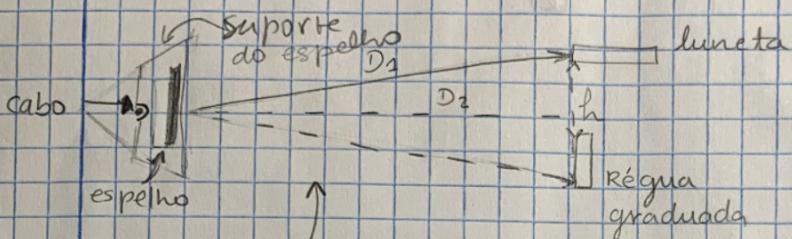


1) Objetivos Verificag

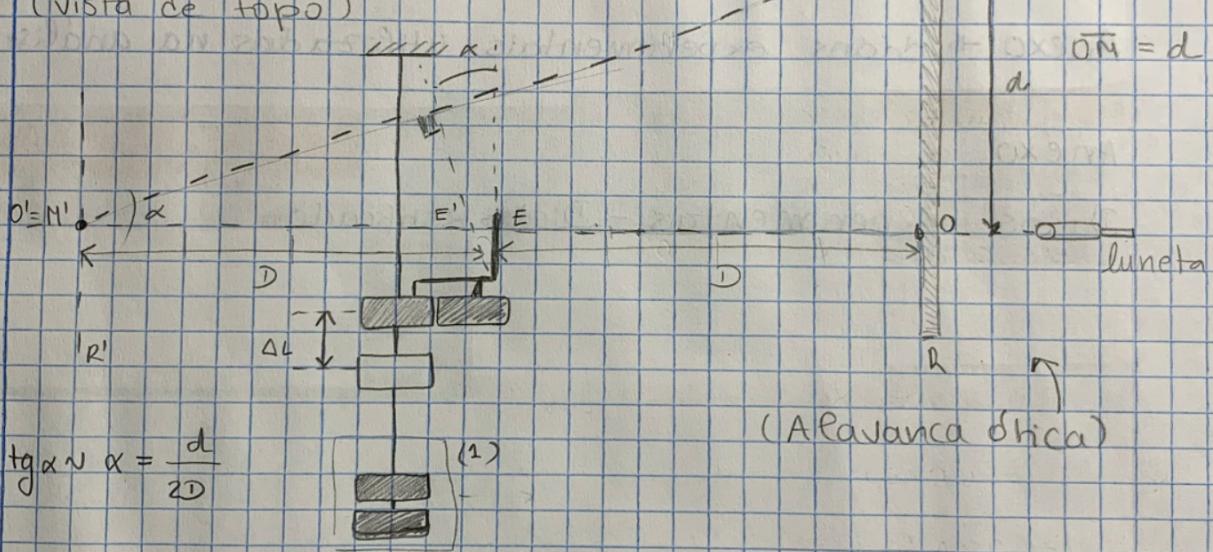
- Objetivos:**

 - 1) Verificação da lei de Hooke de Young de um fio de aço (a partir da carga e descarga de pesos, E_c e E_d , respetivamente)
 - 2) Determinação do módulo de Young, E_c e E_d , pelo método da alavanca ótica, comparando E_c e E_d
 - 3) Verificação experimental do comportamento elástico do aço, pelo método da alavanca ótica, comparando E_c e E_d

Esquema experimental

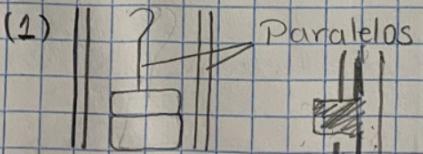


* O cabo não deve tocar no espelho, nem o osular ou alterar a inclinação



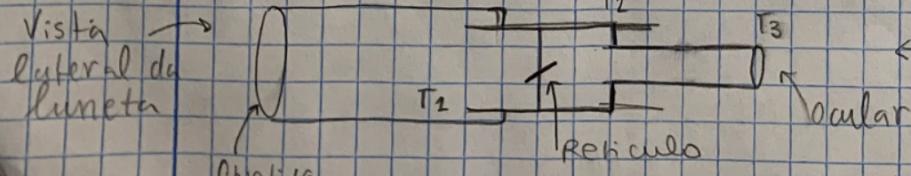
$$\text{Para } x \text{ pequeños} \quad \left[\tan x \approx x \right] \quad x = \frac{d}{z_D}$$

NOTAÇÃO : os parâmetros identificados na forma x' são a imagem de x devido ao espelho



