

Seletor de Velocidades,

Parte 2 – Movimento em Campo

Magnético

Aula 2

Prof. Henrique Barbosa

Edifício Basílio Jafet - Sala 100

Tel. 3091-6647

hbarbosa@if.usp.br

<http://www.fap.if.usp.br/~hbarbosa>

Lista de Discussão

- Lista geral de todas as turmas, professores e monitores:
 - Deve ser usada para tirar dúvidas, trocar experiências, comparar resultados, etc...
 - Os avisos gerais da disciplinas serão distribuídos por esta lista, por isso, assinem!

<http://groups.google.com/group/labflex>

- Lista da nossa turma:
 - Deve ser usada para me encontrar, discutir algo entre apenas entre a nossa turma (ex. projeto), etc...

<http://groups.google.com/group/lab-henrique>

TAREFAS SEMANA PASSADA



Exp. 2 – Seletor de Velocidades

PROGRAMAÇÃO

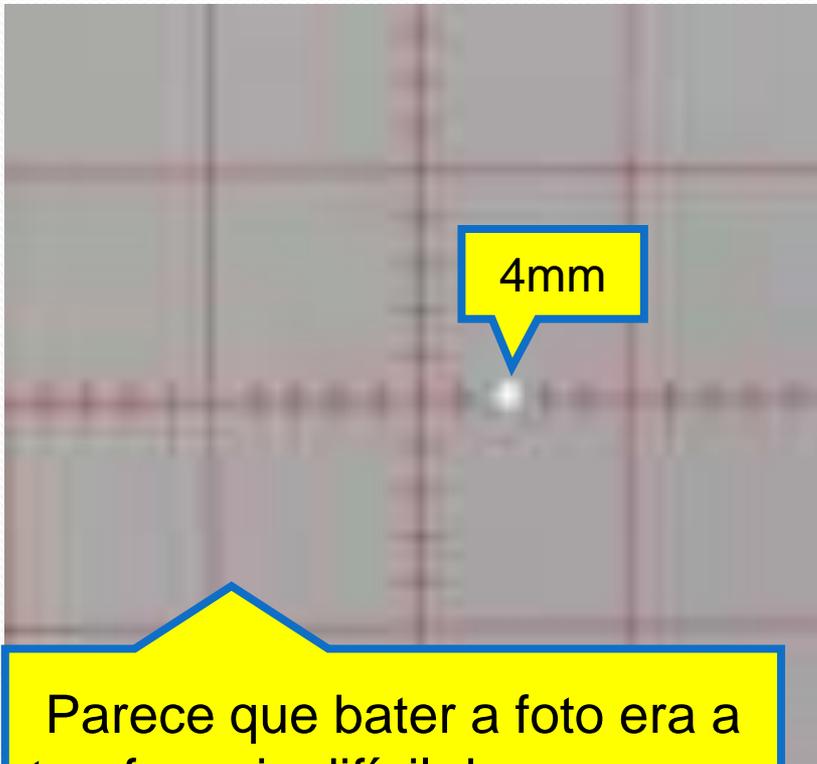
- Semana 1
 - Movimento em campo elétrico
- Semana 2
 - Movimento em campo magnético
- Semana 3
 - Simular o campo elétrico e mapear o campo elétrico
- Semana 4
 - Calibrar o seletor de velocidades
- Semana 5
 - Obter a resolução do seletor de velocidades

Para entregar, Parte 1

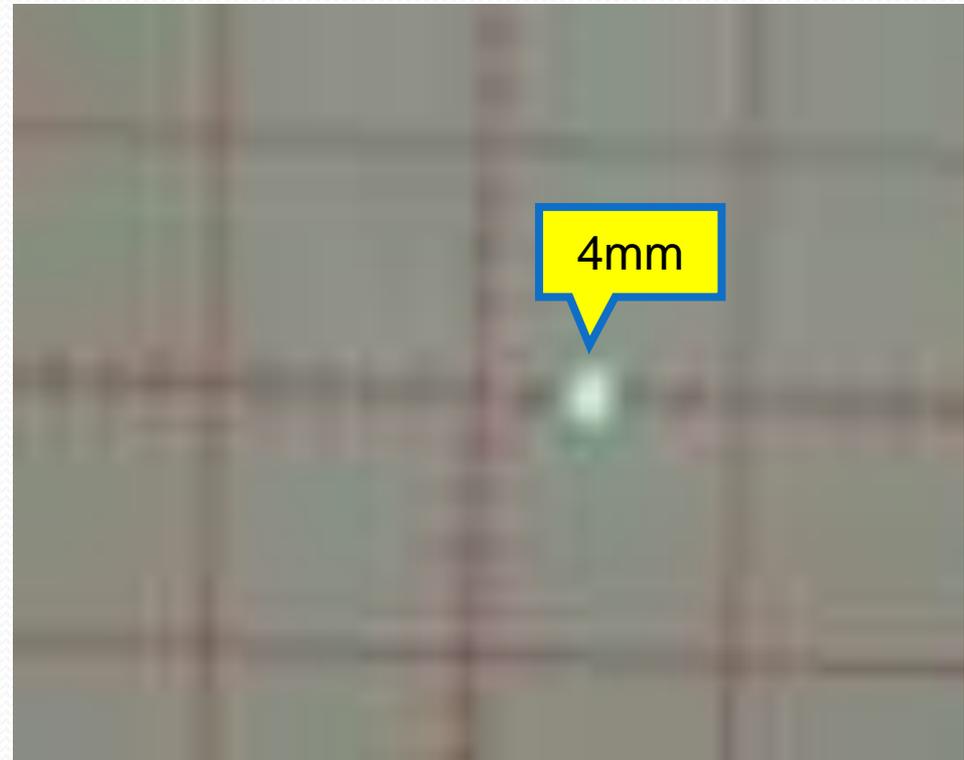
- Ligue o **TRC** e focalize o feixe na tela
 - Aplique uma tensão aceleradora **$V_{ac}=700V$**
 - Mexa no controles:
 - Foco
 - Intensidade
 - Tensão aceleradora (não passar de **$1000V$**)
 - Observe o que acontece com o feixe em cada caso e comente.
- Gire o **TRC** na mesa e observe o que acontece com o feixe
 - Procure fazer com que o feixe esteja focalizado e pelo menos sobre o eixo horizontal
- Nesta condição, aplique **$V_{ac}=700V$** , e defina a origem neste ponto e deixe o TRC fixo nesta posição da bancada (fotografe a tela do TRC)

Foto da Tela

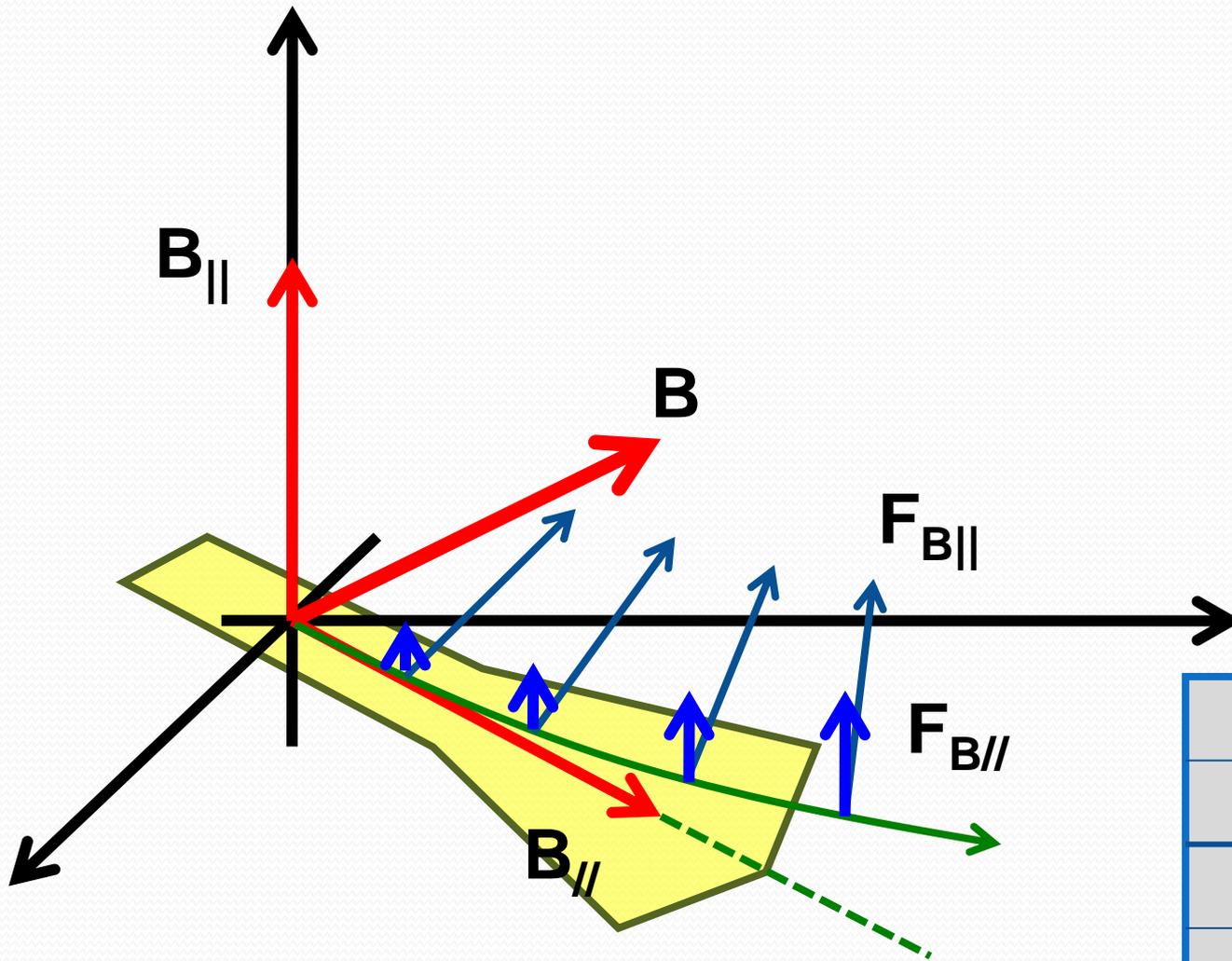
- Pedi explicitamente para fotografarem a tela do TRC depois de alinharem com o campo magnético da Terra.



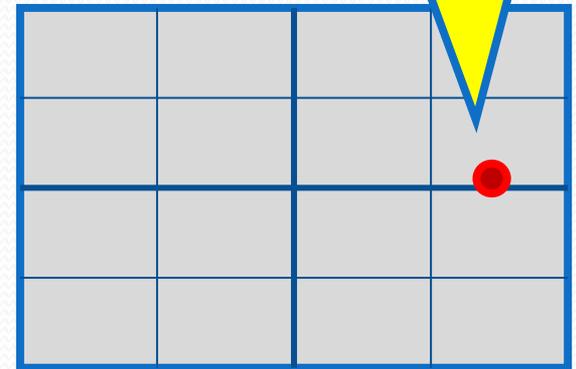
Parece que bater a foto era a tarefa mais difícil da semana...
Só 2 grupos fizeram!!



Campo magnético da Terra



Quase todo o deslocamento na horizontal



Campo magnético da Terra

- Velocidade da partícula

$$eU_{ac} = \frac{1}{2} m_e v^2 \quad v(700V) = \sqrt{\frac{2eU_{ac}}{m_e}} = 5.23\% \text{ luz}$$

- Impulso da força magnética aprox. constante:

$$|\vec{F}_B| \Delta t = evB\Delta t = eBL \equiv P_y$$

A intensidade total é 0.3 gauss

- A quantidade de movimento em y é aprox:

$$P_y \approx \frac{h}{L} P_x = \frac{h}{L} m_e v$$

$$B_{\parallel} \approx \frac{h m_e v}{L^2 e} = 0.05 \text{ gauss}$$



Parte 2, o campo elétrico

- Aplique tensão nas placas defletoras verticais (fonte externa **DC** de **30V**):
 - Mexa na tensão (ie na intensidade do campo elétrico) e verifique o que acontece com o feixe. Comente.
 - Anote a tensão máxima que o feixe ainda continua visível na tela do **TRC**.
- A seguir desligue as placas e observe se o feixe continua focalizado e na origem.

Tensão máxima

Tensão máxima para ponto na tela

H1		H9	
H2		H10	
H3		H11	13.5 V
H4	19V	H12	
H5		H13	
H6		H14	
H7		H15	16.06 (9)
H8	15.4 V e 18.3V		

Apenas 3 grupos fizeram e apenas 1 colocou a incerteza na tensão!

Uma grandeza sem incerteza não tem significado físico!

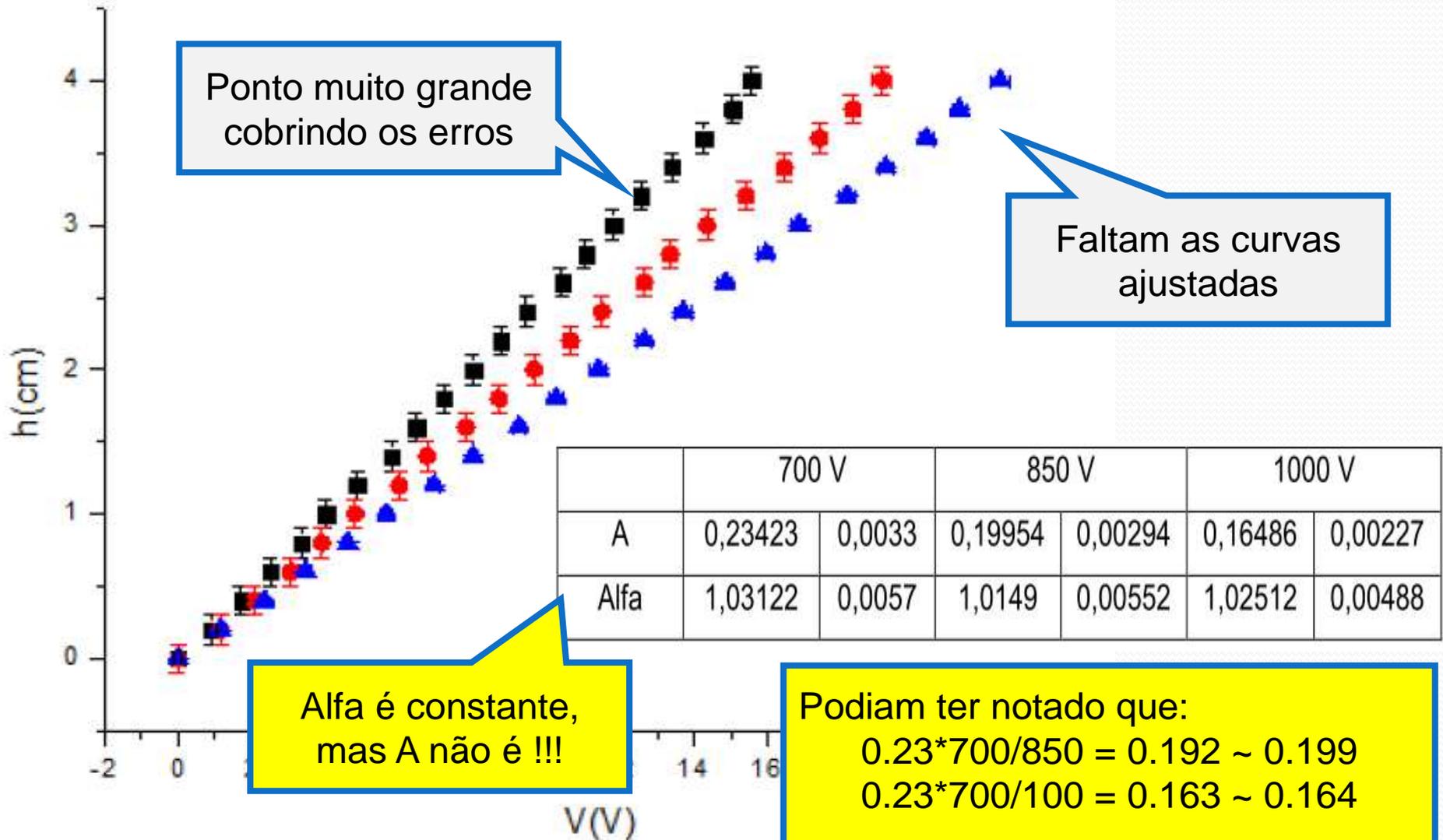
Parte 3, deslocamento x V_p

- Medir h em função de V_p para U_{ac} fixo ($=v_{0x}$ fixo).
- Qual é a dependência funcional? Comece testando uma possibilidade simples:

$$h = AV_p^\alpha$$

- Fazer um gráfico de V_p em função de h para U_{ac} fixo que permita descobrir se a dependência funcional acima é adequada
 - Se for obtenha o expoente alfa. Compare com os valores obtidos por seus colegas
 - **Importante:** a grandeza fixa deve ser escolhida de modo a permitir o maior número possível de pontos medidos.

