

13.5

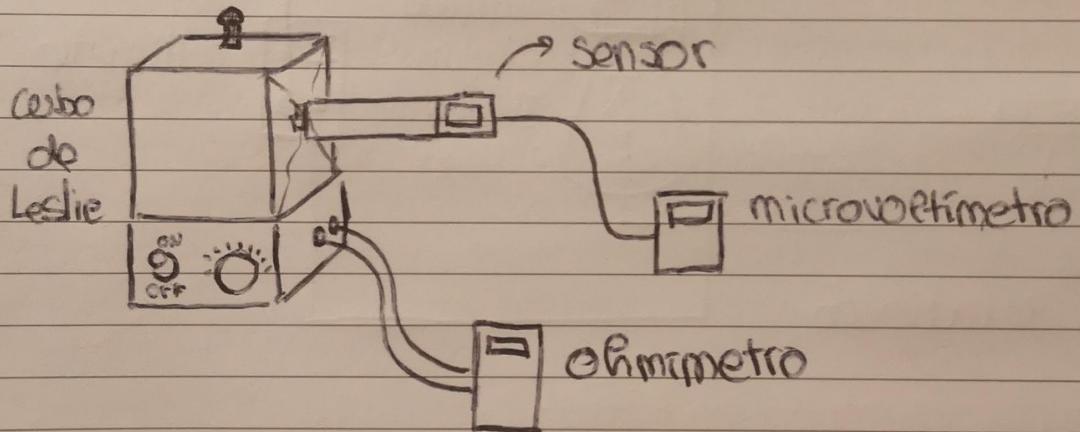
Beatriz Castro PL6 G1A
T2B: Estudo experimental da radiação térmica

Objetivos

- Apreciar qualitativamente a emissividade de vários materiais
- Verificar a lei de Stefan-Boltzmann

Cubo de Leslie

Esquema



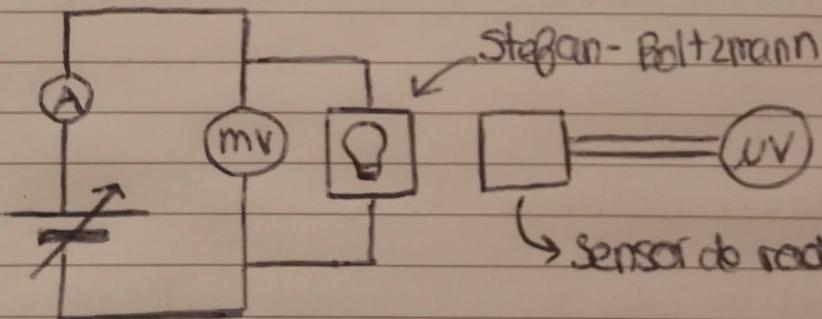
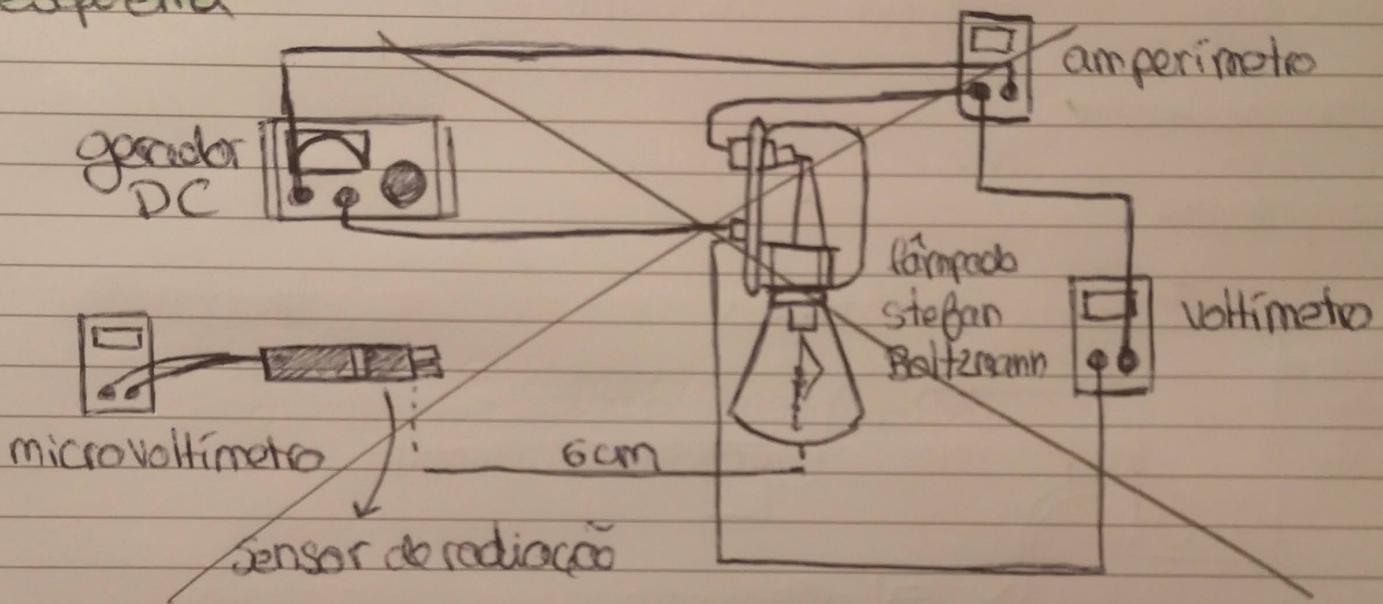
Procedimento

- Medir e registrar a radiação ambiente, R_{amb}
 - ↳ sensor afastado das fontes de calor
 - ↳ representa a quantidade de calor recebida do meio exterior e a quantidade de calor que o sensor emite
- Ligar o ohmímetro nos terminais do termistor do cubo de Leslie e iniciar o seu aquecimento utilizando a potência máxima, High
- Vigilar os valores da resistência do termistor até atingir cerca de $40\text{ k}\Omega$. Ajustar o controle da fonte para a posição 5

- Com o cubo a temperatura estável, em equilíbrio térmico com o exterior, para a potência da posição 5 do alimantador, realizar medições em aquecimento, até ao máximo que for possível

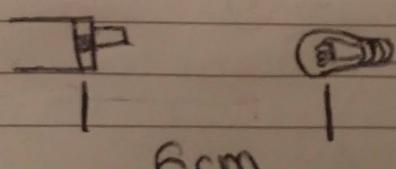
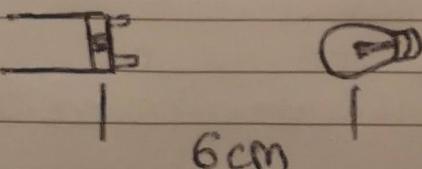
Lei de Stefan - Boltzmann

Esquema



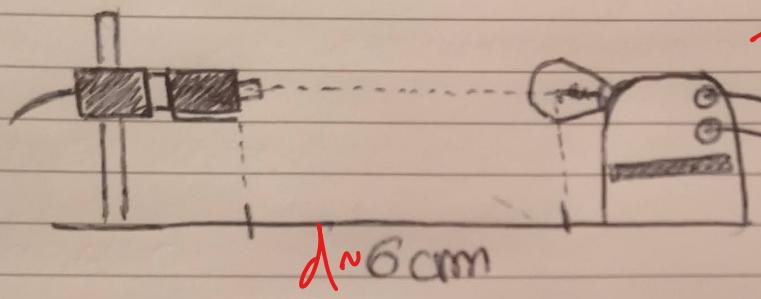
Topo

Lateral



Procedimento

- Medir, com tensão inferior a 0,1V, a resistência da lâmpada de Stefan Boltzmann, Ramb.
- Ajustar a altura do sensor no suporte, alinhar o sensor com o centro de filamento da lâmpada



o que é mais relevante
para respeito a d ? que diz
que é mais relevante
porque 6 cm?

- Entre 1V e 12V, variando V, registra-se tanto em aquecimento como arrefecimento, valores (V, I, Vs)
 - ↳ V e I são obtidos no circuito da lâmpada
 - ↳ V_s é leida no microvoltímetro ligado ao sensor
- Projeta o sensor, executa a experiência rapidamente, troca regularmente o sensor

Usar valores simétricos (aquecimento e arrefecimento), tirando a média dos valores pelo o mesmo ✓