Vista
lateral

Além disso, se a mesa não estiver inclinada e o suporte inicialmente na vertical irá oscilar, criando oscilações no espelho e mesmo quando se o suporte bater nas barras laterais



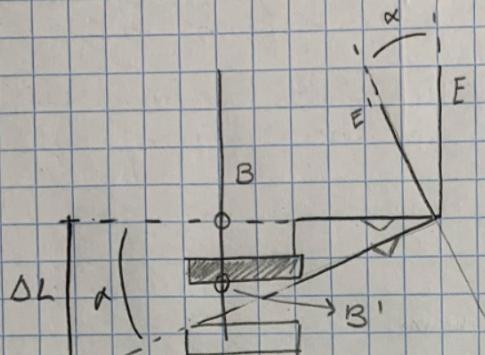
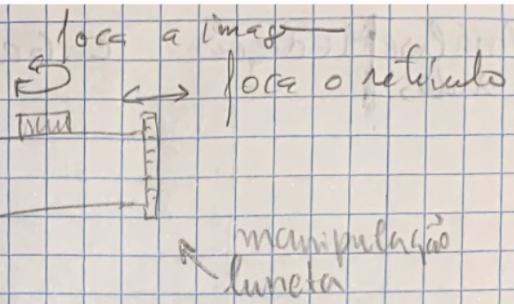
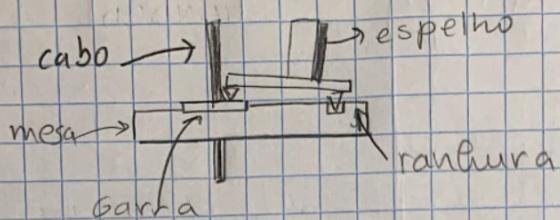
O suporte das massas deve estar na vertical (indica que inclinações da massa) de a que o peso só tenha uma componente vertical que se traduzão no fio esperada pela massa se tiver inclinada e o suporte cair, criando oscilações no espelho sobre bater nas barras laterais

$\leftarrow x \rightarrow$ Verificar se se vê a escala em todos os pesos postos
(Se não → diminuir Δ)

Deve ser o menor possível

lei de Hooke é declinada logm ($\log d$) ≈ 1
Módulo de Young é ... como fz, mas não a carga tem qualidade!

Espeelho → vista lateral



Movimento
do espelho
devido à
deformação
do fio

Cuidados

- não abanar a bancada
- minimizar ao máximo oscilações na montagem
 - ↳ colocar e retirar lentamente as cargas
 - ↳ esperar uns secs. antes de retirar valores
- ① Durante a carga deve-se usar 1º uma massa de $\approx 2\text{ kg}$ seguida pelas de $\approx 1\text{ kg}$. Quando estas acabarem usar as restantes de $\approx 2\text{ kg}$

[claro nos graficos]

Plano de Ação

- Medir massa dos 9 pesos
 - posicionar o suporte → ① deve ser máximo, pois
↑ D, ↑ c para mssm \propto
 - garantir que se vê a escala
 - Focar o retículo
 - Focar escala
 - Medir D → fio de nylon
 - Medir L₀ → comprimento inicial do fio
 - Medir diâmetro do fio ($\varphi \pm u(\varphi)$)
 - Garantir fio na vertical (1)
 - registrar dados
- ↑
não se usa fita métrica pois esta tem um arredondamento
- ML (✓)
ML (✓)
rigido ou
HB —

Análise Medições e Gráficos de Dados

NOTA $\Rightarrow \Delta d = \Delta c_i$

	incerteza (m)	
D/m	2,7314	0,0005
L0/m	0,721	0,009
b/m	0,0750	0,0005
d/m	0,240	0,003
ϕ/m	0,00081	0,00001

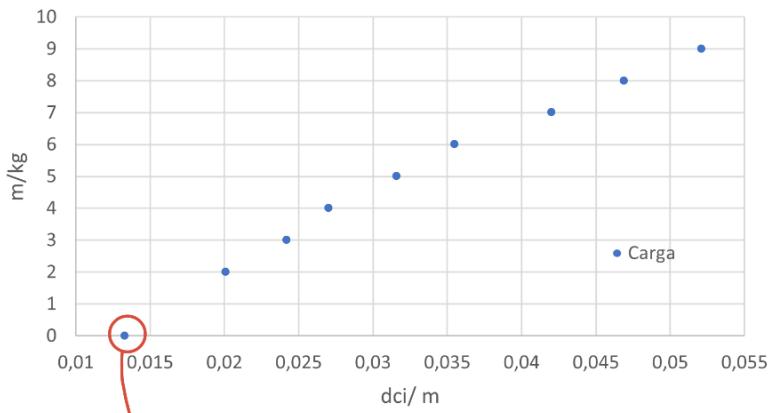
Figura 1 : Tabela de grandezas medidas diretamente e respetivas incertezas

