricação de lâmpadas incandescentes e ainda possui várias aplicações, como em cirurgias dos olhos. Sob baixíssimas temperaturas, a partir de  $-198^{\circ}\text{C}$ , esse gás se solidifica, cristalizando-se de acordo com a figura da célula unitária representada abaixo:



Fonte: Extraído de "Cienc. e Eng. dos Mat. W. Callister."

Célula unitária que forma cristais de argônio.

De mesma maneira que no problema anterior, analisando a figura, responda:

a) Qual é a rede de Bravais que está discriminada na figura?

**i** **Cúbica de face centrada (F).**

b) Quantos átomos compõem essa rede de Bravais? Por quê?

**i** **4 átomos: 6 "fragmentos" de 1/2 átomo nas faces do cubo e mais 8 "fragmentos" de 1/8 de átomo nos vértices do cubo.**

# Atividade 4: Experimento - Movimento Térmico em Redes Cristalinas

**TEMPO ESTIMADO:** 2 aulas de 50 minutos cada.  
**OBJETIVO:** Aprofundar os conceitos de forma experimental.  
**ATIVIDADE PROPOSTA:** Realizar observações com um simulador mecânico.

Nestas aulas, visa-se a **continuidade do aprofundamento** dos conceitos já abordados anteriormente, mas agora de **maneira experimental**, através de um simulador mecânico. Este simulador deverá ser construído por você, professor, a partir de um manual de construção simples indicado nesta Atividade 4. Aqui serão abordados com mais enfoque o movimento térmico, a interação entre as partículas da rede cristalina e a propagação da energia térmica. Desta forma, objetiva-se avançar com a **diferenciação progressiva**, à medida que novos conhecimentos mais detalhados vão sendo adicionados aos conhecimentos que os alunos já possuem. Ao mesmo tempo, os estudantes terão condições de realizar o processo cognitivo da **reconciliação integrativa**, reorganizando os novos conceitos e integrando os significados construídos por eles.

Esta Atividade 4 foi idealizada para ser realizada em duas etapas, as Situações 1 e 2, com duração ideal de uma aula de 50 minutos para cada uma delas. Na **Situação 1**, será explorada a habilidade de observação dos estudantes. Esta primeira situação é por sua vez dividida em três partes, sendo a primeira realizada pelos estudantes, em grupos, apenas observando a estrutura cristalina representada com o simulador desligado. Já na segunda parte da Situação 1, os estudantes continuarão realizando a análise por observação, mas desta vez com o simulador acionado, onde será ilustrado o movimento térmico em uma estrutura cristalina. Por fim, na parte 3 os alunos deverão socializar as conclusões das observações por meio de uma roda de conversa.

A **Situação 2** também é dividida em 3 partes. Na primeira parte os estudantes deverão, em grupos, por meio da observação, entender como se dá o processo da transferência de energia térmica por condução em sólidos (calor por condução). Na parte 2, os alunos deverão comparar o potencial de interação entre átomos reais (potencial de Lennard-Jones) com a energia potencial elástica empregada no simulador. A parte 3 será destinada também à socialização dos resultados entre os alunos por meio de apresentação feita pelos grupos de alunos.

A seguir é apresentado o **Manual de Construção do simulador mecânico** que deve ser construído pelo professor para o desenvolvimento desta atividade:



## Manual de Construção: Simulador Mecânico

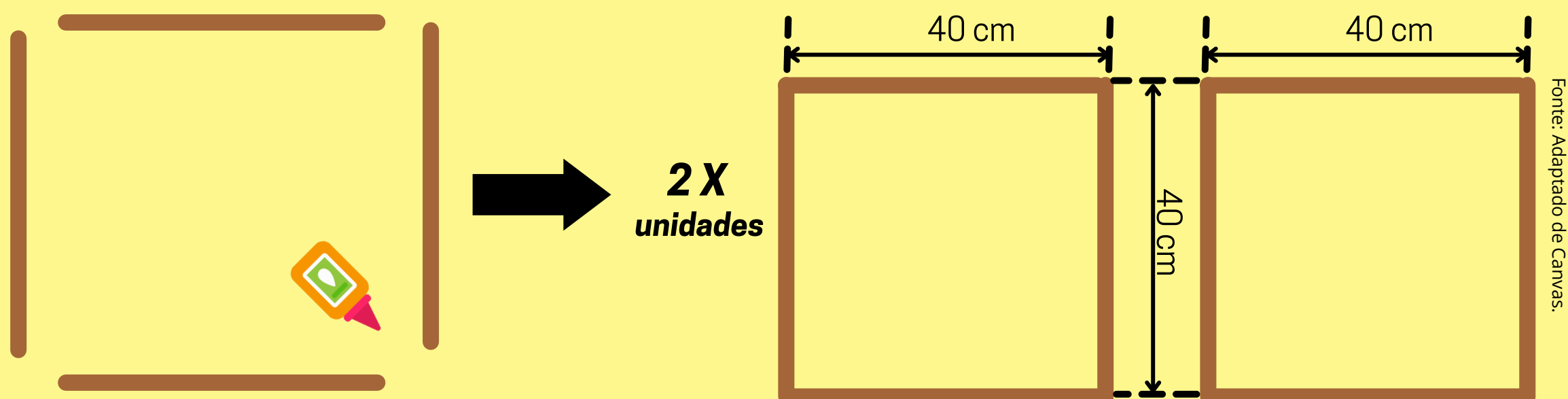


### Materiais necessários:

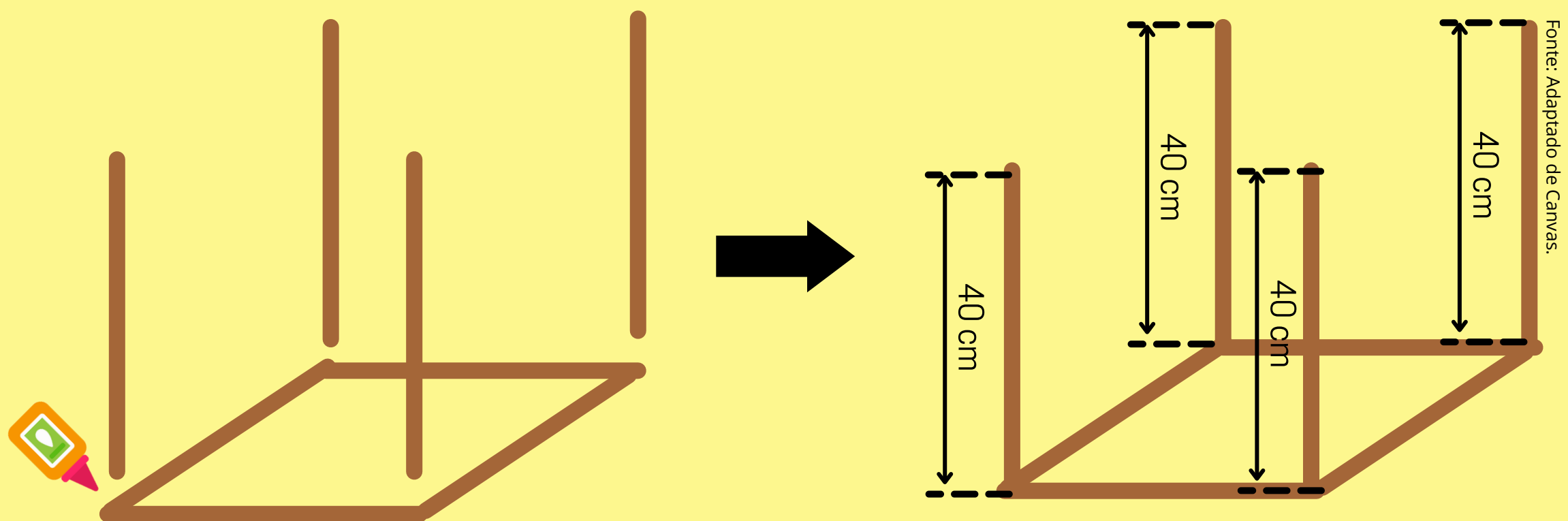
- 30 varetas de 40 cm (como espetos de churrasco ou de algodão-doce);
- 1 pistola de cola quente;
- 1 tubo de cola quente;
- 1 tubo de cola instantânea;
- 63 esferas de poliestireno expandido (EPS) de 25 mm de diâmetro;
- 1 régua de 30 cm;
- 1 tesoura;
- 1 agulha de costura;
- 10 m de elástico (diâmetro 1mm, 58% elastodieno e 42% poliéster ou semelhante);
- 2 tintas de tecido de 37 ml, 2 cores;
- 1 pincel de pintura;
- 1 pilha de 9V;
- 1 clip conector de bateria de 9V;
- 1 motor vibrador de 5V de corrente contínua (DC);
- 1 botão interruptor com trava;
- 1 botão interruptor sem trava;
- 1 m de fio 0,3 mm<sup>2</sup>;
- 1 ferro de solda;
- 1 tubo de estanho para solda eletrônica;
- 1 rolo de fita isolante;
- 3 placas de fibra *Medium Density Fiberboard* (MDF);
- 1 arco de serra;
- 1 serra.

## Construção:

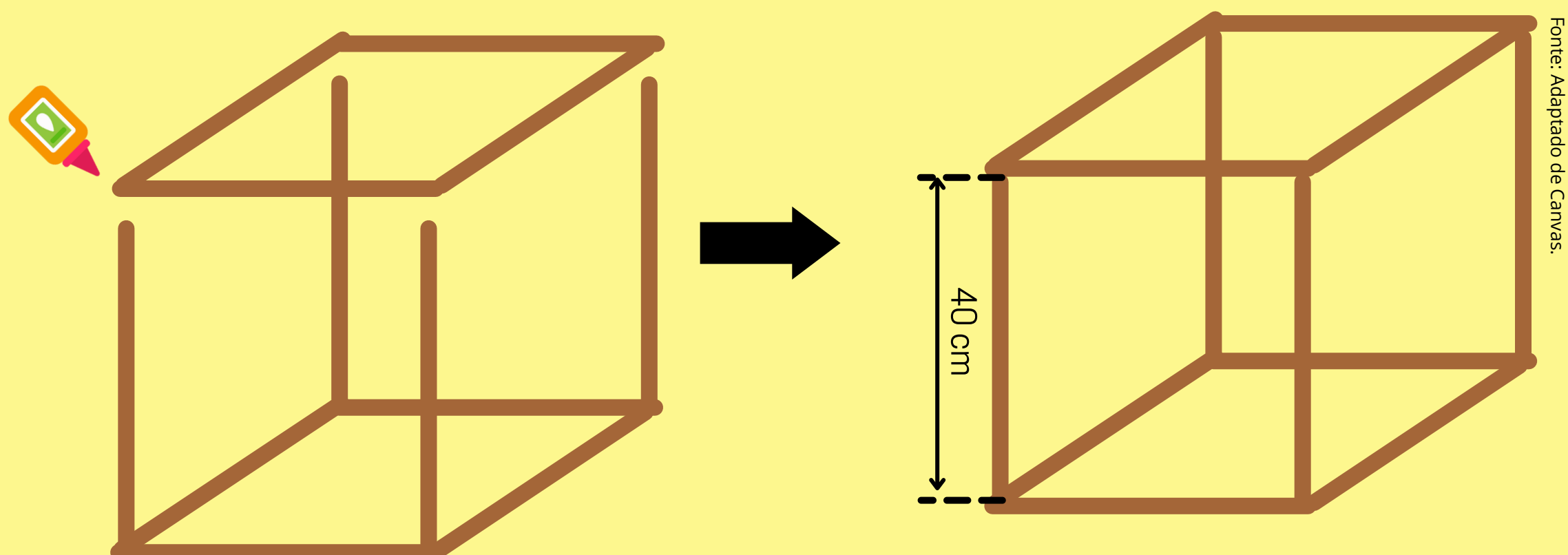
**Passo 1:** Pegue 8 varetas de 40 cm cada e por meio da cola, una suas extremidades para formar dois quadrados separados, de lados iguais a 40 cm aproximadamente, conforme a figura abaixo:



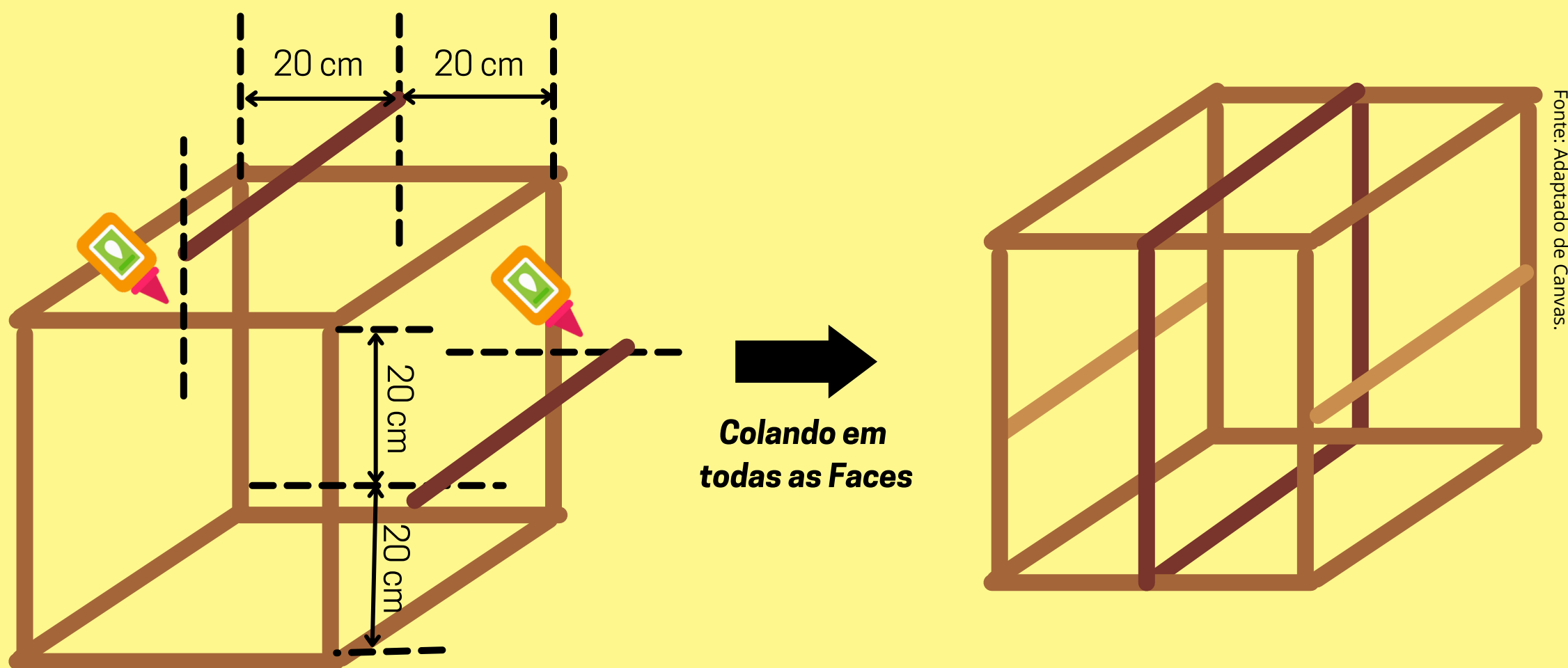
**Passo 2:** Posicione um dos quadrados sobre uma mesa e em cada vértice cole uma vareta de 40 cm de modo que fique perpendicular aos lados do quadrado, como indicado na ilustração:



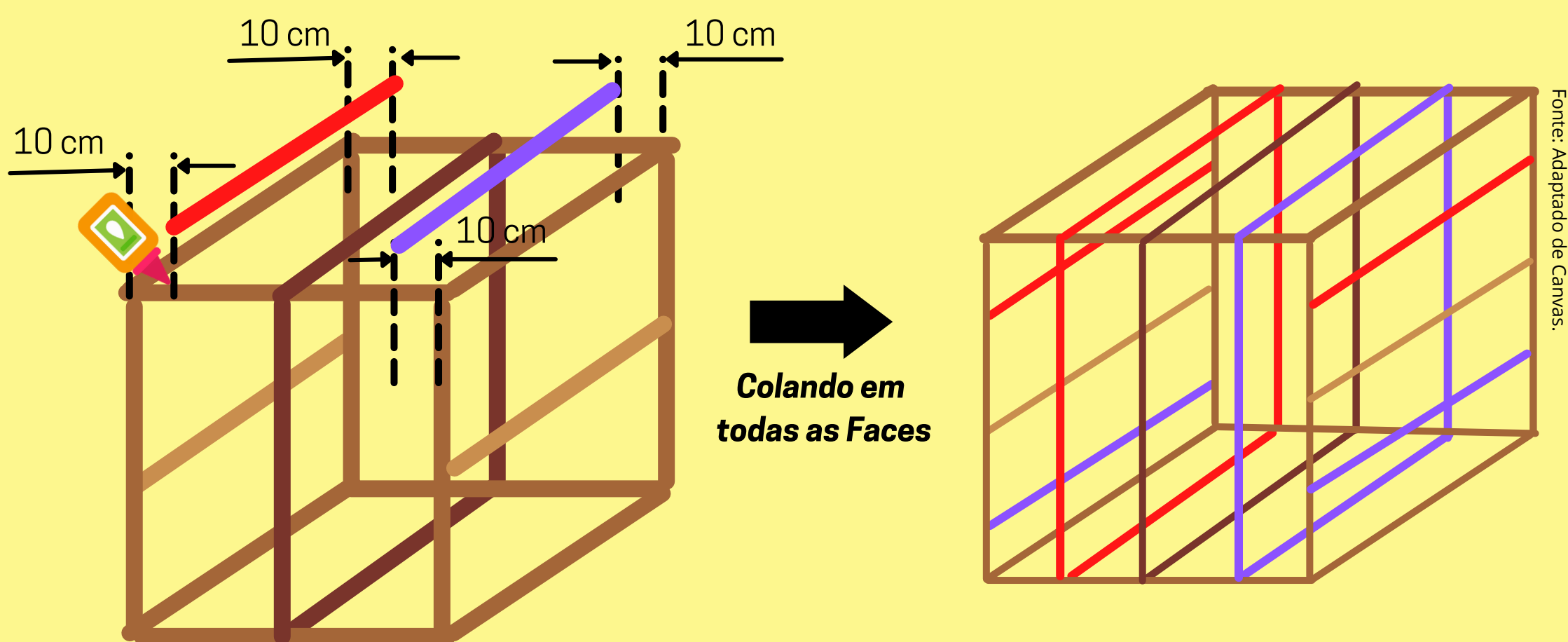
**Passo 3:** Cole o segundo quadrado nas extremidades das varetas, conforme indicado na figura abaixo. Agora obtemos um cubo completo.



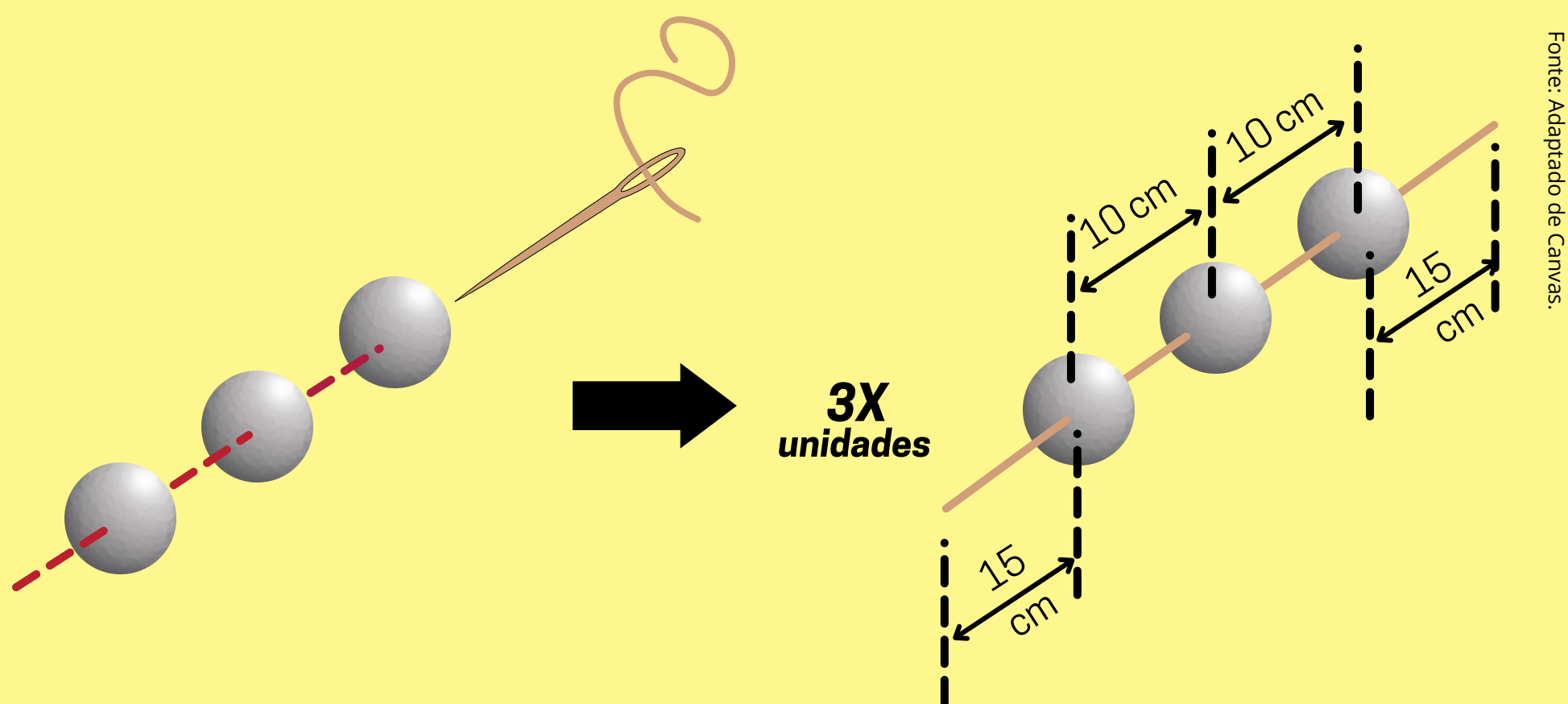
**Passo 4:** Cole uma vareta no centro de cada uma das faces do cubo formado:



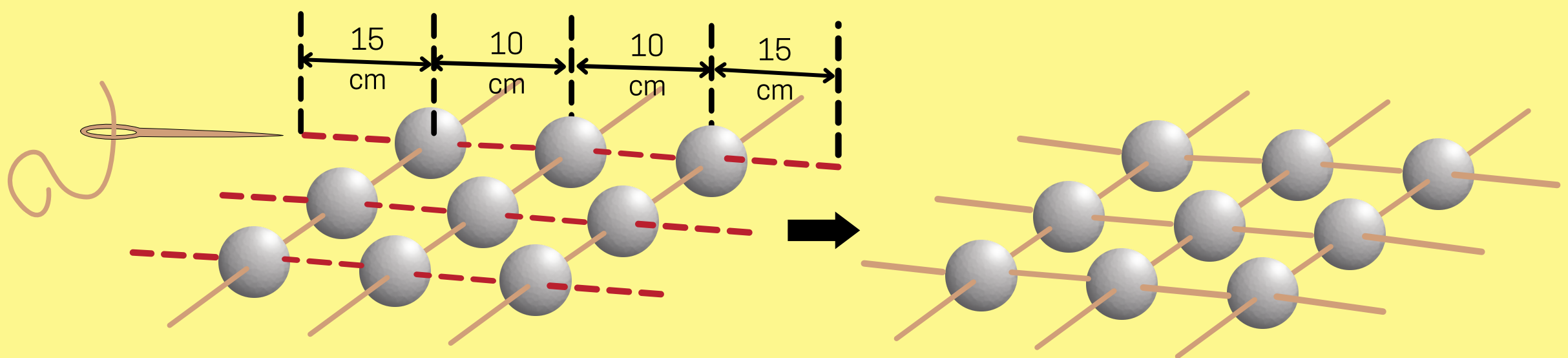
**Passo 5:** Agora, cole mais duas varetas em cada face, paralelas à vareta central do passo anterior e a 10 cm de cada lado do quadrado, como indicado na ilustração a seguir (indicadas em azul e vermelho). Após isso, a "gaiola" do simulador estará pronta.



**Passo 6:** Passe o elástico no furo da agulha e com esta, fure 3 esferas de EPS passando o elástico pelo centro das esferas, interligando-as de modo que fiquem separadas por 10 cm. Deixe sobrando 15 cm de elástico a partir das esferas das extremidades, como segue ilustrado a seguir. Monte três fileiras destas, com 3 esferas cada.

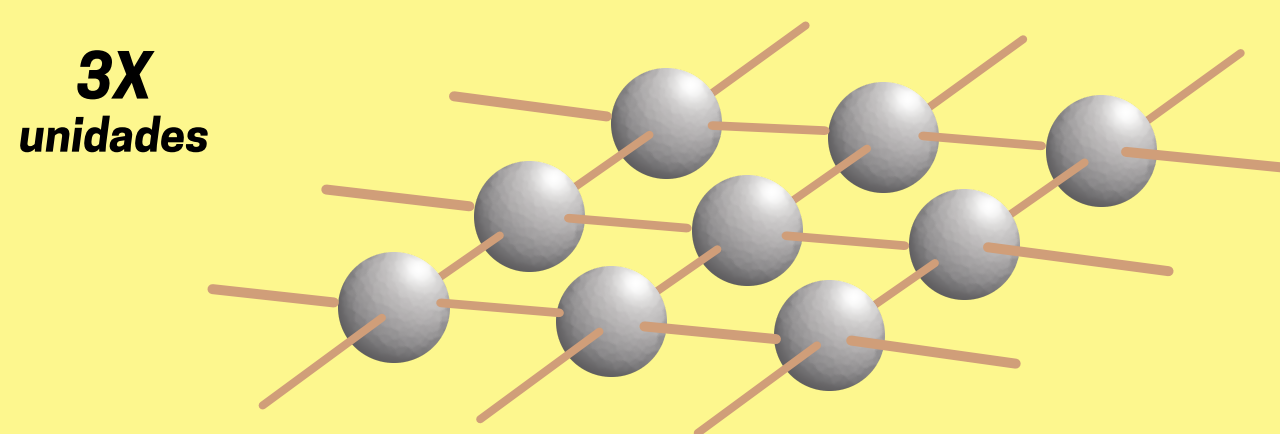


**Passo 7:** Posicione paralelamente as 3 fileiras de esferas e as interligue com elástico por meio da agulha. Da mesma forma, deixe um espaço de 10 cm entre as fileiras, deixe também sobrando 15 cm de elástico em relação às esferas da extremidade, de modo a formar a malha plana como a indicada abaixo.



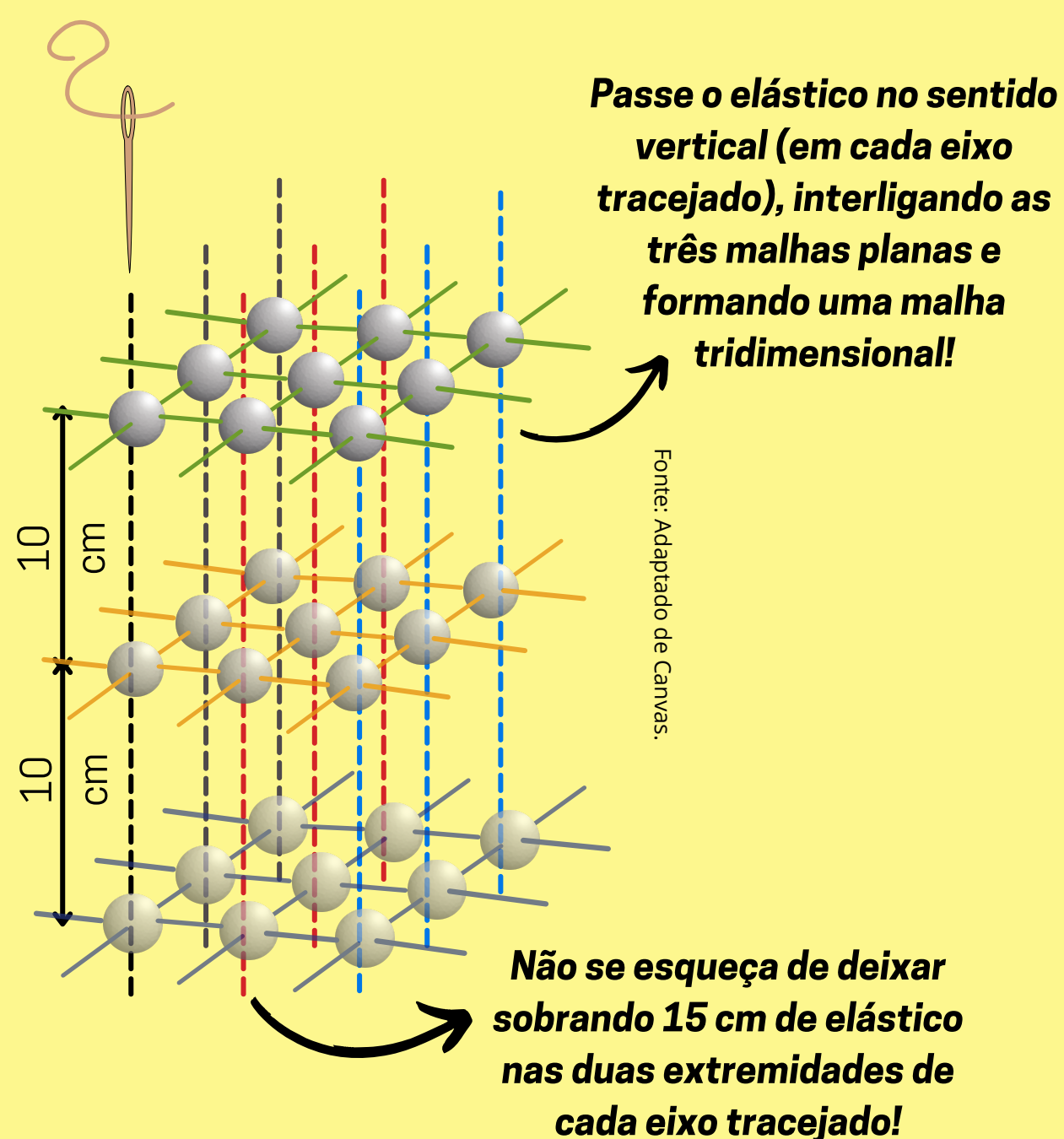
Fonte: Adaptado de Canvas.

**Passo 8:** Repita os Passos 6 e 7 mais duas vezes, a fim de se obter ao todo, três malhas planas (incluindo a malha descrita anteriormente).



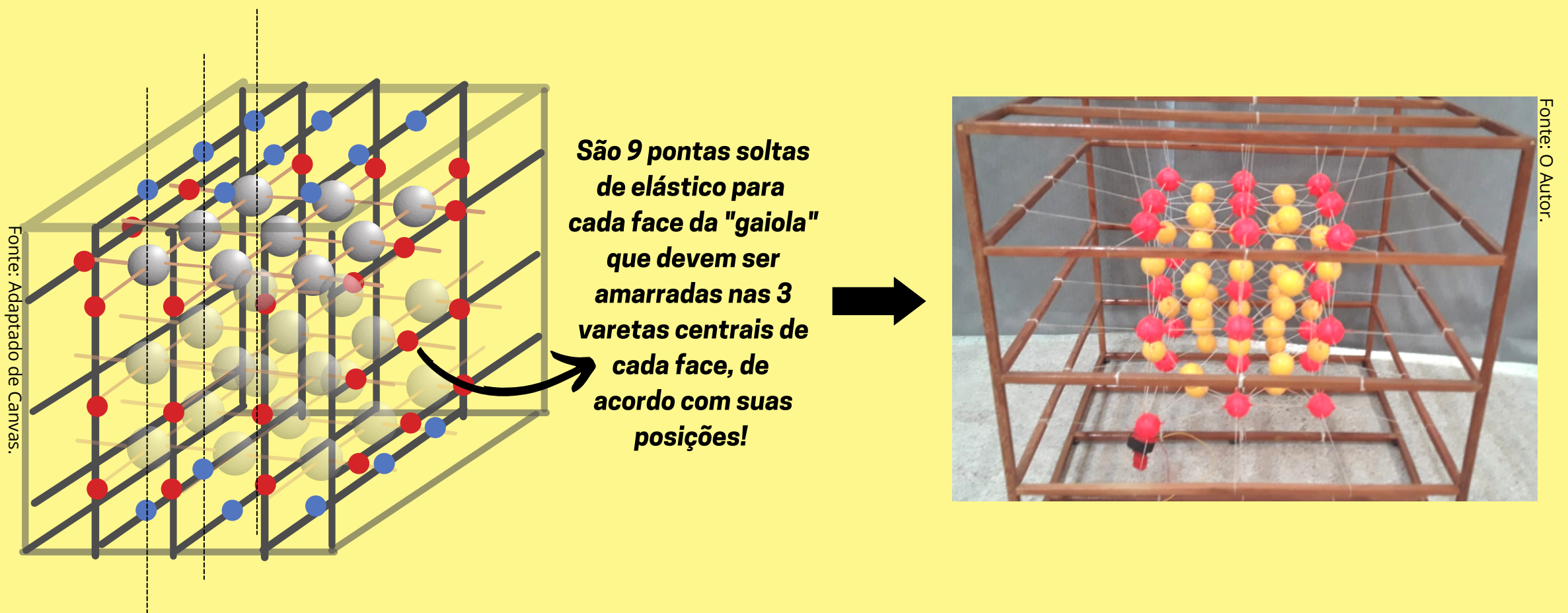
Fonte: Adaptado de Canvas.

**Passo 9:** Agora, interligue com o elástico, por meio da agulha, as três malhas (ou planos) construídas anteriormente (conforme a ilustração abaixo). Deixe as malhas separadas por 10 cm entre si, e também, deixe sobrando 15 cm de elástico em relação às esferas das extremidade (da mesma forma que nos passos anteriores). Ao final, será obtido uma malha tridimensional em formato cúbico, contendo 27 esferas interligadas entre si. Ao todo, 54 pontas de elásticos soltos de 15 cm se formarão para permitir que essa malha tridimensional seja esticada e fixa na "gaiola".



Fonte: Adaptado de Canvas.

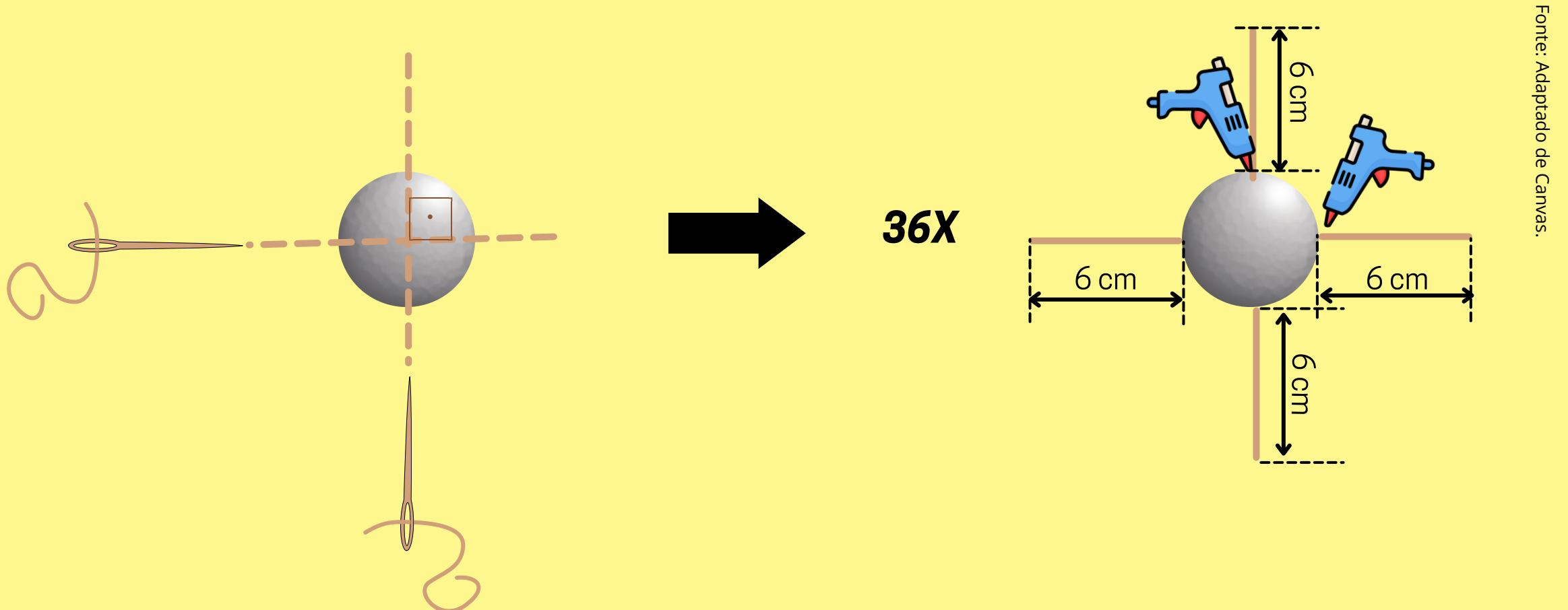
**Passo 10:** Posicione a malha construída no Passo 9 no interior da "gaiola" finalizada no Passo 5. Por meio das 54 pontas de 15 cm de elástico presentes em cada extremidade de cada fileira e coluna de esferas, amarre nas varetas presentes nas faces do cubo que constitui a "gaiola", como indicado na ilustração (os pontos vermelhos e azuis indicam em quais varetas os elásticos devem ser amarrados). Importante: Você deverá esticar a malha para que seja fixada na gaiola!



