

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

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



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**

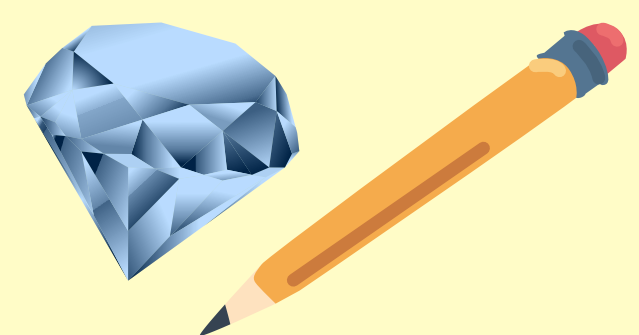
é fazer com que o aluno reflita sobre a constituição dos materiais.

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.

.....

.....

.....




Churrasco.

Fonte: Adaptado do Canvas.

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:

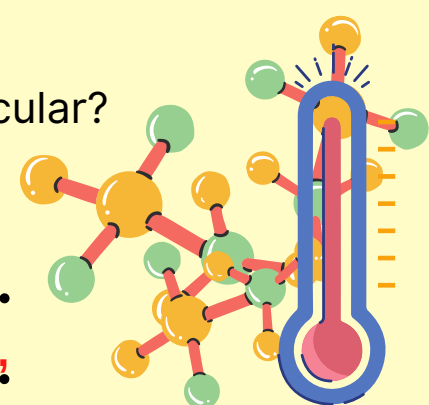
a) Você acha que existe relação entre a temperatura de um corpo e o movimento molecular?

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

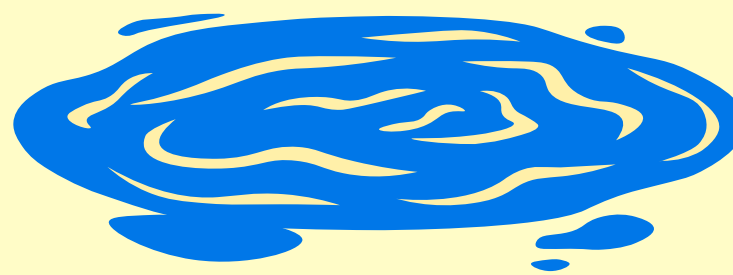
realizada no segundo momento desta aula.



Maria está correta?


Fonte: Canvas.

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. 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

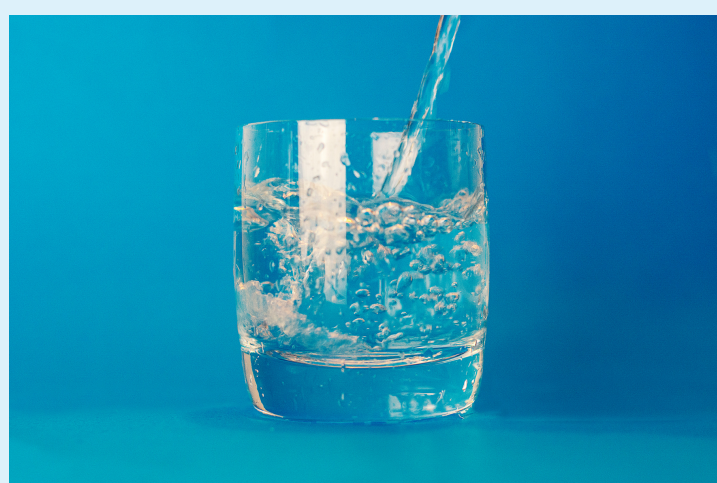
A matéria pode se apresentar, basicamente, em **três estados físicos** diferentes. Estes estados refletem o estado de agregação das partículas (moléculas, átomos ou íons) de um corpo, isto é, o quanto essas partículas estão próximas, ou afastadas umas das outras. As partículas que constituem os corpos 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.

Fonte: Canvas.



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

Fonte: Canvas.

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.

Fonte: Canvas.

Elaborado pelo Autor.

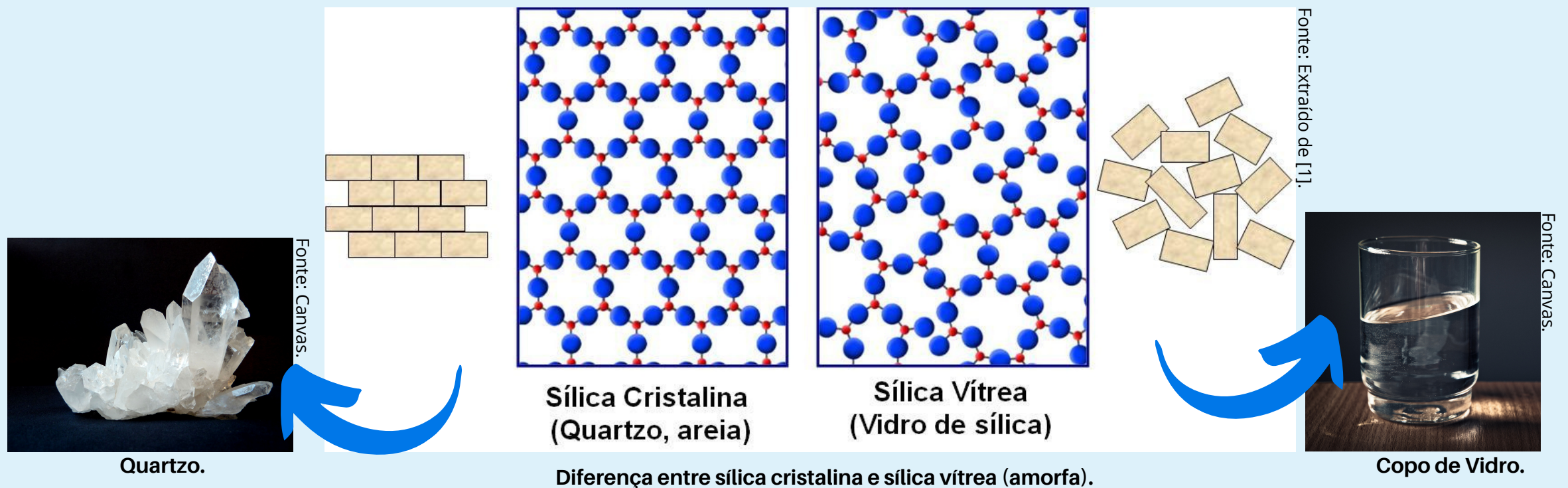
Texto 2 O Quartzo e o Vidro

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 (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).

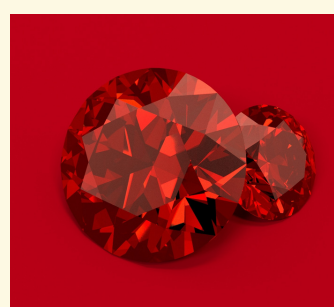
Existem minerais exóticos, como o rutilo, e muito valiosos como o coríndon que, em sua forma vermelha é chamado de rubi, e na forma azul é conhecido como safira. Neste caso, os minerais são chamados de gemas ou simplesmente de "pedras preciosas". Outros exemplos é o mineral berilo que forma a água-marinha 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

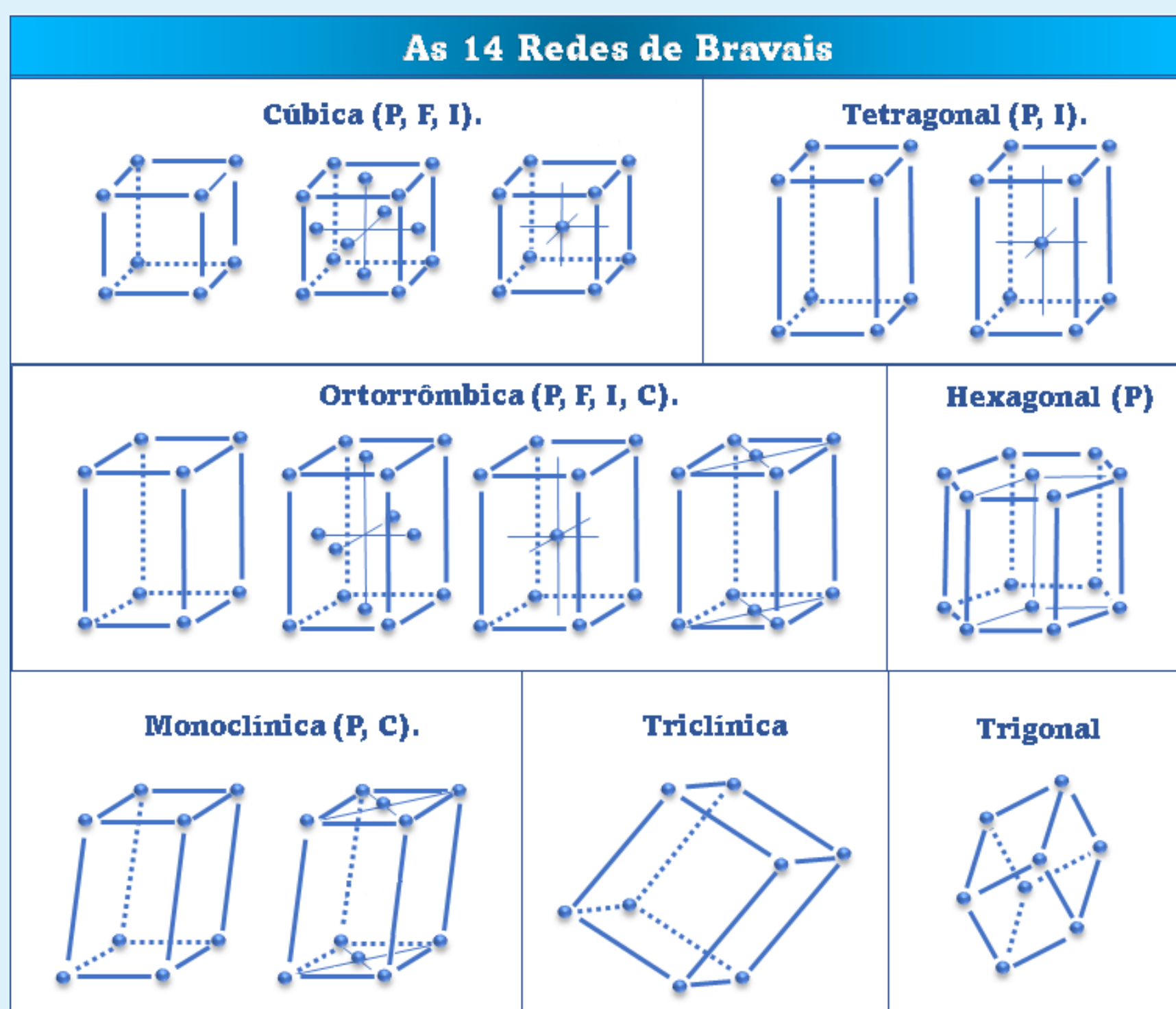
Agora que você já sabe que os sólidos podem se organizar microscopicamente através de uma estrutura cristalina, chegou a hora de conhecer um pouco mais sobre estas estruturas especiais. Leia atentamente o texto 1, abaixo:

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 triclinico. 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:

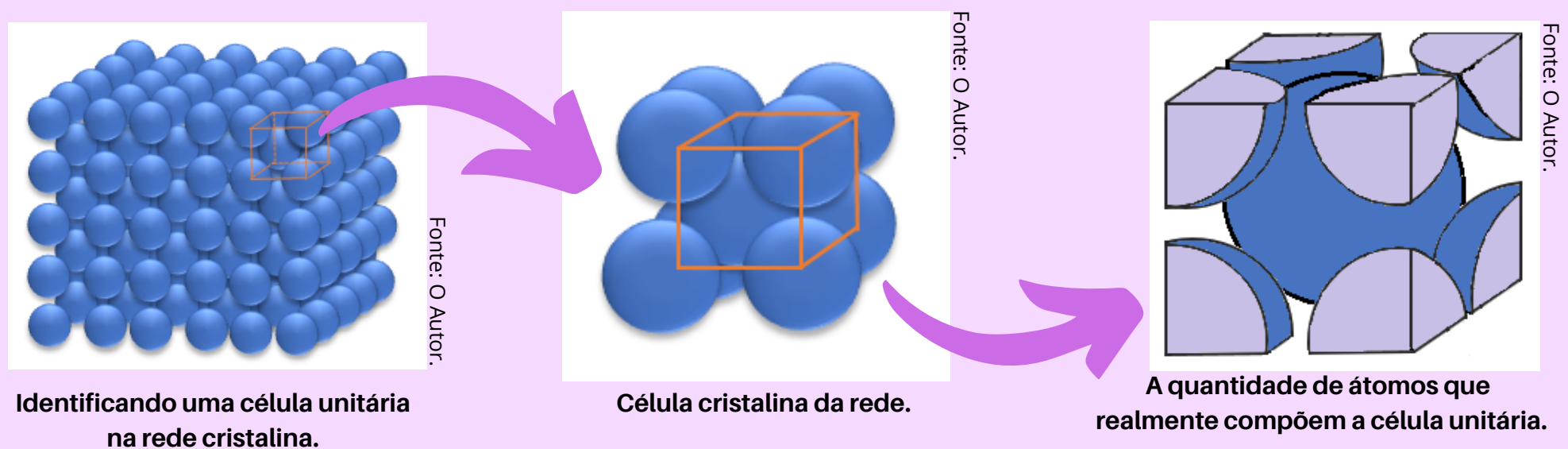
Atividade

Atividade 1: Associe corretamente:

- Célula Unitária (A)**
- Sistema Cristalino (B)**
- Redes de Bravais (C)**
- Rede Cristalina (D)**

- (C)** Configurações básicas que resultam da combinação dos sistemas cristalinos com a posição das partículas em cada uma das células unitárias.
- (D)** Conjunto de um enorme número de células unitárias interligadas.
- (A)** Menor unidade que se repete e reproduz a rede cristalina.
- (B)** Classificação que leva em conta os comprimentos e ângulos das células unitárias.

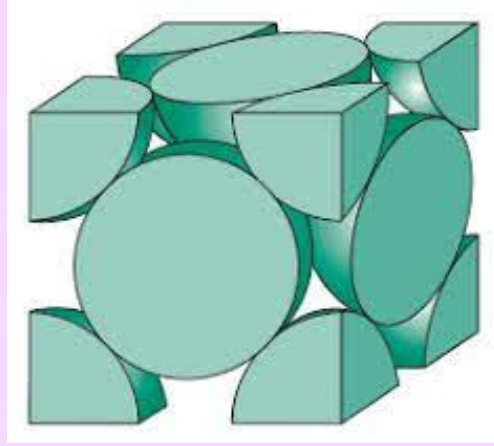
Atividade 2: Para sabermos a quantidade de átomos que compõem uma célula unitária, não basta simplesmente contá-los. Na verdade, a quantidade de átomos presentes na célula unitária é obtida somando-se os "pedaços" de átomos que foram "partidos" para isolar a célula. Para entender melhor, veja a figura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

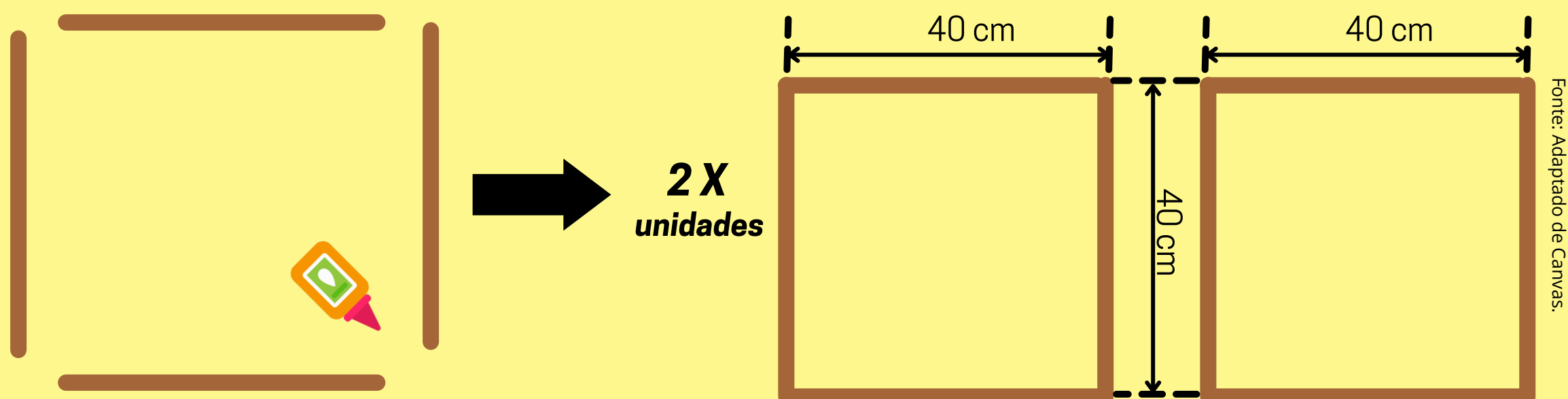


Materiais necessários:

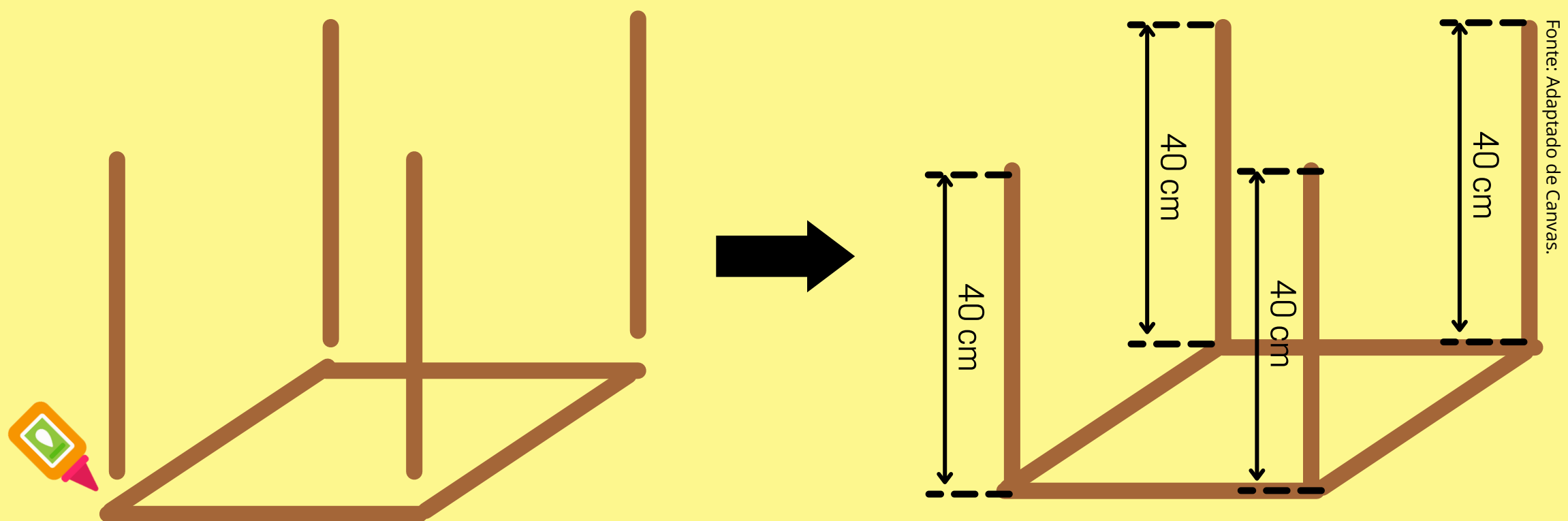
- 30 varetas de 40 cm (como espetos de churrasco ou de algodão-doce);
- 1 pistola de cola quente;
- 1 tubo de cola quente;
- 1 tubo de cola instantânea;
- 63 esferas de poliestireno expandido (EPS) de 25 mm de diâmetro;
- 1 régua de 30 cm;
- 1 tesoura;
- 1 agulha de costura;
- 10 m de elástico (diâmetro 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 mm²;
- 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:

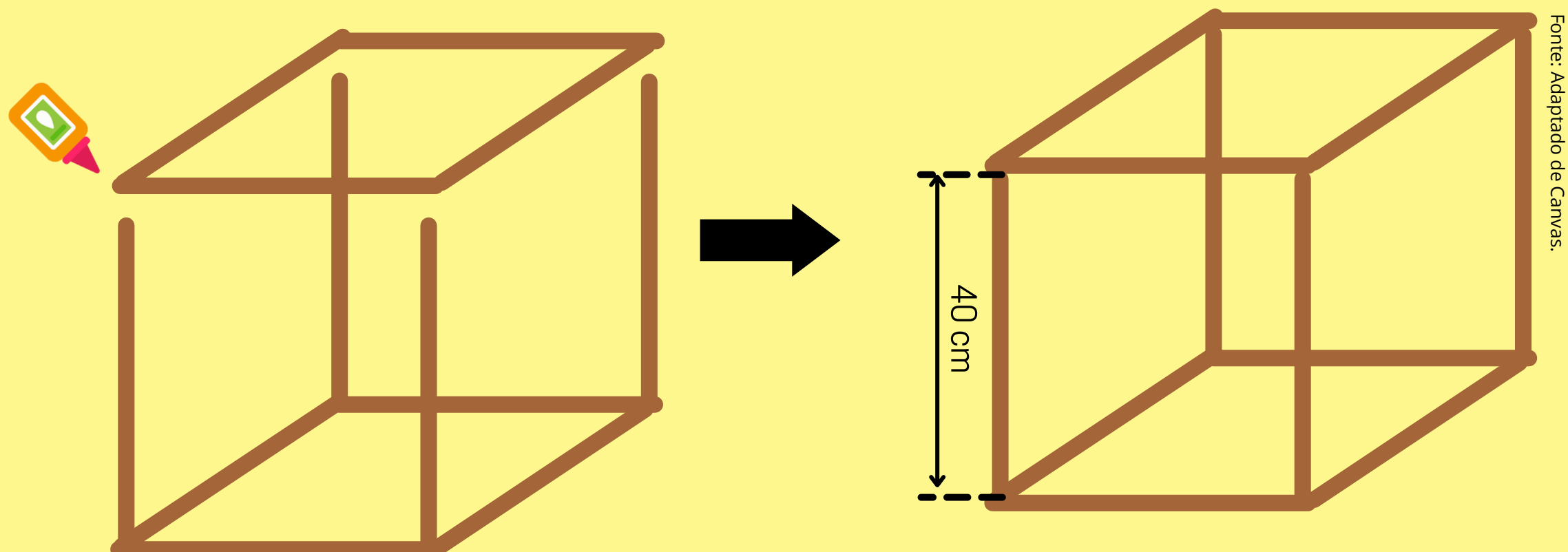
Passo 1: Pegue 8 varetas de 40 cm cada e por meio da cola, una suas extremidades para formar dois quadrados separados, de lados iguais a 40 cm aproximadamente, conforme a figura abaixo:



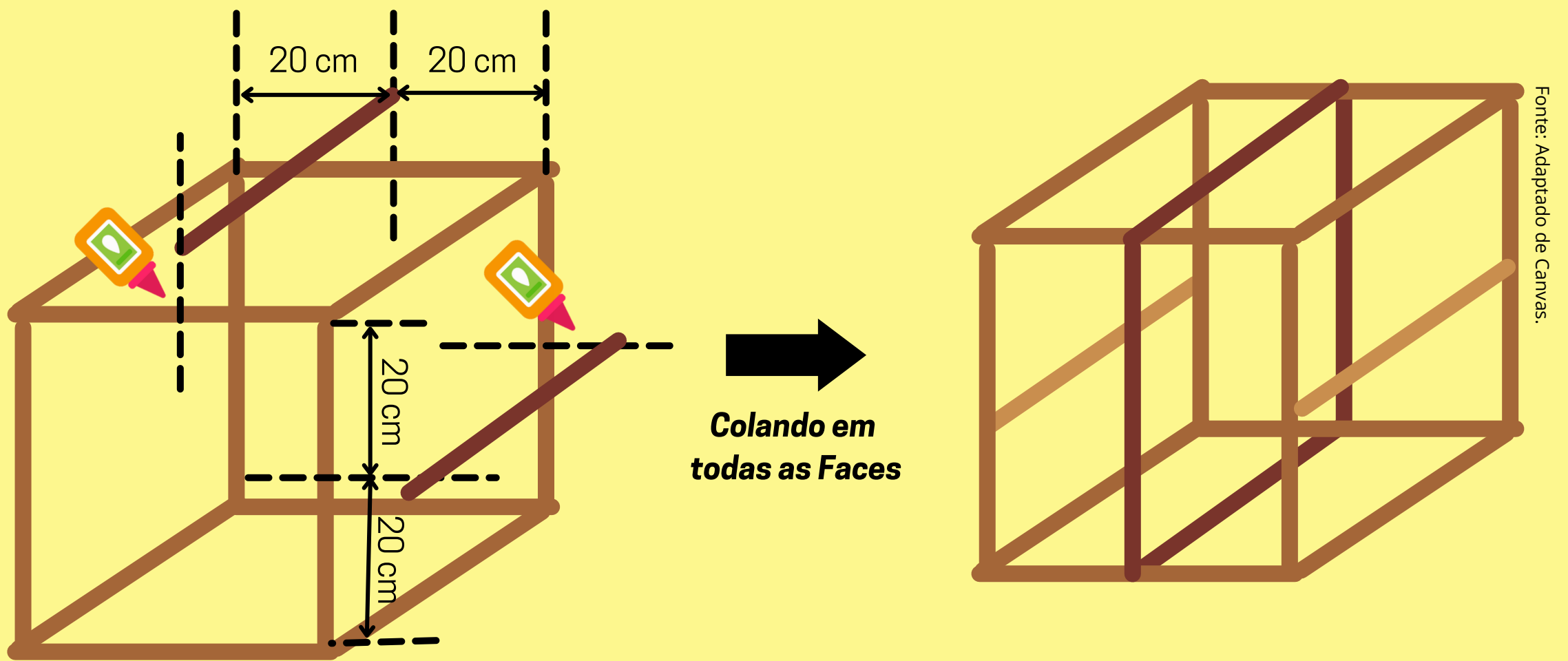
Passo 2: Posicione um dos quadrados sobre uma mesa e em cada vértice cole uma vareta de 40 cm de modo que fique perpendicular aos lados do quadrado, como indicado na ilustração:



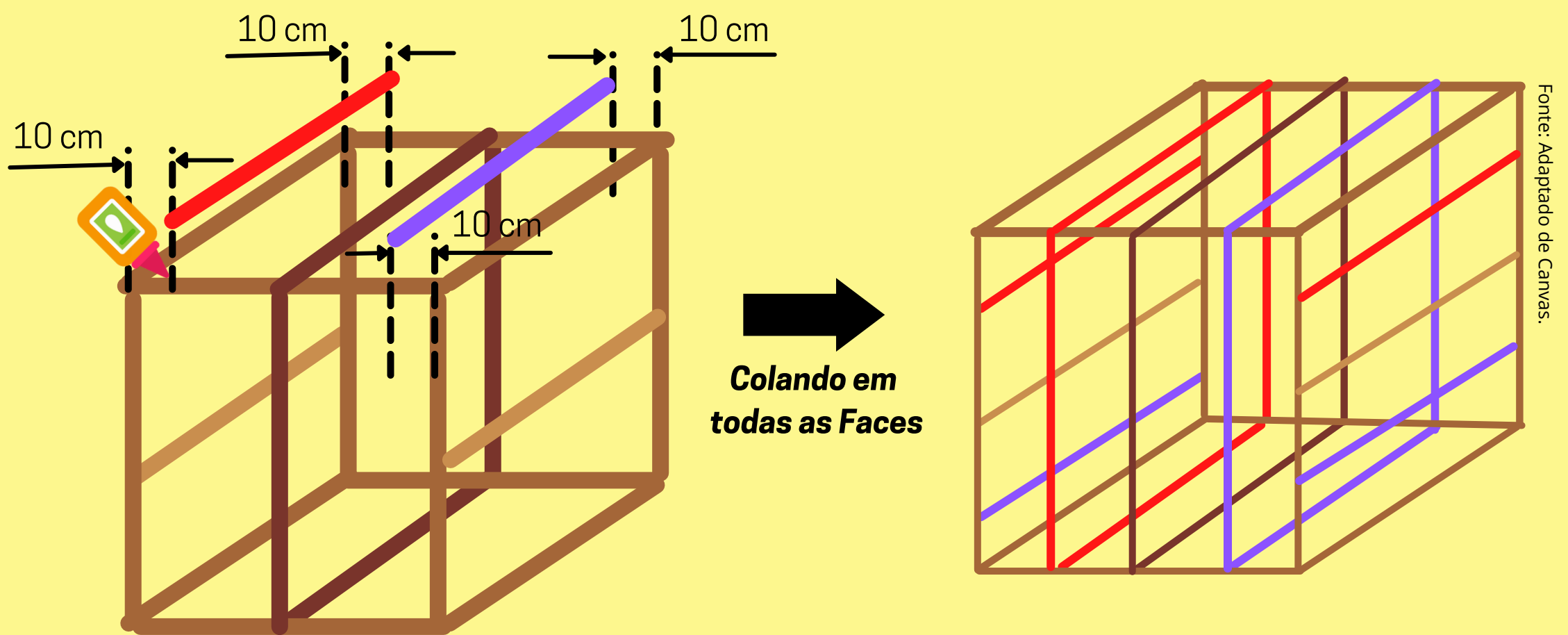
Passo 3: Cole o segundo quadrado nas extremidades das varetas, conforme indicado na figura abaixo. Agora obtemos um cubo completo.



