

**Universidade de São Paulo
Instituto de Física de São Carlos
Laboratório de Ensino de Física**



**Prática IV
Estática**

**Gabriel Alves Lima nº 12558547
Jefter Santiago Mares nº 12559016
Vitória Bitencourte Galliac nº 12624818**



**São Carlos
2021**

1. Resumo

Nesta prática será estudado as condições para o equilíbrio estático em três sistemas: três massas suspensas por polias, um fio sujeito à tração por meio de uma massa, e por fim um corpo na iminência do movimento em uma rampa. No primeiro experimento foi analisado a influência das forças de tensão para a determinação de duas das massas do sistema em equilíbrio. No próximo experimento, foi comparado e discutido os resultados de dois métodos diferentes para a obtenção da tensão de ruptura do fio. No último experimento, foi analisado o ângulo crítico de inclinação do plano para o início do movimento e o coeficiente de atrito; calculado duas vezes, com superfícies de contato distintas em cada. Assim, foi possível observar as condições de cada sistema na iminência do movimento, uma vez que foram encontrados os valores críticos para mantê-los em equilíbrio.

2. Objetivos

Os objetivos dessa prática englobam a análise das condições para manter três sistemas em equilíbrio estático. No primeiro experimento, o objetivo foi analisar a precisão do método de obtenção das massas do sistema - a partir das forças de tensão do fio - comparando o valor calculado com o valor das massas obtido diretamente. No segundo experimento o objetivo era estudar a diferença entre dois métodos e sua precisão para a determinação da tensão de ruptura do fio. No terceiro experimento, a partir da observação de um ângulo crítico de inclinação do plano para o início do movimento de uma massa, os objetivos eram encontrar o coeficiente de atrito estático para duas condições distintas, onde as superfícies de contato foram alteradas.

3. Introdução

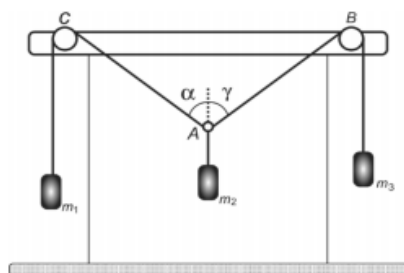


Na mecânica, se um sistema possui aceleração e velocidade nulas, dizemos que ele está em equilíbrio estático, ou seja, a resultante das forças que atuam sobre ele é nula. Na prática, os corpos estudados serão considerados um ponto material. Para o estudo das forças, elas serão decompostas em duas direções perpendiculares x e y . Logo:

$$\sum_i \vec{F}_{ix} = 0$$

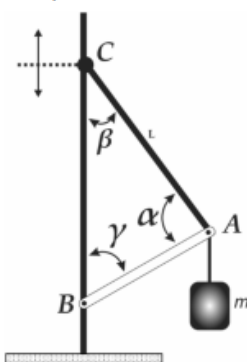
$$\sum_i \vec{F}_{iy} = 0$$

Em um sistema de massas equilibradas por meio de polias, percebe-se que a tensão é equivalente ao peso da massa suspensa.



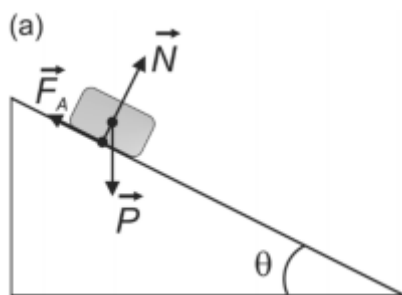
Se nesse sistema as massas forem diferentes, a posição de equilíbrio irá formar dois ângulos distintos - α e γ - entre os fios e a direção y no ponto A.

A tensão de ruptura do fio utilizado no experimento 2 será medida com o instrumento indicado abaixo, que aplicará tensões no fio entre A e C. Em equilíbrio, é possível calcular a tensão aplicada por meio de $T = \frac{mgL}{CB}$.



Analisando as forças que atuam no conjunto, pode-se concluir que se o comprimento de \overline{CB} for reduzido, a tensão sobre o fio aumentará, e eventualmente, se continuarmos a diminuir o comprimento, seu ponto de ruptura será atingido e o sistema sairá do equilíbrio.

