

## Roteiro do Experimento “Atrito” – Parte I

### A) Introdução ao experimento

O objetivo deste experimento é a familiarização com as propriedades do atrito em sistemas reais. A experiência consiste em diversas medições dos coeficientes de atrito estático e cinético mediante a variação da superfície de contato e da massa do corpo de prova.

### B) Procedimento de análise

Existem dois coeficientes de atrito aos quais um corpo de prova pode estar submetido, o estático e o cinético (ou dinâmico). Ambos relacionam a força de atrito com a força normal em diferentes regimes; o estático no regime de repouso relativo à superfície de contato e o cinético, no regime de movimento relativo a ela.

**B1.** Para calcular o **coeficiente de atrito estático** será necessário obter o ângulo de inclinação máxima que o plano pode possuir *sem* que o objeto escorregue. Este ângulo pode ser determinado a partir de sua tangente, uma vez conhecidas a base e a altura do plano. Para a sua situação experimental, leia a altura do plano usando a fita amarela que consta à esquerda dos quadros. Esta medida, combinada com a medida da base do plano (*base = 48,6 cm*), permite a determinação desse coeficiente. Verifique tal relação no Apêndice (seção D).

**B2.** Acesse os quadros de sua situação experimental, onde o bloco aparece sobre o plano. Chamando de  $t_i$  o valor do tempo no quadro de número  $i$  e  $x(t_i)$  a posição do bloco nesta mesma foto, faça as leituras para todas as fotos e construa uma tabela  $t_i \times x(t_i)$  em uma planilha.

*Atenção! Lembre-se que a posição deve ser lida sempre a partir de um mesmo traço lateral dentre os que o bloco possui. A partir de um certo momento, o bloco fica borrado nos quadros e não é mais possível ler sua posição, mas é necessário lê-la ao menos em 6 dos quadros. Procure determinar a posição com 0,5 mm de precisão. Note que quando o bloco desliza rápido não é possível conseguir tal precisão.*

**B3.** Para determinar a velocidade com melhor precisão, precisamos calcular o instante médio do intervalo de tempo  $[t_{i-1} ; t_{i+1}]$  usado para estimar a derivada da posição, ou seja, para cada  $i$  calculamos o instante médio  $t'_i$  pela seguinte expressão:

$$t'_i = \frac{t_{i-1} + t_{i+1}}{2}$$

**B4.** Calcule a velocidade instantânea no instante médio  $t'_i$  como sendo a velocidade média no intervalo de tempo  $[t_{i-1} ; t_{i+1}]$ , ou seja:

$$v(t'_i) = \frac{x(t_{i+1}) - x(t_{i-1})}{t_{i+1} - t_{i-1}}$$

**B5.** Faça os cálculos na planilha para todos os  $i$  possíveis (não será possível estimar a velocidade nem no primeiro nem no último quadro) e com os valores obtidos faça um gráfico da evolução temporal da velocidade,  $t'_i \times v(t'_i)$ .

**B6.** A fim de obter o **coeficiente de atrito cinético**, você precisará da aceleração do corpo ao longo da rampa, que pode ser determinada a partir do gráfico de velocidade em função do tempo. Verifique se a aceleração foi aproximadamente constante – isso não será verídico em apenas uma das situações. Lembre-se que a inclinação da reta do gráfico de velocidade em função do tempo corresponde à aceleração do bloco no plano inclinado, que é o dado necessário à determinação do coeficiente de atrito cinético.

Atenção! Em todos os outros 19 casos, pode-se traçar uma reta média bastante boa; interpretamos essa dispersão dos pontos em torno da reta média como flutuação estatística, resultado da precisão limitada da fita métrica e da leitura da posição por causa da forma como o sistema foi filmado e as fotos, extraídas.