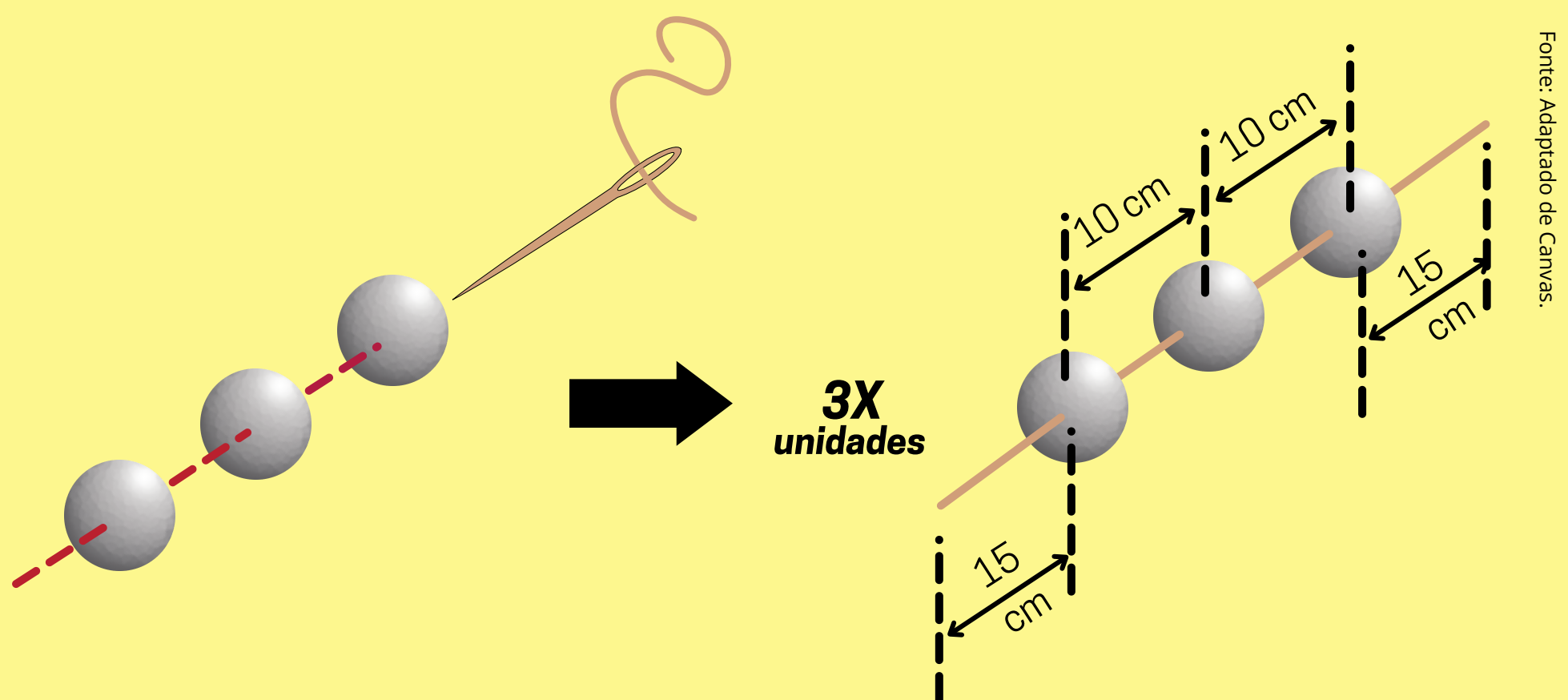
Passo 4: Cole uma vareta no centro de cada uma das faces do cubo formado:



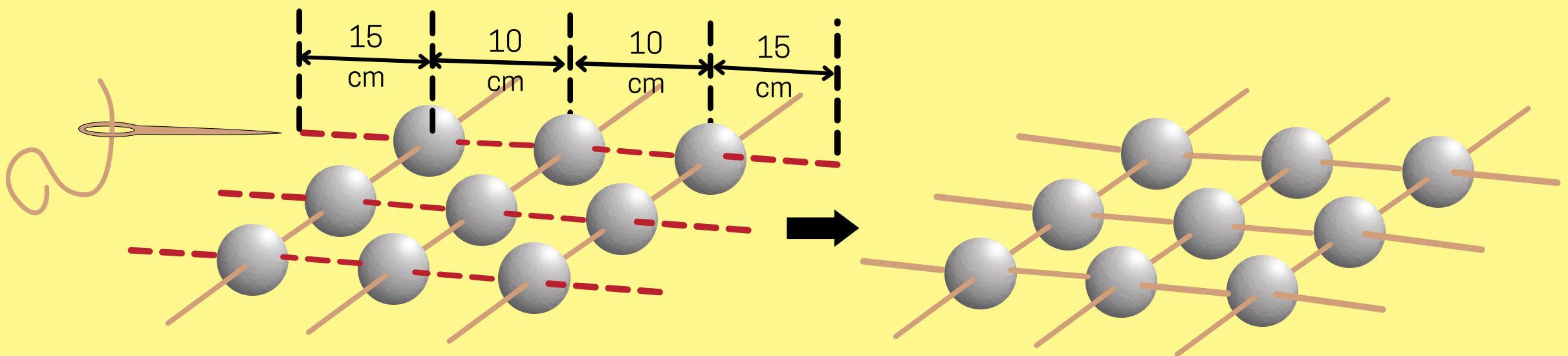
Passo 5: Agora, cole mais duas varretas em cada face, paralelas à vareta central do passo anterior e a 10 cm de cada lado do quadrado, como indicado na ilustração a seguir (indicadas em azul e vermelho). Após isso, a "gaiola" do simulador estará pronta.



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.

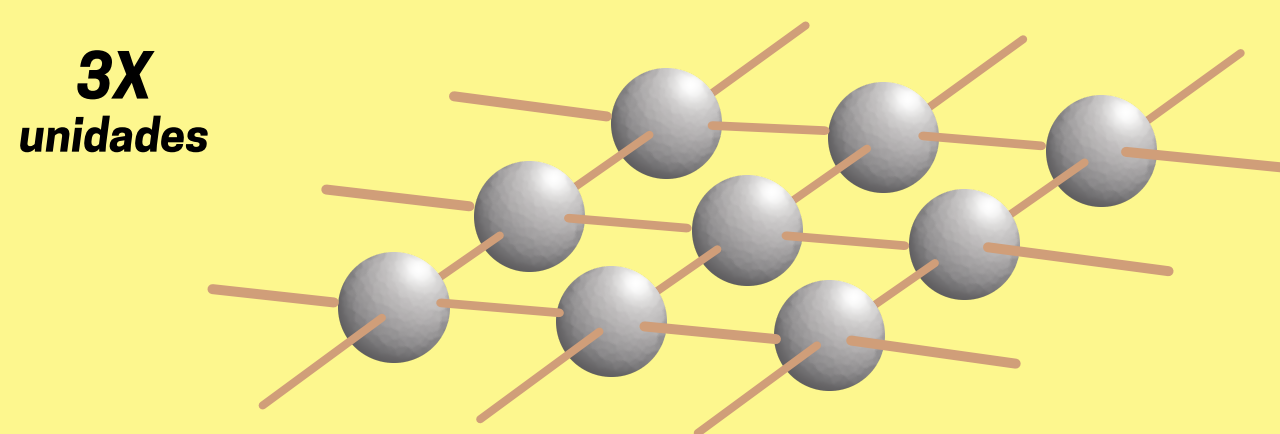


Passo 7: Posicione paralelamente as 3 fileiras de esferas e as interligue com elástico por meio da agulha. Da mesma forma, deixe um espaço de 10 cm entre as fileiras, deixe também sobrando 15 cm de elástico em relação às esferas da extremidade, de modo a formar a malha plana como a indicada abaixo.



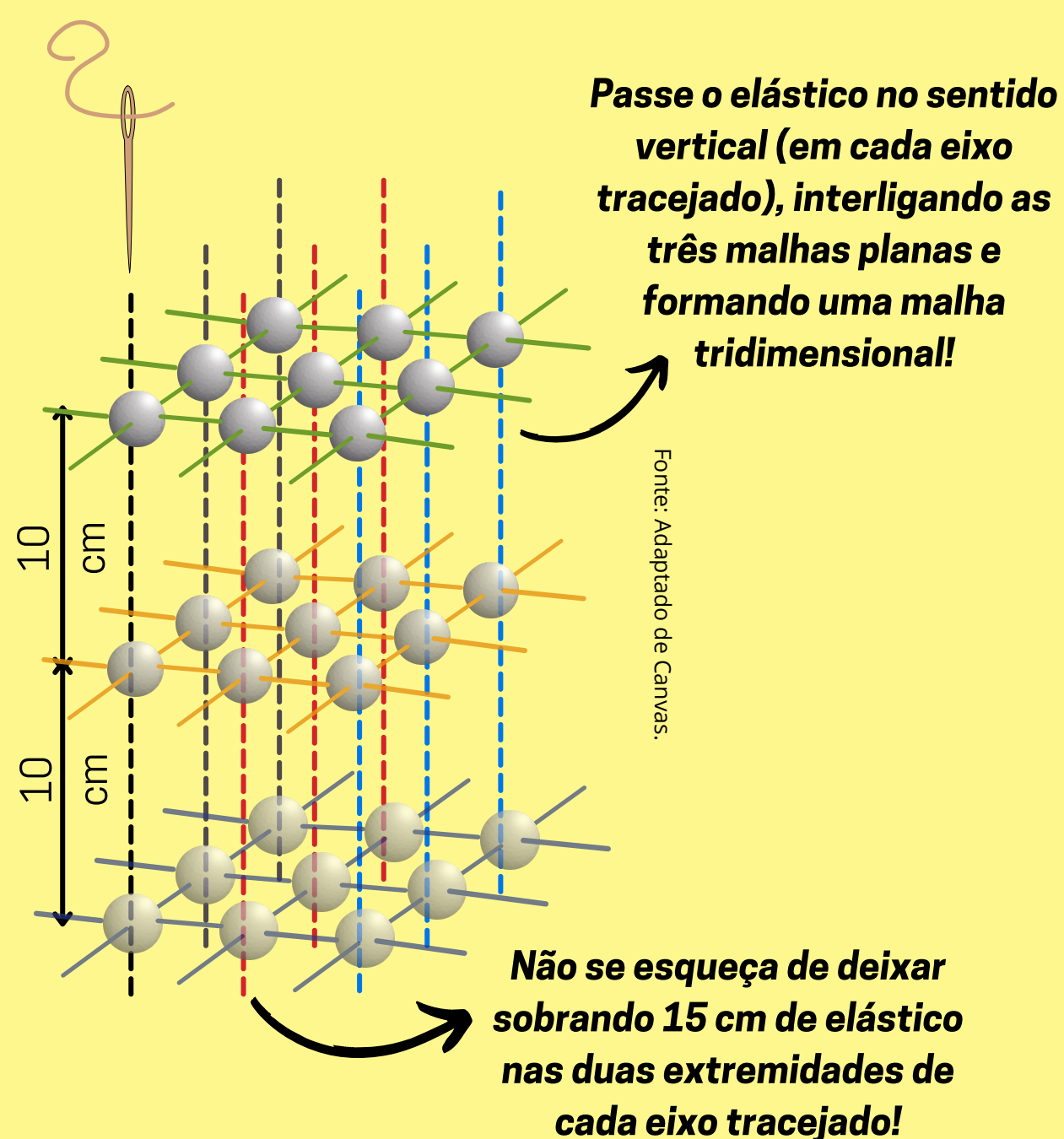
Fonte: Adaptado de Canvas.

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).



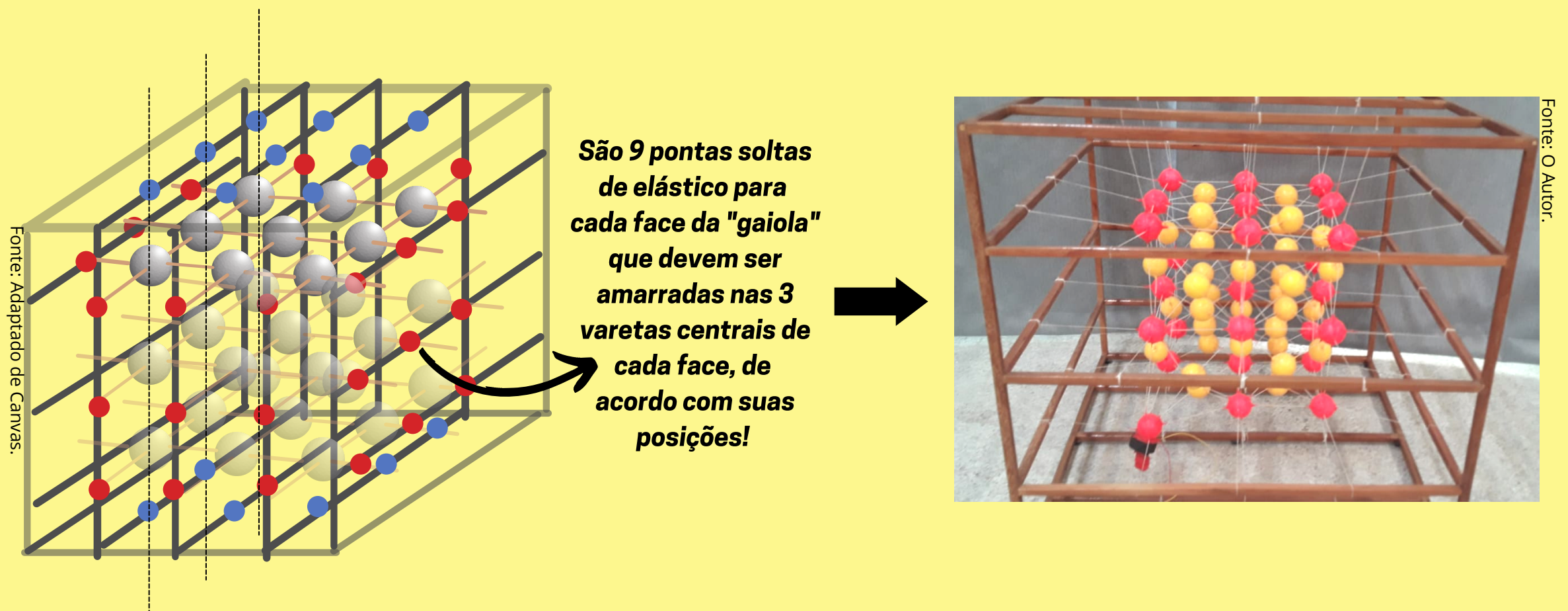
Fonte: Adaptado de Canvas.

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.

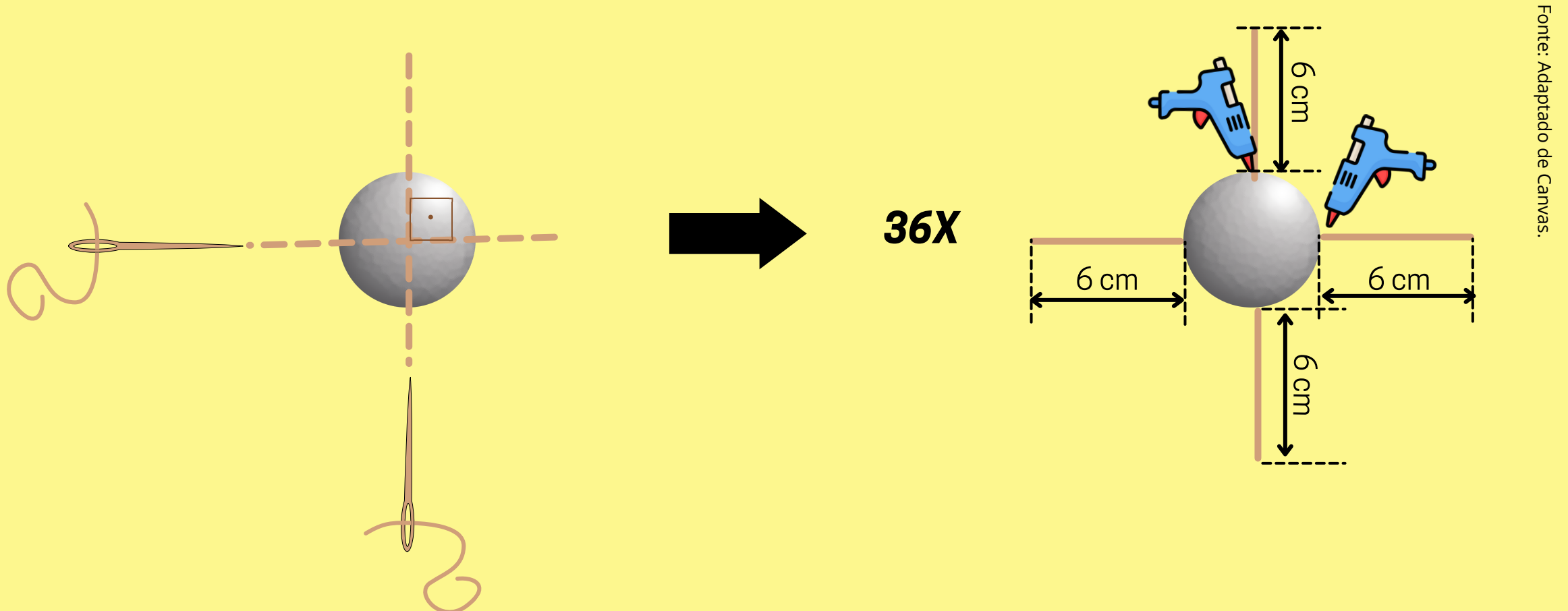
Passo 10: Posicione a malha construída no Passo 9 no interior da "gaiola" finalizada no Passo 5. Por meio das 54 pontas de 15 cm de elástico presentes em cada extremidade de cada fileira e coluna de esferas, amarre nas varetas presentes nas faces do cubo que constitui a "gaiola", como indicado na ilustração (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!



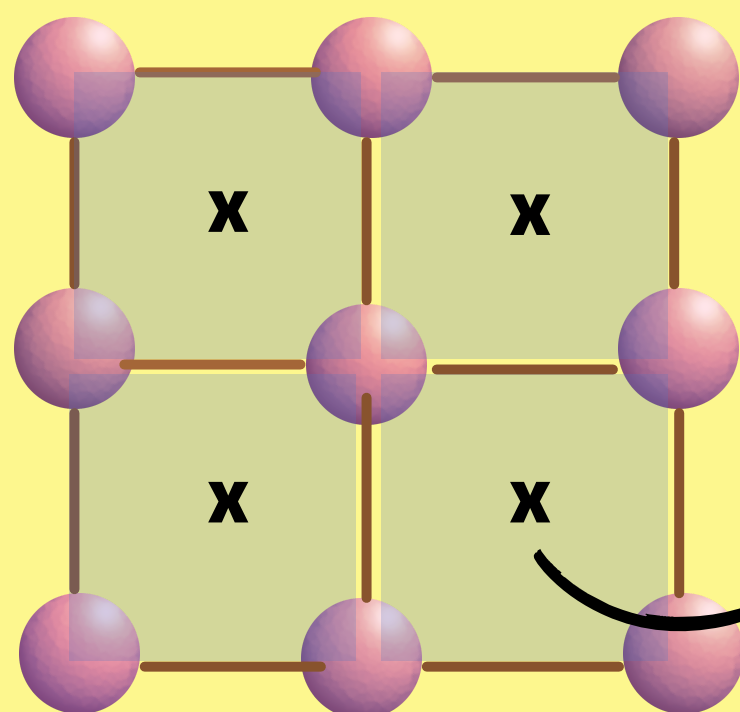
Passo 11: Passe um pouco de cola quente em todos os furos das 27 esferas por onde passaram os elásticos, a fim de evitar que elas deslizem pelo elástico.

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:

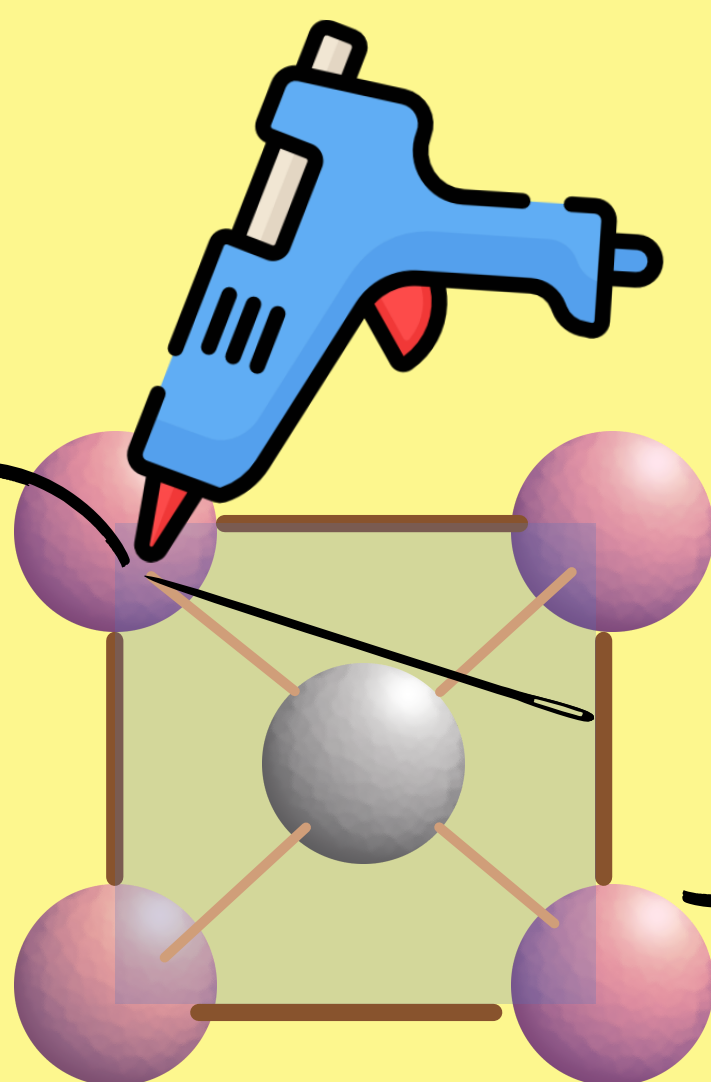


Fonte: Adaptado de Canvas.

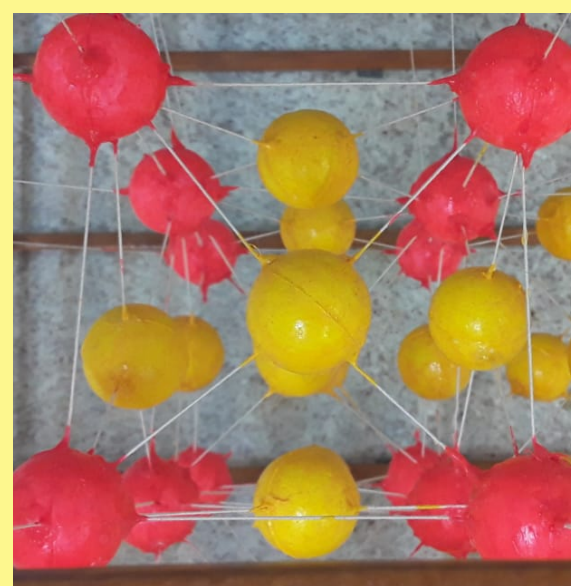
Todas as faces da rede finalizada no Passo 12 são formadas por 4 quadrados menores (em azul). Esta estrutura de quadrados também aparece internamente na rede (nas três direções)!

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!



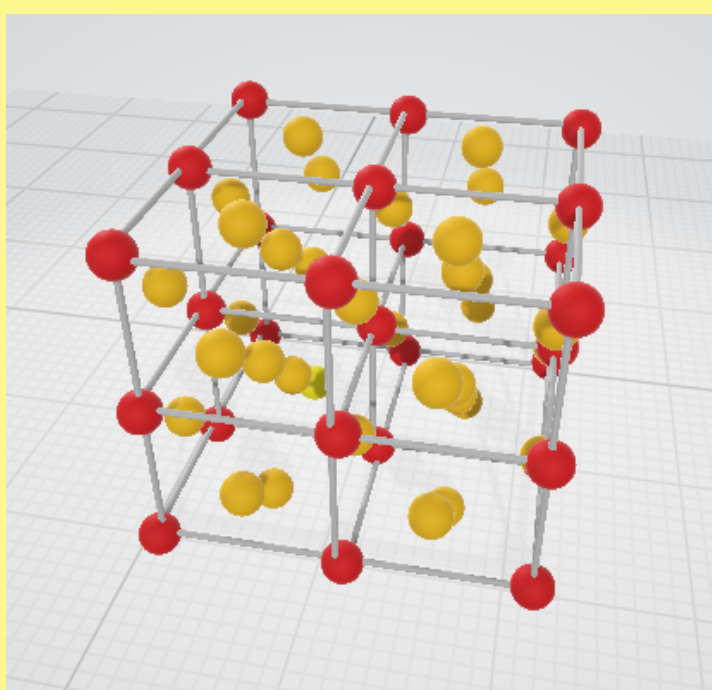
Fonte: Adaptado de Canvas.



Fonte: O Autor.

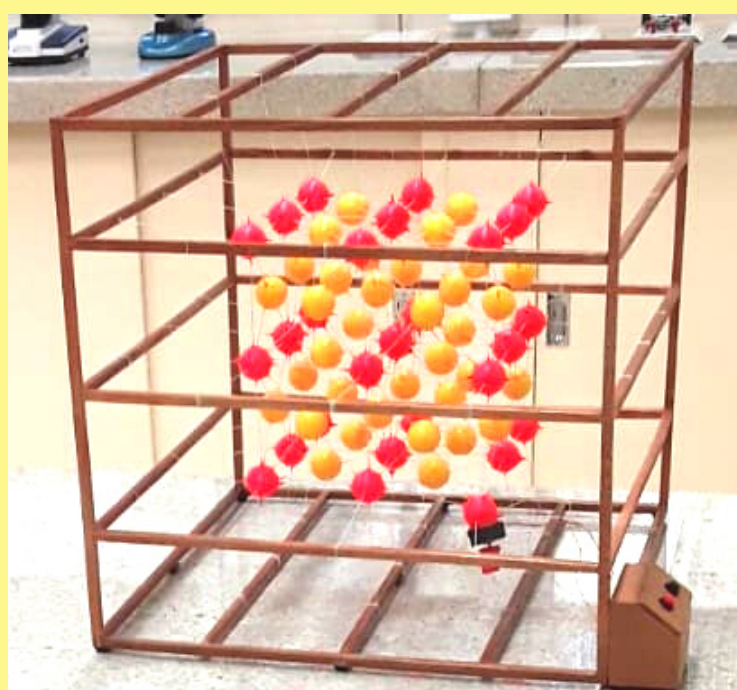
Modelo real.

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. 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:



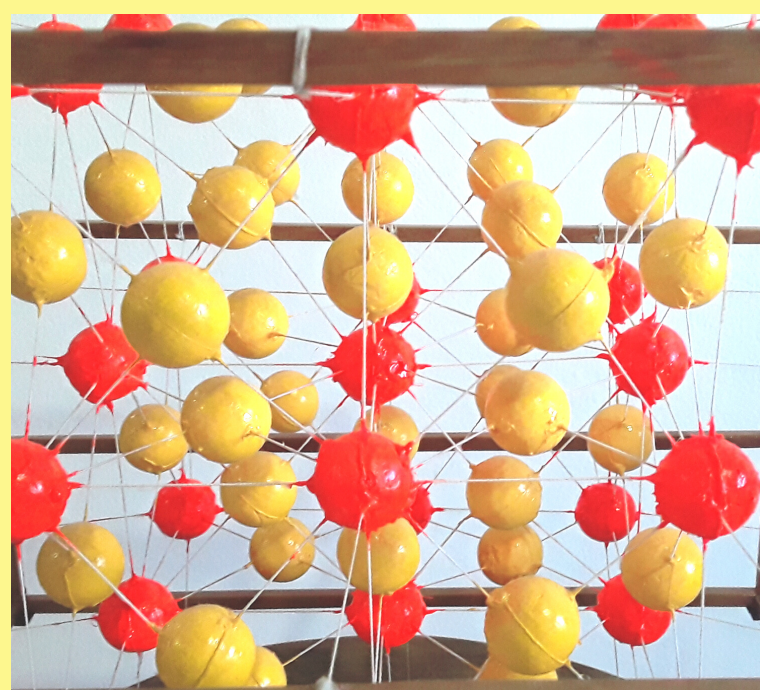
Fonte: O Autor.

Modelo 3D do cristal representado por este simulador.



Fonte: O Autor.