Em um experimento que visa a obtenção do coeficiente de atrito estático entre duas superfícies, o sistema pode ser demonstrado da seguinte forma:



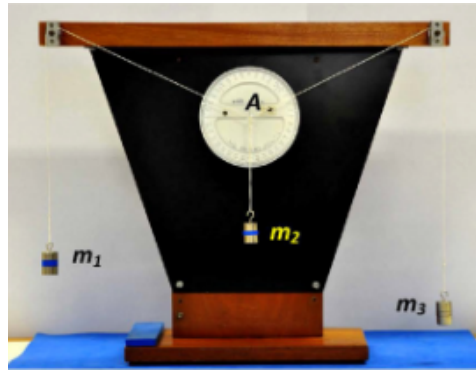
Conforme o ângulo θ é ampliado, a força de atrito estática também cresce, atingindo seu valor máximo quando o plano tem uma inclinação θ crítica, ou seja, uma condição que representa a iminência do movimento da massa na superfície.



4. Método Experimental


4.1. Descrição do Experimento I - Sistema de Polias

Nesse experimento, foram suspensas três massas com um conjunto de polias. Para encontrar a configuração mais adequada para determinar a posição de equilíbrio do sistema, ele foi movido algumas vezes e foi observado seu ponto de retorno.



Em seguida, os ângulos α e γ (ângulos formados entre a orientação y em A e um dos fios diagonais) foram medidos com um transferidor e foi desenhado um diagrama de corpo livre para o ponto A, em escala. A partir do diagrama, foi feito o triângulo de forças atuantes no ponto analisado.

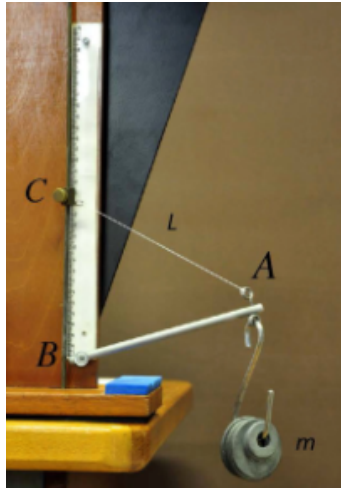
Com o valor da massa m_2 foi calculada a tensão T_{ab} e T_{ac} de ambos os fios diagonais a partir da lei dos senos ($\frac{T_{ab}}{\sin(\alpha)} = \frac{T_{ac}}{\sin(\gamma)} = \frac{P}{\sin[180^\circ - (\alpha + \gamma)]}$), possibilitando assim calcular os valores das massas m_1 e m_3 indiretamente.

Por fim, foram comparados os valores calculados das três massas com os valores obtidos através de uma balança, além de discutidos a influência das tensões T_{ab} e T_{ac} na determinação das massas m_1 e m_3 . 

4.2. Descrição do Experimento II - Tensão de Ruptura

Antes do início do experimento, o material foi analisado para conferir se a massa e o comprimento inicial do fio utilizados eram suficientes para ocorrer o rompimento do fio.


No primeiro método utilizado para determinar a tensão de ruptura do fio, foi primeiramente registrado os valores do comprimento L_i do fio e as respectivas distâncias entre o ponto C e B (\overline{CB}_i) do sistema imediatamente antes da ruptura, isso foi repetido 5 vezes.



Para cada valor fixado de L_i , foi calculado a força de tensão $T_i = \frac{mgL_i}{CB_i}$, onde m é a massa utilizada no experimento e g a aceleração da gravidade. Em seguida, foi obtido a tensão média $\bar{T} = \frac{\sum_{i=1}^5 T_i}{N}$ e a determinada incerteza $\Delta T = \frac{\sum |T_i - \bar{T}|}{N}$, onde $N = 5$, obtendo então a tensão final $T = \bar{T} \pm \Delta T$.

No segundo método de obtenção da tensão de ruptura, o fio foi colocado na vertical e a massa presa em sua extremidade inferior foi sendo gradativamente aumentada até o rompimento do fio, isso foi feito 5 vezes. Com os cinco valores obtidos para as massas, foi calculada a tensão

$T_i = m_i g$, a tensão média $\bar{T} = \frac{\sum_{i=1}^5 T_i}{N}$, e finalmente a incerteza $\Delta T = \frac{\sum |T_i - \bar{T}|}{N}$. Assim, a tensão final também foi obtida como $T = \bar{T} \pm \Delta T$.