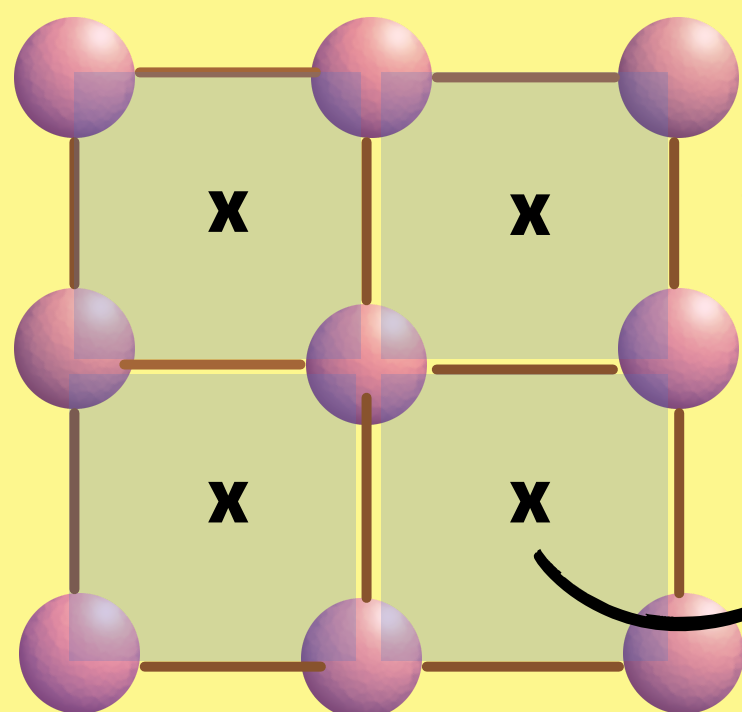
**Passo 11:** Passe um pouco de cola quente em todos os furos das 27 esferas por onde passaram os elásticos, a fim de evitar que elas deslizem pelo elástico.

**Passo 12:** Pinte as 27 esferas que você instalou na "gaiola", por exemplo, na cor vermelha. Esta pintura facilitará a identificação dos "planos" que formarão a rede cristalina a ser representada.

**Passo 13:** Por meio da agulha, atravesse, separadamente, as outras 36 esferas de EPS por dois pedaços de elástico cada uma delas. Os elásticos devem cruzar o centro das esferas em forma de "X", passe cola quente para fixá-los nos furos da esferas e suas pontas soltas devem ter 6 cm cada, conforme ilustrado na imagem abaixo:



**Passo 14:** Analisando a rede elástica fixada na "gaiola" finalizada no Passo 12, é possível perceber que a mesma é formada por vários quadrados que integram todos os seus planos, isto é, é possível identificar diversas configurações em que quatro esferas ocupam posições que correspondem aos vértices de um quadrado. Ao todo, existem 36 quadrados que formam a rede cristalina construída até o Passo 12. Por meio da agulha e da cola quente, fixe ao centro de cada um destes quadrados uma das esferas produzidas no Passo 13. Essa fixação deve ser feita introduzindo, por meio da agulha, cada uma das quatro extremidades soltas, respectivamente, em cada esfera que ocupa o vértice de um referido quadrado. É importante que as esferas a serem fixadas nos centros dos quadrados tenham seus elásticos tensionados durante a fixação, para lhes garantir a sustentação adequada. A figura a seguir ilustra essa fixação:

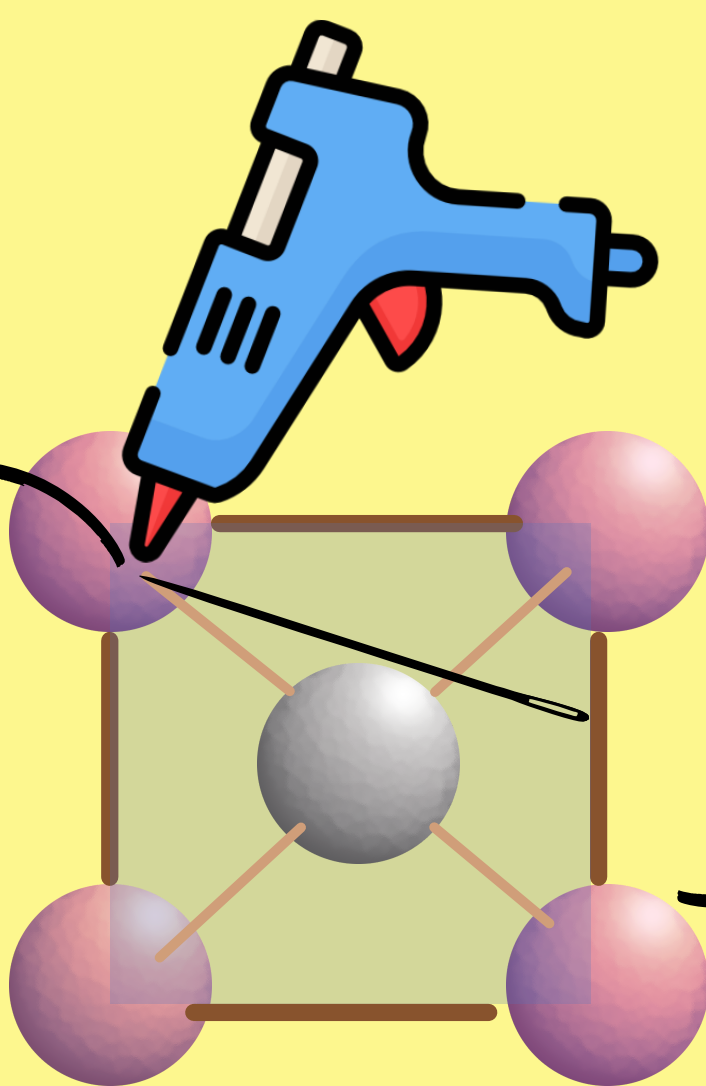


Fonte: Adaptado de Canvas.

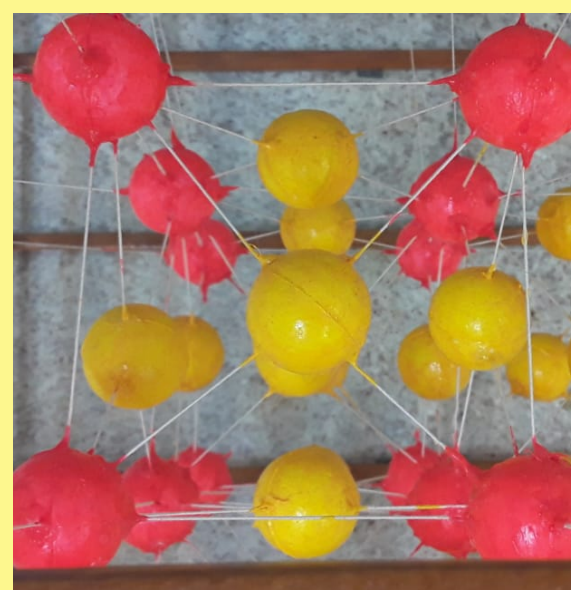
Todas as faces da rede finalizada no Passo 12 são formadas por 4 quadrados menores (em azul). Esta estrutura de quadrados também aparece internamente na rede (nas três direções)!

No centro de cada quadrado, destacado aqui com "x", uma nova esfera deve ser fixada através do elástico, que por sua vez serão ancorados nas 4 esferas dos vértices do quadrado.

Pegue uma esfera preparada no Passo 13 e posicione-a no centro de um quadrado. Por meio da ponta da agulha, introduza um trecho de cada elástico solto no interior de cada esfera que forma os vértices (introduza até que os elásticos fiquem tensionados igualmente). Passe cola quente no furo onde está o elástico para impedir que a esfera central se solte. Faça isso em todos os 36 quadrados que formam a rede!



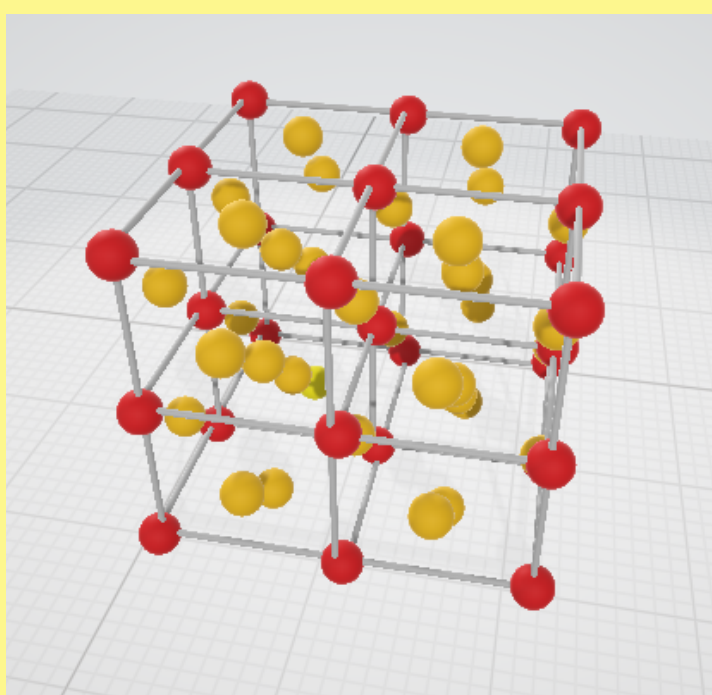
Fonte: Adaptado de Canvas.



Fonte: O Autor.

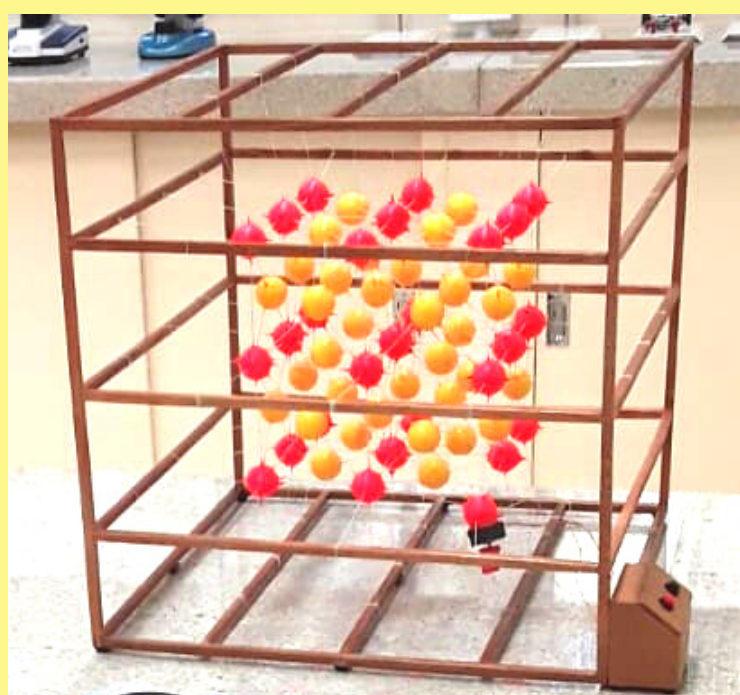
Modelo real.

**Passo 15:** Cheque se todos os quadrados da rede possuem a esfera central. Estes quadrados são na verdade as faces cúbicas de células cristalinas cúbicas de face centrada, a qual pretendemos representar. Você poderá perceber agora, que o modelo construído é um cristal contendo 8 células cristalinas cúbicas de face centrada. Para lhe auxiliar na localização destas células, você poderá baixar o modelo virtual deste cristal que está disponível em [https://drive.google.com/file/d/1vTRNOK9\\_AkDCMW8vDWn8MWBxjTbyN8pJ/view](https://drive.google.com/file/d/1vTRNOK9_AkDCMW8vDWn8MWBxjTbyN8pJ/view). O modelo deve ser aberto pelo software *Paint 3D* e pode ser rotacionado para visualização. Pinte as esferas que representam o átomo central das faces de outra cor, por exemplo de amarelo, para facilitar a identificação pelos alunos. As imagens com a representação da rede cristalina e o modelo real a que se destina este manual seguem abaixo:



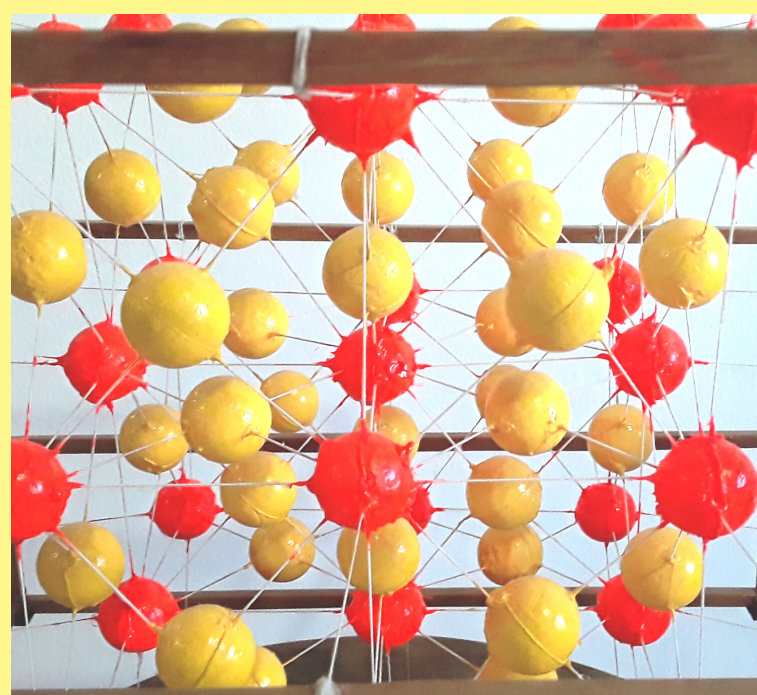
Fonte: O Autor.

Modelo 3D do cristal representado por este simulador.



Fonte: O Autor.

Simulador construído mostrando a rede cristalina simulada.

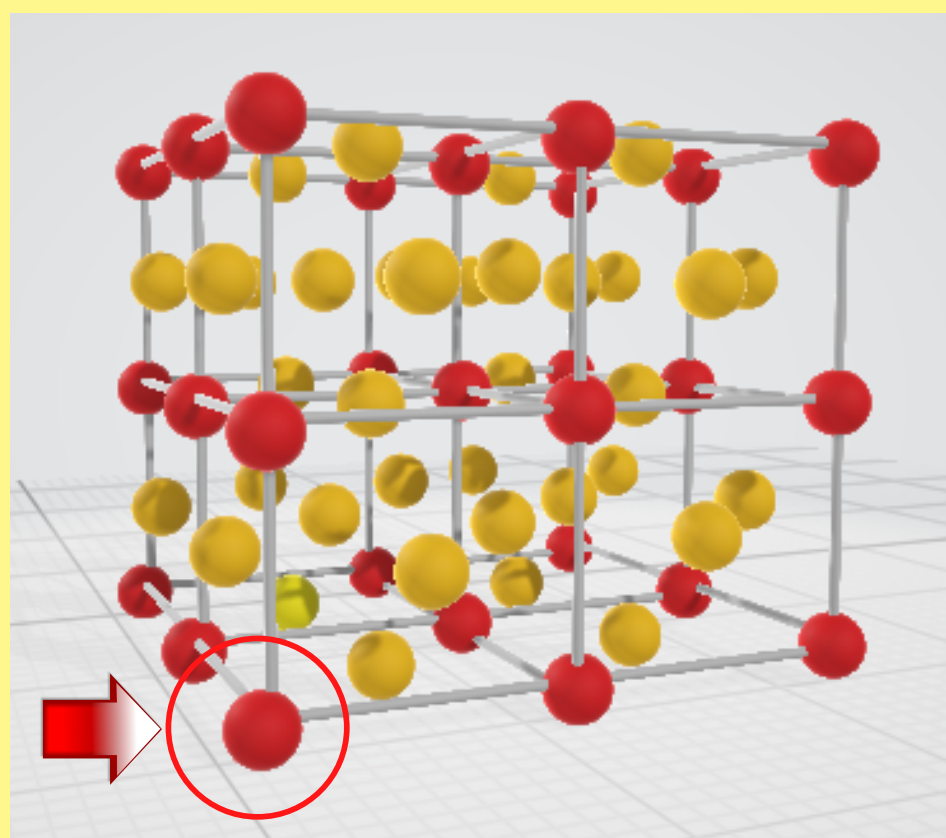


Fonte: O Autor.

Detalhe da rede construída mostrando os elásticos e as esferas já pintadas.

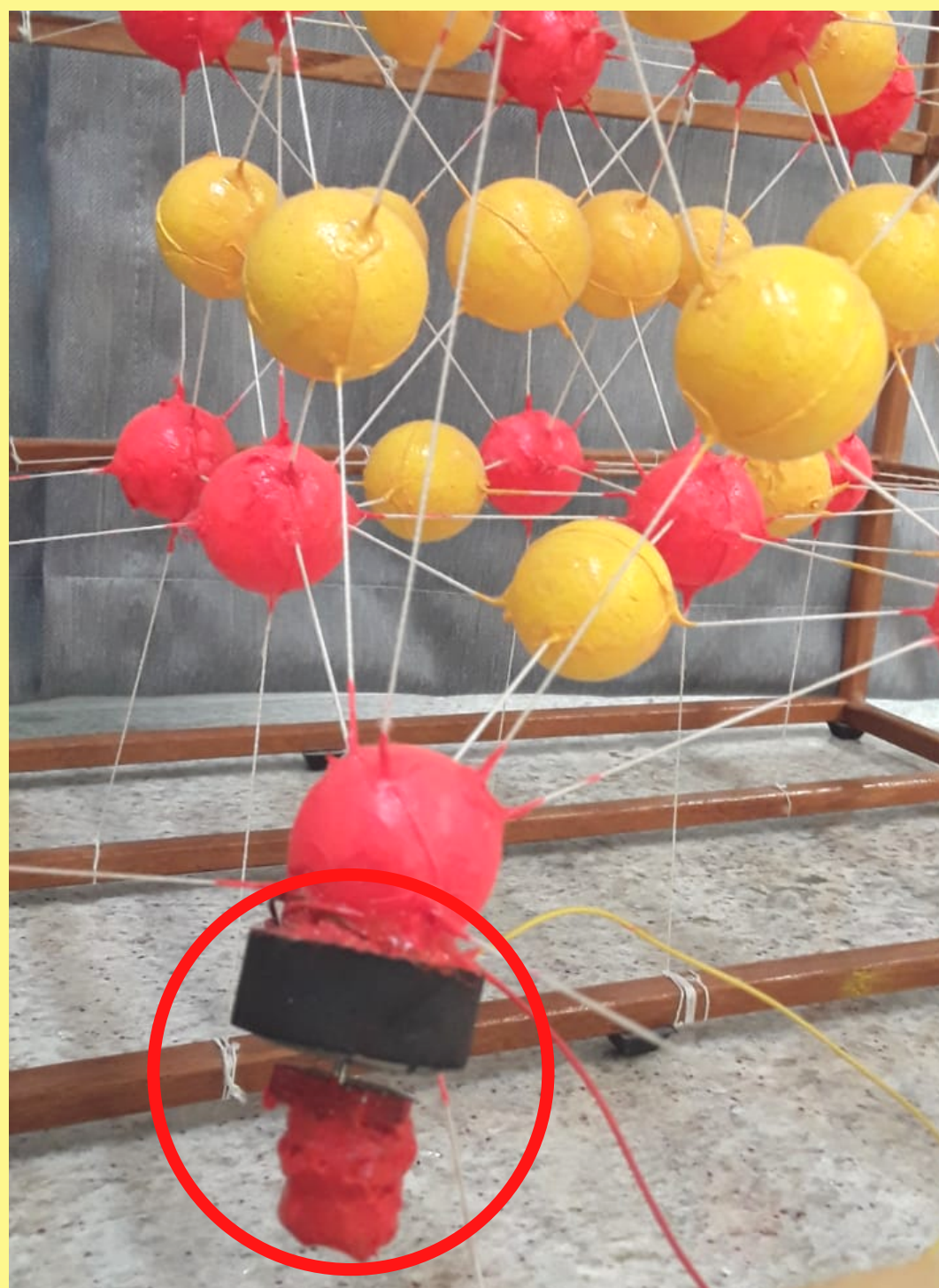


**Passo 16:** Localize a esfera indicada na figura abaixo (à esquerda), ela será chamada de "esfera primária". Por meio da cola quente, fixe o motor vibrador na parte inferior da esfera primária. Certifique-se que, ao ligar, os elásticos da esfera primária não se enrolarão no eixo do motor (nem os fios elétricos).



Fonte: O Autor.

Localização da esfera primária, a única a ser motorizada.



Fonte: O Autor.

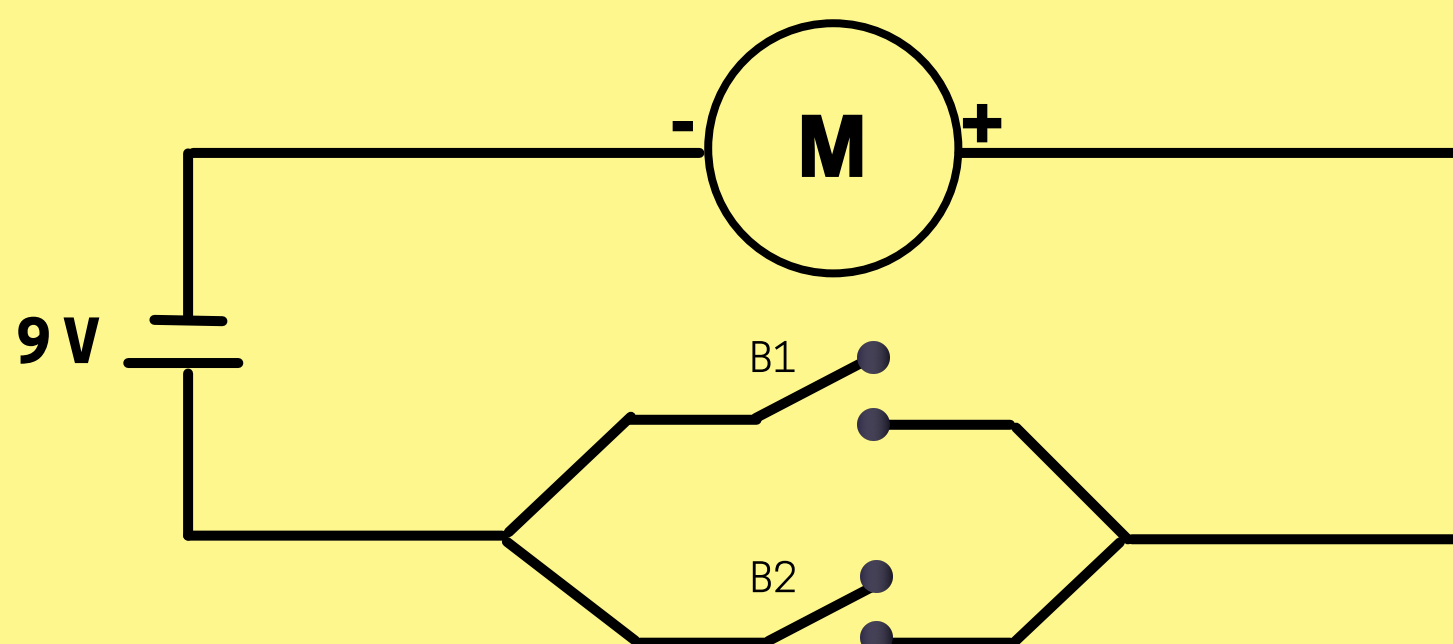
Motor vibrador (em destaque) fixado na esfera primária do simulador mecânico real.



Fonte: Kimmore.

Típico motor vibrador DC que pode ser utilizado para motorizar o simulador mecânico.

**Passo 17:** Para o acionamento do simulador, monte o seguinte circuito elétrico. Utilize o clip conector para inserir a bateria de 9V ao circuito.



Onde:

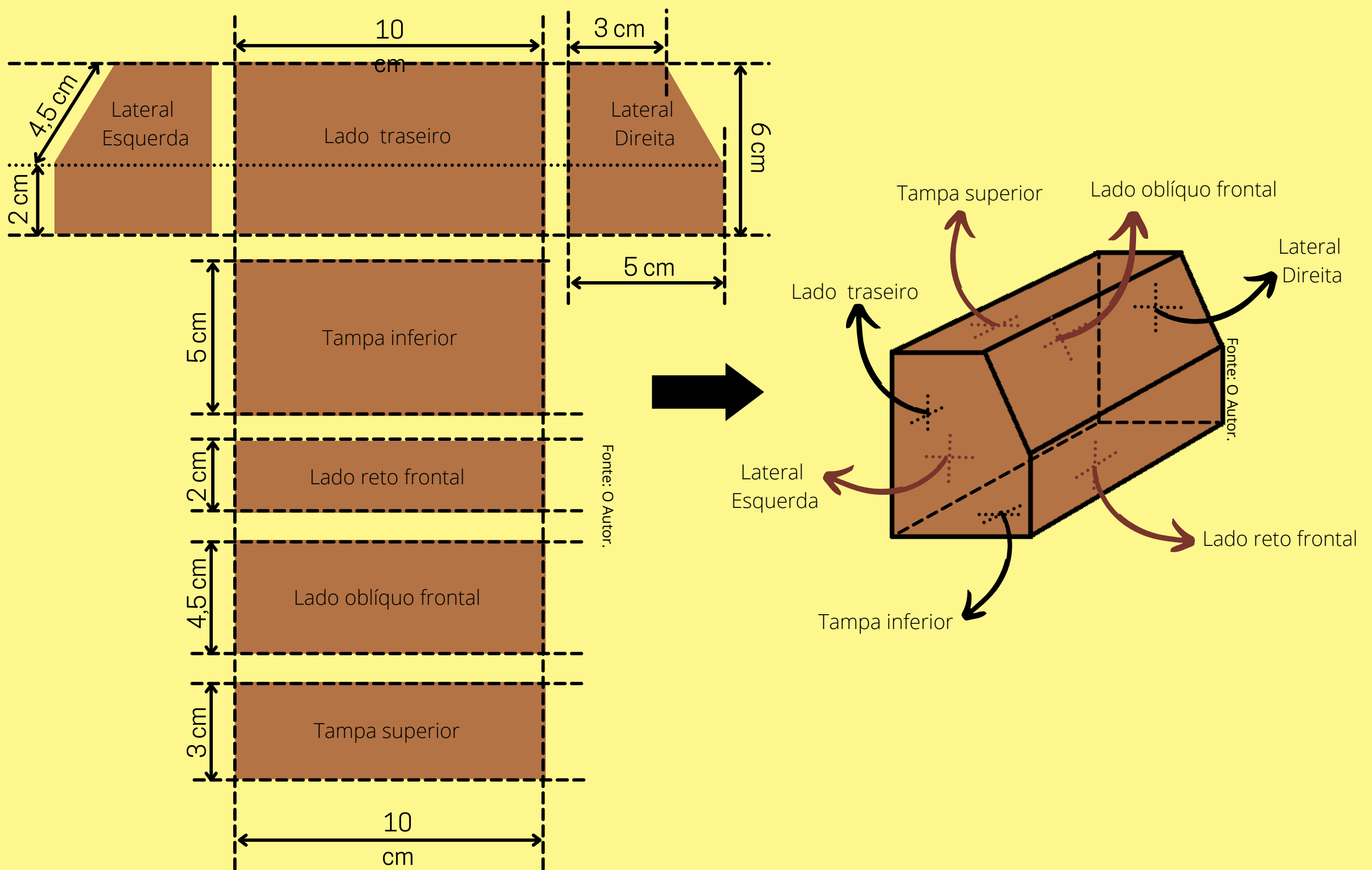
**Motor 5V de Corrente Contínua (DC).**

**Fonte de Tensão de Corrente Contínua (bateria 9V).**

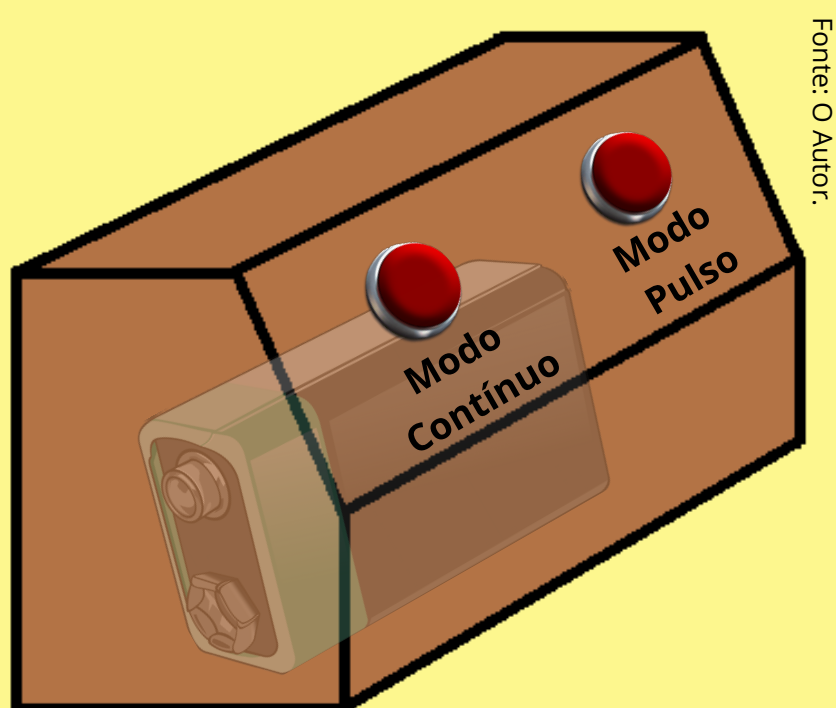
**Botão com trava.**

**Botão sem trava.**

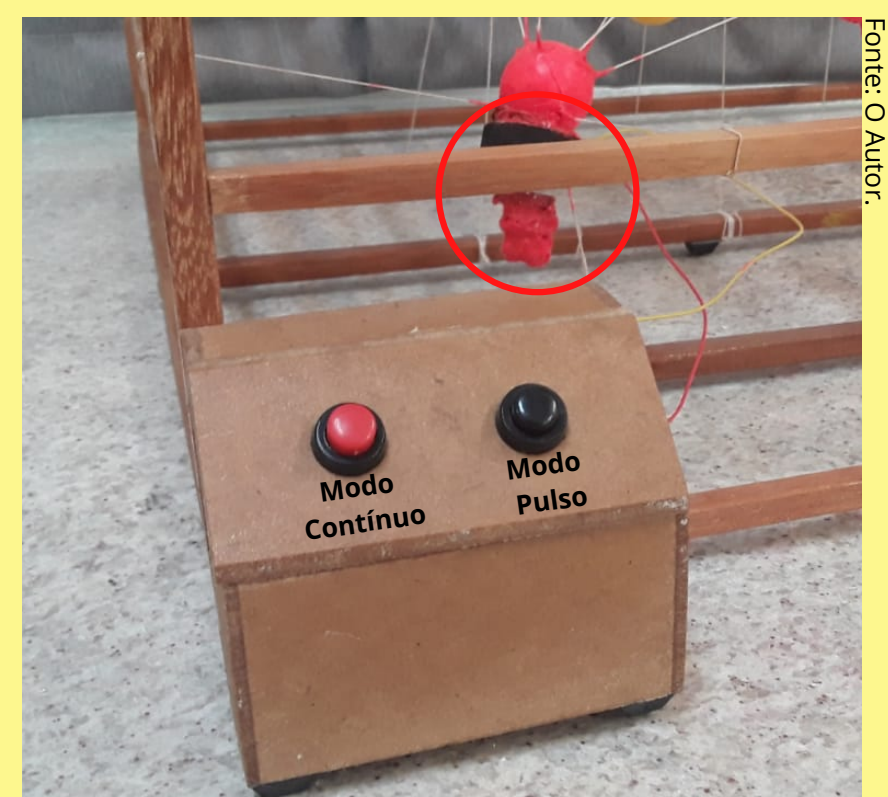
**Passo 18:** Construa uma pequena caixa para acomodar seu circuito elétrico. Essa caixa servirá como painel de controle do simulador. Abaixo, seguem as dimensões das 7 peças que constitui o painel proposto. Estas peças foram idealizadas para serem construídas em MDF e unidas com cola instantânea. O *lado oblíquo frontal*, indicado na ilustração a seguir, não deverá ser colado, pois será por ele que deverá ser inserido o circuito com a bateria no interior do painel.



**Passo 19:** Faça dois furos nas mesmas dimensões que os botões (com trava e sem trava) no *lado oblíquo frontal* da caixa construída no Passo 18. Fixe os botões com cola instantânea. Indique os nomes dos botões no painel (escrevendo com uma caneta, por exemplo). Ao botão com trava, nomeie de "Modo Contínuo". Já ao botão sem trava, nomeie de "Modo Pulso", conforme ilustração abaixo à esquerda (a posição da bateria segue indicada também). Faça um furo no lado traseiro para passar os fios que alimentarão o motor vibrador que está fixado na esfera primária (Passo 16).

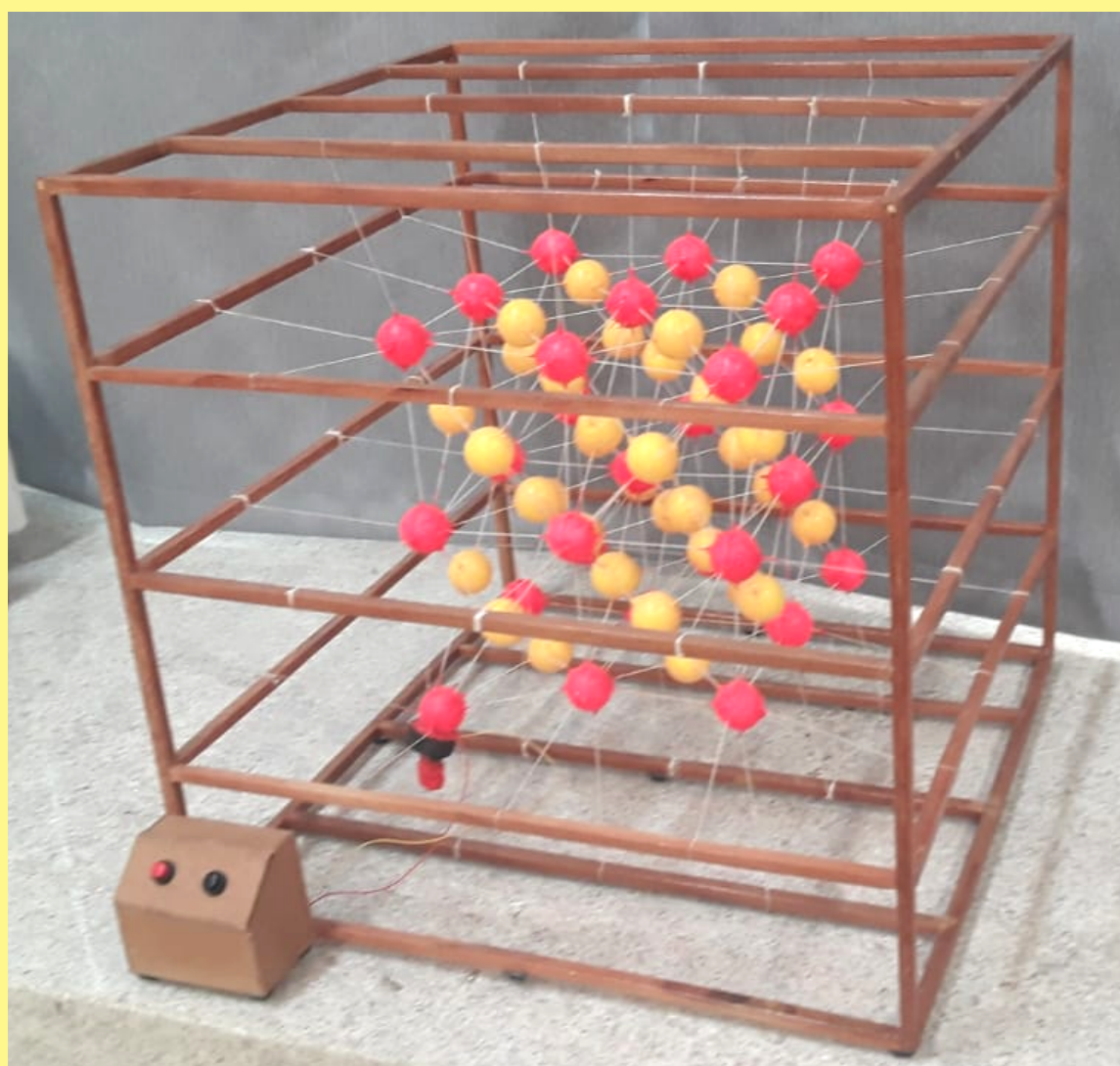


Montagem final do painel com os botões fixados e identificados. A bateria de 9V deve ser posicionada horizontalmente, conforme indicado acima.



Painel real construído. Note os fios elétricos que se conectam ao motor vibrador (em destaque).

## Simulador Pronto!



Fonte: O Autor.

Simulador mecânico finalizado.