Figura 2 : Tabela de dados \rightarrow fase de carga

Nº de massas	m _{cargas} /g	m _{cargas} /Kg	F _{carga} /N	L _c /cm	d _c /cm	d _c /m	a _j (m _{carga})	resíduos (m _{carga})
0	0,0	0	0	30,72	0	0	-0,9174	0,9174
1	2006,0	2,006	20,06	29,39	-1,33	0,0133	1,9139	0,0921
1+2	3008,9	3,0089	30,089	28,71	-2,01	0,0201	3,3615	-0,3526
1+2+3	4006,0	4,006	40,06	28,3	-2,42	0,0242	4,2344	-0,2284
1+2+3+4	5007,8	5,0078	50,078	28,02	-2,7	0,027	4,8305	0,1773
1+2+3+4+5	6009,1	6,0091	60,091	27,56	-3,16	0,0316	5,8097	0,1994
1+2+3+4+5+6	7005,5	7,0055	70,055	27,17	-3,55	0,0355	6,6400	0,3655
1+2+3+4+5+6+7	8005,1	8,0051	80,051	26,52	-4,2	0,042	8,0237	-0,0186
1+2+3+4+5+6+7+8	9002,7	9,0027	90,027	26,03	-4,69	0,0469	9,0669	-0,0642
1+2+3+4+5+6+7+8+9	10003,4	10,0034	100,034	25,51	-5,21	0,0521	10,1739	-0,1705
				u(L _c)=0,05 cm	u(d _c)=0,05 cm			

Figura 3 : massa em função da deformação (obtido na aula)

m(Δd) - CARGA



Pontos duvidosos

resíduos - CARGA

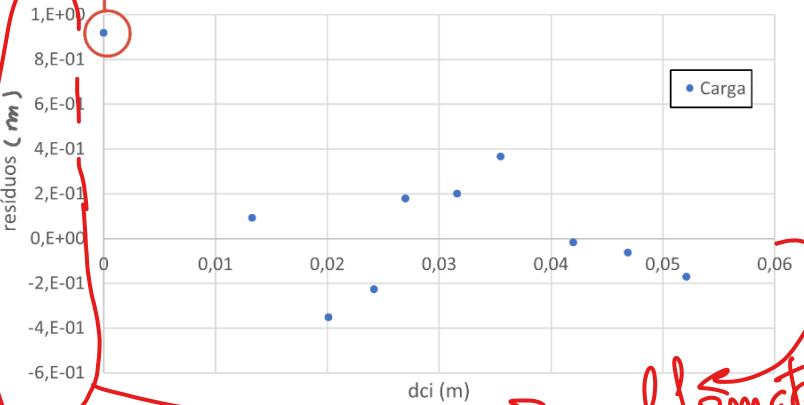


Figura 4 : Gráfico de resíduos experimentais

Os gráficos acima contêm todos os pontos recolhidos no trabalho. O ponto assinalado a vermelho no gráfico m(d) apareceu ser duvidoso, e como se confirmou nos resíduos este sai da gama de valores em que se encontram os restantes resultados e por isso não foi considerado no ajuste linear e análise dos dados experimentais.

Finalmente, para observar o mal ajuste do fito ao modelo (por observações sem máximas).

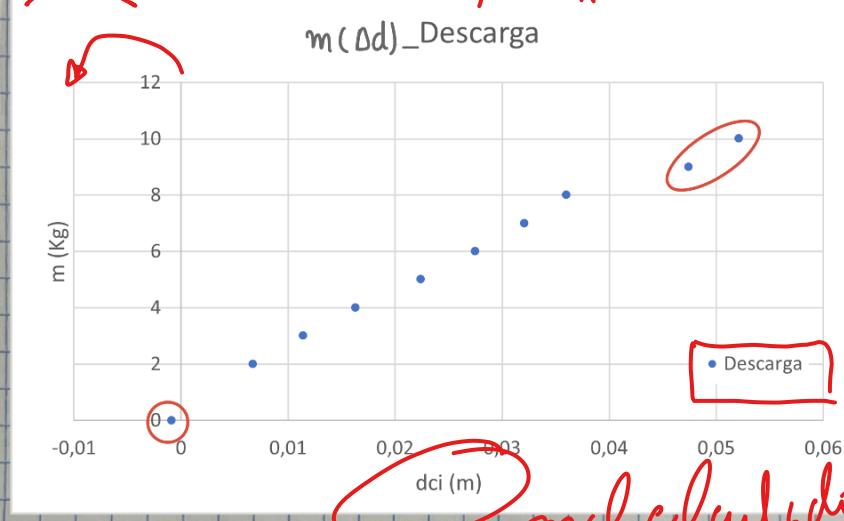
Figura 5: Dados recolhidos durante a experiência na fase de descarga

