



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO

Instituto de Física

Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física

Mestrado Profissional em Ensino de Física

Vendo nas Entrelinhas: o uso de linhas de campo no ensino de eletromagnetismo

(Material Instrucional)

Douglas Ferreira de Souza
Reinaldo Faria de Melo e Souza
Rodrigo Miranda Pereira

Material instrucional associado à dissertação de mestrado de Douglas Ferreira de Souza, apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física da Universidade Federal do Rio de Janeiro.

Rio de Janeiro
Dezembro de 2024

Sumário

1	Introdução	3
2	Descrição do Material Instrucional	5
2.1	Atividade 1: Boas Vindas à Física do Invisível	5
2.2	Aula 1: Boas Vindas à Física do Invisível	7
2.3	Aula 2: O que é Carga Elétrica? A evolução do conceito ao longo do tempo	7
2.4	Atividade 2: Mapeando as Linhas de Campo	8
2.5	Atividade 3: Lendo as linhas (de campo) na palma da sua mão	10
3	Cargas 3D	14
3.1	Modelagem das Cargas no Fusion 360	15
3.1.1	Construindo um Dodecaedro	16
3.1.2	Construindo as Esferas	19
3.2	Processo de Impressão	21
3.3	Montagem e demais cuidados com a peça	22
4	Material do professor	25
4.1	Links para as apresentações em slides (Powerpoint/Apresentações Google)	25
4.2	Links para Impressão 3D	25
5	Material do aluno	26

Capítulo 1

Introdução

Caro(a) professor(a),

Este material foi desenvolvido pensando em você, que está à procura de novas formas de abordar a Eletrostática em sala. Aqui, você encontrará uma sequência de aulas e atividades com o objetivo de tornar o tema menos abstrato e mais acessível para seus alunos, proporcionando uma experiência de aprendizado envolvente e significativa. Para isso adotamos o conceito das Linhas de Campo como um recurso chave que interliga todas as atividades.

Neste capítulo, você encontrará uma visão geral do material e como ele pode ser utilizado no planejamento das suas aulas.

No capítulo seguinte, todas as aulas e atividades da sequência didática estão detalhadamente descritas. Recomendamos que siga a ordem apresentada, pois ela foi cuidadosamente planejada para construir gradualmente os conceitos e habilidades necessários para o entendimento completo da Eletrostática. No entanto, fique à vontade para ajustar o ritmo e a ordem de acordo com as necessidades e limitações de sua turma, seja em termos de tempo ou recursos disponíveis.

O terceiro capítulo traz um guia completo para modelar, imprimir e montar as peças em 3D que utilizamos em nossa última atividade. Sabemos que nem todas as escolas têm fácil acesso a impressoras 3D, mas acreditamos que este recurso pode agregar valor ao ensino, permitindo que os alunos explorem conceitos abstratos de maneira mais concreta e prática. Além disso, incluí-

mos sugestões de alternativas caso a impressão 3D não esteja disponível.

No quarto capítulo, disponibilizamos uma sequência de links com os materiais do professor, incluindo slides das aulas, modelos dos materiais utilizados e outros links que julgamos relevantes para facilitar a implementação das atividades em sala de aula.

No capítulo final, você encontrará o material dedicado aos alunos, com roteiros de atividades prontos para serem utilizados diretamente em sala de aula. Esses roteiros foram pensados para facilitar a condução das atividades e promover a autonomia dos estudantes durante o processo de aprendizagem.

Os materiais mencionados, assim como a dissertação associada a este material instrucional, podem ser encontrados na [página do Mestrado Profissional em Ensino de Física da UFRJ](https://bit.ly/4fzcKs0) (bit.ly/4fzcKs0) ou diretamente nos **capítulos 4 e 5** deste texto.

Douglas de Souza

Reinaldo de Melo e Souza

Rodrigo Pereira

Capítulo 2

Descrição do Material Instrucional

2.1 Atividade 1: Boas Vindas à Física do Invisível

O objetivo desta atividade é investigar as concepções prévias dos estudantes sobre eletrostática, e ao mesmo tempo promover a reflexão ativa deles sobre o conceito de campo. Para isso, os estudantes realizarão o clássico experimento de atrair pedaços de papel com um material eletrizado por atrito.

Essa atividade pode ser realizada sem grandes despesas, usando materiais simples e facilmente acessíveis em sala de aula, como papel de caderno e canetas esferográficas, além do roteiro impresso, que está no capítulo 5. Como sugestão, recomendamos substituir as canetas por canudos plásticos, que, apesar de comuns no dia a dia dos alunos, não são comuns em salas de ensino médio. Essa pequena mudança é capaz de gerar um aumento significativo no engajamento dos alunos.

Sugerimos ainda o uso de canudos de cores sortidas para que os alunos possam escolher o seu. Dar o poder de escolha para o aluno ajuda a personalizar a experiência, criando assim um vínculo com a tarefa. Além de ser um material de baixo custo, canudos coloridos ainda podem ser facilmente encontrados em lojas de artigos para festas.

Outro fator importante de se lembrar é que as condições climáticas podem interferir no experimento. Em locais ou períodos de baixa umidade, é mais fácil eletrizar corpos por atrito, enquanto em ambientes úmidos o processo pode ser mais demorado, mas ainda viável. O tipo de cabelo e os produtos que os alunos utilizam podem influenciar o resultado. Em caso de dificuldade, o professor pode disponibilizar folhas de papel-toalha para o atrito. Recomendamos que o professor teste a atividade previamente para garantir o sucesso em sala.

Cada grupo de estudantes (entre 3 a 4 estudantes) recebe uma cópia do roteiro.

1. Na questão 1, os estudantes recebem instruções para realizar o experimento e são orientados a comparar o comportamento do sistema antes e depois do atrito. O objetivo é que eles observem e descrevam o fenômeno, percebendo que ele está diretamente relacionada ao atrito.
2. Na questão 2, os estudantes devem relacionar a interação entre o tubo e o papel com a distância entre eles. Embora possa parecer uma questão simples agora, ela é fundamental para a sequência didática, pois as respostas fornecidas pela turma aqui estarão em destaque na atividade seguinte, quando o conceito de linhas de campo for abordado, mas os alunos não deverão saber disso neste momento.
3. Na questão 3, o grupo é incentivado a formular hipóteses sobre o efeito da fricção entre o cabelo e o tubo, explorando as mudanças que ocorrem no tubo após o atrito. O objetivo é avaliar os conhecimentos prévios dos alunos sobre a composição da matéria. Além disso, caso um integrante do grupo tenha maior entendimento sobre o tema o objetivo é que ele possa ajudar a lembrar os demais, promovendo a instrução por pares.
4. A questão 4 tem como objetivo incentivar os estudantes a refletirem sobre os mecanismos invisíveis por trás das interações a distância.
5. Na última questão, os alunos são desafiados a discutir a sobre a existência de um terceiro elemento presente na interação entre o tubo e o

papel. Em caso de uma resposta positiva, pede-se aos alunos para usarem a criatividade para dar um nome e uma forma para esse elemento misterioso.

2.2 Aula 1: Boas Vindas à Física do Invisível

Os objetivos desta sequência de slides são, primeiramente, provocar uma série de questionamentos aos alunos, incentivando-os a refletir sobre ações à distância que eles já experimentam em seu dia a dia. Junto com as perguntas, ao longo da sequência, introduzimos a ideia de um mediador dessas interações, que ao final da atividade chamamos de campo. No encerramento, propomos um breve questionamento para debater com os alunos se a ideia de campo é realmente necessária e se ele de fato existe.