Boa análise – h02



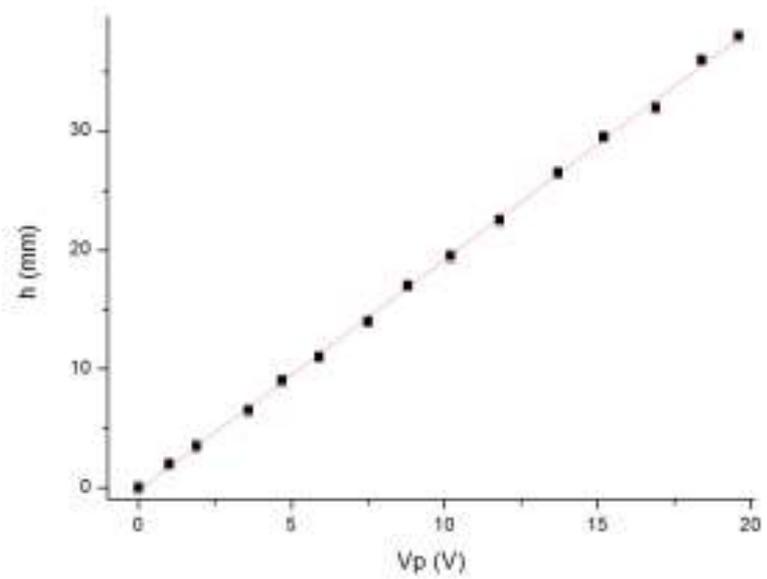
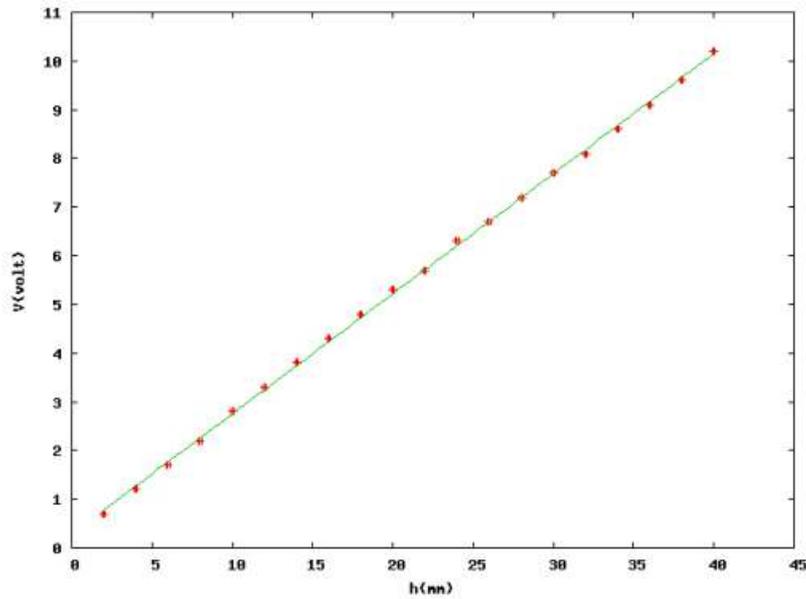
Podiam ter notado que:

$$0.23 \cdot 700 / 850 = 0.192 \sim 0.199$$

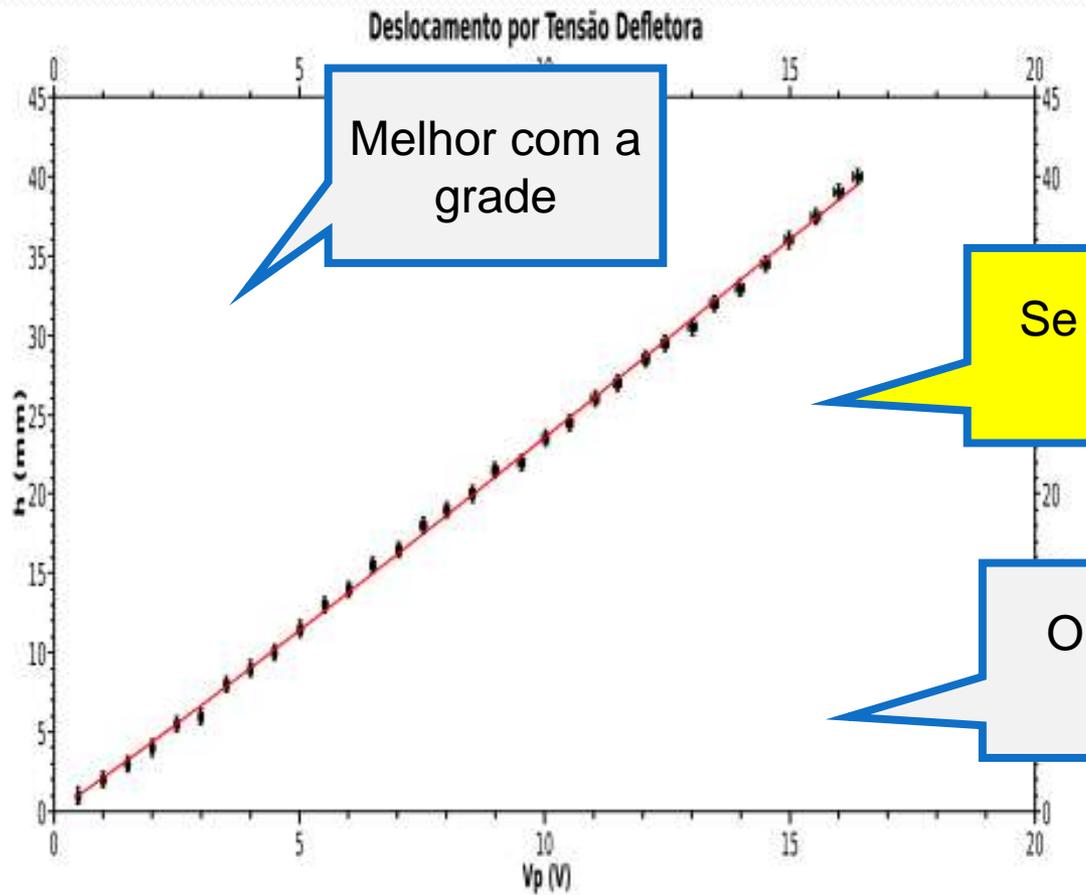
$$0.23 \cdot 700 / 100 = 0.163 \sim 0.164$$

Constante A parece variar com $1/V_{ac}$

Outros resultados



Erros 1 – linear mas $\alpha \neq 1$



Se o gráfico é linear, como é possível $\alpha=1.48$??

O resultado do ajuste devia estar dentro do gráfico

Para o primeiro gráfico foi buscada uma relação do tipo $h = AV_p^\alpha$ e foi encontrado α como $1,408 \pm 0,007$ pois o gráfico apresenta uma configuração linear. Já

Erros 2 – Tabela + Gráfico

Tabela 1. Valores medidos da altura H e da tensão entre as placas V_p com tensão geradora $U_{ac} = 700V$ constante.

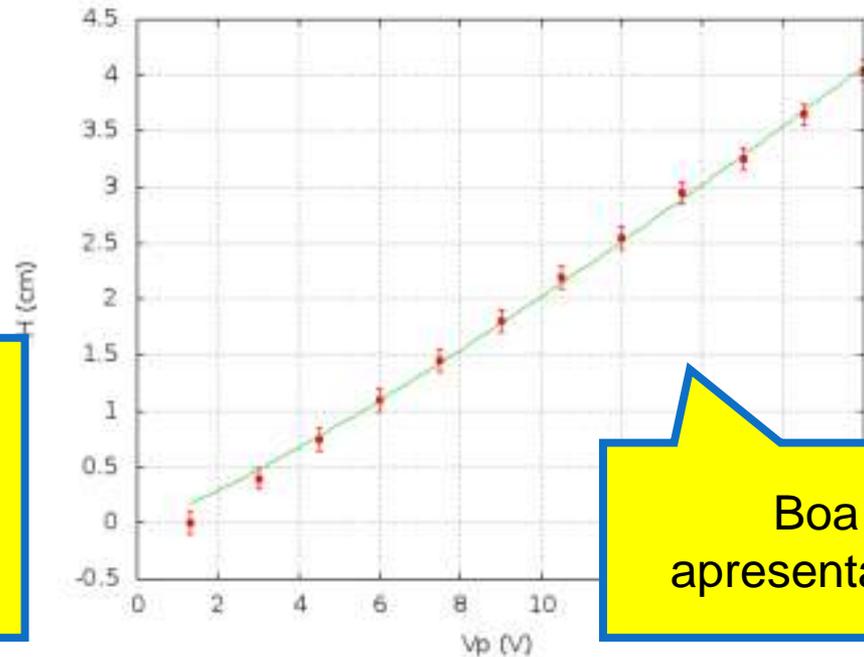
$V_p(V)$	$H(cm)$
1.3 ± 0.1	0.2 ± 0.1
3.0 ± 0.1	0.4 ± 0.1
4.5 ± 0.1	0.8 ± 0.1
6.0 ± 0.1	1.1 ± 0.1
7.5 ± 0.1	1.4 ± 0.1
9.0 ± 0.1	1.8 ± 0.1
10.5 ± 0.1	2.2 ± 0.1
12.0 ± 0.1	2.6 ± 0.1
13.5 ± 0.1	3.0 ± 0.1
15.0 ± 0.1	3.2 ± 0.1
16.5 ± 0.1	3.6 ± 0.1
18.0 ± 0.1	4.0 ± 0.1

$$A = 0.13084 \pm 0.01032$$

$$\alpha = 1.19498 \pm 0.02975$$

$$\text{chi quadrado reduzido} = 0.52743$$

$$R^2 = 0.99702$$



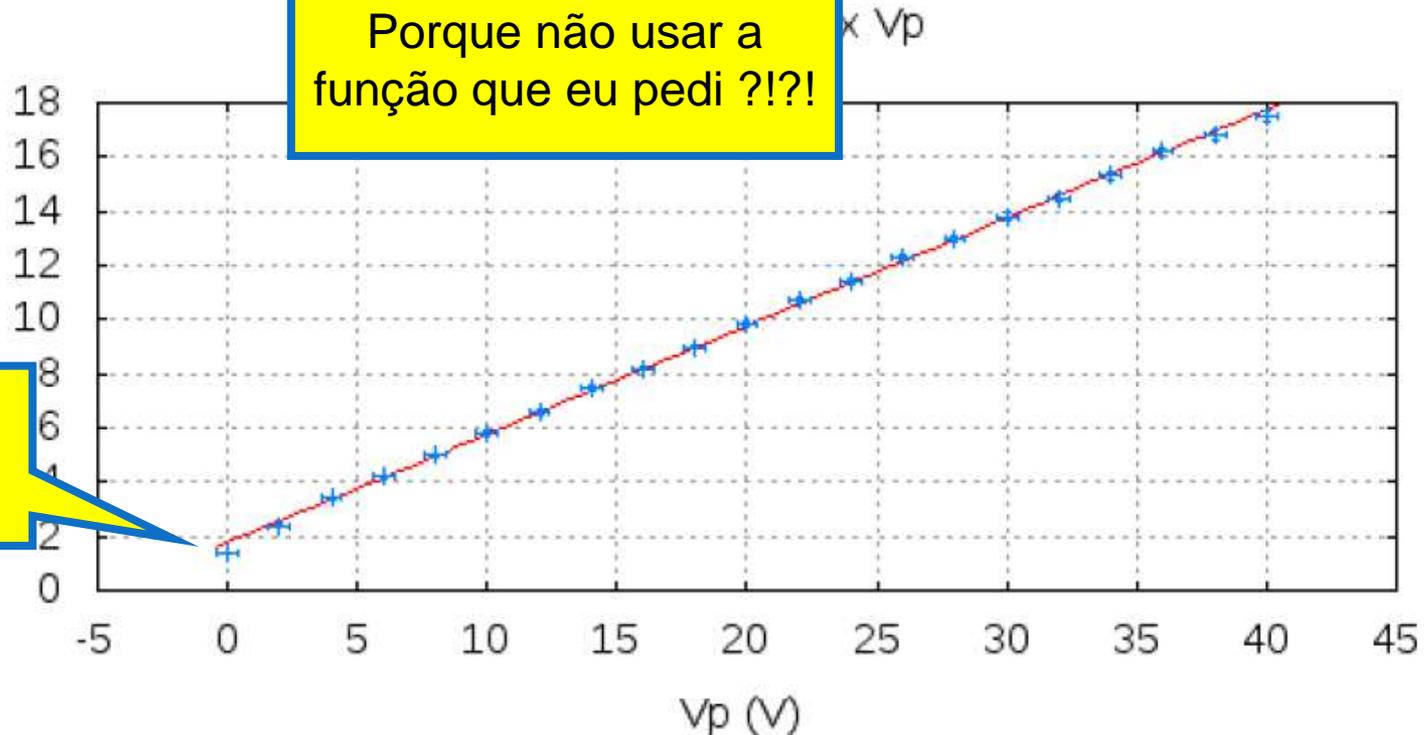
Erro com 4 algarismos significativos ??