A seguir, são apresentados o texto e as atividades propostas no Caderno do Aluno:

## Caderno do Aluno

### Página 8

#### Situação 1- Observando o Movimento Térmico de uma Rede Cristalina

Nesta primeira parte, vocês observarão o comportamento da rede cristalina simulada. Para isso, reúnam-se em grupos de cinco colegas e organizem as carteiras e cadeiras da sala em forma de "U". O simulador será posto no meio da sala pelo professor, para que todos possam enxergá-lo adequadamente. A imagem abaixo mostra o simulador proposto construído.



Fonte: O Autor.


Simulador proposto construído para ser utilizado nesta aula.

Agora, com o seu grupo, analise e responda as seguintes questões propostas em cada parte do experimento simulado:


## Experimento

**Parte 1:** Sem ligar o simulador, observem o tipo de rede cristalina representada nele e respondam:

a) Qual é o sistema cristalino e o tipo de rede de Bravais que constitui a rede simulada?


Resposta contendo a análise de seu grupo:  **O sistema cristalino é o cúbico e a rede de Bravais correspondente é a cúbica de face centrada.**

b) Quantas células unitárias contém a rede simulada?


Resposta contendo a análise de seu grupo:  **Através da observação atenta, os estudantes deverão identificar 8 células cristalinas (cúbicas de face centrada) que constituem a rede cristalina simulada.**

**Parte 2:** Agora, o professor acionará o simulador através do botão "contínuo". Observe atentamente o comportamento da rede cristalina simulada. Em grupo, responda:


a) Os átomos simulados tem movimento plenamente livre? Eles podem alcançar qualquer ponto da rede?

Resposta contendo a análise de seu grupo:  **Os alunos deverão perceber que, embora os átomos representados fiquem "agitados", eles não têm movimento plenamente livre. As esferas se movimentam apenas no entorno de posições centrais, como os átomos reais em um sólido. Assim, podem concluir também que os átomos reais de uma rede cristalina não podem transitar livremente, não se deslocando por distâncias relativamente longas em relação aos outros átomos, impedindo que alcancem qualquer ponto arbitrário da rede cristalina.**

b) É possível estabelecer um análogo da temperatura com o simulador? Se sim, quais regiões possuiriam maior e menor temperatura no cristal simulado?

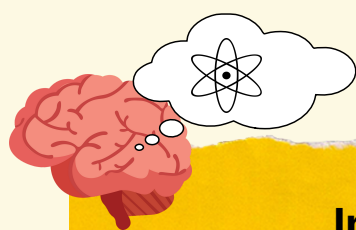
Resposta contendo a análise de seu grupo:  **Ao se acionar o simulador, não é difícil perceber que há regiões mais agitadas que outras, onde pode-se inferir que se tratam de regiões com maior temperatura. A região com maior temperatura é aquela localizada na vizinhança da esfera primária (átomo estimulado). Por consequência, a região mais afastada da esfera primária, na extremidade oposta da diagonal do cubo maior que representa a rede cristalina inteira, é menos agitada, portanto, equivale a porção de menor temperatura do cristal.**

**Parte 3:** Apresentem, agora, as respostas de seu grupo aos demais grupos da sala. Este momento será mediado pelo professor para que vocês possam partilhar suas conclusões. Caso, julguem necessário, vocês podem incrementar ou alterar suas respostas anteriores.

 **Nesta parte, o professor atuará na organização dos grupos e da apresentação das conclusões dos estudantes. A ideia é que cada grupo organize sua conclusão pautada na observação da simulação e que possa também, a partir da informação de outros grupos, incrementar sua explicação a fim de melhorá-la. Assim, buscarão a construção de uma conclusão mais abrangente a partir da contribuição de todos os estudantes da turma.**

## Situação 2- Entendendo a condução de energia térmica em um sólido.

Agora, com o mesmo grupo de colegas criado na atividade anterior, vocês analisarão a propagação do movimento térmico na rede cristalina simulada. Vocês já devem ter notado que apenas uma esfera do simulador é motorizada, entretanto, todas adquirem movimento. Como isso é possível? Para entender, considere a simulação da seguinte situação:




Imagine que pegássemos uma amostra de gás argônio e a resfriássemos ao ponto de solidificá-la, abaixo de  $-198^{\circ}\text{C}$ . Obteríamos, então, um cristal cuja rede cristalina seria formada por células unitárias no sistema cúbico de face centrada! Mas, imagine que resfriássemos ainda mais esse cristal, ao ponto de quase pararmos os átomos da rede, próximo ao zero absoluto ( $-273^{\circ}\text{C}$ ). Neste experimento mental inicial, obteríamos uma rede cristalina praticamente parada. Agora imagine, se pudéssemos fornecer energia térmica a essa rede, mas a partir de um único átomo... O que aconteceria com os átomos vizinhos com o passar do tempo?

A situação descrita acima é exatamente a proposta central do simulador. Como o movimento de um átomo é transmitido aos outros em uma rede cristalina? Em outras palavras, como a energia térmica se propaga em um sólido? Para entender esse fenômeno denominado **condução térmica**, realize com seu grupo as etapas experimentais a seguir.


### Experimento

**Parte 1:** O professor irá acionar o simulador através do botão "pulso", prestem muita atenção no comportamento da rede. Responda:

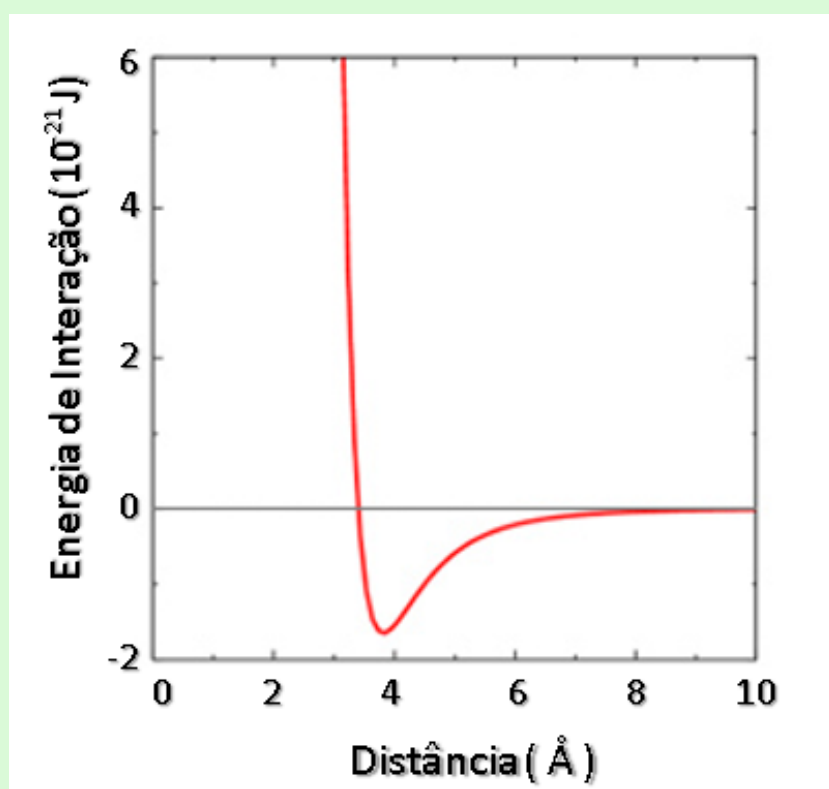
a) Na simulação, se apenas um átomo possui movimento, como os outros átomos adquirem movimento? Como esse "movimento térmico" se propaga na rede?

Resposta contendo a análise de seu grupo:  **Os estudantes podem observar facilmente que, embora apenas um "átomo" esteja sendo estimulado, todos os outros átomos representados se agitam também. Estes outros átomos recebem o movimento por meio de "empurrões" que se transmitem ao longo dos elásticos, com origem a partir da esfera motorizada. Embora não haja colisões propriamente ditas entre os átomos representados, a propagação deste "movimento térmico" se dá de esfera em esfera por intermédio dos elásticos.**

b) Qual o papel dos elásticos na propagação do movimento na rede cristalina representada? Com a ajuda do professor, explique o que esses elásticos representam em um sistema físico real.

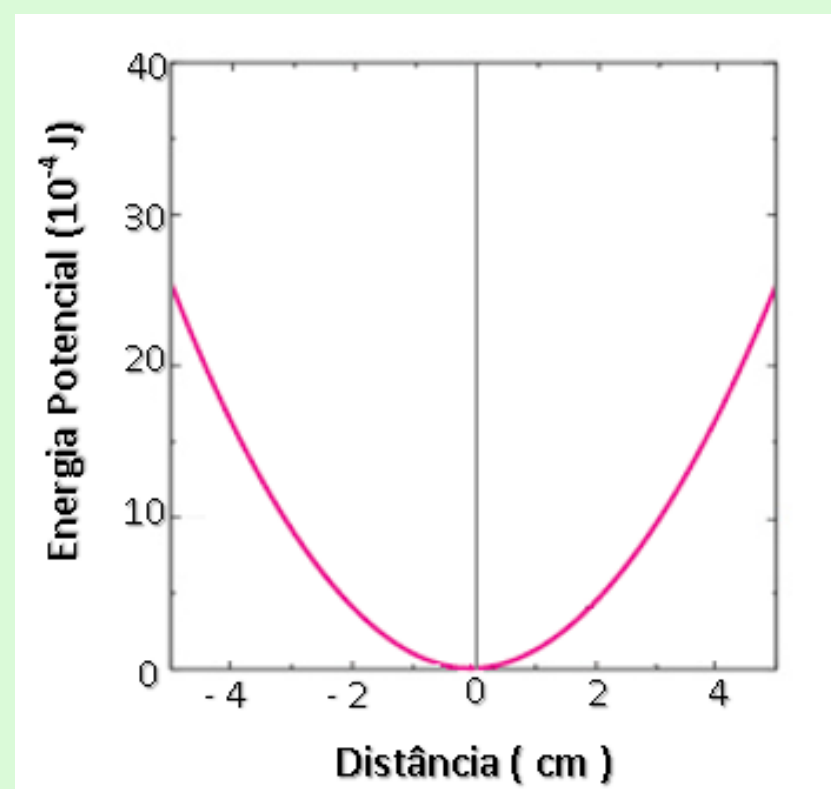
Resposta contendo a análise de seu grupo:  **Os elásticos são os responsáveis por transmitir o movimento de uma esfera à outra, permitindo que a energia cinética se propague pela rede cristalina simulada inteira. Na simulação os elásticos também são responsáveis pela coesão entre as esferas e a organização da rede cristalina. O professor deve explicar aos alunos que, em uma rede cristalina real, esse papel de coesão é desempenhado pela força elétrica que resulta da interação entre os átomos que formam a rede cristalina. Assim como as esferas não colidem com as vizinhas na simulação, os átomos reais também não colidem entre si, mas interagem à distância por meio da força elétrica. Em última análise, é interessante que os estudantes entendam também que os elásticos representam as ligações químicas entre os átomos da rede cristalina.**

**Parte 2:** Os átomos de gases nobres, como os de argônio, interagem entre si de acordo com o potencial de Lennard-Jones. Esse potencial indica a energia de ligação entre os átomos para formar uma rede cristalina real. Em nossa simulação, os "átomos" interagem por meio do elástico que existe entre eles. Neste caso da simulação, a energia de "ligação" é a energia potencial elástica. Analise as figuras abaixo e responda:



Potencial de Lennard-Jones para o Argônio.

Fonte: Adaptado de Madeira e Vittelio (Unicamp).



Energia Potencial Elástica armazenada por um elástico comum.

Fonte: O Autor.

Analisando os gráficos acima a partir de seus formatos, é possível estabelecer alguma similaridade entre o caso real e o simulado? Em que condições esses casos se aproximam?

Conclusão de seu grupo: Professor, oriente seus alunos a analisar alguma similaridade entre as curvas dos gráficos apresentados. É possível inferir que a curva que representa o potencial de Lennard-Jones (à esquerda) para energias de interação negativas, se assemelha à curva da energia potencial elástica (à direita), especialmente no regime de pequenas oscilações. É altamente sugerido que o professor faça essa análise junto com os estudantes para que eles possam associar os gráficos. Em última análise, o professor pode inferir ainda, que para pequenas oscilações os átomos reais se comportam como se estivessem acoplados por elásticos!

**Parte 3:** Por meio de uma roda de conversa organizada pelo professor, apresente as conclusões de seu grupo acerca de como se dá a **condução térmica** em sólidos aos demais grupos da sala! Para facilitar o diálogo, registre abaixo as conclusões gerais de seu grupo.

Nesta última parte, o professor deverá organizar uma roda de conversa para que os grupos apresentem suas conclusões gerais sobre as partes 1 e 2 desta Situação 2. Nesta conclusão, os estudantes devem apresentar o conceito de condução térmica, a partir das observações das simulações. Os estudantes devem ser orientados pelo professor a entender que a condução térmica se dá em todos os tipos de sólidos, não só os cristalinos. Também é interessante deixar os estudantes adotarem o conceito de colisões atômicas para explicarem a transmissão da energia térmica ao longo do sólido. Por fim, o professor pode também explorar outros métodos de transmissão de energia como a convecção e a irradiação, não discutidos neste material.



Professor, leia e discuta o tema abaixo para enriquecer sua aula!



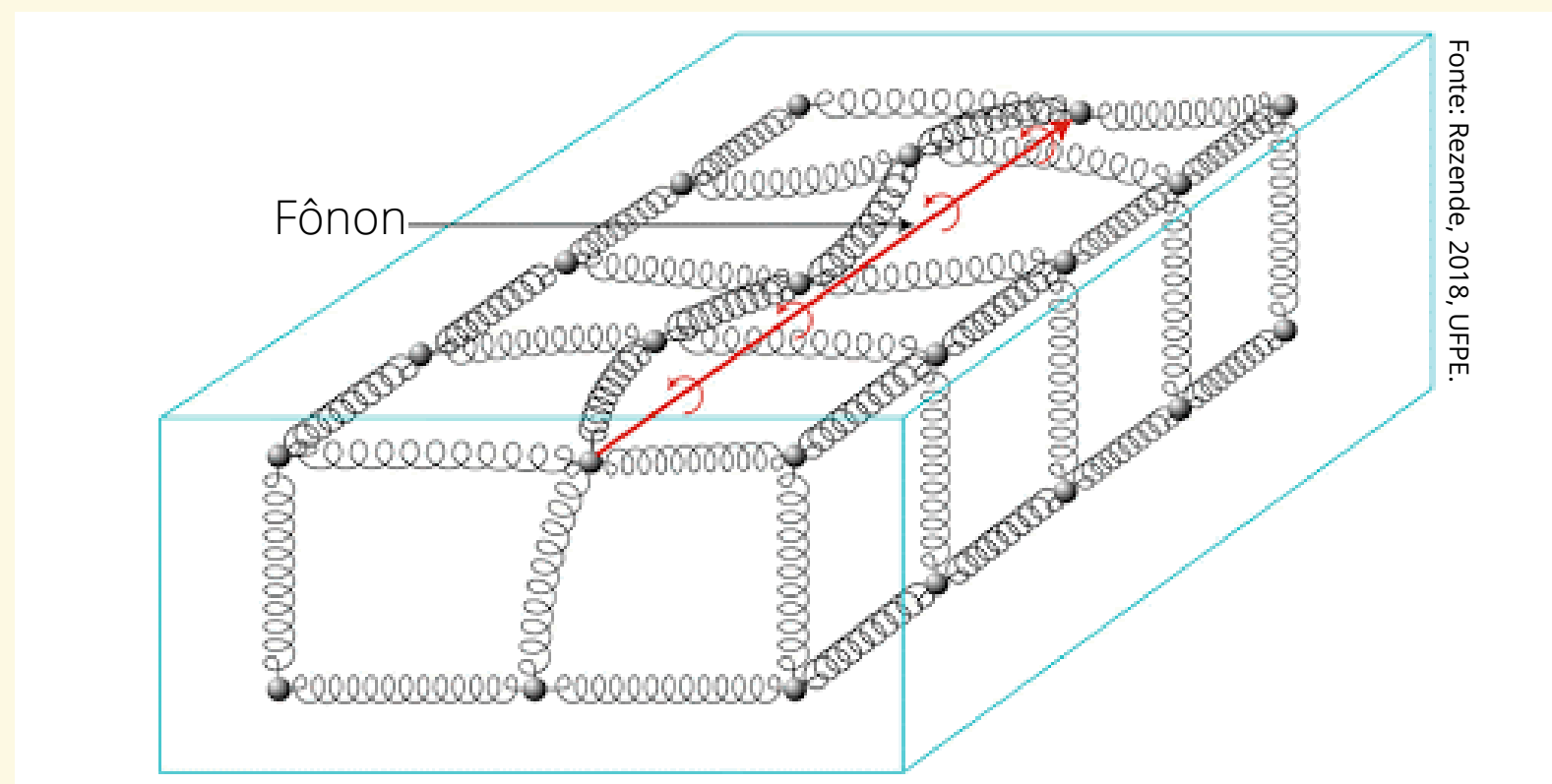
## Os Fônons

Ao analisar o comportamento da rede cristalina, você deve ter percebido que os átomos se movimentam no entorno de uma posição de equilíbrio definida pela rede de Bravais. Isto significa que, apesar do movimento oscilatório das partículas, existe uma posição central a partir da qual elas realizam o movimento.

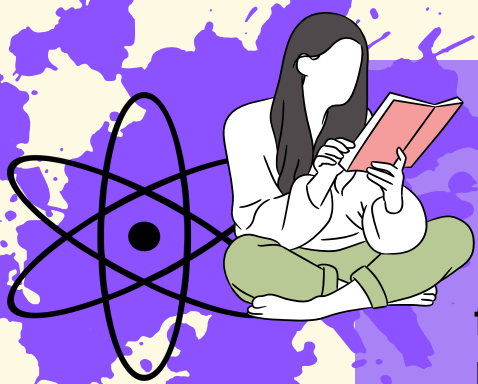
Se considerássemos a rede na menor temperatura possível, dada pelo zero absoluto, observaríamos os átomos da rede em repouso, em posições fixas, exatamente como definida pela rede de Bravais. À medida que a temperatura fosse aumentando, as partículas começariam a se agitar cada vez mais, mas em torno das posições que tinham quando estavam paradas. Como as partículas estão acopladas umas às outras, elas acabam assumindo uma vibração coletiva. Tal oscilação coletiva se propaga pela rede cristalina na forma de uma onda elástica, com frequência específica que depende das características da rede. Na física dos sólidos, considera-se que essa onda elástica se transmite em "pacotinhos" de vibração chamados **fônons** (SBF, 2018).

Os fônons se comportam como se fossem partículas fictícias que se propagam pela rede cristalina, por isso são chamados de quase-partículas. Eles são importantes para o estudo de vários fenômenos que ocorrem nos sólidos, como o som, a condução térmica e a supercondutividade elétrica!

Elaborado pelo Autor.



Representação de um fônon se propagando em uma rede cristalina.



### Leia também!

Para saber mais sobre o assunto leia o texto: "**Estudo brasileiro revela que fônons também podem ter spin**", publicado no site da Sociedade Brasileira de Física (SBF).

Acesse: <http://www.sbfisica.org.br/v1/home/index.php/pt/destaque-em-fisica/684-estudo-brasileiro-revela-que-fonons-tambem-podem-ter-spin>, e saiba mais!

## Atividade 5: Construindo um Modelo Explicativo

**TEMPO ESTIMADO:** 4 aulas de 50 minutos cada.  
**OBJETIVO:** Aprofundar os conceitos de forma experimental.  
**ATIVIDADE PROPOSTA:** Realizar medições no simulador mecânico, mapear a rede cristalina representada e obter um modelo matemático explicativo.

Nesta atividade, visa-se a **continuidade do aprofundamento** dos conceitos já abordados anteriormente com o simulador mecânico proposto, mas desta vez os estudantes deverão construir um **modelo matemático explicativo do movimento térmico** observado. Para isso, o professor deverá construir um instrumento barato que seja capaz de medir a agitação das esferas da rede que denominamos de "**vibrômetro**". Este instrumento também poderá ser construído pelos próprios alunos, caso desejem, de acordo com o indicado pelo Caderno do Aluno. A preferência da construção do vibrômetro pelo professor, assim como a construção do próprio simulador, se dá pela necessidade de otimizar o tempo em sala de aula, evitando a utilização de uma quantidade de aulas excessivas para a realização das atividades aqui propostas. Além disso, o professor tem mais condições de construir tanto o simulador, quanto o vibrômetro de modo mais preciso, garantindo uma simulação e medição de maior qualidade. Entretanto, nada impede que o professor realize as construções com seus alunos, ficando, portanto, essa decisão a seu critério.

Em termos metodológicos, esta Atividade 5 tem por objetivo de prosseguir na **diferenciação progressiva**, desenvolvida durante o aprofundamento, na apresentação de novos detalhes e da matematização do fenômeno observado. Concomitantemente, objetiva-se também a **reconciliação integradora**. Esta é a última atividade de aprofundamento desta UEPS.

A seguir é apresentado o **Manual de Construção do vibrômetro** que será utilizado pelos alunos para o desenvolvimento desta atividade:



### Manual de Construção: Vibrômetro



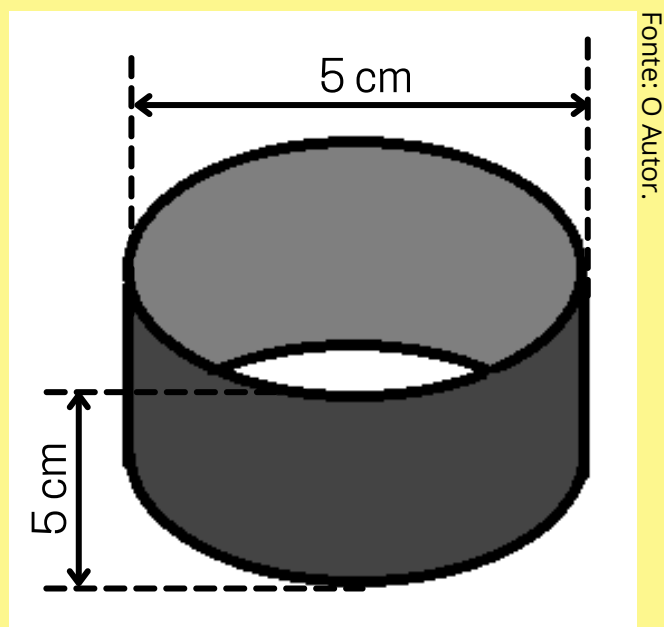
#### Materiais necessários:

- 1 folha de papel cartão;
- 1 folha de papel sulfite;
- 2 palitos de dente;
- 1 pacote de espetos de churrasco;
- impressora com tinta colorida;
- 1 tubo de cola instantânea;
- 1 pistola de cola quente;
- 1 tubo de cola quente;
- 1 lápis de escrever;
- 1 esfera de poliestireno expandido (EPS) de 10 mm de diâmetro;
- 1 régua de 30 cm;
- 1 estilete;
- 1 tesoura;
- 1 agulha de costura;
- tinta para tecido na cor vermelha;
- 1 pincel de pintura;
- 1 m de elástico (diâmetro de 1mm, 58% elastodieno e 42% poliéster- ou semelhante);
- 1 caixa de fibra *Medium Density Fiberboard* (MDF) 7 cm x 7 cm x 5 cm, com tampa.
- 300 g de pedregulho.

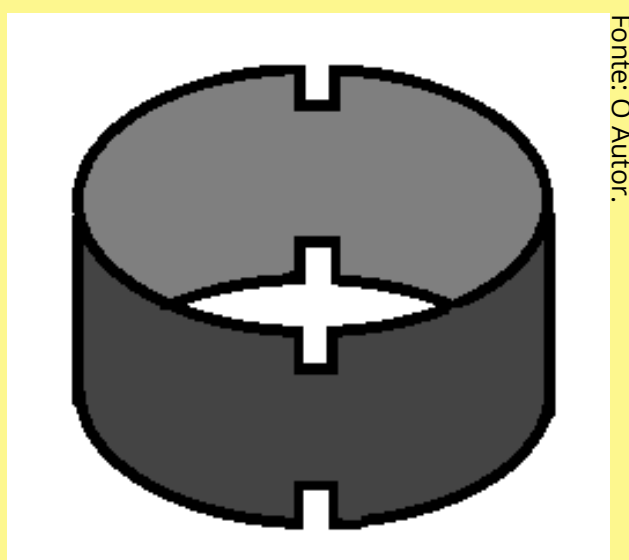


## Construção:

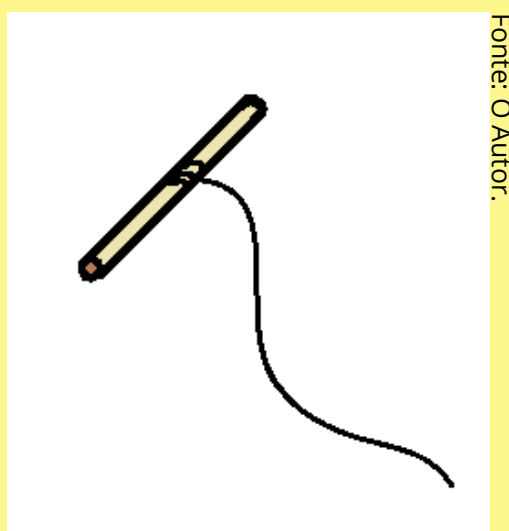
**Passo 1:** Pegue o papel cartão e corte um retângulo de 36 cm x 5 cm . Passe um pouco de cola instantânea ao longo deste retângulo. Enrole-o de modo a formar um canudo de diâmetro de 5 cm e altura de 5 cm. Você perceberá que o comprimento do retângulo é suficiente para constituir duas voltas, tornando a parede do tubo propositalmente mais espessa e resistente. O tubo formado segue ilustrado abaixo:



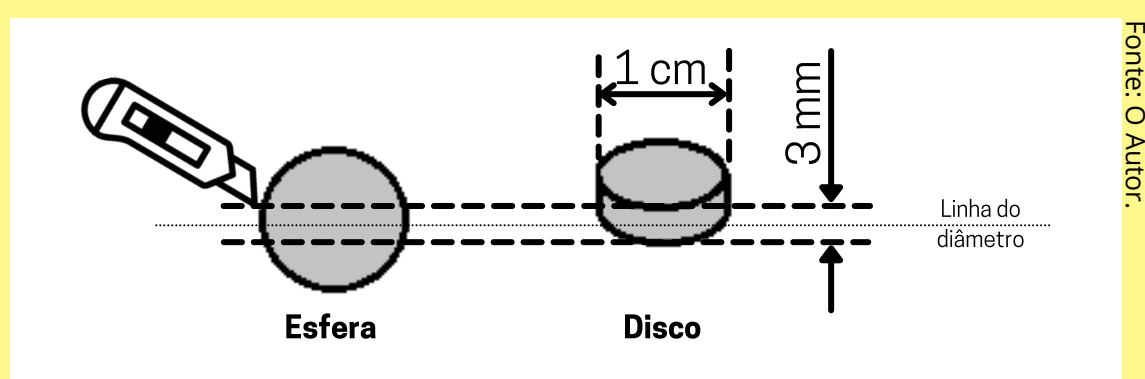
**Passo 2:** Recorte dois rebaixos quadrados de arresta de 2 mm no tubo e diametralmente opostos em cada extremidade, de acordo com a figura:



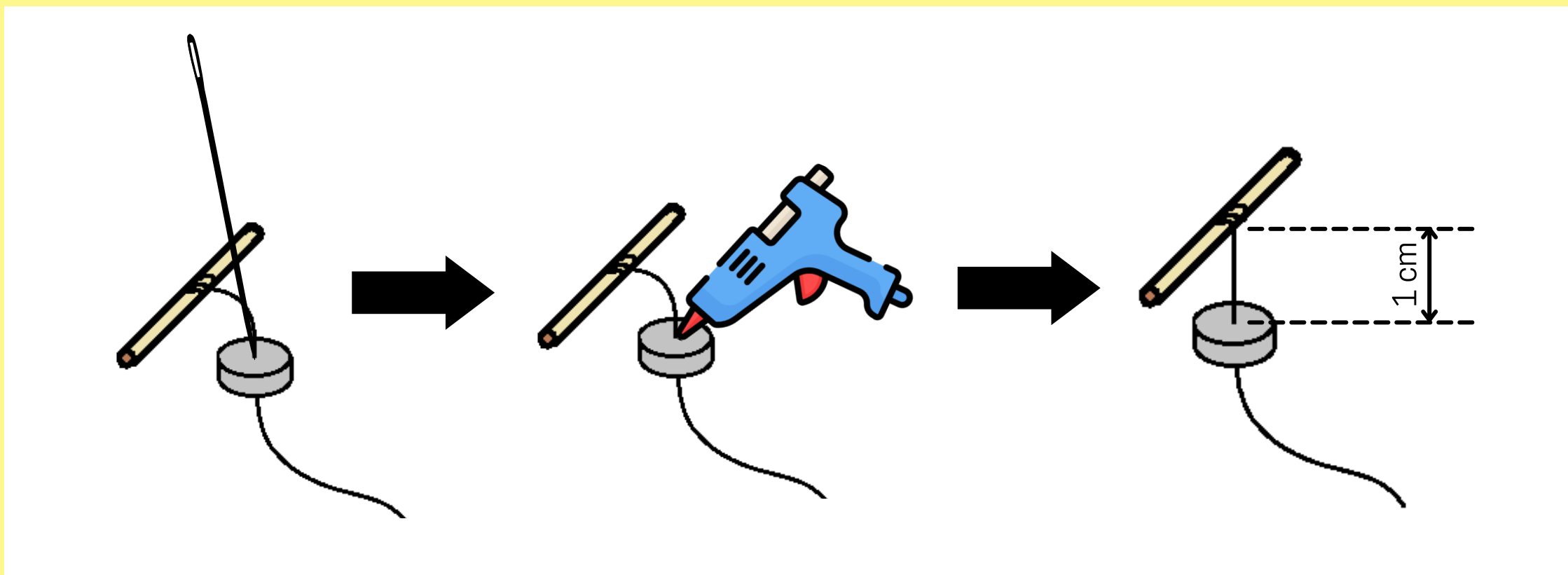
**Passo 3:** Recorte as pontas dos palitos de dente, de modo a deixá-los com comprimento de 5 cm. Pegue um deles e amarre ao centro um pedaço de elástico de 10 cm, como ilustrado na figura a seguir:



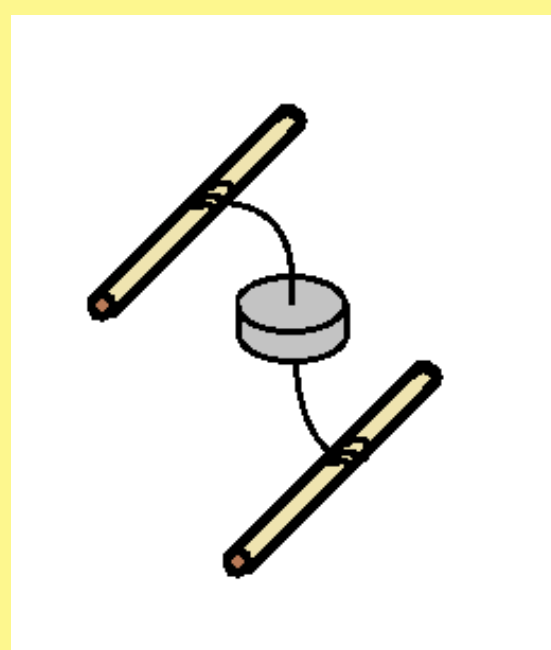
**Passo 4:** Recorte a esfera de EPS com o estilete, tomando por referência o diâmetro, de modo a formar um disco com o mesmo diâmetro da esfera (10 mm = 1cm) e espessura de 3 mm, como indicado abaixo:



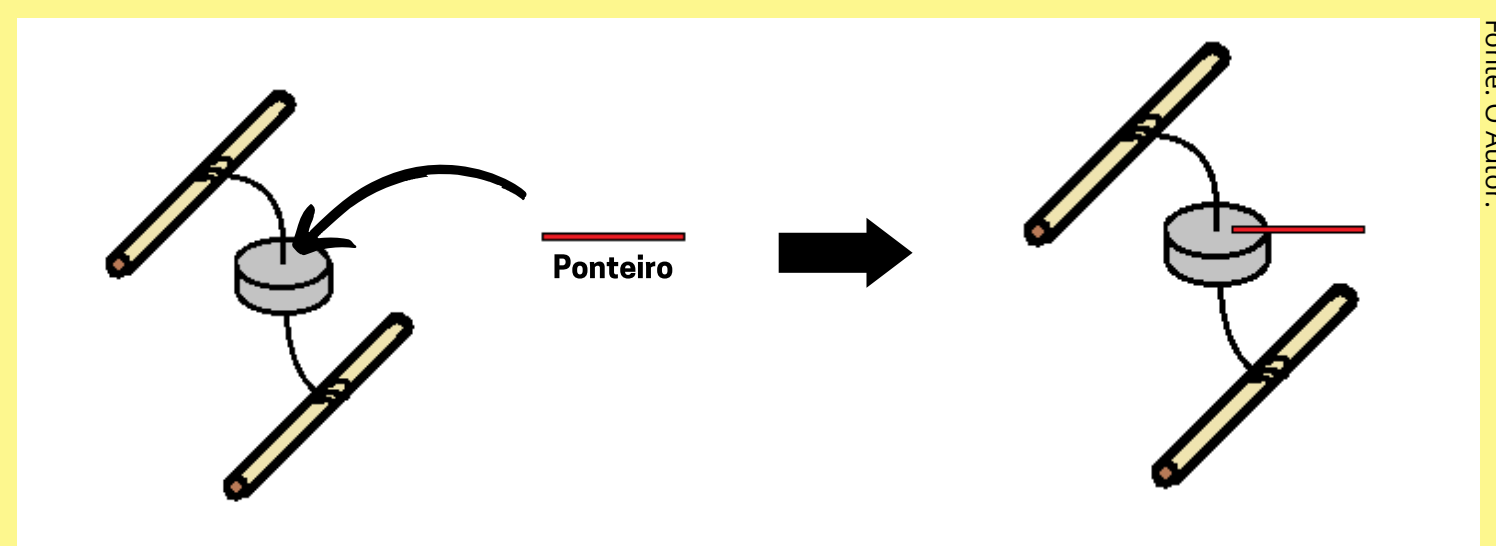
**Passo 5:** Por meio da agulha, passe a extremidade solta do elástico obtida no Passo 3 no centro do disco construído no Passo 4. Através da cola quente, fixe o disco a 1 cm do palito de dente (como ilustrado abaixo).



