



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO  
Instituto de Física  
Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física  
Mestrado Profissional em Ensino de Física

## **ESTÁTICA DE CORPO EXTENSO: UMA ABORDAGEM EXPERIMENTAL**

*Leonardo Sampaio Motta*

&

*Antônio Carlos Fontes dos Santos*

Material instrucional associado à dissertação de mestrado de Leonardo Sampaio Motta, apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física da Universidade Federal do Rio de Janeiro.

Rio de Janeiro  
Dezembro de 2014

# **Estática De Corpo Extenso: Uma Abordagem Experimental**

*Leonardo Sampaio Motta*

*Antônio Carlos Fontes dos Santos*

## **Resumo**

Este trabalho corresponde a elaboração de uma sequência de atividades experimentais envolvendo a estática de um corpo extenso que pode rotacionar em torno de um eixo fixo, assim como, da elaboração dum aparato experimental destinado à realização das mesmas. Essas atividades possibilitam: a explicitação do braço de alavanca como fator geométrico determinante no efeito de rotação que uma força é capaz de gerar, obtendo-se de forma bastante simples - por meio de medidas diretas e inspeção de dados - a relação do torque como o produto da força pelo braço de alavanca, assim como, na validade do princípio de superposição para momentos de força. Num sentido mais restrito obtivemos o que poderíamos denominar de lei de Arquimedes generalizada para o equilíbrio de uma "alavanca". Trabalharam-se também os tipos de equilíbrio – estável, instável e indiferente – na análise dos quais, foi utilizado o conceito de torque resultante restaurador.

# SUMÁRIO

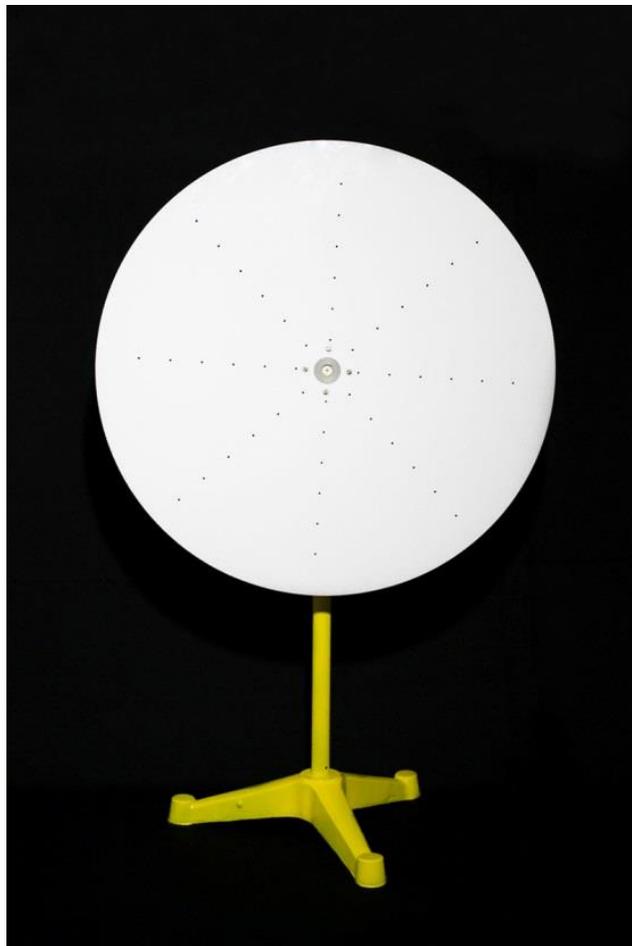
1. Sequência didática experimental.....	3
1.1 Aparato experimental.....	3
1.1.1 Material utilizado.....	3
1.1.2 Montagem.....	9
1.1.3 Tomada de dados.....	11
1.2 Sequência didática.....	15
1.3 Resultados experimentais.....	20
Referências Bibliográficas.....	26

# SEQUÊNCIA DIDÁTICA EXPERIMENTAL

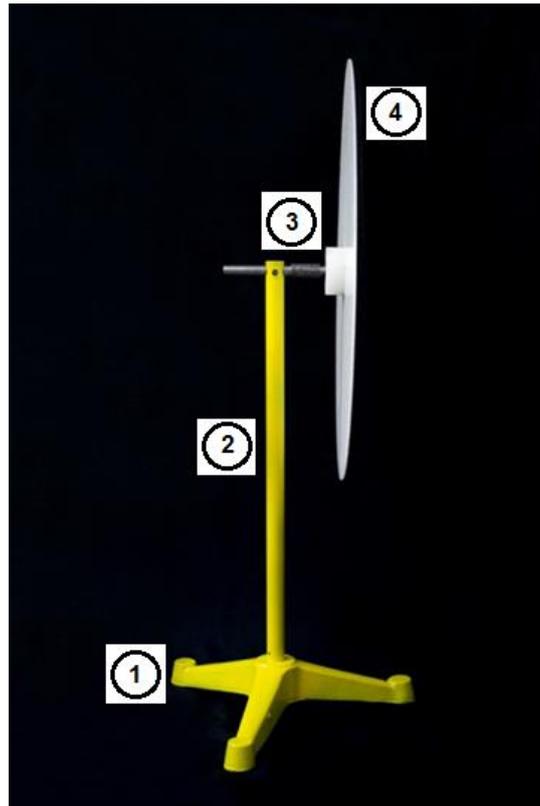
## 1. Aparato experimental

### 1.1 Material

Antes de descrever detalhadamente as partes que compõe o aparato experimental, observemos as duas figuras seguintes (1 e 2) para que tenhamos uma visão geral do aparato.



