

*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.*

Bola Lesma

Uma esfera oca contém uma bola pesada e um fluido viscoso. O movimento de rolamento dessa esfera em um plano inclinado é irregular e surpreendentemente lento. Explique e investigue esse efeito.



1 Enunciado

O enunciado propõe que o movimento do objeto descrito seja investigado em relação a sua irregularidade e velocidade. Não há delimitação explícita da variação de parâmetros, mas o comando "investigue" implica a exploração do fenômeno pelo aluno, o que naturalmente implica uma variação de parâmetros mínima. Espera-se, portanto:

- Uma explicação qualitativa para o movimento da bola lesma;
- Um modelo teórico que preveja esse padrão de movimento e que possa ser comparado com uma abordagem experimental;
- Uma montagem experimental que permita a tiragem de dados relevantes.

1.1 Questionamentos Iniciais

Por que o líquido viscoso é necessário para o problema? Por que a bola interior mais pesada é relevante para o problema? O que ocorre quando um desses elementos é retirado? O que ocorre se mudarmos o formato da bola interior (como um cubo, cilindro ou pirâmide)? Para uma mesma quantidade de fluido e mesmo peso interno, o movimento de rolamento é periódico? Conforme a inclinação do plano aumenta, o tipo de movimento da bola se altera?

1.2 Parâmetros

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

- **Caracterização do líquido:**
 - Viscosidade;
 - Quantidade de líquido inserida na bola.
- **Caracterização da bola interior:**
 - Raio;
 - Massa.

- **Caracterização da bola exterior**

- Raio;
- Espessura.

- **Caracterização do plano**

- Inclinação;
- Coeficiente de Atrito.

2 Análise Qualitativa

2.1 Conceitos Físicos Importantes

- **Torque e rotação**

1. **Definição:** Momento de força que tende a provocar ou alterar o movimento de rotação de um objeto.
2. **Como afeta:** O torque determinará a rotação e o comportamento da bola lesma, permitindo a previsão de seu movimento.

- **Atrito dinâmico**

1. **Definição:** A principal força externa ao fenômeno que opõe o rolamento da bola lesma origina-se do contato da bola lesma com o plano e varia conforme os materiais utilizados na construção da bola lesma e do plano.
2. **Como afeta:** Para a explicação do fenômeno, é importante que o atrito seja minimizado, de forma a observar as forças atuantes sem a interferência de um agente externo. Para experimentos posteriores, a variação do coeficiente de atrito (através da mudança do material da bola lesma ou do plano) pode trazer novos comportamentos ou resultados, e portanto deve ser investigado.

- **Centro de massa**

1. **Definição:** Para caracterização dos movimentos de objetos, o centro de massa é o ponto que concentra a maior parte da massa do objeto, e é o local onde se considera que a força peso atua.
2. **Como afeta:** Para a rotação do objeto, a distância entre o centro de massa e o torque é importante para determinar os padrões de movimento.

- **Força peso e normal**

1. **Definição:** A força peso é causada pela ação da gravidade na bola lesma, enquanto a força normal é causada pelo contato entre a bola e o plano e atua em sentido oposto ao peso.
2. **Como afeta:** Sem um impulso inicial, o peso é o responsável por dar início ao movimento da bola lesma, enquanto a normal atua contra ele.

- **Arrasto do ar**

1. **Definição:** O arrasto é o conjunto de forças exercidas pelo ar que se opõem ao movimento realizado por um corpo em deslocamento.
2. **Como afeta:** Devido à baixa velocidade da bola lesma, talvez possa ser desprezado, mas é necessário analisar se isso é possível para a velocidade do *seu* experimento.

- **Viscosidade**

1. **Definição:** Medida do atrito interno de um fluido, que determina o quanto este resiste ao escoamento.
2. **Como afeta:** A viscosidade do líquido é o principal parâmetro que afeta a velocidade da bola lesma, e o fenômeno pode ser parcialmente realizado sem a bola de metal interna devido à viscosidade do líquido.

- **Número de Reynolds**

1. **Definição:** Número adimensional que descreve o regime de escoamento de um líquido, comparando as forças inerciais às forças viscosas do líquido.
2. **Como afeta:** Para o fenômeno, o número de Reynolds determinará como o líquido responderá ao movimento da bola interior e a forças externas e, ao mesmo tempo, interferirá neste.

- **Equações de Stokes**

1. **Definição:** Versão simplificada das equações de Navier-Stokes que permite tratar de fluidos hiperviscosos (quando o número de Reynolds é muito menor que 1), explicando seu movimento.
2. **Como afeta:** Permite uma análise simplificada do movimento do fluido no interior da bola, desde que ele respeite as condições necessárias.