2.3 Aula 2: O que é Carga Elétrica? A evolução do conceito ao longo do tempo

Diferente da aula anterior, nesta miramos exclusivamente na Eletrostática com o objetivo de apresentar cargas elétricas como criadoras e destruidoras de linhas de campo. A sequência começa com uma introdução histórica, destacando Tales de Mileto e suas observações sobre o atrito no âmbar (do grego *elektron*), seguidas pela popularização da eletricidade no século XVIII com experimentos como o de Stephen Gray, e como esse fenômeno influenciou na cultura pop como conhecemos hoje. Em seguida, aborda-se o trabalho de Benjamin Franklin, que identificou os dois tipos de eletricidade, e Charles Coulomb, que formulou a Lei de Coulomb.

Destacamos que, até este ponto, não há grandes novidades em relação à forma como a eletrostática é apresentada no ensino médio — muitos livros didáticos já fazem essa introdução nas primeiras páginas do capítulo inicial de eletrostática. A diferença em nosso material é que, ao contrário do tradicional, que apresenta o conceito de campo apenas em capítulos posteriores, aqui optamos por fazer uma transição direta de Coulomb e sua lei de força

para Michael Faraday e o conceito de campo elétrico. Vale salientar que, embora tenhamos passado rapidamente pela Lei de Coulomb, isso não significa que não voltaremos a utilizá-la mais adiante. Ela será retomada para ensinar os alunos a quantificar a força elétrica.

Adiante, as cargas são apresentadas como criadoras/devoradoras de linhas de campo, e explicamos as regras básicas dessas linhas.

2.4 Atividade 2: Mapeando as Linhas de Campo

Embora os estudantes frequentemente acreditem ter compreendido plenamente uma aula expositiva e afirmem não ter dúvidas, a aplicação desse conhecimento costuma ser uma etapa bem mais desafiadora. O objetivo desta atividade é justamente instigar os alunos a refletir e manipular as linhas de campo, transformando as informações adquiridas em um conhecimento mais sólido.

Para realizar essa atividade, o único material necessário é uma cópia do roteiro da Atividade 2 (disponível no Capítulo 5), sendo uma cópia por grupo de 3 a 4 alunos. Vale destacar que não é necessário manter a mesma formação de grupos da atividade anterior.

O início da atividade pode apresentar dificuldades para os alunos, portanto o professor desempenha um papel fundamental nesta etapa, oferecendo maior atenção e suporte aos grupos. À medida que a atividade avança, os alunos começam a se adaptar, colaborando uns com os outros, auxiliando seus colegas e se engajando nas discussões, tanto dentro de seus grupos quanto com grupos adjacentes.

1. Na questão 1, é apresentada uma carga pontual positiva e pede-se que os alunos desenhem as linhas de campo geradas por essa carga. Em seguida, eles devem analisar a ação do campo em um ponto específico, representando o vetor campo elétrico e a força elétrica que uma carga de prova experimentaria em duas situações: sendo ela positiva ou negativa. O objetivo aqui é leva-los a perceber a relação entre força e campo, e a sua dependência com o sinal da carga no ponto.

2. A questão 2, adaptada do vestibular da UFSM de 2014, avalia se os estudantes conseguem relacionar densidade das linhas com intensidade do campo, bem como a capacidade de associar as linhas de campo com sua fonte. Além disso, destaca-se que a compreensão das linhas de campo é uma habilidade frequentemente cobrada em vestibulares.
3. A questão 3 pede aos alunos que desenhem vetores representando o campo elétrico e a força elétrica atuando sobre uma carga em um ponto onde as linhas de campo são curvas. Nesse ponto, não é mais possível inferir a distribuição de cargas que originou essa configuração, embora ela ainda seja real.
4. Na questão 4, a turma é introduzida ao conceito de Campo Elétrico Uniforme (CEU) pela primeira vez. Os alunos são desafiados a identificar o ponto de maior intensidade do campo, embora, como professores, saibamos que o campo é o mesmo em toda a região. O objetivo é fomentar o debate tanto entre os membros do mesmo grupo quanto entre diferentes grupos, com o professor atuando como questionador e mediador da discussão, guiando-os até que a maioria chegue à conclusão correta. Somente ao final da atividade o professor formaliza o conceito de CEU.
5. Na última questão, os estudantes devem comparar suas respostas da questão 2 da atividade anterior com as imagens apresentadas e escolher qual melhor representa o campo elétrico do canudo, justificando com base em seus conhecimentos sobre linhas de campo.

No capítulo 5, você encontrará essa questão no roteiro, juntamente com as respostas fornecidas pela primeira turma a que esse material foi aplicado. Recomendamos que, ao destacar esse roteiro em PDF, o professor edite essa parte, substituindo as respostas da turma anterior pelas respostas da sua própria turma, mantendo o modelo original, onde os trechos que indicam a relação entre distância e intensidade estão destacados em negrito.

Para realizar essa edição, sugerimos o uso de um editor de PDF online

gratuito, caso o professor não disponha de um software específico em seu computador. Uma simples busca na internet oferece diversas opções de editores gratuitos.

2.5 Atividade 3: Lendo as linhas (de campo) na palma da sua mão

Nesta atividade, os estudantes irão explorar empiricamente o conceito de campo elétrico e a Lei do Inverso do Quadrado. Para isso, eles serão divididos em grupos, preferencialmente em duplas ou trios, dependendo do tamanho da turma e da quantidade de kits disponíveis. Cada grupo receberá um roteiro (disponível no capítulo 5) e um kit contendo três peças identificadas pelo professor como A, B e C, que representam cargas pontuais em diferentes configurações (veja na Figura 2.1).

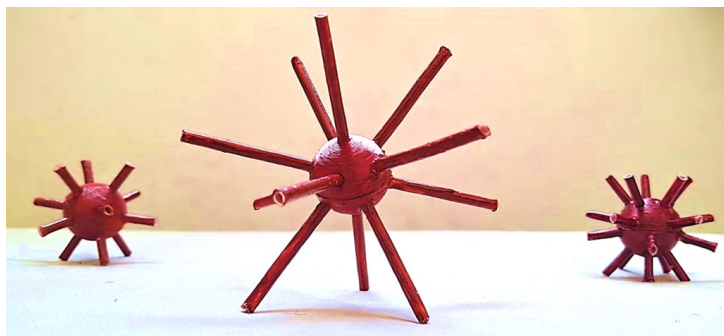


Figura 2.1: Kit contendo as três peças: Peça A (à esquerda), Peça B (à direita) e Peça C (ao centro), representando diferentes configurações de cargas pontuais para a Atividade 3

O professor apresentará as peças e orientará os alunos a analisá-las de forma individual inicialmente, observando suas características.

- A Peça A é uma esfera com 12 hastes radiais, representando uma carga pontual positiva de módulo Q . As hastes não indicam sentido, simbolizando uma carga positiva. A maior distância entre dois extremos é de 6 cm (raio de 3 cm).

- A Peça B possui 20 hastes de comprimento igual às da primeira peça, representando uma carga pontual com módulo de $\frac{5Q}{3}$.
- A Peça C, semelhante a peça A, possui 12 hastes, mas com uma distância total entre extremos de 12 cm, simulando uma carga pontual de módulo Q observada 2 vezes mais distante em relação a Peça A.

O objetivo desta atividade é proporcionar aos estudantes uma experiência prática e sensorial que permita uma compreensão empírica do conceito da Lei do Inverso do Quadrado. Ao manipular as peças e observar a concentração das linhas de campo em suas mãos, os alunos poderão associar a intensidade do campo elétrico a uma percepção física e tangível, facilitando a internalização do conceito abstrato que é o campo elétrico como uma entidade concreta e mensurável. Com isto em mente, foram elaboradas as questões do roteiro, planejadas para orientar os estudantes nessa análise.

Antes de começar a responder as perguntas do roteiro, os alunos devem desenhar círculos em suas mãos, nos quais, em algumas questões, eles terão que posicionar as peças para medir a densidade de linhas de campo. É importante que mais de um aluno faça essas medições, pois esses valores vão variar de aluno para aluno e o grupo todo deve chegar a um valor comum para todos, aumentando o número de medidas.