Por fim, foi analisado se ambos os valores calculados para a tensão de ruptura do fio são equivalentes e se o módulo da tensão final depende do método de obtenção utilizado. 

4.3. Descrição do Experimento III - Coeficiente de atrito Estático

Neste experimento foi utilizado um bloco de madeira com duas faces de diferentes materiais. Assim, o método que será descrito a seguir será feito duas vezes, cada uma com uma superfície diferente do bloco de madeira, para analisar os valores do coeficiente de atrito estático de ambas as superfícies com o plano inclinado que será utilizado.



Para iniciar o experimento, o plano foi sendo inclinado até atingir um ângulo $\theta_{m\acute{a}x}$, ou seja, o ângulo de inclinação onde o bloco está na iminência do movimento. Esse processo foi repetido 20 vezes. Em seguida, o coeficiente de atrito estático foi calculado a partir de $\mu_e = \tan(\theta_{m\acute{a}x})$ para cada valor encontrado para o ângulo. Após o cálculo do coeficiente de

atrito estático, foi calculado a média $\overline{\mu_e} = \frac{\sum_{i=1}^{20} \mu_{ei}}{N}$, e a incerteza $\Delta\mu = \frac{\sum |\mu_{ei} - \overline{\mu_e}|}{N}$, com $N=20$.

Por fim, foram analisados os valores de $\overline{\mu_e} \pm \Delta\mu$ para cada superfície estudada.

5. Resultados e Discussão

5.1. Experimento I: Sistema de Polias

No primeiro experimento, o sistema de polias foi retirado de seu ponto de equilíbrio várias vezes, porém o ponto em que o sistema retornava sempre coincidia com o ponto de equilíbrio do sistema. Isso aconteceu porque no ponto de equilíbrio o somatório de todas as forças é zero, ou seja, é o ponto em que a força resultante é nula.

Com o sistema de polias no ponto de equilíbrio foi mensurado os ângulo que as cordas \overline{AB} e \overline{AC} fazem com a reta vertical que passa pela corda do peso m_2 . Os ângulos encontrado foram $\alpha = 46^\circ$ e $\gamma = 58^\circ$.

O Diagrama de corpo livre do ponto A e o triângulo de força nessa configuração estão apresentados, respectivamente, abaixo.

Figura 1: Diagrama de corpo livre ponto A

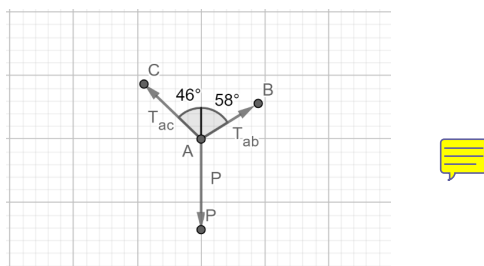
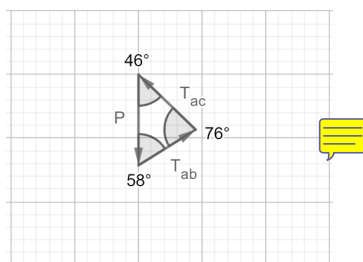


Figura 2: Triângulo de forças do ponto A



Utilizando o triângulo das forças, *Figura 2*, e sabendo que a massa m_2 tem valor de $(72,72 \pm 0,01) g$ pode se descobrir o módulo das tensões T_{ac} e T_{ab} por meio da lei dos senos, como demonstrado a seguir:

$$\frac{T_{ab}}{\text{sen}(\alpha)} = \frac{T_{ac}}{\text{sen}(\gamma)} = \frac{P}{\text{sen}[180^\circ - (\alpha + \gamma)]}$$

Assim, foi calculado que $T_{ac} = (0,62 \pm 0,01) N$ e $T_{ab} = (0,52 \pm 0,01) N$. Com os valores das tensões foi possível calcular de forma indireta as massas m_1 e m_3 , visto que as tensões são iguais a força peso de cada cilindro. Para o cálculo das massas foi empregado as equações abaixo.

$$T_{ac} = m_1 g \Rightarrow m_1 = (0,063 \pm 0,001) Kg$$

$$T_{ab} = m_3 g \Rightarrow m_3 = (0,053 \pm 0,001) Kg$$

Comparando os valores medidos indiretamente das massas com os valores medidos diretamente temos:

Comparação da massa m_1

$$|m_{1i} - m_{1d}| < 2(\Delta m_{1i} + \Delta m_{1d})$$

$$|63 - 62,89| < 2(1 + 0,01)$$

$$0,11 < 2,02$$



Comparação da massa m_3

$$|m_{3i} - m_{3d}| < 2(\Delta m_{3i} + \Delta m_{3d})$$

$$|53 - 54,66| < 2(1 + 0,01)$$

$$1,66 < 2,02$$

Observando as comparações feitas entre as massas calculadas de forma direta e indireta dos de cada bloco, m_1 e m_3 , podemos concluir que as massas calculadas de forma indireta são equivalentes às massas calculadas de forma direta.

