

## Trabalho 3: Verificação da 2ª lei de Newton

Introdução à Física Experimental - 2023/24

Cursos: Lic. Física e Lic. Eng. Física

*Departamento de Física - Universidade do Minho*

### Objetivos

Este trabalho pretende atingir os seguintes objetivos principais:

- Verificar (não validar) uma lei física
- Controlar e medir forças, velocidades e acelerações usando um sistema computadorizado
- Estimar (qualitativamente?) fatores que influenciam a experiência

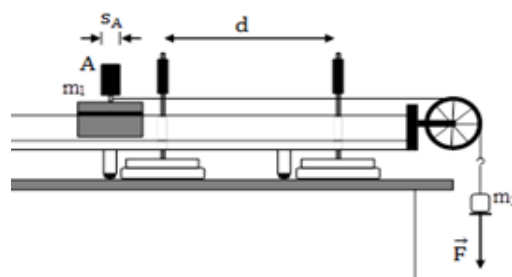
### Qual é a física envolvida

Vocês conhecem, certamente, a 2ª lei de Newton. Ela já vos foi apresentada com pompa e circunstância. Esta lei relaciona a aceleração do centro de massa de um sistema com a resultante de todas as forças aplicadas no sistema. Na verdade, apenas as forças externas ao sistema precisam de ser contabilizadas porque as forças internas que partes do sistema exercem noutras partes do sistema, cancelam-se entre si e têm resultante nula. A expressão da 2ª lei de Newton assume a forma tradicional (não usei vetores porque vamos trabalhar a uma dimensão):

$$a_{CM} \approx \frac{\sum F_{ext}}{M} \quad (1)$$

Na prática, vamos simplificar o trabalho usando corpos rígidos com movimento de translação (deste modo, e dentro da aproximação de corpo rígido, o movimento de qualquer ponto do corpo é igual ao movimento do centro de massa do corpo, isto, têm a mesma velocidade e a mesma aceleração). Escolheremos ainda configurações em que as forças externas, as únicas que nos interessam conhecer, são poucas e fáceis de quantificar.

A montagem que utilizaremos está representada na figura à direita. Uma calha horizontal capaz de criar uma almofada de ar serve de guia a um cavaleiro que se desloca em cima dela com atrito reduzido. Um fio leve fixo ao cavaleiro esticado ao longo da calha, passa por uma roldana no fim desta transformando um movimento horizontal em vertical. Na ponta desse fio está suspensa um gancho onde se podem adicionar massas. Para medir a velocidade e aceleração do cavaleiro, recorreremos a dois sensores óticos a uma distância  $d$  um do outro ao longo da calha. Fixa ao cavaleiro está uma bandeira de largura  $s_A$  que interceta os feixes de luz dos sensores óticos ao passar por eles. Um computador regista durante quanto tempo os feixes dos sensores são interrompidos,  $t_1$  e  $t_2$ , e quanto tempo demora, após a bandeira interromper o primeiro sensor, a interromper o segundo sensor,  $\Delta t$ .



A partir destes valores podemos calcular as velocidades e a aceleração do cavaleiro:

$$v_1 \approx \frac{s_A}{t_1}, \quad v_2 \approx \frac{s_A}{t_2}, \quad a \approx \frac{v_2 - v_1}{\Delta t} \quad (2)$$

Não foi usado o sinal “=” porque se trata de velocidades médias. A aceleração, que é o parâmetro que nos interessa para verificarmos a 2ª lei de Newton, é constante, mas dada a forma como determinámos as velocidades e o intervalo de tempo não há garantia de que obtenhamos o valor correto.

Determinámos a aceleração,  $a$ , mas de que sistema? Qual é a sua massa,  $M$ , e qual é a resultante das forças externas ao sistema,  $F$ ?

O cavaleiro move-se na horizontal e o gancho, com a massa suspensa, na vertical. Estes movimentos estão ligados pelo fio que também se move. A própria roldana gira. Todas estas massas contribuem para a massa do sistema. A massa do cavaleiro, com a sua bandeira, bem como do fio e a massa suspensa são fáceis de medir: basta pegar no conjunto e colocá-lo em cima da balança. A massa da roldana é mais difícil de medir porque não podemos separar a roda do suporte e teríamos que entrar em conta com momentos de inércia e rotações o que complicaria um pouco as contas. Neste caso vamos desprezar essa massa, fica apenas o alerta de que a massa medida tem um erro sistemático por defeito, isto é, a massa correta poderá ser ligeiramente maior.