mal calculados

Nº de massas	margas /g	margas / Kg	Fcarga /N	Lci/cm	dci/cm	dc/m	aj (marga)	resíduos (marga)
1+2+3+4+5+6+7+8+9	10003,4	10,0034	100,034	25,51	-5,210	0,0521	11,03281871	-1,029418706
1+2+3+4+5+6+7+8	9002,7	9,0027	90,027	25,98	-4,740	0,0474	10,09898802	-1,096288016
1+2+3+4+5+6+7	8005,1	8,0051	80,051	27,12	-3,600	0,036	7,833951875	0,171148125
1+2+3+4+5+6	7005,5	7,0055	70,055	27,51	-3,210	0,0321	7,05907109	-0,05357109
1+2+3+4+5	6009,1	6,0091	60,091	27,97	-2,750	0,0275	6,145109138	-0,136009138
1+2+3+4	5007,8	5,0078	50,078	28,48	-2,240	0,0224	5,131803496	-0,124003496
1+2+3	4006,0	4,0060	40,060	29,09	-1,630	0,0163	3,919810474	0,086189526
1+2	3008,9	3,0089	30,089	29,58	-1,140	0,0114	2,946242308	0,062657692
1	2006,0	2,0060	20,060	30,05	-0,670	0,0067	2,012411618	-0,006411618
0	0,0000	0,0000	0,0000	30,81	0,090	-0,0009	0,502387524	-0,502387524

$u(Lci)=0,05 \text{ cm}$ $u(dci)=0,05 \text{ cm}$

$$\cancel{dci} = d_{desc\ i} = Lci - 1^{\circ} Lci \text{ da carga}$$



Pontos duvidosos assinalados a vermelho

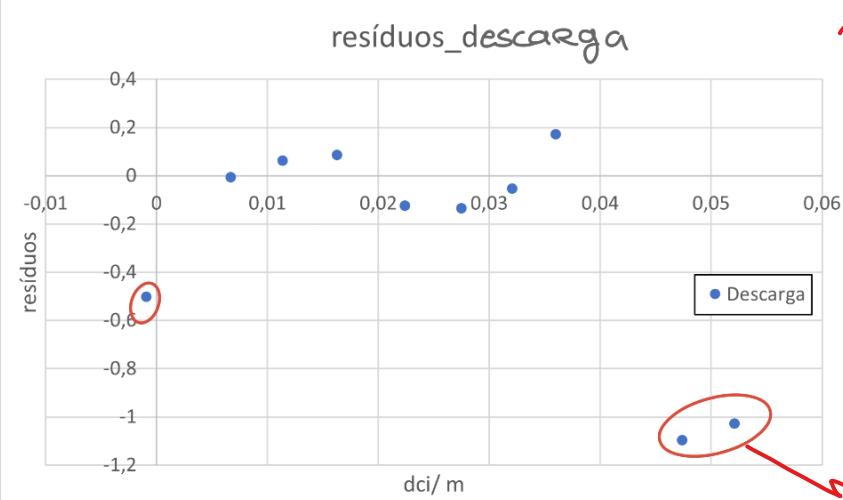


Figura 7: resíduos experimentais de massa na fase de descarga

A semelhança da fase de carga, também os graficos obtidos para a totalidade dos dados revelaram a existência de pontos duvidosos (assinalados a vermelhos). Estes foram tratados como o procedimento anterior e não foram considerados no tratamento de dados.

o prato encostou nos seixos!