Usamos uma tabela, quando não vamos colocar os pontos em um gráfico... Não era o caso.

Boa apresentação

Erro 3 – Ajuste linear

A seguir o deslocamento do feixe na vertical em função da voltagem das placas defletoras foi medido, com U_{ac} ainda fixo em 700(7)V. Os dados foram ajustados com uma função linear, tal que $h(V_p) = a \cdot x + b$, com $a = 0.3998(23)$ e $b = 1.754(55)$, pois o ajuste exponencial simples teve tendência residual. Dados e função ajustada estão na figura 1.



Erro 4

Gráfico 1: gráfico de h x V_p com os dados obtidos no laboratório, tendo h uma incerteza de 0,8mm e a incerteza de V_p calculada da seguinte forma: $[(\text{valor medido}) \cdot 0,005] + 0,01$, seguindo o manual do multímetro (ligado a uma fonte DC de 30V (FA3003)).

Pra que mostrar o gráfico com e sem o ajuste ???

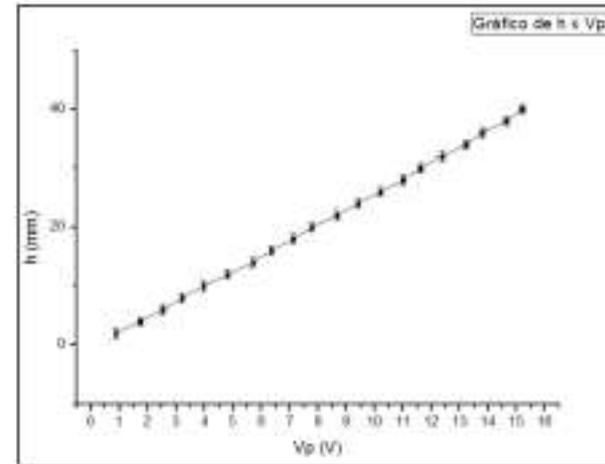
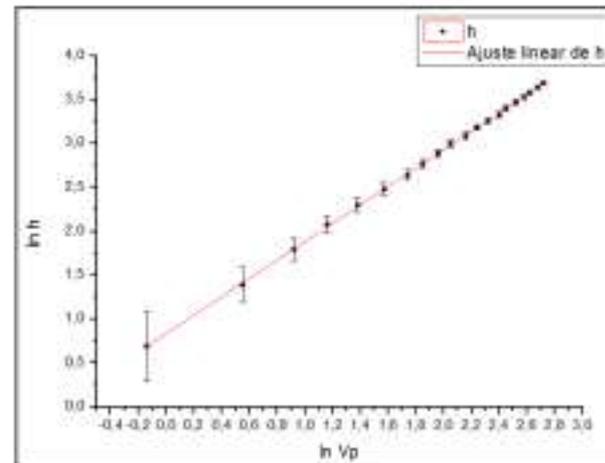


Gráfico 2: função ajuste linear $\ln(h)$ x $\ln(V_p)$, com suas respectivas incertezas propagadas.



Erro 5 - Incertezas

- Não deviam confiar nem na fonte DC e nem na caixa de controle do TRC. Todos os valores de tensão, resistência, corrente, etc... Deviam ser medidos diretamente com o multímetro!

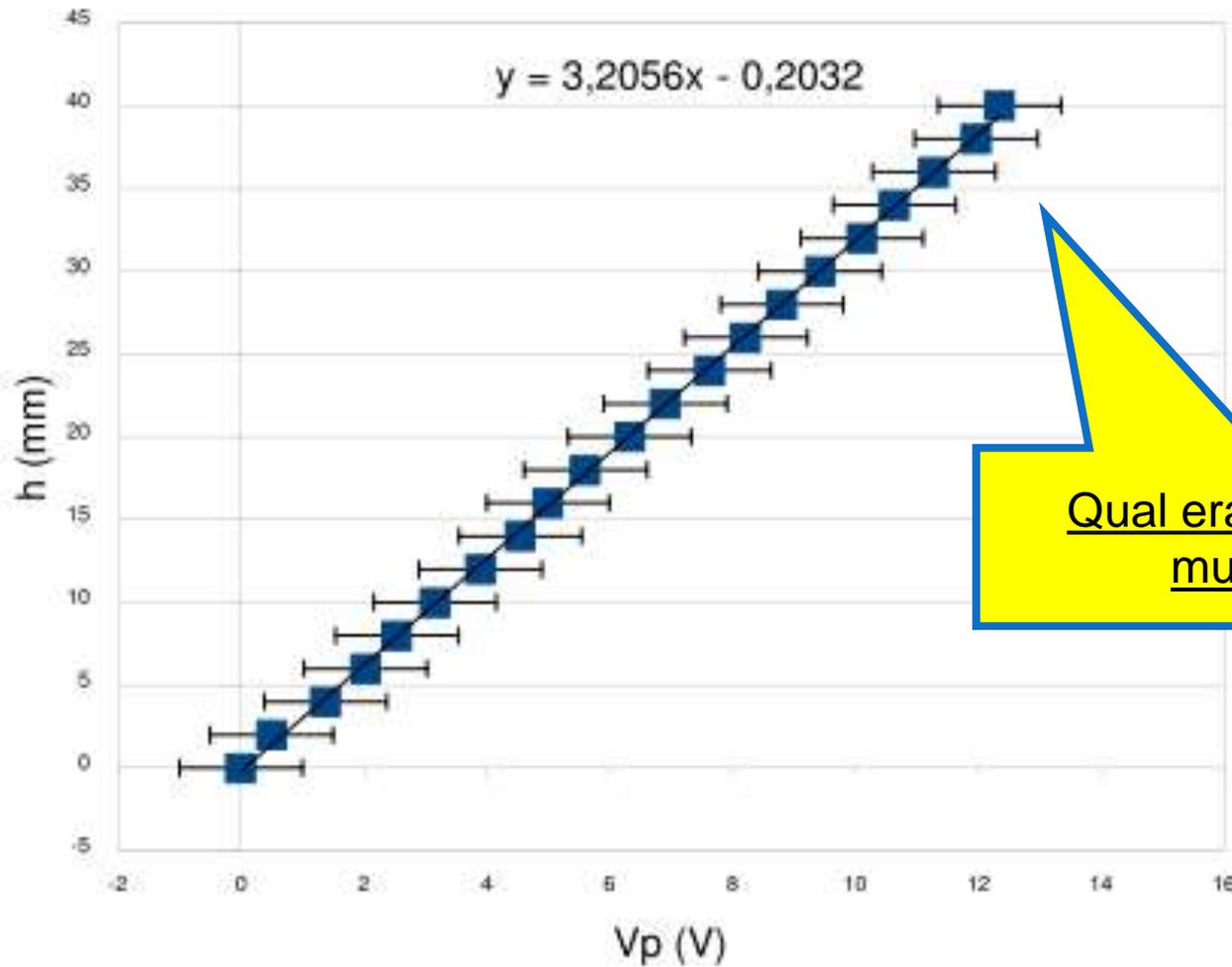
Foram efetuadas duas medidas para cada altura. Como não tínhamos o erro instrumental para a caixa de controle do TRC, o único erro utilizado foi o desvio padrão amostral. Posteriormente, foi feito um ajuste linear (tabela 1).

Equation	$y = a + b*x$		
Adj. R-Square	0,99957		
		Value	Stand.
	Intercept	0,23711	0,04615
	Slope	4,04662	0,01926

Tabela 1: Ajuste linear para o gráfico 1.

Além disso usaram uma função linear ao invés de encontrar o valor de alfa!

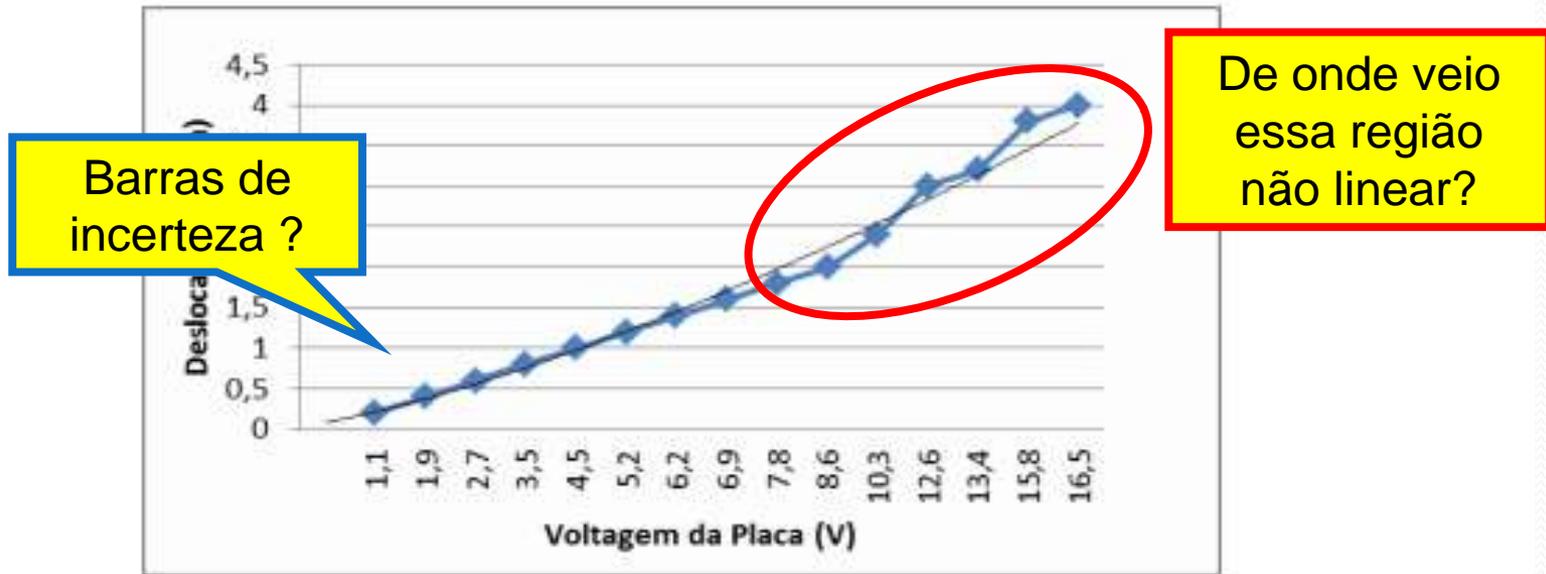
Erro 6 - Incertezas



Qual era a incerteza do multímetro ??

Gráfico 1 – Variação de h por V_p

Erro 7- Qualidade dos dados



A linha mais grossa corresponde aos dados obtidos e a mais fina o ajuste da reta feita pelo programa Excel 2010.

De acordo com o Excel 2010, obtemos para (1) $C=0,08$; $a=1,37$.

Melhor não usar o Excell...

Incerteza ?

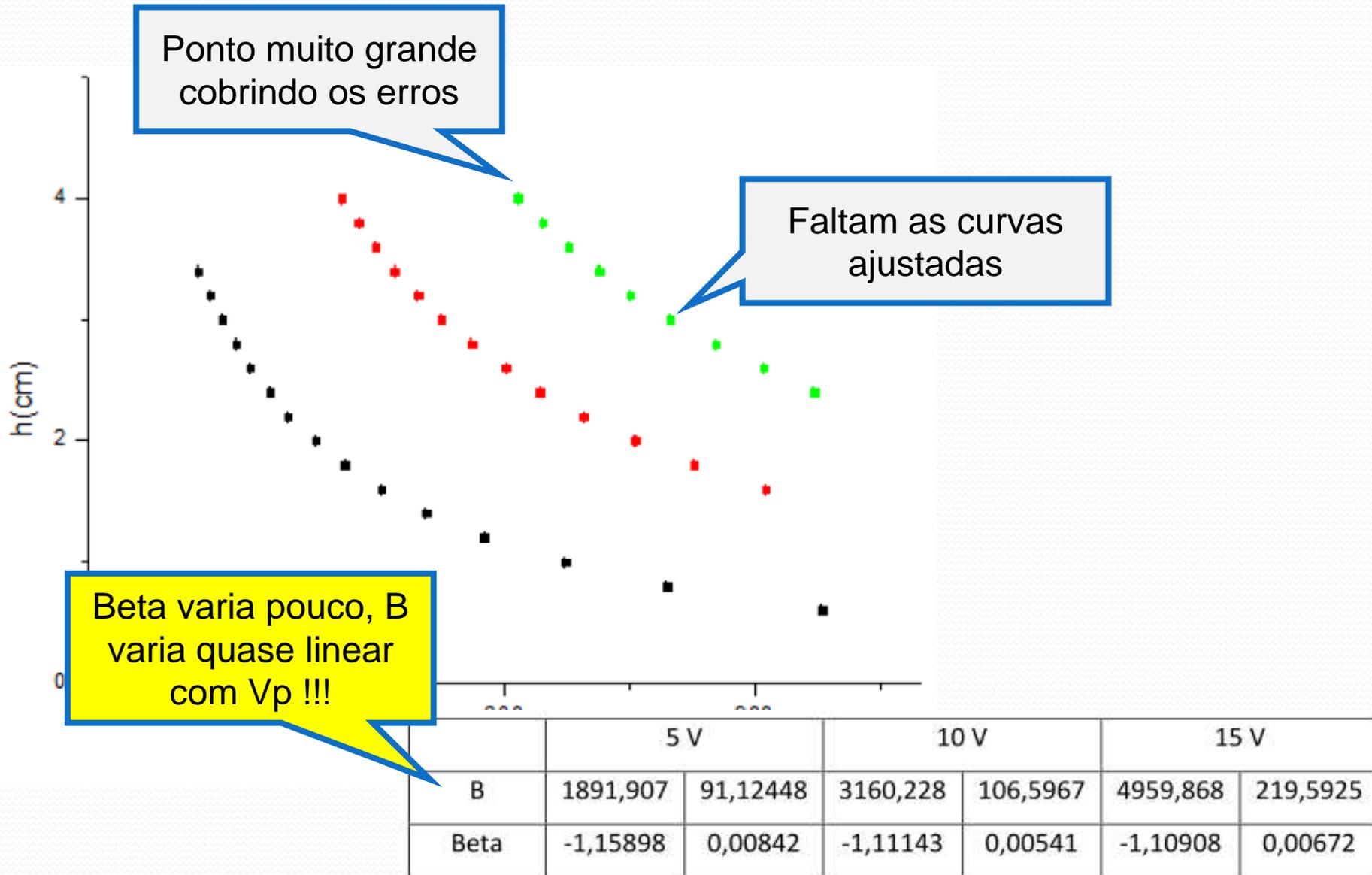
Dependência com Vp

	α		α
H1	1.408 (7)	H9	1.02 (4)
H2	1.03122(57)	H10	1.37
H3	1.19498 (2975)	H11	Linear
H4	Linear	H12	n/a
H5	1.05000 (574)	H13	1.0260 (??)
H6	Linear	H14	n/a
H7	Linear	H15	Linear
H8	Linear		

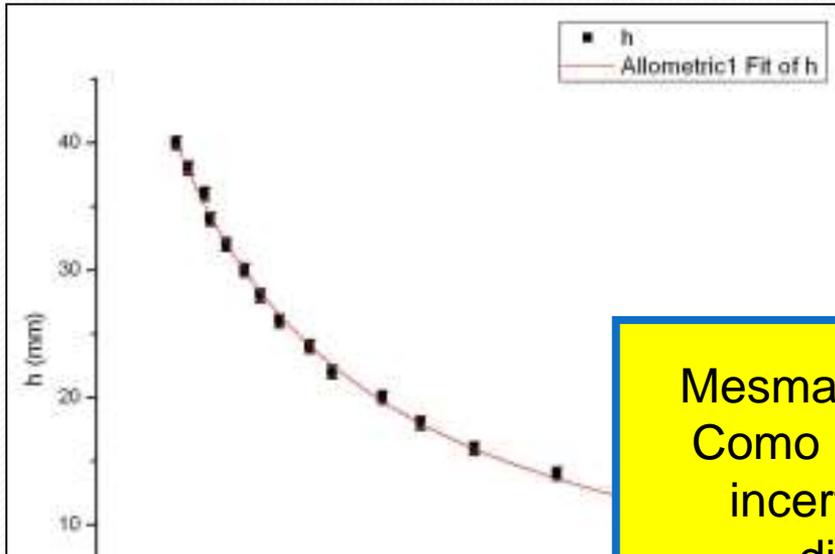
Parte 4, deslocamento x Vac

- Medir h em função de U_{ac} para V_p fixo.
- Qual é a dependência funcional? Comece testando uma possibilidade simples:
$$h = BU_{ac}^{\beta}$$
- Fazer um gráfico de h em função de U_{ac} para V_p fixo que permita descobrir se a dependência funcional acima é adequada
 - Se for obtenha o expoente beta. Compare com os valores obtidos por seus colegas
 - **Importante:** a grandeza fixa deve ser escolhida de modo a permitir o maior número possível de pontos medidos.