**B6.** Repita o mesmo procedimento para a segunda situação experimental que lhe foi designada.

### C) Procedimento de elaboração da síntese

Nesta etapa de análise do experimento, deve-se determinar os coeficientes de atrito estático e cinético para as duas situações que lhe foram designadas. A síntese deve conter as seções relacionadas abaixo:

**C1. Identificação:** inclua nome, turma e a identificação dos conjuntos de dados (situações) que analisou.

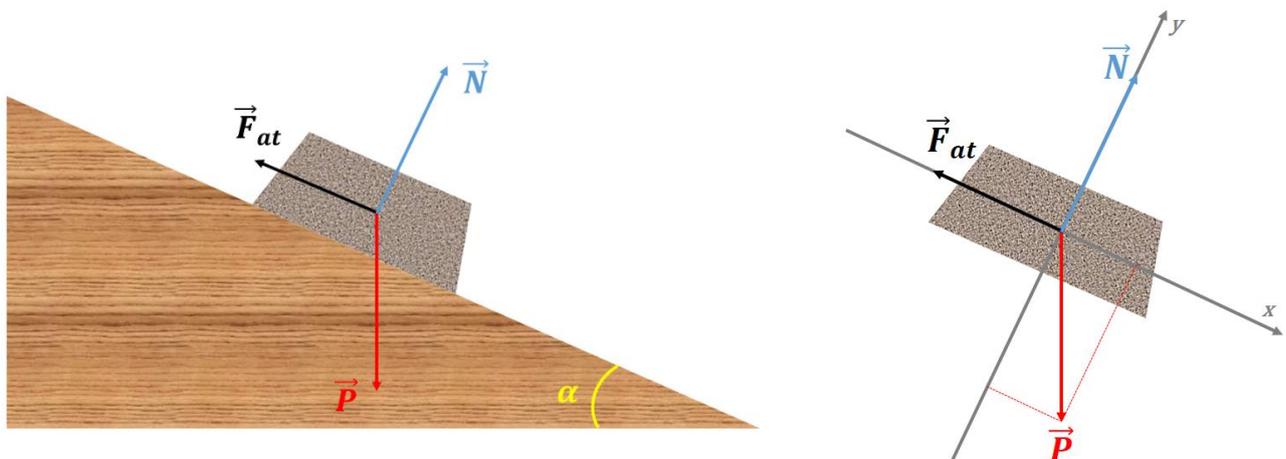
**C2. Dados Obtidos:** apresente, para cada um dos conjuntos de dados que lhe foram designados, uma tabela dos dados obtidos de posição do bloco em função do tempo,  $[t_i, x(t_i)]$ , e a tabela de velocidades do bloco em função do tempo,  $[t_i, v(t_i)]$ , deduzida dos dados experimentais, bem como o gráfico correspondente. Verifique se expressou os valores das grandezas em unidades apropriadas e com o número adequado de algarismos significativos.

**C3. Análise dos Dados:** Apresente os resultados dos cálculos dos coeficientes de atrito estático e cinético dos dois conjuntos de dados analisados. Verifique também se expressou os valores das grandezas em unidades apropriadas e com o número adequado de algarismos significativos.

**C4. Discussão e Conclusão:** as leis empíricas do atrito de contato são, em resumo: a força de atrito opõe-se ao movimento ou à sua tendência; independe da área de contato; tem valor constante em movimento; o coeficiente de atrito independe da massa do objeto; materiais diferentes têm coeficientes de atrito diferentes. Discuta quais dessas propriedades você pode testar com seu par de dados e conclua se o comportamento do bloco está de acordo com o que era esperado. Discuta também porque o coeficiente de atrito estático determinado neste experimento tem que ser maior que o cinético.

### D) Apêndice

A Figura 1 representa um diagrama de corpo livre para o bloco nas condições do experimento em questão. Note que escolheu-se o eixo  $x$  na direção da superfície inclinada do plano e não na direção horizontal.



**Figura 1.** Diagrama de corpo livre e referencial adotado para o problema.

As projeções da força peso no referencial escolhido são  $P_x = m.g.\text{sen}(\alpha)$  e  $P_y = -m.g.\text{cos}(\alpha)$ . O bloco não tem movimento na direção  $y$ , estando, portanto, se movendo apenas na direção  $x$ , isto é, ao longo superfície inclinada do plano. Assim, a resultante de forças na direção  $y$  é nula, donde se deduz que:

$$N = mg \cos(\alpha) \quad (1)$$

Este resultado é válido, independentemente do corpo estar parado ou não. Já na direção  $x$ , há duas possibilidades:

- i. Quando há deslizamento para baixo (no sentido positivo de  $x$ ), a força de atrito está orientada para cima (no sentido negativo de  $x$ ), pois se opõe ao movimento. Sendo sua intensidade  $F_{at,c}$ , a resultante de forças na direção  $x$  é tal que:

$$ma_x = mg \text{sen}(\alpha) - F_{at,c} \quad (2)$$

- ii. Quando não há movimento, a resultante de forças na direção  $x$  é nula, e a força de atrito orienta-se para cima, pois se opõe à tendência de movimento. Sendo sua intensidade  $F_{at,e}$ , ela será tal que:

$$F_{at,e} = mg \text{sen}(\alpha) \quad (3)$$

Essas equações permitem determinar os coeficientes de atrito estático e cinético, mas antes são necessárias as definições de ambos.