Análise de dados - Fase de Carga

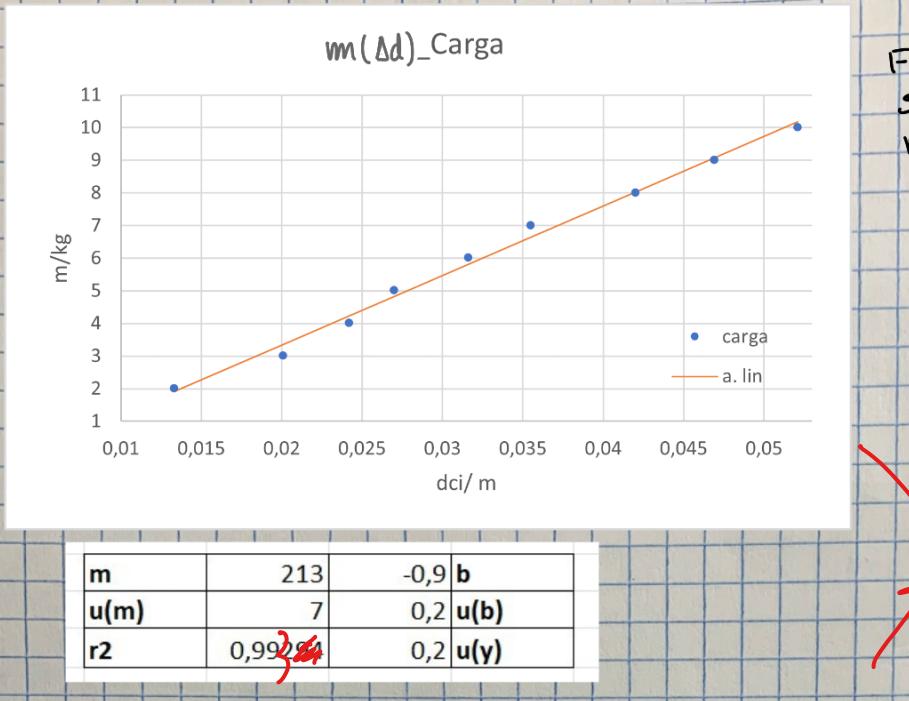


Figura 8 : Gráfico
s/ pontos duvidosos,
respetivo ajuste linear
e parametros

→ mal formatado

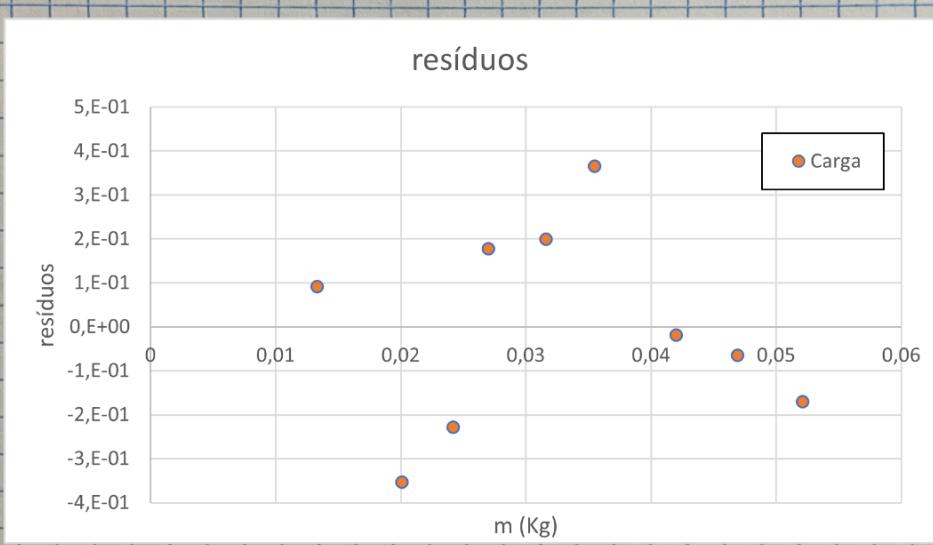
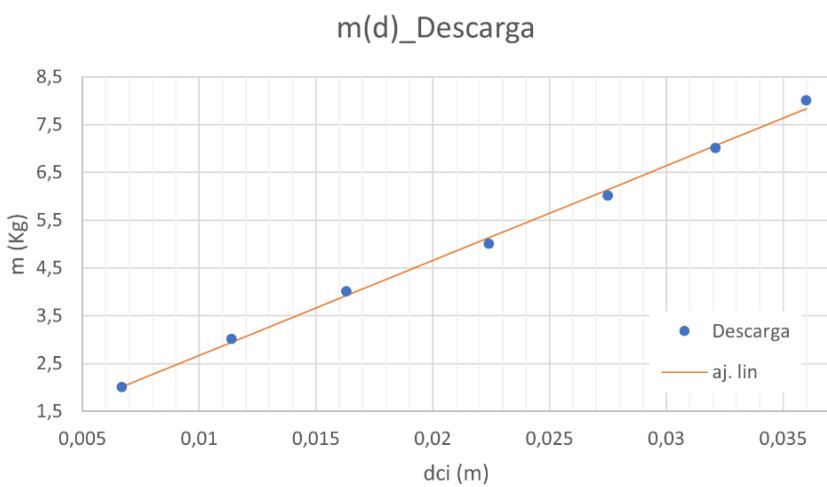