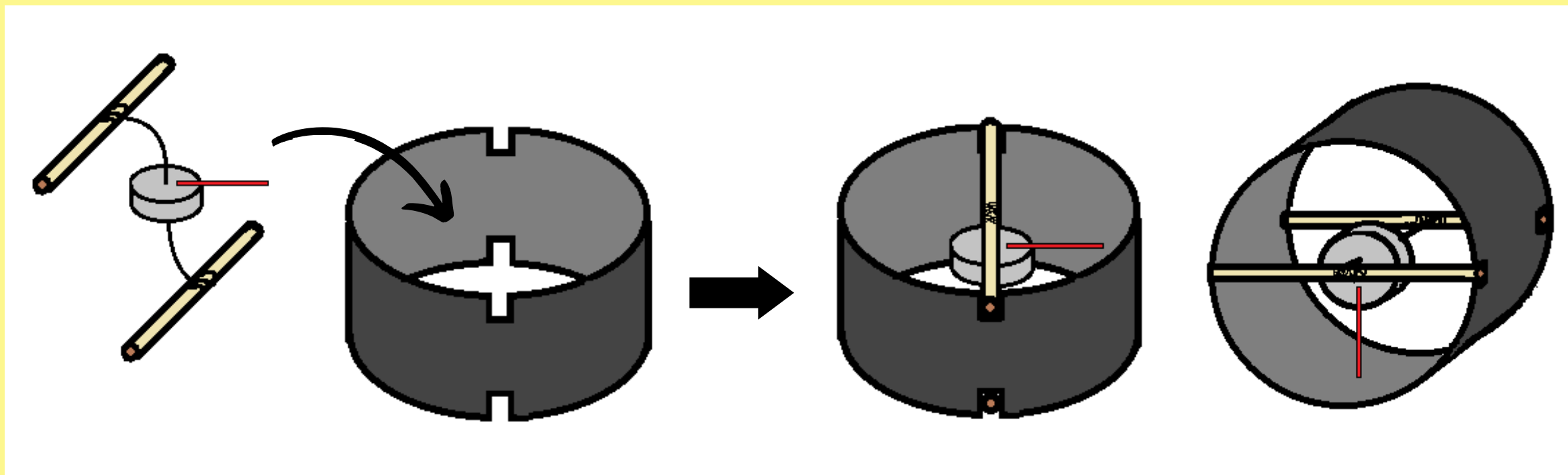
**Passo 6:** Amarre a outra extremidade do elástico no outro palito de dente. Da mesma forma que no passo anterior, deixe 1 cm de elástico entre o palito e o disco central. A figura a seguir ilustra o conjunto obtido:



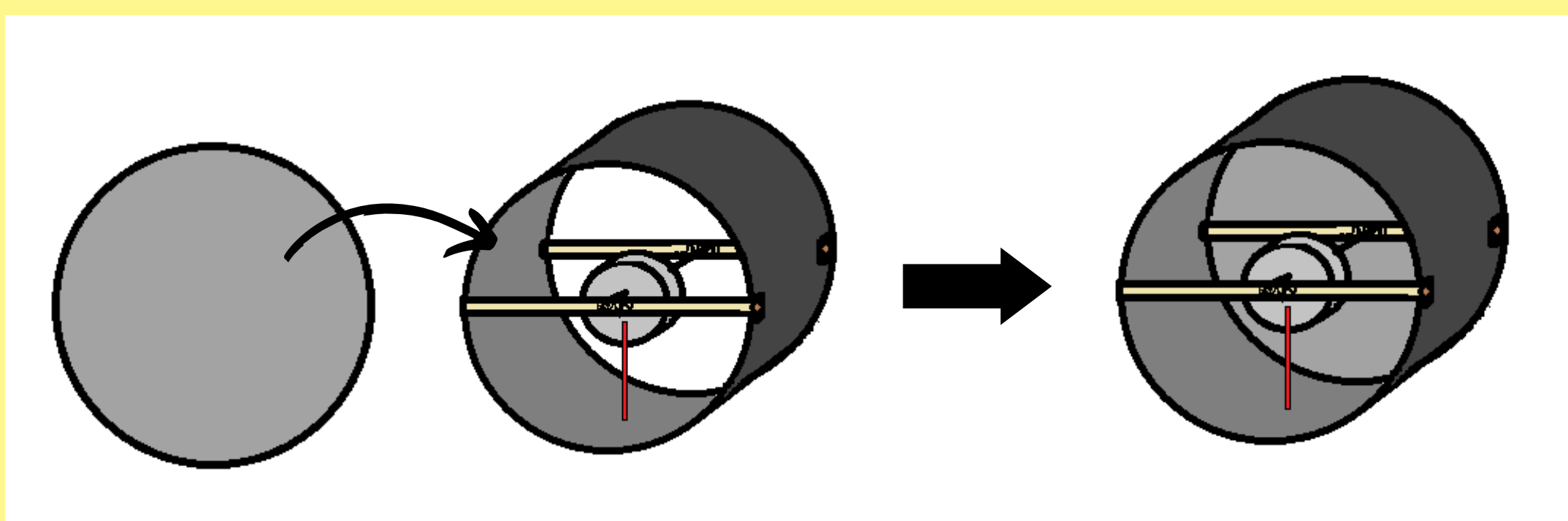
**Passo 7:** Através do estilete, corte o espeto de churrasco de modo a obter uma pequena vareta de 4 cm de comprimento e 2 mm de espessura. Pinte essa vareta de vermelho, pois ela será nosso ponteiro. Por fim, cole o ponteiro por meio da cola instantânea ao centro do disco do conjunto formado no passo anterior, conforme ilustração abaixo:



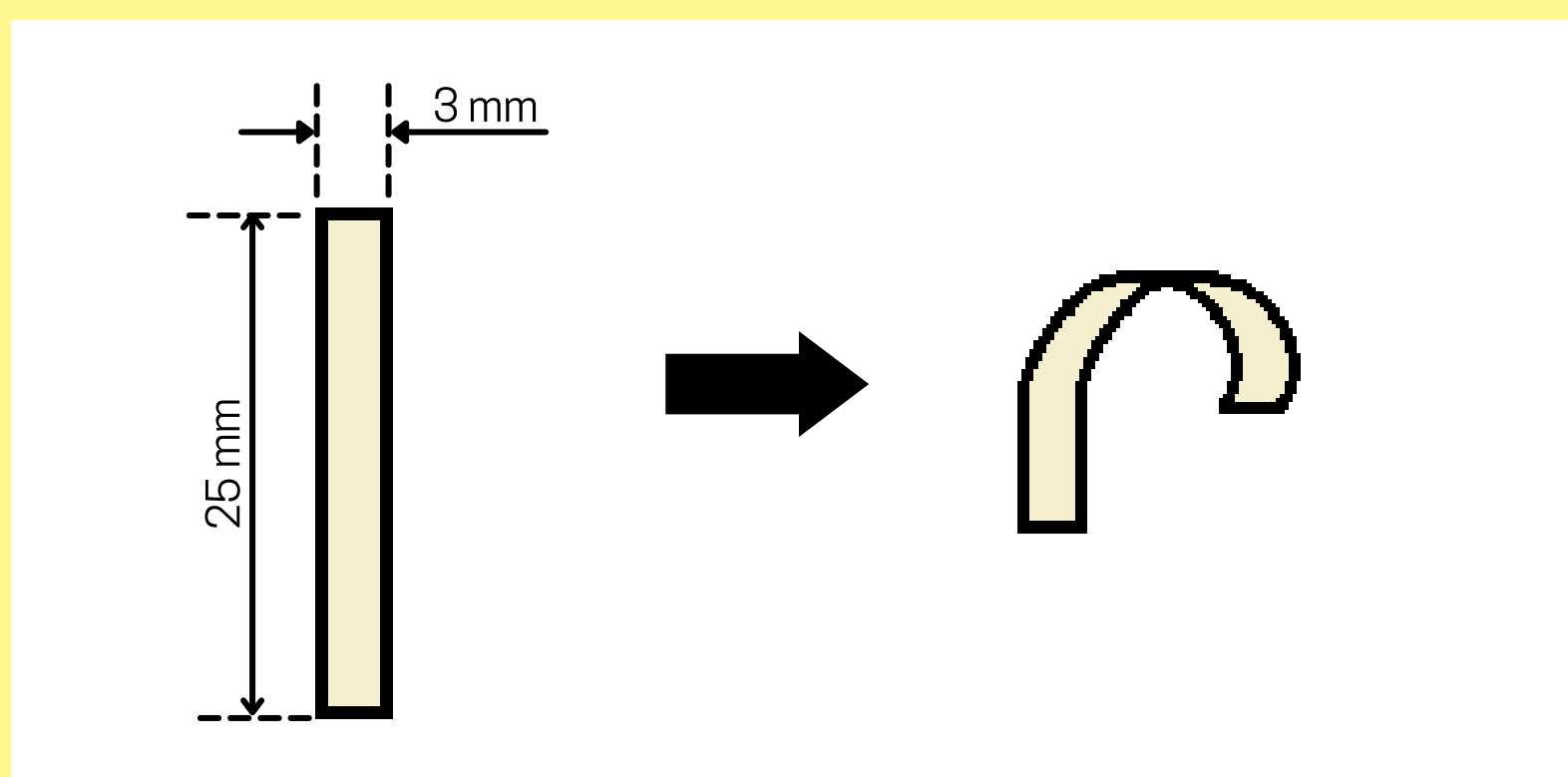
**Passo 8:** Insira o conjunto construído no Passo 7 no interior do tubo confeccionado no Passo 2. Para isso, coloque cada palito nos rebaixos das extremidades do tubo. Naturalmente, o elástico se manterá tensionado, sustentando o disco central e o ponteiro. Ajuste os palitos de modo a posicionar o ponteiro exatamente na posição central. Após o ajuste, fixe os palitos nos rebaixos por meio da cola instantânea. A ilustração a seguir mostra essa montagem.



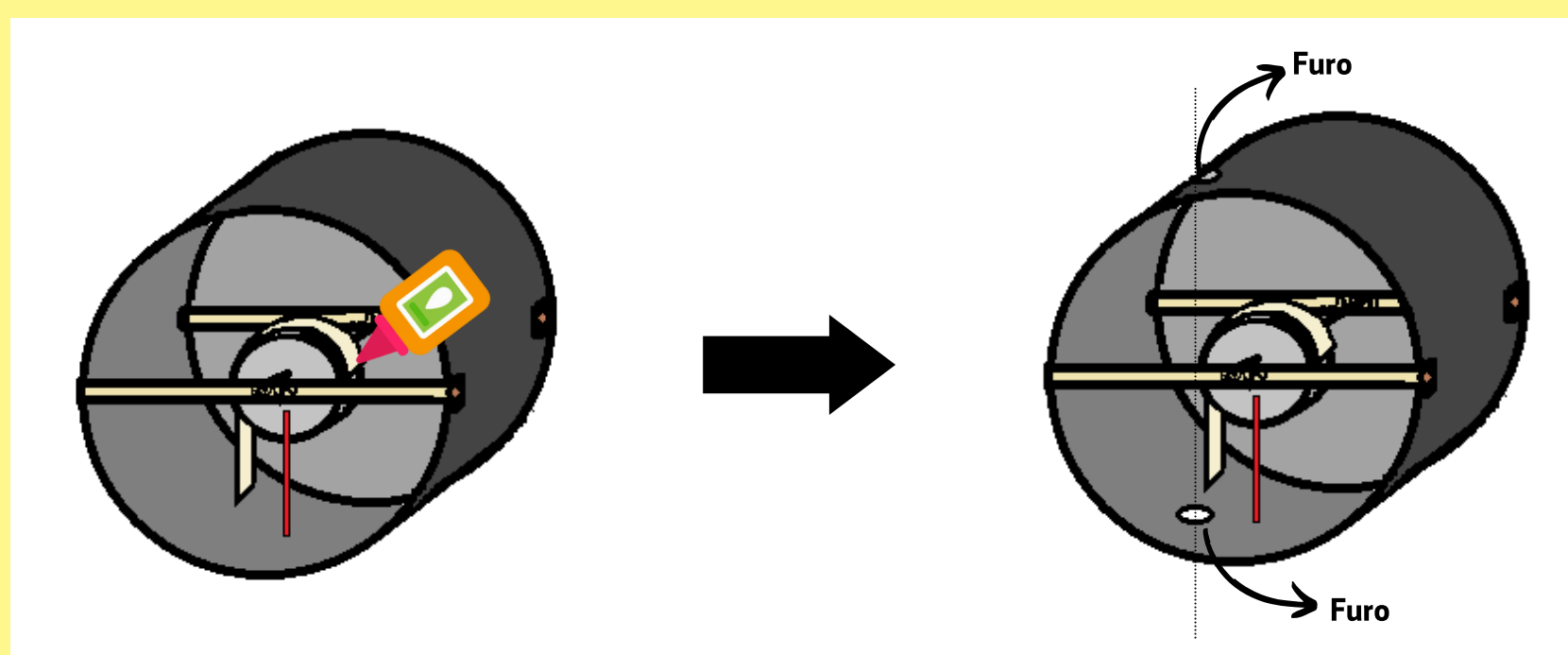
**Passo 9:** Corte um círculo de 5 cm de diâmetro no papel cartão. Ele será a tampa de fundo do tubo do vibrômetro, fixe-a com cola instantânea (figura abaixo).



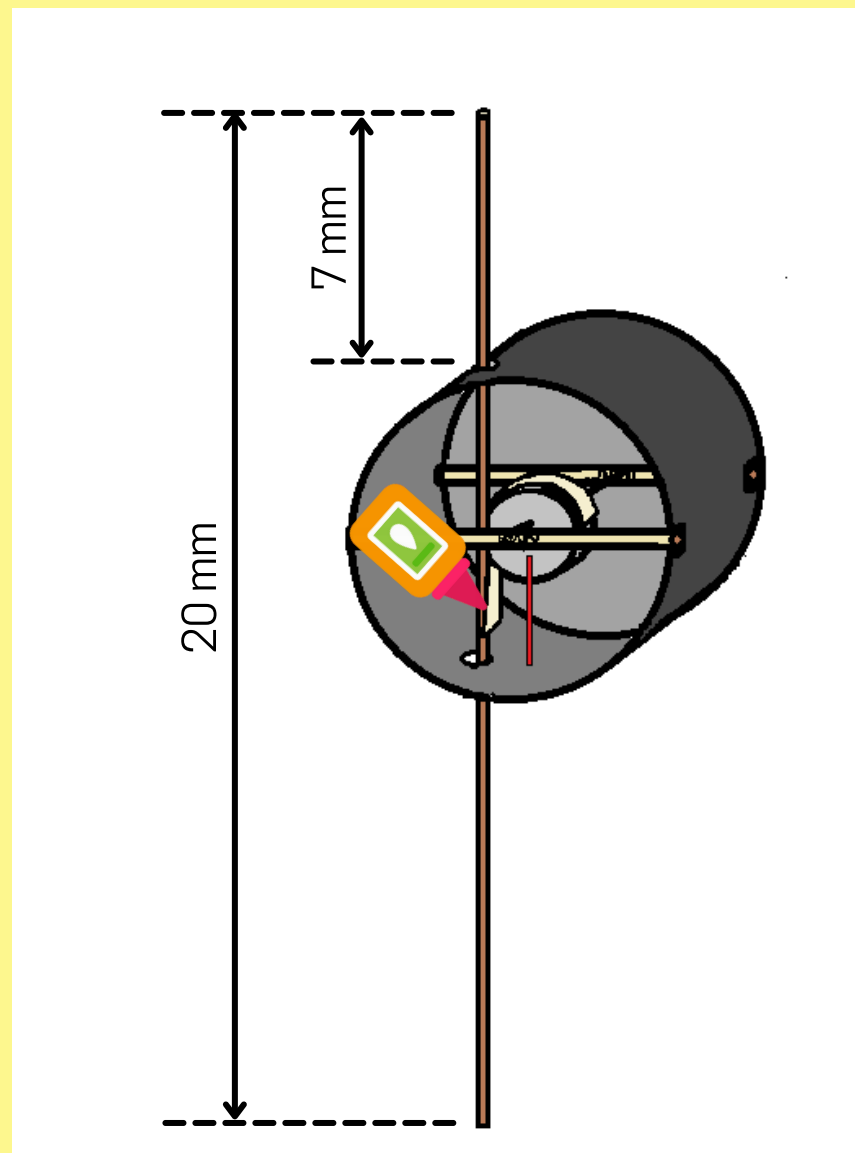
**Passo 10:** Corte um pequeno retângulo de 25 mm x 3 mm no papel sulfite. Curve com os dedos uma das extremidades deste retângulo, conforme a figura abaixo. Esta será a "lâmina" do vibrômetro.



**Passo 11:** Ajuste a lâmina construída no passo anterior ao disco e cole-a ao disco na posição indicada na figura abaixo, à esquerda. Cole apenas a ponta da extremidade curvada da lâmina no disco, pois a lâmina deve ter movimento livre e deverá se enrolar ao disco quando se deslocar. Faça dois furos de 4 mm de diâmetro no tubo de modo que o eixo dos furos seja imediatamente paralelo à extremidade solta e reta da lâmina, conforme indicado abaixo à direita.



**Passo 12:** Com um estilete corte um espeto de churrasco e confeccione uma vareta menor, com diâmetro de 3 mm e comprimento de 200 mm. Esta é a vareta de medição. Introduza essa vareta nos furos do tubo do vibrômetro e posicione-a de modo que a ponta superior tenha 7 mm, de acordo com a figura a seguir. Cole a extremidade solta e reta da lâmina a essa vareta com a cola instantânea.

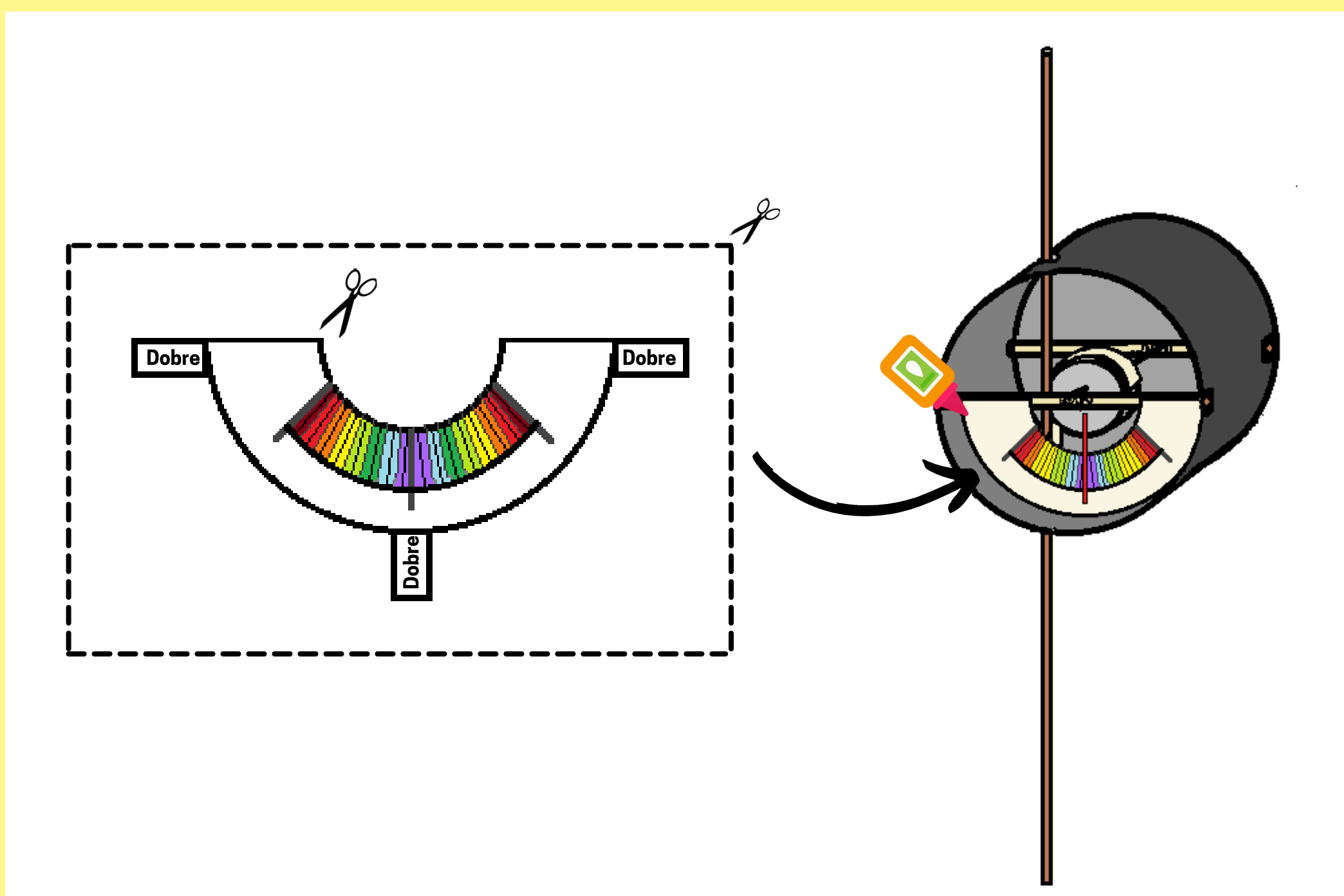


Fonte: O Autor.

**Passo 13:** Recorte o retângulo tracejado abaixo, à esquerda, e depois recorte a seguinte escala graduada (em tamanho real). Caso deseje não recortar este Caderno do Professor, você pode baixar um PDF gratuitamente através do link abaixo. Este PDF contém 10 escalas graduadas em tamanho real para você recortar:

<https://fisicatermica.wixsite.com/simulador/construa-o-vibr%C3%B4metro>

Após recortar a escala graduada, dobre as partes indicadas para trás e cole na parede interna do tubo, atrás do ponteiro.

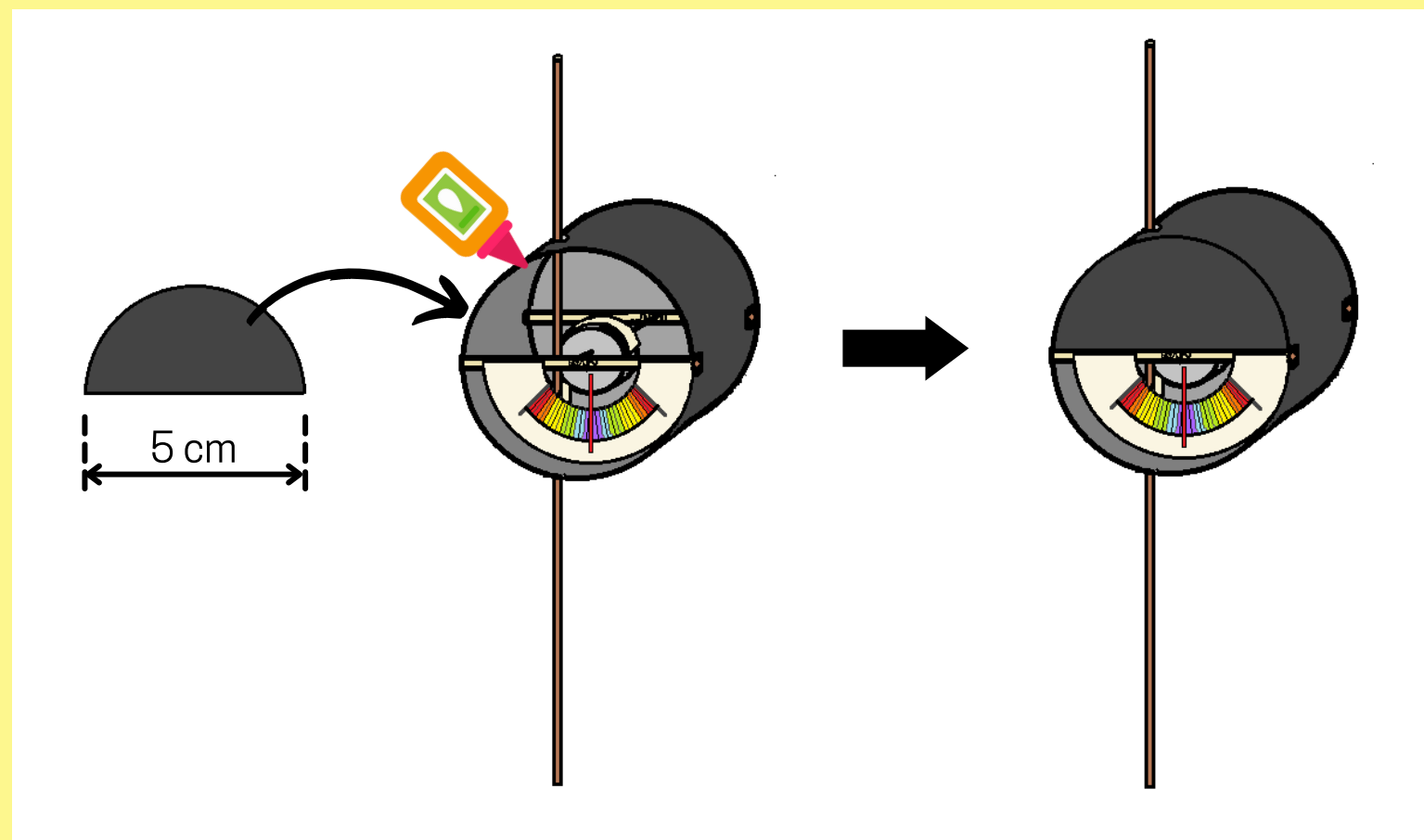


Fonte: O Autor.

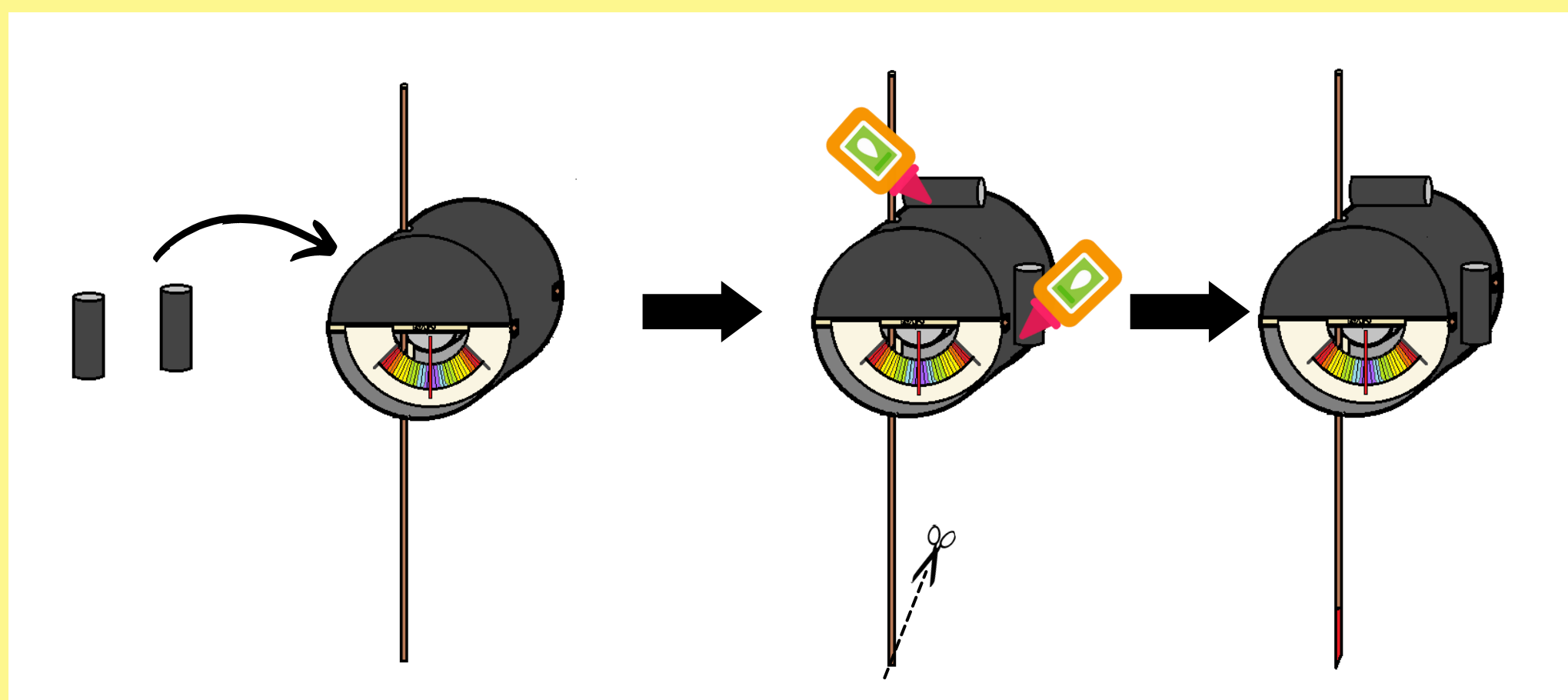
**Passo 14:** Para calibrar seu vibrômetro, desloque a vareta de medição, para cima ou para baixo, até que o ponteiro atinja a última marcação da escala (em vermelho). Meça o deslocamento linear da vareta com a régua e anote o valor. Depois divida o deslocamento anotado por 16, que é a quantidade de divisões da escala graduada. Anote o resultado, de preferência na própria escala, pois será a resolução do vibrômetro.

Por exemplo, se a vareta se deslocar 5 mm para atingir a última marcação da escala, tem-se:  $5 \text{ mm} / 16 = 0,3 \text{ mm}$ , isto é, cada divisão da escala equivale a 0,3 mm.

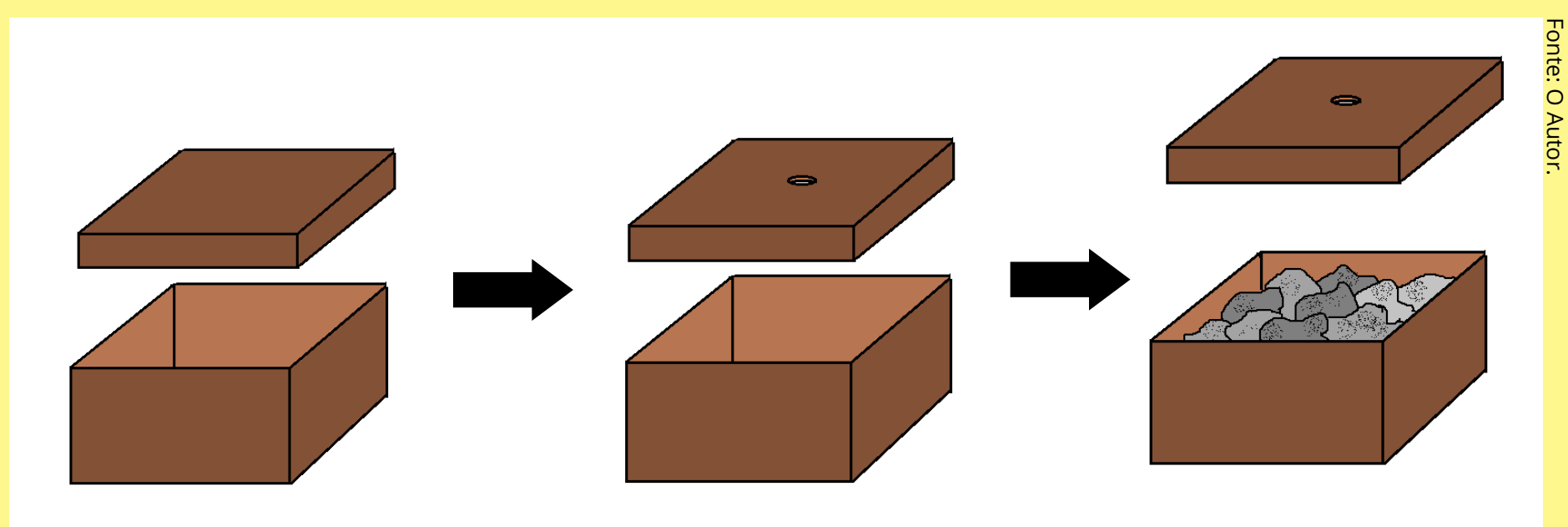
**Passo 15:** Recorte um semicírculo com raio igual a 5 cm. Cole na parte frontal superior do tubo do vibrômetro, conforme a figura a seguir:



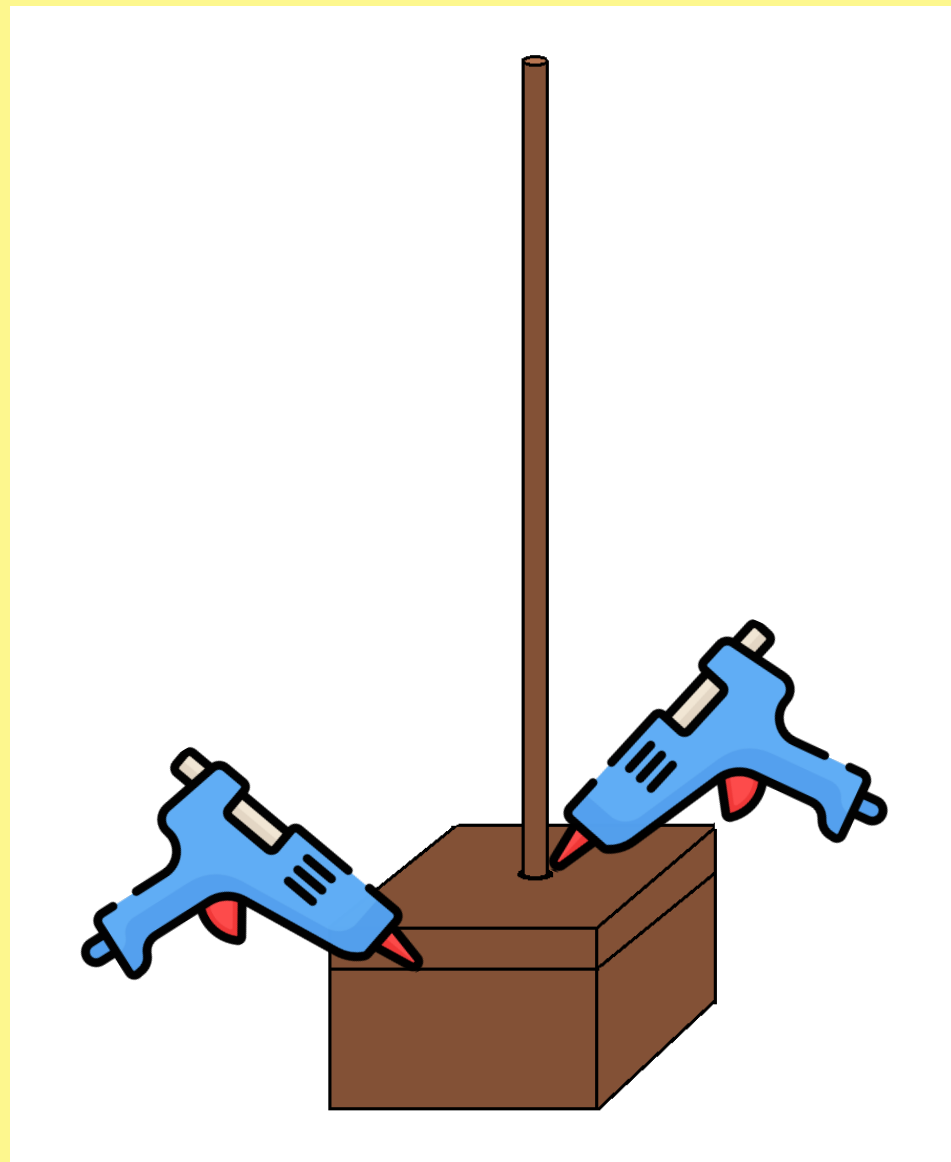
**Passo 16:** Confeccione dois tubos com papel cartão com comprimento de 15 mm e diâmetro igual ao do espeto de churrasco que você dispõe, de modo que os tubos envolvam e fiquem ajustados ao espeto. Use o próprio espeto como molde para os tubos. Use cola instantânea para confeccionar esses tubos. Cole um dos tubos na lateral direita do vibrômetro e o outro na parte superior, como segue indicado abaixo. Com a tesoura, corte a extremidade inferior da vareta de medição para que fique pontiaguda. Pinte de vermelho essa ponta:



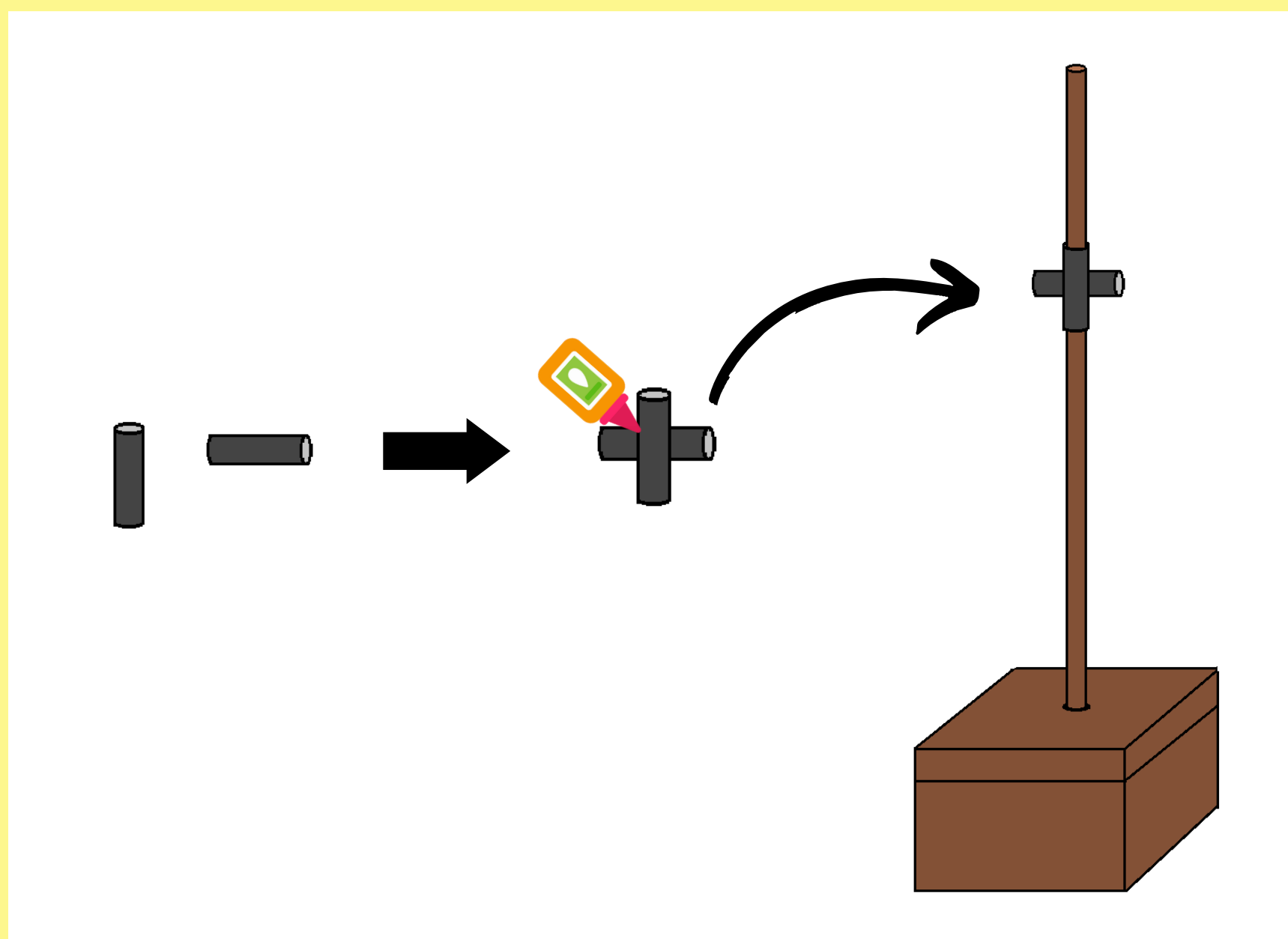
**Passo 17:** Agora pegue a caixa de MDF e fure o centro da tampa com o mesmo diâmetro do espeto de churrasco que você dispõe. Preencha o interior da caixa com pedregulho. Essa caixa será a base do vibrômetro.