O roteiro da atividade é estruturado em quatro partes, cada uma com o foco em uma peça, além da parte final que é a conclusão. Abaixo, uma análise das questões de cada parte:

Para a **Peça A**:

1. A Questão 1 pede apenas para os alunos identificarem a direção e o sentido das linhas de campo, mesmo sem indicação explícita de sentido nas hastes - porém com a informação de que a carga é positiva.
2. A Questão 2 pede para os alunos realizarem a primeira medição do número de linhas sobre a região delimitada na mão - que representa densidade de linhas - para ser usada como comparação com as demais peças.

3. Na Questão 3 deve-se medir a distância entre o centro da carga e uma das extremidades das hastes (o raio da peça). Pode ser aconselhado pelo professor que a medida seja feita de ponta a ponta e dividida por dois para obter o raio.

Para a **Peça B**:

1. Nas Questões 1 e 2, os alunos devem prosseguir com as medições, que servirão como base para desenvolver as respostas às questões 3 e 4.
2. A Questão 3 explora a capacidade dos alunos de relacionar, em um contexto tridimensional, o valor da carga com a quantidade de linhas de campo da peça, permitindo uma comparação qualitativa sobre qual peça representa uma carga de maior módulo (A ou B). Como objetivo secundário, verifica-se se os alunos conseguem extrapolar a razão entre as linhas ($5/3$) para a razão entre os módulos das cargas.
3. Na Questão 4, o professor deve estimular os alunos a estabelecer uma correlação matemática entre campo e carga, esperando-se que eles argumentem a favor da proporcionalidade direta entre essas grandezas.

Para a **peça C**:

1. Nas Questões 1 e 3, os alunos devem continuar realizando as medições, que servirão de base para as respostas nas demais questões relacionadas à peça.
2. A Questão 2 tem como objetivo fazer com que os alunos percebam que, embora as peças A e C apresentem diferenças físicas, ambas representam a mesma carga, porém sob diferentes perspectivas.
3. A Questão 4 investiga se os alunos conseguem expandir a análise e imaginar que, para hastes mais longas, o valor da carga permanece constante, enquanto as extremidades das hastes ficam cada vez mais distantes entre si, indicando uma diminuição da densidade do campo.

4. Na Questão 5, o professor deve incentivar os alunos a estabelecer uma correlação matemática entre o campo e a distância em relação à carga. Espera-se que os alunos argumentem que essas grandezas são inversamente proporcionais. O professor pode intervir, quando necessário, para orientá-los a observar que a relação é, na verdade, inversamente proporcional ao quadrado da distância, dependendo dos resultados obtidos. Esse ponto pode ser abordado durante a aula ou em uma discussão posterior.

Na parte final, a **Conclusão**, os alunos devem juntar as conclusões obtidas nas questões 4 da peça B e 5 da peça C, chegando ao conceito de que $E \propto \frac{Q}{d^2}$, ou conclusões próximas. O professor conduzirá a discussão para consolidar esse entendimento, destacando que esse é um passo sutil, portanto não se espera que todos cheguem ao resultado da Lei de Coulomb.

Capítulo 3

Cargas 3D

Neste capítulo, detalharemos o processo de construção das peças utilizadas na terceira atividade da sequência didática apresentada. Nela, cada grupo de estudantes recebeu um kit contendo três peças, sendo que duas delas são baseadas no mesmo modelo 3D, representando uma carga com 12 linhas de campo elétrico. A única diferença entre essas duas peças está no tamanho das linhas de campo (as hastes). A terceira peça, por sua vez, representa uma carga com 20 linhas de campo, exigindo uma modelagem distinta.

Cada peça é composta por duas partes: uma esfera com encaixes, que representa uma carga pontual, e as hastes, que representam suas linhas de campo. A esfera foi modelada e impressa em 3D, enquanto as hastes foram adquiridas separadamente, já prontas. Optar por um material pronto não apenas reduziu o tempo total de impressão, mas também aumentou a durabilidade das peças, já que hastes impressas em 3D tendem a ser frágeis. Como hastes foram utilizados 'palitos de pirulito e topo de bolo', facilmente encontrados em lojas de artigos para festas, embora creio que qualquer material similar possa substituí-los. O importante é que as hastes sejam compridas e fáceis de cortar, permitindo assim a manipulação precisa dos tamanhos necessários para representar as diferentes linhas de campo.

Para garantir a precisão na montagem, o primeiro passo antes de iniciar a modelagem é medir o diâmetro das hastes. A medida encontrada para as hastes utilizadas neste projeto foi de 4,8 mm, sendo importante anotar esse

valor. O ideal é usar um paquímetro para obter uma medição precisa, mas, na ausência desse instrumento, pode-se utilizar uma régua. No entanto, ao utilizar uma régua, a imprecisão aumenta consideravelmente, resultando em possíveis encaixes inadequados das hastes, o que exigiria a reimpressão das peças. Para minimizar esse risco, recomenda-se imprimir uma peça de teste antes de iniciar a produção dos kits, conforme descrito no final da Seção 3.2.

3.1 Modelagem das Cargas no Fusion 360

O software escolhido para modelar as peças foi o Autodesk Fusion 360, um dos mais populares no ramo de modelagem 3D. Dentre as principais vantagens deste programa estão o fato de ele oferecer licenças gratuitas para uso doméstico (link disponível no capítulo 4) e o de contar com uma vasta comunidade de usuários, o que facilita o acesso a diversos tutoriais no YouTube, fóruns na internet e uma variedade de *plugins*.

As peças desenvolvidas nesse trabalho foram modeladas com o objetivo de serem completamente isométricas, e por isso a escolha de um software de modelagem paramétrica como o Fusion, ao invés de um software de modelagem orgânica - ideal para a modelagem de seres animados.

A modelagem de uma carga esférica isométrica envolve a distribuição equidistante de furos sobre sua superfície, nos quais as linhas de campo serão encaixadas. Entretanto, conforme discutido no Capítulo 2 da dissertação associada a este material, essa distribuição uniforme só é possível quando utilizamos como base poliedros regulares — também conhecidos como poliedros de Platão. Para um aprofundamento nas nuances geométricas intrínsecas ao conceito de linhas de campo em três dimensões, recomendamos ao leitor conferir a seção 2.3 da dissertação.

Portanto a escolha por modelos de 12 e 20 furos não é arbitrária, mas resulta diretamente da limitação no número de poliedros platônicos. Podemos usar como base para isto um dodecaedro onde fazemos 12 furos a partir do centro de suas faces e 20 furos a partir dos 20 vértices. Da mesma forma, podemos usar apenas um icosaedro (20 faces e 12 vértices) para construir ambos os modelos. Mostrarei brevemente como se faz das duas maneiras.

3.1.1 Construindo um Dodecaedro

Ao abrir o aplicativo, damos um nome para nosso projeto e criamos a base da nossa peça clicando com o botão direito em (Não Salvo) > Novo componente. Por organização, é bom nomear esse componente de Dodecaedro. A partir daí a maneira mais fácil de gerar um dodecaedro é através do *plugin* **Gerador de Poliedros**.

Essa extensão pode ser obtida gratuitamente na loja de aplicativos da Autodesk. Para acessá-lo, vá até a aba Utilidades, clique sobre o nome "Complementos" e depois selecione "Loja de Aplicativos do Fusion". Na página que será aberta no navegador, use a barra de pesquisa para procurar por "Polyhedron Generator". Após localizar o Gerador de Poliedros, clique em "Download", execute o arquivo baixado, e o *plugin* já irá aparecer no seu Fusion. Para executar a extensão, vá em "Complementos" novamente, clique em "Script e Complementos" e, na aba Complementos da janela que é aberta, selecione "Polyhedron Generator" e clique em executar.