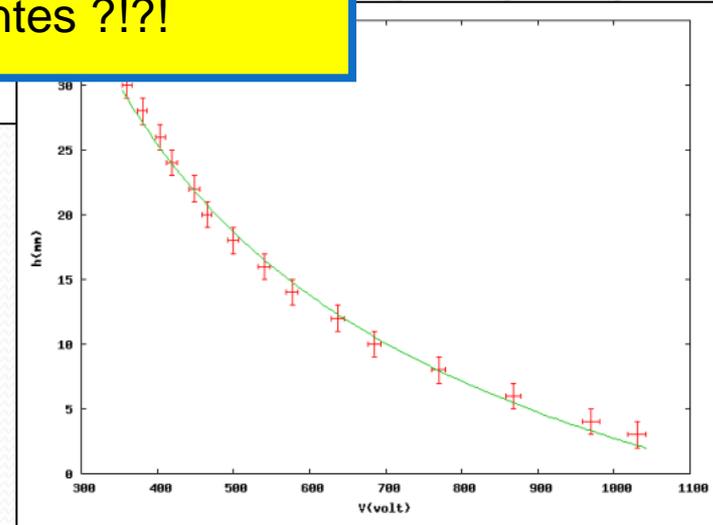
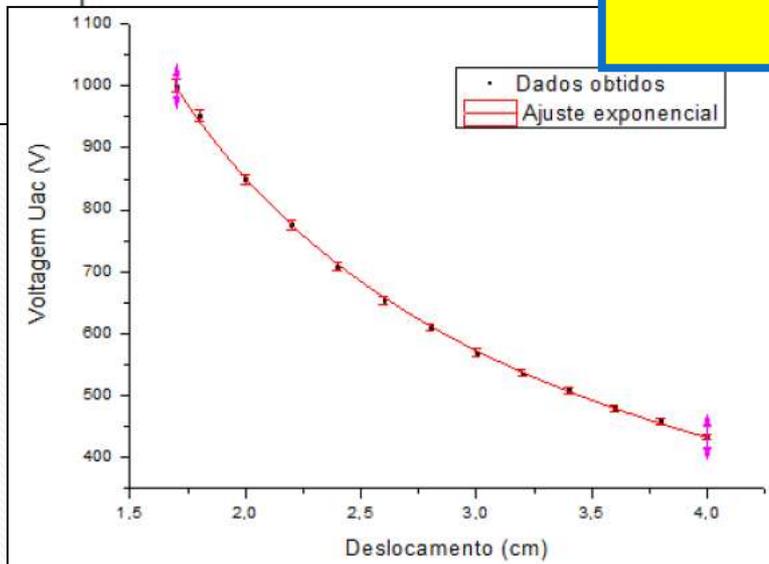
Boa análise – h02



Outros resultados



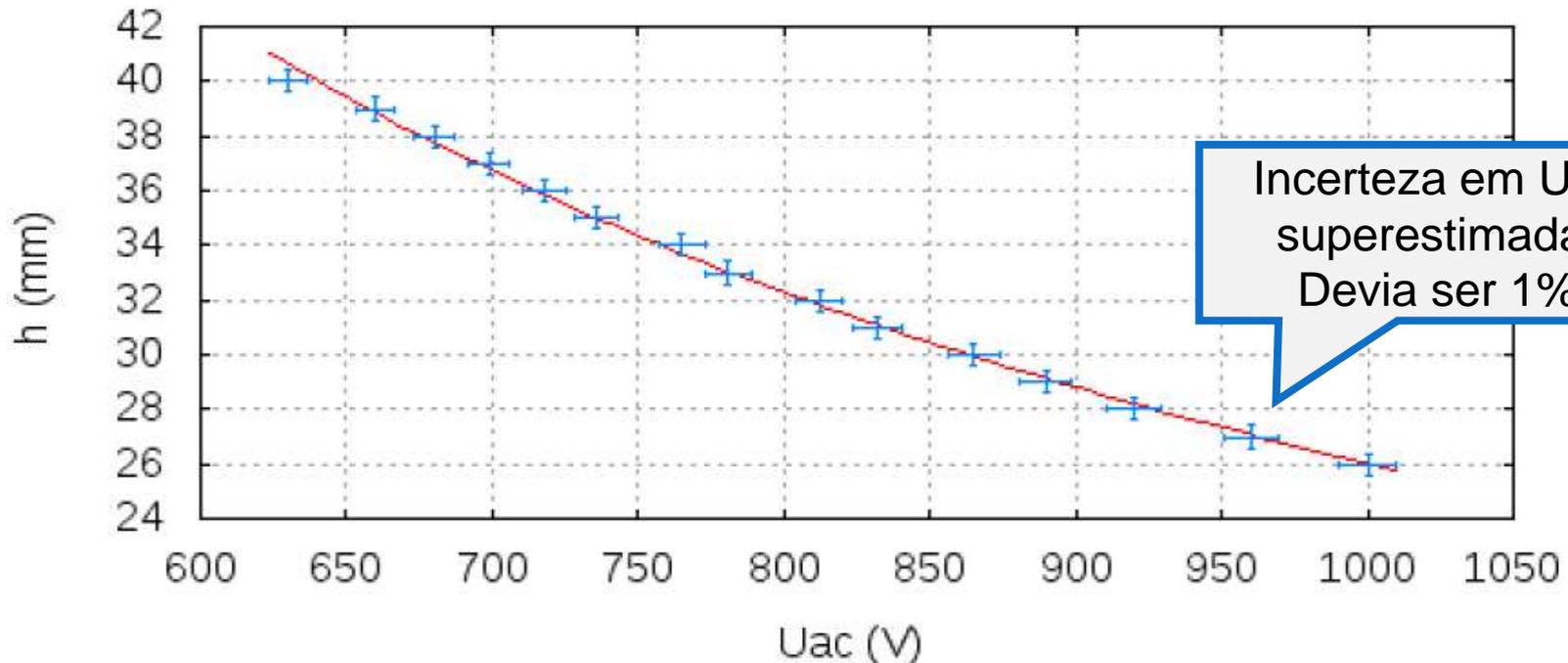
Mesma instrumentação...
Como é possível que as
incertezas sejam tão
diferentes ?!?!



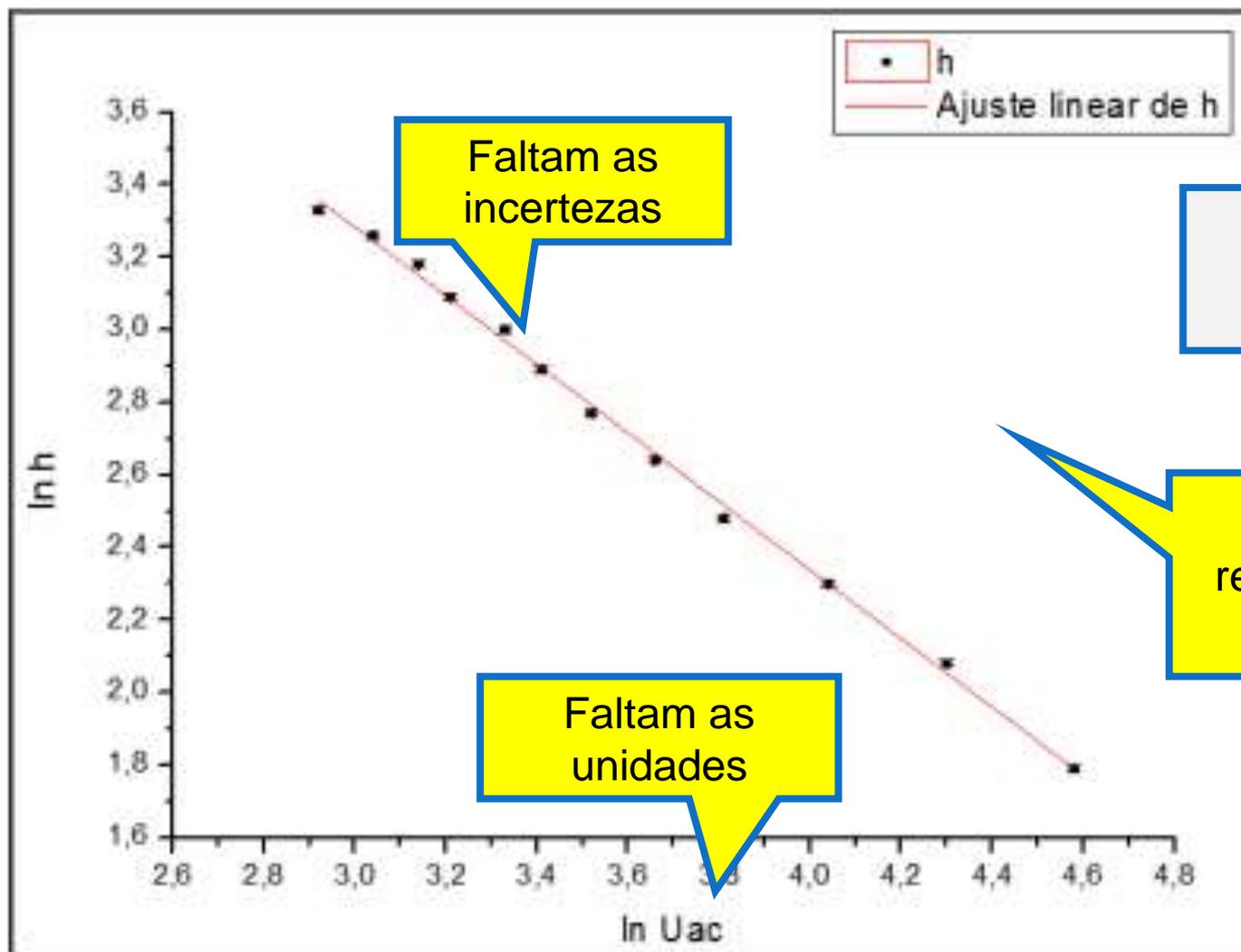
Erros 1 – Incertezas

A outra rodada de medidas teve V_p fixo em 15.0(1)V, e foi medida a altura variando agora a U_{ac} . Desta vez a **função exponencial** foi melhor ajustada aos dados, tal que $h(U_{ac}) = a \cdot (x^b)$, com $a = 20300(1900)$ e $b = -0.964(14)$.