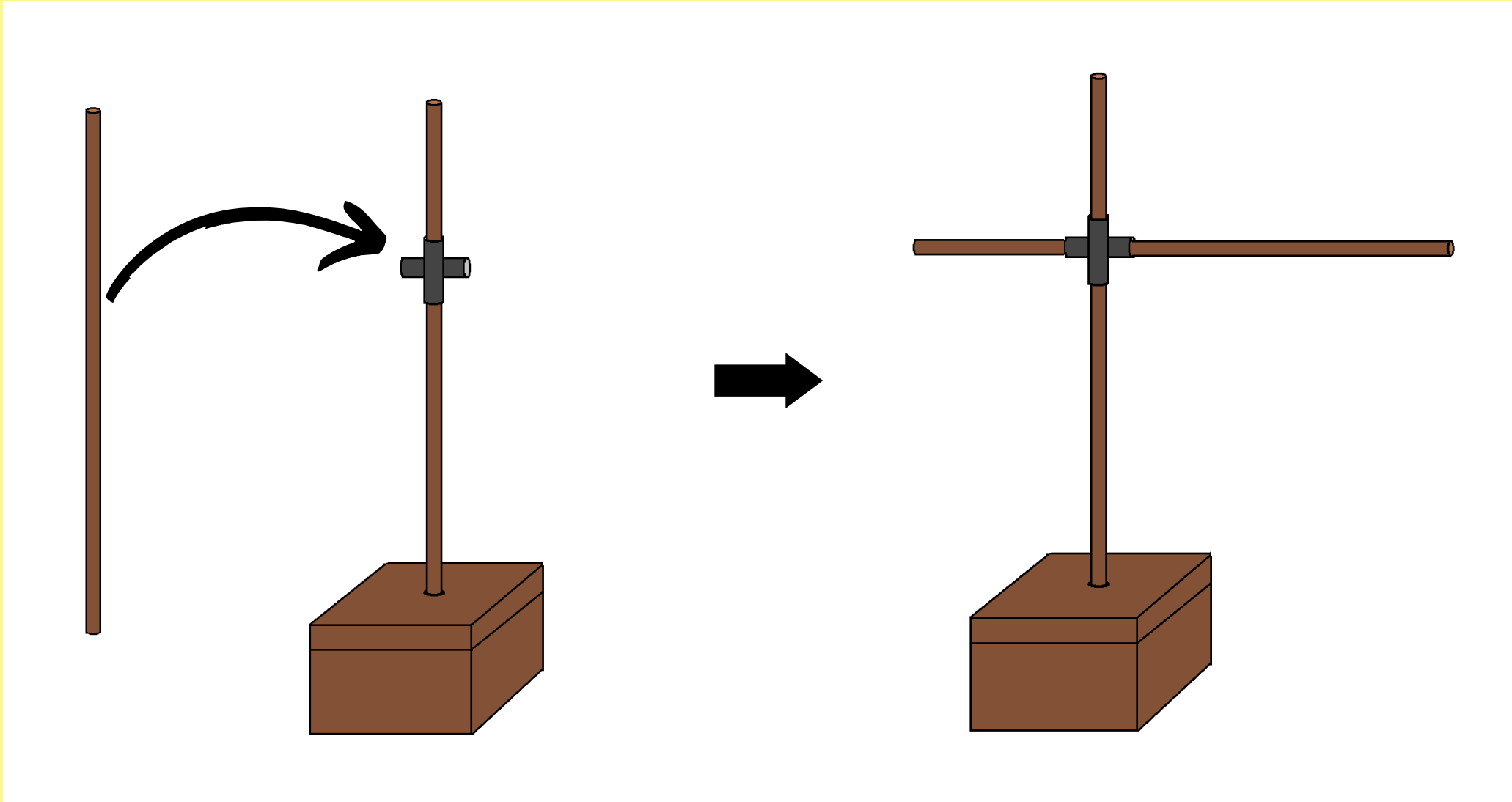
**Passo 18:** Insira um palito de churrasco na tampa da caixa de MDF. Ajuste o palito para que o espeto adentre o pedregulho pelo menos 1 cm. Este palito será o suporte de movimentação vertical. Fixe o palito e a tampa com cola quente.



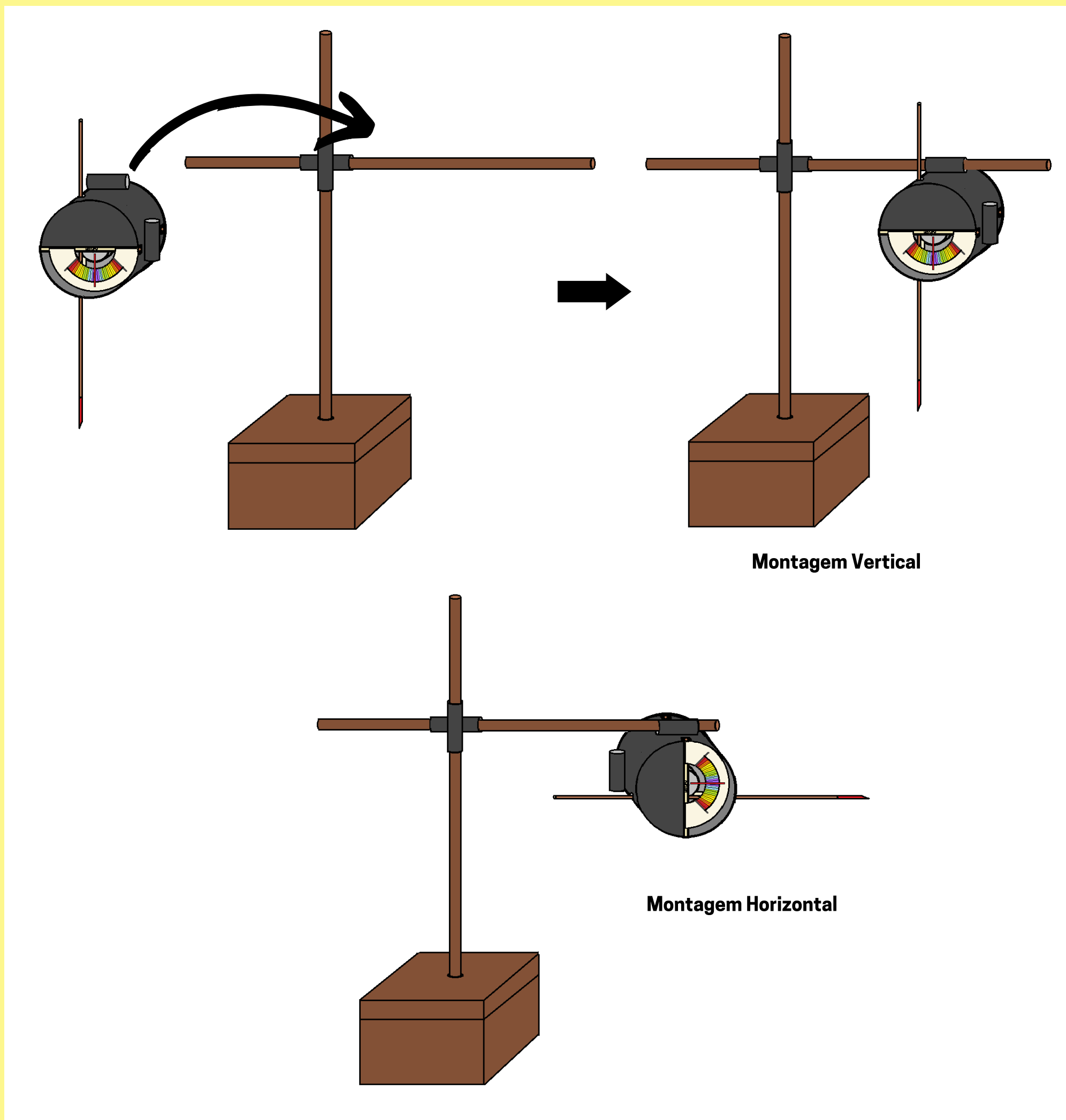
**Passo 19:** Faça mais dois pequenos tubos idênticos aos do Passo 16. Posicione-os perpendicularmente entre si, formando uma cruz. Fixe um ao outro por meio da cola instantânea. Chamaremos essa peça de "cruzeta". Insira a cruzeta no suporte de movimentação vertical de maneira que possa deslocar-se livremente ao longo deste, como indicado na ilustração abaixo:



**Passo 20:** Pegue outro espeto, remova a ponta e insira na cruzeta, de modo que este fique na horizontal (a figura abaixo ilustra esse passo). Este novo espeto será o suporte de movimentação horizontal.



**Passo 21:** Insira o vibrômetro no suporte horizontal através dos tubos de fixação laterais. Assim, a construção do vibrômetro estará concluída. Note que os suportes de movimentação permitem a livre movimentação por deslizamento do vibrômetro tanto verticalmente, quanto horizontalmente. São possíveis duas montagens com o vibrômetro: a vertical e a horizontal.



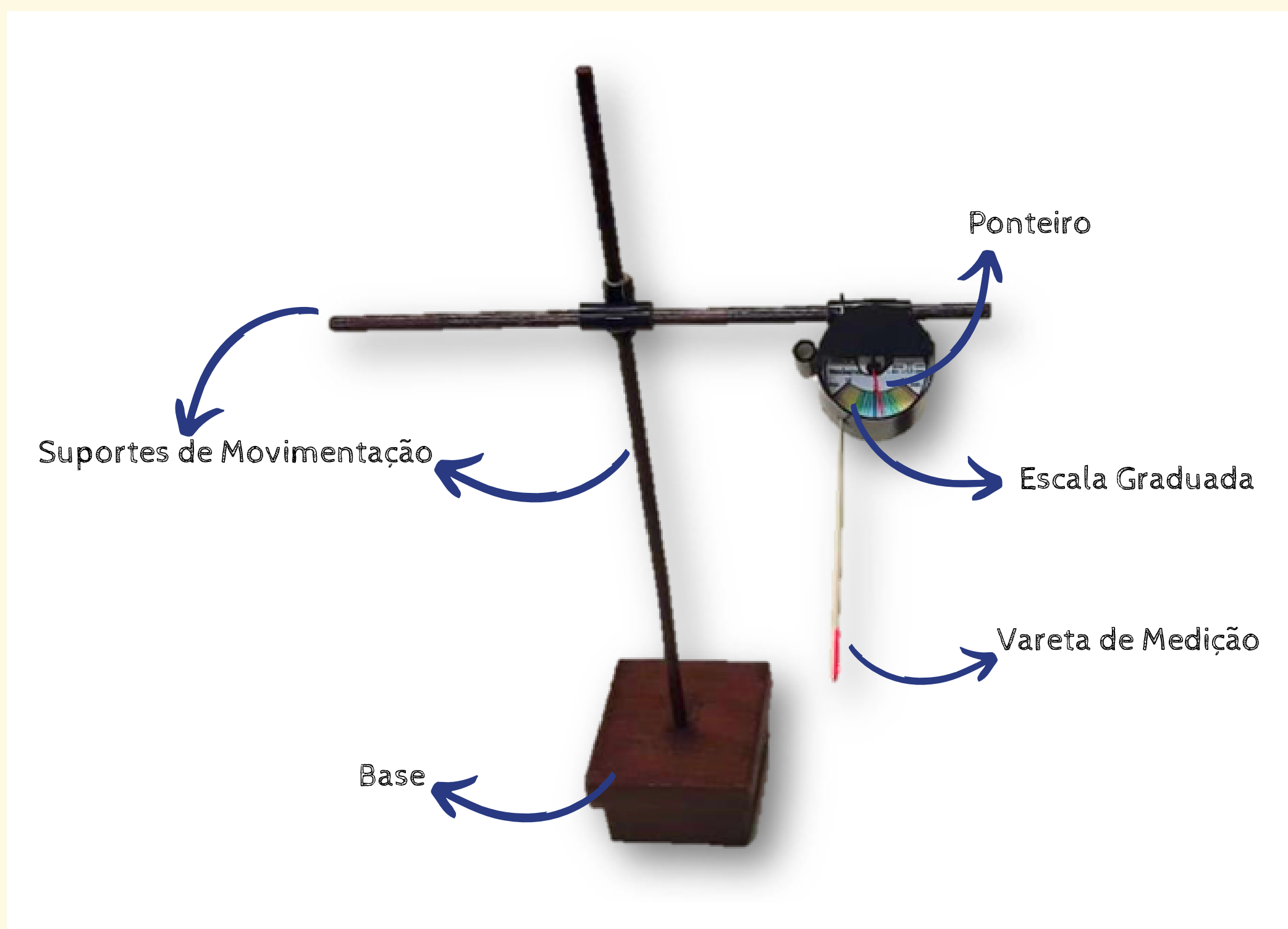
**Passo 22:** Construa **seis unidades completas** do vibrômetro descrito para serem utilizados pelos grupos de alunos em sala de aula.

A seguir, são apresentados o texto e as atividades propostas no Caderno do Aluno:

Agora que já entendemos como se dá qualitativamente a condução térmica em um sólido, vamos analisar a rede cristalina simulada com um pouco mais de detalhe? Para isso, nós realizaremos medições das vibrações dos átomos representados e "mapearemos" nossa rede cristalina! Além disso, nesta aula, a partir dos dados experimentais coletados, seu grupo deverá construir um modelo matemático que expresse com maior precisão a propagação do movimento térmico na rede. Vamos lá?

### Parte 1- Medindo a vibração da rede cristalina simulada.

Como você já deve ter percebido, para analisar quantitativamente o movimento da nossa rede cristalina, deveremos realizar medições da agitação dos átomos representados. A medição será feita através de um instrumento proposto e denominado sugestivamente de "vibrômetro". Esse instrumento, feito a partir de materiais simples, é capaz de indicar amplitudes de deslocamentos com precisão de até 0,3 mm em relação a uma posição central de referência. Seu professor levará para a aula alguns vibrômetros já construídos e prontos para o uso.



Vibrômetro construído para a medição da oscilação dos átomos representados.



Se você quiser fazer o seu próprio vibrômetro, acesse o link:

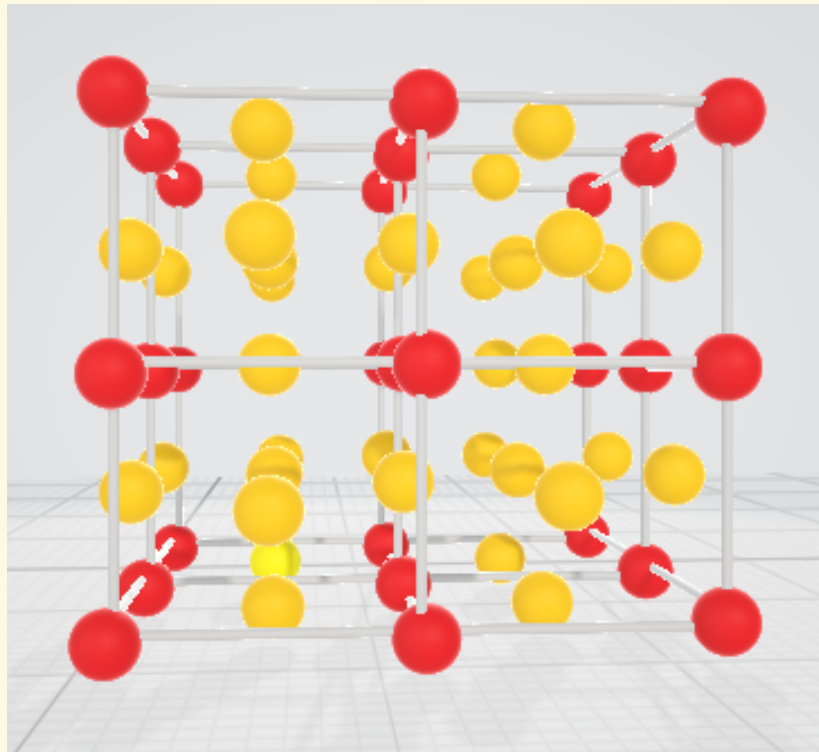
<https://fisicatermica.wixsite.com/simulador/construa-o-vibrômetro>

Capriche e leve para a aula para utilizá-lo!

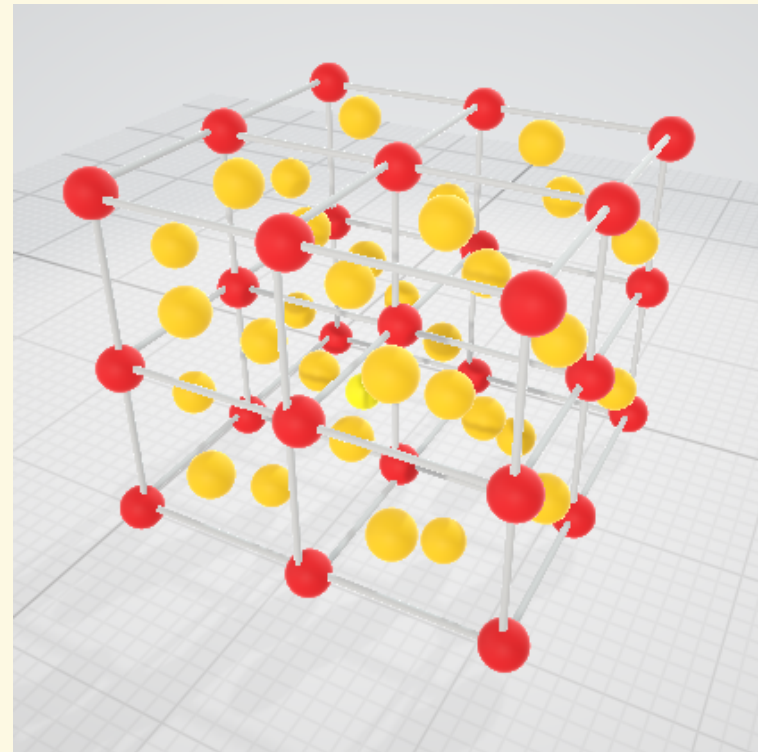


Forme grupos de cinco colegas e, com o auxílio do professor, meça através dos vibrômetros a oscilação dos átomos que constituem a rede cristalina. Nossa rede representada possui 63 átomos, mas nos concentraremos apenas naqueles que se encontram nos vértices dos cubos das células cristalinas, indicados em **vermelho** nas figuras abaixo. Para realizar a medição, basta introduzir a ponta da haste do vibrômetro no átomo representado, ajustar a posição do instrumento na medida 0 mm, e após ligar o simulador, ler a medida indicada pelo ponteiro na escala.





Fonte: O Autor.

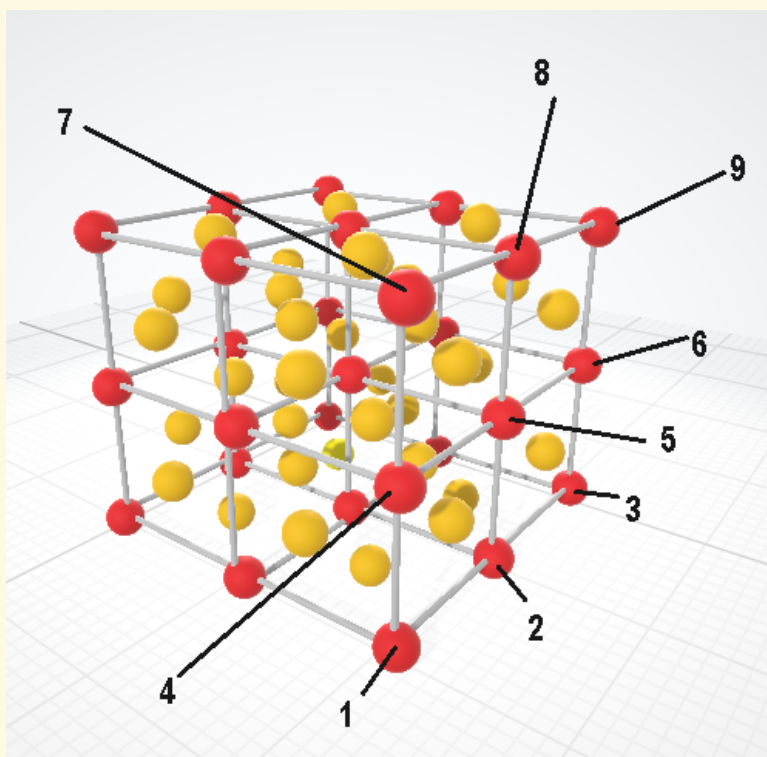


Fonte: O Autor.

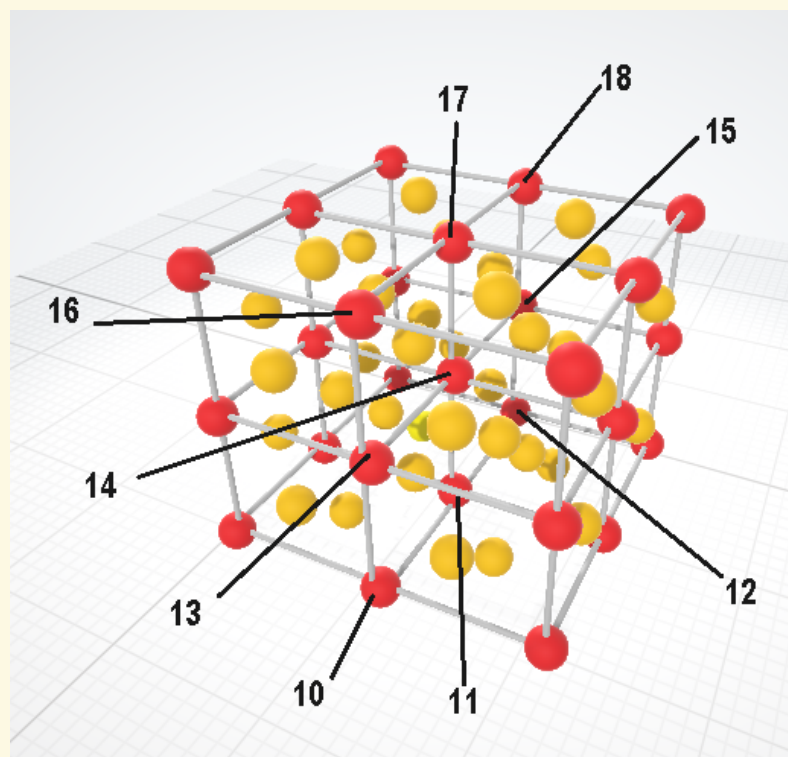
Vista 1: Átomos dos vértices das células unitárias cúbicas .

Vista 2: Outra perspectiva dos átomos dos vértices das células unitárias cúbicas .

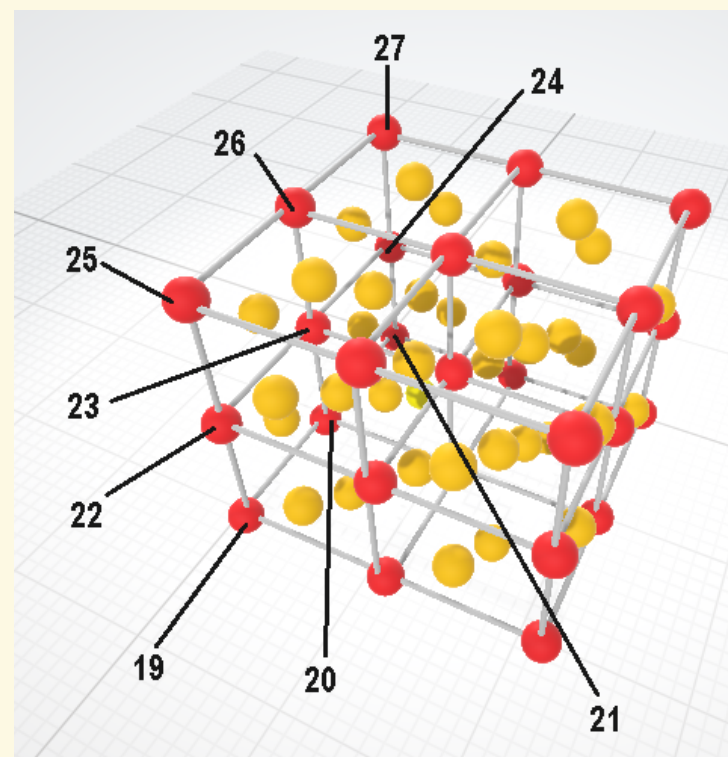
Como você pode ter percebido, são 27 átomos que formam os vértices das células unitárias do sistema cúbico (indicados em vermelho). Assim, serão necessárias 27 medições com o vibrômetro. Com o auxílio de seu professor, e em **acordo com os demais grupos da sala**, identifique cada um desses átomos **indicados a seguir com um número**. É importante que todos os grupos utilizem essa mesma identificação para mapear a rede cristalina.



Átomos de 1 à 9.



Átomos de 10 à 18.



Átomos de 19 à 27.

Cada grupo ficará responsável em medir a vibração de 4 a 6 átomos da rede cristalina, dependendo da quantidade total de alunos de sua sala. Utilize os dados coletados de outros grupos e registre aqui os resultados das medições.



Os valores das amplitudes encontradas pelos alunos dependem da qualidade da construção do simulador e dos vibrômetros. Além disso, os resultados dependem também da correta utilização dos vibrômetros. Espera-se, contudo, que a amplitude de oscilação diminua naturalmente com o aumento da distância entre os "átomos" e o "átomo motorizado" (esfera primária).

*\*Resposta dos grupos.*

Átomo	Amplitude de Oscilação (mm)
1	*
2	*
3	*
4	*
5	*
6	*
7	*
8	*
9	*

Átomo	Amplitude de Oscilação (mm)
10	*
11	*
12	*
13	*
14	*
15	*
16	*
17	*
18	*

Átomo	Amplitude de Oscilação (mm)
19	*
20	*
21	*
22	*
23	*
24	*
25	*
26	*
27	*

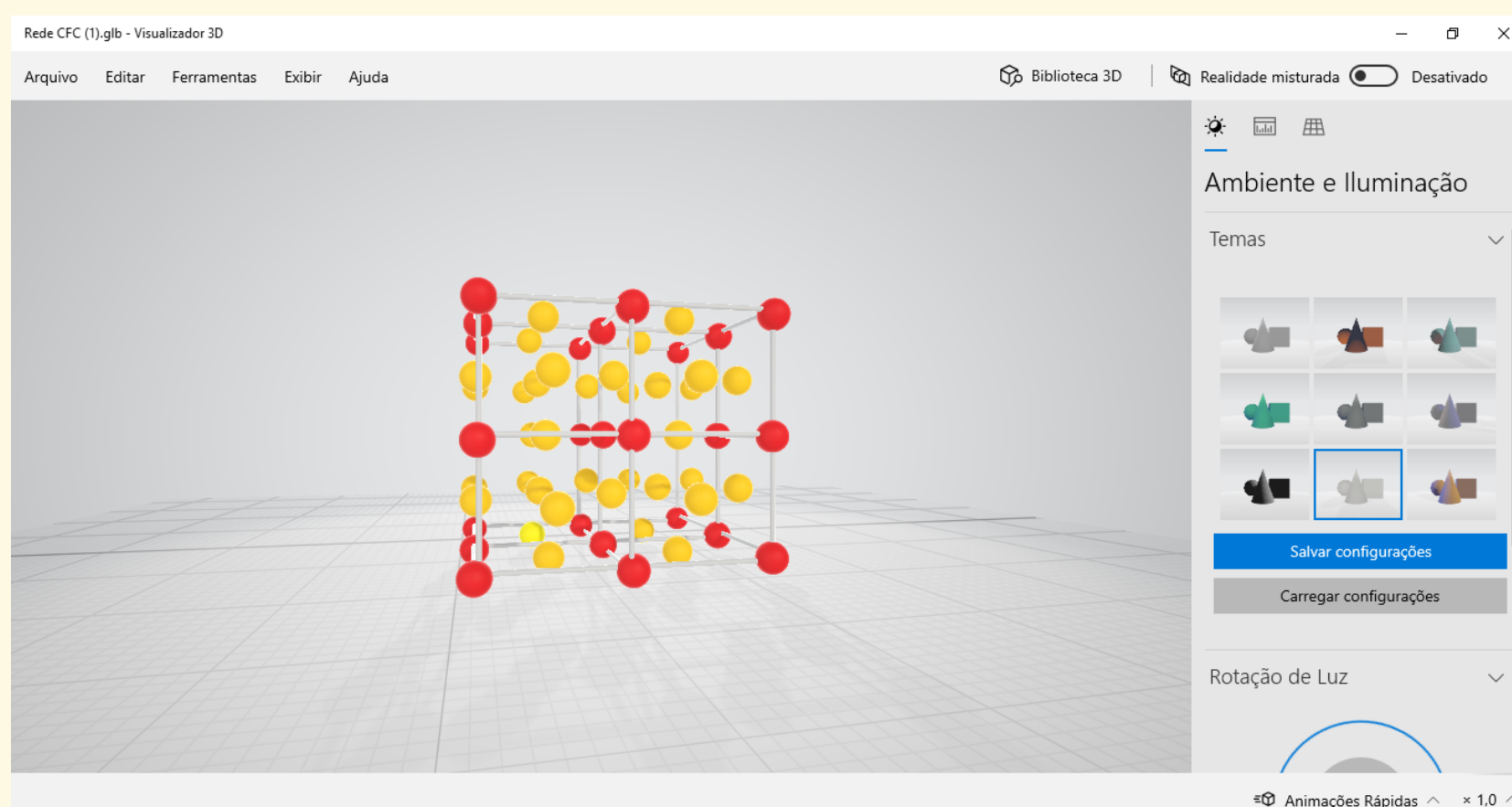
### Parte 2- Mapeando nossa rede cristalina.

Nesta parte de nossa análise, faremos um mapeamento tridimensional de nossa rede cristalina simulada. Para isso, acesse o site <https://fisicatermica.wixsite.com/simulador>, inscreva-se gratuitamente e selecione na página inicial "Baixe um Mapa 3D da Rede", ou acesse a rede diretamente em:



[https://drive.google.com/file/d/1vTRNOK9\\_AkDCMW8vDWn8MWBxjTbyN8pj/view](https://drive.google.com/file/d/1vTRNOK9_AkDCMW8vDWn8MWBxjTbyN8pj/view)

Neste link você baixará um modelo tridimensional da rede cristalina que estamos estudando (no formato *.gltf*). Esse arquivo pode ser aberto pelo software **Paint 3D**, que normalmente já vem instalado junto com o sistema operacional *Windows 10*. Acessando o arquivo a partir de um computador que possui o *Paint 3D* instalado, ao dar duplo clique sobre este arquivo baixado, você poderá visualizá-lo diretamente através do *Visualizador do Paint 3D* que abre automaticamente. A figura abaixo, mostra a interface do programa com o arquivo aberto:

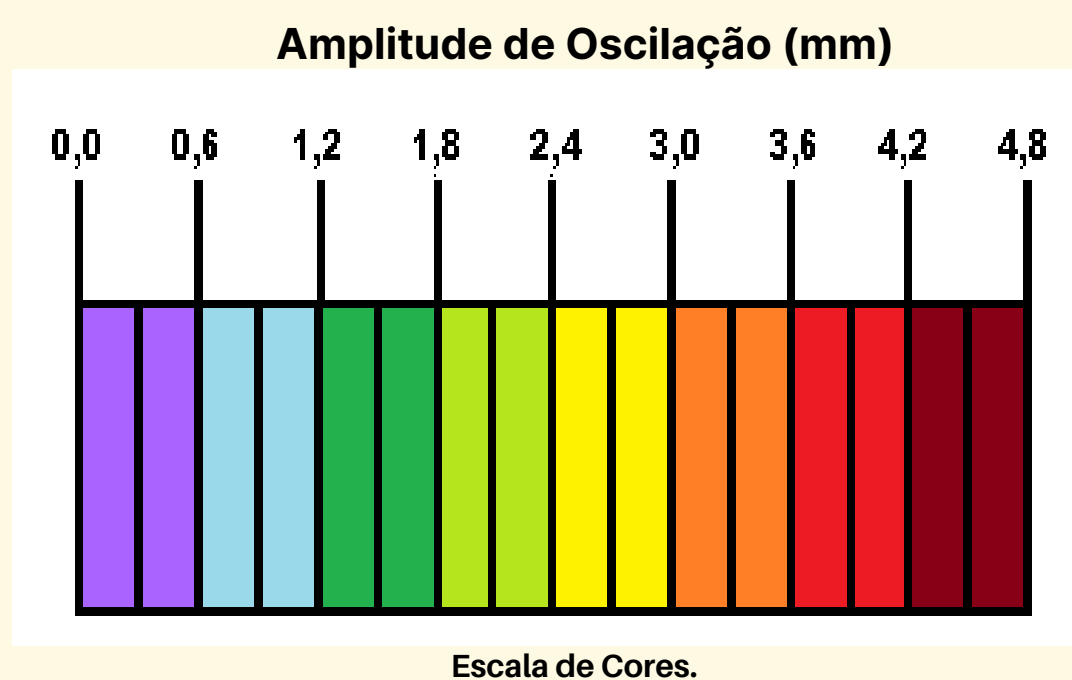


Interface do *Visualizador do Paint 3D* mostrando o modelo da rede cristalina que estamos estudando.

Após abrir o arquivo diretamente, selecione na aba superior esquerda "**Arquivo**". Clique em "**Abrir com o Paint 3D**". Pronto! Seu arquivo estará pronto para edição.

Com o mesmo grupo de colegas criado e a partir dos dados encontrados na Parte 1, sua missão é colorir o modelo 3D da rede cristalina de acordo com a intensidade de vibração de cada átomo medido. Vamos fazer um Mapa 3D da rede!

Para cumprir a tarefa acima, utilizaremos uma **escala de cores** que representará a intensidade da vibração dos átomos. Essa referida escala segue representada abaixo e foi construída utilizando a escala de cores do próprio Paint 3D. Assim, fica mais fácil para você representar os valores **pintando as esferas** do modelo 3D da rede de acordo com os valores medidos na Parte 1! Abaixo segue a mesma escala de cores utilizada no vibrômetro, pinte de acordo com os valores obtidos:

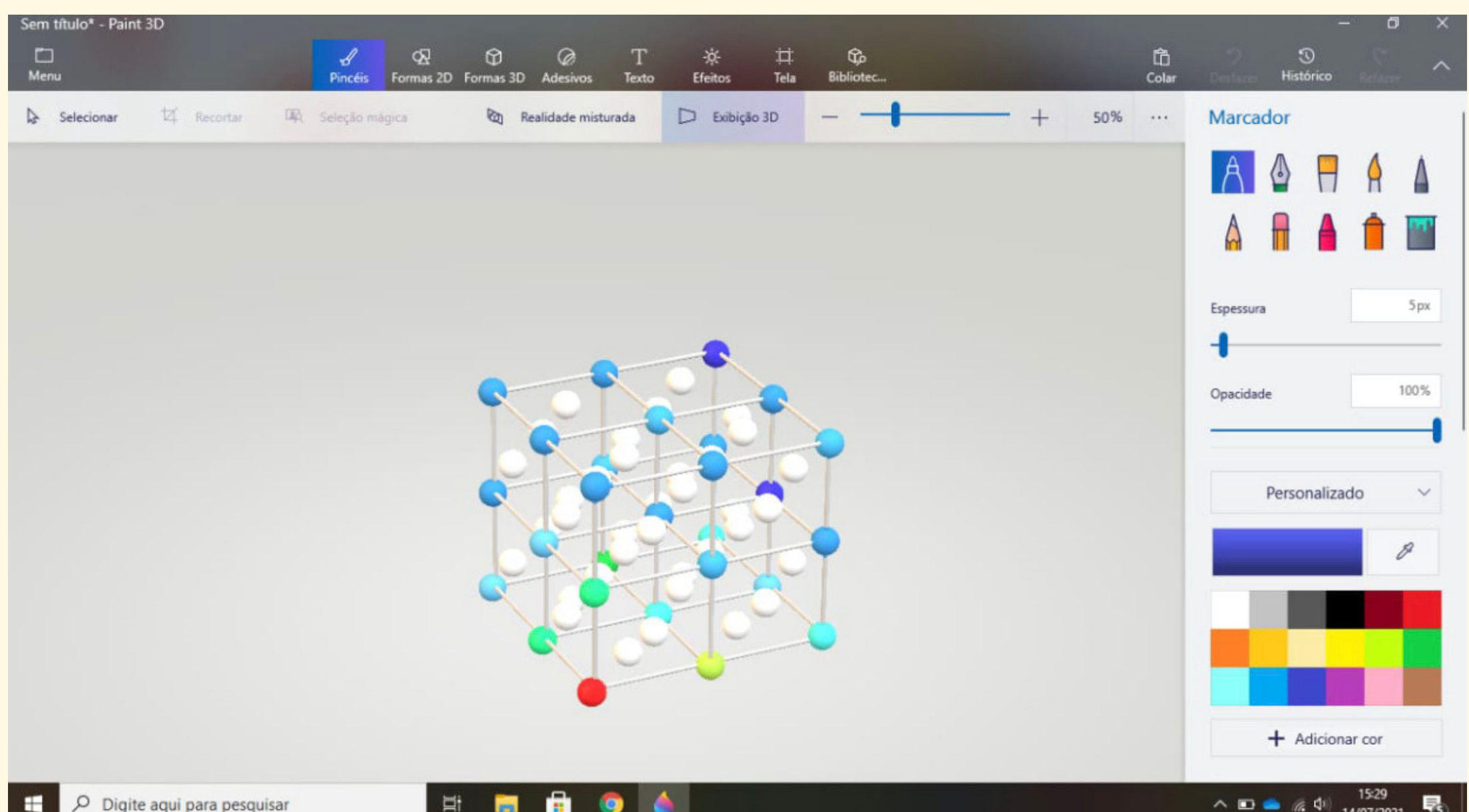


**Importante!** Pinte de branco os "átomos" que não foram medidos, ou seja, aqueles que estão "centrados nas faces" das células cristalinas cúbicas.