**Figura 1** Vista frontal do aparato completo, com o disco acrílico no plano vertical.

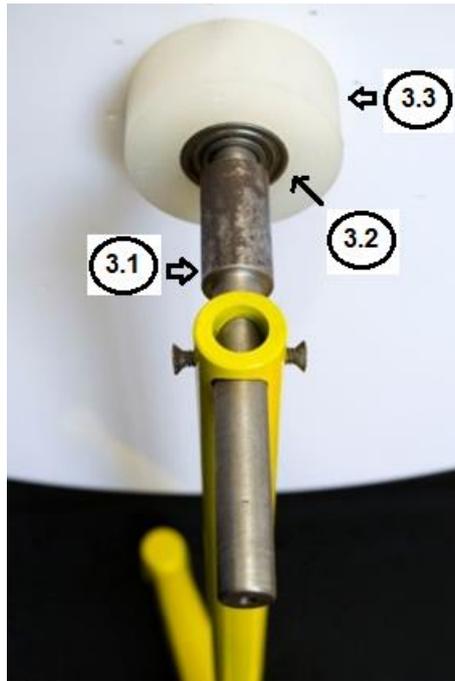


**Figura 2** Vista lateral do aparato completo com o eixo na direção horizontal e o disco acrílico no plano vertical.

Podemos dizer que o aparato é composto fundamentalmente de 4 (quatro) partes principais; pela figura 2 são elas:

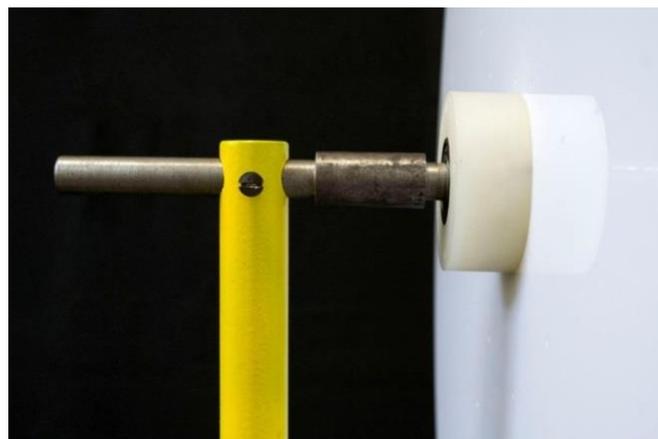
- 1) Base (parte 1);
- 2) Haste (parte 2);
- 3) Conjunto eixo – rolamento - base acrílica (parte 3);
- 4) Disco acrílico (parte 4).

A parte 3 é observada com detalhe na figura 3 a seguir:



**Figura 3** Vista traseira superior do conjunto: haste – eixo (parte 3.1) – rolamento (parte 3.2) – base acrílica (parte 3.3) – disco acrílico.

Para que tenhamos uma ideia clara da disposição das partes 2 (dois), 3 (três) e 4 (quatro) vejamos as figuras 4 e 5 a seguir:



**Figura 4** Vista lateral do conjunto: haste – eixo – rolamento – base acrílica – disco acrílico.



**Figura 5** Detalhe do eixo e da base acrílica na qual o rolamento é fixado. Os parafusos prendem o disco à base acrílica.

Passemos agora à descrição detalhada de cada parte principal que compõe o aparato:

- Parte 1(base)

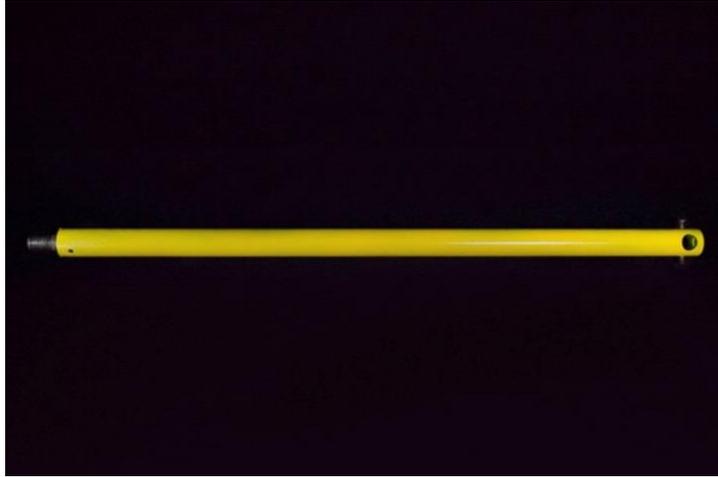
Base triangular de aço, de 42 cm de lado, rosqueada no centro.



**Figura 6** Vista superior da Base.

- Parte 2 (haste)

Haste de aço com 68 cm de altura, 3 cm de diâmetro, rosqueada em uma extremidade e perfurada radialmente e longitudinalmente (na outra extremidade), como visto nas figuras 7 e 8 a seguir:



**Figura 7** Vista "lateral" da haste.



**Figura 8** Vista superior da haste, na qual podemos visualizar o orifício longitudinal na extremidade superior da mesma.

- Parte 3 (Conjunto eixo – rolamento - base acrílica).

- parte 3.1 (eixo)

Cilindro de aço com 20 cm de comprimento e 1,5 cm de diâmetro (figura 3 anterior).

- parte 3.2 (rolamento)

Rolamento de aço, com 1,5 cm de diâmetro interno e 4 cm de diâmetro externo (figura 3 anterior).

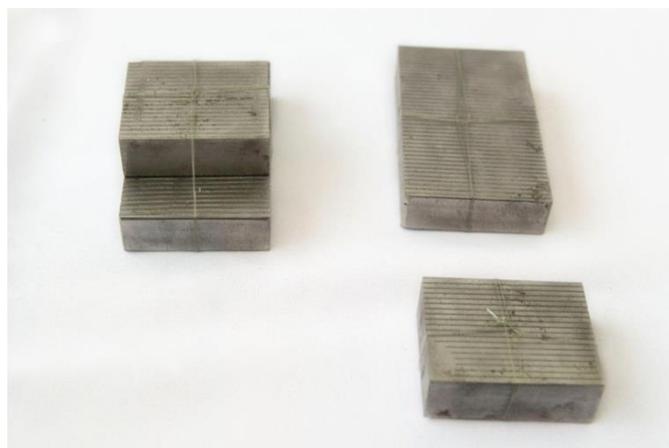
- parte 3.3 (base acrílica)

Peça acrílica cilíndrica com 8 cm de diâmetro externo e 4 cm de diâmetro interno (figura 3 anterior).