Dessa forma, pode se concluir que só foi possível calcular as massas m_1 e m_3 devido ao sistema estar em equilíbrio, pois assim a força de tração das cordas são iguais aos respectivos pesos das massas em que estão ligados.

Se fosse considerado forças atuando entre as polias e a corda poderia se inferir a partir do experimento que as massas encontradas ficariam constantes, assim como a força peso. Isso

aconteceria pois quem iria variar seria a tensão que compensaria as novas forças existentes entre a polia e a corda.

5.2. Experimento II: Tensão de Ruptura

Nesse experimento foram utilizados dois métodos para determinar a tensão de ruptura do fio. Antes de iniciar o primeiro método, foi conferido se o comprimento L do fio e a massa m $[(56,75 \pm 0,01) g]$ permitiriam o rompimento do fio a alguma distância \overline{CB}_i .

No primeiro método, foi medido o comprimento L_i do fio, visto que o fio pode ter uma determinada elasticidade, para cada distância \overline{CB}_i do equipamento no instante anterior à ruptura do fio, isso foi repetido 5 vezes.

Com tais valores anotados, foi calculado a tensão $T_i = \frac{mgL_i}{\overline{CB}_i}$ e o módulo da diferença entre T_i e a tensão média ($\overline{T}_1 = 0,762 N$) dos valores obtidos.

Tabela 1: Valores comprimento L_i , distância \overline{CB}_i , e tensão T_i para cada caso.

i	$\overline{CB}_i \pm 0,001 (m)$	$L_i \pm 0,001 (m)$	$T_i (N)$	$ T_i - \overline{T} (m)$
1	0,132	0,180	0,760	0,002
2	0,121	0,178	0,820	0,060
3	0,130	0,182	0,780	0,020
4	0,136	0,181	0,740	0,020
5	0,145	0,186	0,710	0,050

Após a obtenção de tais valores, a incerteza da tensão foi calculada a partir de $\Delta T = \frac{\Sigma |T_i - \overline{T}|}{N}$. Assim, o valor final da tensão de ruptura do fio calculada no primeiro método é $(0,762 \pm 0,030) N$.

Para o segundo método, o equipamento foi preparado de forma com que o fio permaneça na vertical, com uma massa em sua extremidade, gerando uma tensão $T_i = mg$. Para analisar a tensão de ruptura, a massa aplicada foi gradativamente aumentada até a ruptura do fio. O processo foi repetido cinco vezes, e os valores da tensão T_i e da média \overline{T} foram calculados ($\overline{T}_2 = 0,82 N$).

Tabela 2: Valores da massa suficiente para o rompimento do fio e suas respectivas tensões.

i	$m_i \pm 0,01 \cdot 10^{-3} (Kg)$	$T_i (N)$	$ T_i - \bar{T} (N)$
1	$90,40 \cdot 10^{-3}$	0,90	0,08
2	$91,50 \cdot 10^{-3}$	0,90	0,08
3	$70,40 \cdot 10^{-3}$	0,70	0,12
4	$91,50 \cdot 10^{-3}$	0,90	0,08
5	$70,50 \cdot 10^{-3}$	0,70	0,12

Em seguida, a incerteza $\Delta T = \frac{\sum |T_i - \bar{T}|}{N}$ foi determinada. Por fim, o valor final da tensão de ruptura do fio obtido no método 2 foi $(0,82 \pm 0,10) N$.

Para analisar se os valores finais de ambos os métodos podem ser considerados equivalentes, foi utilizada a seguinte expressão:

$$|\bar{T}_1 - \bar{T}_2| < 2(\Delta T_1 + \Delta T_2)$$

$$|0,762 - 0,82| < 2(0,030 + 0,10)$$

$$0,058 < 0,26$$

Assim, pode-se concluir que os valores da tensão de ruptura obtidos no experimento são **equivalentes**, ou seja, o resultado da tensão final não depende do método de determinação.