Equações

$$V_s = A \epsilon \sigma T^4 \rightarrow \text{Lei de Stefan Boltzmann}$$

$\sigma \rightarrow$ constante

$\epsilon \rightarrow$ emissividade do tungsténio

$A \rightarrow$ área superficial sólida do filamento

$V_s \rightarrow$ intensidade radiada para área A

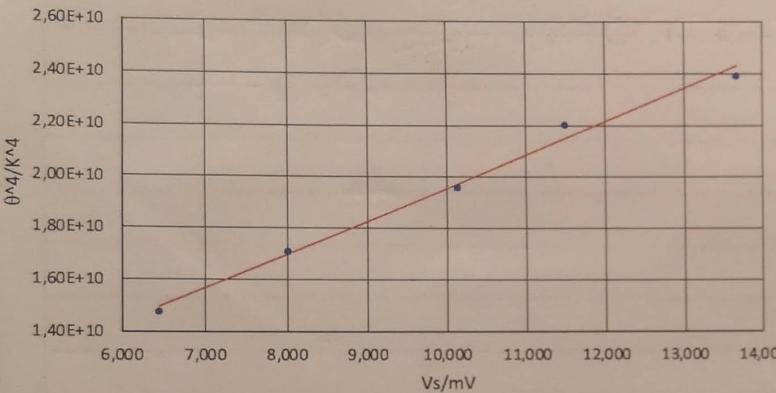
MLST

Cubo de Leslie

Face preta

R	Vs	θ, K	θ^4	q ajuste	Resíduos (q)	R/q) relativos
11600	6,440	348,7	1,48E+10	1,50E+10	2,00E+08	1,332
8000	8,015	361,8	1,71E+10	1,70E+10	-1,14E+08	-0,672
5400	10,130	374,2	1,96E+10	1,97E+10	1,23E+08	0,621
3800	11,494	385,4	2,21E+10	2,15E+10	-5,65E+08	-2,628
3000	13,670	393,4	2,39E+10	2,43E+10	3,57E+08	1,470

q(Vs) face preta



• Dados exp
— Ajuste

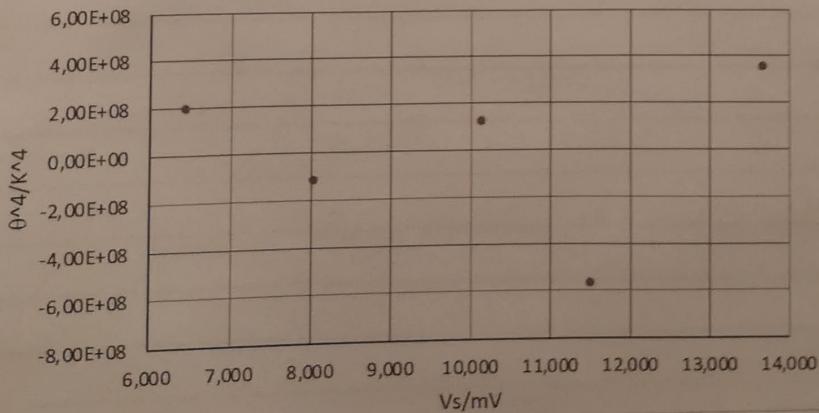
m	1288836327	y	6682777288
σ_m	72868629	y_{aj}	748323326
r^2	0,991	σ_{yaj}	414257102

alg? signif. erros!

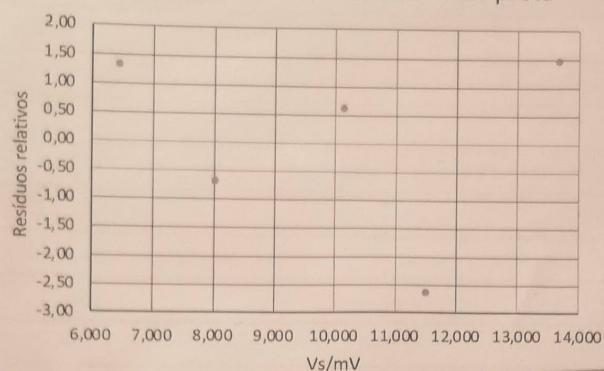


A temperatura θ , apresentada na tabela, é conseguida através da conversão resistência/temperatura, apresentada nos anexos dos apontamentos do trabalho T2B.

Resíduos face preta



Resíduos relativos face preta



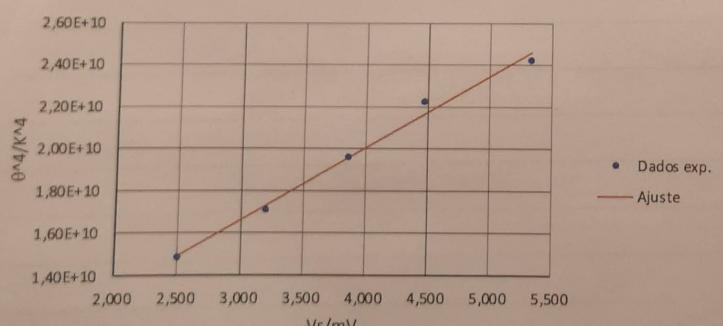
• Resíduos relativos

Os resíduos apresentam uma distribuição aleatória e nenhum ponto foi considerado deviido.

face branca

R	Vs, V	θ_K	θ^4	q ajuste	Resíduos (q)	R(q) relativo
11500,0	2,504	349,3	1,49E+10	1,494E+10	4,75E+07	0,32
8000,0	3,200	361,8	1,71E+10	1,732E+10	1,94E+08	1,12
5400,0	3,864	374,2	1,96E+10	1,959E+10	-2,55E+07	-0,13
3700,0	4,472	386,3	2,23E+10	2,167E+10	-5,93E+08	-2,74
2900,0	5,333	394,6	2,42E+10	2,461E+10	3,77E+08	1,53

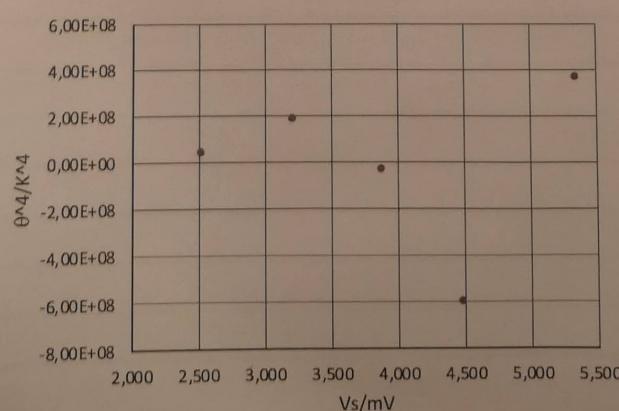
$\theta^4(Vs)$ face branca



Dados exp.
Ajuste

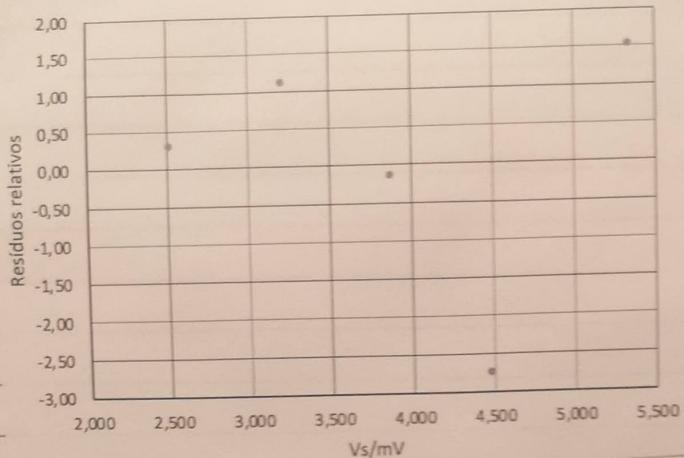
m	3417931479	y
σ_m	192340666	y_{ej}
r^2	0,991	422167352 $\sigma_{y ej}$

Resíduos face branca



• Resíduos

Resíduos relativos face branca



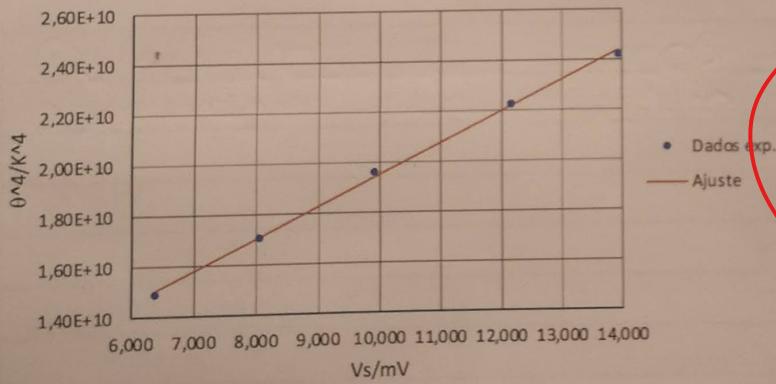
Série1

Os resíduos são aleatórios e não apresentam uma tendência

Face baça

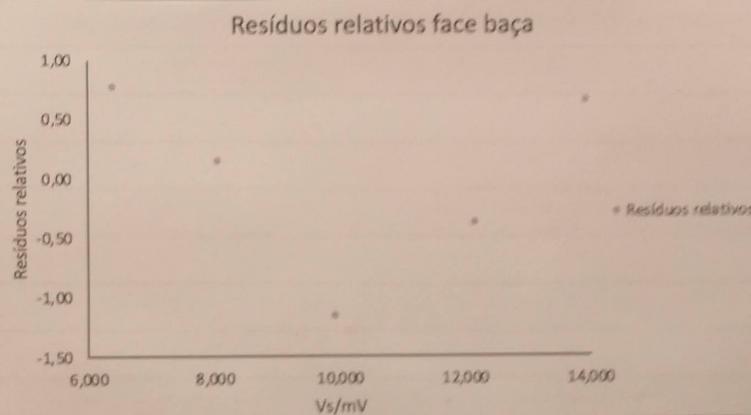
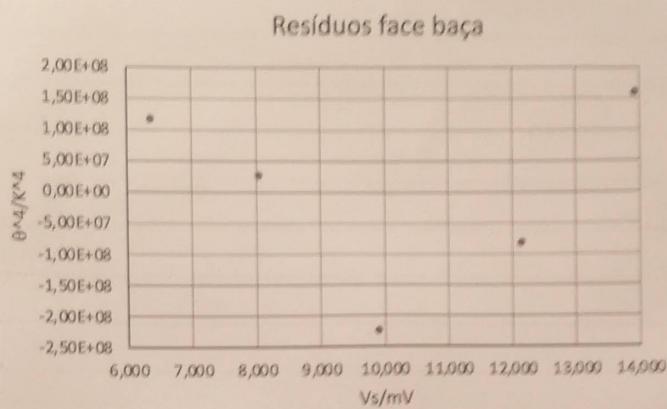
R _{1,2,3,4}	V _s	θ_1	θ^4	q ajuste	Resíduos (q)	R _{1,2,3,4} relativos
11500	6,370	349,3	1,49E+10	1,50E+10	1,18E+08	0,78
8100	8,040	361,4	1,71E+10	1,71E+10	2,66E+07	0,16
5400	9,901	374,2	1,96E+10	1,94E+10	-2,24E+08	-1,15
3700	12,149	386,3	2,23E+10	2,22E+10	-8,11E+07	-0,37
2900	13,934	394,6	2,42E+10	2,44E+10	1,61E+08	0,66