Deslocamento x U_{ac}



Erros 2 - Apresentação

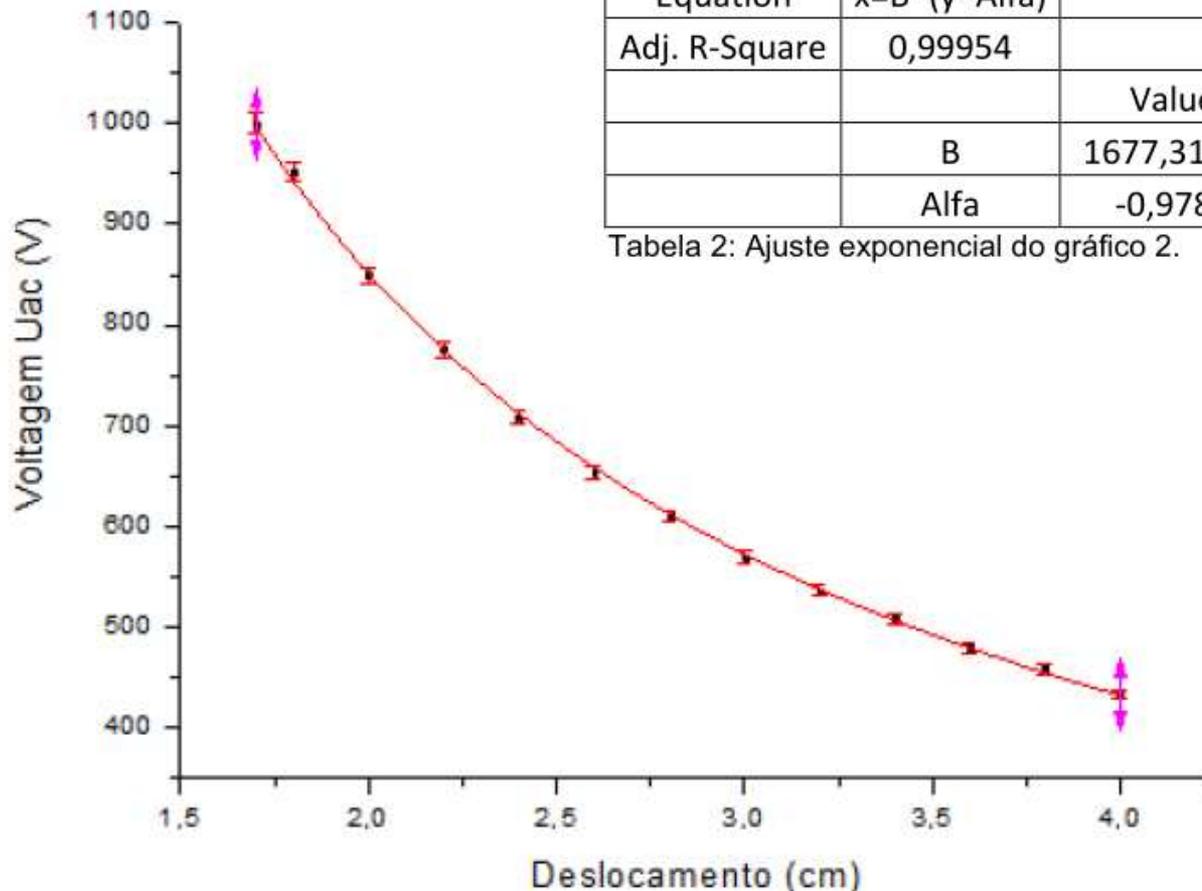


Erros 3 – Resultado do ajuste

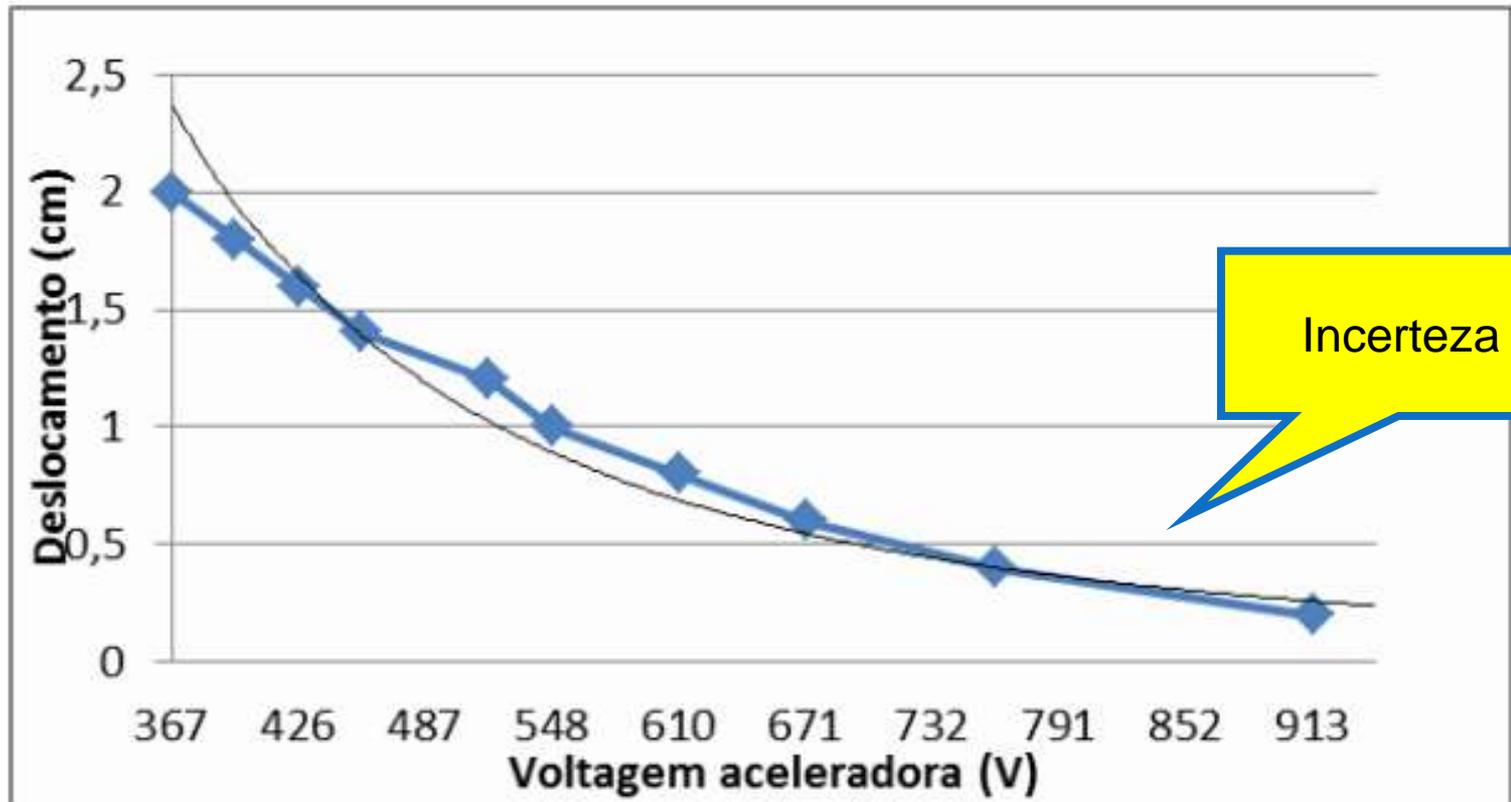
Incerteza ??
Unidades ??

Equation	$x=B*(y^{\text{Alfa}})$	
Adj. R-Square	0,99954	
		Value
	B	1677,31601
	Alfa	-0,9787

Tabela 2: Ajuste exponencial do gráfico 2.



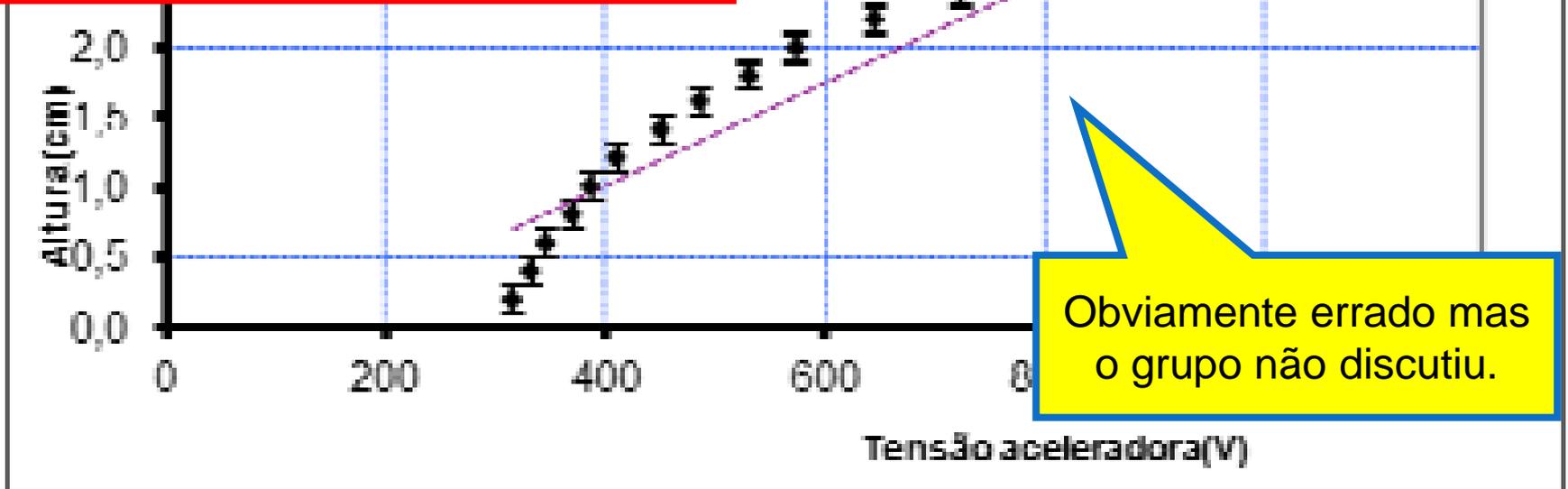
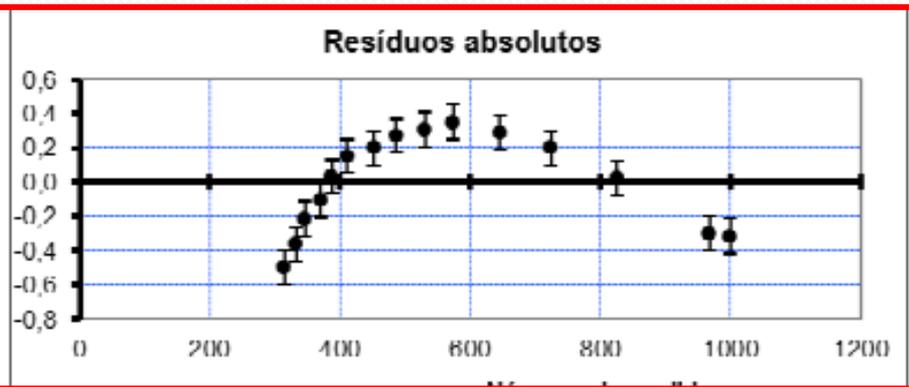
Erro 4 - Qualidade dos dados



Incerteza ??

Erro 5 – Função ajustada

Assim, os valores encontrados para α e β foram: 1,0260 e 4,9134; r



Dependência com Vac

	β		β
H1	-1.07 (1)	H9	-0.945 (21)
H2	-1.11143 (541)	H10	-2.44
H3	-1.08808 (1997)	H11	-1.071 (??)
H4	-0.964 (14)	H12	n/a
H5	-0.95 (14)	H13	4.9134
H6	-0.9787 (??)	H14	n/a
H7	n/a	H15	n/a
H8	-0.6240 (1612)		

Coeficientes esperados

A energia dos elétrons ao sair da fonte é muito menos que a adquirida na aceleração, de forma que será desprezada. Temos então

$$\frac{1}{2}mv_x^2 = U_{ac} \leftrightarrow v_x = \sqrt{\frac{2}{m}U_{ac}}$$

Se as placas de deflexão possuem comprimento L , o tempo que o feixe estará sujeito ao campo elétrico será

$$t = \frac{L}{v_x}$$

e a velocidade vertical adquirida será

$$v_y = at = \frac{F}{m}t \leftrightarrow v_y = \frac{qEL}{m} \sqrt{\frac{m}{2U_{ac}}}$$

supondo que o campo defletor é uniforme. O ângulo de saída θ terá tangente

$$\tan \theta = \frac{v_y}{v_x} = \frac{qEL}{m} \frac{m}{2U_{ac}}$$

Se o feixe percorreu uma distância horizontal M após passar pela deflexão, o desvio vertical será

$$h = M \tan \theta = \frac{qELM}{2} \frac{1}{U_{ac}}$$

$$h = \frac{qELM}{2} \frac{V_p}{U_{ac}}$$

Exp. 2 – Seletor de Velocidades

PROGRAMAÇÃO

- Semana 1
 - Movimento em campo elétrico
- Semana 2
 - Movimento em campo magnético
- Semana 3
 - Simular o campo elétrico e mapear o campo elétrico
- Semana 4
 - Calibrar o seletor de velocidades
- Semana 5
 - Obter a resolução do seletor de velocidades

A proposta para hoje

1. Revisão sobre resistência, corrente e potencial
 1. Voltímetros e amperímetros => multímetros
2. Medir como o deslocamento dos elétrons na tela depende:
 1. da energia dos elétrons e
 2. da corrente nas bobina
3. Dicas



1. Revisão Eletricidade

Resistência elétrica

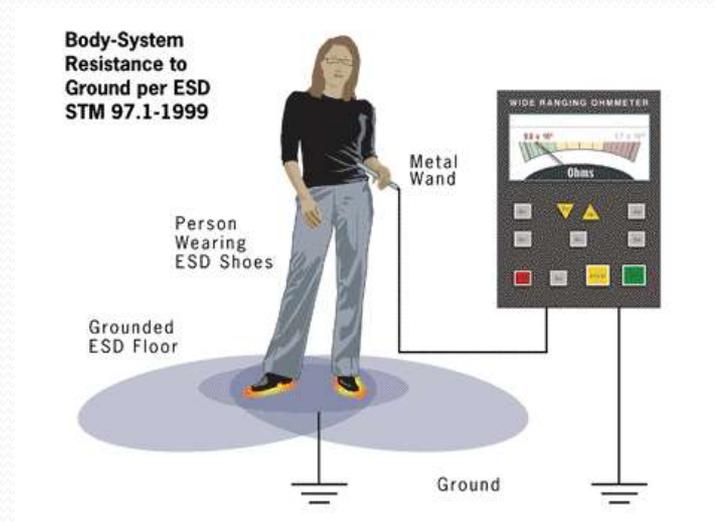
- Resistência: é a propriedade física que define a facilidade que um material oferece à passagem da corrente.
- Exemplos:



Infrared heating element heats objects, not air.



Electric Radiant (Infrared) Heater



- Materiais bons condutores de corrente → resistência baixa
- Materiais maus condutores de corrente → resistência alta

Resistência elétrica

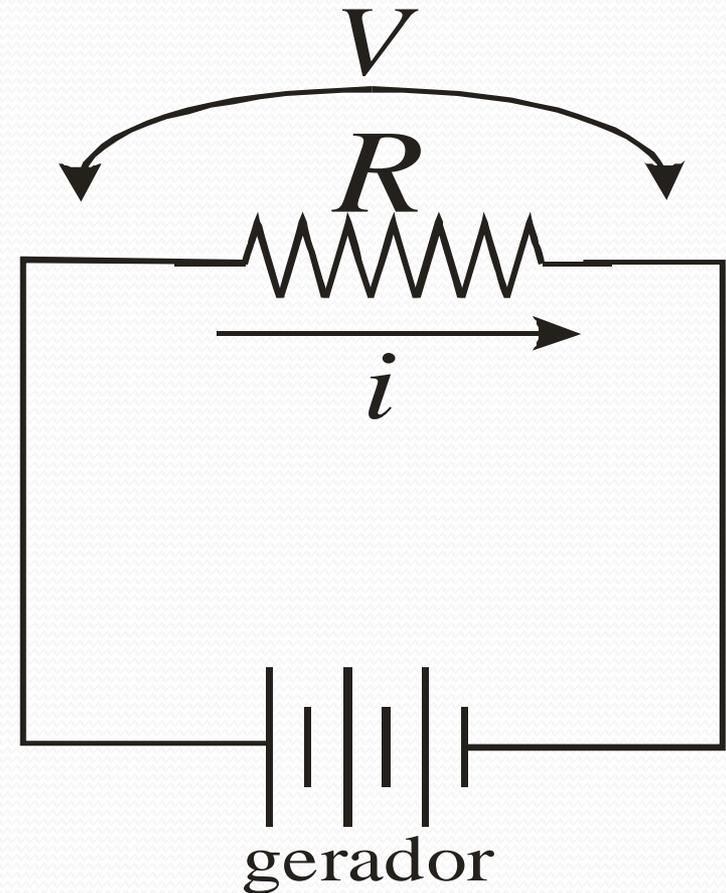
- A resistência elétrica de um elemento resistivo qualquer, \mathbf{X} , é a razão entre a voltagem e a corrente que passa por esse elemento:

$$R_X = \frac{V_X}{I_X}$$

- Essa é a **definição geral de resistência elétrica**, seja o elemento resistivo ôhmico (linear), caso em que a resistência é constante seja qual for o valor de \mathbf{V}_x e de \mathbf{i}_x , seja ele não ôhmico (não linear) que é o caso em que a resistência varia para valores diferentes de \mathbf{V}_x e \mathbf{i}_x .