**Salve o mapa pronto de seu grupo** e o encaminhe ao seu professor para avaliação. Este mapeamento da rede auxiliará vocês a fazerem a Parte 3.



Abaixo segue um exemplo do mapa 3D proposto com os resultados encontrados com um simulador e vibrômetro construídos de acordo com os manuais descritos. Note que a esfera primária (em vermelho) é que possui a maior amplitude de oscilação dentre todas as esferas. Também é possível perceber que as esferas mais distantes (em azul escuro) são as que menos vibram, de acordo com a escala de cores.



### Parte 3- Criando um modelo matemático com nossos resultados.

Nesta última parte, você e seus colegas do grupo deverão expressar suas conclusões através de uma expressão matemática que descreva a **intensidade da oscilação dos átomos representados** na rede cristalina em função da **distância** que estes átomos estão do "átomo motorizado". Lembrem-se que apenas uma única esfera é motorizada em nosso simulador. Utilizem apenas as oscilações medidas dos átomos presentes na diagonal principal do cubo que passa pelo "átomo motorizado", ou seja, os átomos **1, 14 e 27**.

Reflitam em grupo: **i** **O professor pode realizar essa reflexão por meio de um questionário oral.**

- Existe relação entre os resultados experimentais da Parte 1 com a posição dos átomos representados evidenciados na Parte 2?

- Que relação é essa? **i** **Os alunos perceberão facilmente que a amplitude das vibrações tendem a diminuir com o aumento da distância dos átomos que estão sendo medidos em relação ao átomo motorizado.**

A tarefa de seu grupo é estabelecer uma **expressão matemática** que relacione a intensidade **I** da amplitude de oscilação dos átomos representados (em mm) e a distância **d** (em mm) de cada átomo representado em relação ao átomo motorizado.



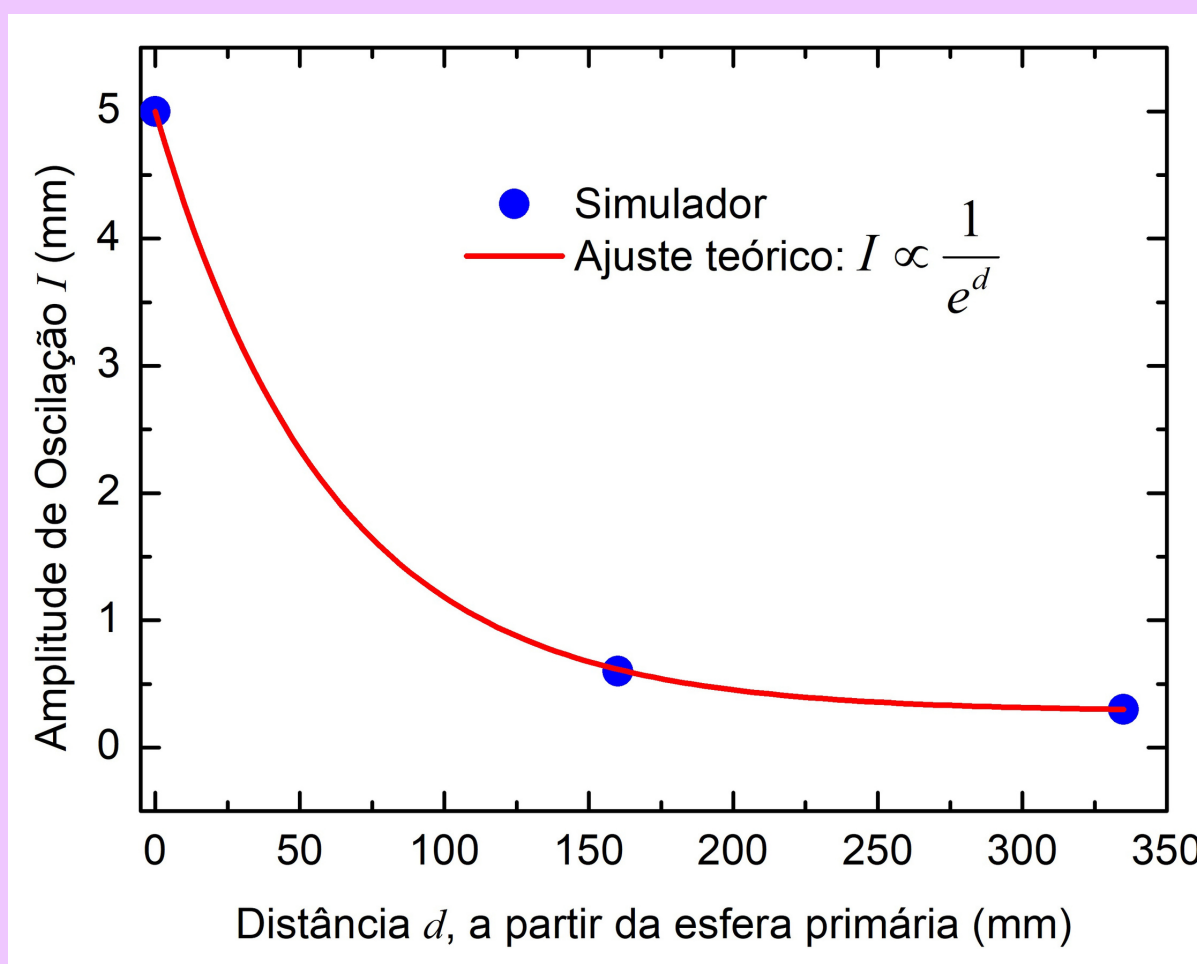
Dicas e procedimentos (peça ajuda ao professor):

- Usem o modelo 3D da rede pintada da Parte 2 para perceber visualmente alguma relação de intensidades de oscilação.
- Com uma régua e com a ajuda de seu professor, meça a distância entre cada átomo representado medido e o átomo motorizado.
- Com o auxílio do software *Excel* da *Microsoft*, insira os dados da intensidade de oscilação **I** e das respectivas distâncias **d** para cada átomo medido. Plote o gráfico de **I x d** e obtenha a expressão matemática solicitada!

Escreva aqui a expressão encontrada por seu grupo. O professor solicitará que a apresente aos demais grupos para uma discussão final.



**O gráfico e a equação de ajuste obtidas dependem das medidas encontradas. O gráfico deve evidenciar que a intensidade de oscilação é inversamente proporcional à distância entre cada "átomo" e o "átomo motorizado". Abaixo é mostrado o exemplo de um gráfico elaborado a partir dos resultados obtidos com o simulador construído:**



A função utilizada para o ajuste da curva obtida foi uma exponencial decrescente, ou seja,

$$I = Ae^{-(Bd)} + C$$

em que **A**, **B** e **C** são constantes utilizadas para ajustar a curva aos pontos experimentais. Este resultado evidencia claramente que o aumento da distância **d** entre cada átomo e o átomo motorizado faz com que a amplitude **I** de oscilação das esferas diminua significativamente, de maneira exponencial na montagem utilizada. Vale ressaltar que o comportamento indicado pelo gráfico é para o sistema mecânico construído, embora apresente similaridade com a curva do resfriamento de Newton.



Leia a seguinte seção de curiosidade para enriquecer sua aula! Faça uma breve comparação, por meio de uma conversa com os alunos, entre o trabalho realizado com o simulador e a Dinâmica Computacional.

Caderno do Aluno

Página 16

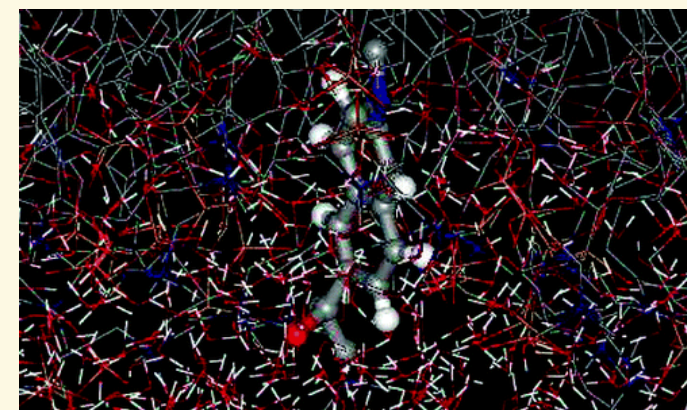


## Curiosidade

### Dinâmica Molecular

Existe uma ferramenta computacional poderosa chamada Dinâmica Molecular (DM). Ela é usada para descrever o comportamento de átomos e moléculas, desde que se saiba os potenciais de interação entre essas partículas e as equações que regem seus movimentos. A DM possui aplicações muito importantes, entre elas o estudo de fármacos para o tratamento de doenças.

*Elaborado pelo Autor.*



Simulação computacional de moléculas.

Fonte: Inst. de Física / USP.

## Atividade 6: Avaliação Final

Esta última atividade será o **fechamento desta UEPS**. Trata-se de uma avaliação final que servirá para verificar como os alunos assimilaram os conceitos trabalhados nas atividades. Peça aos alunos para recortarem na linha tracejada e entregar a avaliação para que seja corrigida. O tempo sugerido para esta atividade é de **2 aulas de 50 minutos cada**.

Esta avaliação também pode ser baixada livremente em PDF para impressão através do link: [https://0bc550fa-d7ec-4586-95fc-10139adb14c1.filesusr.com/ugd/7d796d\\_1da08b4bdf8a45d7b5b75b1b92e54ee0.pdf](https://0bc550fa-d7ec-4586-95fc-10139adb14c1.filesusr.com/ugd/7d796d_1da08b4bdf8a45d7b5b75b1b92e54ee0.pdf)

Página 17- Caderno do Aluno

Escola:

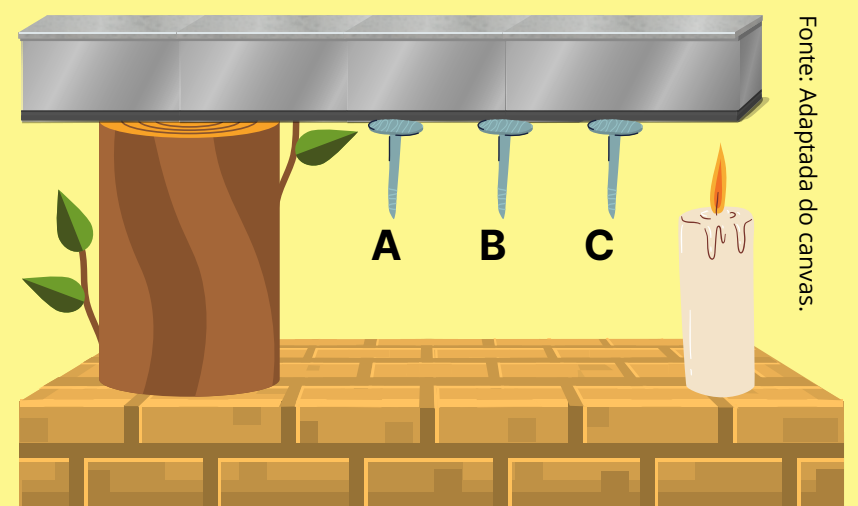
Série:

Nome:

Turma:

### Avaliação Final

**Questão 1-** Três pregos, A, B e C, são fixados por meio de parafina de vela a uma haste metálica que está apoiada sobre um tronco. A haste é aquecida por uma das extremidades através da chama de uma vela, conforme a figura ao lado.



Fonte: Adaptada do canvas.

Qual será a ordem da queda dos pregos? Explique microscopicamente porque isso acontece e dê o nome desse tipo de transferência de energia térmica.



A ordem da queda dos pregos será: C, B e A. Os alunos devem explicar o fenômeno da condução térmica a partir do comportamento microscópico dos sólidos. Em analogia, no simulador os alunos puderam perceber que os átomos mais próximos ao "átomo motorizado" possuíam maior agitação, indicando que a temperatura era maior nessa região do que nas regiões mais distantes.

No caso deste problema, a extremidade da haste junto à chama da vela se aquece primeiro, logo os átomos desta extremidade se agitam mais que os demais átomos que constituem a haste. O movimento destes átomos mais agitados é transferido aos átomos vizinhos por meio de interações, assim como ocorreu nas esferas do simulador. Neste caso, as interações foram intermediadas pelos elásticos. Desta forma, a energia térmica vai se propagando ao longo da haste que vai se aquecendo gradualmente. Quanto mais próxima da chama, mais os átomos estarão agitados e maior será a temperatura, o que explica o derretimento da parafina que sustenta os pregos e a consequente queda dos pregos na ordem indicada.

**Questão 2-** Analise a célula unitária do sólido ao lado.

Responda:

a) Qual é a rede de Bravais representada?



Cúbica de corpo centrado.

b) Quantos átomos compõem essa célula unitária?



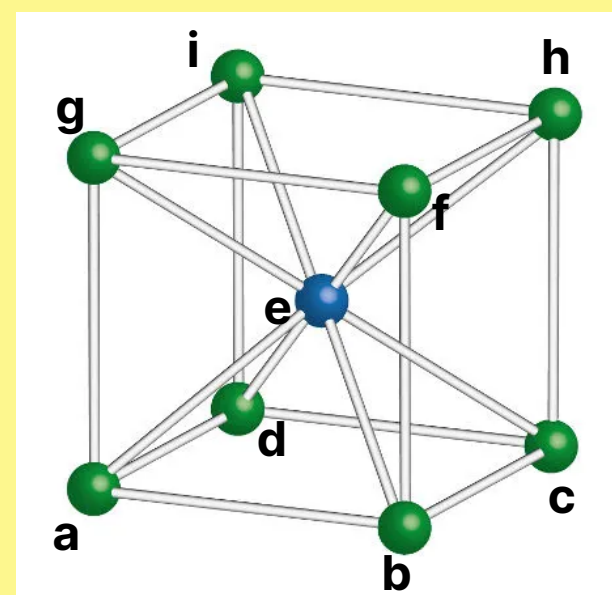
$8 \times 1/8 + 1 = 2$  átomos.

c) Qual(is) é(são) o(s) átomo(s) mais próximo(s) do átomo "a"? Qual é o átomo mais distante?



A diagonal de um cubo de aresta  $r$  é dada por  $r\sqrt{3}$ . Pode-se perceber visualmente que o átomo mais distante do átomo "a" é o que está na extremidade oposta desta diagonal, isto é, o átomo "h".

Já o átomo mais próximo é o "e", pois está no ponto médio da diagonal do cubo. Sua distância é, portanto, igual a  $(r\sqrt{3})/2$ . Note que essa distância é aproximadamente  $0,87 r$ , o que torna o átomo "e" 13% mais próximo do átomo "a" que os átomos "b", "d" e "g" que estão nos vértices do cubo.



Fonte: Manual da Química.

Folha 1

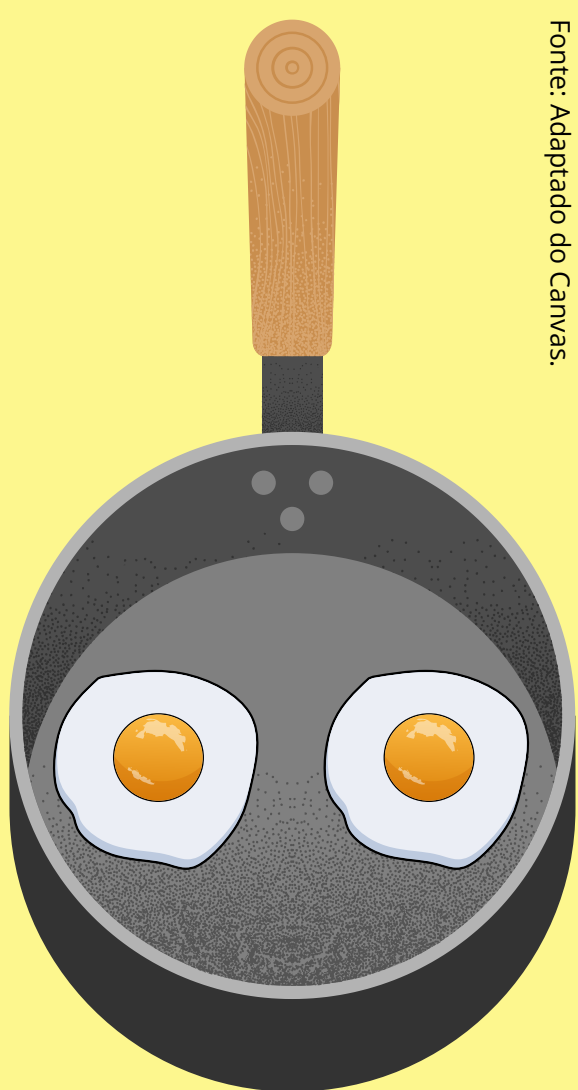
## Atividade 6: Avaliação Final

Esta avaliação também pode ser baixada livremente em PDF para impressão através do link: [https://0bc550fa-d7ec-4586-95fc-10139adb14c1.filesusr.com/ugd/7d796d\\_1da08b4bdf8a45d7b5b75b1b92e54ee0.pdf](https://0bc550fa-d7ec-4586-95fc-10139adb14c1.filesusr.com/ugd/7d796d_1da08b4bdf8a45d7b5b75b1b92e54ee0.pdf)

### Página 18- Caderno do Aluno

**Questão 3-** Se os átomos, mesmo em um sólido cristalino, estão em constante movimento térmico, como é possível eles ainda serem capazes de formar estruturas cristalinas tão ordenadas?

**Apesar dos átomos dos sólidos cristalinos estarem em constante movimento, eles não transitam entre si, mas permanecem agitando-se no entorno de posições centrais de equilíbrio estável. Logo, as células cristalinas mantêm suas configurações ordenadas e o sólido cristalino conseqüentemente mantém sua estrutura organizada.**



Fonte: Adaptado do Canvas.

**Questão 4-** Dois ovos crus são postos ao mesmo tempo em lados opostos de uma frigideira, como mostrado na figura ao lado. A frigideira é levada ao fogo, de modo que a chama incida exatamente no centro inferior dela. Responda:

a) Levando em conta apenas a posição dos ovos, qual fritará primeiro?

**Ambos ovos fritarão ao mesmo tempo, pois estão em posições simétricas em relação à fonte de energia térmica (chama do fogão).**

b) Como o aumento da intensidade do movimento térmico se propaga pela frigideira neste caso?

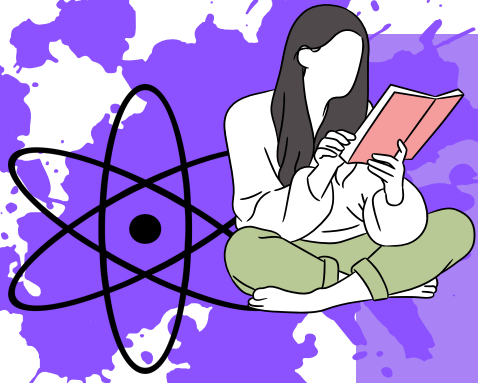
**Através da simulação, os estudantes puderam perceber que os átomos mais próximos ao átomo estimulado se agitavam mais que os demais. Além disso, a simulação permitiu ilustrar que o movimento oscilatório se propaga simetricamente em todas as direções. Analogamente, os alunos poderão indicar que os átomos do centro da panela, ao receberem energia térmica da chama, se agitam mais que os átomos das regiões periféricas. Assim, por meio das interações, a agitação atômica vai sendo transferida no sentido radial, provocando o aumento da temperatura gradual do centro para as bordas da frigideira.**

c) Tanto a parte metálica da frigideira, quanto o cabo de madeira são sólidos. Entretanto, se após certo tempo no fogo, você tocar na parte metálica, poderá se queimar, o que não ocorrerá se tocar no cabo. Por que isso ocorre?

**Porque a madeira do cabo não conduz tão bem a energia através de calor quanto a parte metálica da panela. Os alunos devem associar suas respostas à diferença de condutividade térmica entre os materiais envolvidos (madeira e metal). No simulador essa diferença pode ser observada se considerarmos elásticos mais flexíveis para o caso de um material que seja isolante térmico e elásticos menos flexíveis para simular materiais que sejam bom condutores térmicos.**

**Questão 5)** "Quando um cristal extenso é aquecido em uma extremidade, a energia térmica se transmite instantaneamente a todos os átomos de toda a rede cristalina, independente da distância da porção diretamente aquecida." Esta afirmação está correta? Explique!

**A afirmação não está correta. Por meio da simulação no modo "pulso", é desejado que os estudantes percebam que o movimento é transmitido de átomo para átomo individualmente, requerendo um intervalo de tempo para que a energia seja transmitida para os átomos mais distantes. Também por meio de analogia e associação, é desejável que os alunos compreendam que o aquecimento do cristal deverá ser gradual, já que a energia térmica é transferida via interações entre os átomos do sólido (condução térmica). Portanto, através do aquecimento de apenas uma extremidade, tal processo nunca será instantâneo, uma vez que a propagação da energia térmica na rede cristalina tem velocidade limitada e, portanto, necessita de tempo para ocorrer.**



## Referências: Leitura para o aluno!

HEWITT, P. G. **Física conceitual**. 9ª ed. Porto Alegre: Bookman, 2002.

INOVAÇÃO TECNOLÓGICA. **Calor se propaga em ondas no grafeno**. Disponível em :<https://www.inovacaotecnologica.com.br/noticias/noticia.php?artigo=calor-propaga-se-ondas-grafeno&id=010165150318#.YlpgCLVKjIU>. Acesso em 15 de Abril de 2021.

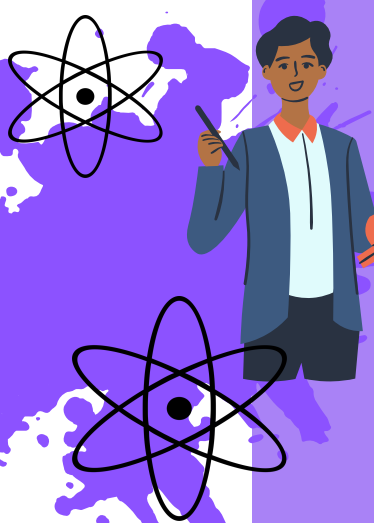
NAMBA, A. M., et. al. **Dinâmica Molecular: Teoria e Aplicações em desenvolvimento de fármacos**. Ecl. Quím., São Paulo, v. 33, n. 4, p. 13-24, 2008.

SGB-SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. **Cristais**. Disponível em: <http://www.cprm.gov.br/publique/CPRM-Divulga/Cristais-2715.html#:~:text=Os%20cristais%20s%C3%A3o%20poliedros%20convexos,de%20pelo%20menos%20dois%20cristais>. Acesso em 20 de Abril de 2021.

SOCIEDADE BRASILEIRA DE FÍSICA. **Estudo brasileiro revela que fônons também podem ter spin**. Disponível em: <http://www.sbfisica.org.br/v1/home/index.php/pt/destaque-em-fisica/684-estudo-brasileiro-revela-que-fonons-tambem-podem-ter-spin>. Acesso em 15 de Abril de 2021.

TEIXEIRA, M. M. **Condução Térmica**. Disponível em: <https://mundoeducacao.uol.com.br/fisica/conducao-termica-1.htm>. Acesso em 20 de Abril de 2021.

WIKIVIDROS. **Introdução ao vidro e sua produção**. Disponível em: [https://wikividros.eesc.usp.br/introducao\\_ao\\_vidro\\_e\\_sua\\_producao/elaboracao](https://wikividros.eesc.usp.br/introducao_ao_vidro_e_sua_producao/elaboracao). Acesso em 20 de Abril de 2021.



## Referências: Leitura para o Professor!

AMARAL, L.Q. do. **Entre Sólidos e Líquidos: uma Visão Contemporânea e Multidisciplinar**. São Paulo: Livraria da Física, 2014.

KITTEL, C. **Introduction to Solid State Physics**. John Wiley & Sons, 2004.

LUZ, A. B.; LINS, F. A. F. **Rochas e minerais Industriais: usos e especificações**. 2ª edição. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2008.

NUSSENZVEIG, M. **Curso de Física Básica 2: Fluidos, Oscilações e Ondas, Calor**. 4ª ed. Editora Edgard Blücher, 2002.

NYE, J. F. **Physical Properties of Crystals: Their Representation by Tensors and Matrices**. Oxford University Press, 1985.

YOUNG, H. D., FREEDMAN, R. A. **Física II: Termodinâmica e Ondas**. 14ª edição. São Paulo: Pearson, 2015.

ZACHARIASEN, W. H. **The atomic arrangement in glass**. *Journal of the American Chemical Society*, v.54, p. 3841 – 3851, 1932.





Movimento Térmico

em

Redes Cristalinas

Conceitos, Atividades &  
Simulação Experimental

**Caderno do Aluno**

**Escola:**

**Nome:**

Wesley Boracchi | James Souza

Física - Ensino Médio

Movimento Térmico

em

Redes Cristalinas

Conceitos, Atividades &  
Simulação Experimental

**Caderno do Aluno**

1ª Edição

Sorocaba - SP

Edição do Autor

2021

Este material foi concebido para subsidiar atividades da disciplina de Física para o Ensino Médio e pode ser reproduzido livremente, incluindo as imagens autorais, desde que devidamente citadas as fontes.

Este documento é veiculado gratuitamente, sem fins lucrativos ou comerciais para os autores, objetivando somente a divulgação de práticas para o enriquecimento e diversificação do ensino da Física escolar.

## *Apresentação*

Caro estudante, bem-vindo(a) ao maravilhoso mundo dos cristais e do movimento térmico! Este breve material foi desenvolvido para introduzi-lo ao estudo da estrutura microscópica dos sólidos cristalinos e da propagação da energia térmica nesses meios. Desejamos que este material auxilie em seus estudos sobre Termodinâmica e torne suas aulas de Física mais cativantes e enriquecedoras.

Este caderno de atividades trata-se do produto educacional desenvolvido sob orientação do Prof. Dr. James Alves de Souza para o Mestrado Profissional em Ensino de Física, realizado na Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), campus de Sorocaba. Esse programa de mestrado é mantido pela Sociedade Brasileira de Física (SBF) e tem abrangência nacional. Aproveite ao máximo este material e solicite ajuda ao seu professor sempre que achar necessário.

Você descobrirá que os sólidos cristalinos estão muito presentes ao seu redor e que formam desde lindas joias, até as rochas das mais altas montanhas, incluindo a areia da praia em que caminhamos em um belo dia de verão.

A simulação experimental proposta neste material te permitirá entender a maneira que a energia térmica se espalha por uma rede atômica de um sólido e te ajudará a compreender acerca da impossibilidade de reversão de certos processos energéticos dissipativos. Assim você entenderá como a energia útil se esvai, como uma dança atômica frenética, para não mais se concentrar espontaneamente no sistema físico analisado.

Encare um cristal como uma "molécula gigante" e veja os segredos microscópicos da natureza se revelarem a você. Estamos a bordo da Física Térmica, sente-se na janela e aproveite a viagem. Bons estudos!

Prof. Wesley Boracchi,  
O Autor

# Sumário

<b>Atividade 1: Para começar a pensar</b>	<b>1</b>
<b>Atividade 2: Calor, temperatura e estrutura de sólidos</b>	<b>2</b>
<b>Atividade 3: Redes cristalinas</b>	<b>6</b>
<b>Atividade 4: Experimento: Movimento térmico em redes cristalinas</b>	<b>8</b>
<b>Atividade 5: Construindo um Modelo Explicativo</b>	<b>12</b>
<b>Atividade 6: Avaliação Final</b>	<b>17</b>
<b>Referências</b>	<b>19</b>

## Atividade 1: Para começar a pensar

O calor está presente em praticamente todos os fenômenos naturais. A compreensão acerca da energia térmica e seu emprego trouxe uma verdadeira revolução para a sociedade humana. Mais que isso, os processos térmicos estão presentes nos seres vivos. Calor traz vida. Não obstante, a compreensão da estrutura da matéria também permitiu ao homem conhecer um pouco mais a natureza, e a partir daí, conceber materiais cada vez mais sofisticados, culminando em diversos avanços tecnológicos. Nesta aula, você explorará o conhecimento que já possui sobre o tema.



Fonte: Canvas.

Uma fogueira é uma fonte de energia térmica.

### Atividade

Para iniciar nosso estudo acerca do calor, vamos expor o que já sabemos sobre o assunto? Para isso, construa no espaço abaixo um **Mapa Conceitual** sobre *Calor e Estrutura da Matéria*. Para entender o que é um mapa conceitual, assista ao vídeo de 6 minutos e 17 segundos do *Youtube*, indicado a seguir:

COLLAR, L. Aprenda mais sobre os mapas conceituais. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=mhQIAv8Av1s>. Acesso em: 17/05/2021.

. Use as **questões norteadoras** abaixo para lhe ajudar a construir seu mapa (ele deve contemplar os assuntos elencados).

- O que você entende por calor ?
- Do que são feitos os corpos à sua volta ?
- Você acha que as partículas que formam os corpos possuem alguma forma de organização? Você acha que elas estão paradas?

# Atividade 2: Calor, Temperatura e Estrutura de Sólidos

O calor é um processo natural que está fortemente presente em várias situações à nossa volta. Seja no aquecimento provocado pelo Sol, no esfriamento de uma xícara de café ou na escolha de um casaco apropriado em um dia frio. A energia térmica está intimamente relacionada com alguns comportamentos internos da matéria, sobretudo àqueles relacionados à sua propagação nos materiais. Nesta aula, você refletirá sobre algumas dessas situações e também sobre o comportamento térmico dos sólidos.



Fonte: Canvas.

O derretimento do gelo está intimamente relacionado com o calor.

## Problemas

Para pensar, com **base em seus conhecimentos**, responda as seguintes questões propostas:

**Questão 1:** Se você estivesse em uma praça, durante um dia ensolarado de Verão e avistasse dois bancos, um de ferro e outro de madeira, em qual deles você escolheria para sentar-se? Por quê?

Resposta: .....

.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....



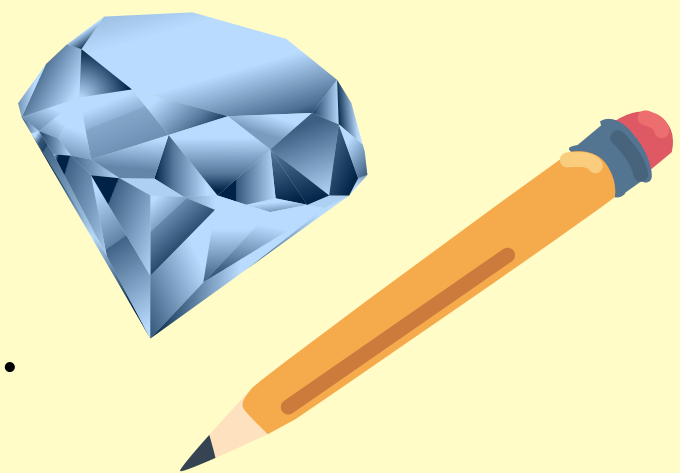
Fonte: O Autor (elaborado no canvas).

Praça no verão.

**Questão 2:** O diamante e o grafite são feitos exclusivamente de átomos de carbono e, apesar disso, possuem características macroscópicas muito diferentes, como cor, dureza e densidade. Se ambos materiais são formados exatamente pelos mesmos átomos, como você explicaria essas diferenças? Registre suas ideias como resposta!

Resposta: .....

.....  
.....  
.....  
.....  
.....  
.....



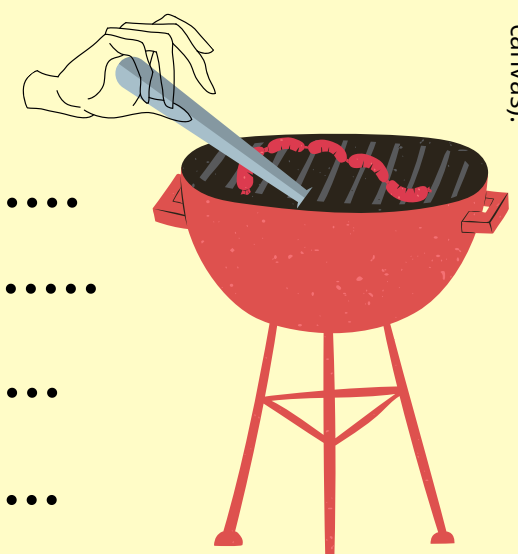
Fonte: Canvas.

O diamante e o grafite de um lápis de escrever são feitos apenas de carbono.

**Questão 3:** Durante um churrasco, não é muito aconselhável manipular a brasa por longo tempo com um objeto inteiramente metálico. Imagine que você ignore essa recomendação e introduza a extremidade de um objeto metálico na brasa enquanto segura a outra extremidade com uma das mãos e aguarda por alguns minutos. Se sua mão não entra em contato direto com a brasa, por que, mesmo assim, é possível queimá-la? Como a energia térmica foi transmitida até a sua mão?

Resposta: .....

.....  
.....  
.....  
.....  
.....



Fonte: O Autor (elaborado no canvas).

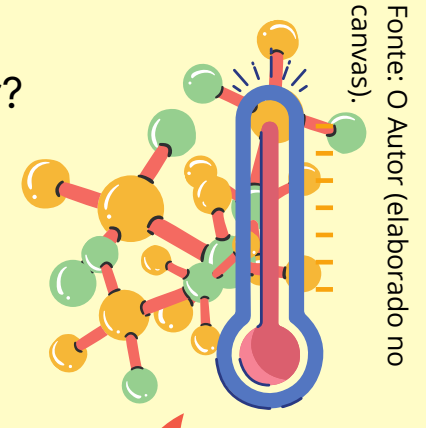
Churrasco.



**Questão 4:** Analise a seguinte afirmação cientificamente verdadeira: "À medida que aquecemos um corpo, suas partículas constituintes se movimentam com velocidades cada vez maiores". A partir dessa informação, e por meio da reflexão, responda:

**a)** Você acha que existe relação entre a temperatura de um corpo e o movimento molecular?

Resposta: .....  
.....  
.....  
.....



Fonte: O Autor (elaborado no canvas).



**b)** Você acha que existe algum limite inferior para a intensidade da agitação molecular? E para a temperatura?

Resposta: .....  
.....  
.....  
.....

Quando um corpo se aquece suas moléculas se agitam mais.

**Questão 5:** Em um dia de verão, Maria escreve em uma mensagem "estou com calor!" e a envia a você. Curioso, você pede para ela explicar melhor o que está acontecendo. Ela então lhe responde: "Minha casa tem muito calor, por isso está muito quente". Você acha que a forma que Maria utiliza a palavra *calor* está correta? Para você, calor e temperatura são a mesma coisa?

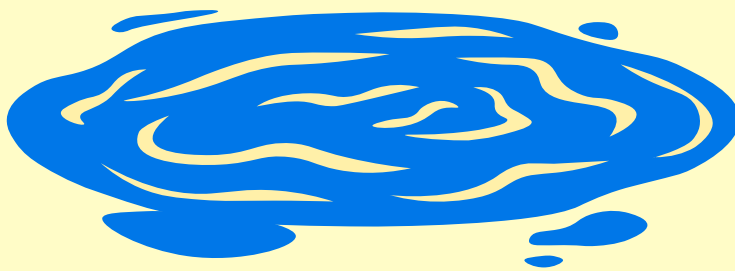
Resposta: .....  
.....  
.....  
.....



Fonte: Canvas.

Maria está correta?

**Questão 6:** Observando um cubo de gelo e uma pequena poça d'água, em qual destes corpos você considera haver maior organização molecular? Por quê?



Fonte: Canvas.

Um cubo de gelo e uma poça d'água: em qual desses corpos as partículas estão mais organizadas?

Resposta: .....  
.....  
.....  
.....  
.....

Agora, vamos investigar esses assuntos com um pouco mais de detalhe. Nesta segunda parte da aula, você começará a entender microscopicamente o que diferencia um estado físico de outro, a diferença interna dos sólidos e a diferença entre bons e maus condutores térmicos. Assista ao vídeo indicado e leia os textos 1 e 2, abaixo:

## Vídeos

Assista ao vídeo indicado do Youtube:



- "**Conceito de Calor- Física Térmica.**" [https://www.youtube.com/watch?v=h4lpkl\\_qmJA](https://www.youtube.com/watch?v=h4lpkl_qmJA). Vídeo do Canal Wesley Boracchi. **Duração:** 12 min. e 46 seg.