Analise agora as forças externas a atuar no sistema. Começamos pelo cavaleiro. Este está em contacto com a calha e com o ar à volta. O apoio na calha é indireto devido à almofada de ar criada por esta. Essa almofada de ar deve reduzir a componente horizontal da força (atrito) o suficiente para a podermos considerar desprezável. Como as velocidades atingidas pelo carrinho não são muito grandes, vamos igualmente desprezar a força de atrito visco devida ao movimento do carrinho no ar. A calha, através da almofada de ar, exercerá uma força na vertical sobre o cavaleiro. Esta força, que completa as forças de contacto externas sobre o cavaleiro, deverá compensar a força gravítica (à distância) sobre o cavaleiro. Sabemos isto pela 1ª lei de Newton uma vez que não há movimento vertical do cavaleiro (Nota: há ainda uma força horizontal sobre o cavaleiro devida ao fio, mas como estamos a considerar o fio como parte do sistema, essa será uma força interna que não consideraremos). Em resumo, a resultante das forças externas sobre o cavaleiro é nula, e há um erro sistemático (em que sentido?) nesta suposição devido a desprezarmos o atrito viscoso.

Vamos igualmente desprezar algum atrito introduzido pela roldana no fio e atrito viscoso devido ao movimento do fio e do gancho + massas suspensas devido ao ar. No fio, para além do ar cuja interação desprezamos (atrito viscoso) e força de impulsão, não temos mais nenhuma força de contacto externa (o fio faz parte do nosso sistema). Assim, a resultante das forças externas no gancho é a força gravítica que atua nele. Em conclusão, a resultante das forças externas é igual ao peso do gancho e massas nele suspensas e é fácil medir massa do gancho com essas massas colocando o conjunto no prato da balança.

## Procedimento experimental

O procedimento experimental é simples, mas podemos adaptá-lo para tornar a interpretação dos resultados mais simples ou mais elegante e podemos também estimar mais algumas fontes de erro.

A 2ª lei de Newton prevê, para um sistema de massa constante, uma proporcionalidade direta entre a força (resultante das forças externas) e a aceleração. Se, nessa condição, representarmos num gráfico da força em função da aceleração, devemos obter uma reta a passar pela origem cujo declive é igual à massa do sistema. Esta é uma forma elegante de verificarmos a 2ª lei de Newton. Assim, manteremos a massa do sistema constante, variando a massa suspensa tirando pesos do gancho e colocando-os no cavaleiro.

Alguns outros cuidados que devemos ter incluem:

- Verificar que o fio que liga o cavaleiro à roldana está horizontal.

- Verificar que o cavaleiro não tem tendência para se mover num ou noutro sentido quando abandonado imóvel na calha de ar (devem verificá-lo em vários pontos da calha de ar).
- Verificar que os feixes de luz dos sensores são perpendiculares à calha e que a bandeira é paralela à mesma.
- Verificar que o ponto de onde largam o cavaleiro fica suficientemente atrás do primeiro sensor para que o seu movimento já esteja estabilizado e sem vibrações, e verificar que o gancho não bate no chão antes de passar pelo segundo sensor (na realidade convém evitar que o gancho bata no chão porque a tendência é as massas saltarem e, como são pequenas, perderem-se).
- Para largar o cavaleiro para cada experiência, este não deve ser seguro com os dedos como uma pinça porque temos sempre a tendência, ao abrir os dedos, a fazê-lo primeiro com um dedo do que com os dois ao mesmo tempo e isso introduz vibrações que aumentam o atrito e podem mesmo levar o cavaleiro a entrar em contacto com a calha. É preferível colocar o dedo à frente do cavaleiro, como um batente, e retirá-lo evitando criar vibrações.
- Ao ir retirando as massas suspensas e colocando-as no cavaleiro, verifique que o faz de forma simétrica para que o cavaleiro não fique inclinado.

O procedimento a seguir será:

- i. Familiarizem-se com o equipamento e, em particular, com o software usado para controlar os sensores.
- ii. Selecione o cavalete, a bandeira, o gancho e as massas, o fio (e poderá ser necessário um segundo gancho que liga ao cavalete para amarrar o fio).
- iii. Coloque a roldana na calha, coloque o sistema e verifique que está funcional (pergunte ao docente como ligar o ventilador que cria a almofada de ar).
- iv. Quando tudo estiver funcional façam o registo de cinco ensaios variando a força resultante sem variar a massa do sistema. Para cada valor da massa suspensa façam três ensaios distintos largando o cavaleiro sempre da mesma posição (os valores dos tempos devem dar aproximadamente o mesmo valor nos três ensaios, se não for o caso num dos ensaios esse deve ser repetido).