5.3. Experimento III: Coeficiente de atrito Estático

Num plano inclinado a força de atrito entre o bloco aumenta gradativamente de acordo com o aumento de θ até um ponto crítico, na iminência de movimento, onde a força de atrito é máxima. A partir do diagrama temos que $\mu = \tan(\theta)$ e é dado a incerteza $\Delta\theta = 1^\circ$.

O experimento foi dividido em duas etapas, em que foi medido o coeficiente de atrito de acordo com a equação acima, no primeiro caso calculamos os diferentes μ superfícies iguais e no segundo caso com superfícies diferentes.

Tabela 3: Superfície de contato fôrmica-fôrmica

i	$\theta_{ci} (^\circ) \pm 1^\circ$	$\mu_e \pm 0,02$	$ \mu_{ei} - \mu_e \pm 0,04$
1	15	0,27	0,00
2	15	0,27	0,00
3	14	0,25	0,03

4	17	0,31	0,30
5	14	0,25	0,03
6	15	0,27	0,00
7	15	0,27	0,00
8	16	0,29	0,01
9	15	0,27	0,00
10	14	0,25	0,03
11	16	0,29	0,01
12	16	0,29	0,01
13	15	0,27	0,00
14	15	0,27	0,00
15	15	0,27	0,00
16	16	0,27	0,01
17	17	0,31	0,03
18	15	0,27	0,00
19	16	0,29	0,01
20	16	0,29	0,01

A média dos valores mensurados foi de $\mu_{\text{média}} = 0,2745$ e o desvio padrão é de $\sigma = 0,0164$, sabendo que a incerteza da medida é dada por $\tan(\Delta\theta)$, com $\Delta\theta = 1^\circ$, temos que $\tan(\Delta\theta) = 0,01745 \approx \sigma \approx 0,02$. Portanto, podemos expressar o valor médio do coeficiente de atrito como $\mu = 0,27 \pm 0,02$.

Tabela 4: Superfície de contato feltro-fôrmica

i	$\theta_{ci} (^\circ) \pm 1^\circ$	$\mu_{ei} \pm 0,02$	$ \mu_{ei} - \mu_e \pm 0,05$
1	25	0,47	0,03
2	24	0,45	0,05
3	27	0,51	0,02

4	25	0,47	0,03
5	23	0,42	0,07
6	27	0,51	0,02
7	29	0,55	0,06
8	27	0,51	0,02
9	25	0,47	0,03
10	28	0,53	0,04
11	27	0,51	0,02
12	26	0,49	0,00
13	27	0,51	0,02
14	26	0,49	0,00
15	26	0,49	0,00
16	25	0,47	0,03
17	26	0,49	0,00
18	29	0,55	0,06
19	25	0,47	0,03
20	26	0,49	0,00

A média para o caso 2 foi de $\mu_{\text{média}} = 0,4913$ e o desvio padrão $\sigma = 0,033$, como $\sigma > \tan(\Delta\theta)$, temos que a incerteza será dada por $\pm \sigma$, o maior valor encontrado. Então podemos representar o valor médio para esse caso como $\mu = 0,49 \pm 0,03$.

6. Conclusão

Logo, pode-se concluir que no experimento 1 tendo os ângulos que as tensões fazem entre si e a massa de um dos objetos é possível determinar de forma relativamente próxima à massa dos outros dois objetos. Além disso, pode-se constatar que isso só é possível de ser feito quando o sistema estiver em equilíbrio.

Em adição, após o cálculo da tensão de ruptura do fio através de dois métodos distintos no experimento 2, pode-se constatar que o valor final que se busca não deve depender do método de obtenção utilizado, uma vez que ambos os valores calculados no experimento são equivalentes. Porém, cabe destacar que o primeiro método utilizado fornece um resultado com menor incerteza, ou seja, um valor mais preciso. No experimento 3 era esperado que o



coeficiente de atrito para o caso feltro-fórmica fosse maior, pois a superfície de feltro apresenta mais irregularidades que a fórmica e os resultados obtidos estão de acordo com o esperado.

7. Referências

SCHNEIDER, José F. **Laboratório de Física 1**: Livro de práticas. São Carlos: 2016.