3 Sugestão de Experimental

3.1 Equipamentos e Forma de Extração de Dados

- **Bolas de acrílico transparentes** para inserir todos os elementos internos e permitir sua visualização;
- **Fita métrica ou régua** para relacionar a distância real com a distância no vídeo;
- **Câmera ou smartphone** para capturar o movimento da bola;
- **Bolas internas pesadas** com diferentes raios, massas, e/ou materiais para observar diferenças no movimento;
- **Software de rastreamento (Tracker ou similar)** para identificar a posição da bola no vídeo;
- **Software de medição de ângulos** para identificar a inclinação do plano;
- **Placa plana móvel** cujo ângulo de inclinação possa ser alterado.

3.2 Metodologia

- **Preparo do sistema:** Fixe o plano e use um software de medição de ângulo para avaliar sua inclinação. Coloque uma régua em um local próximo de onde o experimento ocorrerá para avaliar o tamanho real do movimento posteriormente. Solte a bola sem fornecer nenhuma força, pelo menos nos primeiros experimentos.
- **Registro digital:** Coloque a câmera paralela ao plano de movimento da bola. Grave a bola até o momento em que ela saia do plano delimitado. Ao fim do movimento, nomeie o vídeo com o ângulo de inclinação, material da bola, peso e quaisquer outros parâmetros relevantes, para identificação posterior.
- **Análise da trajetória:** Importe o vídeo no software de rastreamento. Marque quadro a quadro a posição da bola externa e da bola interna ao longo do tempo para obter dados do deslocamento de ambas as bolas e suas velocidades.

- **Validação experimental:** Sugere-se que o mesmo experimento seja repetido algumas vezes para que uma validação estatística possa ser realizada.

3.3 Cuidados Experimentais, Incertezas e Possíveis Erros

- **Erro humano:** Por vezes, a mão humana pode aplicar alguma força na bola, mesmo que acidentalmente. Para evitar uma distorção dos dados, sugere-se que os experimentos sejam repetidos algumas vezes.
- **Minimização de paralaxe:** Ponha a câmera centralizada em um plano paralelo ao movimento da bola e a uma distância considerável do plano.
- **Ambiente estável:** Mantenha a câmera estável ao longo do experimento, sem realizar vibrações (use um tripé).
- **Configurações do software:** Ajuste o sistema de coordenadas e o momento inicial de análise (frame 0) de forma consistente.

3.4 Limites Experimentais

- **Visão do movimento interno:** Caso a variação de raio/massa da bola externa seja desejada, pode ser difícil encontrar bolas transparentes de acrílico que possibilitem a visão do peso interno.
- **Distorções de paralaxe:** Se o celular não estiver corretamente alinhado, este pode sofrer efeitos de paralaxe.
- **Visão bidimensional da trajetória:** O movimento de uma das dimensões não é capturado na câmera.
- **Sem medidas diretas:** Essa experimental permite uma investigação do movimento da bola, mas não tem equipamentos específicos para realizar medidas diretas de outras grandezas físicas.

3.5 Investigações Adicionais

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

- Investigar como as propriedades do líquido afetam o fenômeno, como a tensão superficial (colocando um surfactante) e a viscosidade (alterando o líquido);
- Calcular o centro de massa verdadeiro da bola lesma e relacioná-lo aos resultados;
- Investigar abordagens diferentes para capturar a trajetória da bola (múltiplas câmeras, laser, etc);
- Investigar o fenômeno sem o peso interno e avaliar como ele muda;
- Variar a quantidade de líquido interno e investigar como isso afeta o movimento;
- Fazer grande variação de ângulos/materiais do plano e investigar seu efeito no movimento.

4 Referências para Estudo

- **Kit de Referência da IYPT** (inglês), material excelente para encontrar artigos sobre o fenômeno;
- **Curso de Física Básica: Fluidos, Oscilações e Ondas, Calor (Volume 2)** de H. Moysés Nussenzveig, um livro de fluidos para analisar quantitativamente a dinâmica deles;
- **Fundamentos de Física (Volume 1)** de Halliday & Resnick, um livro de mecânica para aprofundar seu entendimento da mecânica da bola;

- **Problema 9 da IYPT 2023 - Prego oscilante**, problema de uma IYPT passada com fenômenos físicos muito parecidos.
- **Artigo sobre as equações de Stokes**, que serve como base introdutória para o desenvolvimento da parte fluidodinâmica do problema.