## Texto 1

### Os Estados Físicos da Matéria

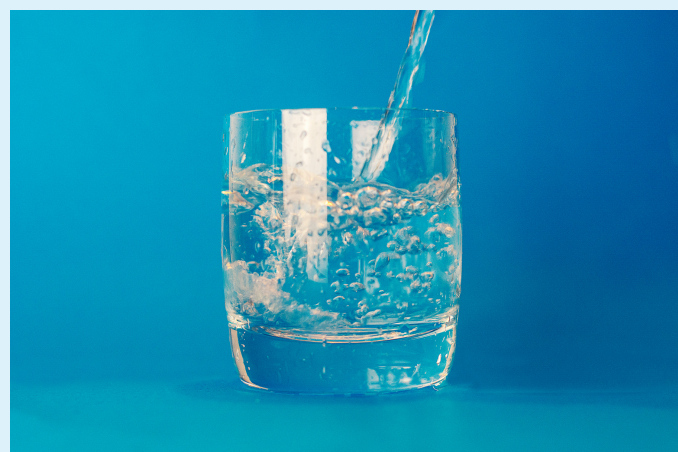
A matéria pode se apresentar, basicamente, em **três estados físicos** diferentes. Estes estados refletem o estado de agregação das partículas (moléculas, átomos ou íons) de um corpo, isto é, o quanto essas partículas estão próximas, ou afastadas umas das outras. As partículas que constituem os corpos possuem energia cinética e, portanto, se movimentam constantemente (YOUNG & FREEDMAN, 2015). A ação combinada do movimento das partículas é denominada de **movimento térmico**. Assim, quanto maior a intensidade da agitação molecular, mais espaço cada partícula necessita para realizar seu movimento, o que causa uma maior separação entre elas. A grandeza associada diretamente à agitação molecular é a **temperatura** (HEWITT, 2002). Deste modo, quanto mais agitadas estiverem as partículas de um corpo, maior será sua temperatura.

O estado de menor agitação molecular, e conseqüente maior agregação das partículas, é o estado **sólido**. Neste estado, as moléculas de um corpo estão se movimentando em todas as direções, mas no entorno de posições fixas (AMARAL, 2014). Isto permite que as partículas ocupem uma posição média definida, o que confere aos corpos neste estado, um formato fixo e bem definido também. Um bom exemplo é o gelo. As moléculas de água se agitam em torno de posições fixas o que permite ao gelo possuir uma estrutura molecular organizada. É por isso que o gelo possui um formato rígido e definido antes de derreter.



Fonte: Canvas.

O gelo possui um formato definido: é um sólido.



Fonte: Canvas.

A água, assim como todos os líquidos, assume o formato do recipiente que a contém.

Ao aumentar a agitação molecular, isto é, a temperatura, as moléculas se afastam mais umas das outras, até chegar ao ponto em que as moléculas passam a se mover mais livremente. Macroscopicamente, essa maior separação causa a fusão do corpo e obtemos o estado **líquido** do sistema. Neste estado, as moléculas estão mais desagregadas e deixam de se movimentar em torno de posições definidas, mas ainda permanecem ligadas às suas vizinhas (AMARAL, 2014). A água líquida é um exemplo clássico. Suas moléculas possuem certa liberdade de movimento e ao mesmo tempo estão unidas umas às outras. Este fato permite à água, e a todos os líquidos, a capacidade de fluir e não assumir um formato próprio definido.

Fornecendo mais energia ao sistema, conseqüentemente, aumentamos mais ainda a agitação molecular. As moléculas que estavam no estado líquido se afastam ainda mais entre si, e passam a se mover praticamente de forma livre. Essa transição de estado é chamada vaporização e após ela, obtemos o estado **gasoso**. Os gases são formados por moléculas que possuem grande energia cinética (NUSSENZVEIG, 2002). Exemplo disso é o vapor d'água. Outro exemplo interessante é o ar, que é uma mistura gasosa. Essa grande liberdade das partículas de um gás permite a ele se espalhar por todo o recipiente que os contém, ocupando todo o volume disponível. É por isso que você nunca correrá o risco de sufocar-se em um cômodo aberto, pois o ar sempre vai ocupar todo o espaço disponível nele.



Fonte: Canvas.

Os gases possuem partículas livres e ocupam todo o volume dos recipientes que os encerram.

Elaborado pelo Autor.

## Texto 2

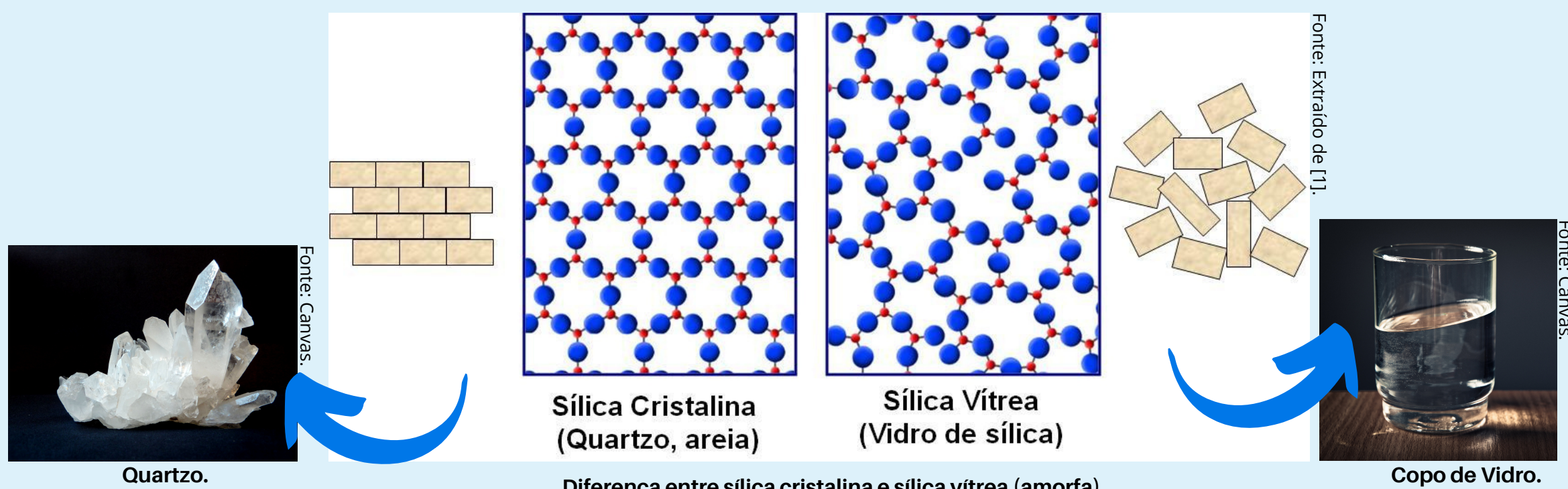
### O Quartzo e o Vidro

Provavelmente você já ouviu falar que o vidro é fabricado a partir da areia. O quartzo e a areia tem a mesma composição química, ambos são formados por sílica ( $\text{SiO}_2$ ) (ZACHARIASEN, 1932). A areia nada mais é que pequenos fragmentos de quartzo. Este, por sua vez, é um mineral muito abundante na crosta terrestre, formando diversas rochas, como o granito e o arenito (LUZ; LINS, 2008). Acontece que, embora visualmente muito parecidos, o vidro comum e o quartzo tem algumas propriedades diferentes. Uma delas é a dureza!

O quartzo é capaz de riscar o vidro, o que indica que sua dureza é superior. Mas, se ambos são feitos de sílica, por que são diferentes? A resposta envolve a estrutura interna destes materiais. Embora sejam feitos da mesma substância, a forma como os átomos estão organizados é diferente.

O quartzo possui uma estrutura interna organizada, isto é, seus átomos estão em posições ordenadas, formando um padrão repetitivo. Em outras palavras, o quartzo é um **cristal**. Aliás, todos os minerais são cristais! Essa estrutura organizada é chamada de **estrutura cristalina** (CALLISTER JR, 2000). No caso do quartzo, essa estrutura adquire esse padrão ordenado porque os átomos se combinam lentamente para formar a rede, isto é, a cristalização é lenta.

Já no caso do vidro, ocorre um rápido resfriamento, não permitindo que a estrutura atômica fique organizada. O que obtemos então é uma estrutura atômica irregular e sem um padrão repetitivo. Dizemos por isso que o vidro é um sólido **amorfo**. Veja nas figuras abaixo a diferença entre a sílica que forma o quartzo (sílica cristalina) e a que forma o vidro comum (sílica vítrea):



Diferença entre sílica cristalina e sílica vítrea (amorfa).

Como você já deve ter percebido a partir da figura acima, na sílica cristalina os "blocos" (átomos) que formam a rede estão organizados entre si, o que não ocorre na sílica vítrea.

Elaborado pelo Autor.

## Problemas

Reúnam-se em grupos de cinco colegas, baseando-se no vídeo indicado e, principalmente nos Textos 1 e 2, para resolver a seguinte **situação-problema**:

*"O quartzo na natureza pode formar espontaneamente belos cristais prismáticos com um formato próprio e específico. Entretanto, se derretida em um forno, a sílica que o constitui passa a assumir o formato do molde onde se resfria. Como pode a mesma substância assumir formatos tão diferentes?"*

Registre a resposta de seu grupo nas linhas indicadas abaixo. O professor irá organizar a aula para que cada grupo apresente a resposta elaborada para uma discussão geral com a turma.

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

## Curiosidade

### Os minerais

Os minerais são **sólidos cristalinos** formados em ambiente natural. Essas substâncias formam a crosta e terrestre e existem em uma enorme variedade. Os minerais mais abundantes da superfície da crosta terrestre são os do grupo do feldspato e o quartzo (SGB,2021).

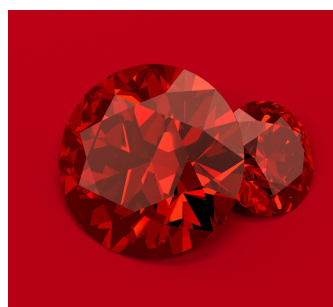
Existem minerais exóticos como o rutilo, e muito valiosos como o coríndon que em sua forma vermelha é chamado de rubi, e na forma azul é conhecido como safira. Neste caso, os minerais são chamados de gemas ou simplesmente de "pedras preciosas". Outros exemplos é o mineral berilo que forma a água-marinha e a valiosa esmeralda. Em contrapartida, há ainda aqueles que são muito perigosos por serem venenosos como a galena, ou radioativos, como a uraninita. Foi justamente com a variedade deste último mineral, chamada *pechblenda*, que a física e química Marie Curie (1867 - 1934), com ajuda de seu marido, descobriu os elementos radioativos rádio e polônio no início do século XX.

Elaborado pelo Autor.



Uraninita.

Fonte: Wikimedia Commons.



O valioso rubi lapidado.

Fonte: Canvas.



Galena.

Fonte: Wikimedia Commons.



Água-marinha com turmalina negra.

Fonte: Wikimedia Commons.

# Atividade 3: Redes Cristalinas

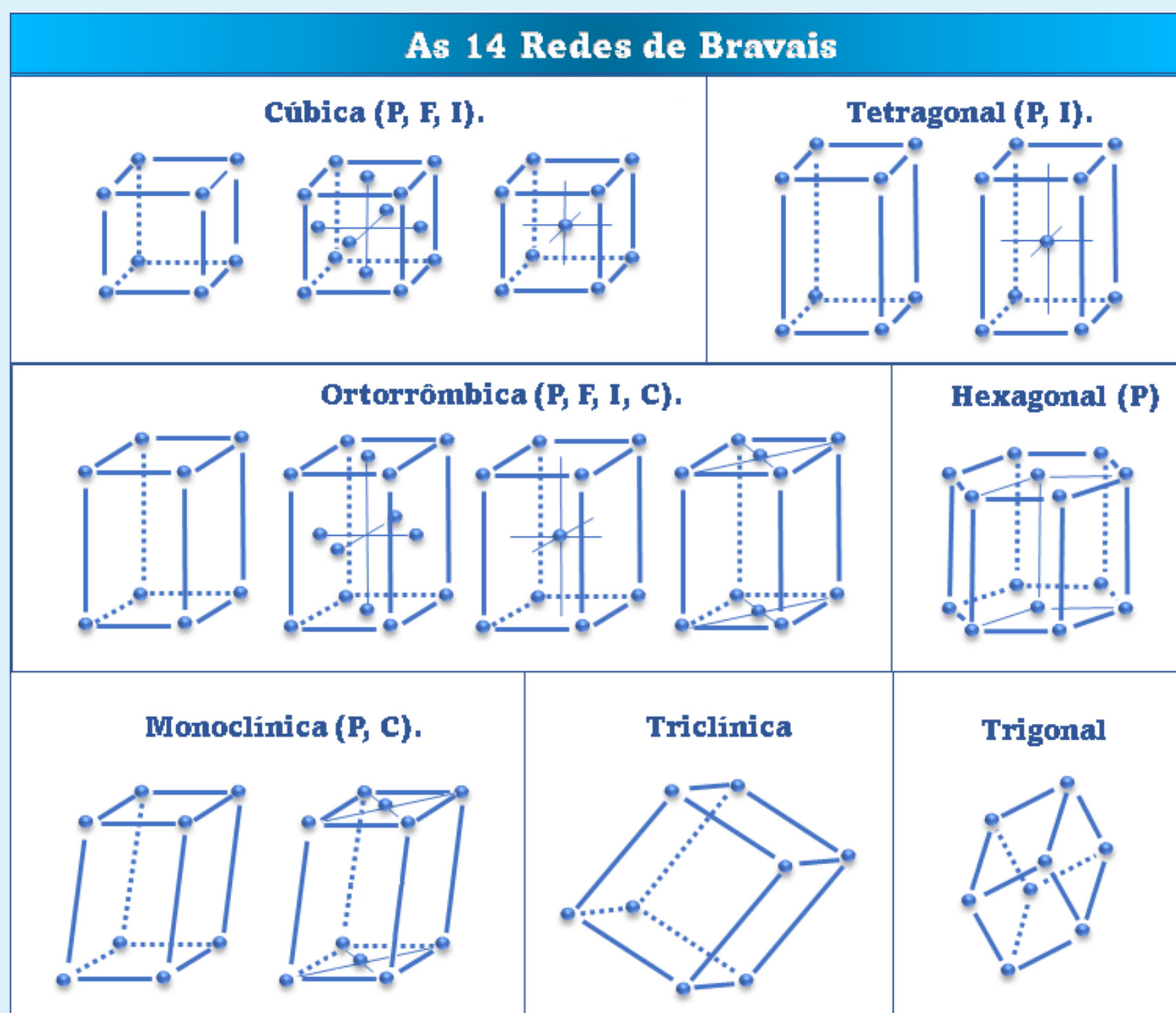
Agora que você já sabe que os sólidos podem se organizar microscopicamente através de uma estrutura cristalina, chegou a hora de conhecer um pouco mais sobre estas estruturas especiais. Leia atentamente o texto 1, abaixo:

## Texto 1

### Células Unitárias e Redes de Bravais

Os sólidos cristalinos tem a propriedade de possuir uma estrutura atômica interna organizada. Assim, cada átomo se liga aos seus vizinhos de modo a formar um padrão geométrico regular. Este padrão se repete inúmeras vezes, formando o que chamamos de **rede cristalina** (KITTEL, 1978).

As redes cristalinas formam o cristal como um todo, mas nada mais são que repetições de partes menores chamadas **células unitárias**. Denominamos **sistema cristalino** a maneira que essas células unitárias se arranjam no espaço, em relação aos seus comprimentos e aos ângulos formados entre as ligações dos átomos constituintes do sistema (KITTEL, 1978). Existem sete sistemas cristalinos possíveis: cúbico, tetragonal, ortorrômbico, hexagonal, trigonal, monoclinico e triclínico. Entretanto, devido às possíveis localizações das partículas nestes sistemas cristalinos, é possível obter novas configurações a partir dos mesmos. Assim, é possível obter 14 tipos de células unitárias diferentes, chamadas de **redes de Bravais** (KITTEL, 1978), em homenagem ao físico francês Auguste Bravais (1811 - 1863) que as propôs em 1850. Veja abaixo, todas as redes de Bravais:



Fonte: O Autor.

As catorze redes de Bravais em três dimensões.

Você deve ter reparado na figura acima, as denominações **P**, **I**, **F** e **C**. Essas letras representam a configuração de cada sistema cristalino. Se uma célula for simples, com átomos apenas em seus vértices, ela é chamada de **primitiva (P)** ou **simples**. Caso exista um átomo central em cada face da célula, ela é chamada de **"face centrada" (F)**. Existe ainda a rede de face centrada, mas que ocorre apenas nas faces ao longo do eixo vertical (na "base" e na "tampa" da célula cristalina), como no quarto exemplo da rede ortorrômbica e no segundo da rede monoclinica da figura anterior. Nestes casos, as redes são indicadas com a letra **C**. Por fim, existe a rede que abriga um átomo no ponto central de seu interior. Esta é chamada de **"corpo centrado"** e indicada com a letra **I** (KITTEL, 1978).

Agora fica muito mais fácil de entender cada rede! Por exemplo, o sistema cristalino cúbico abrange três redes de Bravais: a cúbica primitiva (P), a cúbica de face centrada (F) e a cúbica de corpo centrado (I).

As redes de Bravais descrevem todos os sólidos cristalinos conhecidos e são importantes para a descrição microscópica destes tipos de materiais. Um bom exemplo são os metais: todos os metais cristalizam-se quando se solidificam. Outro exemplo são os minerais (leia a seção *"Curiosidade"* da aula anterior e saiba mais!), estes são, por definição, sólidos cristalinos. O conhecimento da estrutura interna da matéria nos permite confeccionar materiais para aplicações cada vez mais avançadas. Mais que produzir materiais para aplicações importantes, o conhecimento da organização microscópica da matéria é fascinante. Este é o maravilhoso universo dos sólidos, estudado em um ramo da Física surgido a partir da década de 1940, a Física do Estado Sólido, que por sua vez é o principal ramo de outro maior, o da Física da Matéria Condensada!

Elaborado pelo Autor.

Após a leitura do Texto 1, faça as atividades propostas a seguir:

### Atividade

**Atividade 1:** Associe corretamente:

**Célula Unitária (A)**

**Sistema Cristalino (B)**

**Redes de Bravais (C)**

**Rede Cristalina (D)**

( )

Configurações básicas que resultam da combinação dos sistemas cristalinos com a posição das partículas em cada uma das células unitárias.

( )

Conjunto de um enorme número de células unitárias interligadas.

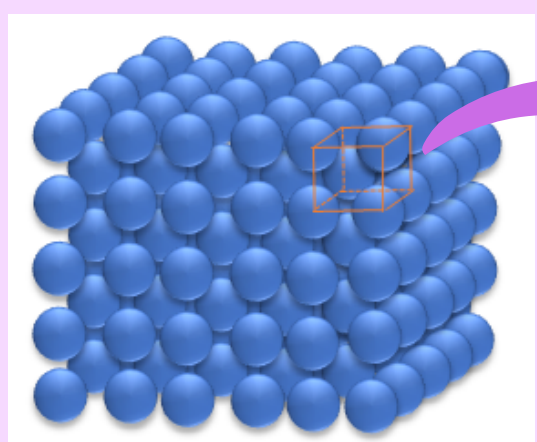
( )

Menor unidade que se repete e reproduz a rede cristalina.

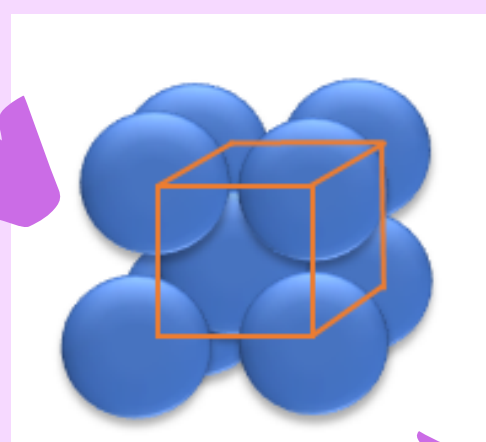
( )

Classificação que leva em conta os comprimentos e ângulos das células unitárias.

**Atividade 2:** Para sabermos a quantidade de átomos que compõem uma célula unitária, não basta simplesmente contá-los. Na verdade, a quantidade de átomos presentes na célula unitária é obtida somando-se os "pedaços" de átomos que foram "partidos" para isolar a célula. Para entender melhor, veja a figura abaixo:

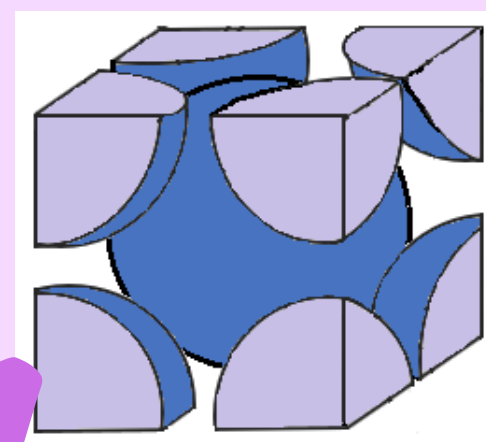


Identificando uma célula unitária na rede cristalina.



A célula unitária da rede.

Fonte: O Autor.



A quantidade de átomos que realmente compõem a célula unitária.

Fonte: O Autor.

Analise as figuras acima e responda:

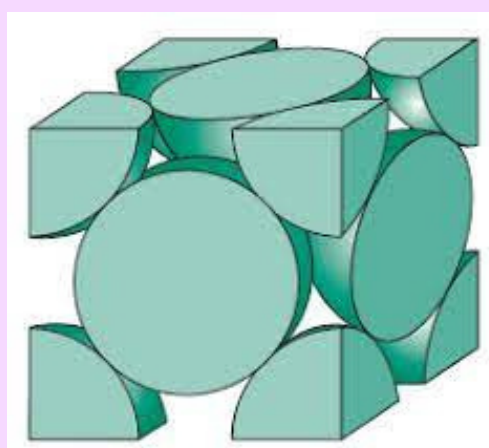
**a)** Qual é a rede de Bravais que está discriminada na figura?

.....

**b)** Quantos átomos compõem essa rede de Bravais? Por quê?

.....

**Atividade 3:** O argônio é o gás nobre mais abundante da Terra, compondo aproximadamente 1% do ar que respiramos. Este gás foi muito utilizado na fabricação de lâmpadas incandescentes e ainda possui várias aplicações, como em cirurgias dos olhos. Sob baixíssimas temperaturas, a partir de  $-198^{\circ}\text{C}$ , esse gás se solidifica, cristalizando-se de acordo com a figura da célula unitária representada abaixo:



Célula unitária que forma cristais de argônio.

Fonte: Extrairdo de "Clenc. e Eng. dos Mat. W. Callister.

Da mesma maneira que no problema anterior, analisando a figura, responda:

**a)** Qual é a rede de Bravais que está discriminada na figura?

.....

**b)** Quantos átomos compõem essa rede de Bravais? Por quê?

.....

# Atividade 4: Experimento - Movimento Térmico em Redes Cristalinas

Agora que você entende um pouco melhor o que é o movimento térmico e o que é uma rede cristalina, vamos fazer um experimento para simular como uma rede cristalina se comporta termicamente? Para isso, **seu professor trará pronto** para a aula um simulador mecânico que imitará o movimento térmico de uma rede cristalina. Esse simulador é um **modelo que representa uma rede cristalina** com esferas interligadas por elásticos. O mais interessante, é que este simulador é motorizado, o que permitirá que você compreenda melhor o movimento térmico em um sólido!



Se você quiser fazer o seu próprio simulador, acesse o link:

<https://fisicatermica.wixsite.com/simulador/construa-o-simulador>

Capriche e leve para a aula para utilizá-lo!



## Situação 1- Observando o Movimento Térmico de uma Rede Cristalina

Nesta primeira parte, vocês observarão o comportamento da rede cristalina simulada. Para isso, reúnam-se em grupos de cinco colegas, e organizem as carteiras e cadeiras da sala em forma de "U". O simulador será posto no meio da sala pelo professor, para que todos possam enxergá-lo adequadamente. A imagem abaixo mostra o simulador proposto construído.



Fonte: O Autor.

Simulador proposto construído para ser utilizado nesta aula.

Agora, com o seu grupo, analise e responda as seguintes questões propostas em cada parte do experimento simulado:

### Experimento

**Parte 1:** Sem ligar o simulador, observem o tipo de rede cristalina representada nele e respondam:

**a)** Qual é o sistema cristalino e o tipo de rede de Bravais que constitui a rede simulada?

Resposta contendo a análise de seu grupo: .....

.....

**b)** Quantas células unitárias contém a rede simulada?

Resposta contendo a análise de seu grupo: .....

.....

**Parte 2:** Agora, o professor acionará o simulador através do botão "contínuo". Observe atentamente o comportamento da rede cristalina simulada. Em grupo, responda:

**a)** Os átomos simulados tem movimento plenamente livre? Eles podem alcançar qualquer ponto da rede?

Resposta contendo a análise de seu grupo:.....  
.....  
.....  
.....

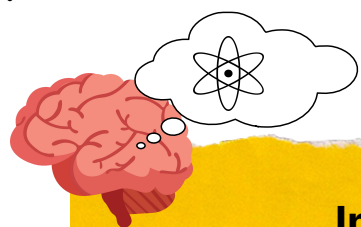
**b)** É possível estabelecer um análogo da temperatura com o simulador? Se sim, quais regiões possuiriam maior e menor temperatura no cristal simulado?

Resposta contendo a análise de seu grupo:.....  
.....  
.....  
.....

**Parte 3:** Agora, vocês deverão apresentar as respostas de seu grupo aos demais grupos da sala. Este momento será mediado pelo professor para que vocês possam partilhar suas conclusões. Caso, julguem necessário, vocês poderão incrementar ou alterar suas respostas anteriores.

## Situação 2- Entendendo a condução de energia térmica em um sólido.

Agora, com o mesmo grupo de colegas criado na atividade anterior, vocês analisarão a propagação do movimento térmico na rede cristalina simulada. Vocês já devem ter notado que apenas uma esfera do simulador é motorizada, entretanto, todas adquirem movimento. Como isso é possível? Para entender, considere a simulação da seguinte situação:



**Imagine que pegássemos uma amostra de gás argônio e a resfriássemos ao ponto de solidificá-la, abaixo de  $-198^{\circ}\text{C}$ . Obteríamos, então, um cristal cuja rede cristalina seria formada por células unitárias no sistema cúbico de face centrada! Mas, imagine que resfriássemos ainda mais esse cristal, ao ponto de quase pararmos os átomos da rede, próximo ao zero absoluto ( $-273^{\circ}\text{C}$ ). Neste experimento mental inicial, obteríamos uma rede cristalina praticamente parada. Agora imagine, se pudéssemos fornecer energia térmica a essa rede, mas a partir de um único átomo... O que aconteceria com os átomos vizinhos com o passar do tempo?**

A situação descrita acima é exatamente a proposta central do simulador. Como o movimento de um átomo é transmitido aos outros em uma rede cristalina. Em outras palavras, como a energia térmica se propaga em um sólido? Para entender esse fenômeno denominado **condução térmica**, realize com seu grupo as etapas experimentais a seguir.

### Experimento

**Parte 1:** O professor irá acionar o simulador através do botão "pulso", prestem muita atenção no comportamento da rede. Responda:

**a)** Na simulação, se apenas um átomo possui movimento, como os outros átomos adquirem movimento? Como esse "movimento térmico" se propaga na rede?

Resposta contendo a análise de seu grupo: .....

.....

.....

.....

.....

.....

**b)** Qual o papel dos elásticos na propagação do movimento na rede cristalina representada? Com a ajuda do professor, explique o que esses elásticos representam em um sistema físico real.

Resposta contendo a análise de seu grupo:.....

.....

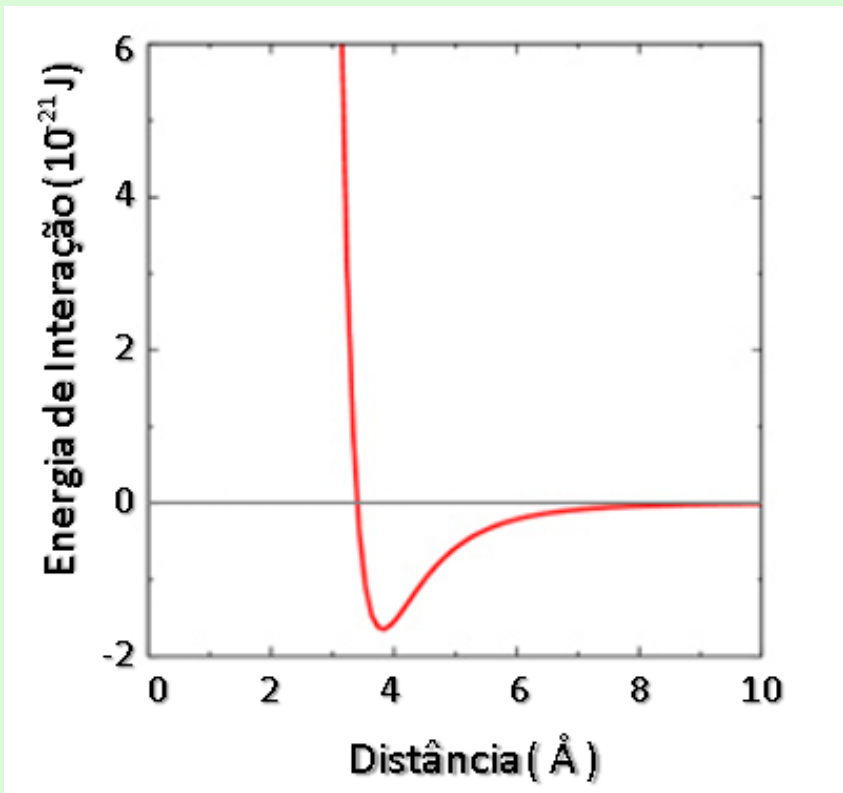
.....

.....

.....

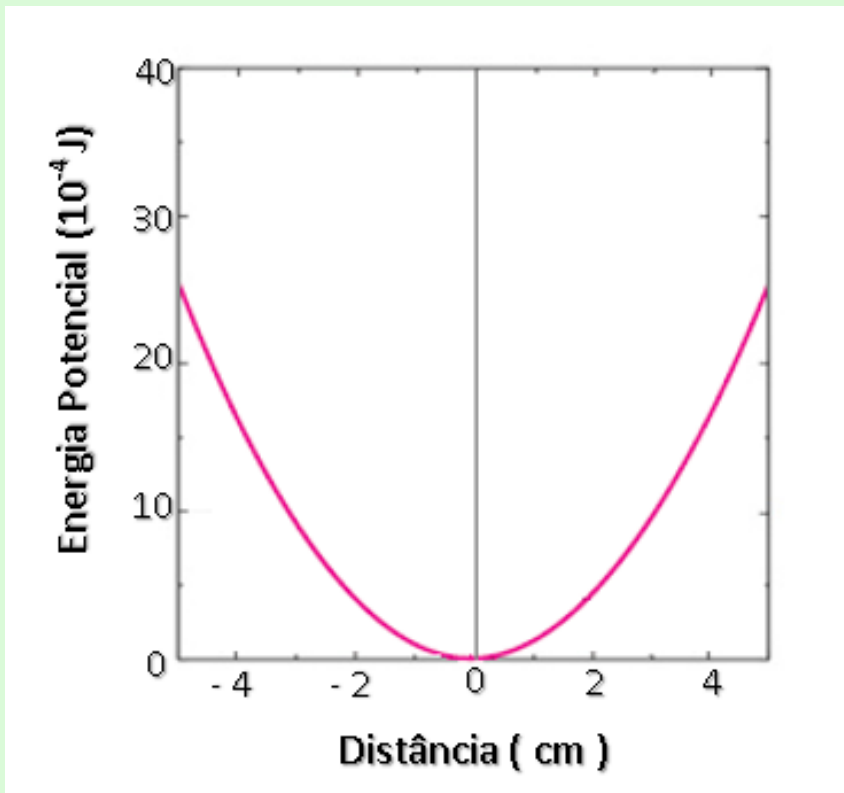
.....

**Parte 2:** Os átomos de gases nobres, como os de argônio, interagem entre si de acordo com o potencial de Lennard-Jones. Esse potencial indica a energia de ligação entre os átomos para formar uma rede cristalina real. Em nossa simulação, os "átomos" interagem por meio do elástico que existe entre eles. Neste caso da simulação, a energia de "ligação" é a energia potencial elástica. Analise as figuras abaixo e responda:



Fonte: Adaptado de Madeira e Vitteio (Unicamp).

Potencial de Lennard-Jones para o Argônio.



Fonte: O Autor.

Energia Potencial Elástica armazenada em um elástico comum.

Analisando os gráficos acima a partir de seus formatos, é possível estabelecer alguma similaridade entre o caso real e o simulado? Em que condições esses casos se aproximam?

Conclusão de seu grupo: .....

.....

.....

.....

.....

.....

**Parte 3:** Por meio de uma roda de conversa organizada pelo o professor, apresente as conclusões de seu grupo acerca de como se dá a **condução térmica** em sólidos aos demais grupos da sala! Para facilitar o diálogo, registre abaixo as conclusões gerais de seu grupo.



Conclusões gerais de seu grupo: .....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....



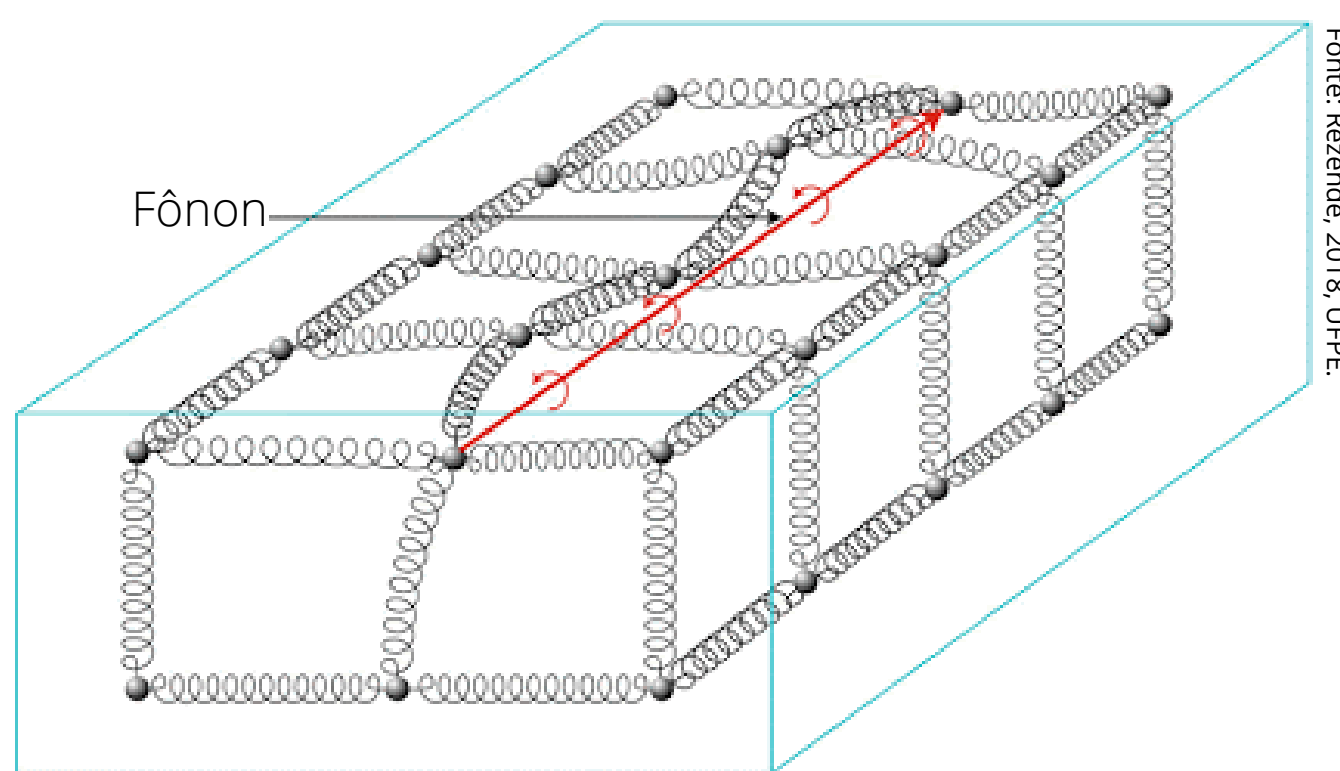
## Os Fônons

Ao analisar o comportamento da rede cristalina, você deve ter percebido que os átomos se movimentam no entorno de uma posição de equilíbrio definida pela rede de Bravais. Isto significa que, apesar do movimento oscilatório das partículas, existe uma posição central a partir da qual elas realizam o movimento.

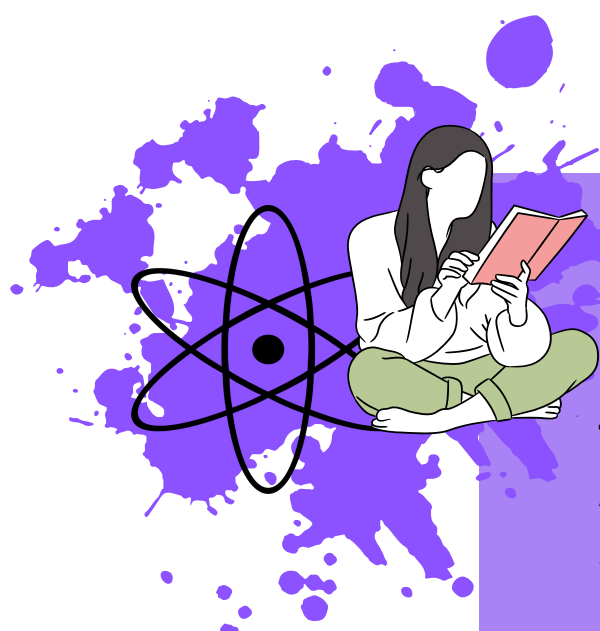
Se considerássemos a rede no zero absoluto, a menor temperatura possível, observaríamos os átomos da rede em repouso, em posições fixas, exatamente como definida pela rede de Bravais. À medida que a temperatura fosse aumentando, as partículas começariam a se agitar cada vez mais, mas em torno das posições que tinham quando estavam paradas. Como as partículas estão acopladas umas às outras, elas acabam assumindo uma vibração coletiva. Tal oscilação coletiva se propaga pela rede cristalina na forma de uma onda elástica, com frequência específica que depende das características da rede. Na física dos sólidos, considera-se que essa onda elástica se transmite em "pacotinhos" de vibração chamados **fônons** (SBF, 2018).