$\theta^4(V_s)$ face baça



Dados exp.
Ajuste

m	1240413963	y
σ_m	29522393	y_m
r^2	0,9981	179800368 σ_{y_m}

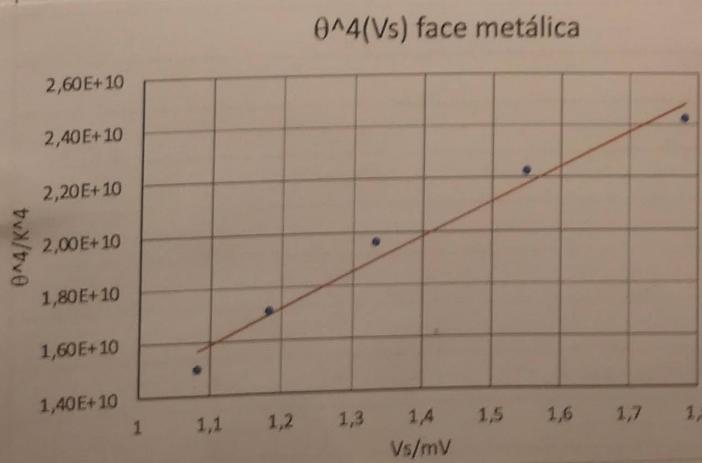


Os resíduos apresentam uma distribuição aleatória

Face metalizada

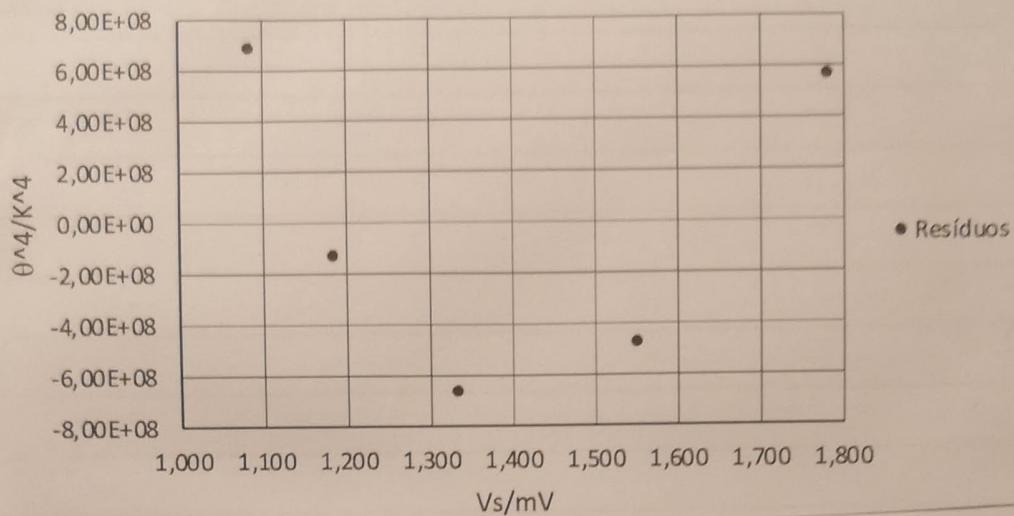
R	Vs	θK	θ^4	q ajuste	Resíduos (q)	R(q) relativos
11400	1,083	350,0	1,50E+10	1,57E+10	6,92E+08	4,41
8000	1,183	361,8	1,71E+10	1,70E+10	-1,30E+08	-0,77
5400	1,333	374,2	1,96E+10	1,90E+10	-6,60E+08	-3,48
3700	1,550	386,3	2,23E+10	2,18E+10	-4,73E+08	-2,17
2900	1,781	394,6	2,42E+10	2,48E+10	5,71E+08	2,30

p/qui?

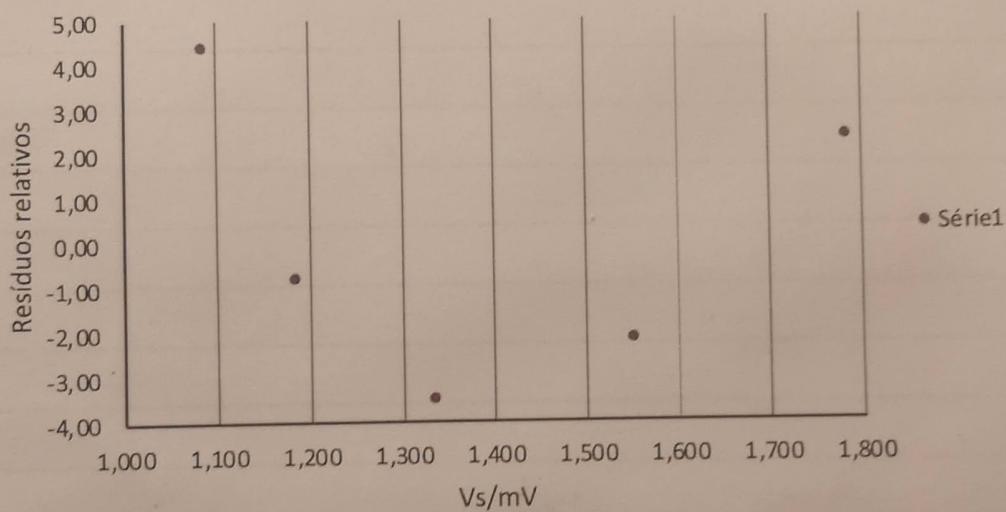


m	13058455543	1548774148	y
m	1244856339	1753766052	y
y	0,97	702818152	o

Resíduos face metálica

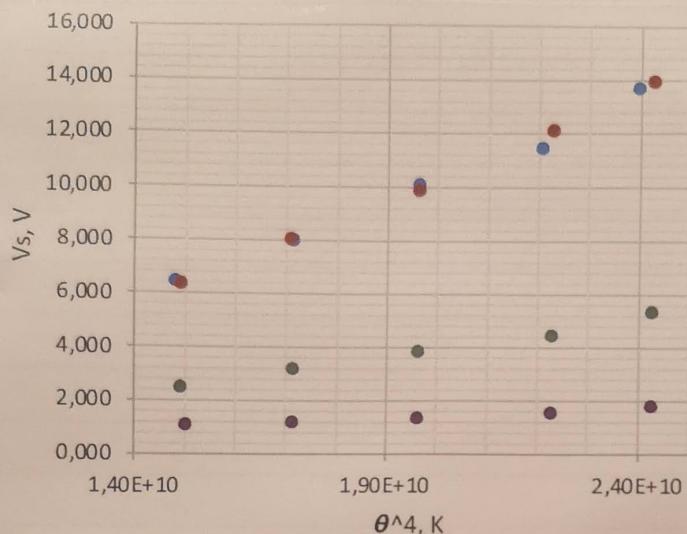


Resíduos relativos face metálica



Os resíduos apresentados são pequenos, mas apresentam uma tendência parabólica

Só interessam os todos
 - graficos e os dados respetivos de
 - linhas e ojuns
 - Residuo que incluem os dados faces



Consideremos a emissividade da face preta como 1 e igual a um
 $E_{\text{preta}} = 1$.

Por comparação, podemos perceber que a emissividade da face baça é bastante parecida com a da face preta
 $E_{\text{baça}} \approx 1$

A face branca tem uma emissividade bastante mais baixa, comparativamente com a face preta, e a face metalizada é ainda mais baixa que a da face branca.
 $E_{\text{branca}} > E_{\text{metalizada}}$

$$E_{\text{preta}} \approx E_{\text{baça}} > E_{\text{branca}} > E_{\text{metalizada}}$$

Leide Stefan Boltzmann

$$R_{amb} = 1,0406 \text{ unid? ine.?}$$

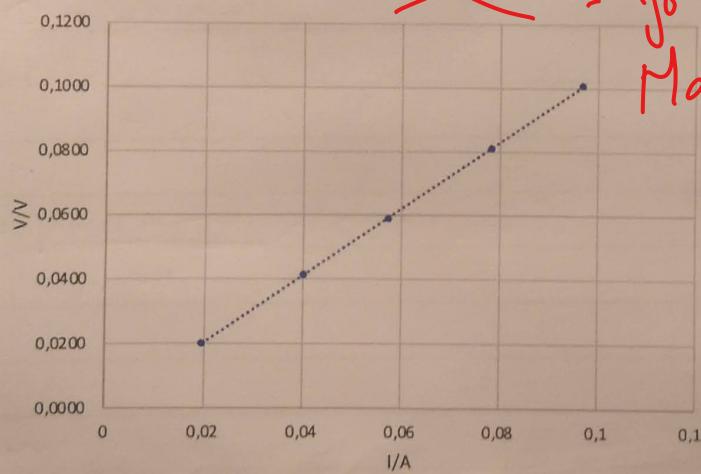
I/A	V/V
0,01976	0,0202
0,04020	0,0413
0,05730	0,0590
0,07840	0,0810
0,09710	0,1007

Muitos pontos!