Depois disso você pode ir até a aba Sólidos, clique sobre "Criar" e o Gerador de Poliedros aparecerá no final da lista. Ao abrir o gerador de poliedros, basta selecionar o dodecaedro entre os sólidos platônicos e confirmar. A Figura 3.1 mostra o polígono gerado.

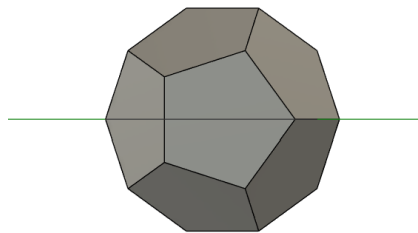


Figura 3.1: Dodecaedro construído pelo Gerado de Poliedros

Embora o uso de um *plugin* possa facilitar a criação de um dodecaedro, é totalmente possível construí-lo manualmente no Fusion 360. A seguir, explicarei o processo passo a passo, portanto, caso tenha êxito através da extensão, pule para a subseção 3.1.2.

Caso, por algum motivo, não tenha conseguido instalar o *plugin*, crie um novo componente, e o nomeie "Dodecaedro". Vá até a aba "Superfície", clique em Criar Esboço e selecione o plano XY. Em seguida, acesse o menu "Criar» Polígono > Polígono Inscrito e configure o número de lados do polígono para 5 e o raio da circunferência como 11,5 mm a partir da origem. Finalize o esboço para criar uma superfície sólida a partir dele.

Selecione o perfil do pentágono, criado a partir do esboço, e ainda na aba "Superfície" clique na ferramenta Correção (ao lado de Criar Esboço) e depois em "OK". Nesse ponto, você terá a primeira face do nosso dodecaedro.

Duplique a superfície recém-criada, expandindo o componente Dodecaedro no navegador do Fusion (lista que fica à esquerda), abrindo a pasta "Corpos", copiando o único elemento da pasta (ver a Figura 3.2) com o '*Ctrl + C*' e dando '*Ctrl + V*', ou 'colar', na mesma pasta.

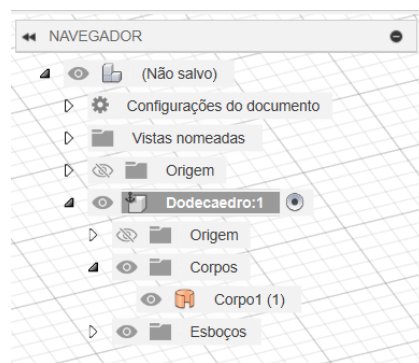


Figura 3.2: Local de 'Corpo1 (1)', elemento a ser duplicado

Ao fazer isto, automaticamente será aberta a ferramenta "Mover/Copiar", se, por algum motivo, a janela desta ferramenta não aparecer, clique sobre 'Corpo 2 (1)' e em seguida a tecla "M". Em "Mover tipo» Rotacionar selecione o eixo de rotação clicando sobre uma das arestas da face pentagonal e insira o ângulo de rotação de 116,57 graus.. Verifique se a nova face está posicionada corretamente antes de finalizar o comando.

Para formar a primeira metade do dodecaedro, você pode replicar a nova face ao redor do eixo Z. No menu "Criar", selecione a ferramenta "Padrão Circular". Escolha a segunda face que você acabou de criar e defina o eixo de rotação como o eixo Z (o eixo vertical que passa pelo centro do dodecaedro).

Defina o número de repetições para 5 (como ilustra a Figura 3.3). Isso criará cinco faces ao redor da face central, distribuídas simetricamente.

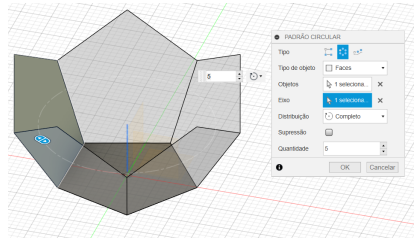


Figura 3.3

Agora que a primeira metade do dodecaedro está pronta, vamos criar a segunda metade. Primeiro, selecione todas as faces e clique sobre a ferramenta "Costurar" na aba "Superfícies" para combiná-las em um único objeto. Assim como utilizamos o navegador para duplicar a primeira face, repetimos o processo para duplicar a primeira metade do nosso poliedro. Gire a cópia em 180 graus ao longo do eixo x, a manipule pelos controles da ferramenta de modo a posicionar o objeto na eminência do encaixe com a primeira metade como a Figura 3.4 mostra.

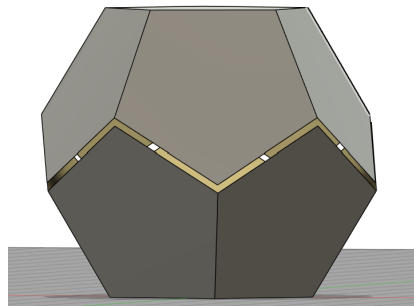


Figura 3.4

Para ajustar a posição da segunda metade e garantir que ambas se encaixem corretamente, utilize novamente a ferramenta "Mover/Copiar". Em seguida, em "Mover Tipo» "Ponto a ponto", alinhe uma quina da face superior com sua respectiva "concavidade" logo abaixo. Dessa forma, você garante que as faces estão corretamente unidas. Para transformar as faces em um único objeto, selecione tudo e, na aba "Superfície", clique em "Costurar".

3.1.2 Construindo as Esferas

A próxima fase envolve a modelagem da peça a ser impressa, que consiste na esfera com os encaixes. O primeiro passo desta fase varia ligeiramente, dependendo se o dodecaedro foi construído (1) por meio do Gerador de Poliedros ou (2) manualmente, face a face, conforme detalhado anteriormente.

1. Desative a visualização do dodecaedro e crie um novo componente chamado "Esfera12"(ou escolha um nome que faça sentido para a esfera com 12 furos). Na aba Sólido, clique em "Criar"e modele uma esfera centrada na origem com um diâmetro de "30/1,35". Após isso, selecione ambos os componentes, vá em Montagem > Grupo Rígido, para que as transformações aplicadas à esfera sejam refletidas no poliedro. Por último, selecione novamente os dois componentes e acesse Modificar > Escala > 1,35, ajustando o grupo ao tamanho final para impressão.
2. Crie um novo componente "Esfera12", vá até o menu "Criar"e selecione "Esfera"e defina o diâmetro em 30 mm a partir da origem. Depois que a esfera for criada, centralize-a com o dodecaedro já modelado, basta deslocá-lo -15.063 mm no eixo Z com a ferramenta "Mover/Copiar".

Como medida de segurança, e para posteriormente construir a segunda esfera, crie uma cópia do conjunto Dodecaedro + Esfera e salve o projeto em uma pasta no seu computador.

Selecione uma das faces do dodecaedro e escolha "Criar Esboço"para desenhar um círculo centralizado, que será usado para os furos na esfera. Para determinar o centro da face pentagonal, crie duas linhas medianas do tipo "de construção", e no ponto de interseção, desenhe um círculo com o diâmetro correspondente às hastes, previamente medido com um paquímetro – no nosso caso, 4,8 mm. A Figura 3.5 ilustra esta etapa do processo. Com o esboço do círculo pronto, selecione-o, altere o componente para a esfera e pressione "E"para realizar a extrusão, direcionando-a para o interior da esfera, criando os furos. No exemplo, a extrusão foi de 9 mm, mas isso pode variar na peça final impressa. É importante conferir a profundidade conforme descrito na montagem. Nos links (4) fornecemos um modelo de uma esfera

dentro de um dodecaedro, permitindo que você ajuste o diâmetro dos furos e economize tempo iniciando o processo de modelagem a partir deste ponto.