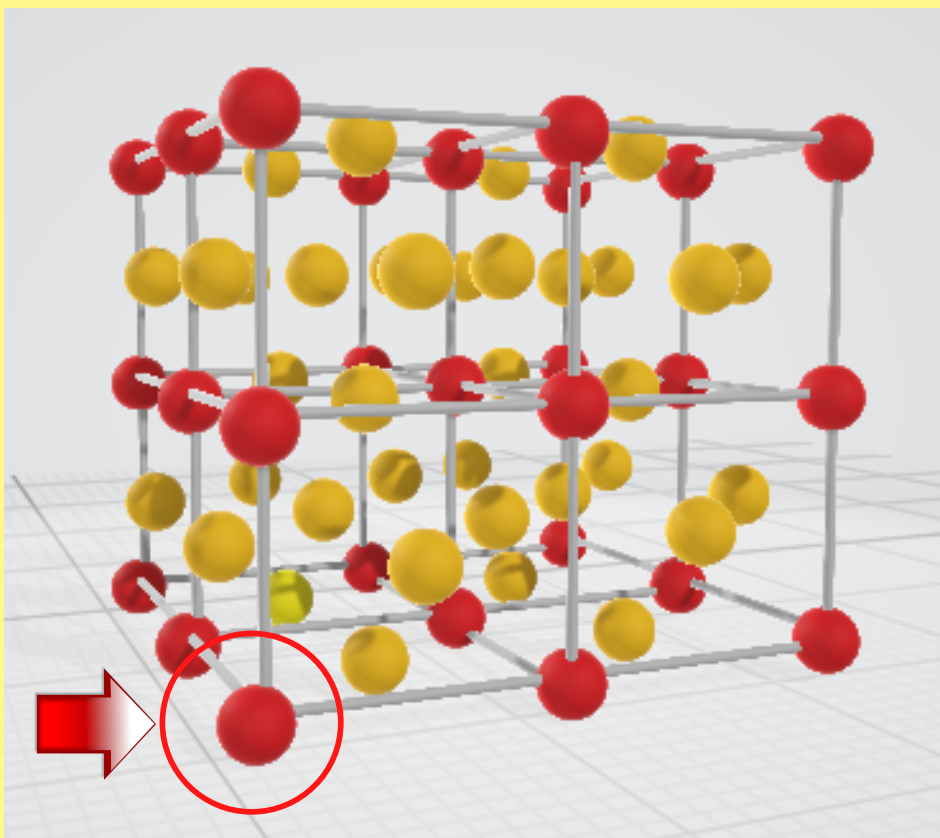
Simulador construído mostrando a rede cristalina simulada.



Fonte: O Autor.

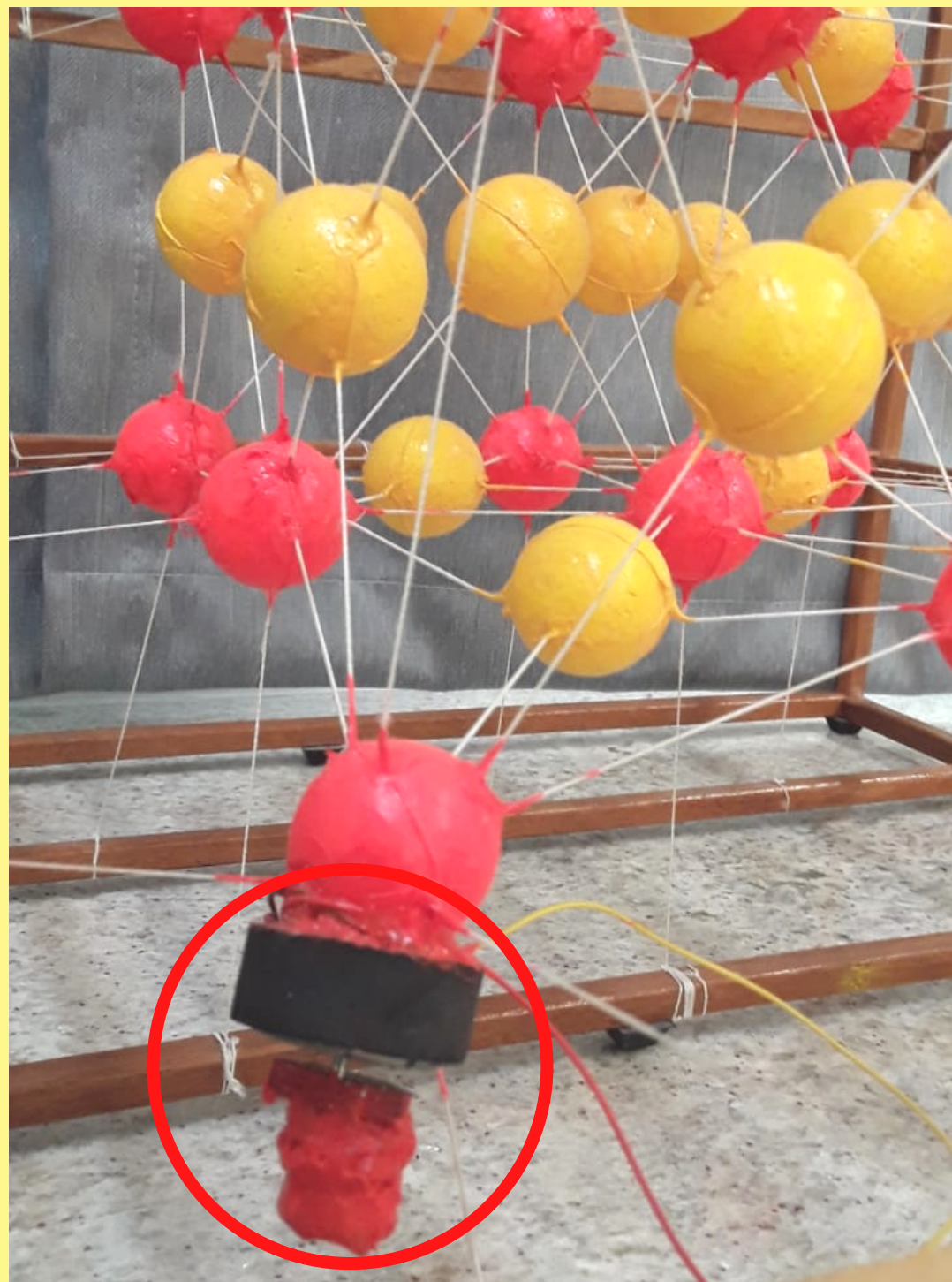
Detalhe da rede construída mostrando os elásticos e as esferas já pintadas.

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.

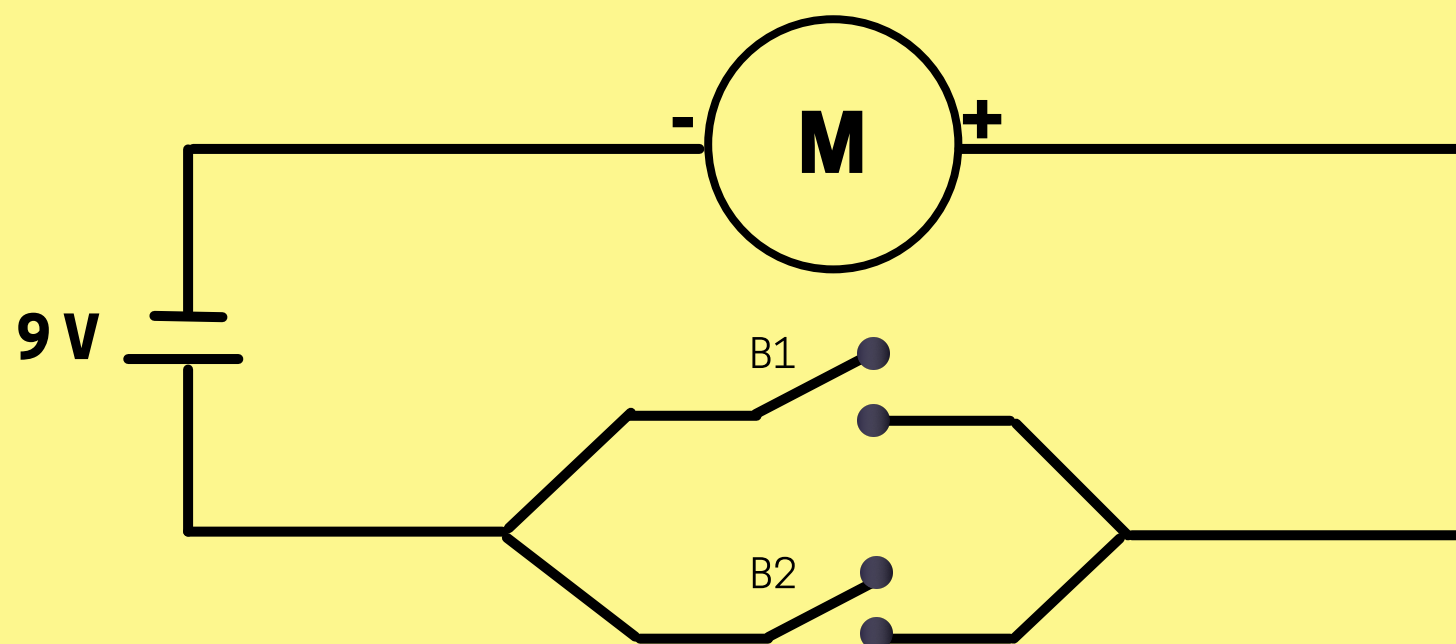
Motor vibrador (em destaque) fixado na esfera primária do simulador mecânico real.



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:

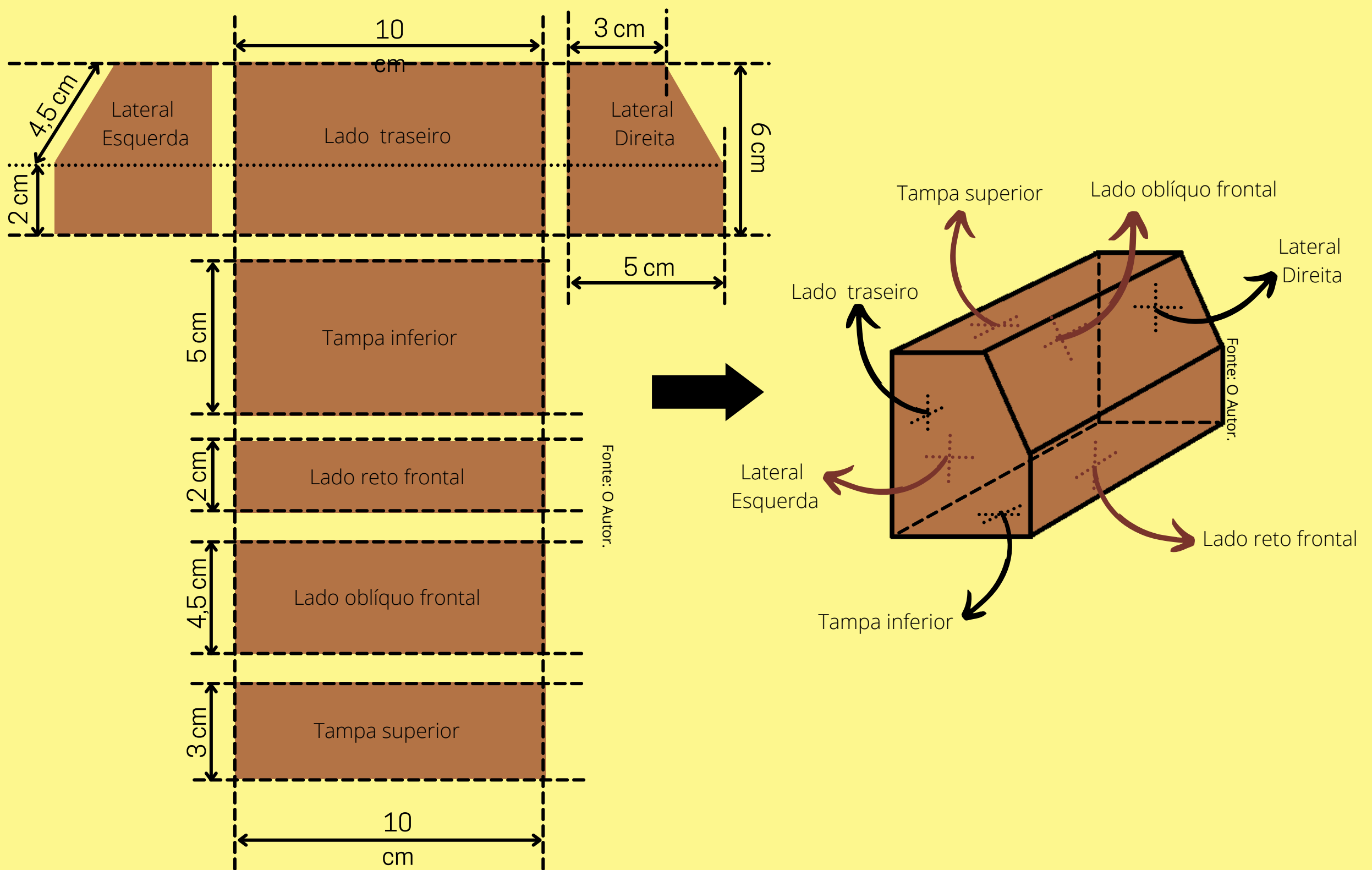
Motor 5V de Corrente Contínua (DC).

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

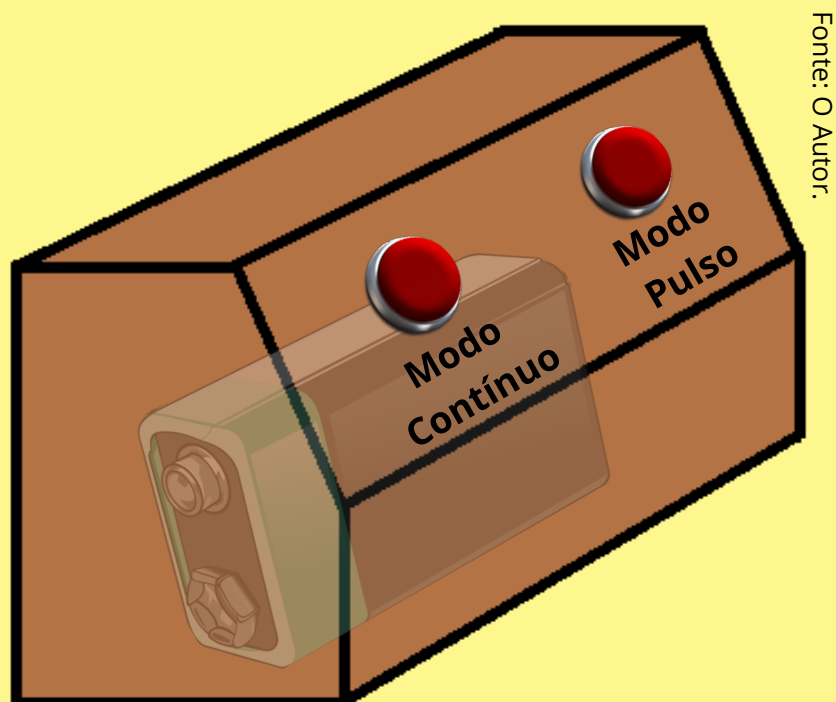
Botão com trava.

Botão sem trava.

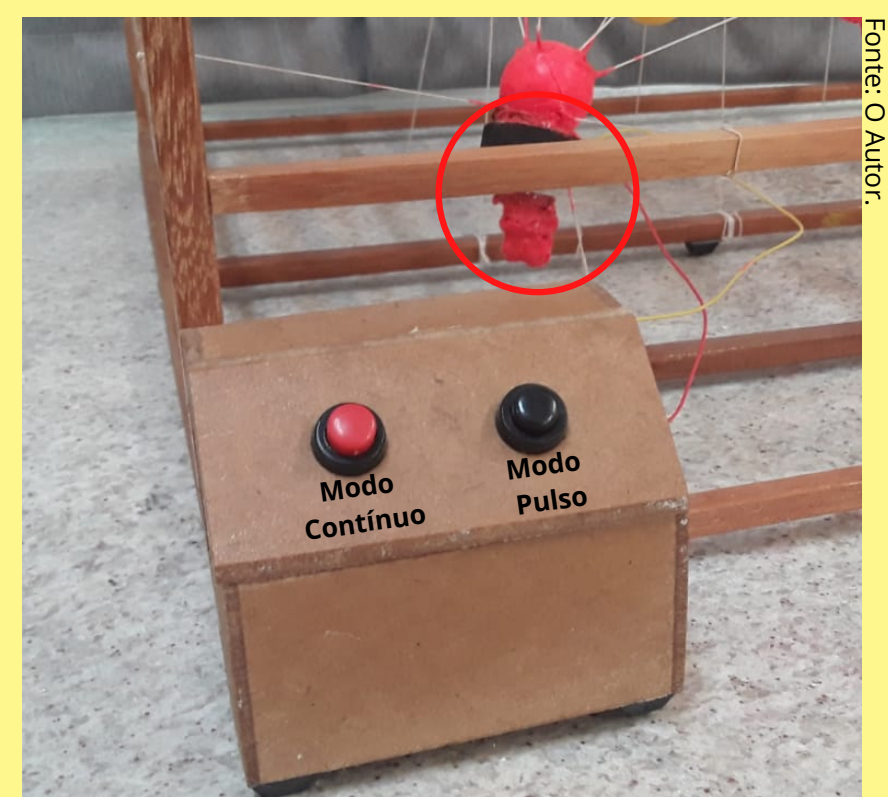
Passo 18: Construa uma pequena caixa para acomodar seu circuito elétrico. Essa caixa servirá como painel de controle do simulador. Abaixo, seguem as dimensões das 7 peças que constitui o painel proposto. Estas peças foram idealizadas para serem construídas em MDF e unidas com cola instantânea. O *lado 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).

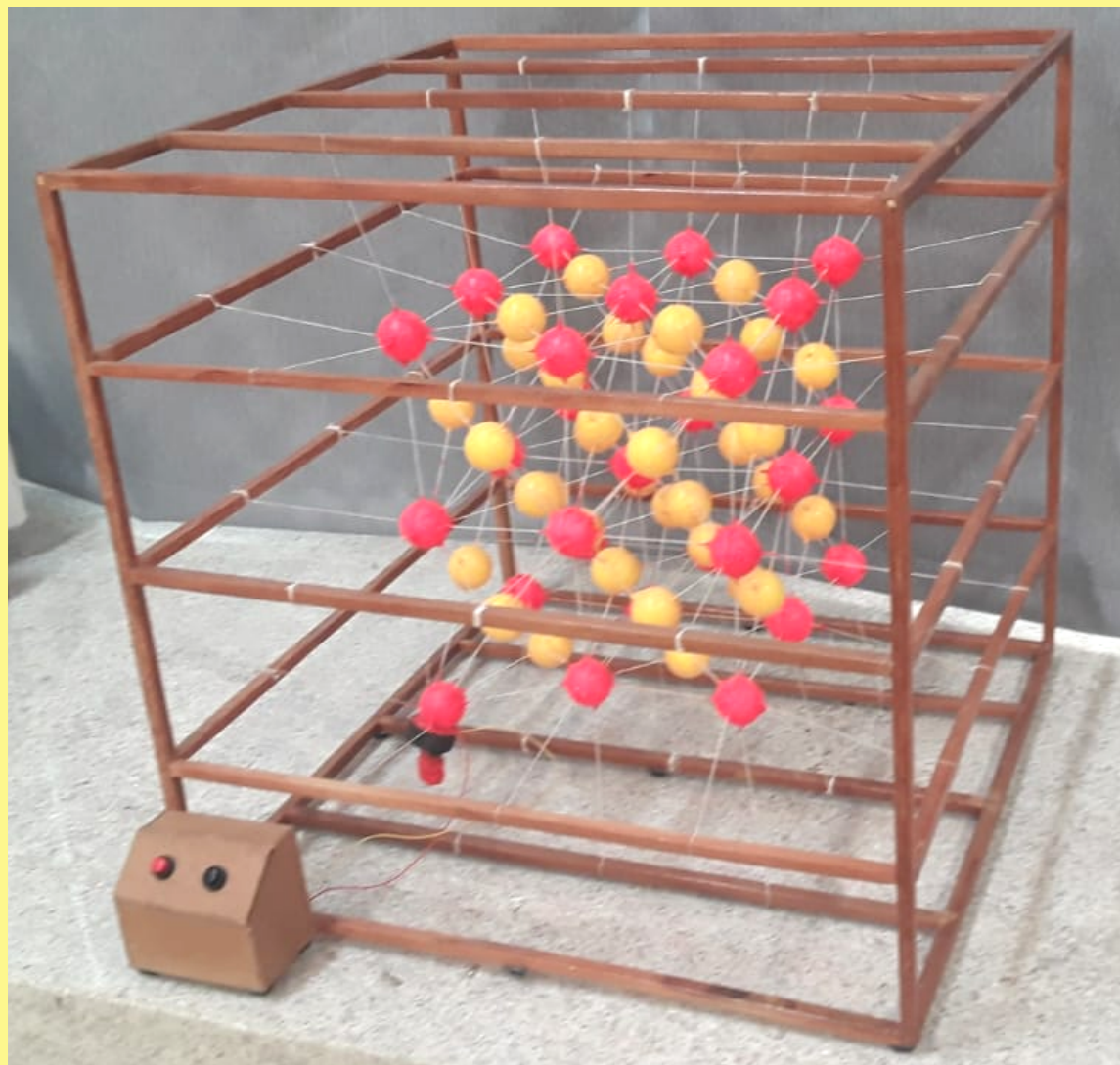


Montagem final do painel com os botões fixados e identificados. A bateria de 9V deve ser posicionada horizontalmente, conforme indicado acima.



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?

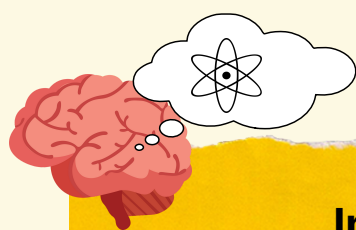
Resposta contendo a análise de seu grupo:  **Ao se acionar o simulador, não é difícil perceber que há regiões mais agitadas que outras, onde pode-se inferir que se tratam de regiões com maior temperatura. A região com maior temperatura é aquela localizada na vizinhança da esfera primária (átomo estimulado). 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°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°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:

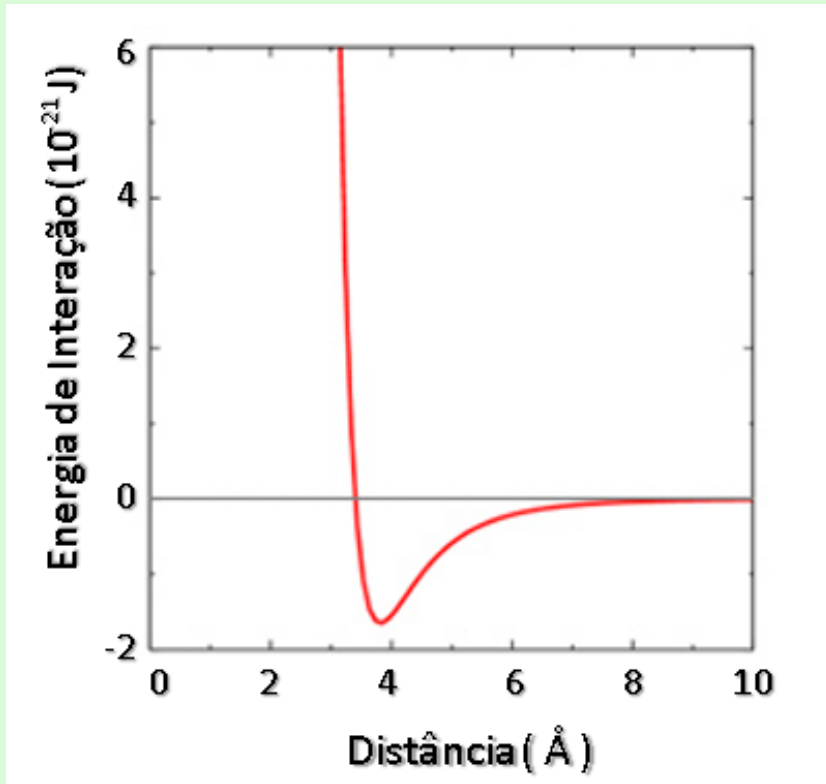
a) Na simulação, se apenas um átomo possui movimento, como os outros átomos adquirem movimento? Como esse "movimento térmico" se propaga na rede?

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.

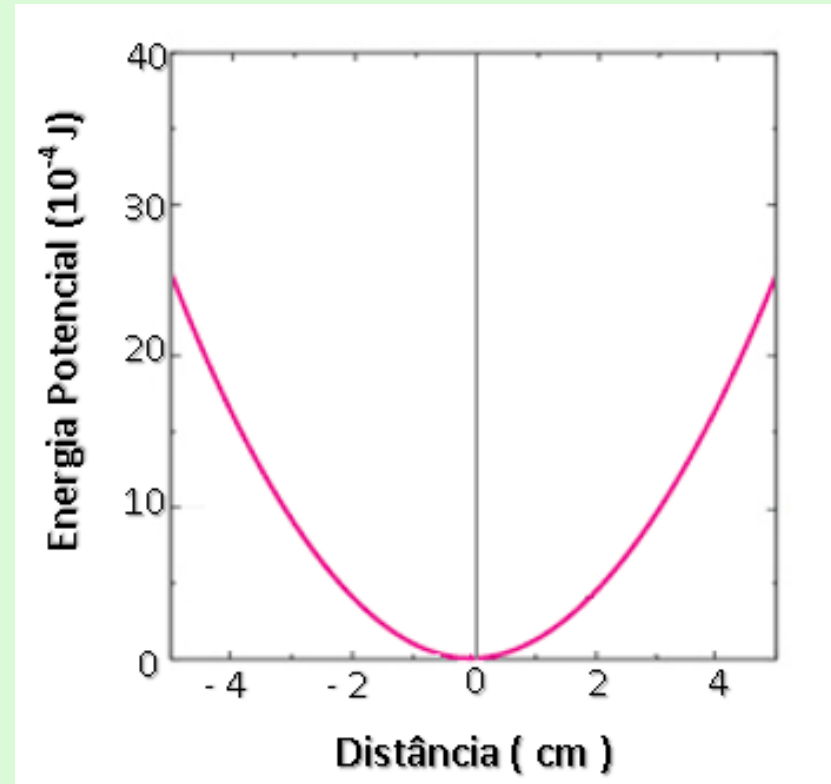
Resposta contendo a análise de seu grupo:  **Os elásticos são os responsáveis por transmitir o movimento de uma esfera à outra, permitindo que a energia cinética se propague pela rede cristalina simulada inteira. Na simulação os elásticos também são responsáveis pela coesão entre as esferas e a organização 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:



Fonte: Adaptado de Madeira e Vitteio (Unicamp).


Potencial de Lennard-Jones para o Argônio.




Fonte: O Autor.

Energia Potencial Elástica armazenada por 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:  **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!



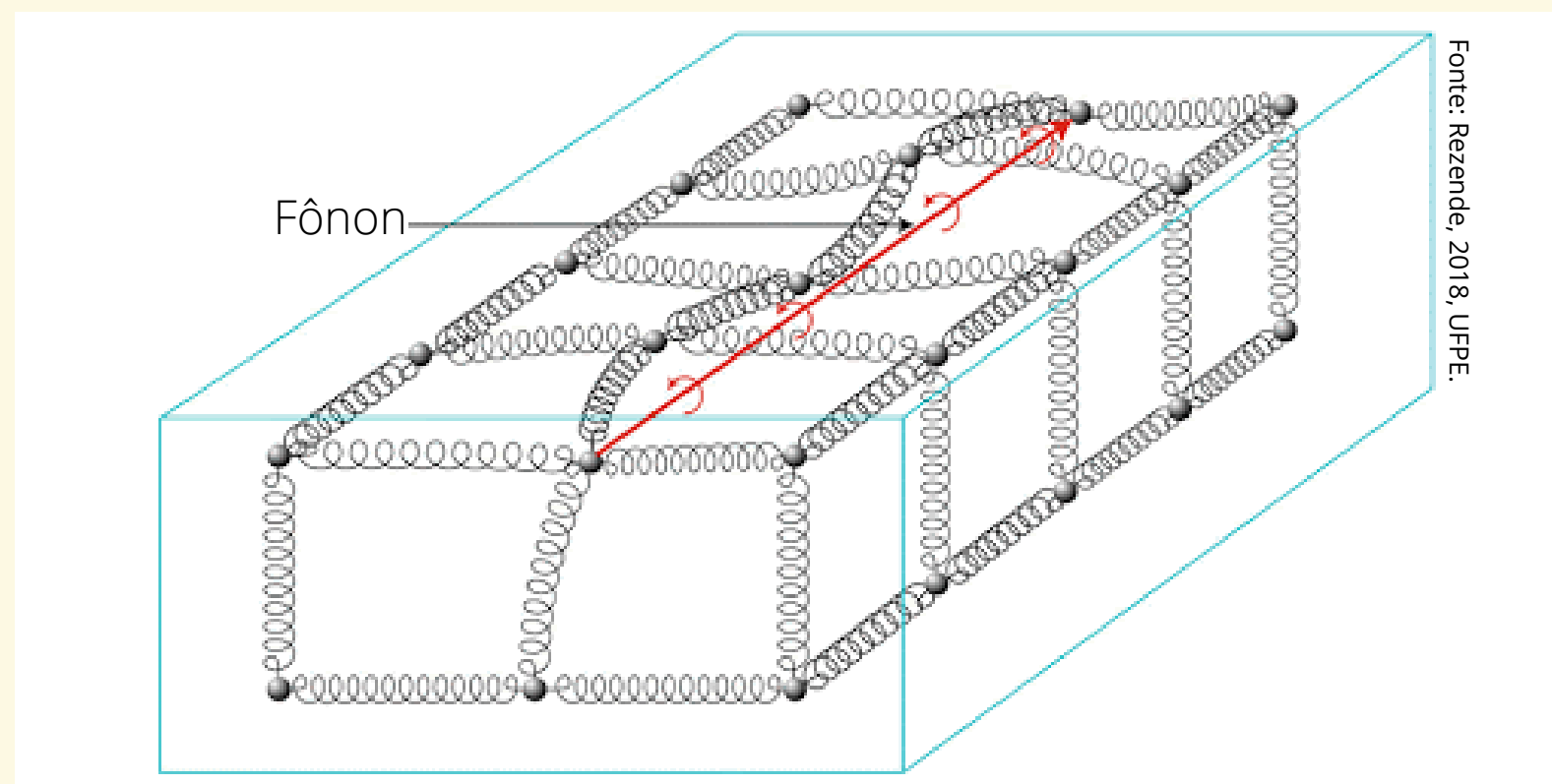
Os Fônons

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.

