

*Esse documento mostra uma possível abordagem física e experimental para investigar o fenômeno, **mas não se limite a ela!** Há inúmeras formas diferentes de analisar qualquer problema da IYPT.*

Carrossel Magnético

Vários ímãs de neodímio estão fixados a um disco horizontal, com os ímãs adjacentes orientados em direções opostas. Uma placa fixa não magnética é colocada horizontalmente acima do disco. Quando o disco gira em torno de seu eixo vertical e uma esfera de aço é colocada sobre a placa, a esfera pode se mover tanto na mesma direção quanto na direção oposta à rotação do disco. Investigue esse fenômeno e determine como o movimento depende dos parâmetros relevantes.



1 Enunciado

O enunciado propõe uma análise da relação entre o movimento da moeda no carrossel magnético e os parâmetros experimentais que o influenciam. Espera-se que (a) sejam realizados experimentos variando os diversos parâmetros e observando os diferentes resultados do movimento, isto é, quando a esfera se move na direção do disco ou oposta a ele; e (b) formule-se uma teoria coerente que explique por que esses diferentes resultados ocorrem, ou seja, realizar uma análise qualitativa e quantitativa do fenômeno, por meio de uma abordagem teórica e experimental do movimento da esfera sob os ímãs.

1.1 Questionamentos Iniciais

Quais parâmetros do disco (ex.: velocidade, quantidade de ímãs, distância entre eles e intensidade do campo magnético) influenciam a velocidade da esfera? Como surge a força que gera o torque na esfera? O que determina se a esfera gira no mesmo sentido que o disco ou no sentido oposto? Para o fenômeno ocorrer, existe uma velocidade mínima ou máxima do disco? Como o material da bola influencia o fenômeno?

1.2 Parâmetros

Para avaliar extensivamente o fenômeno, considere os seguintes parâmetros relevantes:

- **Caracterização da esfera de aço:**
 - Raio da esfera;
 - Densidade e massa da esfera;
 - Tipo de aço (existem vários tipos de esferas de aço que atuam no sistema de maneira diferente);
- **Caracterização do disco e ímãs:**
 - Número de ímãs contidos no disco;

- Tipos de ímãs;
- Intensidade do campo magnético de cada um dos ímãs;
- **Condições iniciais:**
 - Velocidade do disco;
 - Velocidade inicial da esfera.

2 Análise Qualitativa

2.1 Conceitos Físicos Importantes

- **Corrente de Foucault**

1. **Definição:** Quando o fluxo magnético varia no tempo, isto é, quando há uma alteração na intensidade ou no sentido do campo magnético que atravessa o material. São induzidas correntes elétricas, chamadas de correntes de Foucault, as quais criam um campo magnético no sentido oposto à variação de fluxo magnético.
2. **Como afeta:** Quando o disco com os ímãs começa a rotacionar, o fluxo magnético que passa sobre a bola varia. Logo, é possível que sejam induzidas correntes de Foucault, que magnetizarão a esfera e gerarão um torque inicial, como um impulso para ela começar a se mover, visto que os ímãs estão rotacionando constantemente.

- **Magnetização**

1. **Definição:** A magnetização é a indução de dipolos magnéticos em certos materiais por um campo magnético externo.
2. **Como afeta:** No experimento, a esfera, um material ferromagnético, quando sujeita ao campo magnético dos ímãs, se magnetiza, induzindo dipolos no mesmo sentido deste campo.

- **Histerese Magnética**

1. **Definição:** Alguns materiais se mantêm magnetizados, mesmo após a retirada do campo magnético externo. Isso ocorre porque há um 'atraso' na remagnetização do material, e ele precisa estar sob a ação de outro campo magnético oposto para se remagnetizar, isto é, voltar para seu estado normal. Assim, o caminho de magnetização não é o mesmo que o de remagnetização.
2. **Como afeta:** No fenômeno analisado, a esfera de aço, ao ser magnetizada sob a ação de um ímã, se alinha ao campo magnético deste. No entanto, algumas esferas, ao passarem para o próximo ímã de polaridade oposta, não possuem 'tempo' para se remagnetizar, pois têm uma memória magnética muito forte, ou seja, muito presa à magnetização do campo magnético anterior. Então, devido ao ângulo de defasagem entre a sua magnetização e o campo magnético externo aplicado nela naquele instante, a esfera sofre um torque. Em experimentos realizados com esferas feitas de aço muito suscetíveis à histerese magnética, é muito provável que o seu torque seja maior, devido a esse fenômeno.

- **Motor de histerese**

1. **Definição:** Em um motor de histerese magnética, temos o estator, que produz um campo magnético rotativo, e o rotor, feito de um material com forte 'memória magnética'. Devido à variação de fluxo magnético causada pelo estator, as correntes de Foucault são induzidas no rotor, o que irá fazê-lo começar a se movimentar. Esse torque é intensificado ainda mais com a histerese magnética que o material sofre. Com o tempo, a velocidade do estator e do rotor é sincronizada, o que vai acabar com

as correntes de Foucault e o torque gerado só irá se manter devido à memória magnética do material. Além do mais, o torque gerado pelo estator é sempre o mesmo independentemente da velocidade.