- Parte 4 (disco acrílico)

O disco visto na figura 1 anterior, possui 4 mm de espessura e 70 cm de diâmetro, com furação de 4 mm de diâmetro espaçados de 5 cm ao longo de cada raio. Como podemos ver, são 8 (oito) raios equidistantes ( $45^\circ$ ). O disco de acrílico foi cortado / furado numa máquina a laser, mesmo assim, devido a não uniformidade da placa de acrílico que originou o disco, assim como da base de acrílico na qual o conjunto disco – eixo / rolamento foi fixado, fez com que o centro de gravidade (CG) do sistema não estivesse perfeitamente localizado sobre o eixo, o que fez com que houvesse um pequeno torque em relação ao próprio eixo relativo ao peso do conjunto.

Como partes “secundárias” do aparato experimental, temos conforme as figuras 9 e 10 a seguir:



**Figura 9** Massas de 408 g, 970 g e 1406 g. É mostrado na figura o arranjo com linha de pesca para suspensão dos mesmos.



**Figura 10** Linha de artesanato e anzol de pesca. (utilizados para: suspensão dos pesos em uma extremidade e fixação ao disco acrílico na outra).

## 1.2 Montagem

i) Uma vez que o sistema parte 3 (conjunto eixo – rolamento - base acrílica) – parte 4 (disco acrílico) fica permanentemente unido, começaremos explicando como o mesmo é montado.

Inicialmente o rolamento é fixado ao eixo por pressão. Em seguida o rolamento é fixado à base acrílica também por pressão, ou seja, rolamento - eixo e rolamento - base acrílica ficam unidos devido ao atrito. Está montada então a parte 3 do aparato (Observe a figura 3 anterior).

ii) O disco acrílico (parte 4) é, então, unido à parte 3 através de parafusos, conforme a figura 5 anterior.

iii) Depois de montado o sistema parte 3 - parte 4 fixa-se a parte 2 à parte 1 por rosqueamento, conforme a figura 11 a seguir:



**Figura 11** Detalhe da fixação da haste à base.

iv) De posse dos sistemas parte 3 - parte 4 e parte 1 – parte 2, o eixo é inserido num dos orifícios existentes na extremidade da haste e fixado então com o uso de parafusos, havendo então duas possibilidades:

1ª possibilidade: Uso do orifício transversal, conforme as figuras 2, 3 e 4 anteriores. Nesse caso, o eixo fica na posição horizontal e o disco acrílico contido num plano vertical.

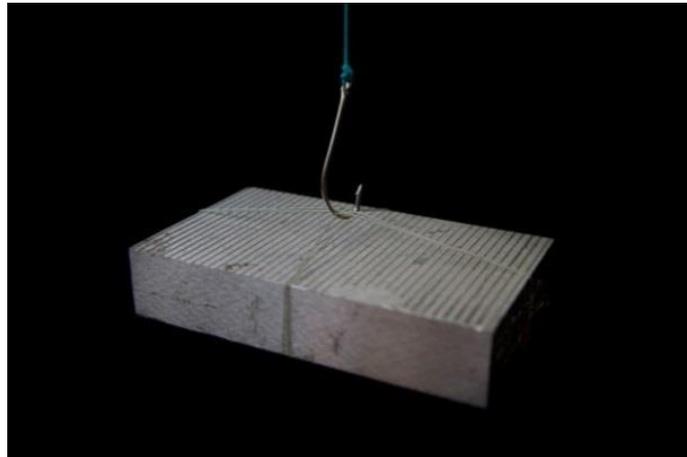
2ª possibilidade: uso do orifício longitudinal (figura 8). Nesse caso, fica então o eixo na direção vertical e o disco acrílico contido num plano horizontal, conforme a figura 12 a seguir:



**Figura 12** Vista frontal do aparato completo, com o disco acrílico no plano vertical.

### 1.3 Tomada de dados

Uma das massas que foram apresentadas na figura 9 é suspensa pelo anzol, descrito na figura 10. O sistema completo está apresentado na figura 13 a seguir.



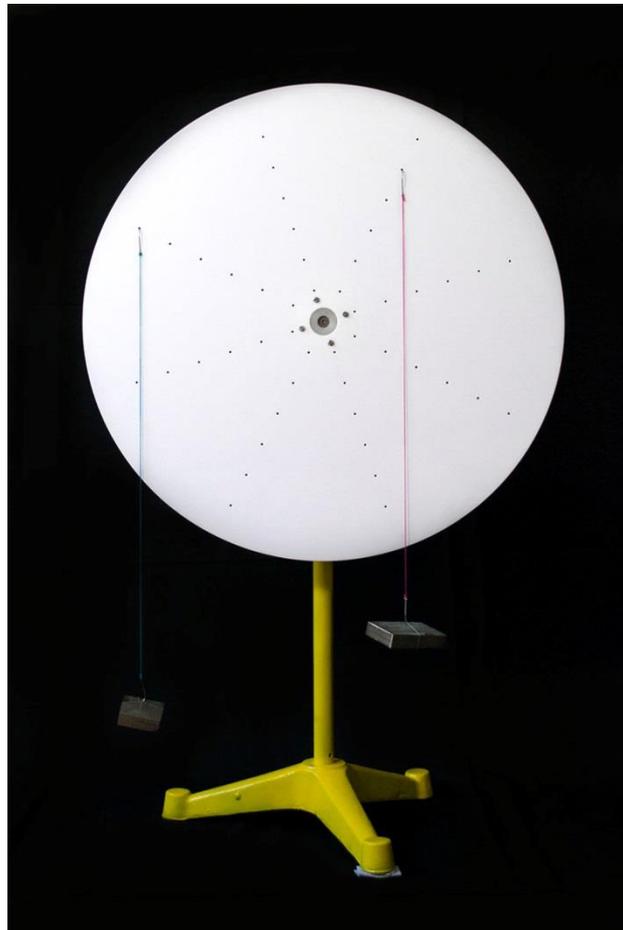
**Figura 13** Detalhe do peso em suspensão.