Falta dureza: que digam
tabela/gráfico
repetit o que?
estudo.

V/mV	I/mA	R	P/mW	θ	V _d /mV	P _d /mW
1,18	0,620	1,83	731,6	479,52	0,100	2321,4
2,42	0,804	2,89	1945,7	679,47	0,400	2839,3
3,44	0,933	3,54	3209,5	800,13	0,921	3738,6
4,71	1,080	4,19	5086,8	919,00	1,788	5235,3
5,72	1,180	4,66	6749,6	1003,99	2,680	6775,1
6,57	1,265	4,99	8311,1	1064,09	3,588	8342,5
7,32	1,336	5,27	9779,5	1113,38	4,421	9780,4
8,26	1,420	5,59	11729,2	1171,45	5,560	11746,6
9,17	1,500	5,87	13755,0	1222,13	6,677	13674,8
10,35	1,597	6,23	16529,0	1284,64	8,274	16431,6
11,30	1,670	6,50	18871,0	1332,95	9,714	18917,4
12,07	1,729	6,71	20869,0	1369,08	10,877	20925,0

R(P)	Rrel(P)	log(Vs)	log(q)	Log(Vs)aj	R(Log(Vs))	Rrel(Log(Vs))	θ ^A	θ ^A _d	θ _d	R(θ ^A)	R(θ ^A) _d
1589,8	68,48	-1,00	2,68	-1,00	0,00	-0,16	5,29E+10	2,2E+11	685	1,67E+11	75,95
893,6	31,47	-0,40	2,83	-0,32	0,08	-24,12	2,13E+11	3,1E+11	747	9,84E+10	31,58
529,1	14,15	-0,04	2,90	0,00	0,03	-1222,97	4,10E+11	4,7E+11	828	6,09E+10	12,93
148,5	2,84	0,25	2,96	0,27	0,01	5,36	7,13E+11	7,4E+11	926	2,24E+10	3,05
25,5	0,38	0,43	3,00	0,44	0,01	2,40	1,02E+12	1,0E+12	1002	-7,71E+09	-0,76
31,4	0,38	0,55	3,03	0,55	0,00	-0,56	1,28E+12	1,3E+12	1065	3,77E+09	0,29
0,9	0,01	0,65	3,05	0,64	-0,01	-0,89	1,54E+12	1,5E+12	1114	3,78E+09	0,25
17,4	0,15	0,75	3,07	0,74	-0,01	-0,87	1,88E+12	1,9E+12	1172	5,36E+09	0,28
-80,2	-0,59	0,82	3,09	0,82	0,00	-0,43	2,23E+12	2,2E+12	1222	-9,60E+08	-0,04
-97,3	-0,59	0,92	3,11	0,92	0,00	0,04	2,72E+12	2,7E+12	1284	-5,56E+09	-0,20
46,4	0,25	0,99	3,12	0,99	0,00	0,25	3,16E+12	3,2E+12	1333	1,17E+09	0,04
56,0	0,27	1,04	3,14	1,04	0,01	0,52	3,51E+12	3,5E+12	1369	1,58E+08	0,00

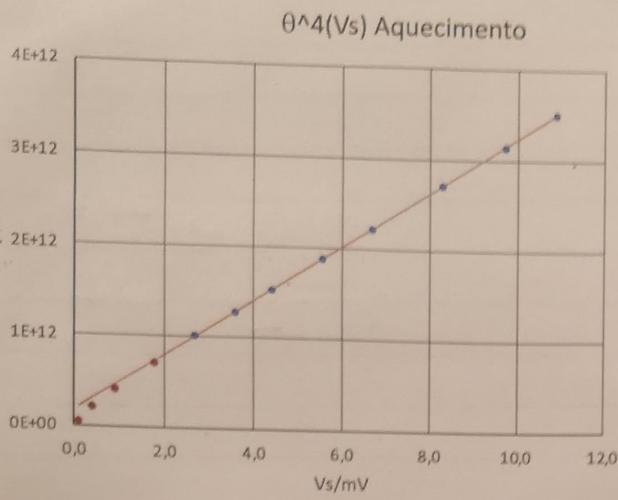


Info relevante em falta!
Mal formatado

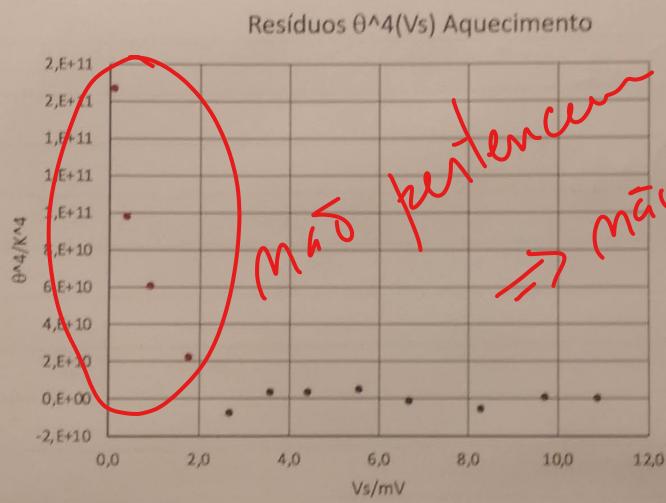
mais / Dev
ser ajuste lim
Ramb van ter

$$\begin{aligned} P &= VI \\ V &= mI + b \\ \frac{V}{I} &= m \end{aligned}$$

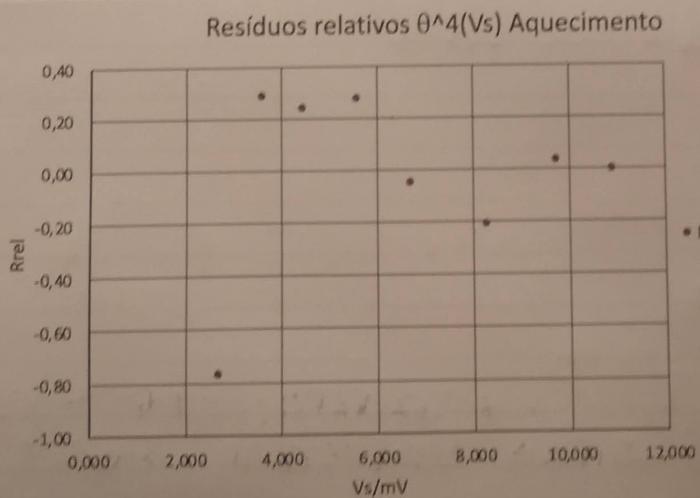
Existe uma relação linear entre P e V, tal que P ∝ V (incerteza associada?)



m	4,48	y
σ_m	0,05	y_{aj}
r^2	0,9992	$\sigma_{y_{aj}}$

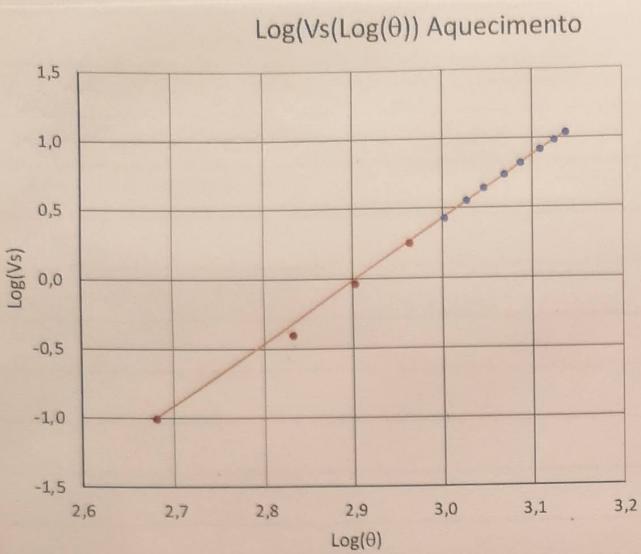


Mais pertencem
máis intenso representar
a ajuste \Rightarrow
aqui!



\rightarrow para que
será este
gráfico?

Os resíduos apresentaram alguns pontos duvidosos; excluindo estes, os resíduos são pequenos e aleatórios.