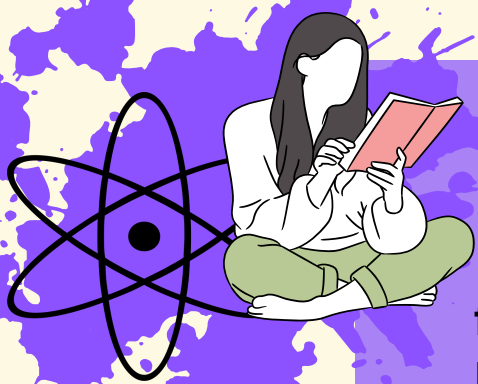
Se considerássemos a rede na menor temperatura possível, dada pelo zero absoluto, observaríamos os átomos da rede em repouso, em posições fixas, exatamente como definida pela rede de Bravais. À medida que a temperatura fosse aumentando, as partículas começariam a se agitar cada vez mais, mas em torno 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-phonons-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

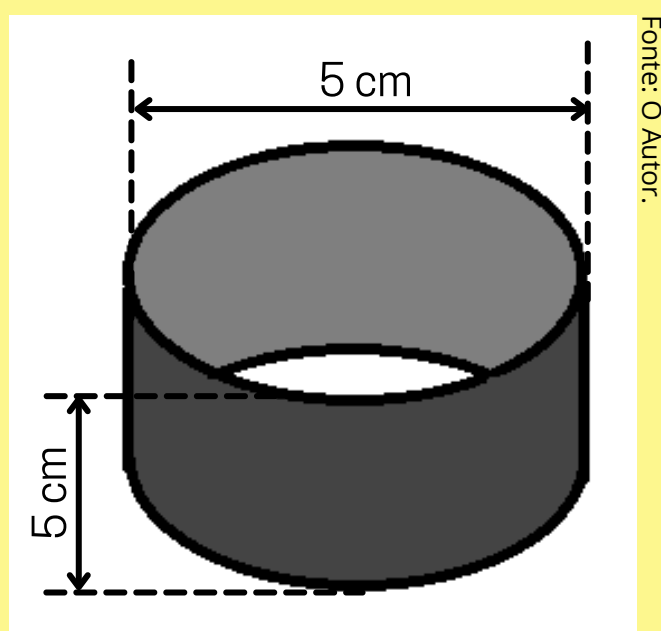


Materiais necessários:

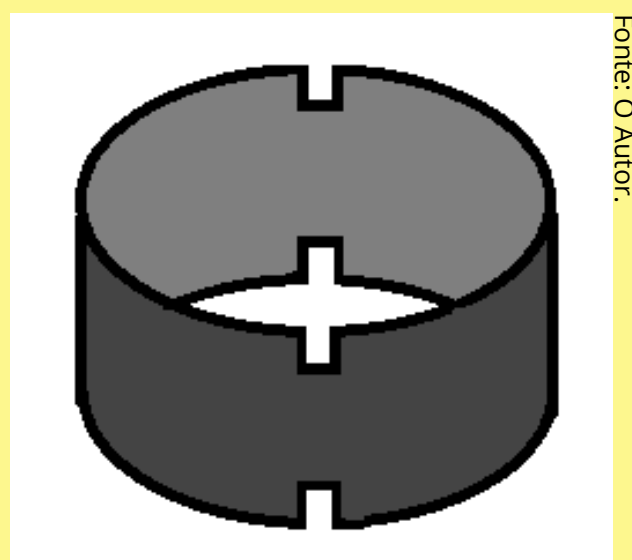
- 1 folha de papel cartão;
- 1 folha de papel sulfite;
- 2 palitos de dente;
- 1 pacote de espetos de churrasco;
- impressora com tinta colorida;
- 1 tubo de cola instantânea;
- 1 pistola de cola quente;
- 1 tubo de cola quente;
- 1 lápis de escrever;
- 1 esfera de poliestireno expandido (EPS) de 10 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:

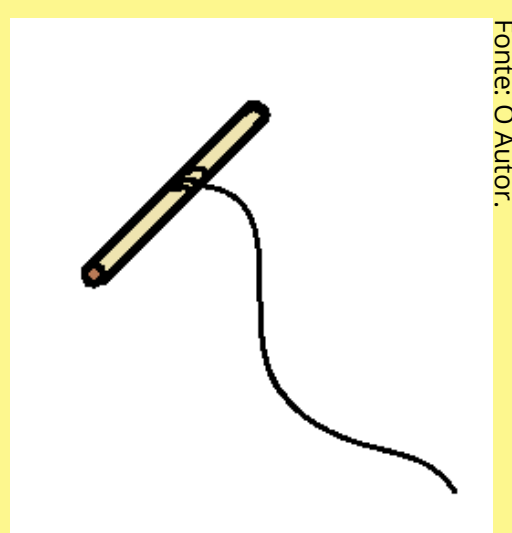
Passo 1: Pegue o papel cartão e corte um retângulo de 36 cm x 5 cm . Passe um pouco de cola instantânea ao longo deste retângulo. Enrole-o de modo a formar um canudo de diâmetro de 5 cm e altura de 5 cm. Você perceberá que o comprimento do retângulo é suficiente para constituir duas voltas, tornando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



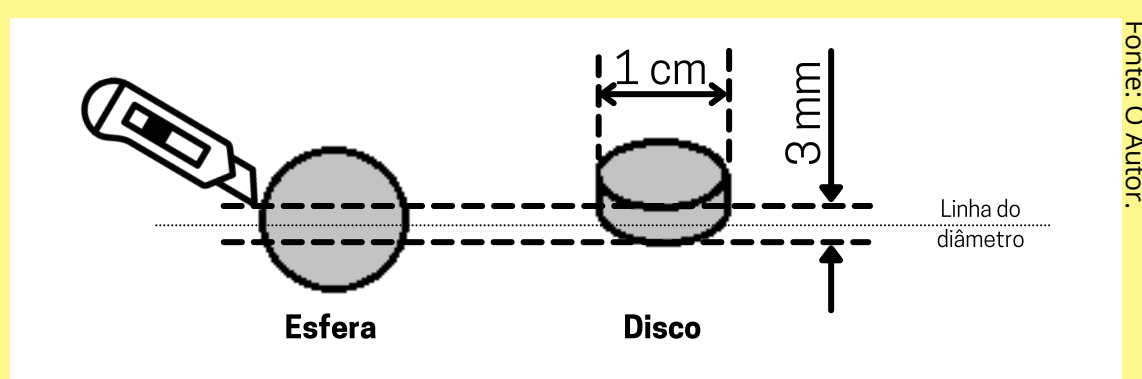
Passo 2: Recorte dois rebaixos quadrados de arresta de 2 mm no tubo e diametralmente opostos em cada extremidade, de acordo com a figura:



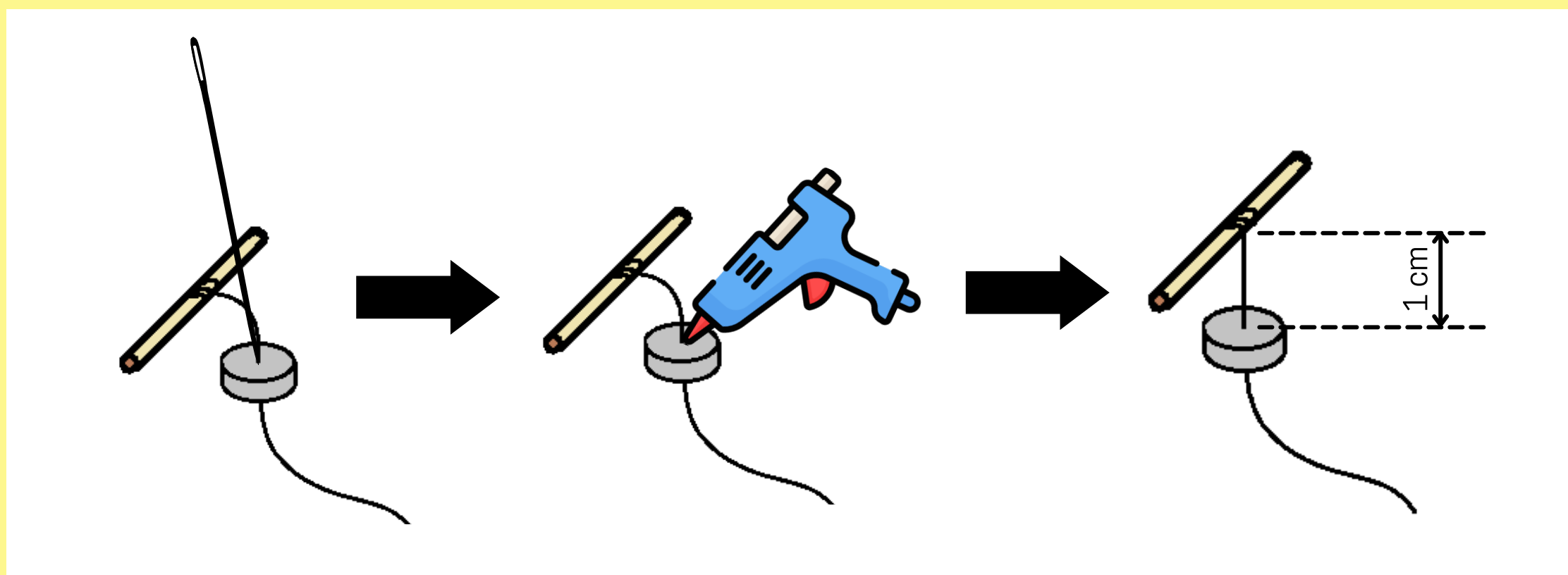
Passo 3: Recorte as pontas dos palitos de dente, de modo a deixá-los com comprimento de 5 cm. Pegue um deles e amarre ao centro um pedaço de elástico de 10 cm, como ilustrado na figura a seguir:



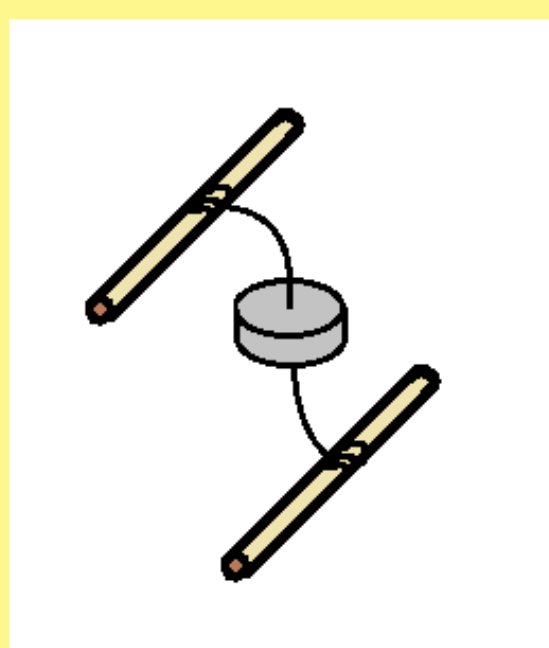
Passo 4: Recorte a esfera de EPS com o estilete, tomando por referência o diâmetro, de modo a formar um disco com o mesmo diâmetro da esfera (10 mm = 1cm) e espessura de 3 mm, como indicado abaixo:



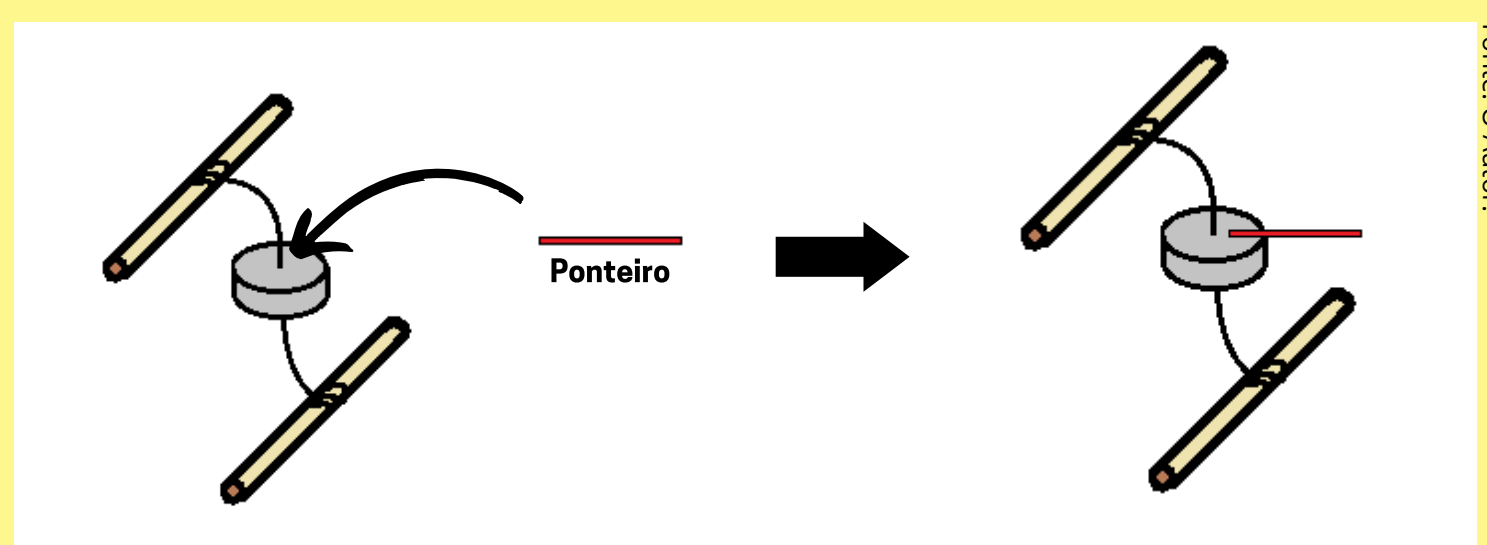
Passo 5: Por meio da agulha, passe a extremidade solta do elástico obtida no Passo 3 no centro do disco construído no Passo 4. Através da cola quente, fixe o disco a 1 cm do palito de dente (como ilustrado abaixo).



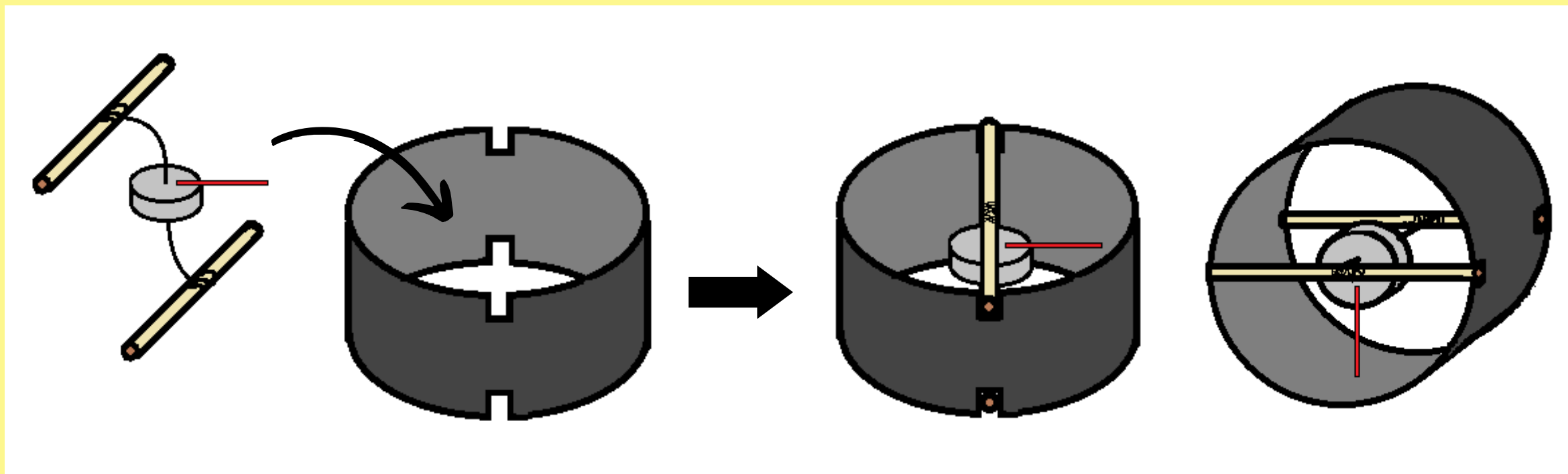
Passo 6: Amarre a outra extremidade do elástico no outro palito de dente. Da mesma forma que no passo anterior, deixe 1 cm de elástico entre o palito e o disco central. A figura a seguir ilustra o conjunto obtido:



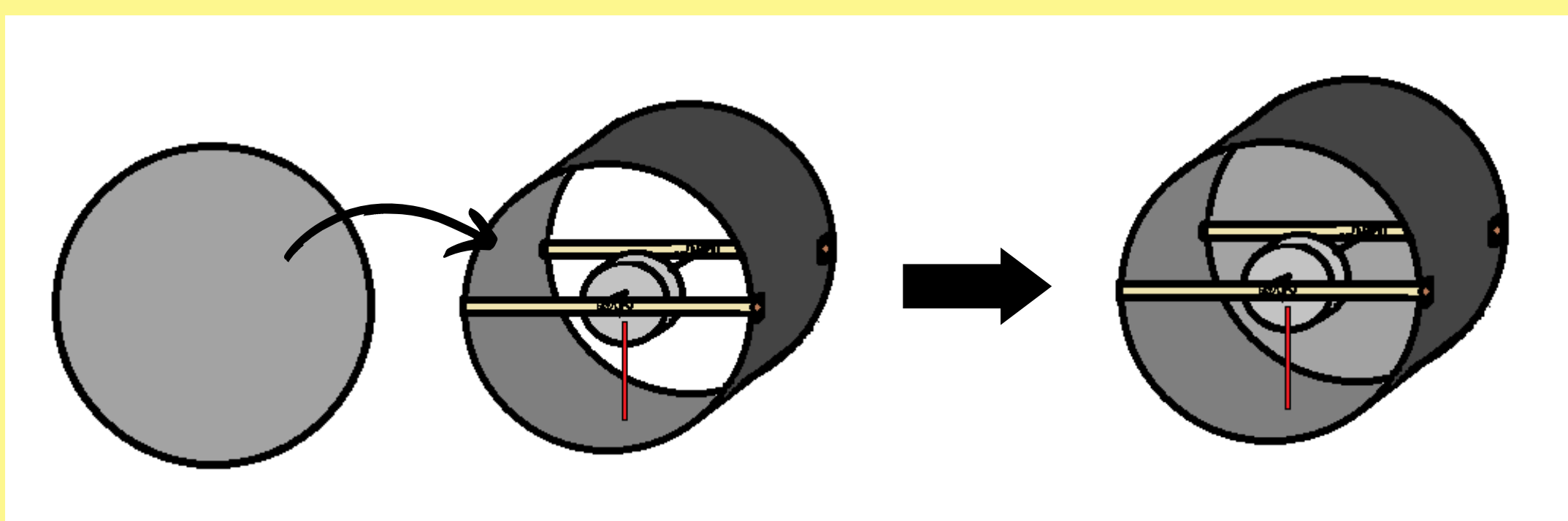
Passo 7: Através do estilete, corte o espeto de churrasco de modo a obter uma pequena vareta de 4 cm de comprimento e 2 mm de espessura. Pinte essa vareta de vermelho, pois ela será nosso ponteiro. Por fim, cole o ponteiro por meio da cola instantânea ao centro do disco do conjunto formado no passo anterior,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



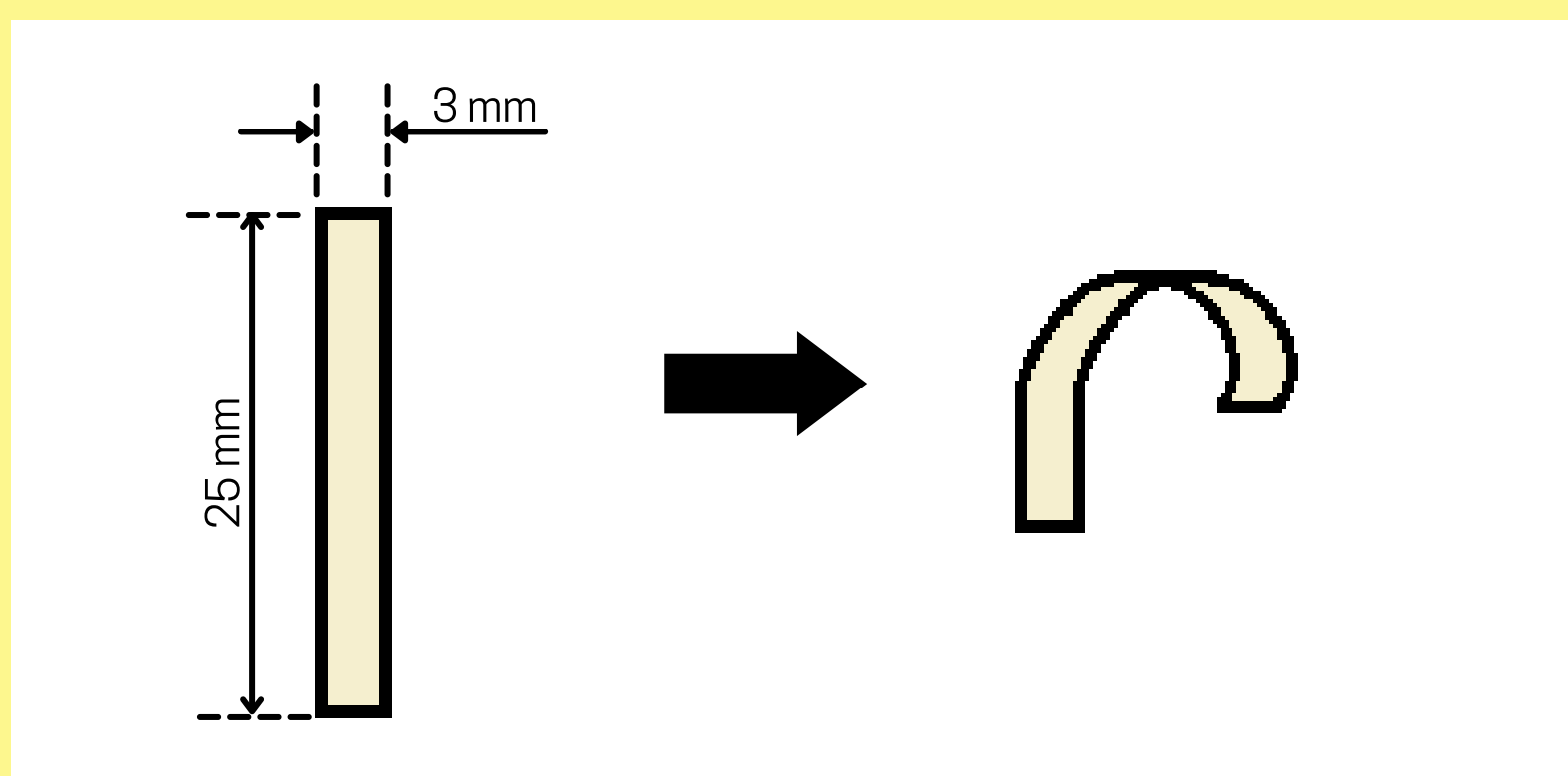
Passo 8: Insira o conjunto construído no Passo 7 no interior do tubo confeccionado no Passo 2. Para isso, coloque cada palito nos rebaixos das extremidades do tubo. Naturalmente, o elástico se manterá tensionado, sustentando o disco central e o ponteiro. Ajuste os palitos de modo a posicionar o ponteiro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



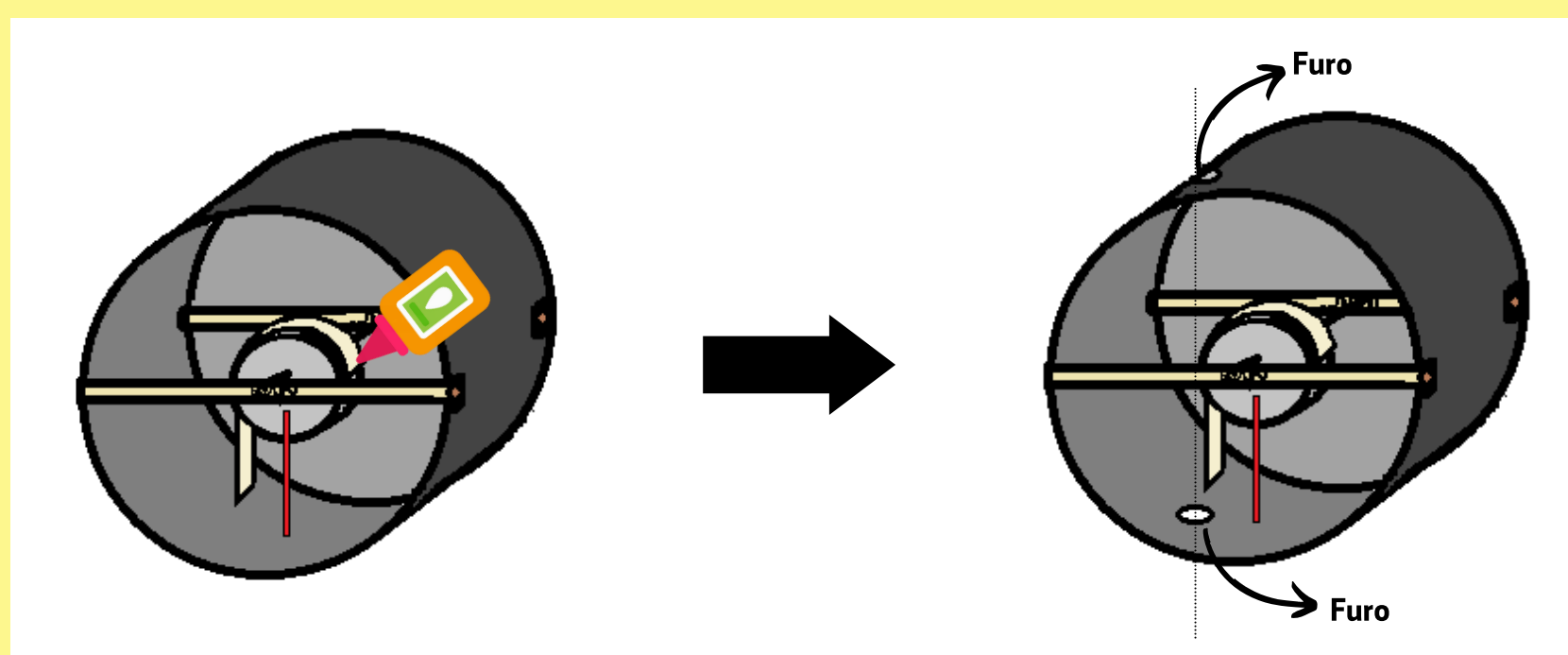
Passo 9: Corte um círculo de 5 cm de diâmetro no papel cartão. Ele será a tampa de fundo do tubo do vibrômetro, fixe-a com cola instantânea (figura abaixo).