Em seguida, o anzol da outra extremidade do fio é introduzido num dos furos do disco acrílico, conforme podemos ver pelas figuras 14 e 15 a seguir:



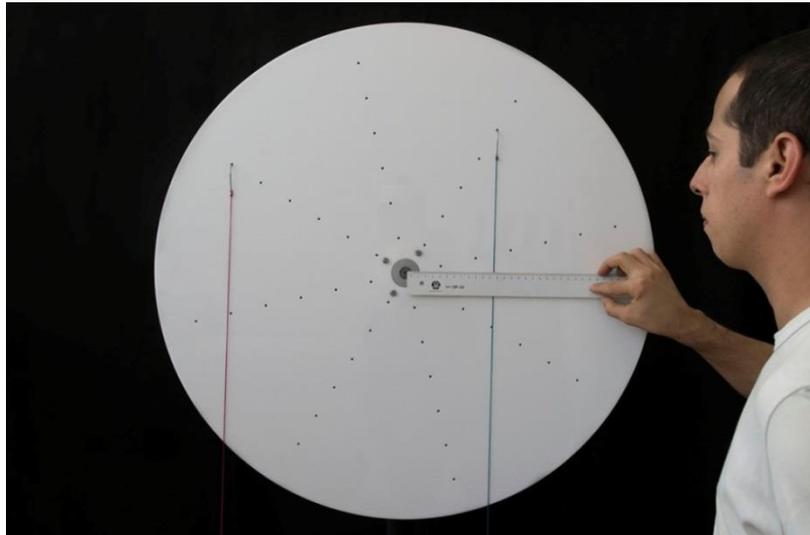
**Figura 14** Detalhe da “fixação” do anzol de pesca ao disco acrílico.

De maneira geral, ao serem fixados os pesos, o sistema disco-pesos não estará em equilíbrio. Nesse caso, gira-se o disco até acharmos, por tentativas, a posição de equilíbrio estático. Conforme a figura 15 a seguir.

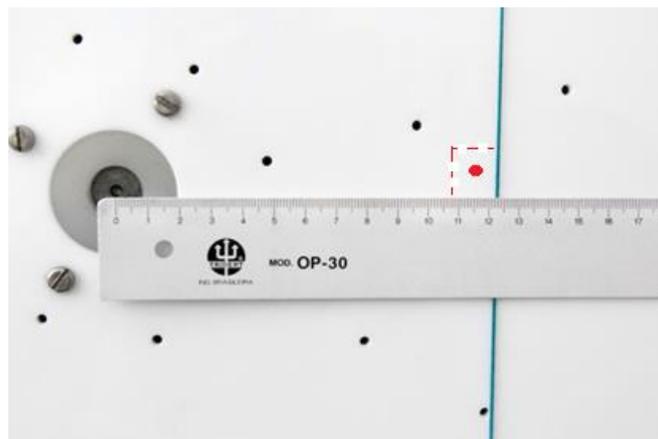


**Figura 15** Vista frontal do disco acrílico em equilíbrio estático submetido à ação do próprio peso, da força de contato no eixo e das trações. Vemos também os pesos em equilíbrio suspensos pelos fios.

Como sabemos, o braço de alavanca corresponde, por definição, à distância entre o eixo e a linha de ação da força em questão (para forças contidas num plano perpendicular ao eixo). Nesse caso, a linha de ação da tração possui a direção do fio, e está “materializada” pelo próprio fio. Na situação em questão, trata-se geometricamente do comprimento do segmento da perpendicular comum ao eixo e ao fio. Vemos então nas figuras 16 e 17 a seguir, a medida direta do braço de alavanca da tração utilizando-se para isso uma régua comum milimetrada.



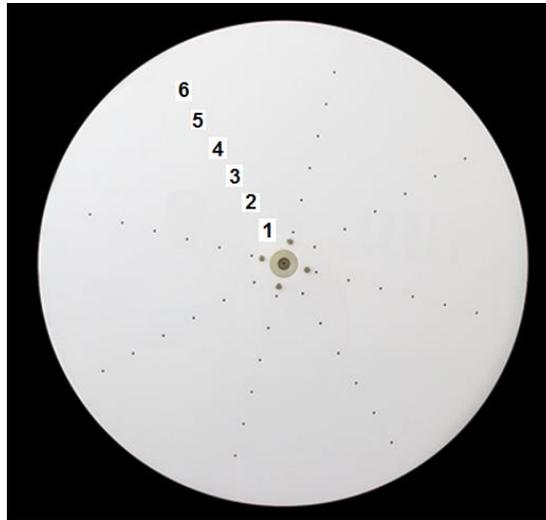
**Figura 16** Medição direta do braço de alavanca, utilizando-se uma régua milimetrada.



**Figura 17** Detalhe da medição do braço de alavanca..

Como há atrito no eixo, ou melhor dizendo, na junção eixo – base acrílica, este faz com que houvesse uma faixa angular correspondendo às posições de equilíbrio. Para tentarmos minimizar a influência do atrito, foi estimada uma posição central de equilíbrio. Para isso, foram observadas as posições extremas referentes ao equilíbrio. Foi considerado uma incerteza de 2 mm associada às medidas de cada braço de alavanca.

Os pontos correspondentes ao mesmo raio foram numerados de 1 (um) a 6 (seis), sendo o ponto 1(um) o ponto mais próximo do eixo de rotação e o ponto 6 (seis) o mais externo do eixo, conforme a figura 18 a seguir:



**Figura 18** Figura ilustrando o modo como foram numerados os pontos de aplicação das forças.

O ângulo entre os raios que contém os dois pontos do disco, pelos quais, foram suspensos os pesos, foi denominado ângulo central ( $\beta$ ).