Os fônons se comportam como se fossem partículas fictícias que se propagam pela rede cristalina, por isso são chamados de quase-partículas. Eles são importantes para o estudo de vários fenômenos que ocorrem nos sólidos, como o som, a condução térmica e a supercondutividade elétrica!

*Elaborado pelo Autor.*



Representação de um fônon se propagando em uma rede cristalina.



## Leia também!

Para saber mais sobre o assunto leia o texto: "**Estudo brasileiro revela que fônons também podem ter spin**", publicado no site da Sociedade Brasileira de Física (SBF).

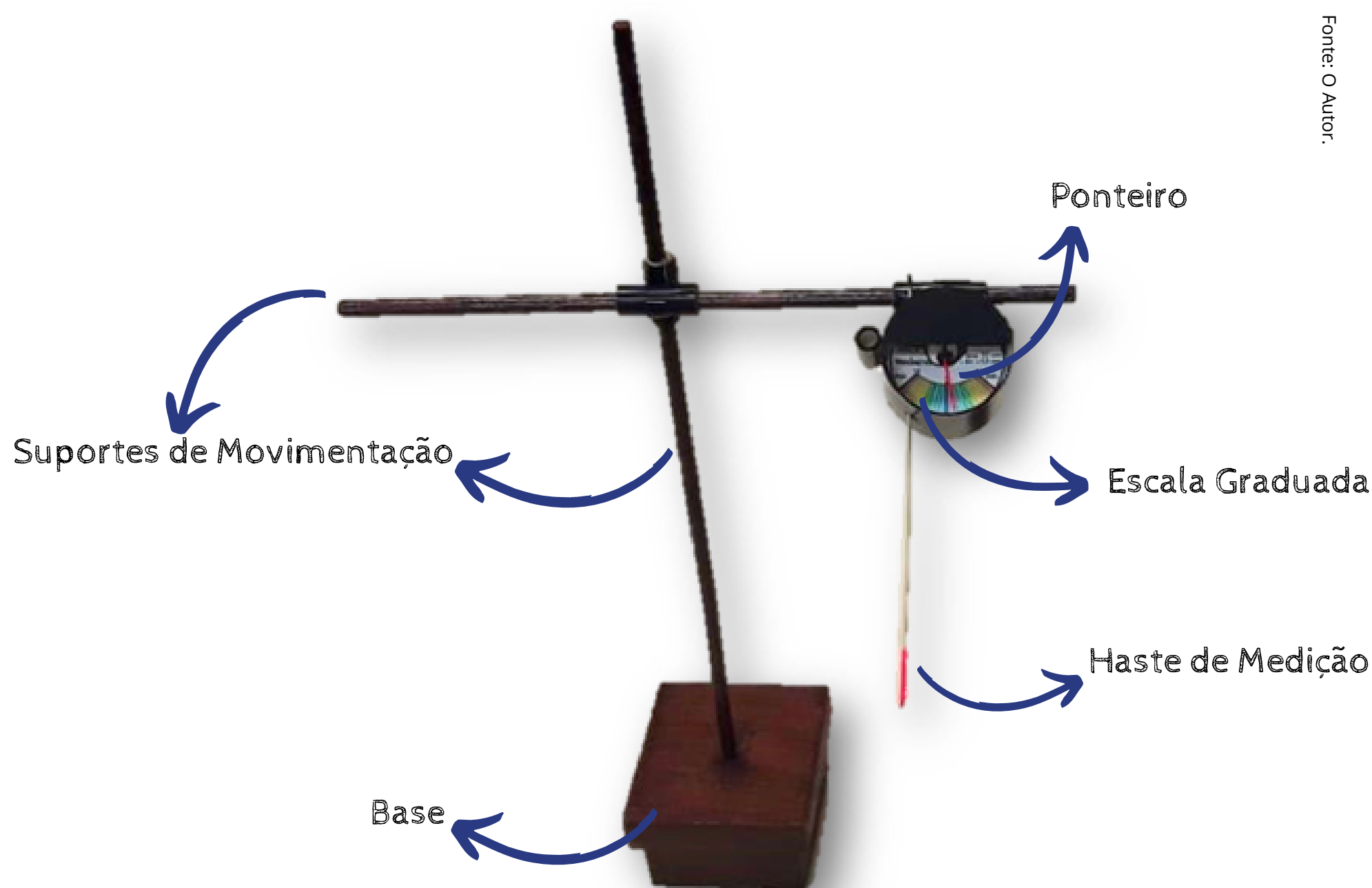
Acesse: <http://www.sbfisica.org.br/v1/home/index.php/pt/destaque-em-fisica/684-estudo-brasileiro-revela-que-fonons-tambem-podem-ter-spin>, e saiba mais!

## Atividade 5: Construindo um Modelo Explicativo

Agora que já entendemos como se dá qualitativamente a condução térmica em um sólido, vamos analisar para nossa rede cristalina simulada com um pouco mais de detalhe? Para isso, nós realizaremos medições das vibrações dos átomos representados e "mapearemos" nossa rede cristalina! Além disso, nesta aula, a partir dos dados experimentais coletados, seu grupo deverá construir um modelo matemático que expresse com maior precisão a propagação do movimento térmico na rede. Vamos lá?

### Parte 1- Medindo a vibração da rede cristalina simulada.

Como você já deve ter percebido, para analisar quantitativamente o movimento da nossa rede cristalina, deveremos realizar medições da agitação dos átomos representados. A medição será feita através de um instrumento proposto e denominado sugestivamente de "vibrômetro". Esse instrumento, feito a partir de materiais simples, é capaz de indicar amplitudes de deslocamentos com precisão de até 0,3 mm em relação a uma posição central de referência. Seu professor levará para a aula alguns vibrômetros já construídos e prontos para o uso.



Vibrômetro construído para a medição da oscilação dos átomos representados.



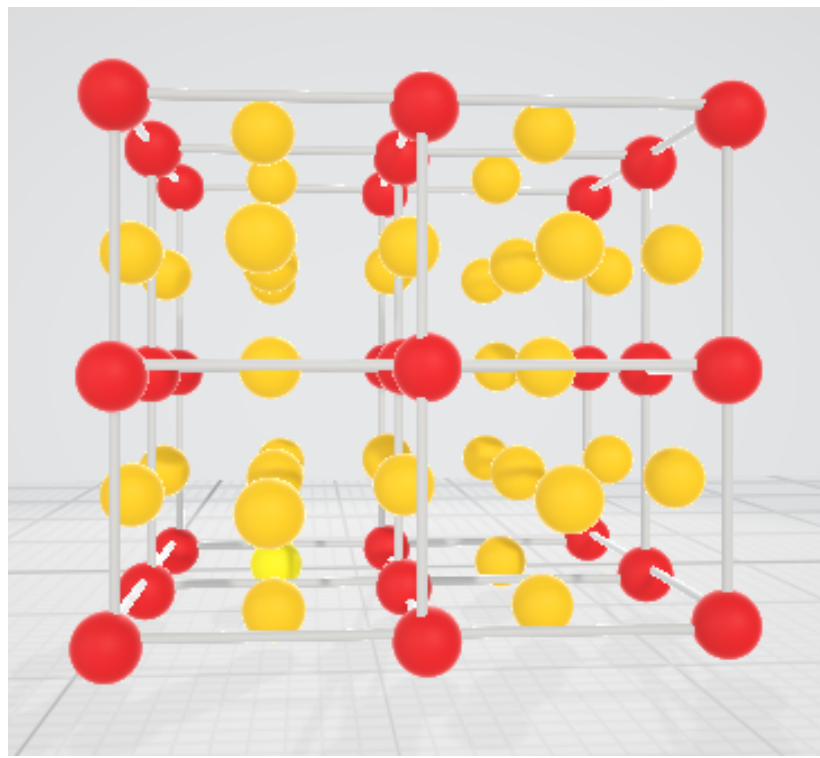
Se você quiser fazer o seu próprio vibrômetro, acesse o link:

<https://fisicatermica.wixsite.com/simulador/construa-o-vibrômetro>

Capriche e leve para a aula para utilizá-lo!

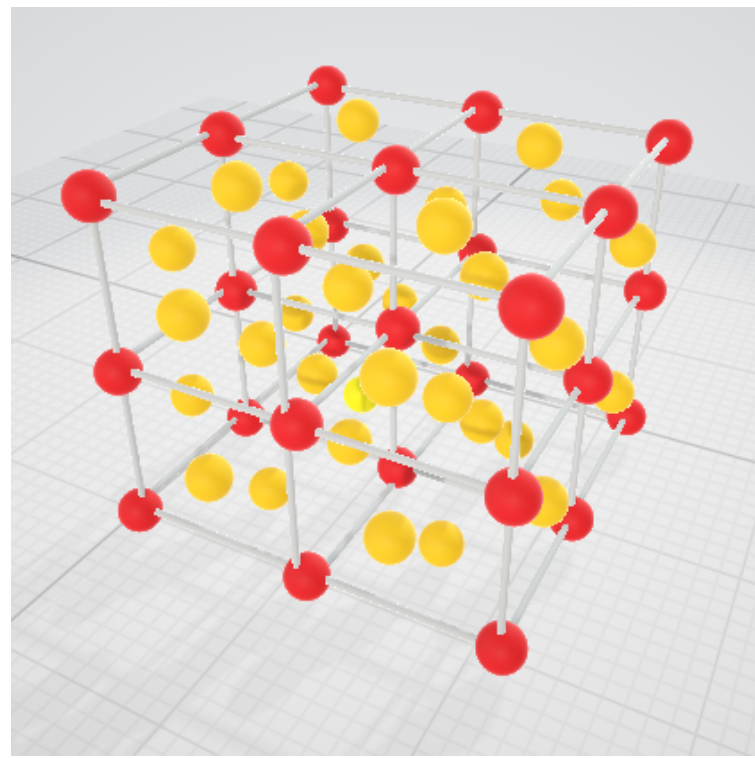


Forme grupos de cinco colegas e, com o auxílio do professor, meça através dos vibrômetros a oscilação dos átomos que constituem a rede cristalina. Nossa rede representada possui 63 átomos, mas nos concentraremos apenas naqueles que se encontram nos vértices dos cubos das células cristalinas, indicados em **vermelho** nas figuras abaixo. Para realizar a medição, basta introduzir a ponta da haste do vibrômetro no átomo representado, ajustar a posição do instrumento na medida 0 mm, e após ligar o simulador, ler a medida indicada pelo o ponteiro na escala.



Fonte: O Autor.

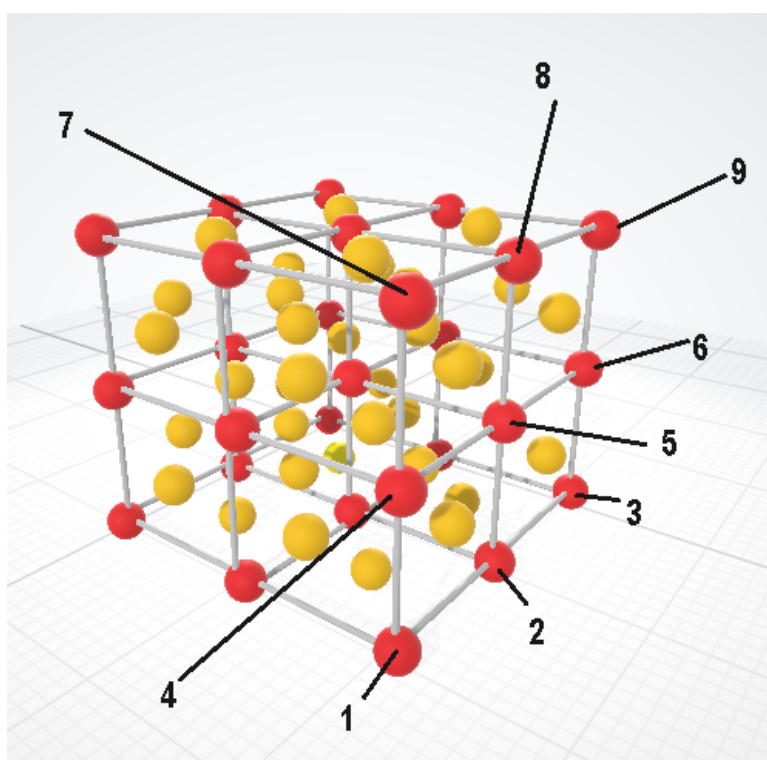
Vista 1: Átomos dos vértices das células unitárias cúbicas .



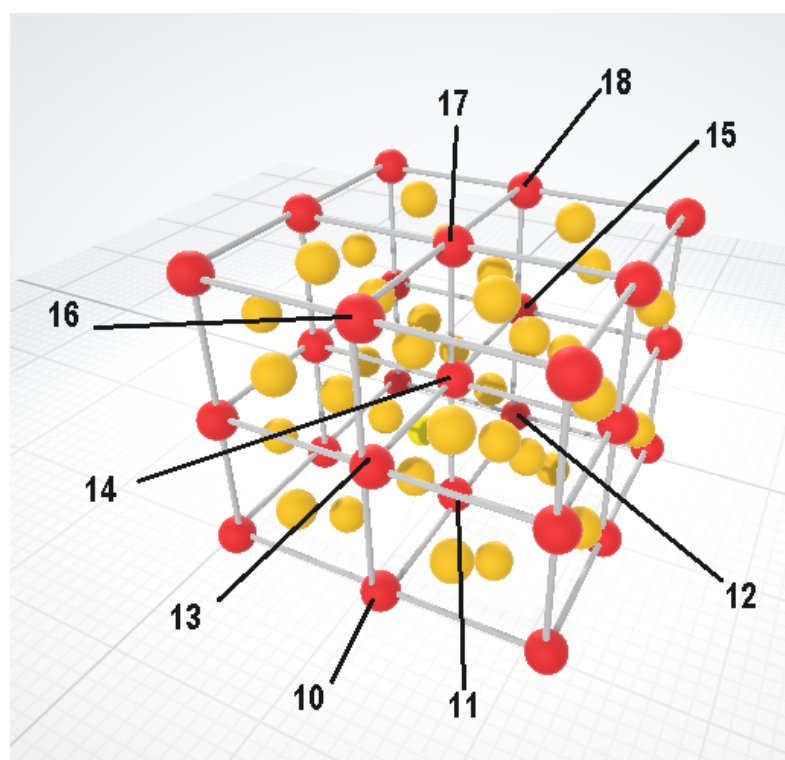
Fonte: O Autor.

Vista 2: Outra perspectiva dos átomos dos vértices das células unitárias cúbicas .

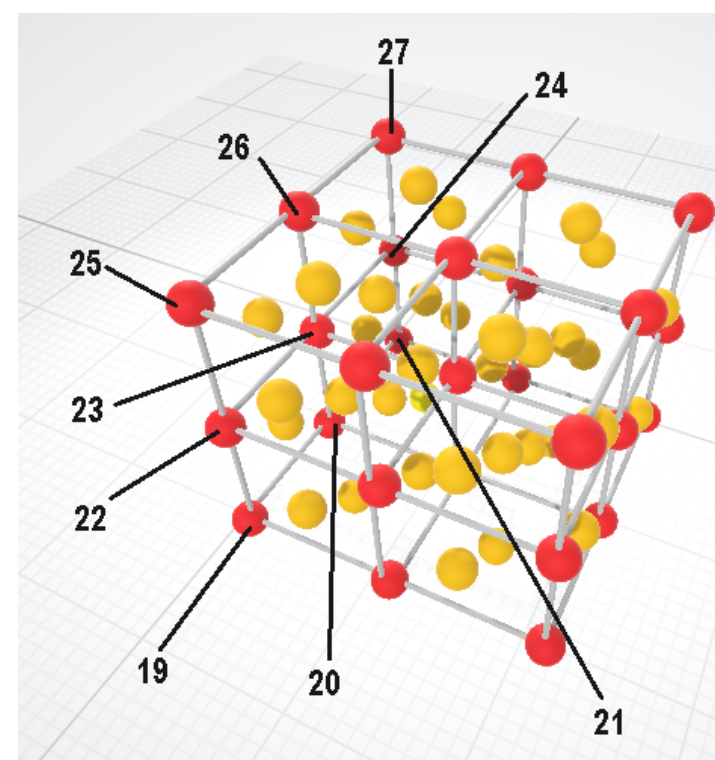
Como você pode ter percebido, são 27 átomos que formam os vértices das células unitárias do sistema cúbico (indicados em vermelho). Assim, serão necessárias 27 medições com o vibrômetro. Com o auxílio de seu professor, e em **acordo com os demais grupos da sala**, identifique cada um desses átomos representados **indicados com um número**. É importante que todos os grupos utilizem a mesma identificação para mapear a rede cristalina.



Átomos de 1 à 9.



Átomos de 10 à 18.



Átomos de 19 à 27.

Cada grupo ficará responsável em medir a vibração de 4 a 6 átomos da rede cristalina, dependendo da quantidade total de alunos de sua sala. Utilize os dados coletados de outros grupos e registre aqui os resultados das medições.

Átomo	Amplitude de Oscilação (mm)
1	
2	
3	
4	
5	
6	
7	
8	
9	

Átomo	Amplitude de Oscilação (mm)
10	
11	
12	
13	
14	
15	
16	
17	
18	

Átomo	Amplitude de Oscilação (mm)
19	
20	
21	
22	
23	
24	
25	
26	
27	

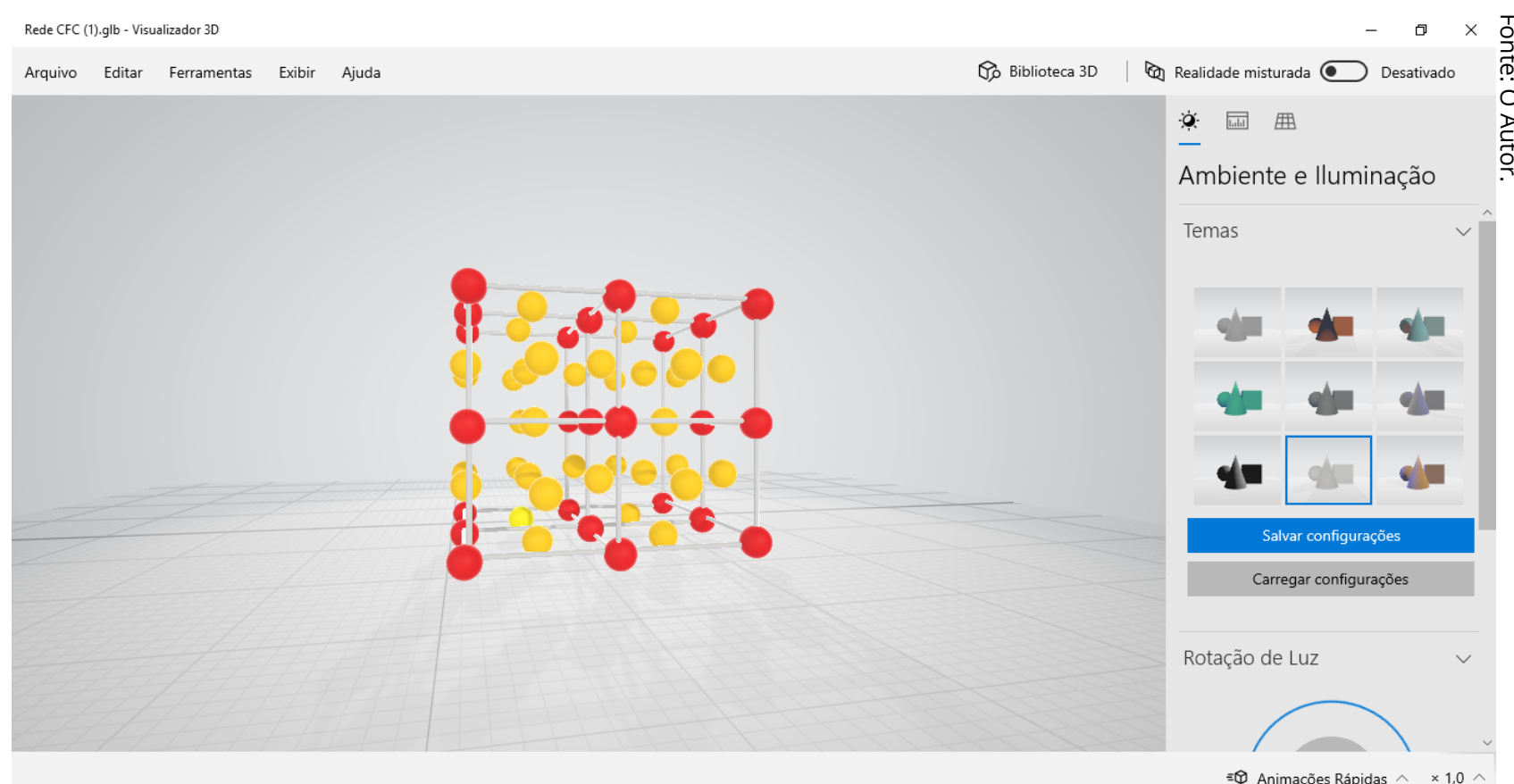
## Parte 2- Mapeando nossa rede cristalina.

Nesta parte de nossa análise, faremos um mapeamento tridimensional de nossa rede cristalina simulada. Para isso, acesse o site <https://fisicatermica.wixsite.com/simulador>, inscreva-se gratuitamente e selecione na página inicial "**Baixe um Mapa 3D da Rede**". Ou acesse a rede diretamente em:



[https://drive.google.com/file/d/1vTRNOK9\\_AkDCMW8vDWn8MWBxjTbyN8pJ/view](https://drive.google.com/file/d/1vTRNOK9_AkDCMW8vDWn8MWBxjTbyN8pJ/view)

Neste link você baixará um modelo tridimensional da rede cristalina que estamos estudando (no formato *.glt*). Esse arquivo pode ser aberto pelo software **Paint 3D**, que normalmente já vem instalado junto com o sistema operacional *Windows 10*. Acessando o arquivo a partir de um computador que possui o *Paint 3D* instalado, ao dar duplo clique sobre este arquivo baixado, você poderá visualizá-lo diretamente através do *Visualizador do Paint 3D* que abre automaticamente. A figura abaixo, mostra a interface do programa com o arquivo aberto:

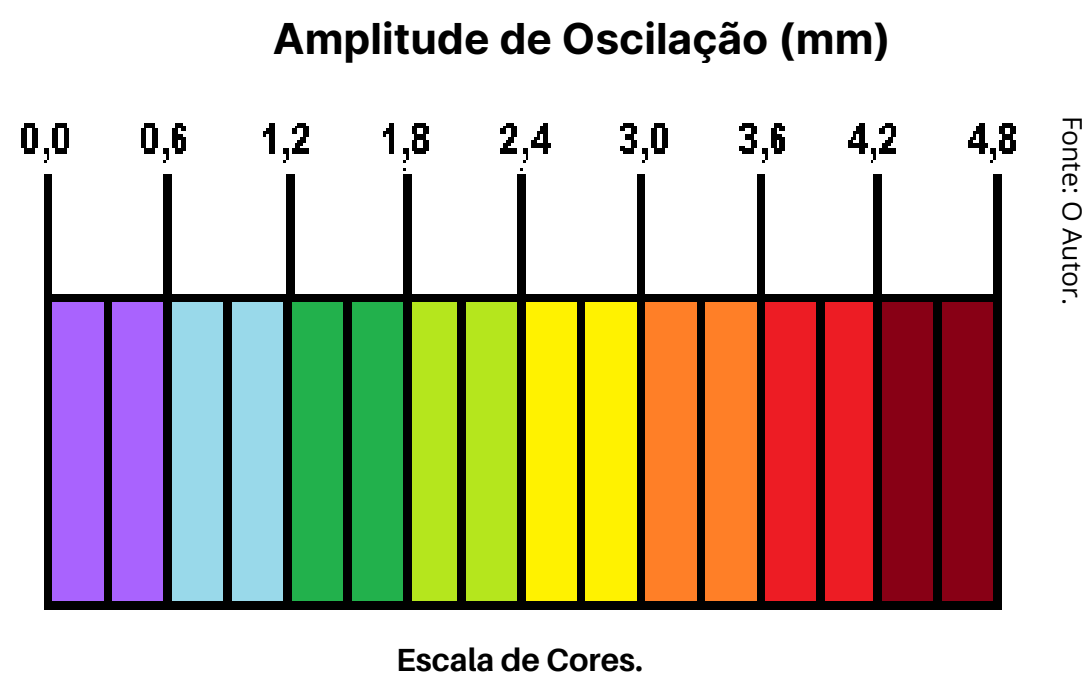


Interface do *Visualizador do Paint 3D* mostrando o modelo da rede cristalina que estamos estudando.

Após abrir o arquivo diretamente, selecione na aba superior esquerda "**Arquivo**". Clique em "**Abrir com o Paint 3D**". Pronto! Seu arquivo estará pronto para edição.

**Com o mesmo grupo de colegas criado e a partir dos dados encontrados na Parte 1, sua missão é colorir o modelo 3D da rede cristalina de acordo com a intensidade de vibração de cada átomo medido. Vamos fazer um Mapa 3D da rede!**

Para cumprir a tarefa acima, utilizaremos uma **escala de cores** que representará a intensidade da vibração dos átomos. Essa referida escala segue representada abaixo e foi construída utilizando a escala de cores do próprio *Paint 3D*. Assim, fica mais fácil para você representar os valores **pintando as esferas** do modelo 3D da rede de acordo com os valores medidos na Parte 1! Abaixo segue a mesma escala de cores utilizada no vibrômetro, pinte de acordo com os valores obtidos:



**Importante!** Pinte de branco os "átomos" que não foram medidos, ou seja, aqueles que estão "centrados nas faces" das células unitárias cúbicas.

**Salve o mapa pronto de seu grupo** e o encaminhe ao seu professor que o avaliará. Este mapeamento da rede auxiliará vocês a fazerem a Parte 3.

### Parte 3- Criando um modelo matemático com nossos resultados.

Nesta última parte, você e seus colegas do grupo deverão expressar suas conclusões através de uma expressão matemática que descreva a **intensidade da oscilação dos átomos representados** na rede cristalina em função da **distância** que estes átomos estão do "átomo motorizado", lembrem-se que apenas uma única esfera é motorizada em nosso simulador. Utilizem apenas as oscilações medidas dos átomos presentes na diagonal principal do cubo que passa pelo "átomo motorizado", ou seja, os átomos **1, 14 e 27**.

Reflitam em grupo:

- Existe relação entre os resultados experimentais da Parte 1 com a posição das átomos representados evidenciados na parte 2?
- Que relação é essa?

A tarefa de seu grupo é estabelecer uma **expressão matemática** que relacione a intensidade ***I*** da amplitude de vibração dos átomos representados (em mm) e a distância ***d*** de cada átomo representado em relação ao átomo motorizado.



Dicas e procedimentos (peça ajuda ao professor):

- Usem o modelo 3D da rede pintada da Parte 2 para perceber visualmente alguma relação de intensidades de vibração.
- Com uma régua e com a ajuda de seu professor, meça a distância entre cada átomo representado medido e o átomo motorizado.
- Com o auxílio do software *Excel* da *Microsoft*, insira os dados da intensidade de vibração ***I*** e das respectivas distâncias ***d*** para cada átomo medido. Plote o gráfico de ***I* x *d*** e obtenha a expressão matemática solicitada!

### Atividade

**Escreva aqui a expressão encontrada por seu grupo. O professor solicitará que a apresente aos demais grupos para uma discussão final.**

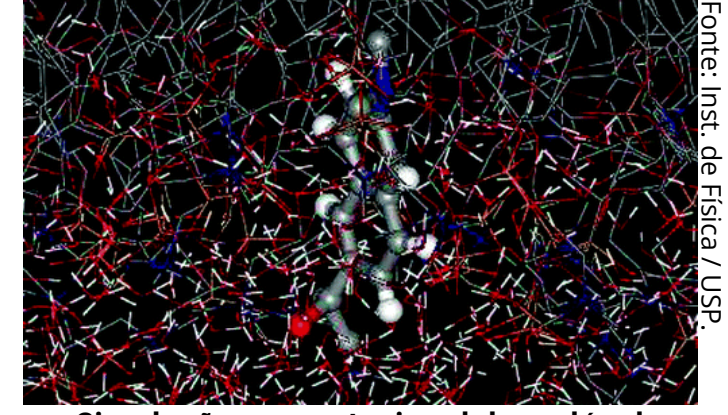


## Curiosidade

### Dinâmica Molecular

Existe uma ferramenta computacional poderosa chamada Dinâmica Molecular (DM). Ela é usada para descrever o comportamento de átomos e moléculas, desde que se saiba os potenciais de interação entre essas partículas e as equações que regem seus movimentos. A DM possui aplicações muito importantes, entre elas o estudo de fármacos para o tratamento de doenças.

*Elaborado pelo Autor.*



Simulação computacional de moléculas.

Fonte: Inst. de Física / USP.

## Atividade 6: Avaliação Final

Nesta última aula, você se reunirá em grupo de três colegas e responderão um questionário final que será utilizado para avaliar suas aprendizagens ao longo desta pequena sequência de aulas. Respondam as questões propostas, recorte na linha tracejada, grampeie com a próxima folha da prova e entreguem ao professor.

Escola:

Série:

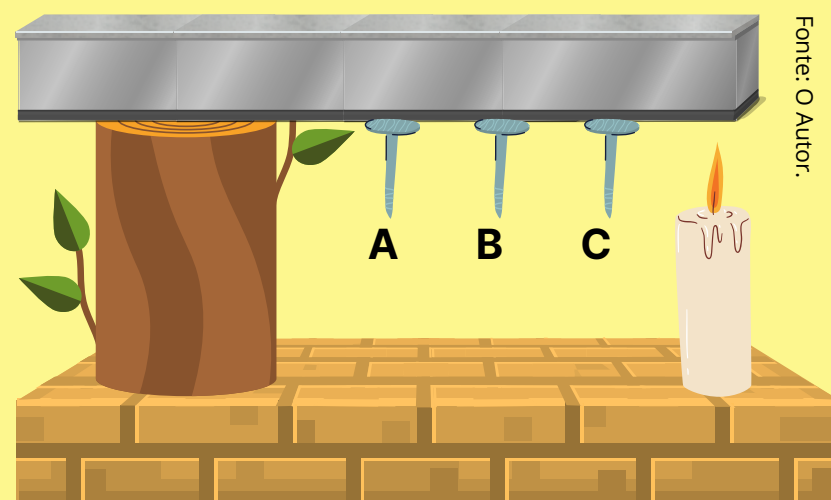
Nomes:

Turma:

### Avaliação Final

**Questão 1-** Três pregos, A, B e C, são fixados por meio de parafina de vela a uma haste metálica que está apoiada sobre um tronco. A haste é aquecida por uma das extremidades através da chama de uma vela, conforme a figura ao lado.

Qual será a ordem da queda dos pregos? Explique microscopicamente porque isso acontece e dê o nome desse tipo de transferência de energia térmica.



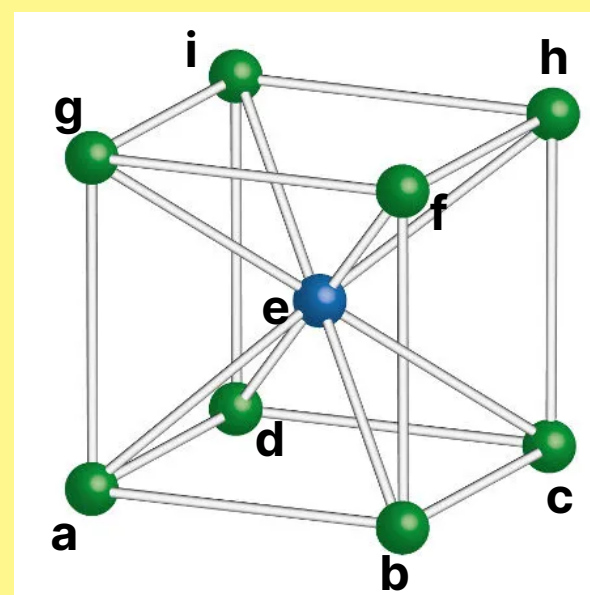
**Questão 2-** Analise a célula unitária do sólido ao lado.

Responda:

a) Qual é a rede de Bravais representada?

b) Quantos átomos compõem essa célula unitária?

c) Qual(is) é(são) o(s) átomo(s) mais próximo(s) do átomo "a"? Qual é o átomo mais distante?



**Questão 3-** Se os átomos, mesmo em um sólido cristalino, estão em constante movimento térmico, como é possível eles ainda serem capazes de formar estruturas cristalinas tão ordenadas?



Fonte: Adaptado de Canva.

**Questão 4-** Dois ovos crus são postos ao mesmo tempo em lados opostos de uma frigideira, como mostrado na figura ao lado. A frigideira é levada ao fogo, de modo que a chama incida exatamente no centro inferior dela. Responda:

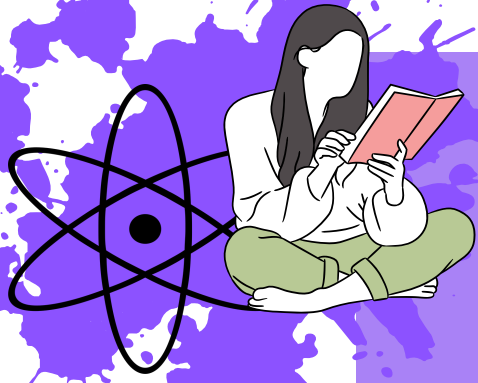
**a)** Levando em conta apenas a posição dos ovos, qual fritará primeiro?

**b)** Como o aumento da intensidade do movimento térmico se propaga pela frigideira neste caso?

**c)** Tanto a parte metálica da frigideira, quanto o cabo de madeira são sólidos. Entretanto, se após certo tempo no fogo, você tocar na parte metálica, poderá se queimar, o que não ocorrerá se tocar no cabo. Por que isso ocorre?

**Questão 5)** "Quando um cristal extenso é aquecido em uma extremidade, a energia térmica se transmite instantaneamente a todos os átomos de toda a rede cristalina, independente da distância da porção diretamente aquecida." Esta afirmação está correta? Explique!





## Referências: Leitura para o aluno!

HEWITT, P. G. **Física conceitual**. 9ª ed. Porto Alegre: Bookman, 2002.

INOVAÇÃO TECNOLÓGICA. **Calor se propaga em ondas no grafeno**. Disponível em :<https://www.inovacaotecnologica.com.br/noticias/noticia.php?artigo=calor-propaga-se-ondas-grafeno&id=010165150318#.YlpgCLVKjIU>. Acesso em 15 de Abril de 2021.

NAMBA, A. M., et. al. **Dinâmica Molecular: Teoria e Aplicações em desenvolvimento de fármacos**. Ecl. Quím., São Paulo, v. 33, n. 4, p. 13-24, 2008.

SGB-SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. **Cristais**. Disponível em: <http://www.cprm.gov.br/publique/CPRM-Divulga/Cristais-2715.html#:~:text=Os%20cristais%20s%C3%A3o%20poliedros%20convexos,de%20pelo%20menos%20dois%20cristais>. Acesso em 20 de Abril de 2021.

SOCIEDADE BRASILEIRA DE FÍSICA. **Estudo brasileiro revela que fônons também podem ter spin**. Disponível em: <http://www.sbfisica.org.br/v1/home/index.php/pt/destaque-em-fisica/684-estudo-brasileiro-revela-que-fonons-tambem-podem-ter-spin>. Acesso em 15 de Abril de 2021.

TEIXEIRA, M. M. **Condução Térmica**. Disponível em: <https://mundoeducacao.uol.com.br/fisica/conducao-termica-1.htm>. Acesso em 20 de Abril de 2021.

WIKIVIDROS. **Introdução ao vidro e sua produção**. Disponível em: [https://wikividros.eesc.usp.br/introducao\\_ao\\_vidro\\_e\\_sua\\_producao/elaboracao](https://wikividros.eesc.usp.br/introducao_ao_vidro_e_sua_producao/elaboracao). Acesso em 20 de Abril de 2021.



## Referências: Leitura para o Professor!

AMARAL, L.Q. do. **Entre Sólidos e Líquidos: uma Visão Contemporânea e Multidisciplinar**. São Paulo: Livraria da Física, 2014.

KITTEL, C. **Introduction to Solid State Physics**. John Wiley & Sons, 2004.

LUZ, A. B.; LINS, F. A. F. **Rochas e minerais Industriais: usos e especificações**. 2ª edição. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2008.

NUSSENZVEIG, M. **Curso de Física Básica 2: Fluidos, Oscilações e Ondas, Calor**. 4ª ed. Editora Edgard Blücher, 2002.

NYE, J. F. **Physical Properties of Crystals: Their Representation by Tensors and Matrices**. Oxford University Press, 1985.

YOUNG, H. D., FREEDMAN, R. A. **Física II: Termodinâmica e Ondas**. 14ª edição. São Paulo: Pearson, 2015.

ZACHARIASEN, W. H. **The atomic arrangement in glass**. *Journal of the American Chemical Society*, v.54, p. 3841 – 3851, 1932.

