

Primeira etapa da análise do experimento de atrito  
Análise das fotos da experiência para retirada de dados e cálculos

## **I. Introdução**

O objetivo deste experimento é familiarizar a(o) estudante com as propriedades do atrito de contato em sistemas reais. Para isso, fizemos um experimento que consiste em diversas medições dos coeficientes de atrito estático e cinético variando o peso do corpo de prova e a superfície de contato, tanto no material quanto na área.

Para compreender melhor a atividade a ser analisada, entre no sítio dos experimentos virtuais, selecione ATRITO e leia o material contido nas abas Introdução, Materiais e Procedimentos Experimentais; em seguida selecione a aba Vídeo e observe os vídeos da experiência.

Você deve descobrir quais são os dois conjuntos de dados que deve analisar na lista que está na página da disciplina – selecione “outros” em “Material” e busque a lista da sua turma. As siglas identificam os conjuntos de dados bem como os arranjos experimentais; você pode entender como interpretá-las lendo o texto da aba Procedimentos Experimentais da página da experiência. Caso você não esteja em nenhuma lista, mande-me um e-mail que lhe passo os exercícios.

Da mesma forma que na experiência do Trilho de Ar, a 2ª etapa do experimento virtual, que consiste na comparação dos resultados obtidos por vários estudantes, somente poderá ser realizada por quem entregar os resultados correspondentes à 1ª etapa.

## **II. Tomada de dados para a determinação dos coeficientes de atrito**

Existem dois coeficientes de atrito, o estático e o dinâmico – o primeiro relaciona a força de atrito com a força normal sobre o corpo enquanto ele não se move e o dinâmico, quando há movimento. Na seção IV deste guia, veremos a relação do coeficiente de atrito estático com a inclinação que o plano pode ter *sem* que o objeto escorregue, de modo que você precisará ler a altura do plano (usando a fita amarela que está à esquerda das fotos) que, combinada com o tamanho da base do plano, medida pela equipe que fez a filmagem,

$$base = 48,6 \text{ cm,}$$

permitirá determinar esse coeficiente.

A fim de obter o coeficiente de atrito dinâmico, você precisará da aceleração do corpo ao longo da rampa, que é medida no gráfico de velocidade em função do tempo. Siga o mesmo procedimento do experimento do Trilho de Ar (se precisar veja o documento “Procedimento de Análise” em notas de aula na página da disciplina), que consiste em:

- determinar as posições do bloco enquanto desliza na rampa, pela leitura da posição na fita métrica azul e branca bem como do *time-code* correspondente;
- transcrever os dados para uma planilha de cálculo;
- determinar a derivada da posição em relação ao tempo numericamente, a partir das posições em um par de instantes e
- fazer o gráfico de velocidade em função do tempo.

Lembre-se que a posição do bloco deve ser marcada sempre por um mesmo traço lateral do bloco. A partir de um certo momento, o bloco fica borrado na foto e não dá mais para ler a posição, mas é preciso ler pelo menos 6 fotos. Procure determinar a posição com 0,5 mm de precisão, mas quando o bloco desliza rápido não é possível conseguir essa precisão.

No gráfico da velocidade  $v$  em função do tempo  $t$ , marque cada ponto  $(t_i, v_i)$  usando para  $t_i$  o instante intermediário entre as duas medições de posição usadas para calcular  $v_i$ ; se você não entender a razão disso, leia o texto “Como calcular numericamente a derivada de uma função” em Notas de Aula na página da disciplina FAP151.