Para exemplificar utilizemos a montagem à qual se refere figura 16:

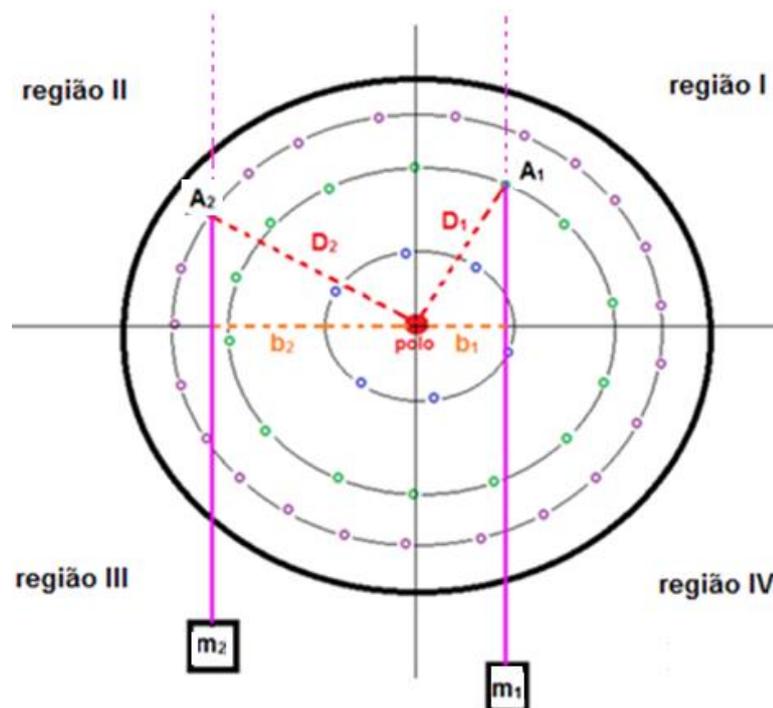
Temos, nesse caso, trações que apresentam tendências de giro opostas. A tração que correspondente à tendência de giro no sentido Anti-horário (A) atua no ponto 6 (seis), enquanto a tração correspondente à tendência de giro no sentido Horário (H) está atuando no ponto 5(cinco). O ângulo central nesse caso é de  $90^\circ$ .

## 1.2 Sequência didática

### Experimento 1

#### Objetivo:

Verificar que o fator geométrico determinante no momento de força não pode ser a distância entre o ponto de aplicação (A) da força e o eixo.



**Figura 19** Figura ilustrativa indicando os braços de alavanca e as distâncias entre os pontos de aplicação e o eixo, para cada tração atuante no disco.

Antes da realização deste experimento, sugiro que se faça uma discussão com os alunos a respeito da situação cotidiana da abertura de uma porta. Essa situação é, na minha opinião, muito bem abordada no livro *Compreendendo a física* [1] do autor Alberto Gaspar. Conforme comentamos anteriormente no capítulo 2 desta dissertação, é possível, a partir da análise dessa situação, a elaboração da hipótese do braço de alavanca ser o fator geométrico determinante na eficiência de uma força em produzir rotação; elaboração de hipótese esta que é, segundo Gil e Castro [2], um dos aspectos das atividades científicas que podem ser explorados nas atividades didáticas investigativas, pois ressaltam a importância das mesmas.

## Procedimento experimental :

**1.1.** Escolher pontos do disco para fixar os conjuntos (sistemas) fio/peso, sendo um sistema fixado na região **I** (que chamaremos de sistema **1**) e o outro (que chamaremos, então, de sistema **2**) na região **II**. Fazer um esquema no caderno.

**1.2.** Discutir a respeito das forças que atuam no disco, assim como a tendência de giro correspondente a cada força (tração) atuante (desprezando o atrito).

**1.3.** Segurando o disco para que não rotacione (caso a posição já não seja a de equilíbrio), identificar e medir as respectivas distâncias (**D**<sub>1</sub> e **D**<sub>2</sub>) entre os pontos de aplicações das forças exercidas pelo fio (tração) sobre o disco e o eixo e os correspondentes braços de alavancas (**b**<sub>1</sub> e **b**<sub>2</sub>) correspondentes às trações  $\vec{T}_1$  e  $\vec{T}_2$ , conforme a figura 19 anterior.

**1.4.** Mantendo **A**<sub>1</sub> na região **I** e **A**<sub>2</sub> na região **II**, girando o disco, procurar a posição de equilíbrio, **analisando qualitativamente /quantitativamente** as mudanças (caso haja) em **D** e/ou **b**, referentes a cada sistema fio/peso.

**1.5.** Verificando a existência de uma **única** posição de equilíbrio (nessas condições), e, levando em conta os valores de **D** e **b**: discutir com os alunos que podemos concluir disso?

Observação: Como os valores de **D** não mudam ao girar o disco, assim como não mudam as intensidades das trações. Caso a intensidade do momento de uma força dependesse somente de **F** e **D**, em termos lógicos: ou todas as posições seriam de equilíbrio, ou nenhuma posição seria de equilíbrio. Como só há uma única posição, conclui-se que a intensidade do momento de força não depende somente de **F** e **D**.

**1.6.** Verificado que o fator determinante para o momento de uma força pode ser o braço de alavanca, mas não a distância entre o ponto de aplicação da força e o eixo, cabe agora uma análise da dependência QUANTITATIVA da intensidade do momento em relação à intensidade da força (**F**) e ao braço (**b**) num outro experimento.

## Experimento 2

### Objetivo:

Obtenção da expressão da intensidade do momento de força ( $M = F \times b$ )

### Procedimento experimental :

**2.1.** Dispondo de um conjunto de massas conhecidas ( $m_1, m_2, m_3, m_4, \dots, m_n$ ): Colocar uma delas ( $m_i$ ) fixa a um ponto da região **I** e a outra ( $m_j$ ) fixa a um ponto da região **II**, para em seguida montar uma tabela indicando os valores das massas ( $m_i$  e  $m_j$ ) e os respectivos braços de alavanca ( $b_i$  e  $b_j$ ) em relação ao eixo, referentes a cada situação de equilíbrio.

Nesse caso, pode-se discutir com os alunos formas de apresentação dos dados.

### Observações:

- Uma sugestão de um procedimento um pouco mais direcionado é que: como estamos interessados em chegar à relação  $F_i \times b_i = F_j \times b_j$ , podemos não informar o valor das massas, mas sim a razão entre as mesmas, sendo de preferência razões simples como 2 : 1; 3 : 1 e 3 : 2, etc. Isso guiará de certo modo os estudantes a raciocinarem de maneira semelhante com relação aos braços de alavanca.

- Uma vez descoberta a relação  $M = F.b$ , podemos informar os valores das massas de modo que se obtenha as intensidades dos momentos.