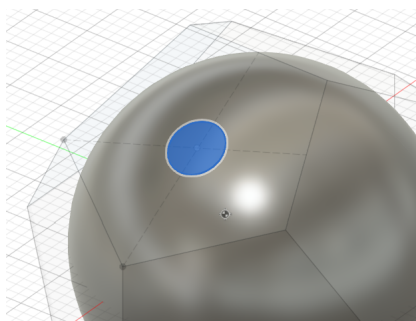


Figura 3.5: Visão em perspectiva da peça antes do primeiro furo. A visualização do poliedro foi reduzida apenas para destacar que a esfera permanece dentro do poliedro. No entanto, ainda é possível visualizar as retas auxiliares sobre ele, usadas para localizar o centro da face para fazer o furo.

Repetimos esse processo para todas as faces do dodecaedro, e ao final temos a esfera com 12 furos, pronta para impressão - basta exportar o arquivo no formato 3mf.

Para modelar a esfera com 20 furos, o procedimento é praticamente o mesmo. Se estiver utilizando o *plugin*, basta selecionar um icosaedro como base, criar uma esfera de diâmetro 15 mm, agrupar as peças e reescalar pelo fator 2. Caso tenha modelado o dodecaedro manualmente, não é necessário criar um icosaedro do zero – você pode utilizar o modelo do dodecaedro já construído.

Para isso, no dodecaedro (seja uma cópia ou o original), utilize a ferramenta "Chanfrar" em "Modificar". Selecione todo o dodecaedro e aplique um chanfro de 5 mm. Com isso, um novo poliedro, embora não regular, é formado. O ponto crucial é que cada um dos 20 vértices do poliedro original se transforma em uma face triangular equilátera. No ponto de encontro das medianas dessas faces, é possível criar esboços de circunferências com 4,8 mm de diâmetro e realizar a extrusão sobre uma nova esfera, semelhante ao processo de criação da peça anterior. No entanto, recomendo uma extrusão um pouco menor que os 9 mm; no modelo a ser impresso, utilizamos 7 mm. O modelo dessa peça antes e depois dos furos de 4,8 mm também pode ser

encontrado nos links disponíveis no Capítulo 4.

A Figura 3.6 ilustra a versão final de cada uma das peças.

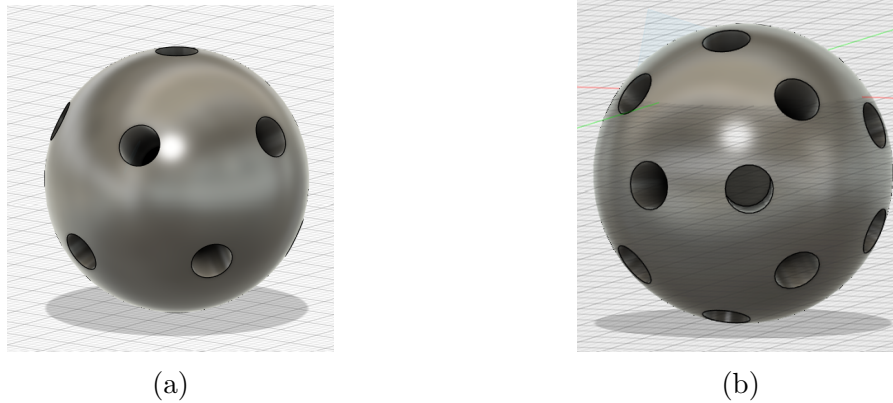


Figura 3.6: Modelo final da esfera de (a) 12 encaixes e (b) 20 encaixes

3.2 Processo de Impressão

Quem está familiarizado com impressão 3D sabe que, antes de imprimir um modelo, é necessário processá-lo em um software de fatiamento. Recomendamos o PrusaSlicer, que foi o que utilizamos. Além de ser uma ferramenta completa, ele permite dividir o modelo em duas semiesferas, o que facilita o processo de impressão e garante maior precisão nos detalhes.

Para isso, basta abrir a peça no programa e selecionar a ferramenta "Cortar"(ou simplesmente pressionar a tecla "C"). Por padrão, o corte será feito em um plano horizontal que divide a peça ao meio. Caso essa opção não apareça, ajuste o corte manualmente com os controles da ferramenta e depois clique em "Aplicar o corte". Em seguida, mova as partes de modo que suas bases fiquem apoiadas na mesa de impressão, como mostrado na Figura 3.7. Nessa etapa, também é possível copiar e colar as semiesferas, conforme a quantidade necessária de peças e o espaço disponível na mesa de impressão.

Essa técnica de impressão elimina a necessidade de suportes adicionais, simplificando o processo. Para este projeto, utilizamos uma impressora Creality Ender-2 com material PLA genérico. Não foi necessário adicionar suportes para os furos da peça, pois o suporte natural da própria peça foi suficiente.

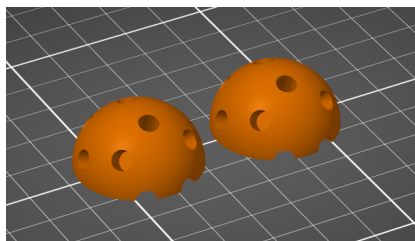


Figura 3.7

Com o modelo finalizado e todas as configurações ajustadas, exportamos o arquivo G-code para a impressora e iniciamos a impressão.

Recomendo começar imprimindo uma única semiesfera para verificar se o modelo se encaixa corretamente com as hastes, uma questão comum em impressões 3D. Além disso, é crucial garantir que as configurações da impressora, como a temperatura da mesa, temperatura do nozzle e altura da mesa, estejam devidamente ajustadas. Caso contrário, a peça pode apresentar desde pequenas imperfeições até falhas graves que comprometem a impressão.

Após imprimir as duas semiesferas, utilize supercola para uni-las, tomando cuidado para preservar a forma original da peça. Nesta etapa, é útil manter o modelo 3D aberto em uma tela, para auxiliar na precisão do encaixe.

3.3 Montagem e demais cuidados com a peça

Com as esferas prontas, o próximo passo é preparar as hastes. Para cada conjunto de três esferas, corte os palitos em 22 segmentos de 2,3 cm (0,8 cm para a profundidade do furo + 1,5 cm que ficarão expostos fora da esfera) e 12 segmentos de 5,3 cm (0,8 cm para o furo + 4,5 cm que ficarão para fora da esfera).

Vale lembrar que a profundidade do furo pode variar ligeiramente entre os modelos de peças. O ideal é, após imprimir uma peça, encaixar a haste corretamente no furo (sem que ela fique folgada), empurrá-la até o fundo e usar uma caneta para marcar a base da parte da haste que ficou exposta.

Depois, retire a haste e meça o comprimento que entrou no furo para garantir a precisão no corte das hastes.

Ao montar as hastes nas esferas, aplique uma pequena quantidade de cola em uma das extremidades de cada segmento maior e encaixe-os nos furos da esfera com 12 encaixes. Repita o processo com os segmentos menores para as demais esferas do conjunto.

Ao cortar os palitos, um alicate pode ser mais rápido, porém, ele tende a amassar as extremidades, o que pode causar desalinhamento no encaixe das hastes. Para evitar isso, uma faca de serra, embora mais trabalhosa, garante cortes mais uniformes, permitindo que as hastes se encaixem perfeitamente.

Para finalizar, pintamos as hastes com esmalte na mesma cor das esferas impressas. Optamos pelo esmalte porque tintas à base de água não aderem bem ao plástico liso. No entanto, essa etapa pode ser evitada se você adquirir o PLA na mesma cor dos canudos. Há uma ampla variedade de cores de PLA disponíveis na internet, o que pode ser uma solução prática. Se você já tiver o material de impressão antes de planejar a atividade, a pintura com esmalte pode não apenas proporcionar um acabamento mais refinado, mas também tornar as peças mais visualmente atraentes, o que pode aumentar o interesse dos alunos durante a atividade. Na Figura 3.8, vemos um modelo finalizado com 12 hastes de raio maior (denominada peça C no roteiro da atividade 3).