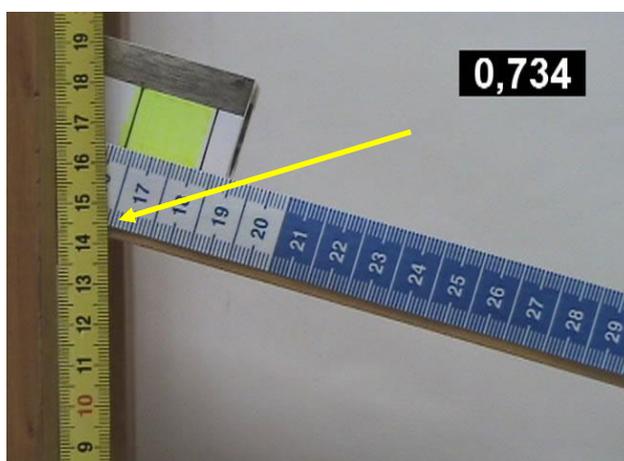
**D1.** O coeficiente de atrito quando há deslizamento. O coeficiente de atrito cinético  $\mu_c$  é definido pela razão entre a força de atrito e a normal, ou seja:

$$|\vec{F}_{at,c}| = \mu_c |\vec{N}| \quad (4)$$

A proporcionalidade direta entre a força de atrito e a normal é uma das leis empíricas do atrito de contato. Substituindo as Equações 1 e 4 na Equação 2 e isolando o coeficiente de atrito, obtemos:

$$\mu_c = \frac{g \text{sen}(\alpha) - a_x}{g \cos(\alpha)} \quad (5)$$

A aceleração do movimento,  $a_x$ , pode ser obtida experimentalmente pela inclinação da reta média do gráfico da velocidade em função do tempo. O ângulo do plano inclinado durante o deslizamento pode ser obtido a partir do triângulo formado pelo plano inclinado e seu suporte, que tem como catetos a altura, que deve ser medida na fita amarela, e a base, cujo valor está dado no item B1, vide Figura 2.



**Figura 2.** Para medir a altura, a leitura deve ser feita na parte inferior da fita métrica. Neste caso, a altura é  $h = 14,45 \text{ cm}$ .

Assim, calcule o ângulo a partir da sua tangente:

$$\tan(\alpha) = \frac{\textit{altura}}{\textit{base}} \quad (6)$$

**D2.** *O coeficiente de atrito quando não há deslizamento.* A Equação 3 mostra que a força de atrito estático aumenta com o aumento do ângulo de inclinação do plano – portanto, não há uma relação de proporcionalidade entre a força de atrito estático e a força normal, ao contrário do que acontece com o atrito cinético. O coeficiente de atrito estático é definido pela razão entre os módulos da força de atrito e da força normal na situação de limite do deslizamento, de maneira que a relação geral entre força de atrito estático e força normal é representada pela seguinte desigualdade:

$$|\vec{F}_{at,e}| \leq \mu_e |\vec{N}| \quad (7)$$

Substituindo as Equações 1 e 3 na Equação 7, obtém-se:

$$mg \sin(\alpha) \leq \mu_e mg \cos(\alpha)$$

Donde obtemos que:

$$\mu_e \geq \tan \alpha$$

O valor do coeficiente de atrito estático é, portanto, a tangente do maior ângulo em que podemos inclinar o plano sem que haja deslizamento,  $\alpha_{lim}$ , ou seja:

$$\mu_e = \tan(\alpha_{lim}) \quad (8)$$

Como o movimento de subida da rampa era muito lento – veja no vídeo *em close* do experimento – pode-se desprezar o movimento da rampa entre o início do escorregamento e as fotos, de modo que a tangente do ângulo limite pode ser calculada com os mesmos valores da base e da altura do plano utilizados no cálculo do ângulo em que ocorreu o deslizamento.