**2.2.** Fazer a discussão das incertezas envolvidas.

**2.3.** Solicitar que os alunos façam o seguinte gráfico referente às posições de equilíbrio

$$M_{\text{Anti-horário}} \times M_{\text{Horário}}$$

**2.4.** Solicitar aos alunos que tentem chegar **por inspeção** a uma **relação quantitativa para o momento de força**.

Observação: Pode-se perguntar aos alunos caso se desejasse utilizar as regiões III e IV, determinar um procedimento para se medir os braços de alavanca correspondentes. Uma sugestão é a utilização dum fio de prumo, cuja direção passa pelo eixo.

### Experimento 3

#### **Objetivo:**

Verificação do princípio de superposição para momentos de forças.

#### **Procedimento experimental :**

**3.1.** Colocar agora, simultaneamente, três massas, e, novamente fixando-as nas regiões I e II ( $m_i$  e  $m_j$  na região I e  $m_k$  na região II, por exemplo). Procurar a situação de equilíbrio, registrando para cada massa, o braço de alavanca correspondente ( $b_i$ ,  $b_j$  e  $b_k$ , respectivamente).

**3.2.** Discutir qualitativamente (a tendência de giro referente a cada momento) e quantitativamente ( $M_i + M_j = M_k$ ) da situação física, ou seja, o princípio de superposição para momentos.

### Experimento 4

#### **Objetivo:**

Análise dos tipos de equilíbrio (estável, instável e indiferente) envolvendo um corpo rígido capaz de rotacionar em torno dum eixo fixo.

#### **Procedimento experimental:**

**4.1.** Utilizando duas massas conhecidas ( $m_i$  e  $m_j$ ) fixá-las a dois pontos do disco ( $A_i$  e  $A_j$ ) e, Girando o disco, achar a posição de equilíbrio, estando os pontos  $A_i$  na região I e  $A_j$  na região II.

**4.2.** Medir os respectivos braços ( $b_i$  e  $b_j$ ) referentes à posição de equilíbrio.

**4.3.** Causando um leve deslocamento angular do disco em relação à posição de equilíbrio, solicitar aos alunos que façam uma análise qualitativa referente à situação física. Fazer uma discussão do desequilíbrio devido às variações dos momentos (aumento de um e diminuição do outro), decorrentes das mudanças dos braços (aumento de um e diminuição do outro, respectivamente).

**4.4.** Notando que o momento resultante possui um efeito de giro no mesmo sentido do deslocamento angular inicial em relação à posição de equilíbrio, caracterizar a posição de EQUILÍBRIO INSTÁVEL.

**4.5.** Com as massas agora nas regiões III e IV, fazer procedimento semelhante, de modo a caracterizar a posição de EQUILÍBRIO ESTÁVEL.

**4.6.** Utilizando furos diametralmente opostos, de tal forma que  $D_i / D_j = m_j / m_i$ , fazer procedimento semelhante, de modo a caracterizar o EQUILÍBRIO INDIFERENTE.

### 3.3. Resultados experimentais

- Resultados correspondentes ao experimento 2.

T	P	F (gf) ± 2gf	b (mm) ± 4mm	M (gf x mm).10 <sup>3</sup>	δ M (gf x mm). 10 <sup>3</sup>	Δ M (gf x mm).10 <sup>3</sup>	E (%)	β (graus)
A1	3	970	55	53	4	3	5.7	45
H1	6	468	119	56	2			
A2	4	970	113	110	4	7	6.4	90
H2	6	468	250	117	2			
A3	6	468	273	128	2	7	5.8	90
H3	6	970	125	121	3			
A4	6	1460	146	213	6	3	1.4	90
H4	5	970	217	210	4			
A5	6	468	272	127	2	7	5.8	90
H5	6	1460	82	120	6			
A6	6	468	270	126	2	3	2.4	135
H6	3	1460	84	123	6			
A7	6	468	273	128	2	4	3.1	135
H7	3	970	136	132	4			
A8	3	1460	173	253	6	14	5.5	135
H8	6	970	275	267	4			
A9	5	468	204	95	2	3	3.2	90
H9	4	970	101	98	4			
A10	6	1460	68	99	6	8	8.1	90
H10	5	468	228	107	2			
A11	4	1460	159	232	6	5	2.2	135
H11	5	970	244	237	4			

**Tabela 1:** Dados correspondentes ao experimento 2.

#### Legenda para os símbolos utilizados na Tabela 1

T = Tendência de giro (A = Anti-horário; H = Horário).

P = Ponto.

F = Força (grama x força).

B = Braço de alavanca (milímetros).

M = Intensidade do Momento de força (grama. Força x milímetros).

δ M = Incerteza na intensidade do Momento de força (grama. Força x milímetros).

Δ M = Módulo da diferença entre as intensidades dos momentos Anti-horário (A) e Horário (H), ou seja,  $|M_A - M_H|$ .

E = Incerteza percentual.