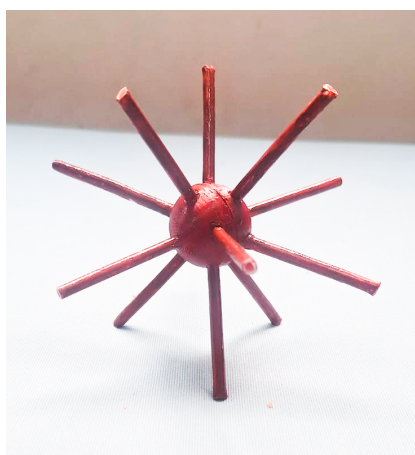


Figura 3.8

Por fim, é importante destacar que peças com muitas hastes tendem a

ser frágeis, e isso não será diferente ao usar palitos de plástico. Portanto, é essencial que o professor não leve apenas a quantidade exata de kits para a turma, especialmente em turmas grandes. Recomenda-se imprimir kits extras como reserva. Uma dica útil para aumentar a resistência das "linhas de campo" é inserir um palito de dente dentro dos canudos, caso haja espaço, o que ajuda a fortalecer as hastes e reduzir o risco de quebras.

Incentivamos que outros professores sintam-se à vontade para fazer suas próprias adaptações neste universo de Cargas Impressas conforme a necessidade de suas turmas, tempo disponível e conhecimento sobre o assunto, a fim de testar e criar variações das peças. Essas variações podem incluir o uso de maquetes (caso não tenham acesso a uma impressora 3D), a substituição dos canudos de plástico por hastes mais flexíveis, a criação de novas cargas utilizando os poliedros de Platão como base, ou até mesmo a impressão de outras situações, como linhas de campo do fio infinito ou do plano uniformemente carregado.

Capítulo 4

Material do professor

4.1 Links para as apresentações em slides (Powerpoint/Apresentações Google)

Aula 1 - Boas Vindas à Física do Invisível - Clique [aqui](https://bit.ly/40HipYf) (https://bit.ly/40HipYf)

Aula 2: O que é Carga Elétrica? - Clique [aqui](https://bit.ly/3Z1k7mk) (https://bit.ly/3Z1k7mk)

4.2 Links para Impressão 3D

1 - Download do Autodesk Fusion 360 para uso pessoal - Clique [aqui](https://bit.ly/4hQDYfj) (bit.ly/4hQDYfj)

2 - Modelo final com 12 furos (4.8 mm) utilizada na aplicação (*formato .3mf*)

- Clique [aqui](https://bit.ly/3AFDAPZ) (https://bit.ly/3AFDAPZ)

3 - Modelo final com 20 furos (4.8 mm) utilizada na aplicação (*formato .3mf*)

- Clique [aqui](https://bit.ly/48IUzxc) (https://bit.ly/48IUzxc)

4 - Modelo Dodecaedro pré-furado (*formato .f3d*) - Clique [aqui](https://bit.ly/3O33tMF) (https://bit.ly/3O33tMF)

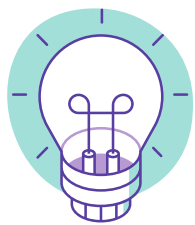
5 - Modelo Icosaedro pré-furado (*formato .f3d*) - Clique [aqui](https://bit.ly/3O3MEkI) (https://bit.ly/3O3MEkI)

Capítulo 5

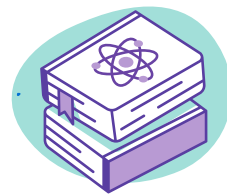
Material do aluno

Nas páginas a seguir se encontram os roteiros das três atividades descritas para o uso em sala de aula. Para destacar em pdf o roteiro da Atividade 1 para imprimir depois, basta pressionar *Ctrl + P* ou clicar em imprimir este documento e procurar pela opção 'Imprimir como PDF' ou 'Salvar como PDF' e marque da página 27 à página 28.

Para destacar apenas a Atividade 2, selecione desde a página 29 até a página 33. Para a Atividade 3 selecione desde a 34 até a 37.



Boas-vindas à Física do invisível



Nomes: _____



Antes de começar:

Lembrem-se de ler cuidadosamente todas as questões e não se preocupar em serem avaliados neste momento. O propósito aqui é compartilhar suas ideias e responder com suas próprias palavras.

Questão 1 - Distribuem pequenos pedaços de papel picado sobre a mesa e, em seguida, aproximem um canudo de plástico ou o tubo de uma caneta transparente dos papéis, observando sempre o que acontece. Repitam o procedimento, mas, antes de aproximar o canudo ou a caneta dos papéis, esfreguem o objeto repetidamente contra o cabelo de um dos integrantes do grupo. Após realizar as duas etapas, comparem e descrevam as diferenças observadas em cada situação.

Questão 2 - Que tipo de interação foi possível observar entre o tubo e o papel, e de que maneira a distância entre estes objetos está relacionada com essa interação?

Questão 3 - Na opinião do grupo, o que vocês acham que o **cabelo** mudou no **tubo** depois de ser esfregado nele? Discutam suas ideias, elaborem hipóteses e expliquem com suas próprias palavras

Questão 4 - E como o **papel** sabe quando o **tubo** está ou não atritado?

Questão 5 - É possível dizer que existe algo **entre** o papel e o tubo que influencie na interação entre os dois? Se a resposta for não, explique o que motiva a resposta do grupo. Se a resposta for sim, deem um nome para essa coisa e criem um desenho simples no espaço abaixo para ilustrar como poderíamos representar esse elemento misterioso - use formas, linhas, setas, a criatividade de vocês ou o que mais vocês acharem necessário para formular a “teoria” de vocês.





Mapeando Linhas de Campo

Nome: _____



Antes de começar:

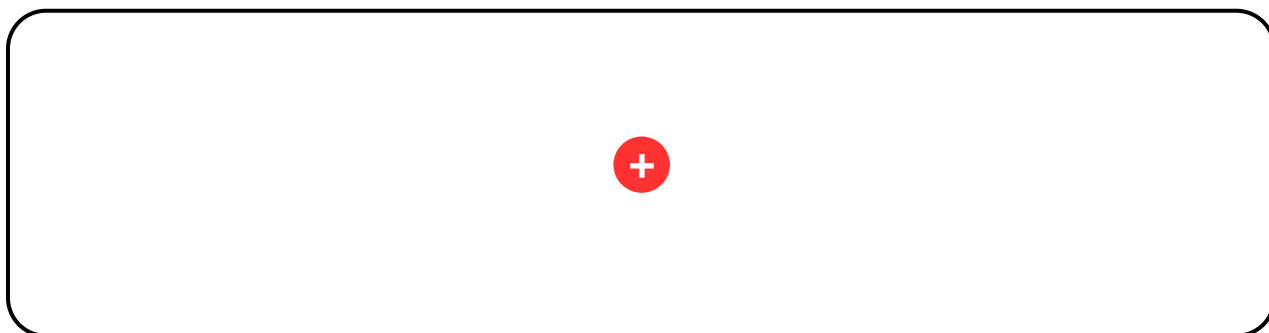
É importante que leiam cada enunciado com atenção, e usem os espaços fornecidos para desenhar ou escrever suas respostas.