2. **Como afeta:** É importante saber como funciona o motor de histerese, pois o carrossel magnético pode funcionar de forma parecida quando possui um campo magnético rotativo atuando sobre um material que sofre histerese magnética. Mas é necessário realizar vários experimentos, com diferentes materiais de esferas, tamanhos e velocidades, para saber como realmente podem se assemelhar. Provavelmente, não será da mesma forma, pois a esfera possui uma carga mais leve do que a do rotor no motor de histerese. E também, dependendo da intensidade da 'memória magnética' do material da esfera, irá ter um comportamento que se afasta ou se aproxima do motor de histerese.

3 Sugestão de Experimental

3.1 Equipamentos e Forma de Extração de Dados

- **Ímãs de neodímio** são um tipo de ímã que possui um campo magnético muito intenso. Variar a quantidade de ímãs no seu experimento será muito importante.
- **Motor** para regular com precisão a velocidade do disco com os ímãs.
- **Câmera ou smartphone** para capturar o movimento da esfera, de preferência uma que possa ser ajustada para câmera lenta, para observar a rotação da bola.
- **Esferas** com diferentes raios, massas e tipos de materiais diferentes, que possuem diferentes intensidades de 'memória magnética', para analisar os efeitos no seu movimento.
- **Disco** que consiga girar e seja feito de um material não condutor, para não interferir no fenômeno.
- **Software de rastreamento (Tracker ou similar)** para analisar a velocidade da esfera.

3.2 Metodologia

- **Preparo do sistema:** Acople o motor ao disco e coloque uma placa de material não magnético sobre o sistema. Em seguida, coloque a esfera sobre a placa de forma muito cuidadosa para não aplicar nenhuma força que interfira no seu movimento. Lembre-se de, antes de realizar o experimento, fazer uma marca na superfície da esfera para observar o seu torque.
- **Registro digital:** Posicione a câmera acima da placa e mantenha-a nesta posição para todos os experimentos; assim, terá mais precisão nos resultados.
- **Análise da velocidade e do torque na esfera:** Faça os experimentos girando o disco em velocidades baixas e altas. A partir do Tracker, obtenha a velocidade e o torque da esfera. Anote em uma planilha todos os resultados.

3.3 Cuidados Experimentais, Incertezas e Possíveis Erros

- **Erro humano:** Ao colocar a esfera que irá se mover sobre o disco, tente não aplicar nenhuma força anterior que possa interferir no seu movimento.
- **Minimização de paralaxe:** Ponha a câmera centralizada em um plano paralelo à placa, para não haver nenhuma paralaxe.
- **Ambiente estável:** Tente fazer um experimento em um local, sem nenhum material magnético intruso por perto que possa interferir nos resultados. E também, antes de fazer o experimento, certifique-se de que

a esfera não foi magnetizada anteriormente por nenhum ímã e esteja sob histerese magnética.

- **Configurações do software:** Ajuste o sistema de coordenadas bem no centro da placa e o momento inicial de análise (frame 0) de forma consistente (ex.: quando o disco começa a se movimentar).

3.4 Limites Experimentais

- **Magnetização da esfera:** Se o material tiver uma 'memória magnética' muito intensa, ao utilizar a mesma esfera para fazer os mesmos experimentos, a esfera pode ter sofrido histerese magnética no experimento anterior. Logo, tenha várias esferas do mesmo tipo e faça o experimento com muito cuidado.
- **Distorções de paralaxe:** A câmera tem que estar o mais alinhada possível com o disco para não ter paralaxe.
- **Intensidade da velocidade:** Se a bolinha tiver uma velocidade muito grande, pode sair pela tangente. Então varie gradualmente a velocidade e observe os resultados.

3.5 Investigações Adicionais

Para analisar as diferentes grandezas relacionadas ao fenômeno e/ou contornar os diferentes limites experimentais, você pode tentar:

- Investigar como esferas de aços diferentes, que possuem diferentes suscetibilidades de sofrer a histerese magnética, podem influenciar como as esferas se movimentam. Investigue se são todas as esferas que conseguem realizar o seu movimento no sentido oposto à velocidade do disco. E também analise se a esfera se movimenta através de um rolamento ou pelo deslizamento.
- Investigue como o atrito da placa ou o arrasto do ar pode interferir no movimento da esfera.
- Investigue em qual velocidade a esfera começa a se mover em sentido oposto. E se essa mudança é gradual ou é instantânea.
- Investigar o porquê há uma inversão no sentido de translação da esfera. Em outras palavras, analise o motivo da esfera se mover no sentido oposto ao do disco, em certas velocidades, e em outras, se mover no mesmo sentido.

4 Referências para Estudo

- **Kit de Referência da IYPT** (inglês), material excelente para encontrar artigos sobre o fenômeno;
- **Eletrodinâmica (3ª edição)** de David J. Griffiths, um livro que explica os conceitos básicos de eletromagnetismo de forma muito didática;
- **Fundamentos de Física - eletromagnetismo (Volume 3)** de Halliday & Resnick, um livro que também explica os conceitos importantes que se aplicam no carrossel magnético;