- Dados exp.
- Ajuste
- Pontos duvidosos

m	4,48	-130E+01	y
σ_m	0,05	1,5E-01	σ_y
r^2	0,9992	6,3E-03	σ_{yaj}

$$\log(V_s) = m \log(T) + b$$

$$\Leftrightarrow \log(V_s) = \log(T^m) + b$$

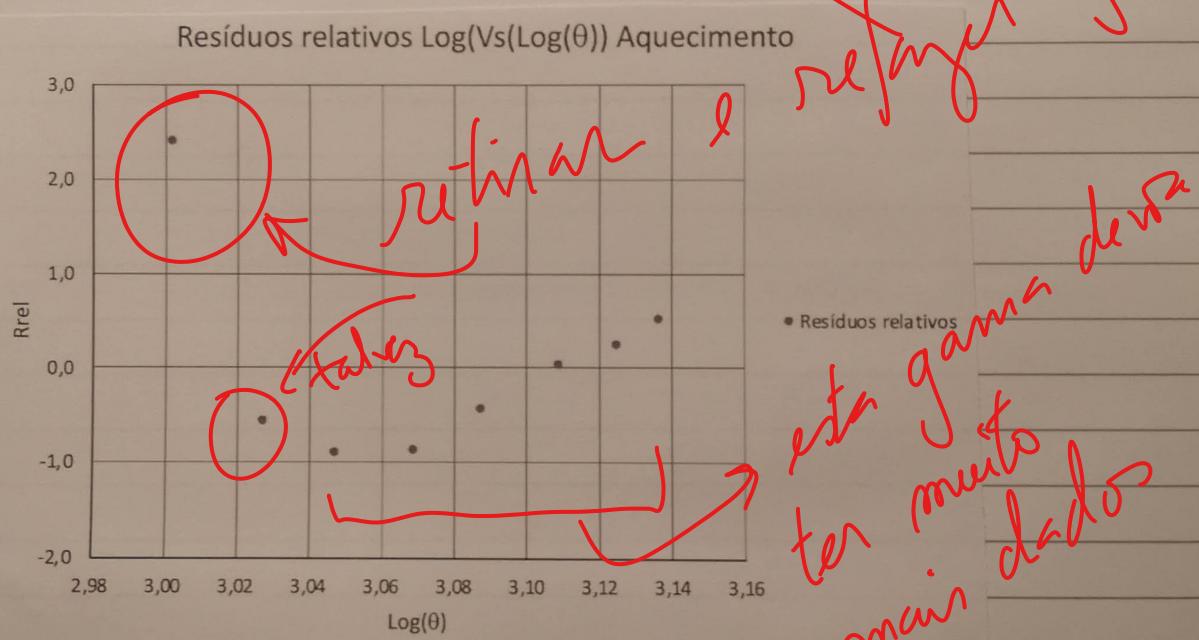
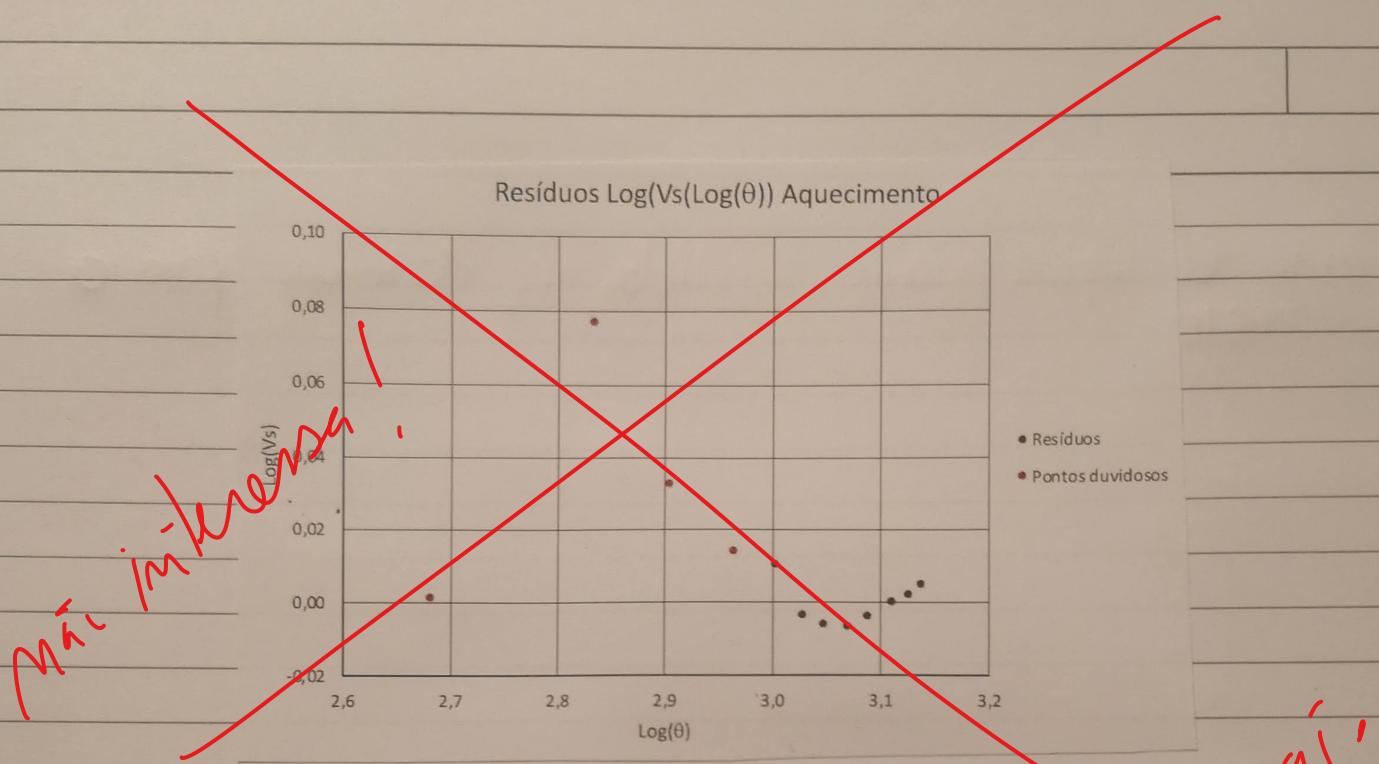
$$\Leftrightarrow V_s = T^m + 10^b$$

$$m = 4,48 \pm 0,05$$

$$V_s = T^{4,48} + 10^b$$

$$\text{Erro relativo} = \frac{|4,48 - 4|}{4} \times 100 = 1,2\%$$

Como temos $V \propto T^{4,48}$, e sabemos que $P \propto V$, verificamos a lei de Stefan-Boltzmann, $P \propto T^4$



Os resíduos apresentam-nos pontos duvidosos, além de terem uma certa tendência parabólica

observações / comentários

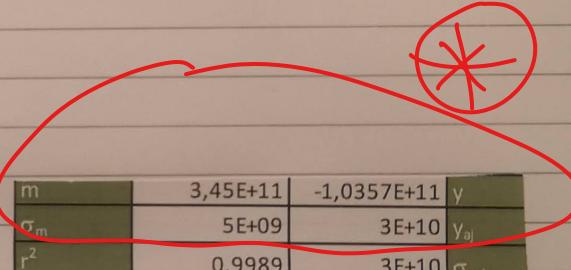
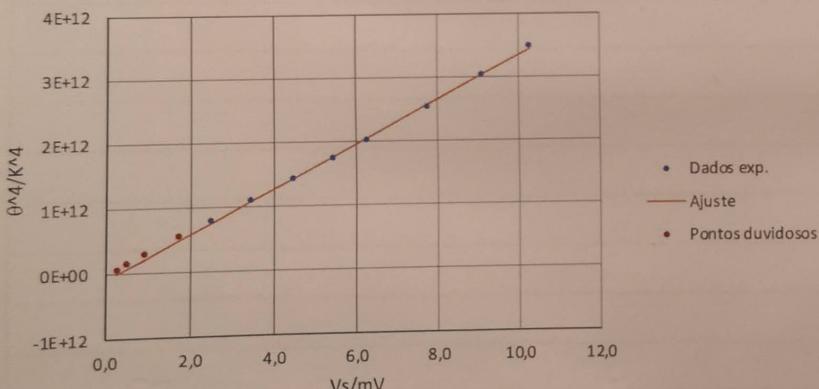
Não identificam aquecimento

Esta parte da experiência foi repetida, mas desta vez para o arrefecimento

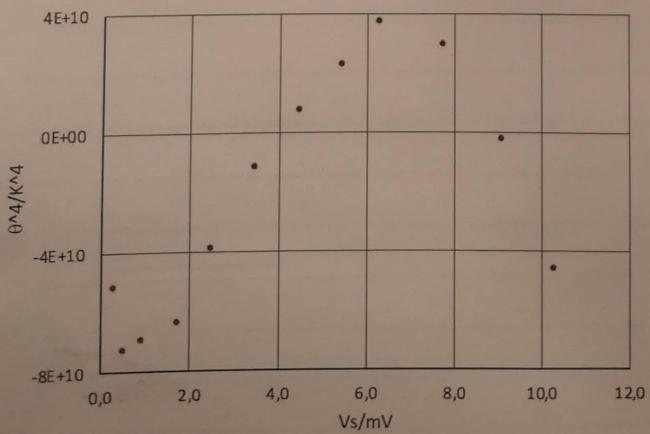
V/mV	I/mA	R	P/mW	θ	V _i /mV	P _{aj} /mW	R(P)	R _{rel} (P)
12,13	1,742	6,69	21130,46	1366,1	10,268	20827,0	-303,4	-1,46
11,10	1,660	6,43	18426,00	1319,5	9,084	18485,5	59,5	0,32
9,96	1,569	6,10	15627,24	1262,1	7,744	15835,4	208,2	1,31
8,70	1,465	5,71	12745,50	1192,3	6,269	12918,4	172,9	1,34
7,96	1,400	5,46	11144,00	1148,9	5,420	11239,4	95,4	0,85
7,08	1,320	5,15	9345,60	1093,5	4,468	9356,6	11,0	0,12
6,06	1,223	4,76	7411,38	1022,7	3,440	7323,6	-87,8	-1,20
5,00	1,113	4,32	5565,00	942,0	2,472	5409,2	-155,8	-2,88
4,07	1,007	3,88	4098,49	862,8	1,724	3930,0	-168,5	-4,29
2,79	0,848	3,16	2365,92	729,6	0,921	2341,9	-24,0	-1,03
1,93	0,728	2,55	1405,04	615,0	0,505	1519,2	114,2	7,51
0,99	0,552	1,72	546,48	459,5	0,280	1074,2	527,7	49,13