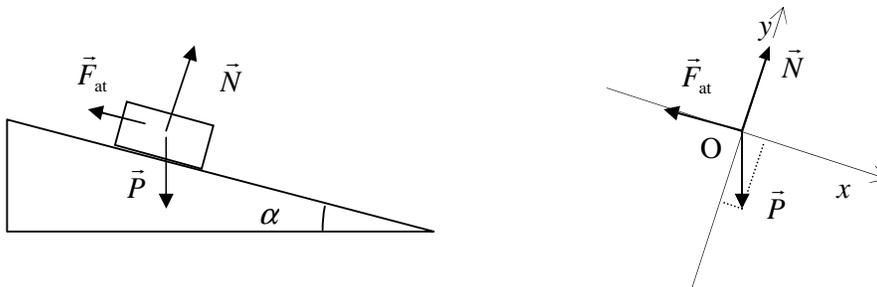
### III. Redução dos dados

Observe o gráfico de velocidade por tempo e determine se a aceleração foi aproximadamente constante – isso não é verdade em apenas um caso. Assim, se você concluir que a aceleração determinada em um dos seus conjuntos de fotos não pode ser uniforme, procure a monitora ou o monitor para ver se é mesmo o caso; se for, não é possível obter um dado útil para a análise e ele deve ser descartado. 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 foram extraídas. Você pode traçar a reta média a mão ou usar o recurso “Linha de Tendência” da planilha para traçá-la. Em qualquer dos casos, a inclinação da reta é a aceleração do bloco no plano inclinado, que é o dado necessário à determinação do coeficiente de atrito.

Já para o cálculo do coeficiente de atrito estático, basta determinar a tangente do ângulo de inclinação do plano, que é a razão entre a altura do plano medida na fita amarela e o tamanho da base do plano até a fita amarela, como está explicado na seção seguinte.

### IV. Determinação dos coeficientes de atrito estático e cinético.

A figura abaixo apresenta o diagrama de corpo livre do bloco que permite efetuar os cálculos. Note que escolhemos o eixo  $x$  na direção da superfície inclinada do plano e não na direção horizontal, porque assim as deduções necessárias ficam mais fáceis.



As projeções do peso nas direções  $x$  e  $y$  são  $mg \sin(\alpha)$  e  $-mg \cos(\alpha)$ , respectivamente. O plano impede o bloco de afundar, ou seja, o bloco só pode mover-se acima da sua superfície; se a velocidade inicial é nula, nunca haverá movimento na direção  $Oy$  e o bloco move-se para baixo e sempre raspando o plano. Por isso, a resultante das forças na direção  $y$  é nula, donde se deduz que

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

independentemente do corpo estar parado ou não. Já na direção do plano inclinado, há duas possibilidades:

- quando há deslizamento para baixo, a força de atrito está orientada para cima do plano porque se opõe ao movimento e tem intensidade  $F_{cin}$ , dando a equação de movimento

$$ma_x = mg \sin(\alpha) - F_{cin} \quad \text{com } v_x > 0 \text{ e } F_{cin} > 0. \quad (2)$$

- quando *não* há movimento, a resultante na direção  $x$  é nula e portanto

$$F_{at} = mg \sin(\alpha) \quad \text{com } v_x = 0. \quad (3)$$

Essas equações permitem determinar os coeficientes de atrito estático e cinético, mas primeiro precisamos defini-los.

### a) 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,

$$|F_{\text{cin}}| = \mu_c |N| \quad . \quad (4)$$

A proporcionalidade direta entre a força de atrito e a normal é uma das leis empíricas do atrito de contato. Substituindo (4) em (2) e isolando o coeficiente de atrito, obtemos

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

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 na seção II. Assim, calcule o ângulo  $\alpha$  a partir da sua tangente,

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

### b) 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 normal, ao contrário do que acontece com o atrito cinético. O coeficiente de atrito estático é definido pela razão entre a força de atrito e a normal na situação de *limite* do deslizamento, de maneira que a relação geral entre força de atrito estático e normal é representada pela *desigualdade*

$$|F_{\text{at}}| \leq \mu_e |N| \quad . \quad (7)$$

Substituindo  $F_{\text{at}}$  da equação (3) na equação acima, obtemos

$$mg \operatorname{sen}(\alpha) \leq \mu_e mg \cos(\alpha),$$

onde usamos a relação (1) para eliminar a força normal. Cancelando  $m$  e  $g$  e isolando o coeficiente de atrito, obtém-se

$$\mu_e \geq \tan(\alpha) \quad .$$

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

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

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  $\tan(\alpha_{\text{lim}})$  pode ser calculado com os mesmos valores de *base* e *altura* usados no cálculo do ângulo  $\alpha$  em que ocorreu o deslizamento.