Figura 9 : resíduos
experimentais
após removidos
pontos duvidosos

Após a filtragem dos pontos duvidosos, obteve uma boa relação linear entre os dados massa em função de $dci \equiv \Delta d$. ($r^2 \approx 0,99$)

O gráfico obtido para os resíduos apresenta pontos distribuídos de forma aleatória e numa gama de valores reduzida $[-4,4] \times 10^{-1}$, observação que apoiam a hipótese de uma boa ~~linearidade~~ linearidade.

Fase de Descarga



m	199	$0,7 \text{ b}$
$u(m)$	5	$0,1 u(b)$
r^2	0,997233	$0,1 u(y)$

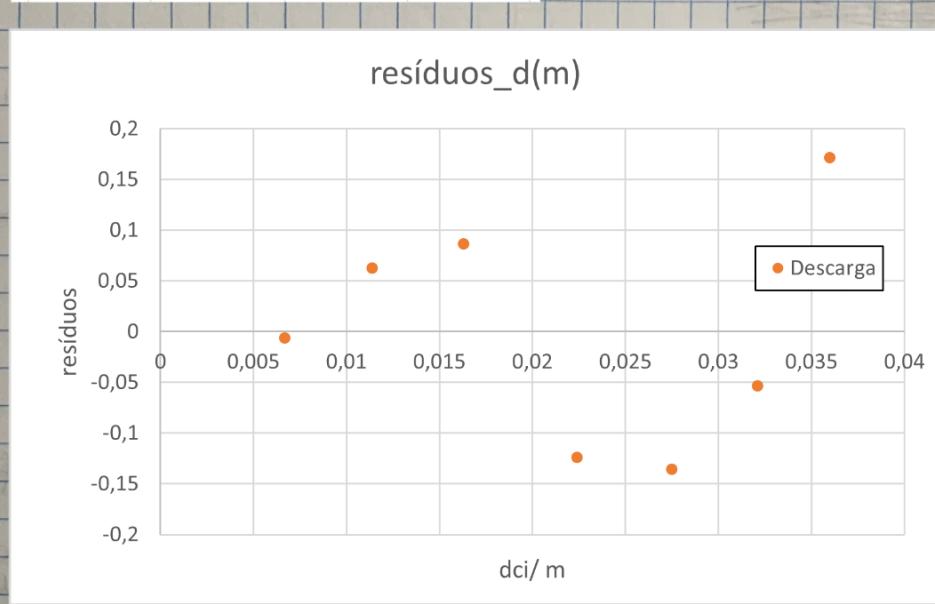


Figura 10: Gráfico dos pontos divididos, respetivo ajuste linear e parâmetros

Figura 11: resíduos experimentais após remoção dos pontos divididos

À semelhança da fase anterior, os gráficos obtidos após a limpeza dos valores experimentais mostram-se de acordo com o esperado.

O gráfico $m(\Delta d)$ tem uma traço que satisfaz a linearidade e os parâmetros obtidos revelam o mesmo ($r^2 \approx 1$).

Através da análise dos resíduos, verificou-se que se distribuem por uma pequena gama de valores ($[-1,5; 2] \times 10^{-1}$) de forma aleatória, característica de uma relação linear entre dados.

Faltam: μ não morfologia, partículas, $\mu(m)$.

Grandezas a calcular

o) coeficiente de ampliação

$$Camp = 72,8$$

$$u(Camp) = \pm 0,5$$

$$[Camp] = \frac{L}{L} = 1 \equiv \text{adimensional}$$

o) Módulo de Young, E

→ Da leitura do Protocolo Sabe-se que o valor de E se encontra na gama $[2,09, 19,5] \times 10^9 \text{ N.m}^{-2}$.