log(Vs)	log(q)	Log(Vs) _{aj}	R(Log(Vs))	R _{rel} (Log(Vs))	θ ⁴	θ ⁴ _{aj}	θ _{aj}	R(θ ⁴)	R(θ ⁴) _{rel}
1,0	3,1	1,0	0,007	0,67	3,48E+12	3,4E+12	1361,6	-4,57E+10	-1,33
1,0	3,1	1,0	0,002	0,23	3,03E+12	3,0E+12	1319,2	-2,27E+09	-0,07
0,9	3,1	0,9	-0,003	-0,29	2,54E+12	2,6E+12	1265,8	2,97E+10	1,16
0,8	3,1	0,8	-0,006	-0,70	2,02E+12	2,1E+12	1197,8	3,75E+10	1,82
0,7	3,1	0,7	-0,004	-0,55	1,74E+12	1,8E+12	1152,7	2,29E+10	1,30
0,7	3,0	0,6	-0,003	-0,40	1,43E+12	1,4E+12	1094,9	7,53E+09	0,52
0,5	3,0	0,5	0,000	-0,09	1,09E+12	1,1E+12	1020,1	-1,12E+10	-1,04
0,4	3,0	0,4	0,006	1,54	7,87E+11	7,5E+11	930,3	-3,85E+10	-5,15
0,2	2,9	0,3	0,016	6,50	5,54E+11	4,9E+11	837,1	-6,33E+10	-12,90
0,0	2,9	0,0	0,009	-34,95	2,83E+11	2,1E+11	680,2	-6,93E+10	-32,36
-0,3	2,8	-0,3	-0,014	4,58	1,43E+11	7,1E+10	515,4	-7,25E+10	-102,71
-0,6	2,7	-0,8	-0,244	30,58	4,46E+10	-7,0E+09	#NÚM!	-5,16E+10	735,66

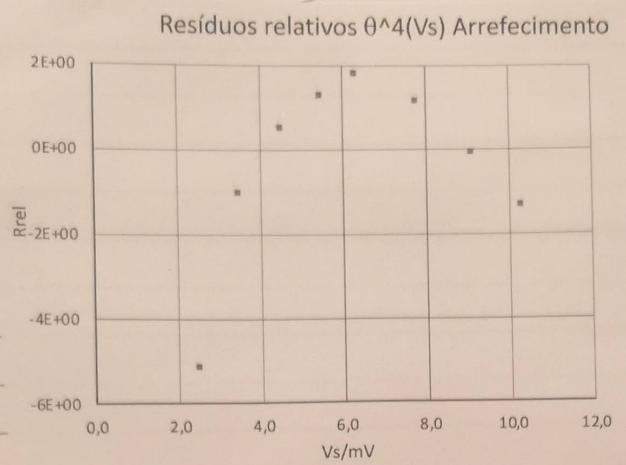
θ⁴(Vs) Arrefecimento



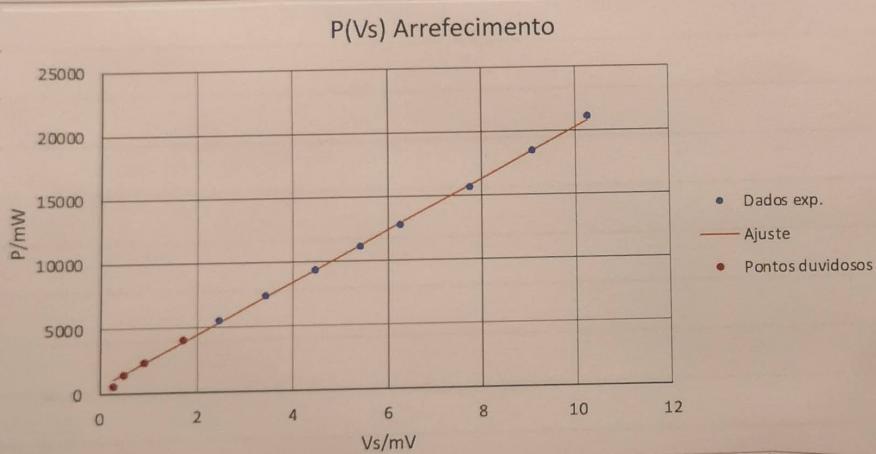
Resíduos θ⁴(Vs) Arrefecimento



- Resíduos
- Pontos duvidosos

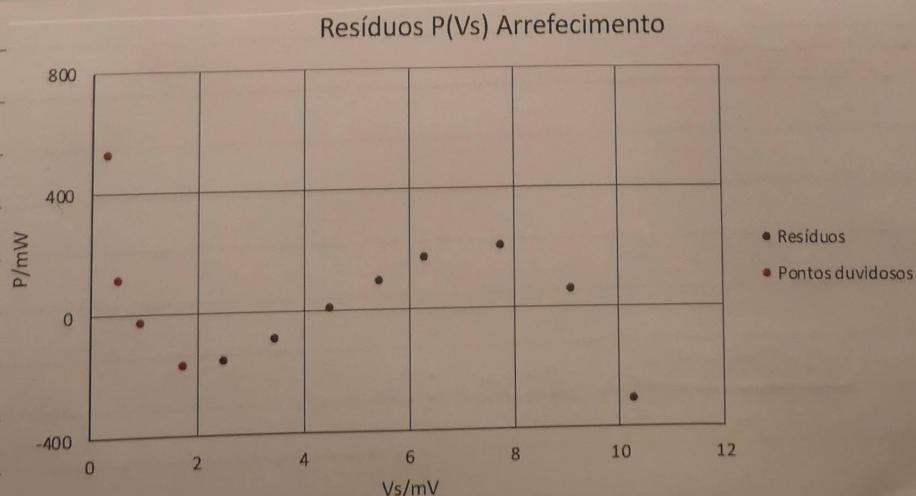


Os resíduos apresentam-nos pontos duvidosos, além de terem uma tendência probabilística

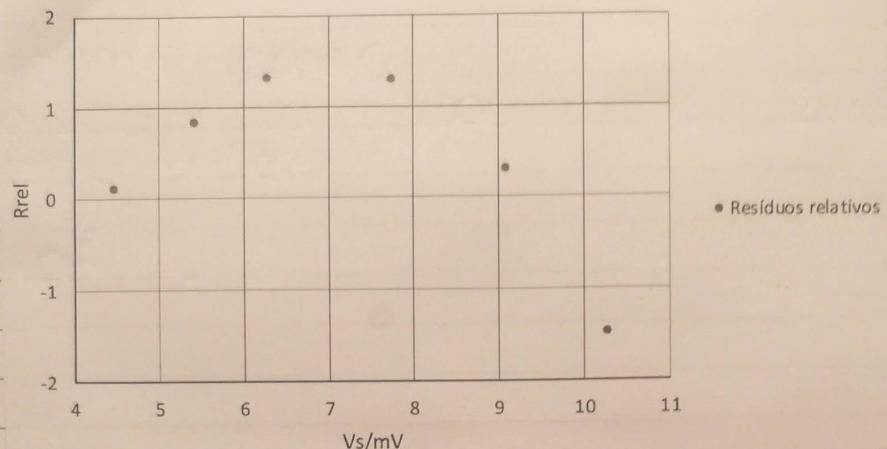


m	1978	520	y
σ_m	26	172	y_{aj}
r^2	0,9990	187	σ_{yaj}

A relação entre P e V_s é linear, pelo que podemos afirmar P \propto V

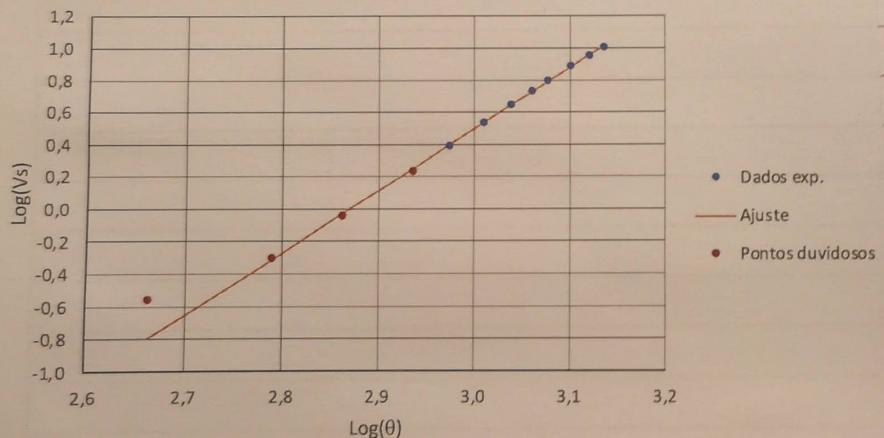


Resíduos relativos $P(V_s)$ Arrefecimento



Os resíduos mostram-nos pontos duvidosos e apresentam uma certa tendência.