Circuito simples

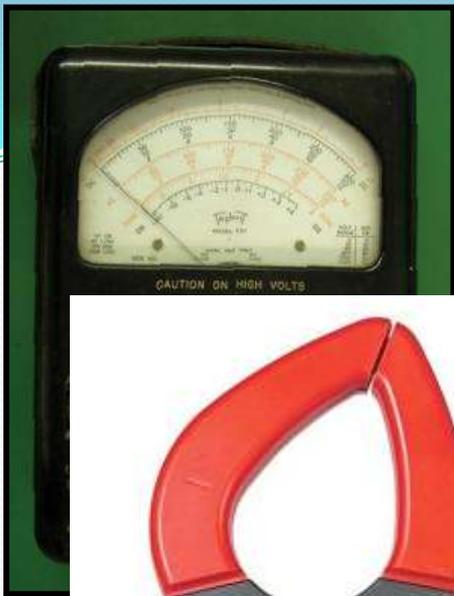
- Mesmo em um circuito bem simples, já temos muitos dos elementos que vamos trabalhar no laboratório de física 3.
- Com que medir:
 - Corrente?
 - A resistência R ?
 - Tensão em R ?
 - Tensão do gerador?
 - Força eletromotriz do gerador?



O multímetro

- Amperímetro e voltímetro são comercializados como um único instrumento, chamado multímetro:
 - **amperímetro** para a medida de corrente elétrica
 - **voltímetro** para a medida de tensão elétrica
 - **ohmímetro** para a medida de resistência elétrica.
- Para efetuar a medida, toda, ou parte, da corrente que flui pelo circuito deve atravessar o medidor





Como usar o multímetro

- Entrada (ou porta) COM (comum)
 - Utilizada sempre
- As outras portas dependem do que vai medir
 - V, Ω , mA, etc
- Olhe o seletor para saber o que está medindo
 - Cuidado com tensão (e corrente) ele mede contínua e alternada!



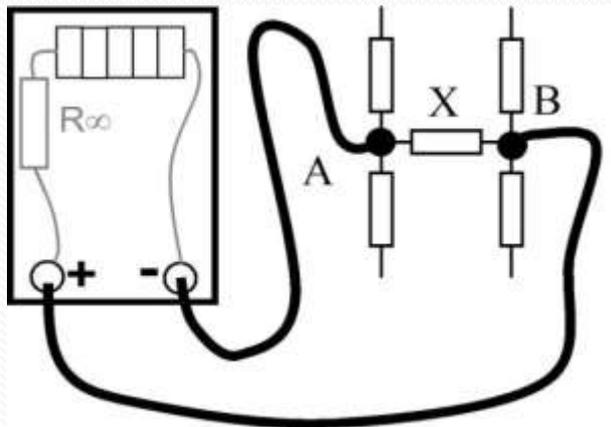
Dicas

- Fiquem atentos à escala utilizada
- Olhem os Algarismos disponíveis na tela, os Algarismos podem mudar com o valor medido.
- Fiquem atentos à precisão (incerteza) do instrumento
 - Olhem o manual - depende do modelo e da escala utilizada!
- Atenção aos Algarismos significativos!

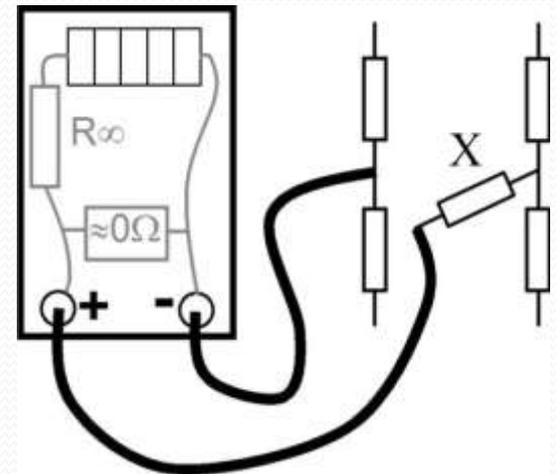


Como usar os medidores

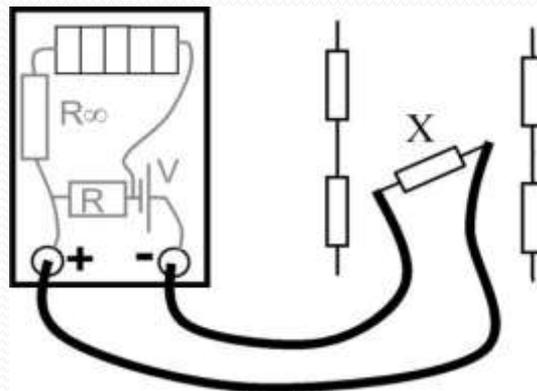
Voltímetro



Amperímetro

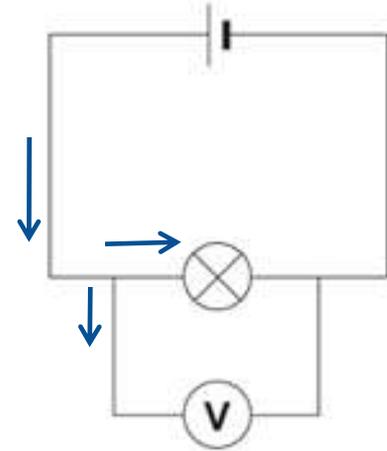


Ohmímetro



Como usar um voltímetro

- Para medir a tensão o aparelho deve experimentar a mesma tensão que o elemento → **ele deve estar em paralelo** com o elemento de interesse.
 - Para isso parte da corrente que flui pelo circuito deve atravessar o medidor.

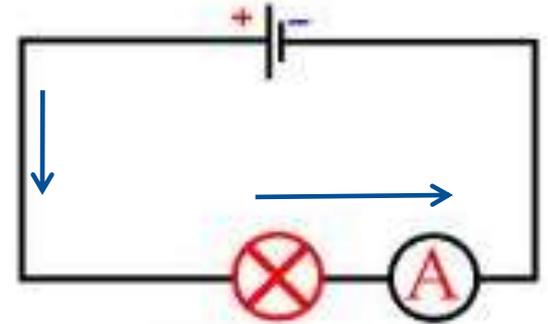


- Um medidor ideal é aquele que absolutamente não altera o circuito que está medindo ($R_V = \infty$).
- Então como ele tem que desviar corrente para efetuar a medida, para não alterar o circuito a corrente que ele desvia deve ser zero. Portanto a resistência interna do instrumento deve ser infinita.

Como usar um amperímetro

- Para medir a corrente o aparelho **deve estar em série** com a malha de interesse.

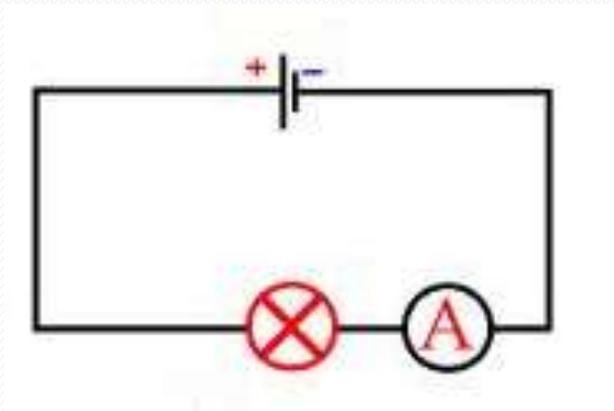
- Assim **toda** a corrente que flui pelo circuito atravessa o medidor.



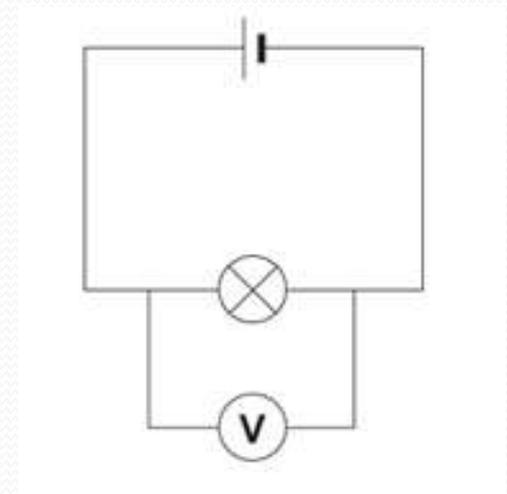
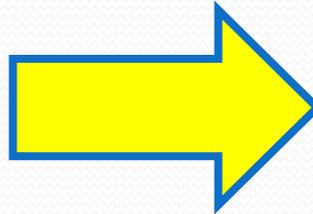
- Um medidor ideal é aquele que absolutamente não altera o circuito que está medindo ($R_A=0$).
- Mas todo material possui alguma resistência, certo?

Amperímetro Seguro

- Para evitar de queimar o amperímetro, podemos medir a corrente usando um resistor de proteção conhecido:



$$I_A = I_{\text{circuito}}$$



$$I_V \approx 0$$

$$I_{\text{circuito}} = \frac{V_X}{R_X}$$



2. Deslocamento em função do campo magnético

Seletor de Velocidades

... Um acelerador de partículas “simples”

- Um seletor de velocidades é um dispositivo que seleciona as partículas, de um feixe de partículas carregadas, de acordo com sua velocidade.
- Esse dispositivo é também chamado de **filtro de velocidades**, ou **filtro de Wien**:

Todo filtro faz uma seleção dos objetos que o atravessam.

Seletor de velocidades: como funciona

- O princípio de funcionamento do seletor de velocidades está baseado no fato de que **partículas carregadas** em movimento sofrem a ação de **forças** quando cruzam uma região onde existe um **campo elétrico** ou um **campo magnético**, ou ambos.
- Se queremos separar partículas com velocidades diferentes:

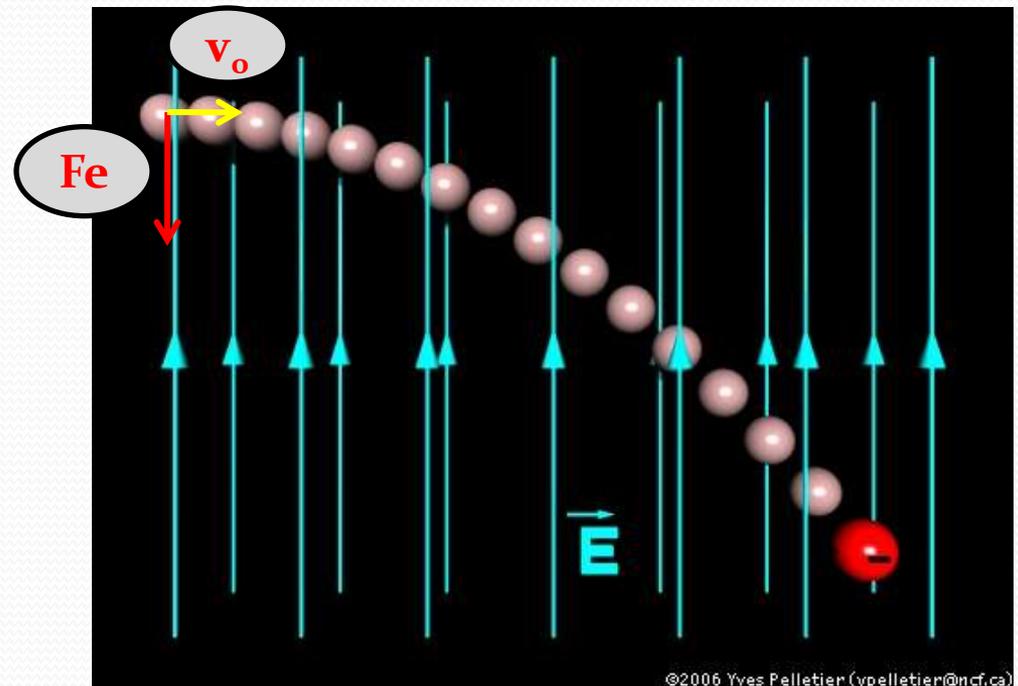
Precisa-se aplicar uma força dependente da velocidade!
... e que atua em algumas partículas (ie, velocidades) e em outras não...

Campo elétrico

- Quando um feixe de partículas carregadas de carga q , atravessa uma região onde existe um campo elétrico, \mathbf{E} , perpendicular à trajetória das partículas, ele vai sofrer uma força \mathbf{F}_e igual a:

$$\vec{F}_e = q\vec{E}$$

Se a partícula for positiva, o sentido da força é o sentido do campo, se for negativa, o sentido da força é oposto ao sentido do campo



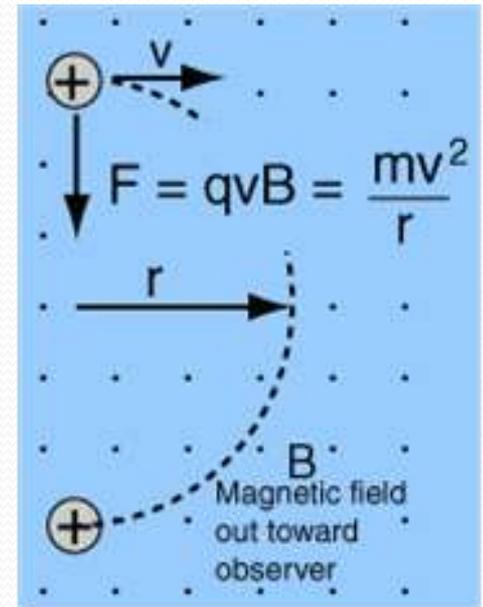
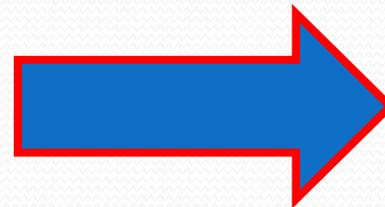
Campo magnético

- O que ocorre com o feixe de partículas (de carga q e velocidade \mathbf{v}) que atravessa uma região onde existe um campo magnético constante e perpendicular à sua trajetória?