Para valor de referência usa-se o valor médio entre os extremos da gama apresentada.

$$E_T = 1,95 \times 10^9 \text{ N.m}^{-2}$$

mas
apresentado como gama e considerando a

$$\text{erro (\%)} = \frac{|2,1 \times 10^9 - 1,95 \times 10^9|}{1,95 \times 10^9} \times 10^2 = 7,7\%$$

$$\text{erro (\%)} = \frac{|2,0 \times 10^9 - 1,95 \times 10^9|}{1,95 \times 10^9} \times 10^2 = 3,6\%$$

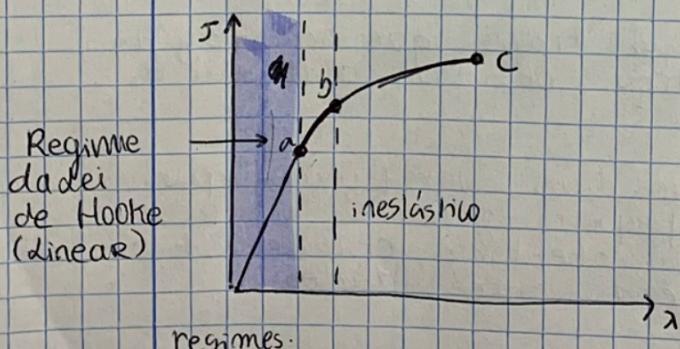
FASE DE CARGA $\left\{ \begin{array}{l} E_C = 2,1 \times 10^9 \text{ N.m}^{-2} \\ u(E_C) = 0,1 \times 10^9 \text{ N.m}^{-2} \end{array} \right.$

FASE DE DESCARGA $\left\{ \begin{array}{l} E_D = 2,0 \times 10^9 \text{ N.m}^{-2} \\ u(E_D) = 0,2 \times 10^9 \text{ N.m}^{-2} \end{array} \right.$

Através da Relação Lei de Hooke.

$|T = E\lambda|$ é possível verificar a usada com ~~correto~~ escrita alternativa, deduzida em anexo

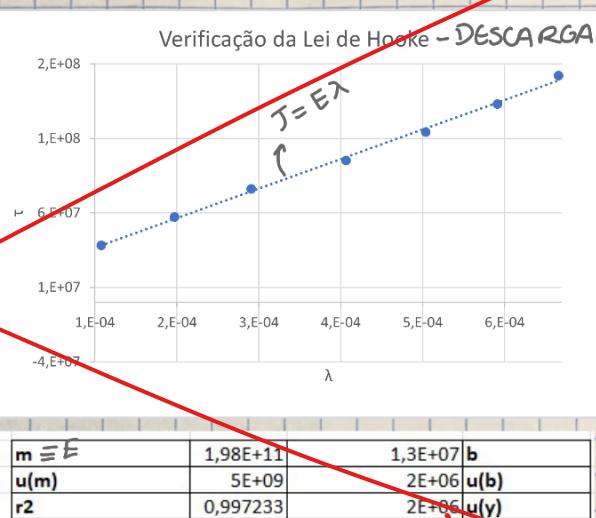
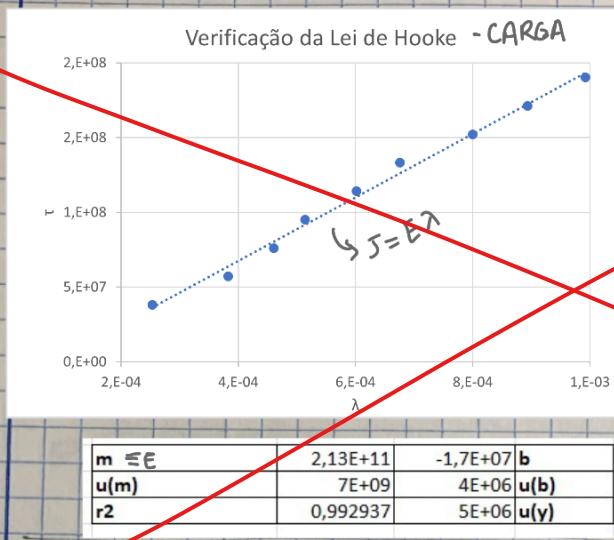
O esquema abaixo, reproduzido do Protocolo, mostra o comportamento de um material sólido



$$\Delta d \equiv \text{deformação}$$

⇒ Reproduzindo este gráfico através dos dados conhecidos, para ambas as fases podemos concluir que se verifica a lei de Hooke na atividade. O fio de aço tem um comportamento elástico que pode ser identificado pela Δd registrada no procedimento (sem haver rotação).