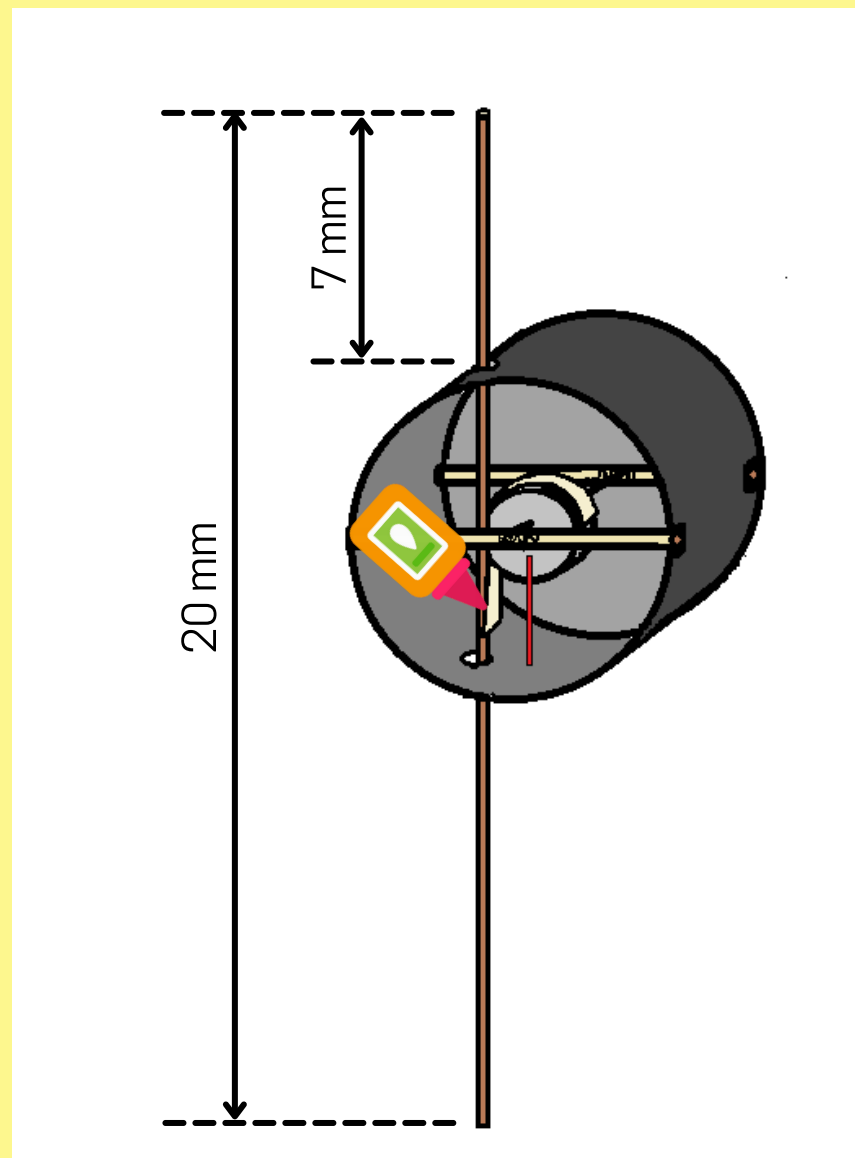
Passo 10: Corte um pequeno retângulo de 25 mm x 3 mm no papel sulfite. Curve com os dedos uma das extremidades deste retângulo, conforme a figura abaixo. Esta será a "lâmina" do vibrômetro.



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.



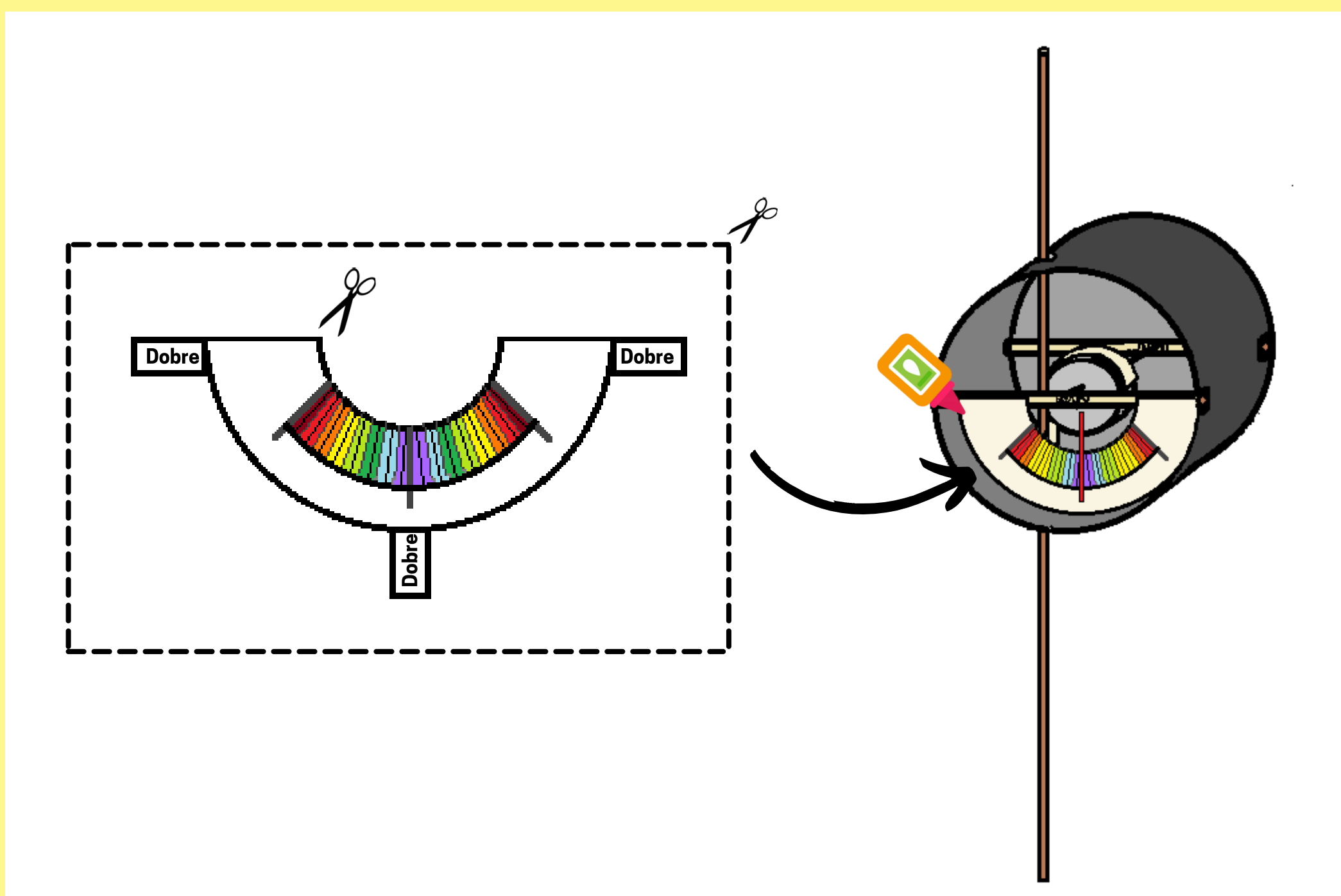
Passo 12: Com um estilete corte um espeto de churrasco e confeccione uma vareta menor, com diâmetro de 3 mm e comprimento de 200 mm. Esta é a vareta de medição. Introduza essa vareta nos furos do tubo do vibrômetro e posicione-a de modo que a ponta superior tenha 7 mm, de acordo com a figura a seguir.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



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>

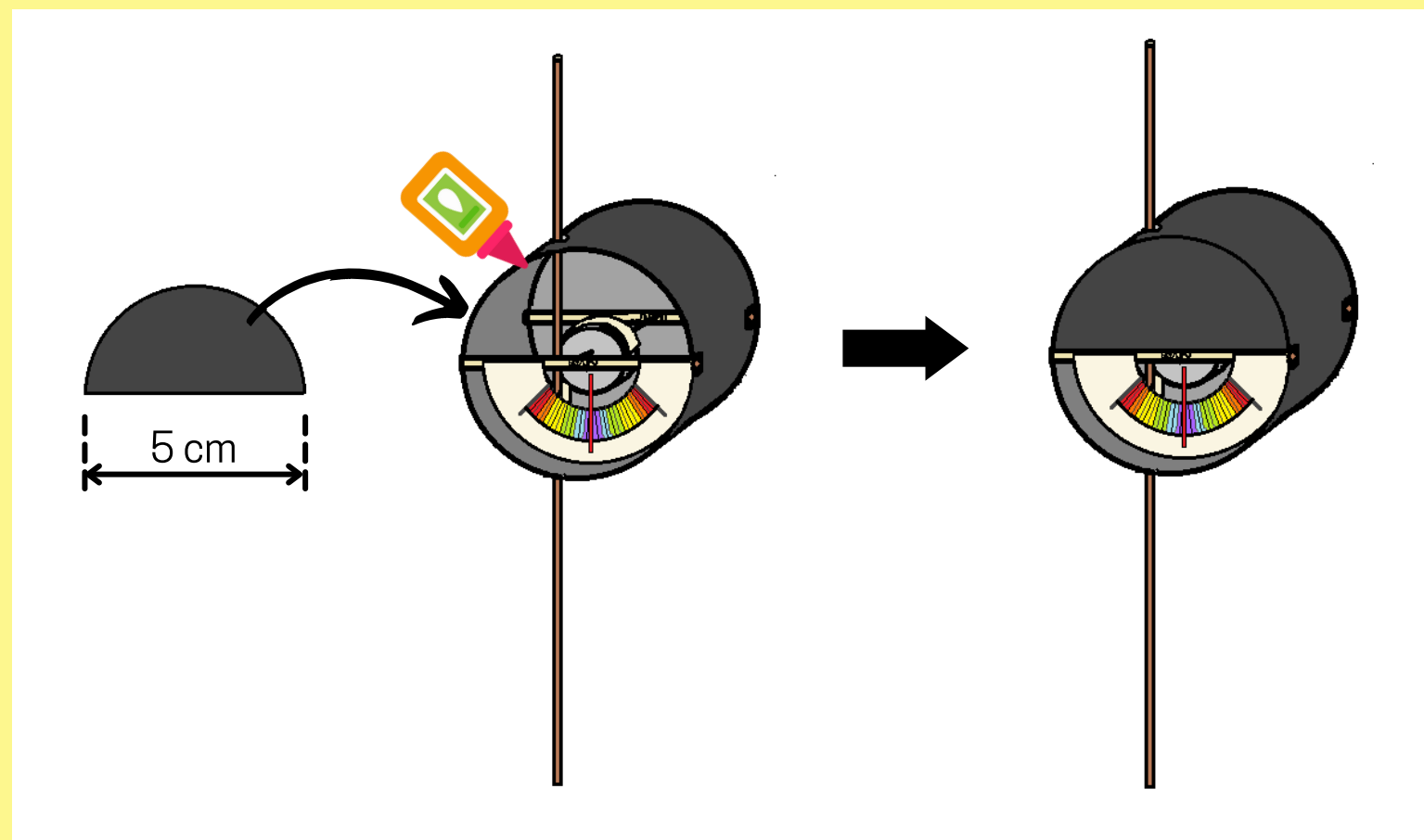
Após recortar a escala graduada, dobre as partes indicadas para trás e cole na parede interna do tubo, atrás do ponteiro.



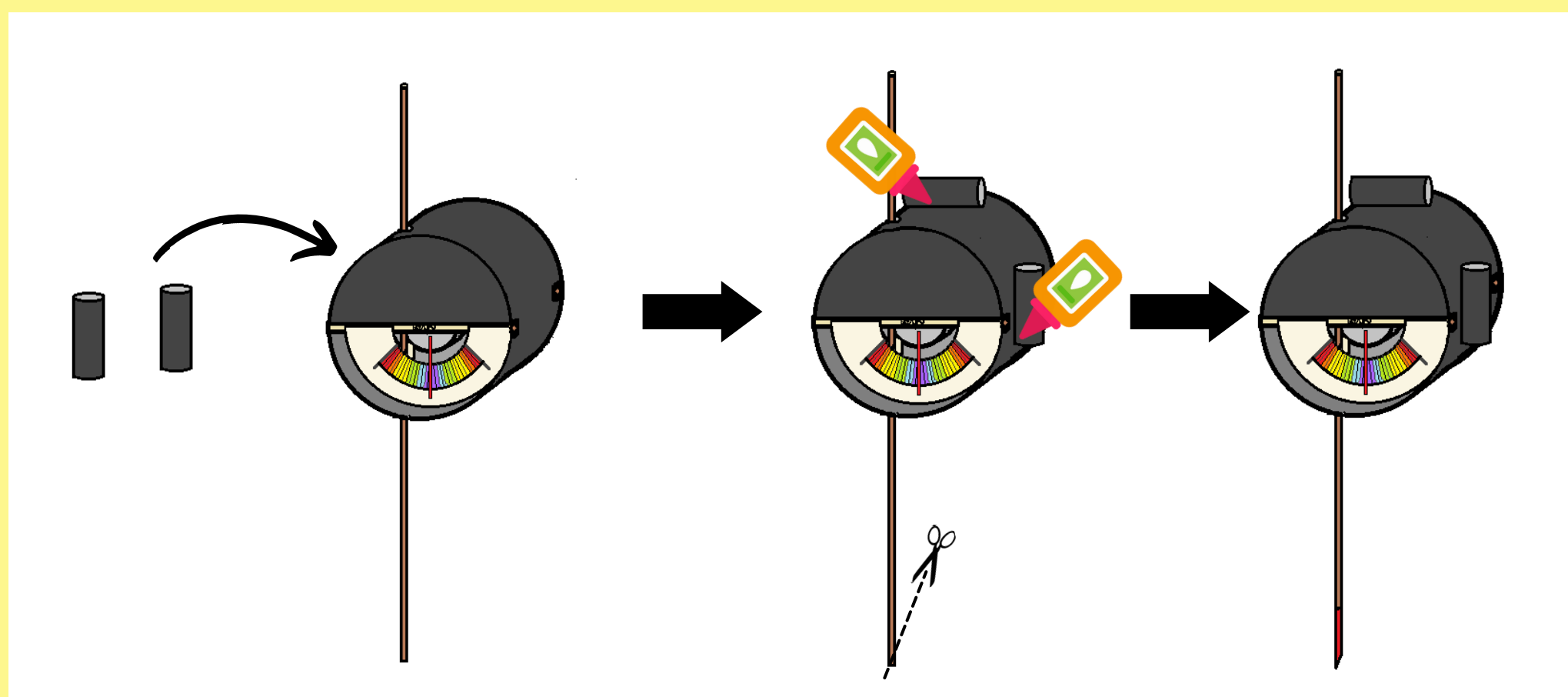
Passo 14: Para calibrar seu vibrômetro, desloque a vareta de medição, para cima ou para baixo, até que o ponteiro atinja a última marcação da escala (em vermelho). Meça o deslocamento linear da vareta com a régua e anote o valor. Depois divida o deslocamento anotado por 16, que é a quantidade de divisões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

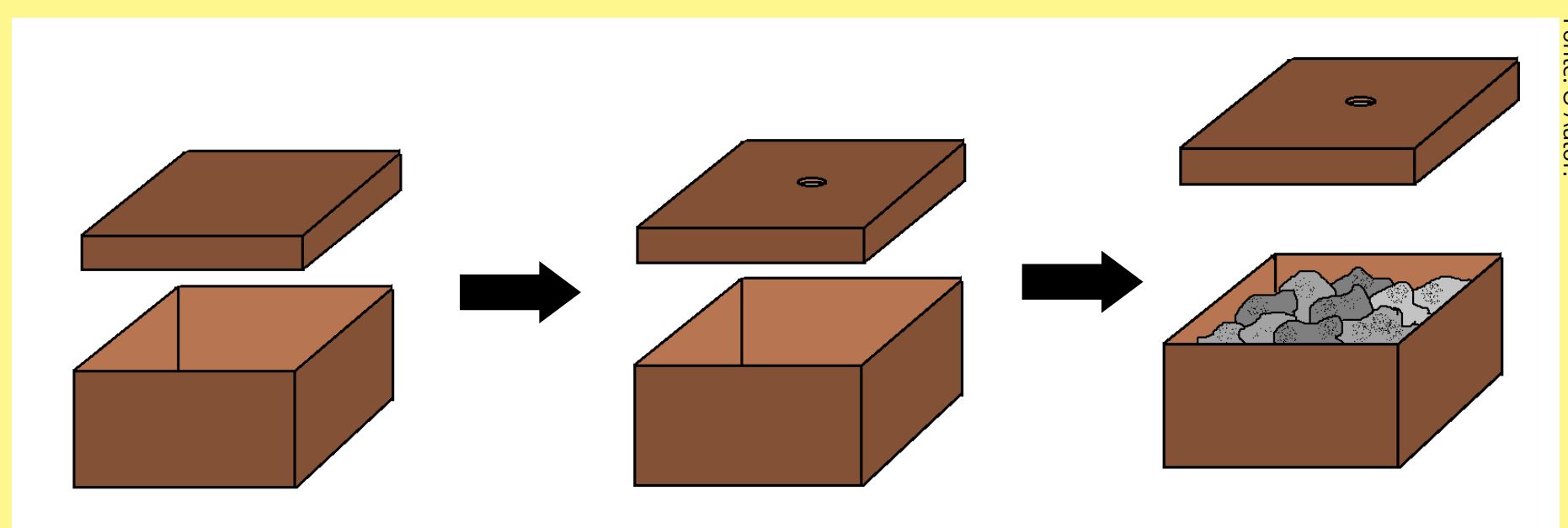
Passo 15: Recorte um semicírculo com raio igual a 5 cm. Cole na parte frontal superior do tubo do vibrômetro, conforme a figura a seguir:



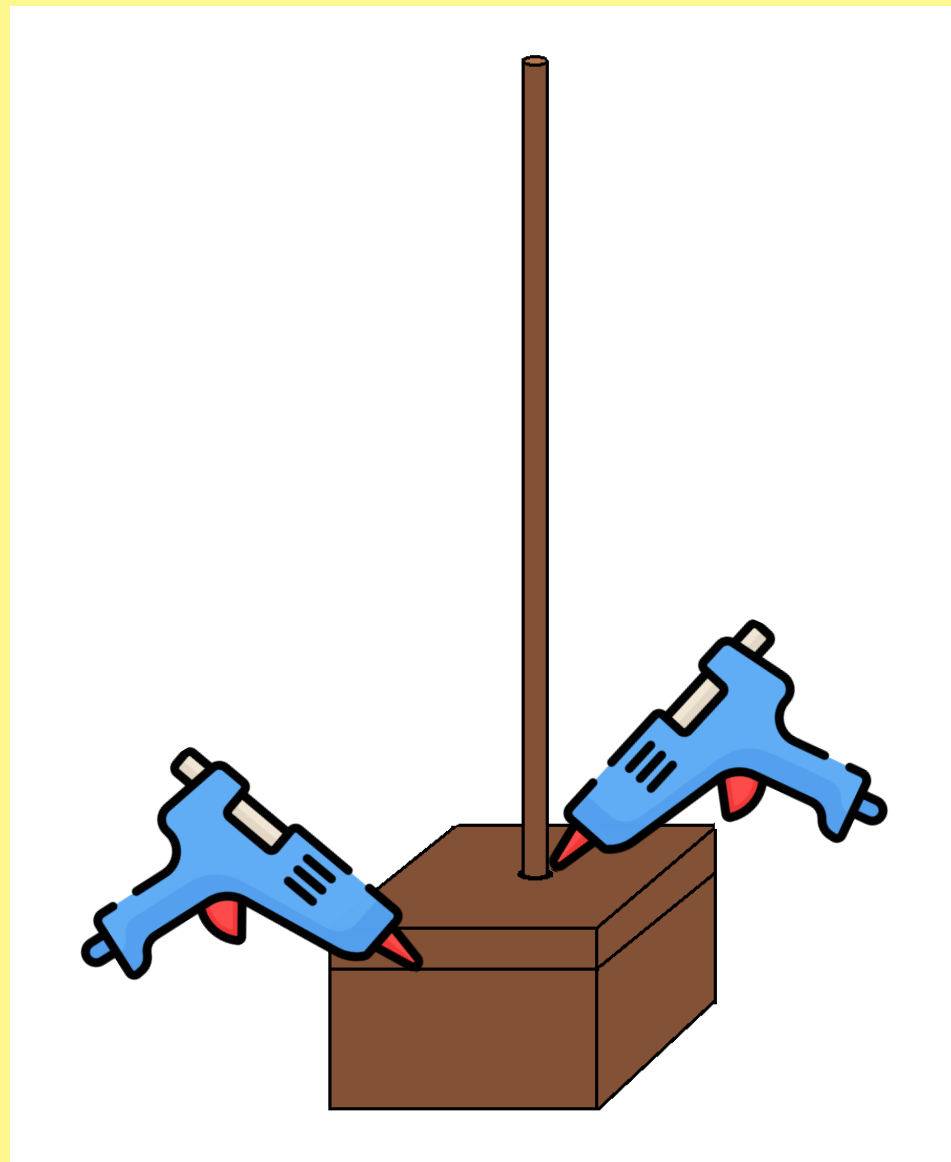
Passo 16: Confeccione dois tubos com papel cartão com comprimento de 15 mm e diâmetro igual ao do espeto de churrasco que você dispõe, de modo que os tubos envolvam e fiquem ajustados ao espeto. Use o próprio espeto como molde para os tubos. Use cola instantânea para confeccionar esses tubos. Cole um 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.

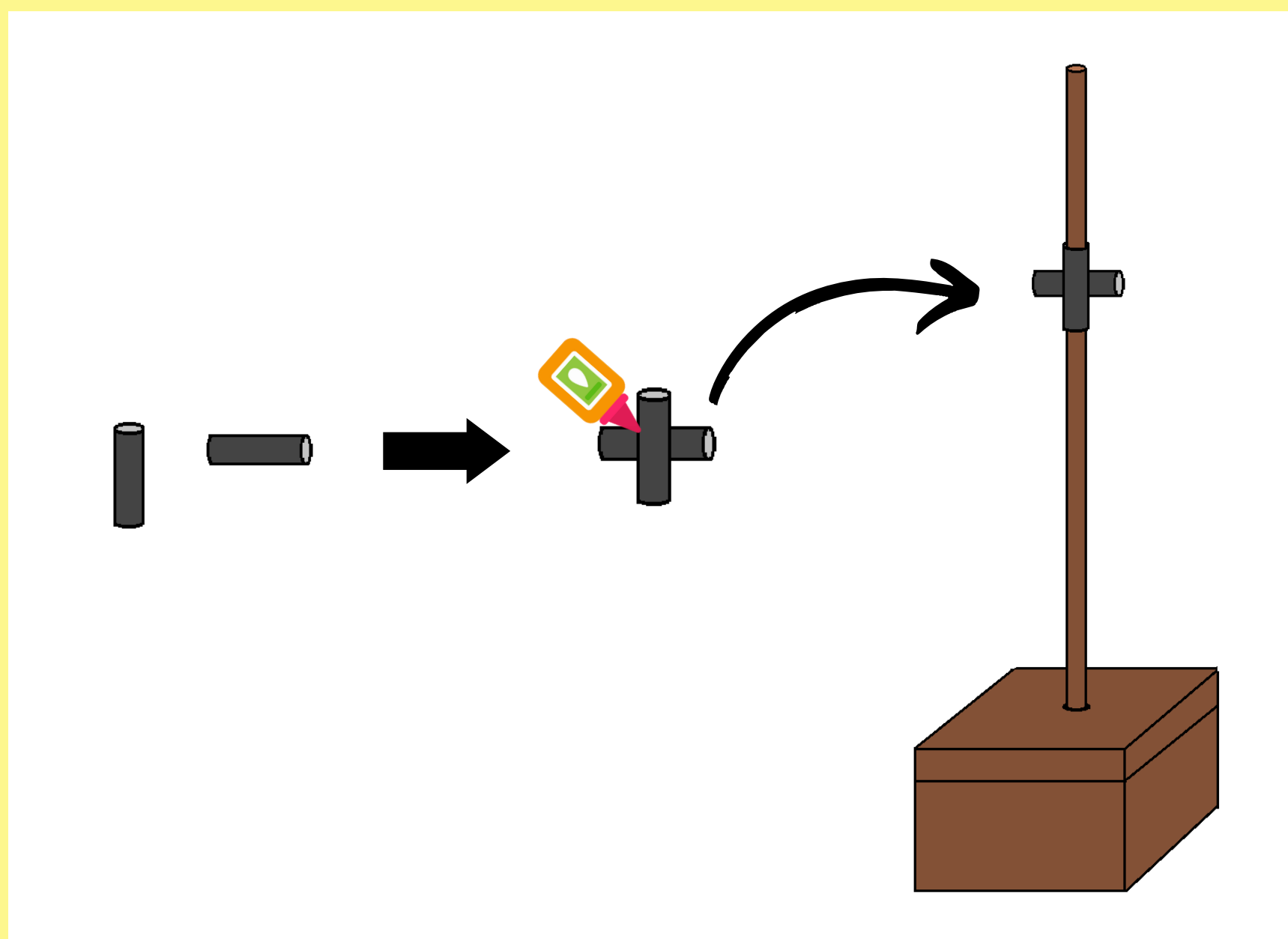


Passo 18: Insira um palito de churrasco na tampa da caixa de MDF. Ajuste o palito para que o espeto adentre o pedregulho pelo menos 1 cm. Este palito será o suporte de movimentação vertical. Fixe o palito e a tampa com cola quente.



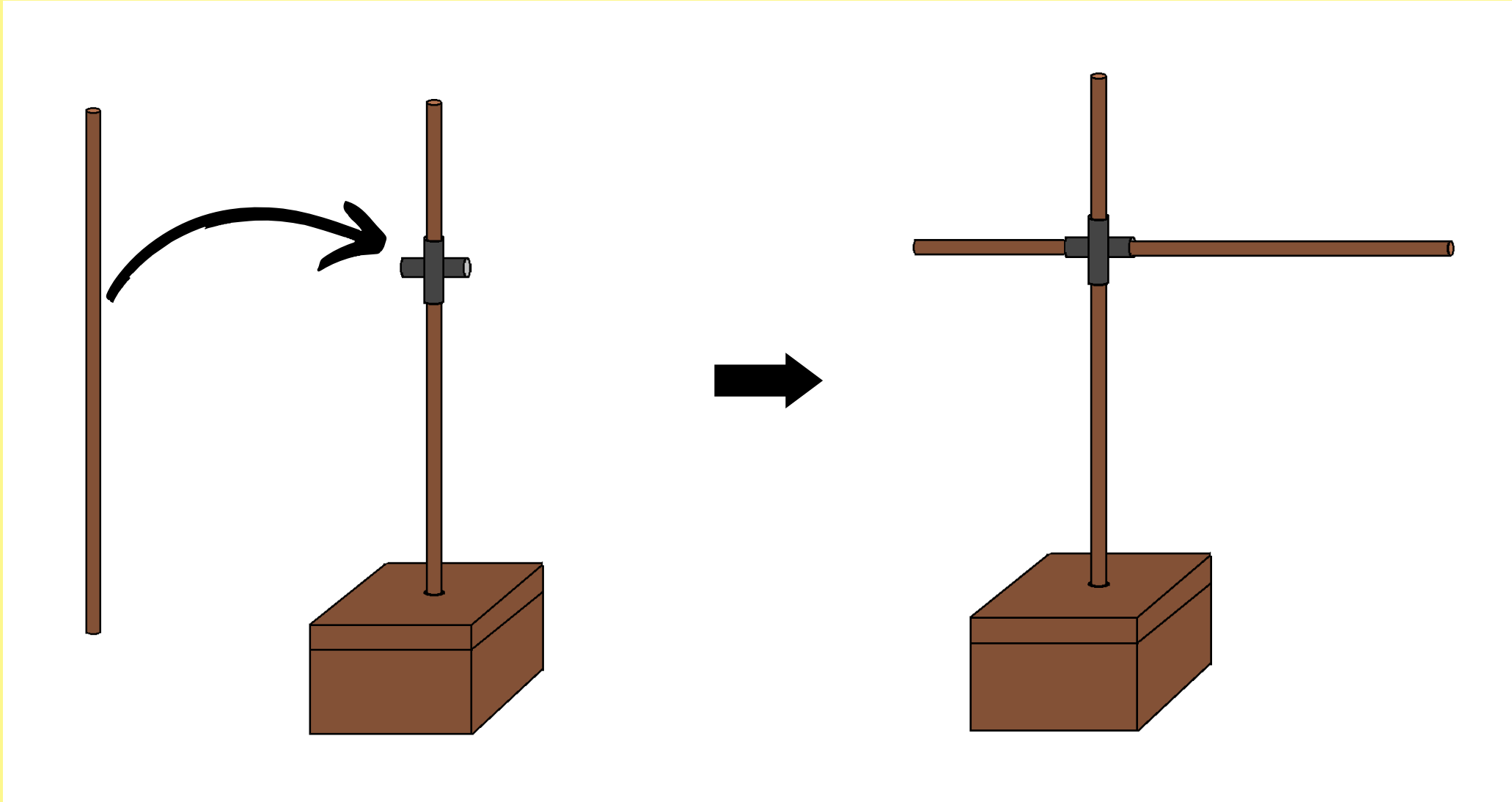
Fonte: O Autor.