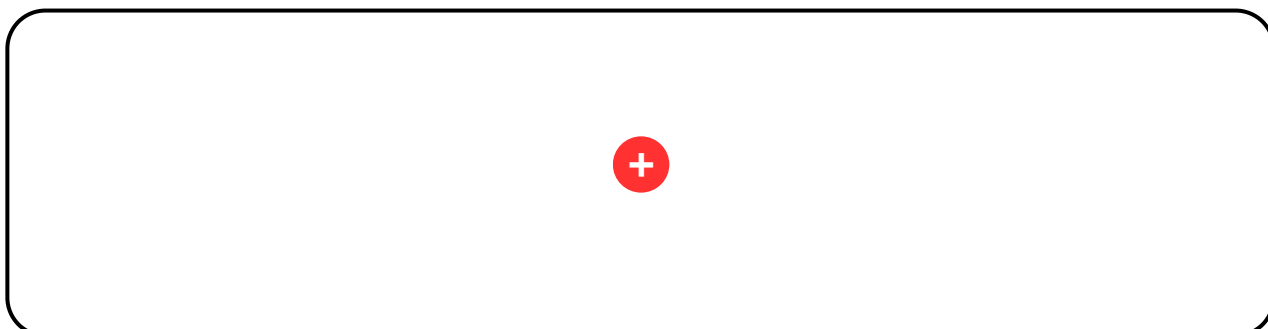
Se tiverem dúvidas, não hesitem em consultar outros colegas. A colaboração é a chave para o sucesso da turma nesta atividade.

Questão 1 - Observe a figura abaixo, nela está representada uma carga elétrica pontual positiva de valor desconhecido, que chamaremos de $+Q$.

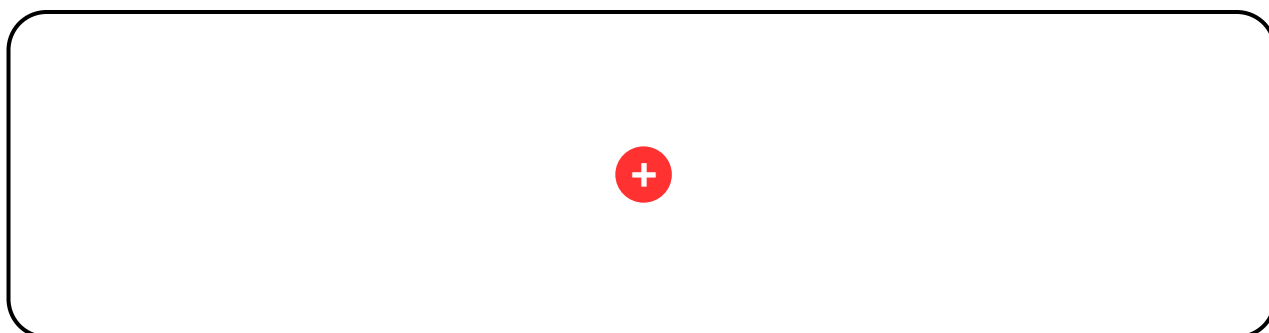
A) Com base em seu conhecimento sobre eletrostática, desenhe as linhas de campo elétrico geradas pela carga $+Q$ sobre a figura. Use régua e lápis para obter a maior precisão possível.



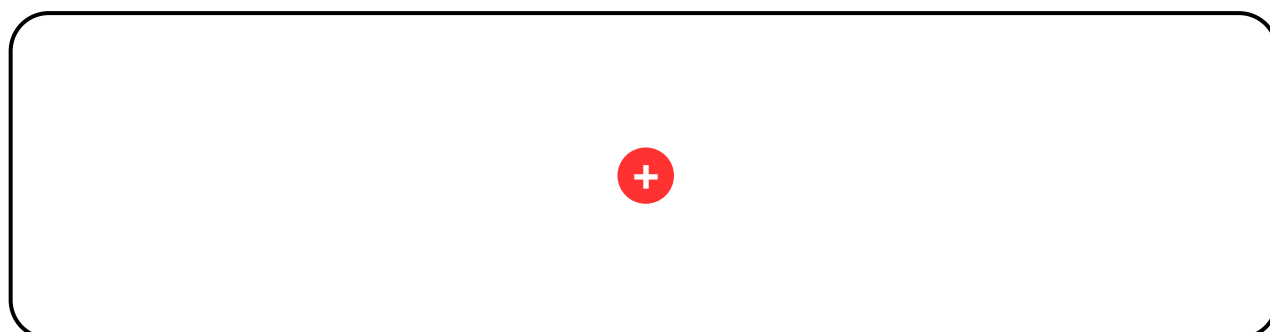
B) Marque um ponto no espaço, localizado próximo a carga, que chamaremos de **P**. Agora, queremos analisar o vetor campo elétrico que atua nesse ponto, representado por \vec{E} . Desenhe esse vetor no espaço abaixo, mostrando claramente sua orientação. Use régua e lápis para obter a maior precisão possível.



C) Tendo em mente como cargas elétricas interagem, imagine agora que uma pequena carga positiva, que chamaremos de q , seja colocada exatamente sobre o ponto **P**. O mesmo do item anterior. Qual será a direção e o sentido da força elétrica \vec{F} que essa nova carga, q , experimenta nesse ponto? Desenhe um diagrama representando o vetor força no espaço abaixo. Use régua e lápis para obter a maior precisão possível.



D) Considere agora que a pequena carga q no ponto **P** seja negativa, ao invés de positiva. Neste caso, qual seria a direção e o sentido da força elétrica \vec{F} que a carga q experimentaria em **P**? Desenhe um novo diagrama representando o novo vetor força no espaço abaixo. Use régua e lápis para obter a maior precisão possível.



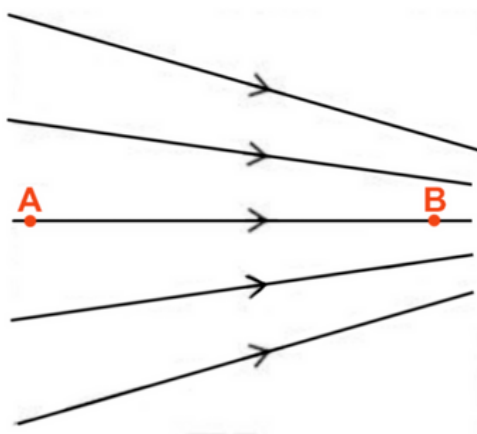
E) Compare os diagramas dos vetores força \vec{F} para as cargas positiva e negativa nos itens **C)** e **D)**. Explique com suas palavras como o sinal da q , chamada carga de prova, influencia na direção e no sentido da força eletrostática que ela experimenta.



De olho no vestibular:

Volta e meia, linhas de campo elétrico surgem como tema em vestibulares por todo Brasil.

Questão 2 - A figura representa as linhas de campo de um campo elétrico.
(UFSM-2014/Adaptada)



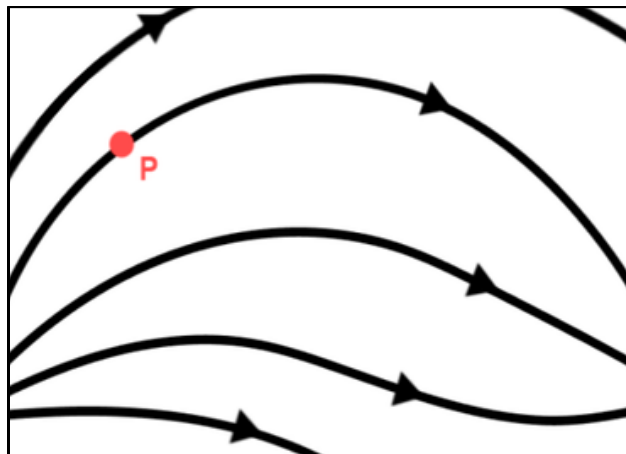
Assim, complete as afirmativas:

- A)** O campo elétrico é mais intenso na região ____ pois a _____ de linhas de linhas de campo é _____ em torno desse ponto.
- B)** Uma única carga de sinal _____ pode ser a fonte desse campo localizada a _____ da imagem.
- C)** Se abandonarmos uma carga elétrica com sinal negativo no ponto A, ela sofrerá uma força que aponta para a _____.