## Tratamento dos dados experimentais

- a. Preenchem a folha de registos calculando as médias e outras fórmulas.
- b. Registem os resultados obtidos num gráfico  $F(a)$  e estimem o declive ajustando aos pontos experimentais uma reta que passa pela origem. Comparem esse valor com a massa total do sistema.
- c. Criem uma tabela com a lista dos fatores que desprezaram (e que dão origem a erros sistemáticos) e que indique se cada um desses fatores, se fosse contabilizado, ia no sentido de melhorar ou piorar o resultado final (comparação de  $M_s$  pesado na balança com o valor do declive da reta de ajuste aos pontos experimentais).

## Folha de registo de resultados

Nota: o valor da aceleração da gravidade por medição direta no campus de Gualtar não é conhecida com grande precisão. Uma melhor forma de a estimar consiste em usar [modelos matemáticos](#) que dão o valor da aceleração da gravidade em função da latitude e altitude do local. Usando um modelo descrito no link, obtemos para o campus de Gualtar um valor de  $g = 9.802 \text{ m/s}^2$ .

$$s_A = \_\_\_\_\_\_ \pm \_\_\_\_\_\_ \text{ mm}$$

$t_1$	$t_2$	$\Delta t$				
			$m_{\text{suspensa}} = (\_\_\_\_\_\_ \pm \_\_\_\_\_\_) \text{ g}$			
			$M_{\text{sistema}} = (\_\_\_\_\_\_ \pm \_\_\_\_\_\_) \text{ g}$			
			$v_1$	$v_2$	$F_r = m_s \times g$	$a = \frac{v_2 - v_1}{\Delta t}$
$\langle t_1 \rangle =$	$\langle t_2 \rangle =$	$\langle \Delta t \rangle =$				

$t_1$	$t_2$	$\Delta t$				
			$m_{\text{suspensa}} = (\_\_\_\_\_\_ \pm \_\_\_\_\_\_) \text{ g}$			
			$M_{\text{sistema}} = (\_\_\_\_\_\_ \pm \_\_\_\_\_\_) \text{ g}$			
			$v_1$	$v_2$	$F_r = m_s \times g$	$a = \frac{v_2 - v_1}{\Delta t}$
$\langle t_1 \rangle =$	$\langle t_2 \rangle =$	$\langle \Delta t \rangle =$				

$t_1$	$t_2$	$\Delta t$				
			$m_{\text{suspensa}} = (\_\_\_\_\_\_ \pm \_\_\_\_\_\_) \text{ g}$			
			$M_{\text{sistema}} = (\_\_\_\_\_\_ \pm \_\_\_\_\_\_) \text{ g}$			
			$v_1$	$v_2$	$F_r = m_s \times g$	$a = \frac{v_2 - v_1}{\Delta t}$
$\langle t_1 \rangle =$	$\langle t_2 \rangle =$	$\langle \Delta t \rangle =$				

$t_1$	$t_2$	$\Delta t$				
			$m_{\text{suspensa}} = (\_\_\_\_\_\_ \pm \_\_\_\_\_\_) \text{ g}$			
			$M_{\text{sistema}} = (\_\_\_\_\_\_ \pm \_\_\_\_\_\_) \text{ g}$			
			$v_1$	$v_2$	$F_r = m_s \times g$	$a = \frac{v_2 - v_1}{\Delta t}$
$\langle t_1 \rangle =$	$\langle t_2 \rangle =$	$\langle \Delta t \rangle =$				

$t_1$	$t_2$	$\Delta t$				
			$m_{\text{suspensa}} = (\_\_\_\_\_\_ \pm \_\_\_\_\_\_) \text{ g}$			
			$M_{\text{sistema}} = (\_\_\_\_\_\_ \pm \_\_\_\_\_\_) \text{ g}$			
			$v_1$	$v_2$	$F_r = m_s \times g$	$a = \frac{v_2 - v_1}{\Delta t}$
$\langle t_1 \rangle =$	$\langle t_2 \rangle =$	$\langle \Delta t \rangle =$				