$\log(V_s(\log(\theta)))$ Arrefecimento



m	3,84	$-11,007$	y
σ_m	0,03	$0,105$	y_{aj}
r^2	0,9995	0,005	σ_{yaj}

$$\log(V_s) = m \log(\theta) + b$$

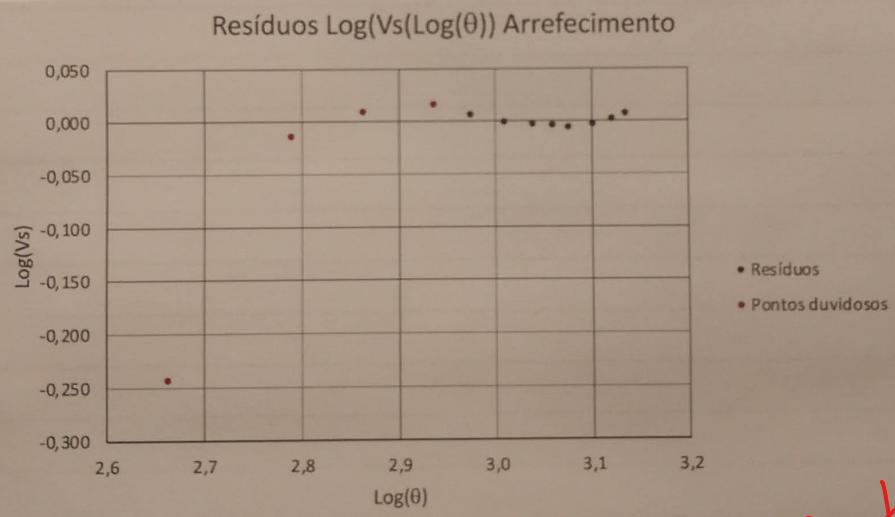
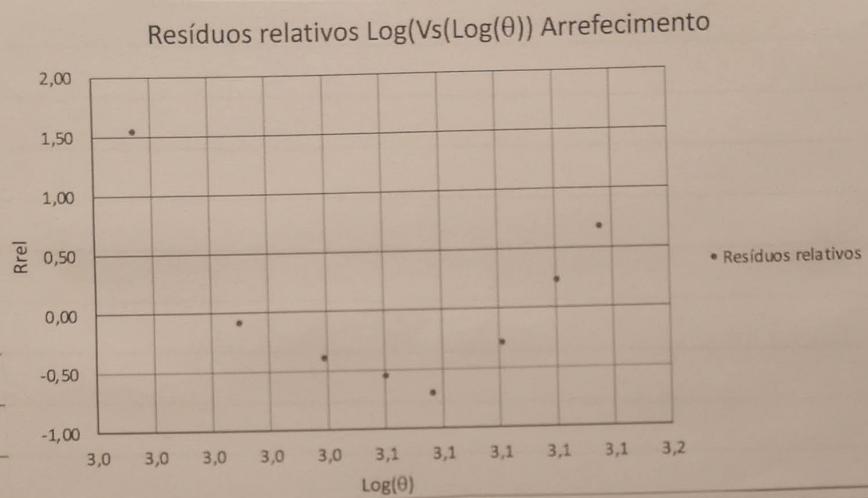
$$\Leftrightarrow \log(V_s) = \log(\theta^m) + b$$

$$\Leftrightarrow V_s = \theta^m + b$$

$$\Leftrightarrow V_s = \theta^{3,84} + b$$

$$E_{\text{relativo}} = \frac{13,84 - 41}{4} \times 100 = 41\%$$

A lei de Stefan-Boltzmann é, assim, também verificada para o arrefecimento, com um erro relativo menor do que o conseguido no aquecimento



Os resíduos apresentam pontos duvidosos e uma certa tendência.

NOTA: Em geral os ajustes não estão bem feitos

feitos

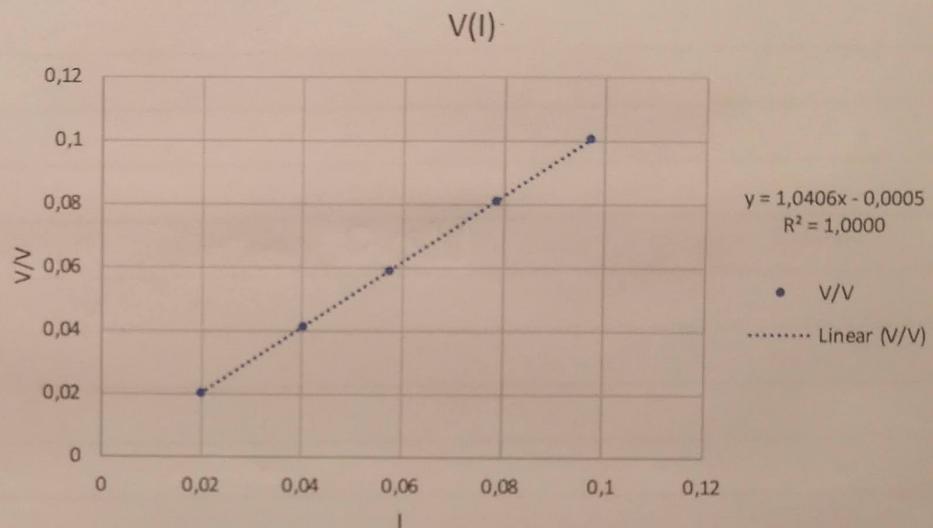
correções idênticas às anteriores

Stefan-Boltzmann tapado

(colocando uma tábua de madeira entre a lâmpada e o sensor entre medições)

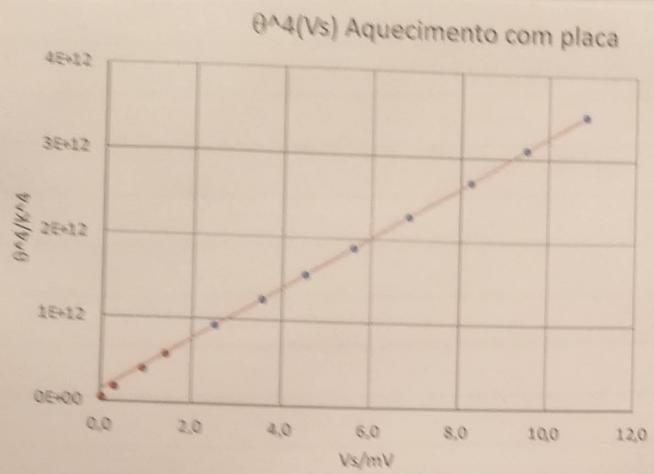
$R_{amb} = 1,0406$ unidade? incerteza?

I/A	V/V
0,01976	0,0202
0,0402	0,0413
0,0573	0,059
0,0784	0,081
0,0971	0,1007

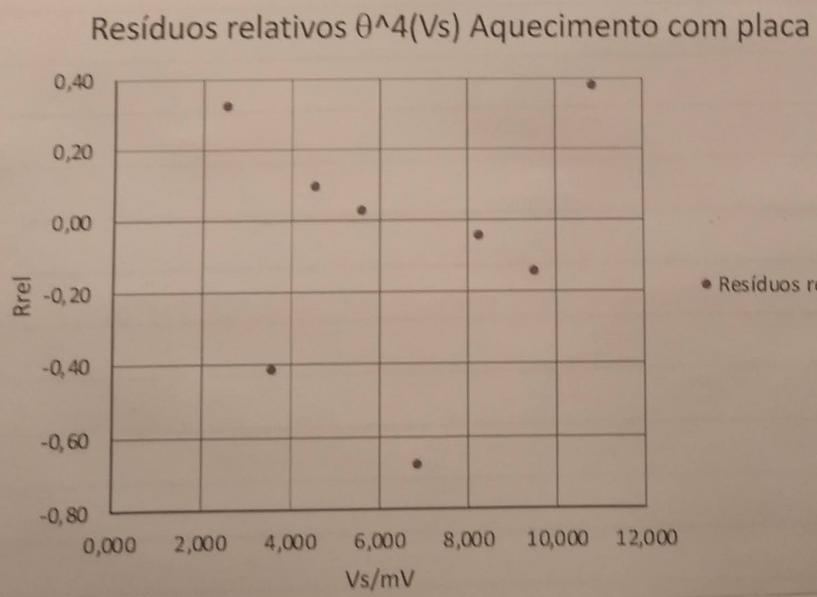
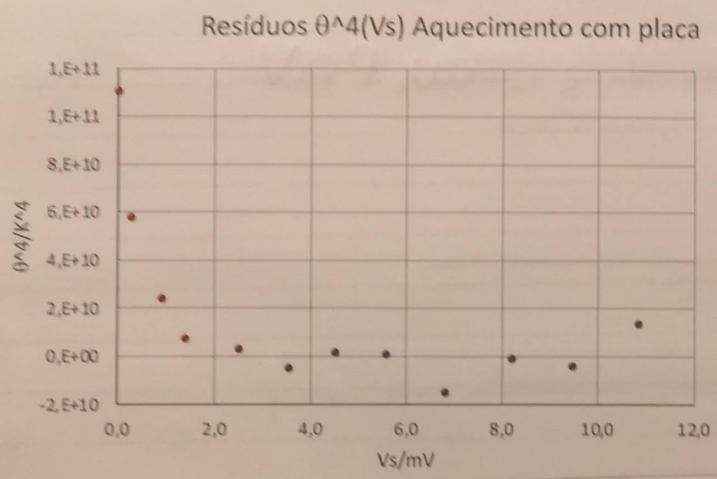


V/mV	I/mA	R	θ	V_s	P/mW	Pa/mW	R(P)	Rrel(P)	log(q)
1,05	0,610	1,65	446,3	0,031	640,5	2205,3	1564,8	70,96	2,65
2,21	0,783	2,71	645,8	0,294	1730,4	2660,5	930,1	34,96	2,81
3,45	0,941	3,52	796,5	0,918	3246,5	3740,5	494,1	13,21	2,90
4,21	1,030	3,93	870,9	1,420	4336,3	4609,4	273,1	5,92	2,94
5,50	1,169	4,52	979,1	2,510	6429,5	6495,9	66,4	1,02	2,99
6,56	1,271	4,96	1058,5	3,563	8337,8	8318,4	-19,4	-0,23	3,02
7,40	1,348	5,28	1115,2	4,520	9975,2	9974,7	-0,5	-0,01	3,05
8,29	1,426	5,59	1170,9	5,585	11821,5	11817,9	-3,6	-0,03	3,07
9,30	1,511	5,91	1229,2	6,830	14052,3	13972,7	-79,6	-0,57	3,09
10,30	1,593	6,21	1282,1	8,220	16407,9	16378,5	-29,4	-0,18	3,11
11,18	1,661	6,47	1326,9	9,489	18570,0	18574,8	4,8	0,03	3,12
12,06	1,729	6,70	1368,1	10,840	20851,7	20913,0	61,3	0,29	3,14