Figura 12: Gráficos obtidos para verificar a lei de Hooke e parâmetros lineares



Resultados finais

- Com os dados obtidos experimentalmente, e a sua análise, verificou-se a lei de Hooke no comportamento do fio de aço quando sujeito a forças de tensão na gama dos 10^9 a 10^{11} N.
- Determinou-se o módulo de Young para o fio em ambas as fases,

$$E_c = E \text{ na fase de carga}$$

$$E_d = E \text{ na fase de descarga}$$

$$E_c = (2,13 \pm 0,1) \times 10^{11} \text{ Nm}^{-2}$$

$$E_d = (1,98 \pm 0,2) \times 10^{11} \text{ Nm}^{-2}$$

da descrença da descrença dos valores. Ainda assim foram uma boa aproximação ao valor usado como referência.

Para o coeficiente de ampliação, o resultado foi satisfatório

$$C_{amp} = 72,8 \pm 0,5 \quad (\gg 1 \text{ como se previa})$$

Conclusão SEPARADA de

Já o fio é melhor com m(d)!

% inc?

O valor obtido foi melhor para a fase descarga. Visto que esta foi a última fase no procedimento experimental e a montagem não se conseguiu identificar a causa

Anexo

1 - Dados Recolhidos

(a) base do espelho

Base do espelho (b) / cm	7,50
u (b) / cm	0,05

(c) diâmetro do fio

ϕ (mm)	$R_s (\pm)$
0,80	23,5
0,80	24,1
0,81	24,4
0,83	71,1
0,80	71,3
ϕ médio / mm	24,0
u (ϕ) / mm	0,3

(d) distância luneta-regua

R_s médio / cm	24,0
u (R_s) / cm	0,3
u (L_0) / cm	0,9

! É "registo de dados" / "não é"!

(b) distância espelho perto luneta

D (cm)	273,14
D médio / cm	273,14
u (D) / cm	0,05

(e) comprimento inicial do fio

L_0 (cm)	73,9
	71,3
	71,1
	72,1
u (L_0) / cm	0,9

nº da massa	m / g	u (m) / g
1	2006,0	0,1
2	1002,9	0,1
3	997,1	0,1
4	1001,8	0,1
5	1001,3	0,1
6	996,4	0,1
7	999,6	0,1
8	997,6	0,1
9	1000,7	0,1

(f)

Tabela dos valores das massas usadas e seu respetivo nº, por ordem de colocação

(g) Dados para lei de Hooke

I - fase de carregamento

λ	τ
2,53E-04	3,8E+07
3,83E-04	5,7E+07
4,61E-04	7,6E+07
5,14E-04	9,5E+07
6,02E-04	1,1E+08
6,76E-04	1,3E+08
8,00E-04	1,5E+08
8,93E-04	1,7E+08
9,92E-04	1,9E+08

II - fase de descarga

λ	τ
6,86E-04	1,5E+08
6,11E-04	1,3E+08
5,24E-04	1,1E+08
4,27E-04	9,5E+07
3,10E-04	7,6E+07
2,17E-04	5,7E+07
1,28E-04	3,8E+07

2- Fórmulas e expressões → que dorem surgir
 a medida que vai sendo precisar na análise!

(a) coeficiente de Ampliação

~~concepto~~

$$CAMP = \frac{2D}{b}$$

$$\mu(CAMP) = CAMP \sqrt{\left(\frac{\mu(D)}{D}\right)^2 + \left(\frac{\mu(b)}{b}\right)^2}$$

(b) Módulo de Young → n̄ foi usada a equação (2) do protocolo da experiência

pois foi encontrado um erro, que resultava numa diferença de 1 ordem de grandeza no resultado final. Após nova substituição de ΔL na lei de Hooke obteve a equação apresentada

$$E = \frac{8DL_0g}{\pi b \varphi^2} \left(\frac{m}{m'(\Delta L)} \right)$$

declive

dos gráficos

$m'(\Delta L)$

$$\mu(E) = E \sqrt{\left(\frac{\mu(D)}{D}\right)^2 + \left(\frac{\mu(b)}{b}\right)^2 + \left(\frac{\mu(L_0)}{L_0}\right)^2 + \left(\frac{\mu(m')}{m'}\right)^2 + \left(\frac{2\mu(\varphi)}{\varphi}\right)^2}$$

$$m' = \text{declive de } \frac{m}{m'(\Delta L)}$$

$$\text{erro (.)} = \frac{|\text{valor obtido} - \text{valor teórico}|}{\text{valor teórico}} \times 10^2$$

(c) Lei de Hooke

$$\sigma = E\lambda \quad \text{onde} \quad \sigma = \frac{F}{A} = \frac{mg}{\frac{\pi}{4} \varphi^2}$$

$$\lambda = \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{b \cdot Ad}{2D L_0}$$

E obtido a partir do declive de $m'(\Delta L)$!

com contribuições de cada uma?