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:

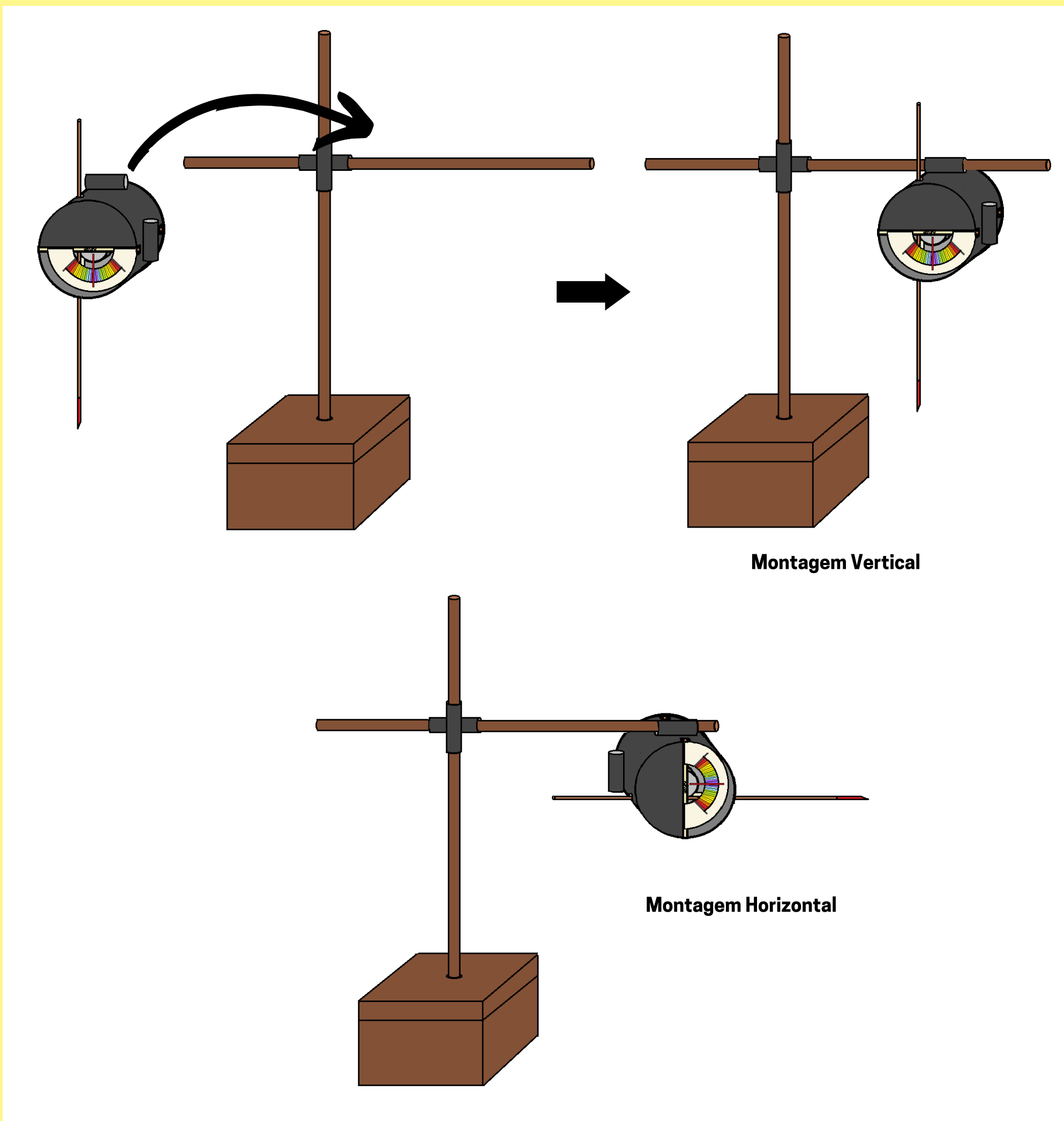


Fonte: O Autor.

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.



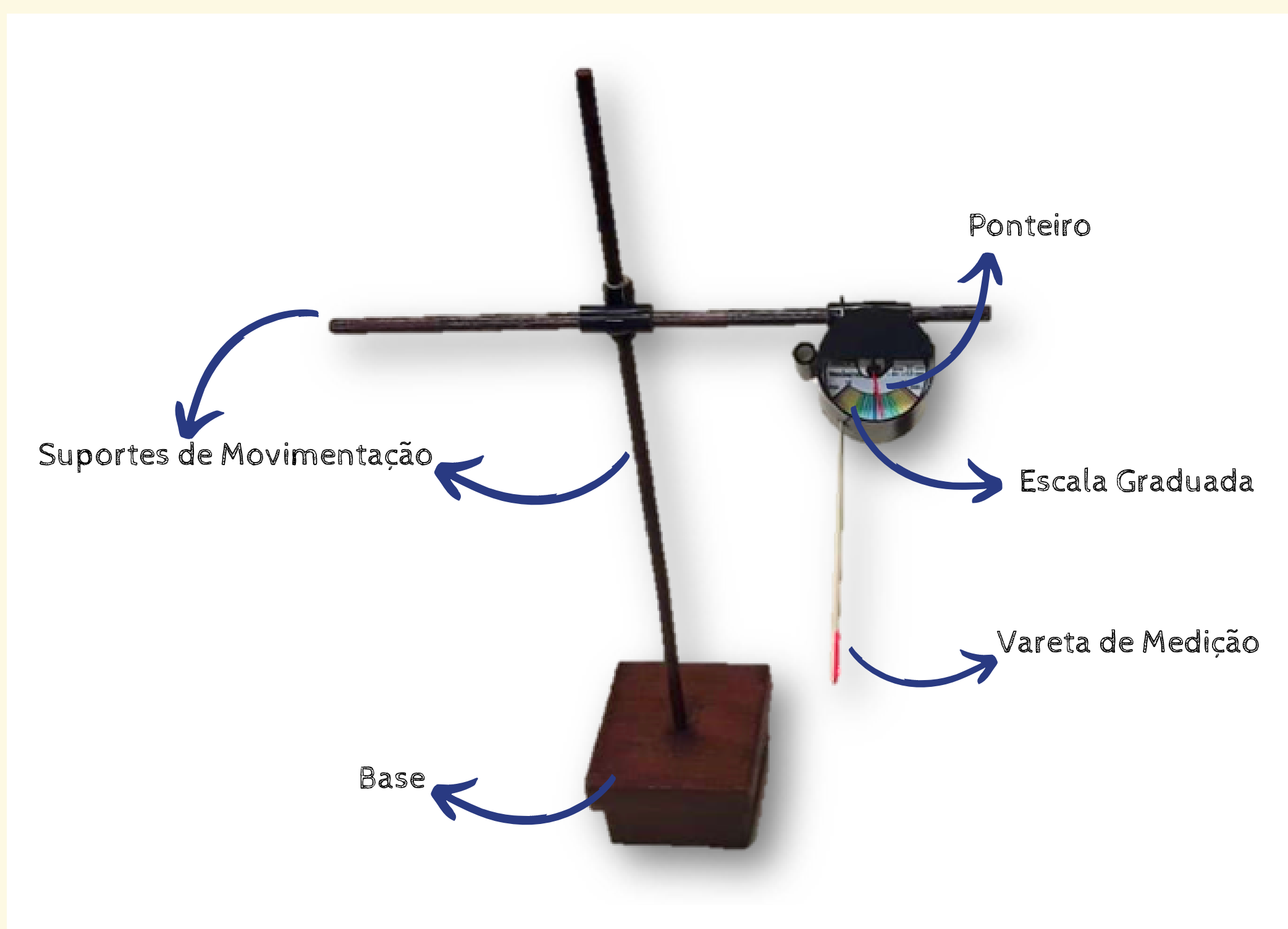
Passo 22: Construa **seis unidades completas** do vibrômetro descrito para serem utilizados pelos grupos de alunos em sala de aula.

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.



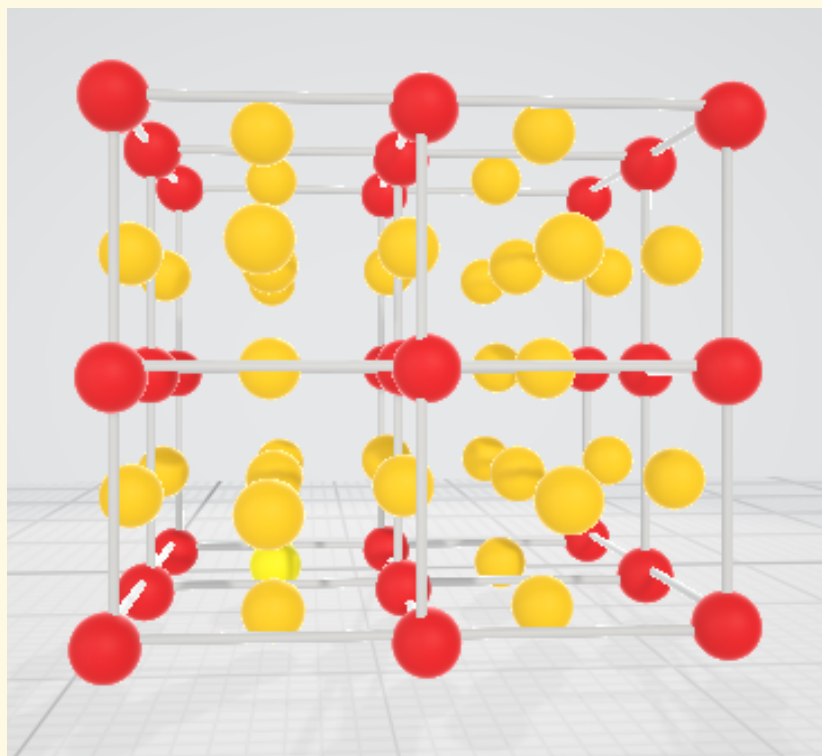
Se você quiser fazer o seu próprio vibrômetro, acesse o link:

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

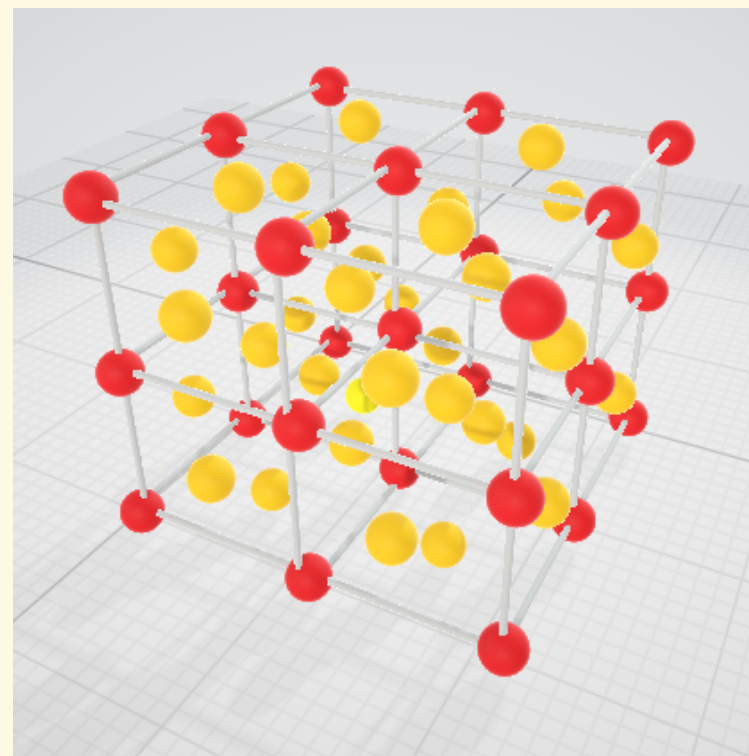
Capriche e leve para a aula para utilizá-lo!



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.

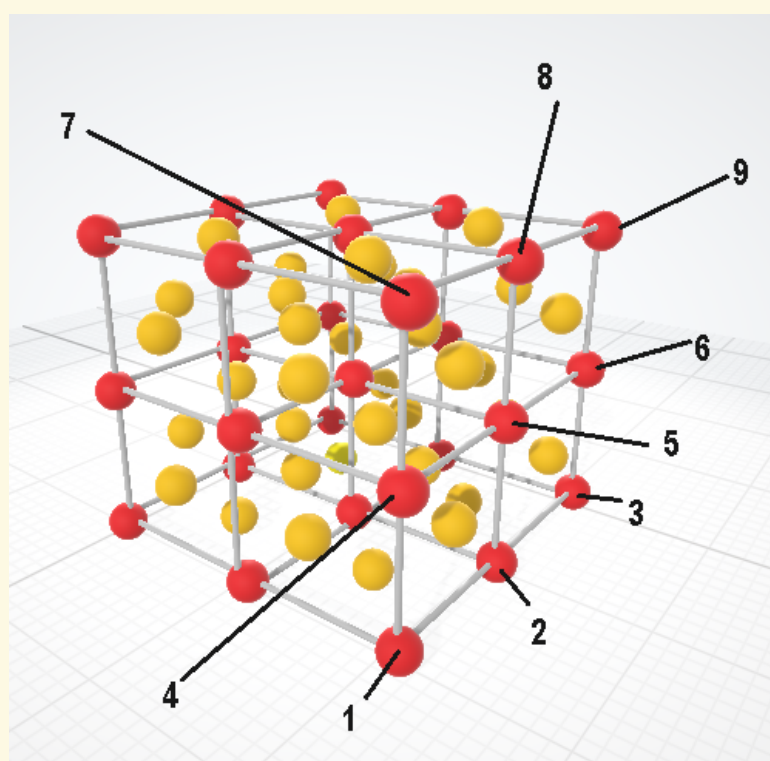


Fonte: O Autor.

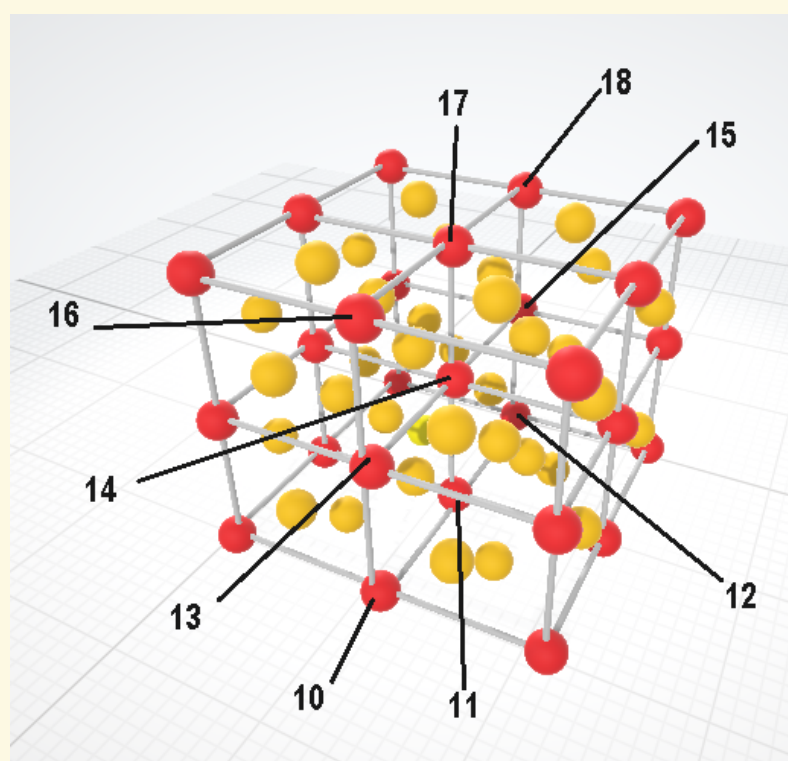
Vista 1: Átomos dos vértices das células unitárias cúbicas .

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

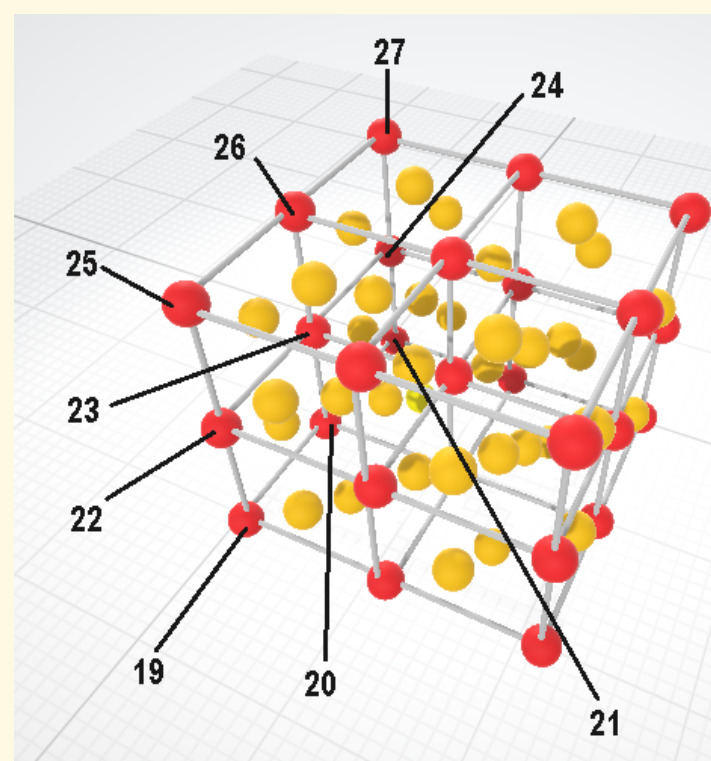
Como você pode ter percebido, são 27 átomos que formam os vértices das células unitárias do sistema cúbico (indicados em vermelho). Assim, serão necessárias 27 medições com o vibrômetro. Com o auxílio de seu professor, e em **acordo com os demais grupos da sala**, identifique cada um desses átomos **indicados 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	*

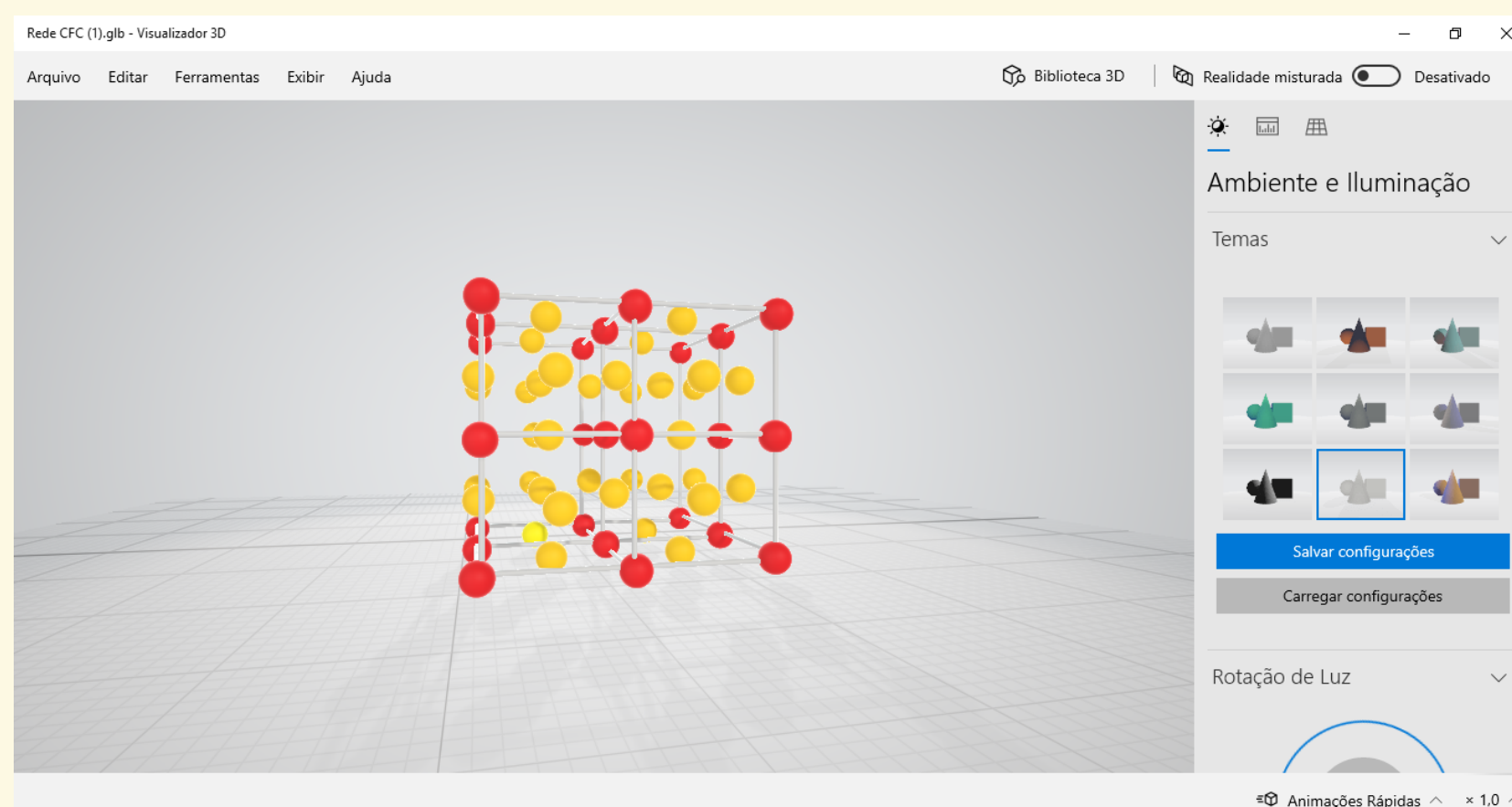
Parte 2- Mapeando nossa rede cristalina.

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

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:

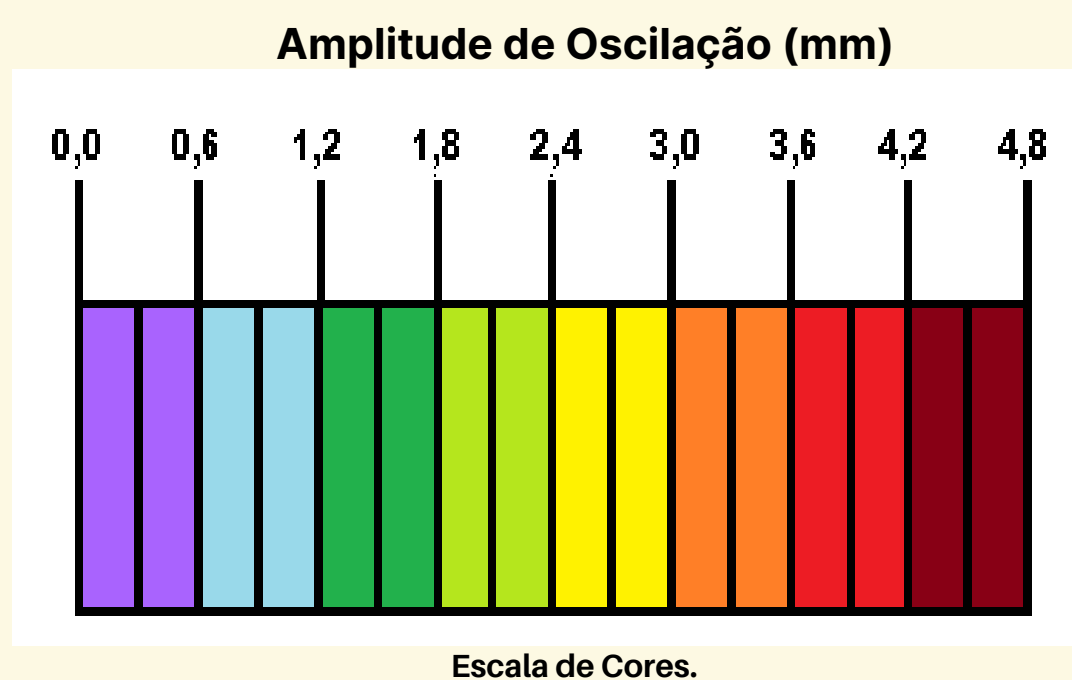


Interface do *Visualizador do Paint 3D* mostrando o modelo da rede cristalina que estamos estudando.

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:

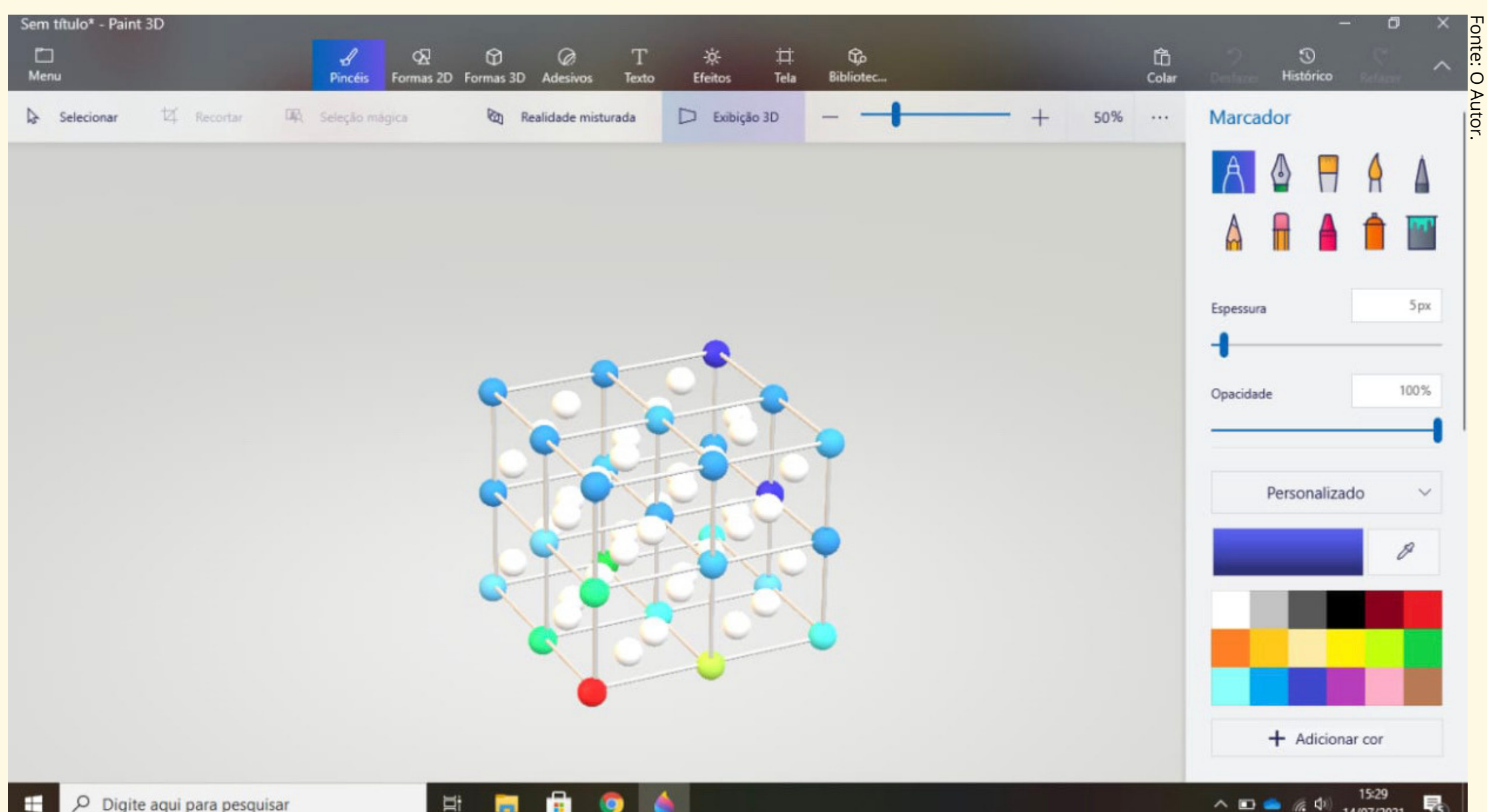


Importante! Pinte de branco os "átomos" que não foram medidos, ou seja, aqueles que estão "centrados nas faces" das células cristalinas cúbicas.

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:  **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?  **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.