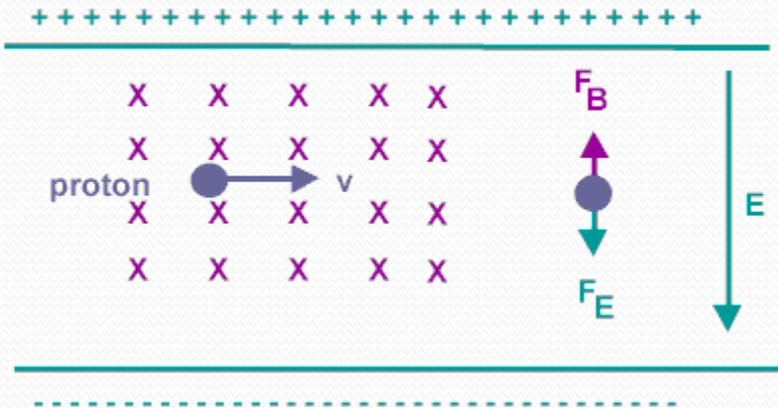
Vai aparecer uma força magnética, \mathbf{F}_m , proporcional à velocidade:

$$\vec{F}_m = q\vec{v} \times \vec{B}$$

Se $B \perp v$

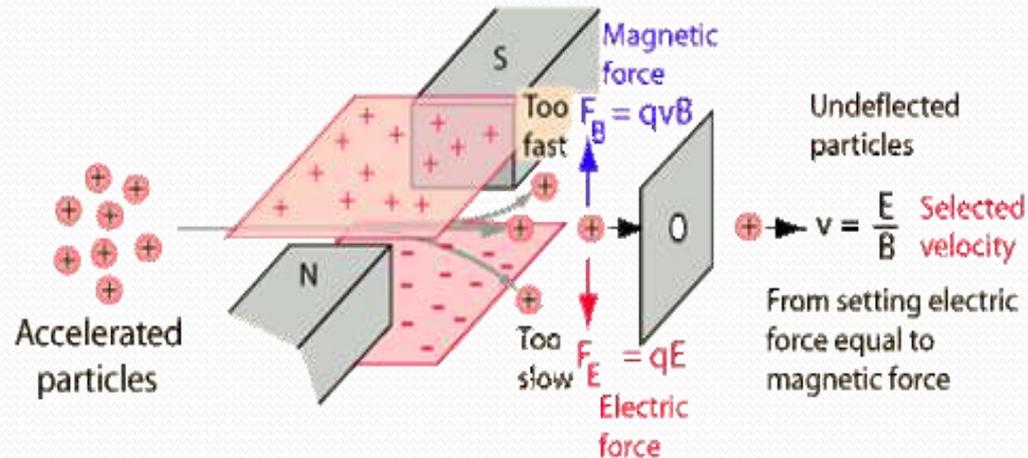


Funcionamento do Seletor



- São dois campos cruzados e perpendiculares à direção do feixe
 - um campo magnético
 - um campo elétrico
- **O segredo:** os campos são orientados de tal forma que F_E e F_B são opostas.

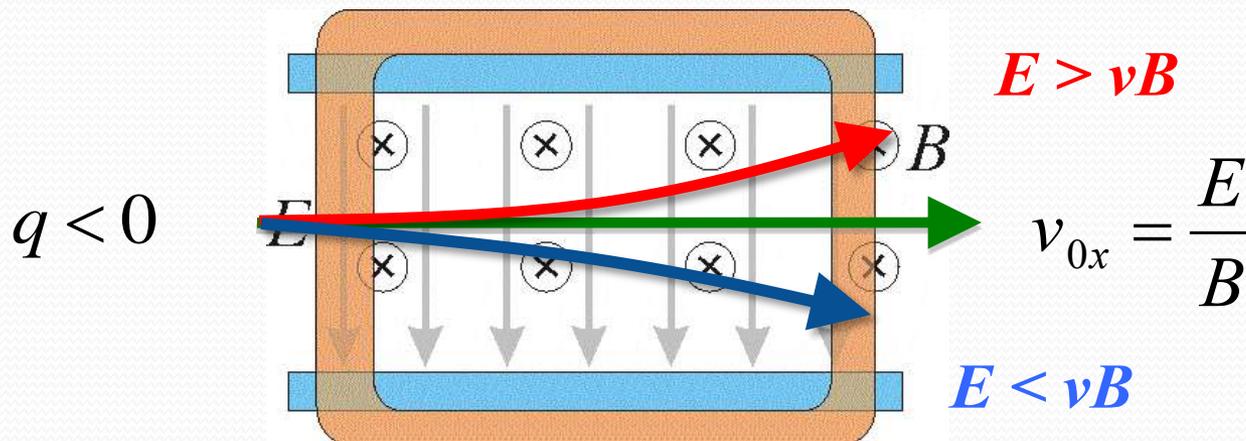
Escolhe-se a intensidade dos campos tal que a partícula da velocidade de interesse passe sem ser desviada:

$$\vec{F}_E + \vec{F}_B = 0$$


Modelo Simplificado

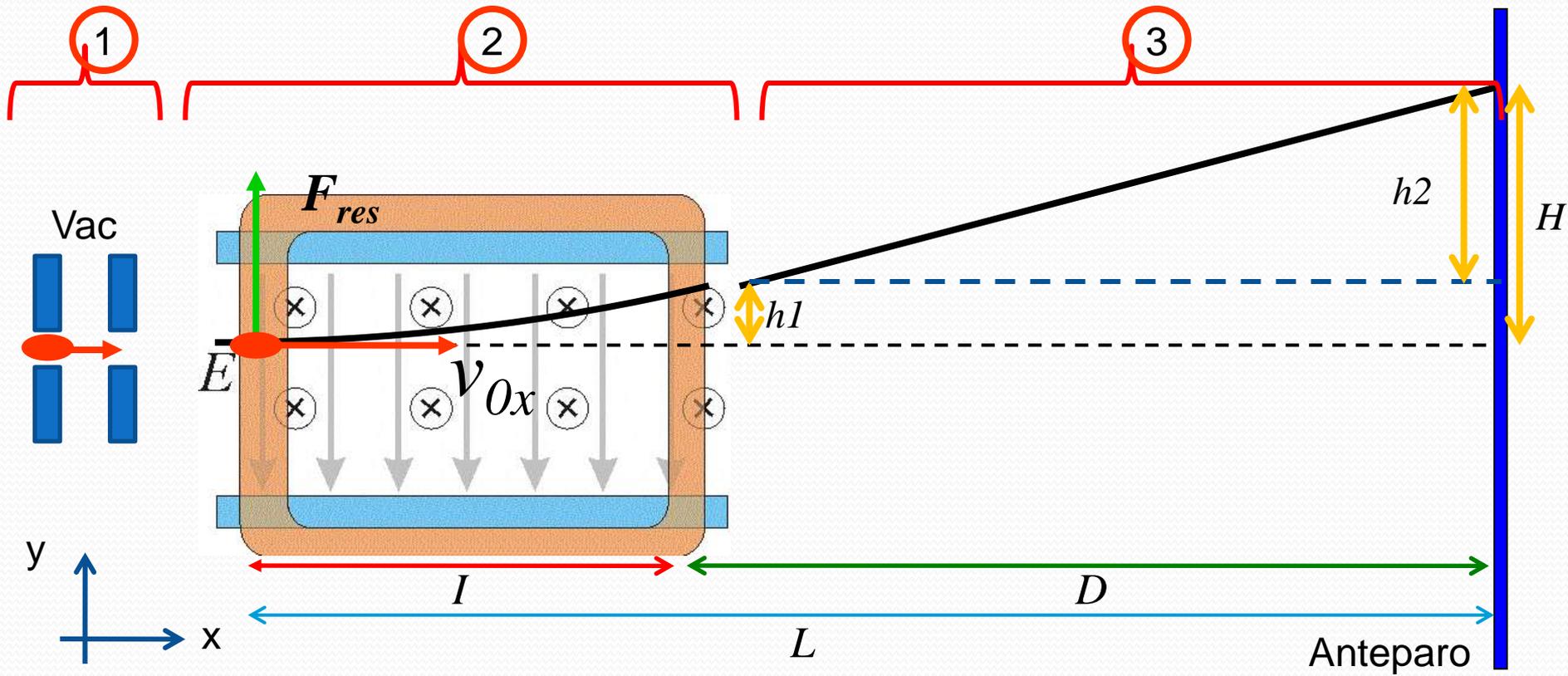
- As forças elétrica e magnética são iguais e opostas no caso da partícula que não sofre deslocamento, ($\mathbf{H}=\mathbf{0}$), isso leva à seguinte expressão para a velocidade dessa partícula:

$$|\vec{F}_E| = |\vec{F}_M| \Rightarrow qE = qvB \Rightarrow v = \frac{E}{B} \text{ para } H = 0$$



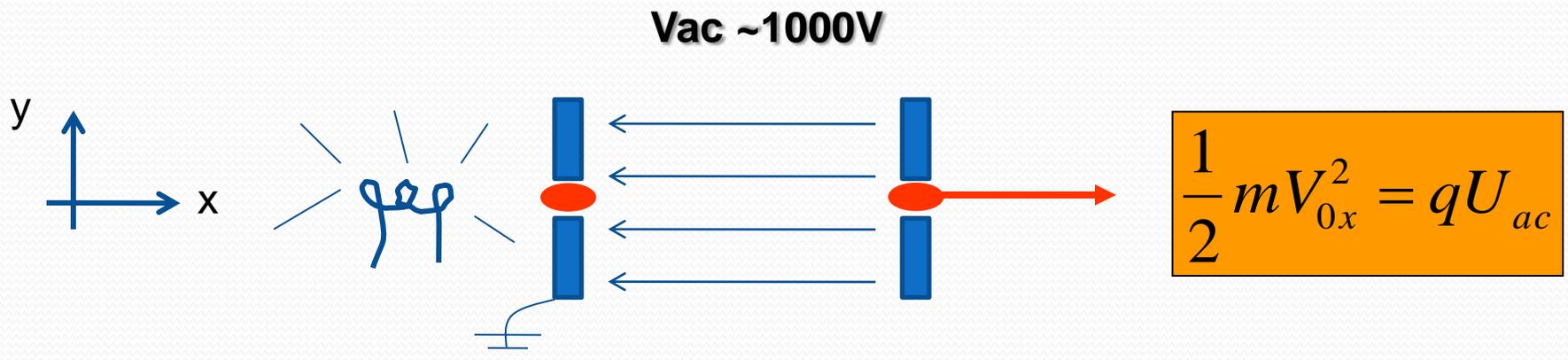
Modelo Simplificado

- O movimento é composto de três partes:
 1. Aceleração em x
 2. Aceleração em y
 3. Movimento uniforme



Modelo Simplificado – Traj. 1

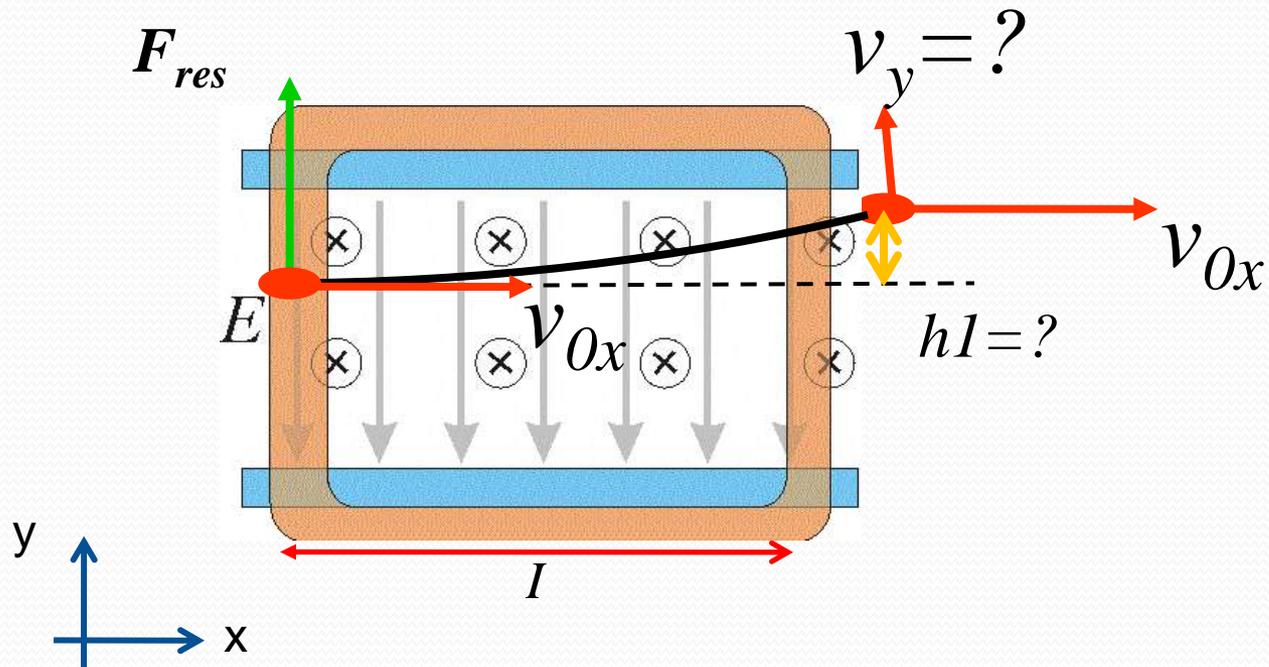
- No primeiro trecho do movimento, a partícula (**um elétron**) é acelerada entre duas placas com alta voltagem (**um capacitor :-**)
- O elétron é emitido, praticamente parado, por um filamento aquecido (botão de intensidade do TRC)



- A energia potencial elétrica é convertida em energia cinética, então qual a velocidade de aceleração do elétron?

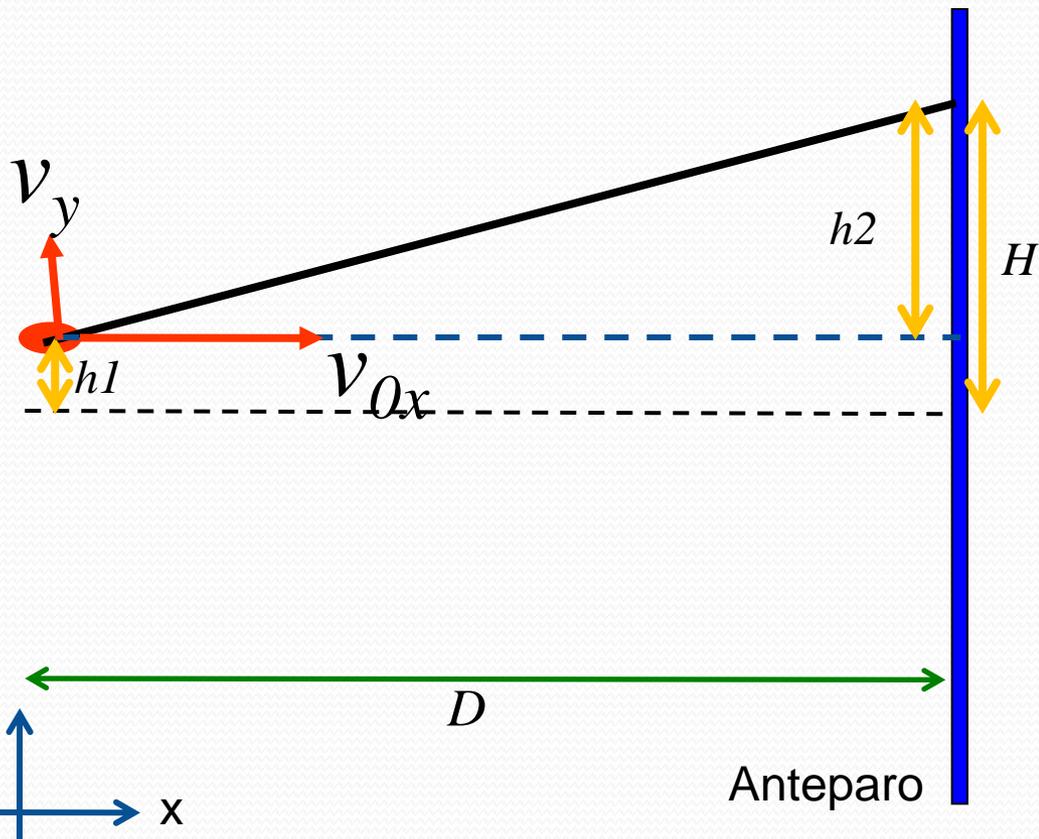
Modelo Simplificado – Traj. 2

- Na região com \mathbf{E} e \mathbf{B} , temos um movimento acelerado em y , que desvia a partícula, e uniforme em x
 - Assumimos que $v_x = \text{cte}$
 - Calculamos v_y e h_1 na saída