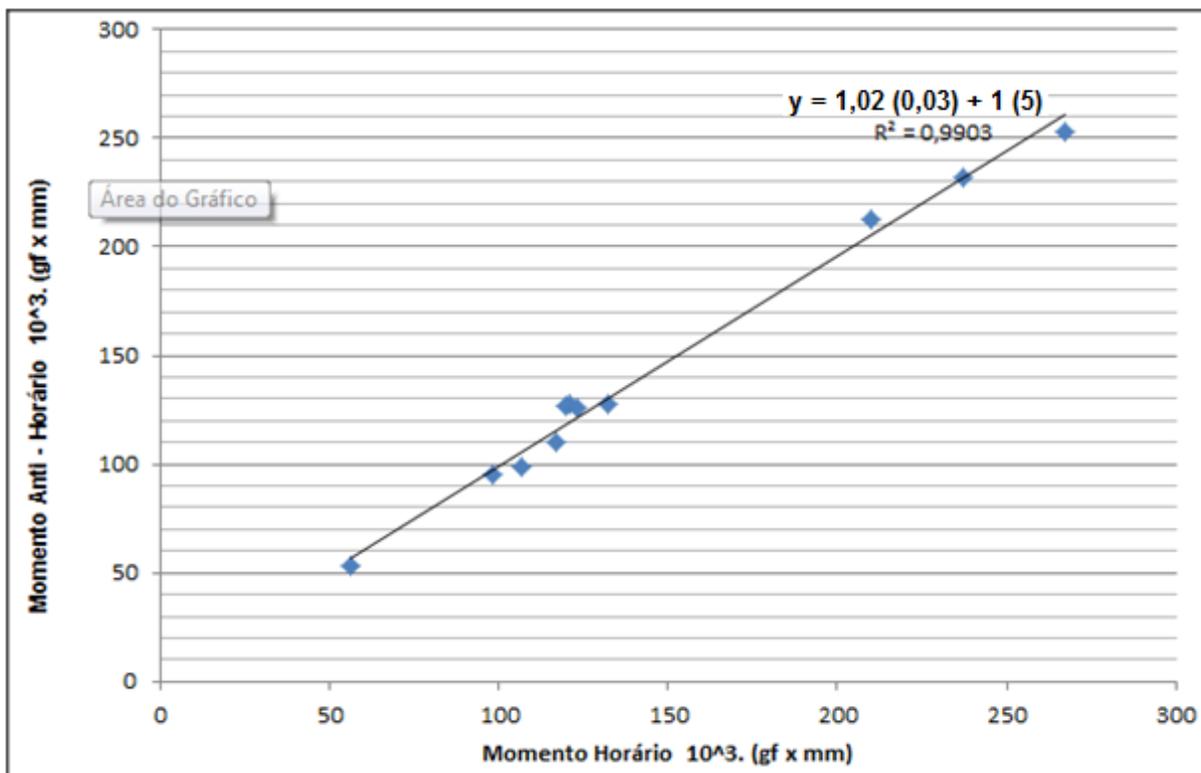
β = Ângulo central.

Tomando somente os valores das intensidades dos momentos anti-horário ( $M_A$ ) e horário ( $M_H$ ), com a finalidade de elaborar o gráfico  $M_A \times M_H$ , temos a tabela 2 a seguir.

A $10^3$ .(gf x mm)	H $10^3$ .(gf x mm)
56	53
117	110
121	128
210	213
120	127
123	126
132	128
267	253
98	95
107	99
237	232

**Tabela 2:** Dados correspondentes às intensidades dos momentos Anti-horário e Horário referentes ao experimento 2.

Vejam os então na figura 20 a seguir como ficou o gráfico  $M_A \times M_H$ , juntamente com a curva de tendência:



**Figura 20** Gráfico  $M_A \times M_H$  com a curva de tendência.

- Resultados referentes ao experimento 3.

T	P	F (gf) ± 2gf	b (mm) ± 4mm	M 10 <sup>3</sup> .(gf x mm)	δ M 10 <sup>3</sup> .(gf x mm)	Δ M 10 <sup>3</sup> .(gf x mm)	E (%)
A11	6	970	245	238	4	1	0.06
A12	3	468	32	15	2		
H1	6	1460	174	254	10		
A21	5	970	232	225	4	4	1.4
A22	6	468	161	75	2		
H2	6	1460	203	296	6		
A31	6	970	170	165	4	4	1.7
A32	4	468	114	53	2		
H3	6	1460	152	222	6		
A41	6	970	97	94	4	6	4.0
A42	4	468	130	61	2		
H4	5	1460	102	149	6		

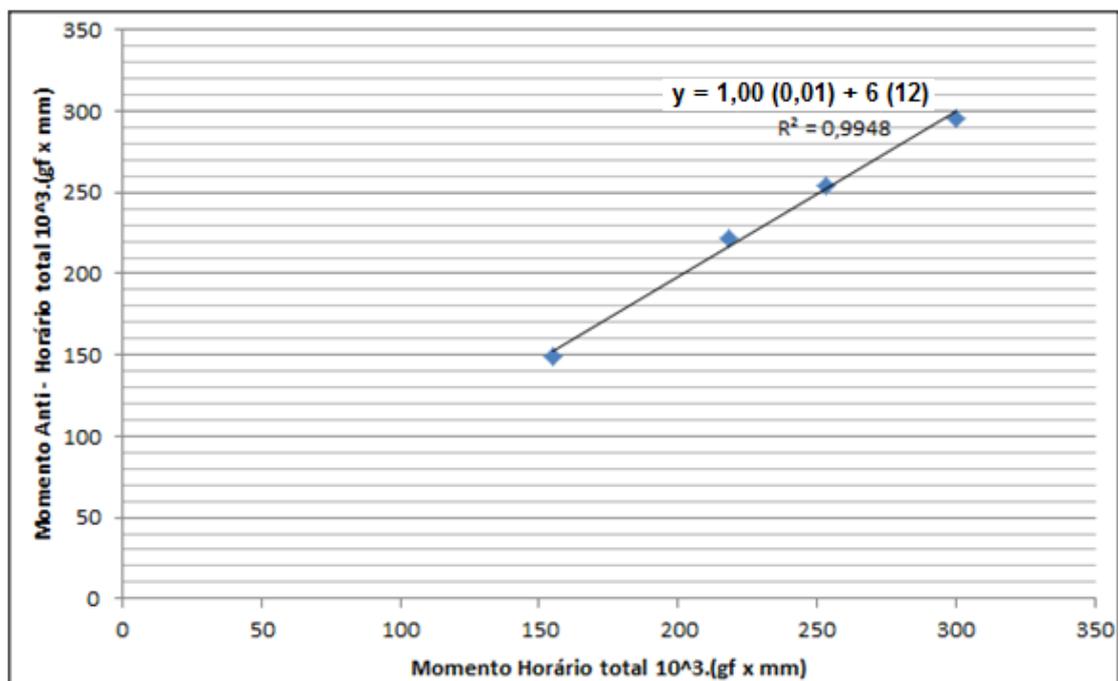
**Tabela 3** Dados relativos ao experimento 3.

Tomando somente os valores das intensidades dos momentos Anti – horário total ( $M_A$ ) e Horário ( $M_H$ ), com a finalidade de elaborar o gráfico  $M_A \times M_H$  referente ao princípio de superposição, temos a tabela 4 a seguir:

Momento Anti-horário total 10 <sup>3</sup> .(gfoxmm)	Momento Horário total 10 <sup>3</sup> .(gfoxmm)
155	149
218	222
253	254
300	296

**Tabela 4** Intensidades dos momentos Anti-horário total ( $M_A$ ) e Horário ( $M_H$ ), referentes ao princípio de superposição.