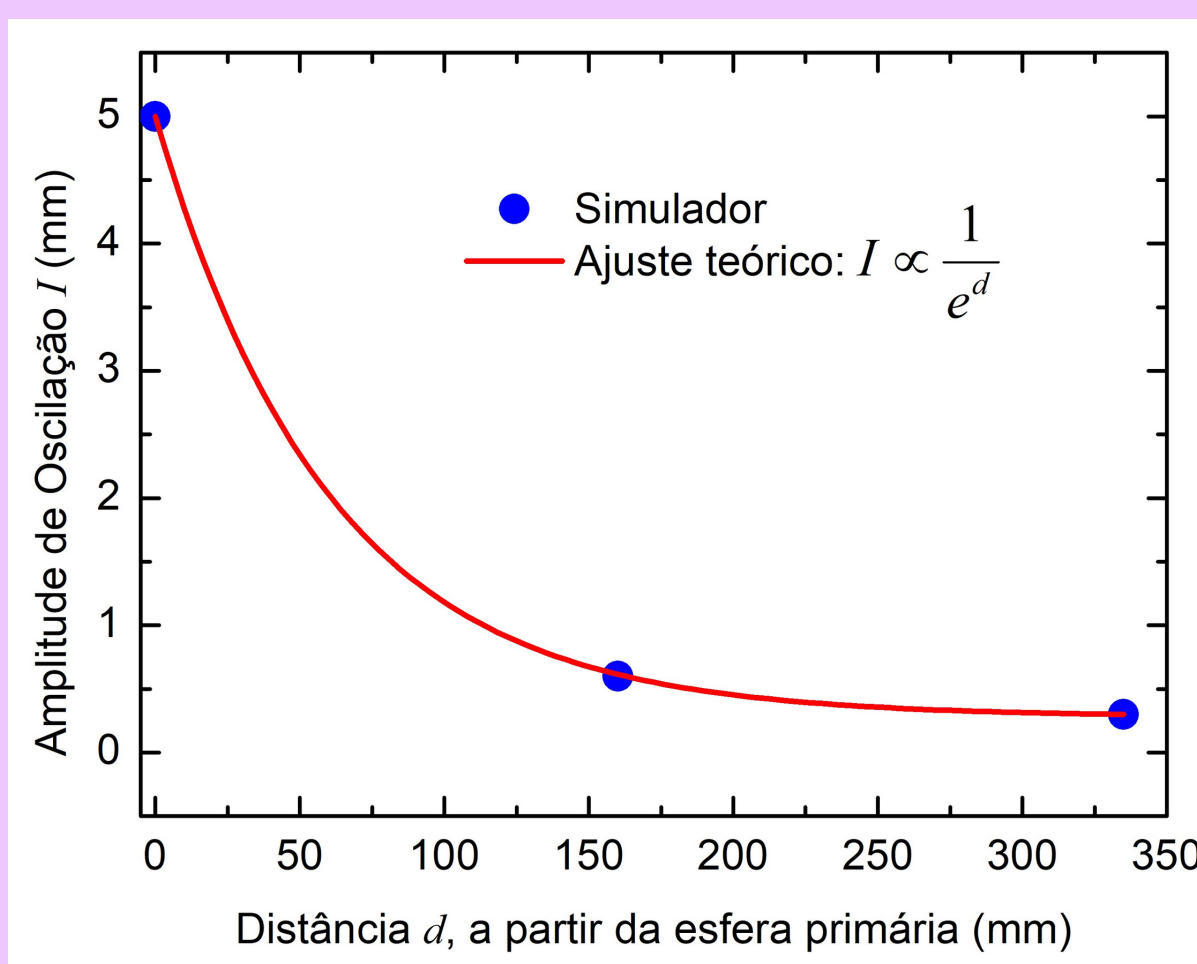
Dicas e procedimentos (peça ajuda ao professor):

- 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

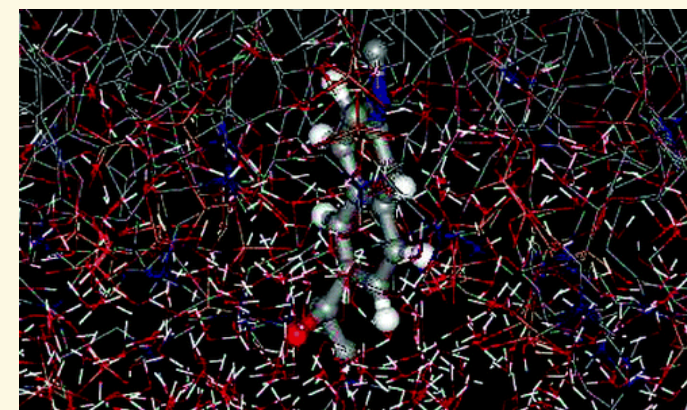


Curiosidade

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

Página 17- Caderno do Aluno

Escola:

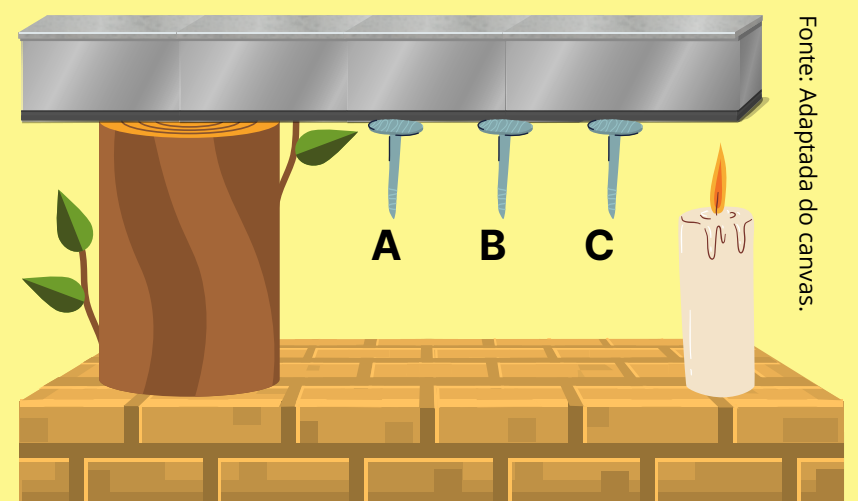
Série:

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?



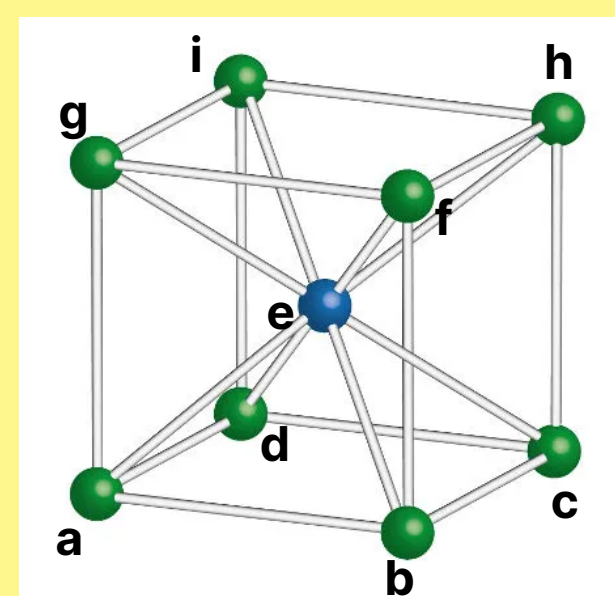
$8 \times 1/8 + 1 = 2$ átomos.

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.

Atividade 6: Avaliação Final

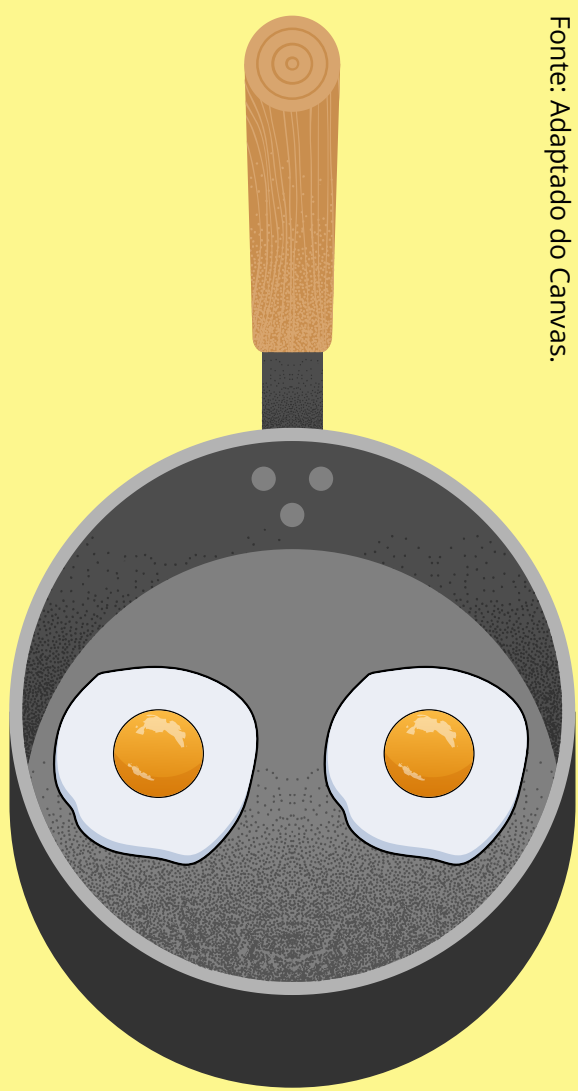
Esta avaliação também pode ser baixada livremente em PDF para impressão através do link: https://0bc550fa-d7ec-4586-95fc-10139adb14c1.filesusr.com/ugd/7d796d_1da08b4bdf8a45d7b5b75b1b92e54ee0.pdf

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?

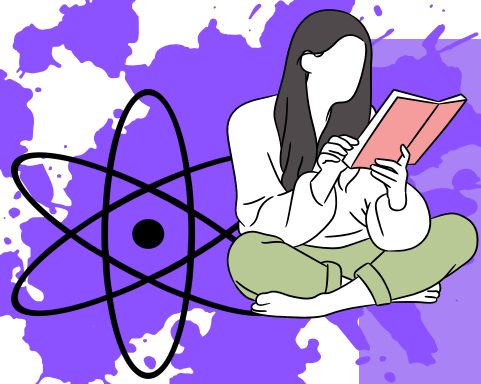


Porque a madeira do cabo não conduz tão bem a energia através de calor quanto a parte metálica da panela. Os alunos devem associar suas respostas à diferença de condutividade térmica entre os materiais envolvidos (madeira e metal). No simulador essa diferença pode ser observada se considerarmos elásticos 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.

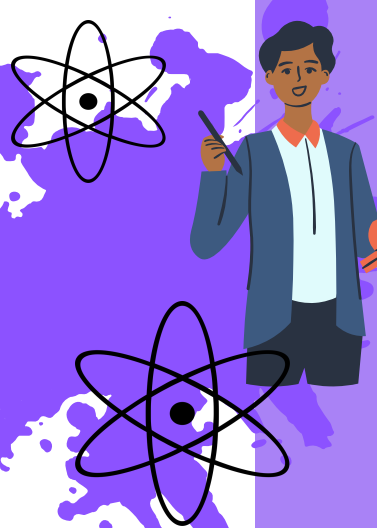
NAMBA, A. M., et. al. **Dinâmica Molecular: Teoria e Aplicações em desenvolvimento de fármacos**. Ecl. Quím., São Paulo, v. 33, n. 4, p. 13-24, 2008.

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. 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

Atividade 1: Para começar a pensar	1
Atividade 2: Calor, temperatura e estrutura de sólidos	2
Atividade 3: Redes cristalinas	6
Atividade 4: Experimento: Movimento térmico em redes cristalinas	8
Atividade 5: Construindo um Modelo Explicativo	12
Atividade 6: Avaliação Final	17
Referências	19

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:

.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....



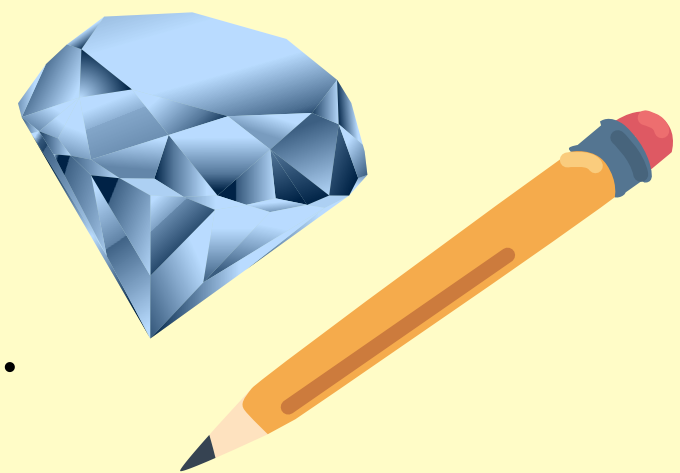
Fonte: O Autor (elaborado no canvas).

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:

.....
.....
.....
.....
.....



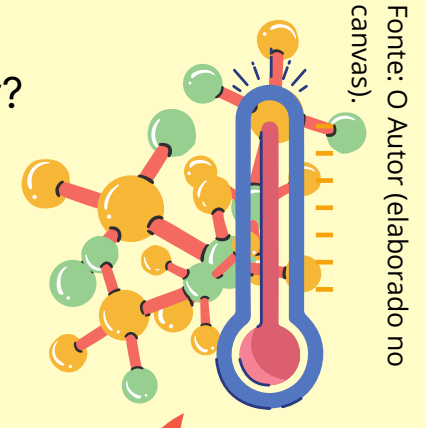
Fonte: O Autor (elaborado no canvas).

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:

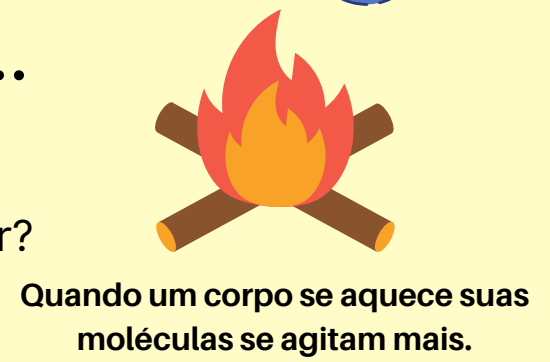
a) Você acha que existe relação entre a temperatura de um corpo e o movimento molecular?

Resposta:
.....
.....
.....



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

Resposta:
.....
.....
.....



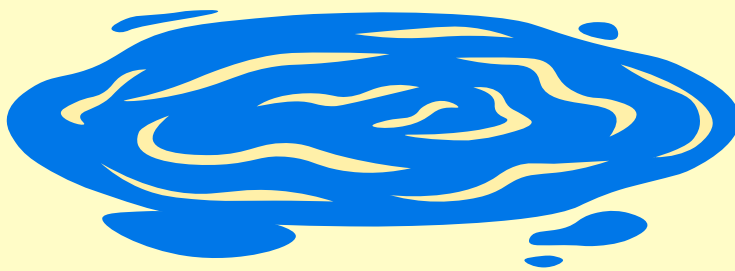
Questão 5: Em um dia de verão, Maria escreve em uma mensagem "estou com calor!" e a envia a você. Curioso, você pede para ela explicar melhor o que está acontecendo. Ela então lhe responde: "Minha casa tem muito calor, por isso está muito quente". Você acha que a forma que Maria utiliza a palavra *calor*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

Resposta:
.....
.....
.....



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. 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

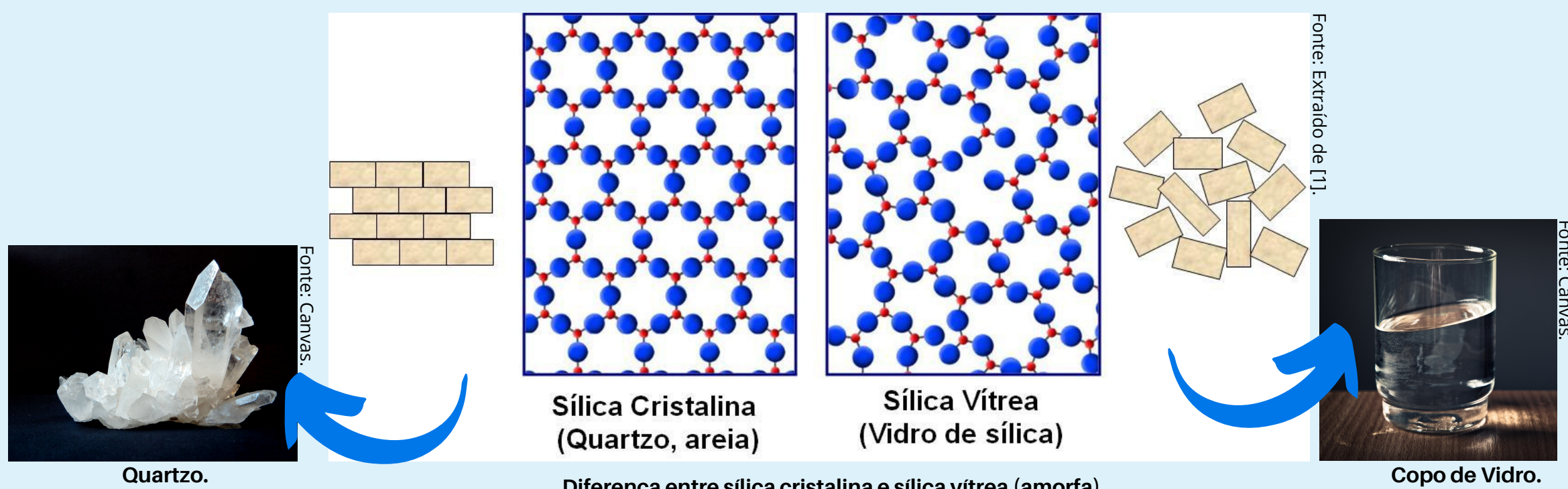
O Quartzo e o Vidro

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 (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):



Quartzo.

Sílica Cristalina (Quartzo, areia)

Sílica Vítrea (Vidro de sílica)

Copo de Vidro.

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).

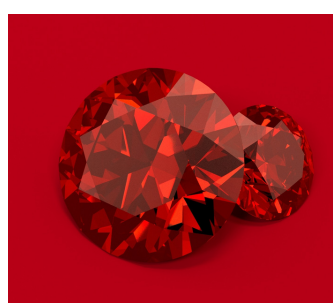
Existem minerais exóticos como o rutilo, e muito valiosos como o coríndon que em sua forma vermelha é chamado de rubi, e na forma azul é conhecido como safira. Neste caso, os minerais são chamados de gemas ou simplesmente de "pedras preciosas". Outros exemplos é o mineral berilo que forma a água-marinha 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

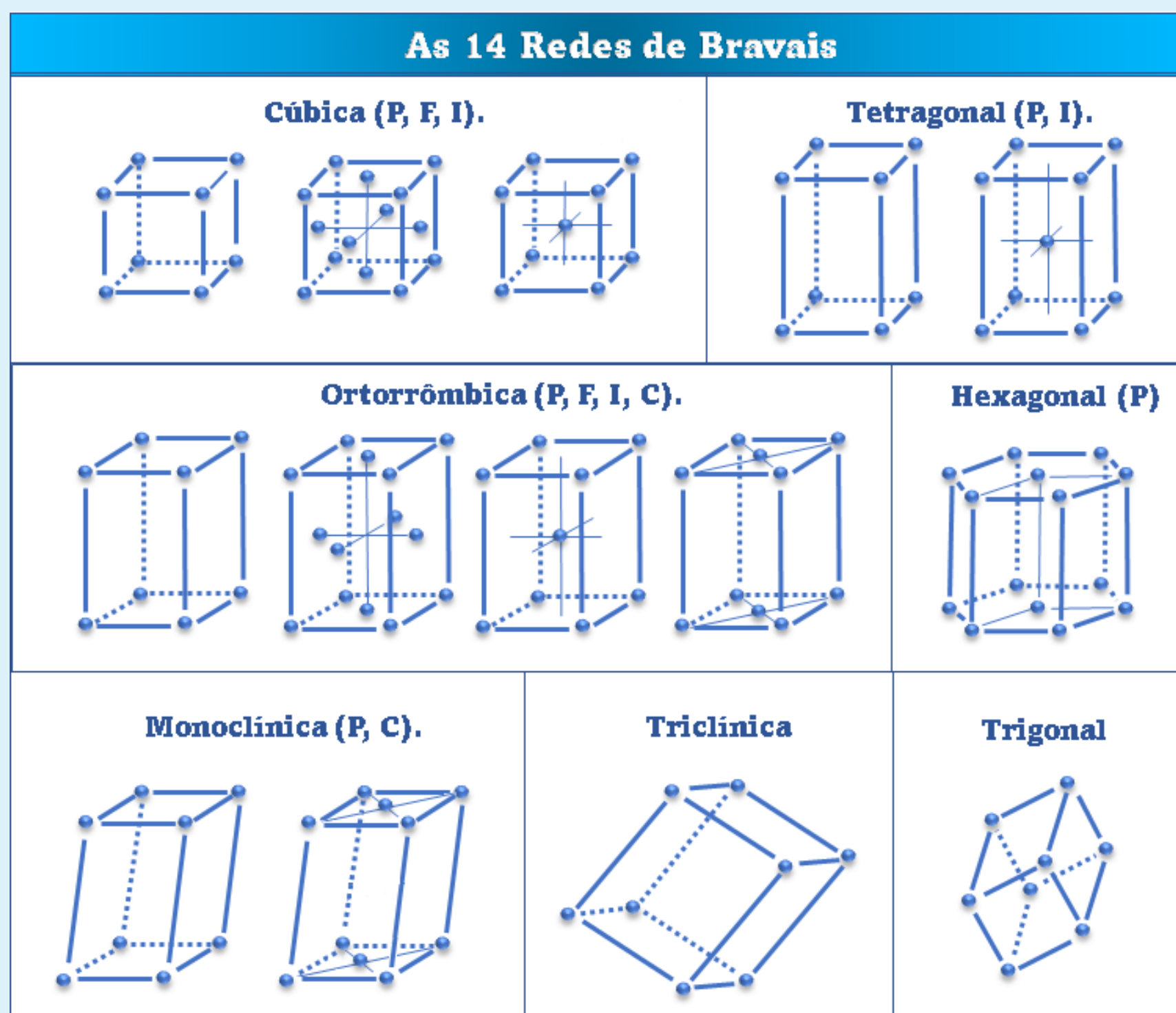
Agora que você já sabe que os sólidos podem se organizar microscopicamente através de uma estrutura cristalina, chegou a hora de conhecer um pouco mais sobre estas estruturas especiais. Leia atentamente o texto 1, abaixo:

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.

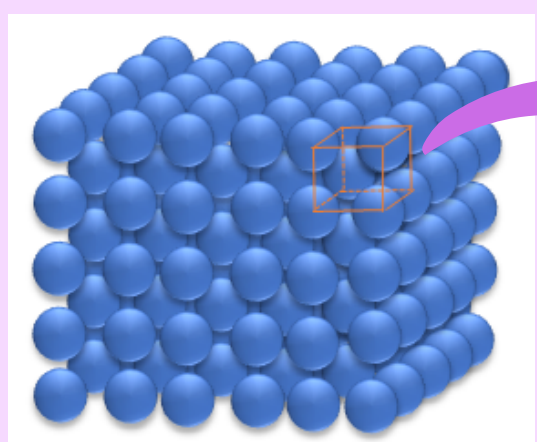
()

Menor unidade que se repete e reproduz a rede cristalina.

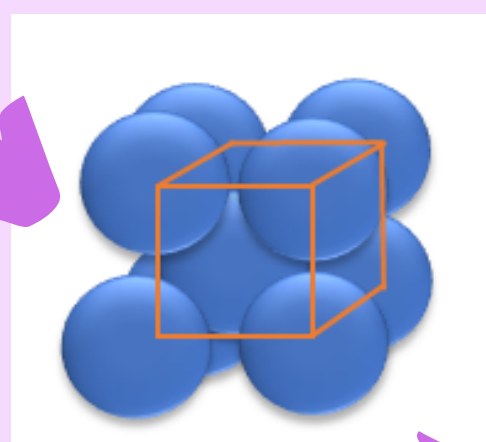
()

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:

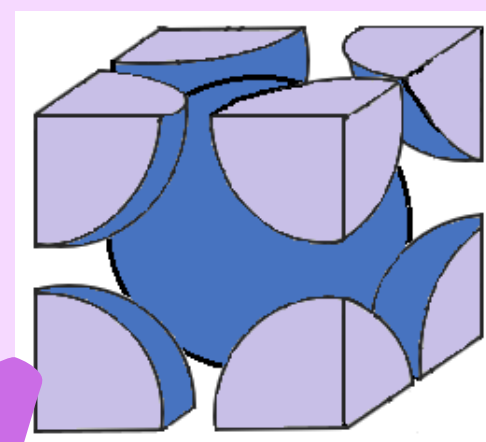


Identificando uma célula unitária na rede cristalina.



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:

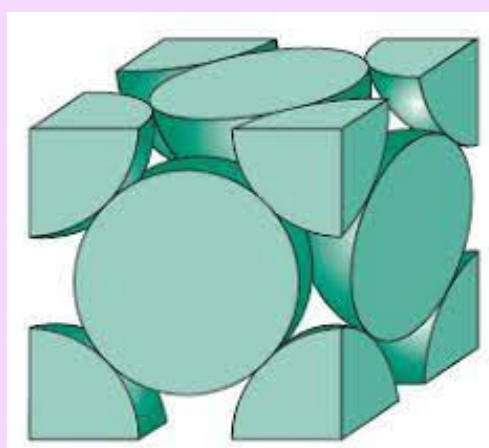
a) Qual é a rede de Bravais que está discriminada na figura?

.....

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°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: Extraído 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:.....
.....
.....
.....

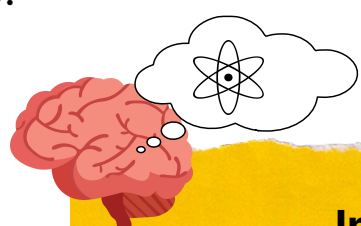
b) É possível estabelecer um análogo da temperatura com o simulador? Se sim, quais regiões possuiriam maior e menor temperatura no cristal simulado?

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°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°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:.....

.....

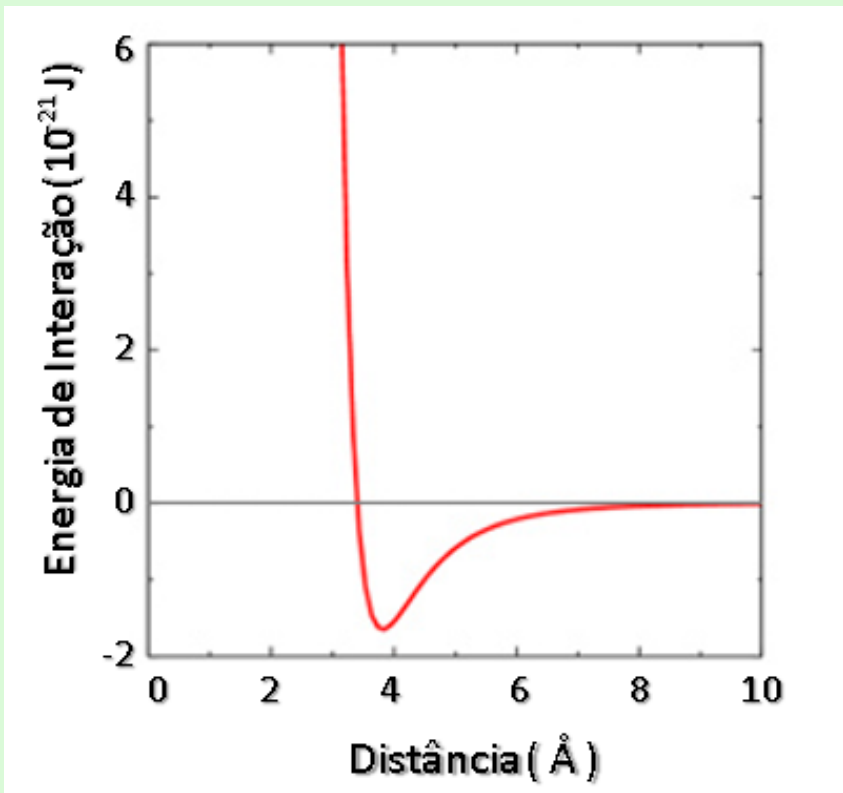
.....

.....

.....

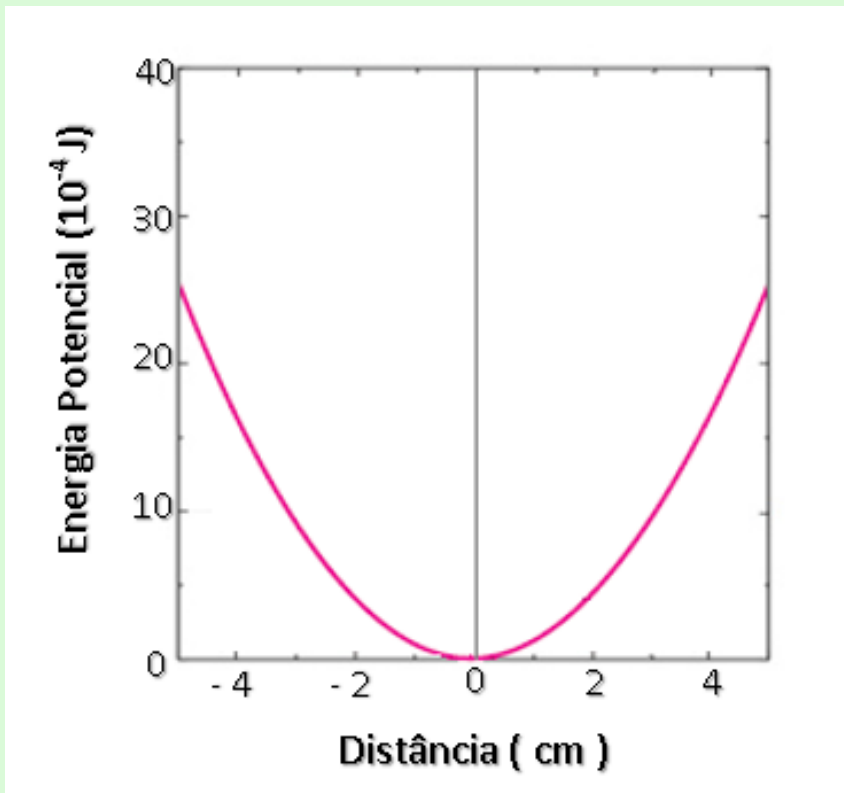
.....

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:

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....