Modelo Simplificado – Traj. 3

- Na última parte não há forças agindo sobre a partícula, então o movimento é uniforme em x e y
 - Usamos as velocidades v_y e v_{0x} , e a posição h_1 , para encontrar H

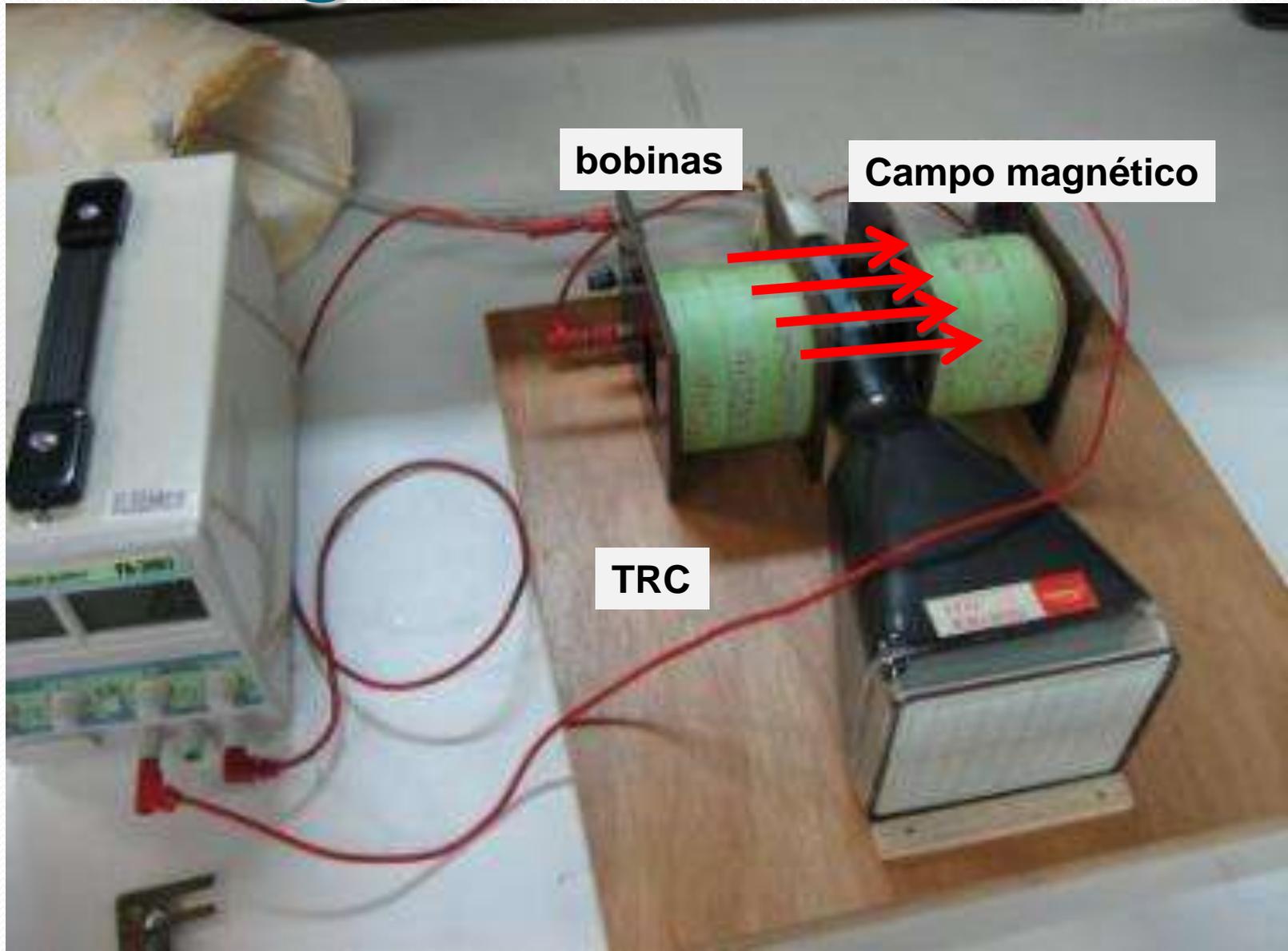


$$(E - v_{0x}B) \propto v_{0x}^2 H$$

$$E / B = v_{reto}$$

- Quanto vale a constante de proporcionalidade?
- Podemos calcular E e B quando a partícula passa direto?

Montagem com as bobinas



Para entregar, Parte 1

- Ligue o **TRC** e focalize o feixe na tela
 - Aplique uma tensão aceleradora **$V_{ac}=700V$**
- Gire o **TRC** e alinhe com o campo magnético local
 - Procure fazer com que o feixe esteja focalizado e pelo menos sobre o eixo horizontal
 - Defina a origem neste ponto e deixe o TRC fixo nesta posição da bancada
- Monte as bobinas de cada lado do tubo do TRC.
 - Elas devem estar alinhadas com as placas desviadoras verticais e entre si.
 - Como verificar se as bobinas estão alinhadas entre si?

Parte 2, o campo magnético

- Use um resistor de proteção de 10 ohms para medir a corrente pelas bobinas
- Aumente e diminua a corrente e verifique o que acontece com o feixe. Comente.
- Veja que a posição depende da corrente aplicada.
- Anote a corrente máxima que permita que o feixe continue visível na tela do **TRC**.
 - CUIDADO: Não passe de 2A e não mantenha uma corrente alta por muito tempo para não danificar as bobinas e nem o resistor de proteção.

Parte 3, deslocamento $\times I_B$

- Medir h em função de I_B para U_{ac} fixo ($=v_{0x}$ fixo).
- Qual é a dependência funcional? Comece testando uma possibilidade simples:

$$h = Ci_b^\gamma$$

- Fazer um gráfico de I_B em função de h para U_{ac} fixo que permita descobrir se a dependência funcional acima é adequada
 - Se for obtenha o expoente gamma. Compare com os valores obtidos por seus colegas
 - **Importante**: a grandeza fixa deve ser escolhida de modo a permitir o maior número possível de pontos medidos.

Parte 4, deslocamento x Vac

- Medir h em função de U_{ac} para I_B fixo.
- Qual é a dependência funcional? Comece testando uma possibilidade simples:

$$h = DU_{ac}^{\delta}$$

- Fazer um gráfico de h em função de U_{ac} para I_B fixo que permita descobrir se a dependência funcional acima é adequada
 - Se for obtenha o expoente delta. Compare com os valores obtidos por seus colegas
 - **Importante**: a grandeza fixa deve ser escolhida de modo a permitir o maior número possível de pontos medidos.

3. Dicas

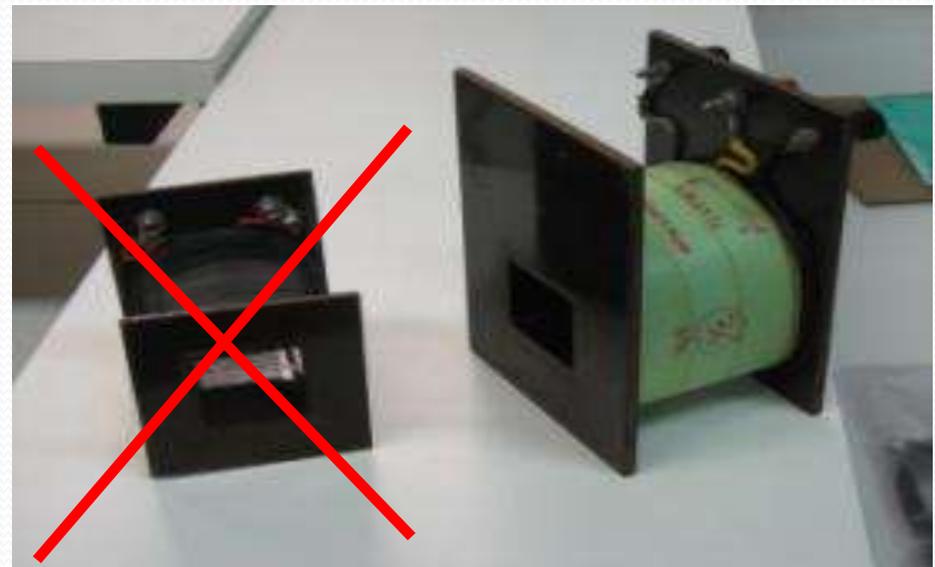


Para pensar:

- Quantos pontos medir em cada caso?
 - O maior número possível, levando em conta os erros experimentais.
- O zero está no centro?
 - Medir para cima, para baixo ou em ambas as direções em relação à origem? Precisa?
- Determinação dos erros experimentais:
 - Qual o erro da medida da posição?
 - O tamanho da “mancha” na tela deve ser levado em conta?
 - E se a mancha duplica?
 - Há erro sistemático? Ele pode se “descontado”?

Cuidado experimental 1

- Parear bobinas
 - Temos 3 tipos de bobinas
 - 100, 250 e 500 espiras
 - Usar o mesmo tipo pois senão o campo não será simétrico
- Anotar o numero da bobina utilizada

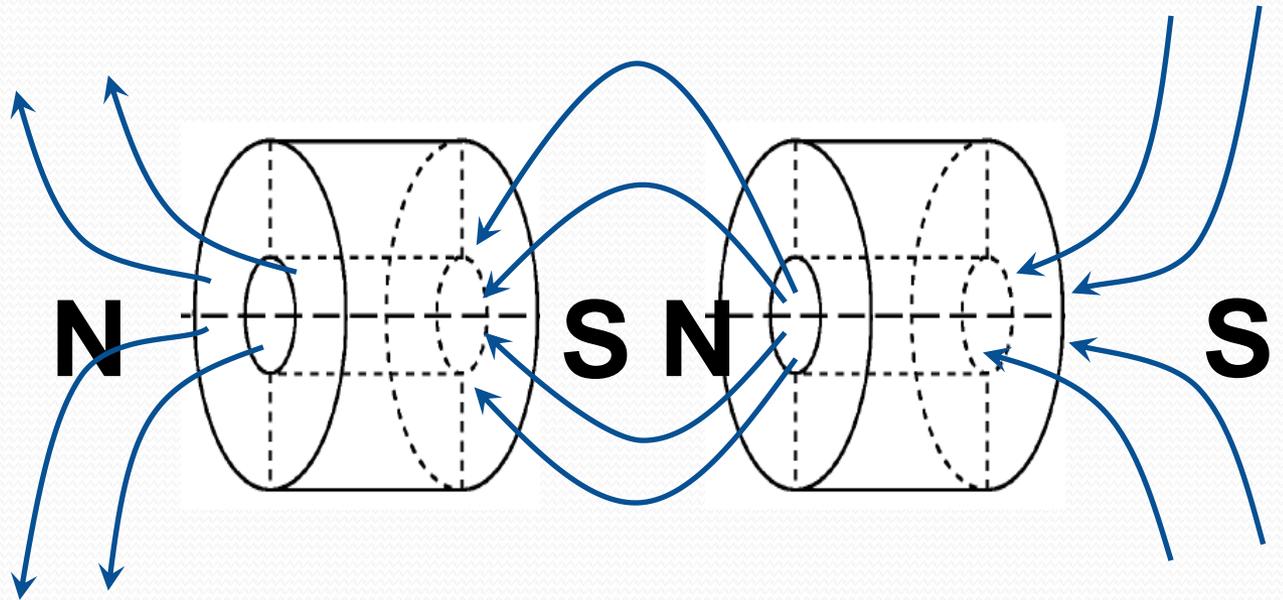
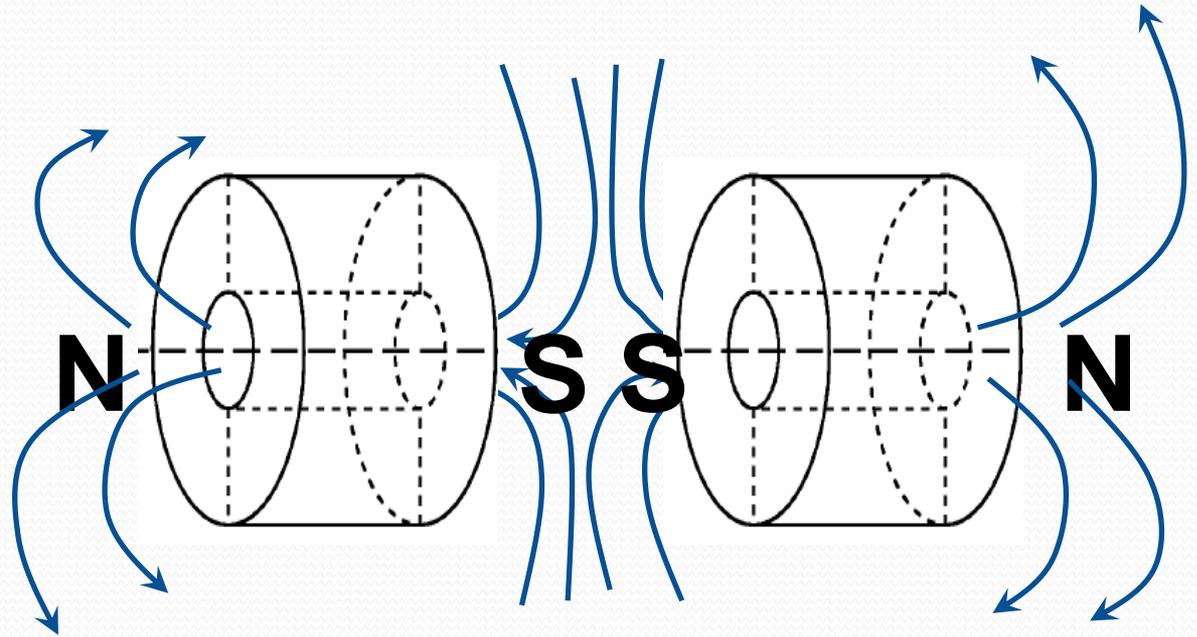


Cuidado experimental 2

- Não confiem na leitura da corrente ou tensão diretamente na fonte DC
 - Não usem o multímetro com amperímetro!
 - Usar um resistor de proteção de 10 ohms que limite a corrente máxima no circuito em 1.5 amps.
-
- NÃO DEIXEM O RESISTOR ESQUENTAR



Cuidado 3



Aterramento

- Nesta semana vocês vão usar apenas as bobinas, ou seja, as placas ficarão desligadas. Portanto, deixem todas aterradas para que todo o desvio do feixe seja devido ao campo magnético das bobinas