Vejamos na figura 21 a seguir como ficou o gráfico  $M_A \times M_H$ , juntamente com a curva de tendência:



**Figura 21** Gráfico  $M_A \times M_H$  com a curva de tendência, referente ao princípio de superposição.

- **Observações gerais e análise das incertezas.**

Observando os coeficientes angulares de 1,02(0,03) referente ao experimento 2 e de 1,01(0,01) referente ao experimento 3, e os valores de 0,9903 e 0,9948 para  $R^2$  dos gráficos correspondentes aos experimentos 2 e 3 respectivamente, notamos que os dados apresentam exatidão e precisão .

Como possíveis **incertezas aleatórias** inerentes a estes experimentos (mais especificamente aos experimentos 2 e 3) podemos citar:

- Foi utilizada como instrumento de medida direta do braço de alavanca uma régua milimetrada. Nesse caso, foi considerado um erro de paralaxe de 2 mm na medida de cada braço de alavanca, e, em vista do exposto no parágrafo anterior, temos um **incerteza total de 4 mm associada a cada braço de alavanca.**

- Para as **medidas das massas** foi utilizada uma balança graduada em gramas (g), com um **incerteza indicada pelo fabricante de 2 g.**

- O Momento (grandeza de saída) medido indiretamente é dado pelo produto  $F \times b$ , temos então como incerteza padrão:

$$\delta M = \sqrt{\left(\frac{\partial M}{\partial F}\right)^2 (\delta F)^2 + \left(\frac{\partial M}{\partial b}\right)^2 (\delta b)^2} = \sqrt{(b \delta F)^2 + (F \delta b)^2} \quad \text{eq 13;}$$

onde  $\delta f = 2 \text{ gf}$  e  $\delta b = 4 \text{ mm}$ .

Gostaria de salientar que: inicialmente a ideia de elaborar o aparato surgiu da necessidade de ter algo material para facilitar o entendimento por parte dos alunos a respeito dos conceitos de ponto de aplicação e linha de ação de uma força. Com esse propósito foram escolhidas trações como forças atuando no corpo rígido, pois as mesmas possuem muito claramente determinados o ponto de aplicação e a linha de ação. A tração tendo a direção do fio faz como que o mesmo sirva como “materializador” da linha de ação.

Passemos agora aos experimentos propriamente ditos: O experimento 2 nos proporciona uma maneira bastante simples de se verificar que a intensidade da grandeza momento de força em relação a um eixo é dada pelo produto da intensidade da força pelo braço de alavanca correspondente. A intensidade da força é conhecida pelo fato da tração estar equilibrando a força peso duma massa conhecida. Já o braço de alavanca é obtido por uma medida direta bastante simples. O raciocínio utilizado para inferir que a intensidade do momento de força é dado quantitativamente por  $F \cdot b$  é o seguinte: estando o corpo rígido em equilíbrio, os efeitos de rotação que as “duas” forças atuantes **tendem** a produzir devem se equilibrar, como podemos ver em Maia [3] (p.152). Num sentido mais restrito, podemos dizer que foi obtida o que poderíamos denominar **lei generalizada de equilíbrio de uma “alavanca”** (na situação de duas forças coplanares e ortogonais ao eixo).

$$(F_1 \cdot b_1)_{\text{Anti-horário}} = (F_2 \cdot b_2)_{\text{Horário}} \quad \text{eq 14}$$

Onde, o braço de alavanca (b) vem substituir a distância entre o ponto de aplicação e o eixo (D), como tradicionalmente enunciada, e, somente válida, para a situação bastante particular.

$$(F_1 \cdot D_1)_{\text{Anti-horário}} = (F_2 \cdot D_2)_{\text{Horário}} \quad \text{eq 15}$$

Falemos agora a respeito do experimento 3: o mesmo mostra claramente a validade do princípio de superposição para os momentos. Chegamos então à seguinte expressão para a **lei generalizada de equilíbrio de uma “alavanca”**

$$\sum M_{\text{Anti-horário}} = \sum M_{\text{Horário}} \quad \text{eq 16; onde } M = F \cdot b$$

O experimento 4 a respeito dos tipos de equilíbrio permite-nos tratar do importante conceito de **torque RESULTANTE restaurador**, conceito esse que, como comentamos no capítulo 2, só aparece nos livros didáticos numa situação bem particular de um corpo suspenso por um eixo horizontal sob ação “exclusiva” do próprio peso. Ou seja, situação de uma força somente (o peso) tendo torque associado.

Com relação ao roteiro aqui indicado, ele é somente uma sugestão. Nesse sentido, o que será abordado nos experimentos, assim como o grau de liberdade que será dado ao aluno, será uma escolha do docente, escolha essa que, como sabemos, depende de um número grande de variáveis, que, dentre as principais, está o tempo disponível. As atividades aqui sugeridas tanto podem ser desenvolvidas utilizando-se uma metodologia tradicional, como também, seguindo uma metodologia investigativa.

Serão agora apresentadas algumas observações úteis a respeito do material utilizado na construção do aparato experimental, assim como da sua construção propriamente dita: No que se refere ao disco de acrílico, acredito que o material utilizado poderia ser alumínio, por ser bastante leve e ter uma boa rigidez. O custo do disco acrílico foi (julho/ 2014) de R\$ 230,00. Quanto ao mecanismo de fixação do eixo, o mesmo poderia estar fixado a uma haste vertical e esta, estar fixada a uma mesa ou bancada através duma estrutura complementar conhecida como sargento. Uma observação muito importante a fazer com relação à segurança é: caso use os anzóis de pesca, não esquecer de cortar / lixar as pontas.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] **GASPAR**, A. Compreendendo a Física – vol 1, 1. ed. São Paulo, Ática, 2011.

[2] **GIL**, D. e **CASTRO V.**, P. La orientación de las prácticas de laboratorio como investigación; um ejemplo ilustrativo. *Enseñanza de las ciencias*. 14(2), p.155-163, 1996.

[3] **MAIA**, L.P.M. *Mecânica Vetorial*, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1984.