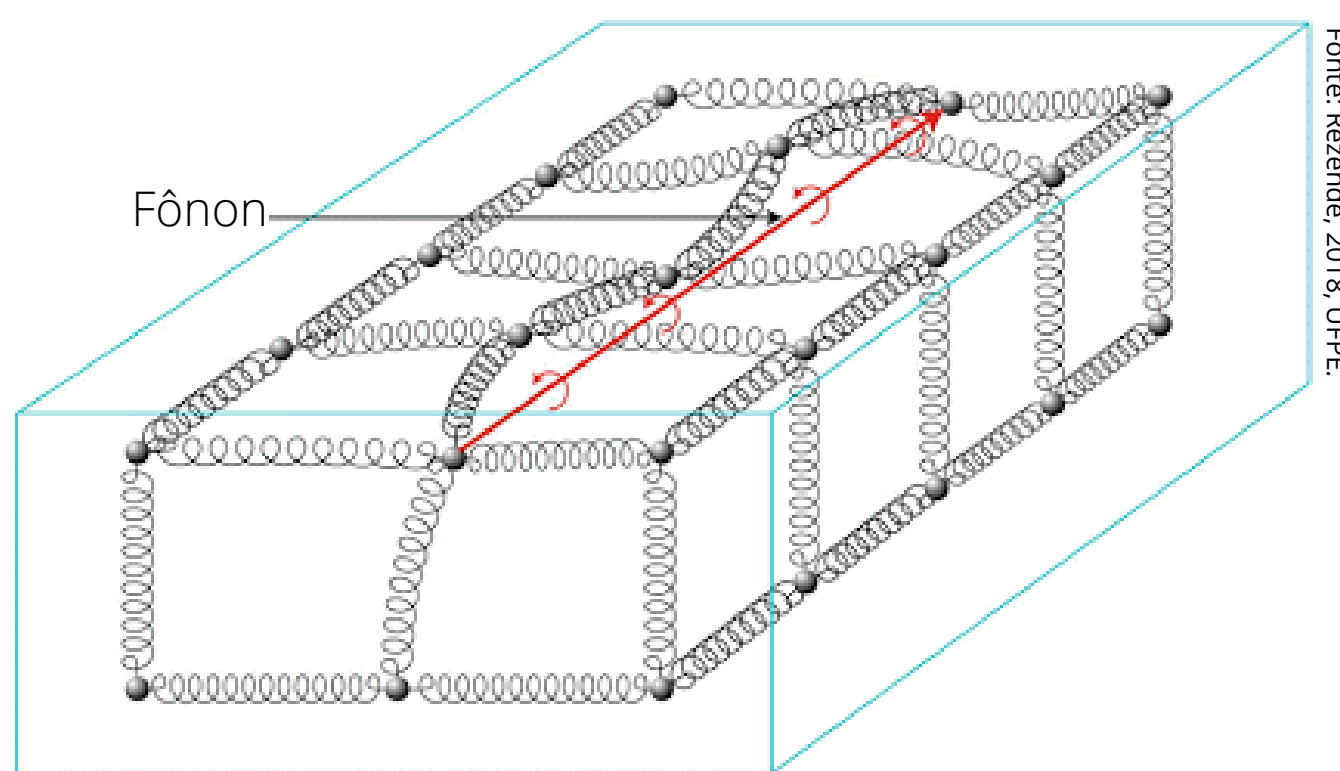
Os Fônons

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.

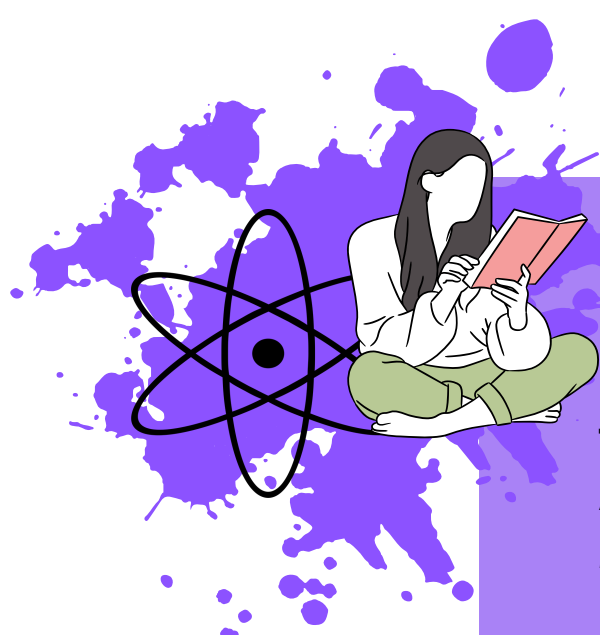
Se considerássemos a rede no zero absoluto, a menor temperatura possível, observaríamos os átomos da rede em repouso, em posições fixas, exatamente como definida pela rede de Bravais. À medida que a temperatura fosse aumentando, as partículas começariam a se agitar cada vez mais, mas em torno das posições 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).

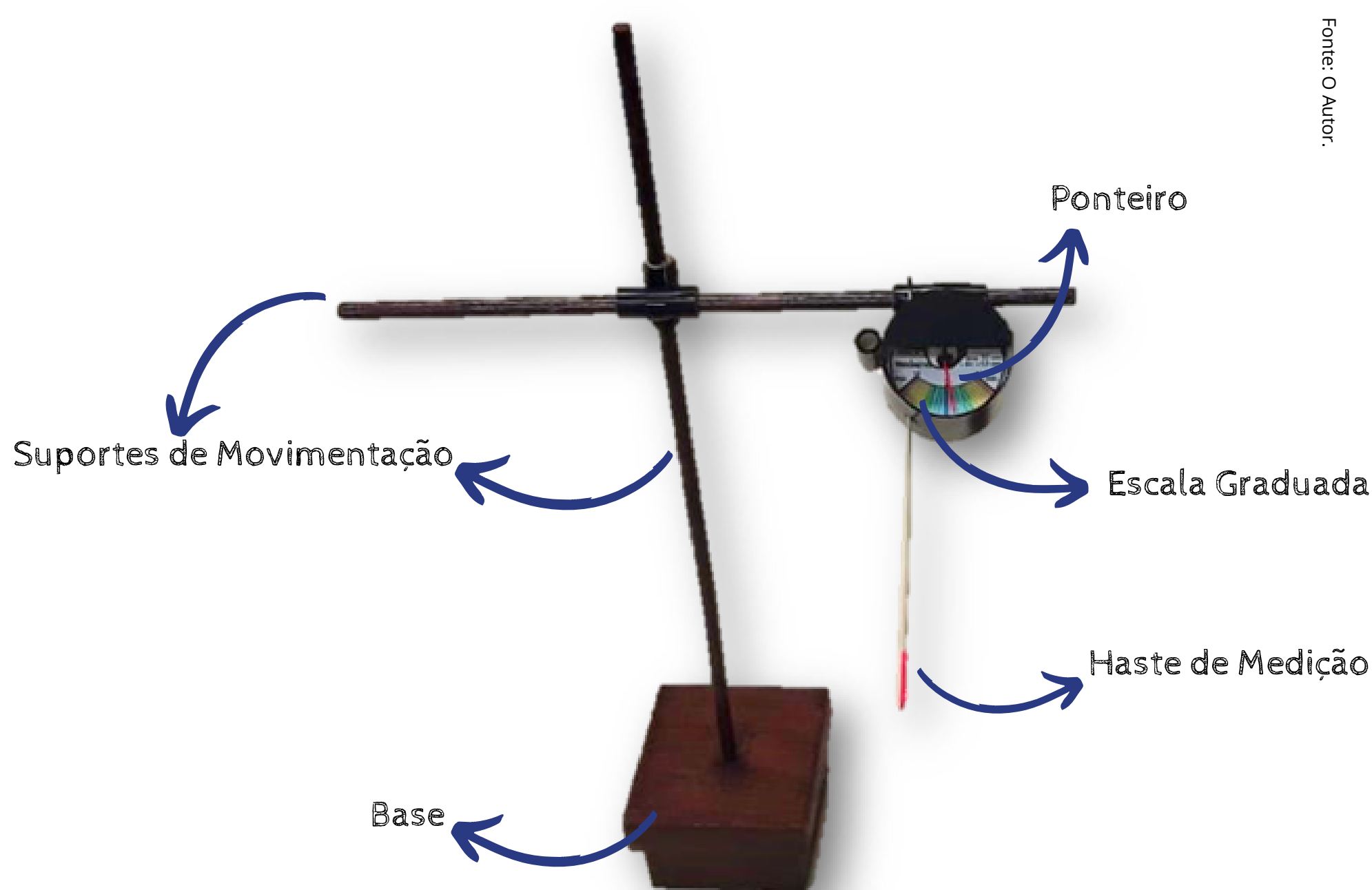
Acesse: <http://www.sbfisica.org.br/v1/home/index.php/pt/destaque-em-fisica/684-estudo-brasileiro-revela-que-fonons-tambem-podem-ter-spin>, e saiba mais!

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.



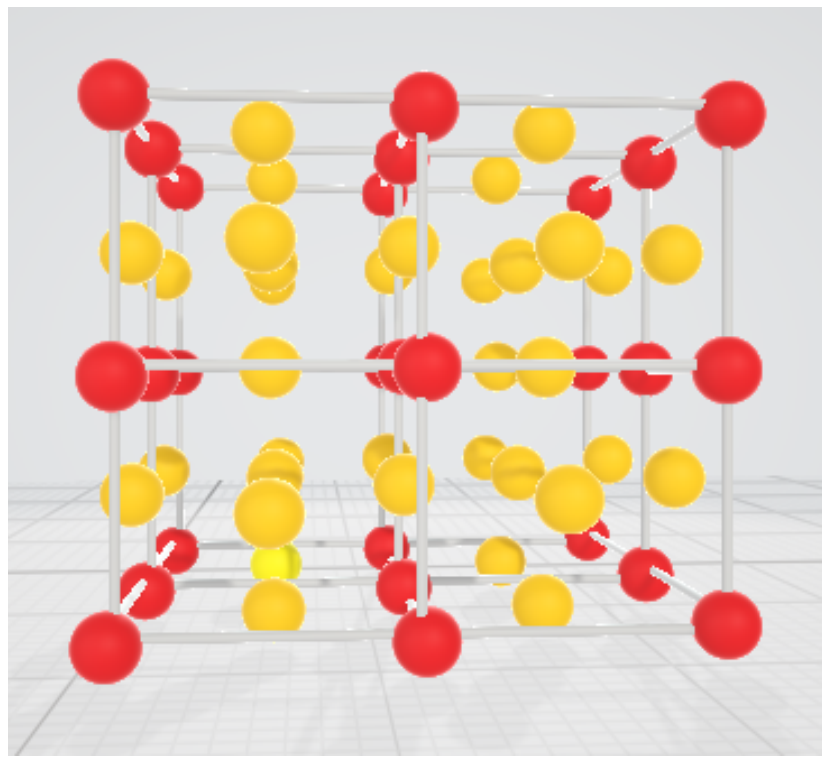
Se você quiser fazer o seu próprio vibrômetro, acesse o link:

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

Capriche e leve para a aula para utilizá-lo!

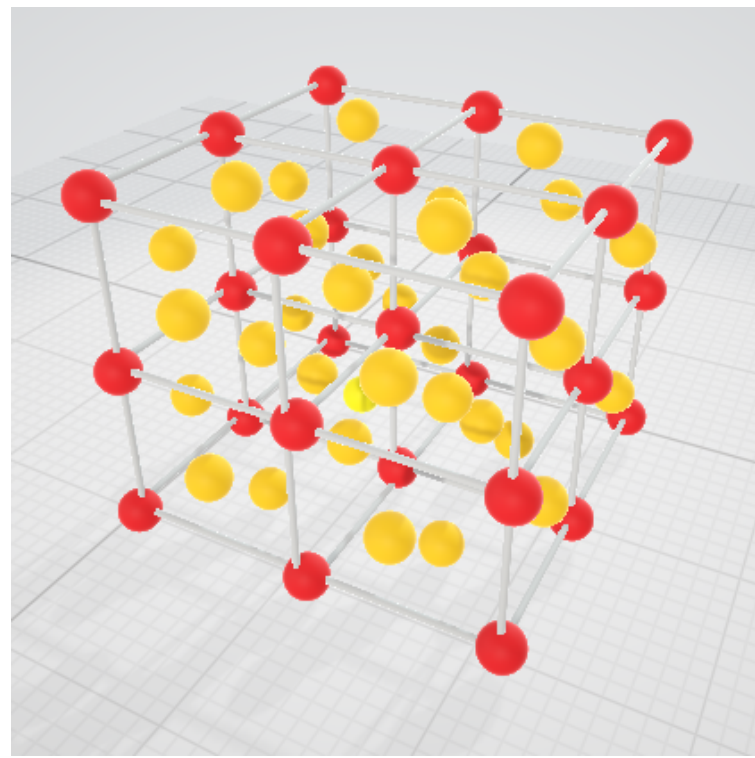


Forme grupos de cinco colegas e, com o auxílio do professor, meça através dos vibrômetros a oscilação dos átomos que constituem a rede cristalina. Nossa rede representada possui 63 átomos, mas nos concentraremos apenas naqueles que se encontram nos vértices dos cubos das células cristalinas, indicados 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.

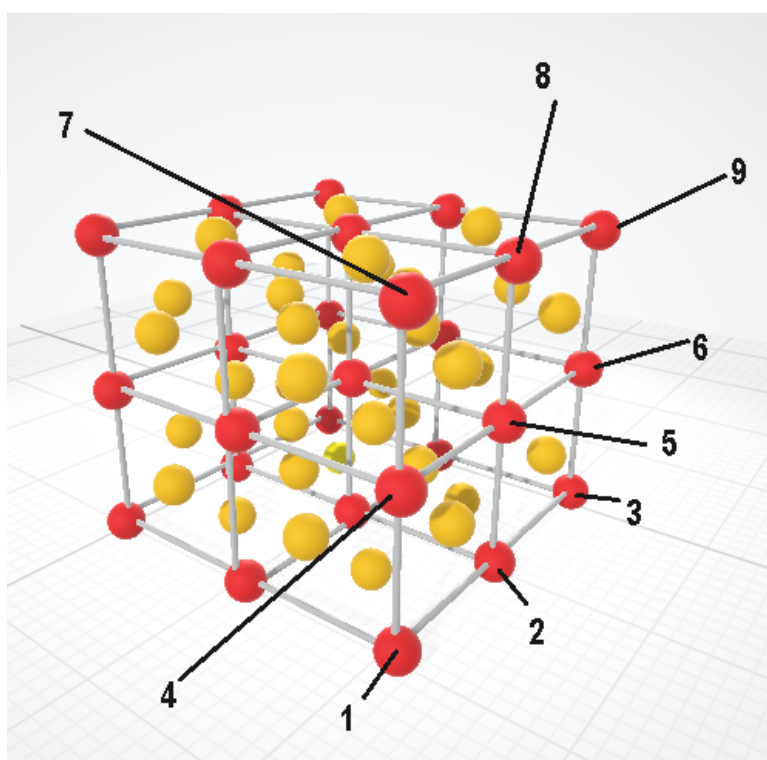
Vista 1: Átomos dos vértices das células unitárias cúbicas .



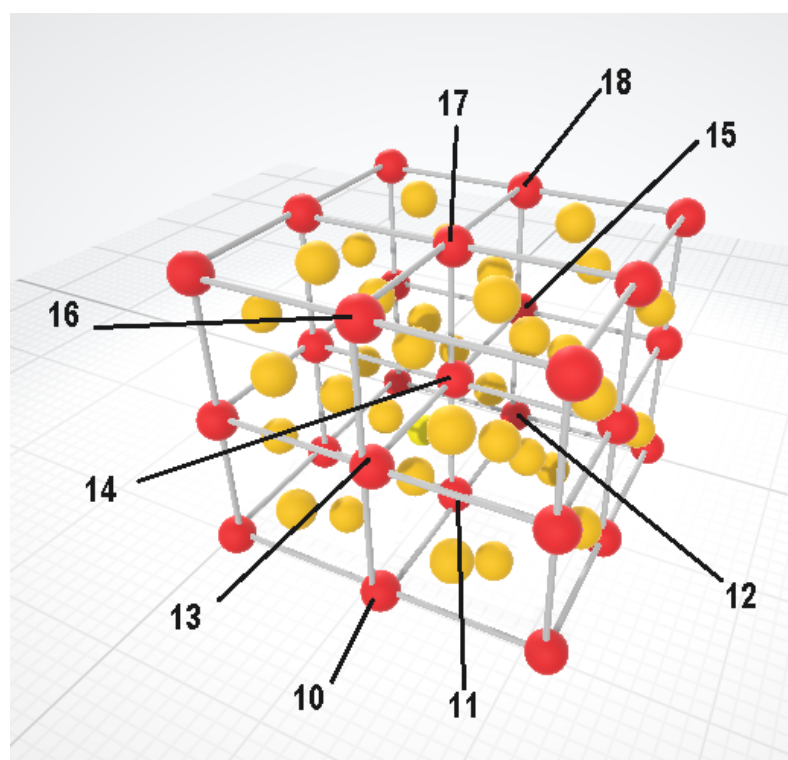
Fonte: O Autor.

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

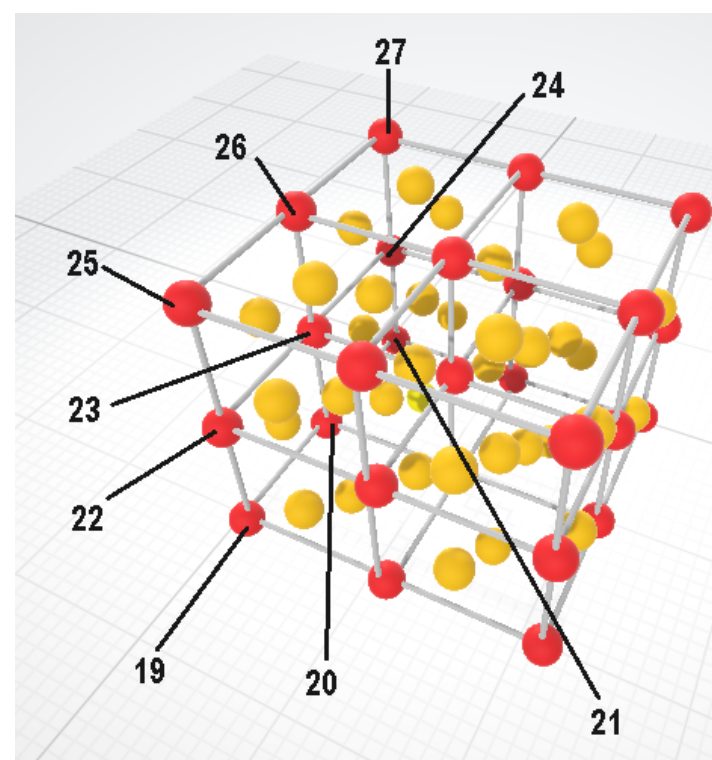
Como você pode ter percebido, são 27 átomos que formam os vértices das células unitárias do sistema cúbico (indicados em vermelho). Assim, serão necessárias 27 medições com o vibrômetro. Com o auxílio de seu professor, e em **acordo com os demais grupos da sala**, identifique cada um desses átomos representados **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	

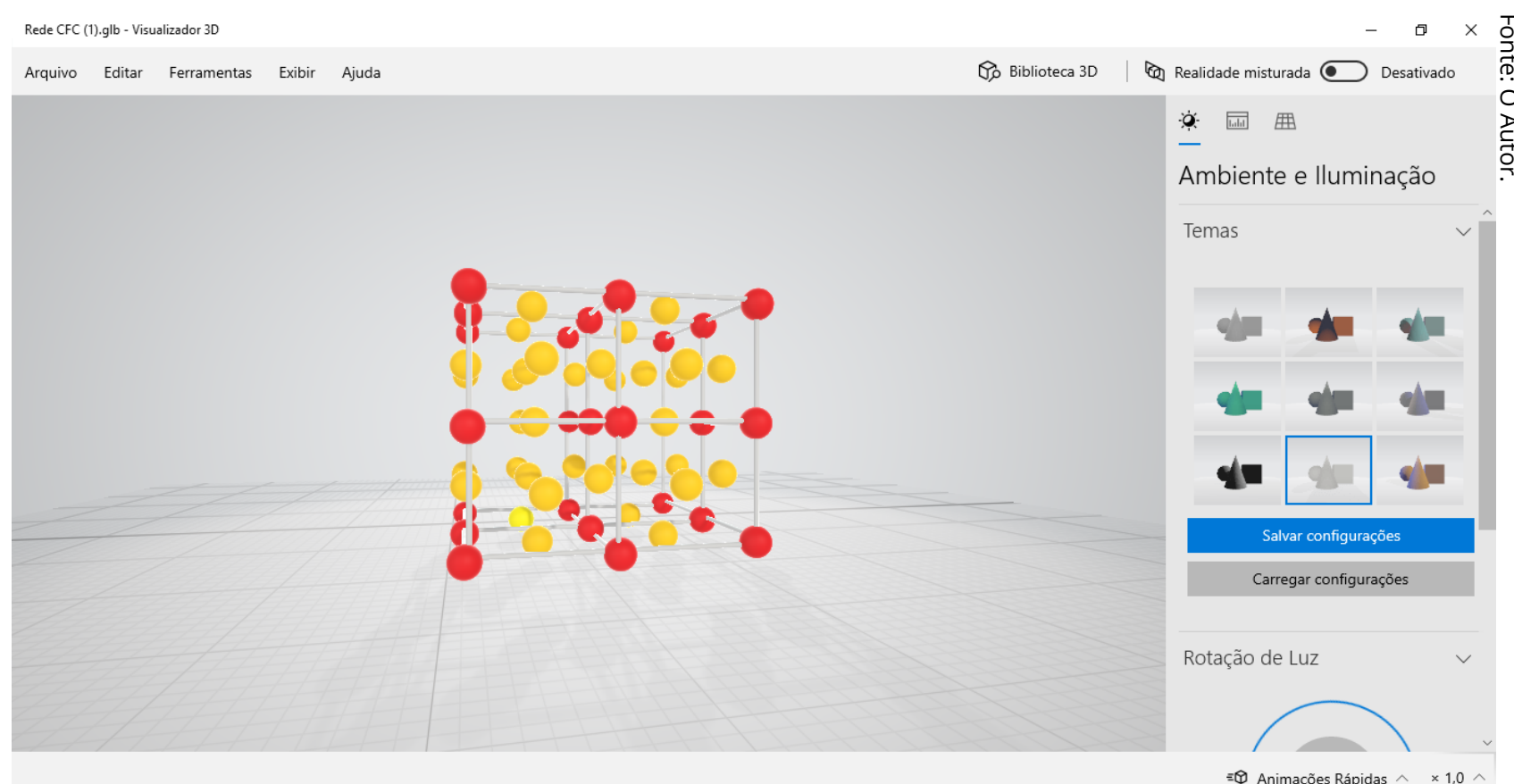
Parte 2- Mapeando nossa rede cristalina.

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

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:

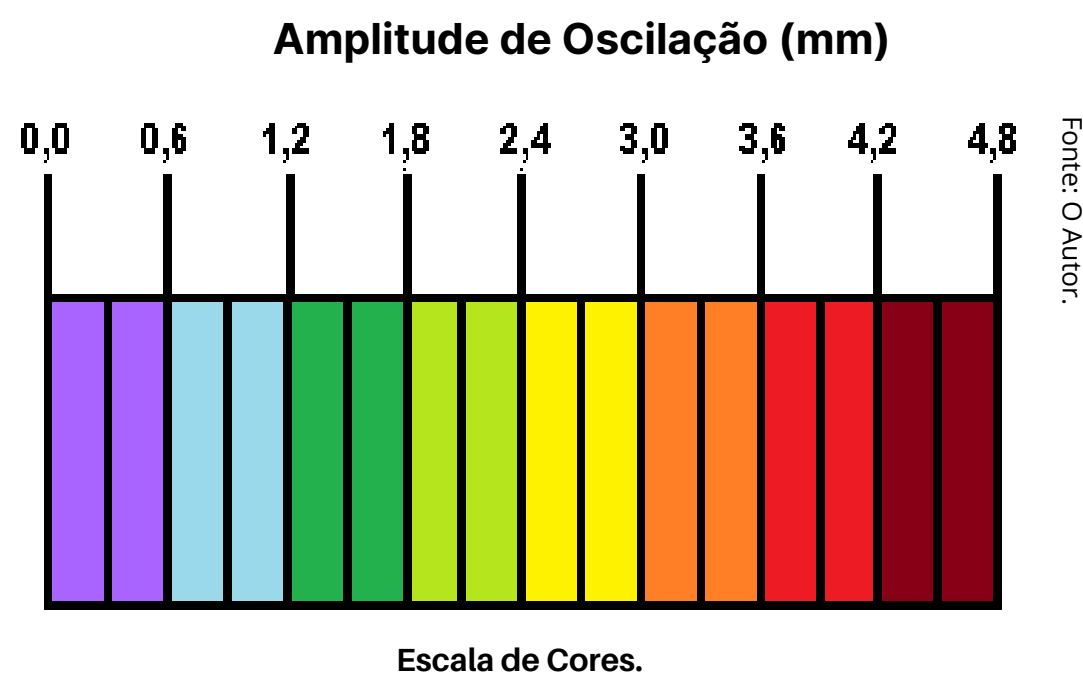


Interface do *Visualizador do Paint 3D* mostrando o modelo da rede cristalina que estamos estudando.

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!

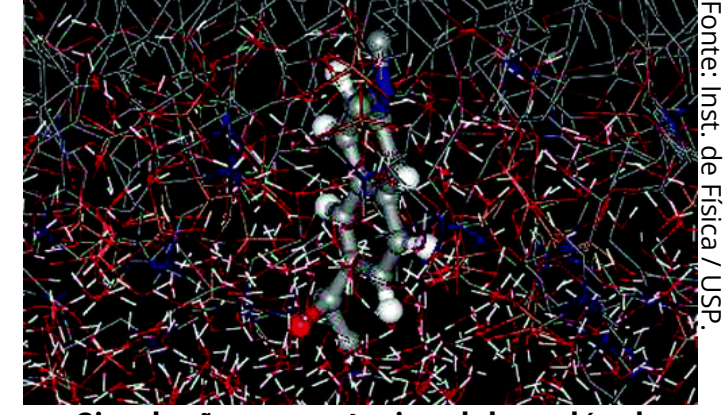
Atividade

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

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:

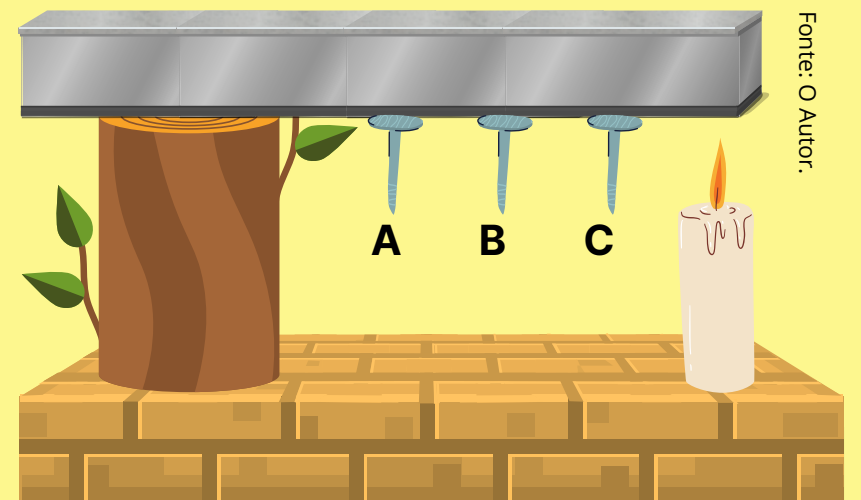
Nomes:

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.



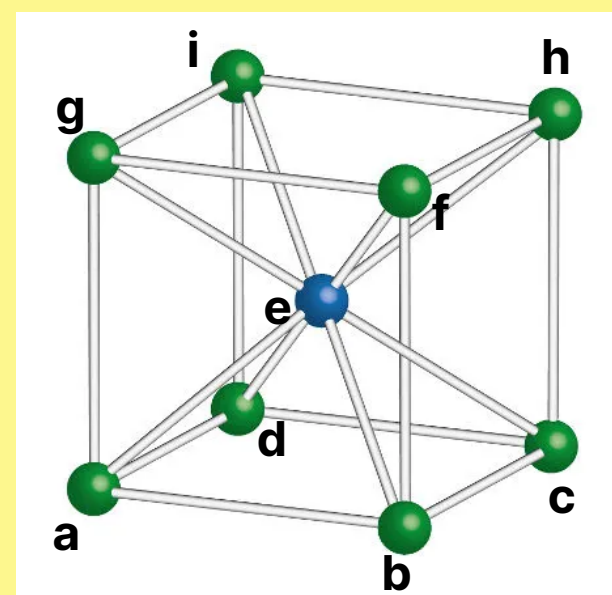
Questão 2- Analise a célula unitária do sólido ao lado.

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.

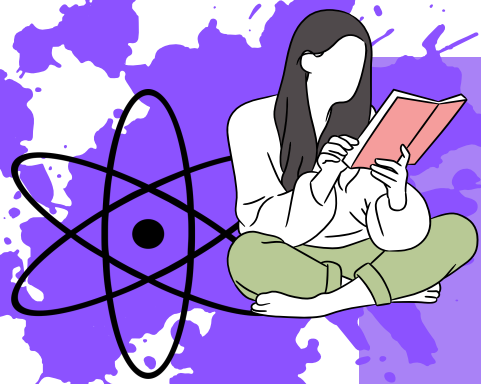
Questão 4- Dois ovos crus são postos ao mesmo tempo em lados opostos de uma frigideira, como mostrado na figura ao lado. A frigideira é levada ao fogo, de modo que a chama incida exatamente no centro inferior dela. Responda:

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.

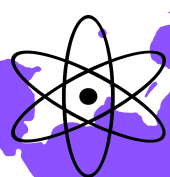
NAMBA, A. M., et. al. **Dinâmica Molecular: Teoria e Aplicações em desenvolvimento de fármacos**. Ecl. Quím., São Paulo, v. 33, n. 4, p. 13-24, 2008.

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. 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.