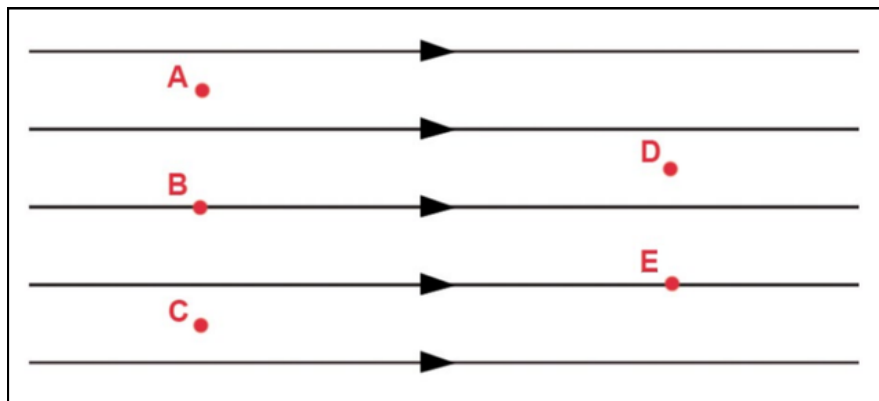
Questão 3 - A imagem abaixo revela o recorte de uma região repleta de linhas de campo que foram geradas por uma configuração de cargas elétricas desconhecida.

Represente no desenho o vetor campo elétrico E sobre ponto P, e também represente a força elétrica F que uma carga negativa q sofreria se fosse colocada exatamente em P.

Dica: Desenhe os vetores Campo Elétrico e Força Elétrica com canetas de cores diferentes.



Questão 4 - Observe o diagrama de linhas de campo abaixo e localize o ponto onde o campo elétrico é mais intenso. Indetifique também os pontos onde os campos elétricos são iguais, considerando sua direção, sentido e intensidade.



Explique a sua resposta com suas próprias palavras:

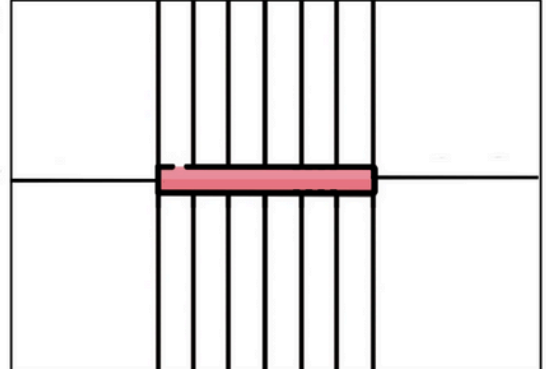
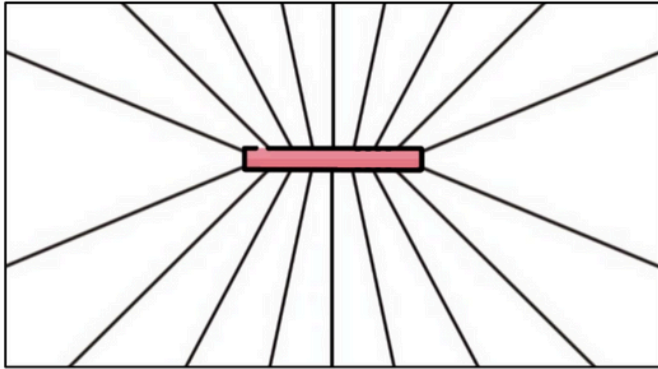
Questão 5 - Como vimos, quando eletrizamos um canudo de plástico por atrito ele ganha a capacidade de atrair pequenos pedaços de papel – se não fez antes, teste aí na sua mesa. No questionário que vocês responderam havia a seguinte pergunta:

“Que tipo de interação foi possível observar entre o tubo e o papel, e de que maneira a distância entre estes objetos está relacionada com essa interação?”

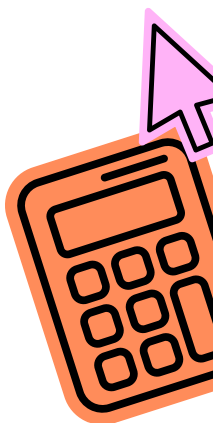
E a resposta dada por vocês foram as seguintes:

- Atração, **quanto mais perto, mais forte**;
- O papel grudou no tubo. A distância interfere, pois, de longe não gruda, **mas chegando perto sim**;
- Atração, **quanto mais perto mais atração**;
- Atração. **Quanto mais perto, mais atraído** o papel se torna;
- **Quanto mais perto, mais atração** entre os dois corpos;
- Eles se atraíram, **quanto mais próximo mais se atraem**.

Hoje sabemos que o canudo adquiriu carga elétrica e essas cargas, por sua vez, geram linhas de campo. Agora observe atentamente as duas figuras abaixo, compare com os trechos destacados em negrito das respostas na página anterior e identifique qual das imagens abaixo melhor representam as linhas de campo elétrico do canudo.



Justifique a sua escolha com suas próprias palavras. De que maneira a imagem escolhida está relacionada com as repostas da turma?





Lendo as linhas de campo na palma da sua mão



Nomes: _____

Para começar:

Nesta atividade seu grupo receberá 3 peças distintas, denominadas pelo(a) professor(a) como A, B e C, todas representam **cargas pontuais positivas**.

I - Identifique quais são as peças A, B e C;

II - Brinque com as peças e as explorem;

III - Com uma caneta ou marcador, cada um do grupo deve desenhar um grande círculo sobre a palma da mão. Essa área servirá como referência de medida durante a atividade.

Com relação à **Peça A**, responda:

Questão 1 - Qual é a direção e o sentido de suas linhas de campo?

Questão 2 - Quantas linhas de campo conseguem ficar dentro do círculo quando cada membro do grupo abraça a peça com a mão marcada?

Questão 3 - Qual é a distância entre o centro da carga e a palma da mão?

Com relação à **Peça B**, responda:

Questão 1 - Quando os membros do grupo seguram agora a peça B, quantas linhas de campo ficam dentro da área delimitada?

Questão 2 - Qual razão entre o número de linhas que passam pela mesma palma da mão quando se segura a Peça B e quanto se segura a Peça A?

Questão 3 - De que maneira essa relação se reflete no mundo real, isto é, o que essa diferença nos diz sobre os valores das cargas A e B?

Questão 4 – As peças representam cargas que geram um vetor de campo elétrico em cada ponto da palma da mão. A intensidade desse campo pode ser determinada pela concentração das linhas de campo ao redor de cada ponto. Sabendo disso, como o valor da intensidade do campo elétrico (E) está ligado ao valor da carga elétrica (Q)?

Com relação à **Peça C**, responda:

Questão 1 - Por fim, envolvam a peça C com a palma da mão que foi marcada - como nas questões anteriores - e digam o número de linhas que atravessam essa região.

Questão 2 - Qual é a diferença entre o número total de linhas de campo que sai da peça A e o número total de linhas que sai da peça C? O que essa diferença nos dá de intuição sobre o valor das cargas elétricas representadas pela peça A e C?

Questão 3 - Ainda comparando a Peça C com a Peça A, determine a distância entre o centro da esfera na peça C e a palma da mão.

Questão 4 - Imaginem agora que aconteceria se as linhas de campo desta peça ficassem cada mais compridas? O valor da carga aumentaria? E como isso afetaria a quantidade de linhas de campo que cabem na palma da mão?

Questão 5 - Como foi feito com a peça anterior, busquem agora encontrar como o valor da do vetor campo elétrico (E) está relacionado com distância da carga à palma da mão (d)?

Conclusão

Levando em conta as relações matemáticas que discutimos nos itens anteriores, transforme a intensidade do vetor campo elétrico (E) em uma equação matemática que relacione o valor da carga (Q) e a distância (d)?