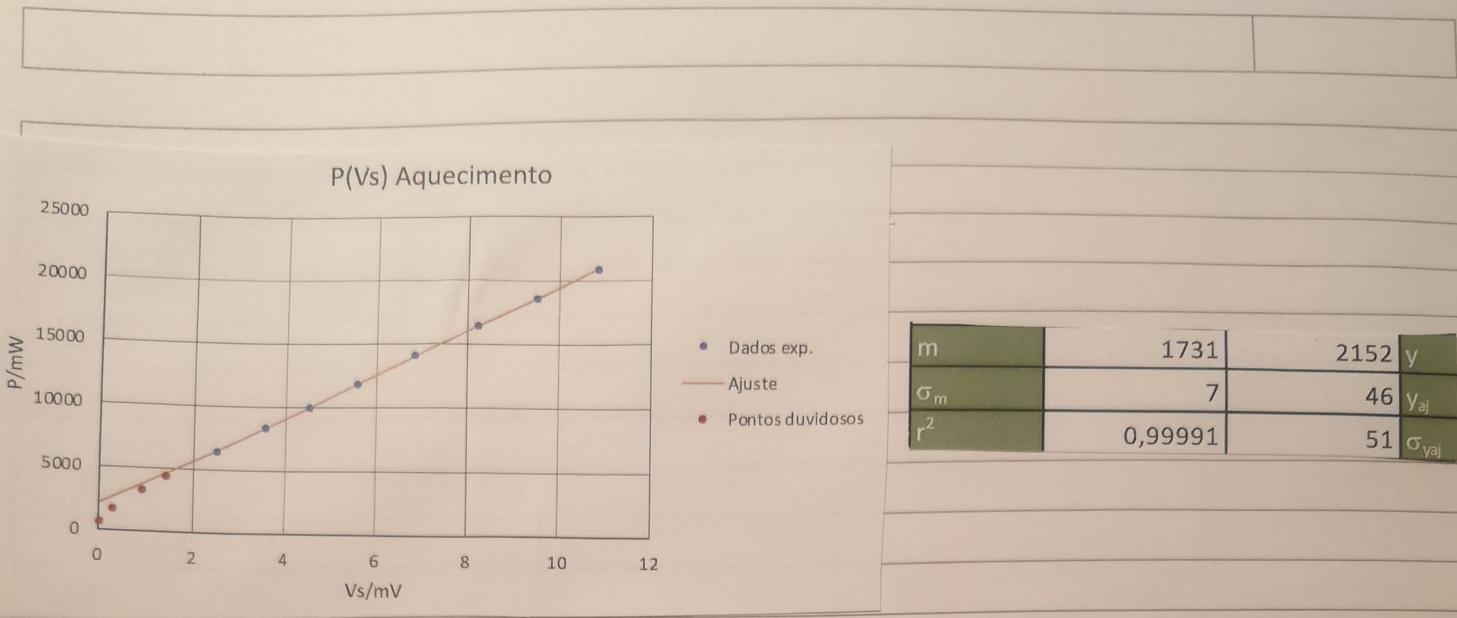
$\log(V_s)$	$\log(V_s)_{aj}$	$R(\log(V_s))$	$Rrel(\log(V_s))$	θ^4	θ^4_{aj}	θ_{aj}	$R(\theta^4)$	$R(\theta^4)_{rel}$
-1,51	-1,08	0,426	-39,41	39685244755	1,50E+11	622,3	1,10315E+11	73,54
-0,53	-0,38	0,149	-38,80	1,7398E+11	2,32E+11	694,0	57938413165	24,98
-0,04	0,01	0,051	373,10	4,024E+11	4,26E+11	808,0	23881479136	5,60
0,15	0,18	0,030	16,62	5,75231E+11	5,83E+11	873,7	7412973646	1,27
0,40	0,40	0,005	1,15	9,19144E+11	9,22E+11	979,9	3012731618	0,33
0,55	0,55	0,000	-0,01	1,25527E+12	1,25E+12	1057,4	-5122394440	-0,41
0,66	0,65	-0,005	-0,71	1,54673E+12	1,55E+12	1115,5	1501496278	0,10
0,75	0,74	-0,004	-0,58	1,87938E+12	1,88E+12	1170,9	576455405,7	0,03
0,83	0,83	0,000	0,04	2,28302E+12	2,27E+12	1227,2	-15268513024	-0,67
0,91	0,91	0,000	-0,05	2,70185E+12	2,70E+12	1281,9	-1148623545	-0,04
0,98	0,98	0,002	0,23	3,10036E+12	3,10E+12	1326,5	-4391710218	-0,14
1,04	1,04	0,002	0,22	3,50335E+12	3,52E+12	1369,4	13427584279	0,38



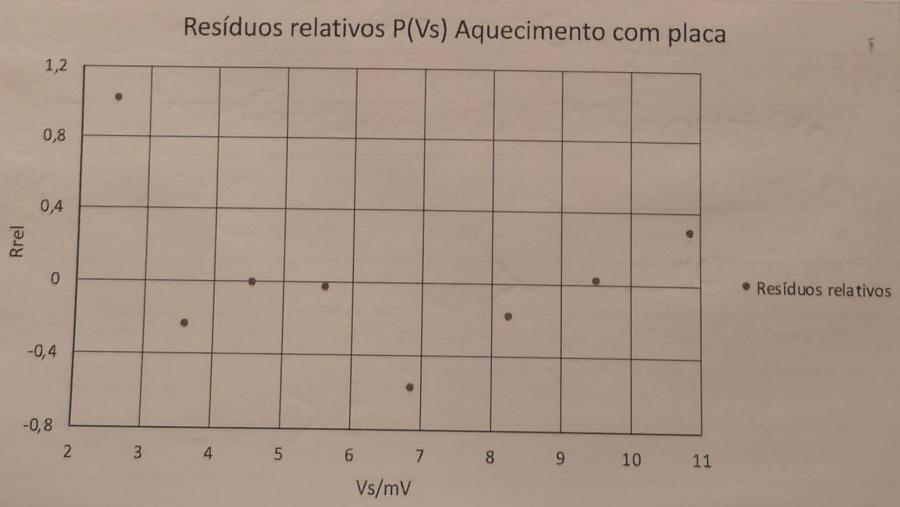
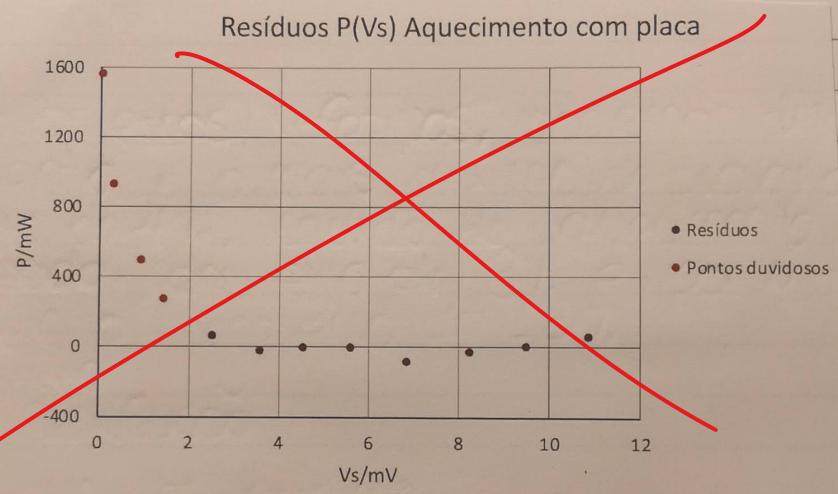
m	3,11479E+11	1,40344E+11	y
σ_m	954841217,9	6320876698	y_{aj}
r^2	0,99993	8675815408	σ_{yaj}



Os resíduos apresentam pontos duvidosos, são abatérios e pequenos

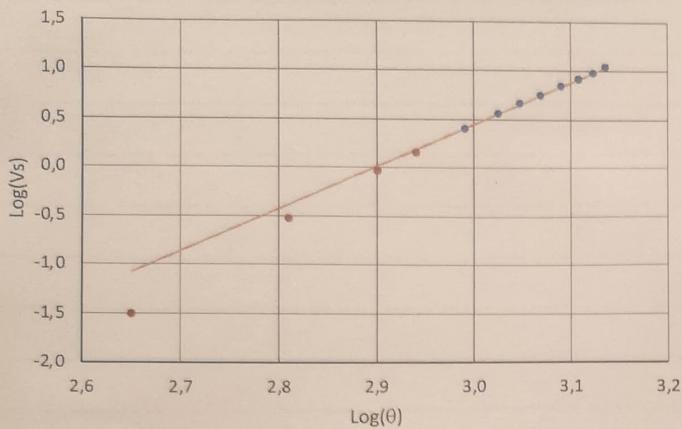


A relação entre $P \circ V_s$ é linear, $P \circ V$



Há pontos duvidosos, os resíduos são abatórios

Log(V_s(Log(θ))) Aquecimento



● Dados exp.
 — Ajuste
 ● Pontos duvidosos

m	4,36	-12,626	y
σ_m	0,03	0,080	y_{aj}
r^2	0,9998	0,003	σ_{yaj}

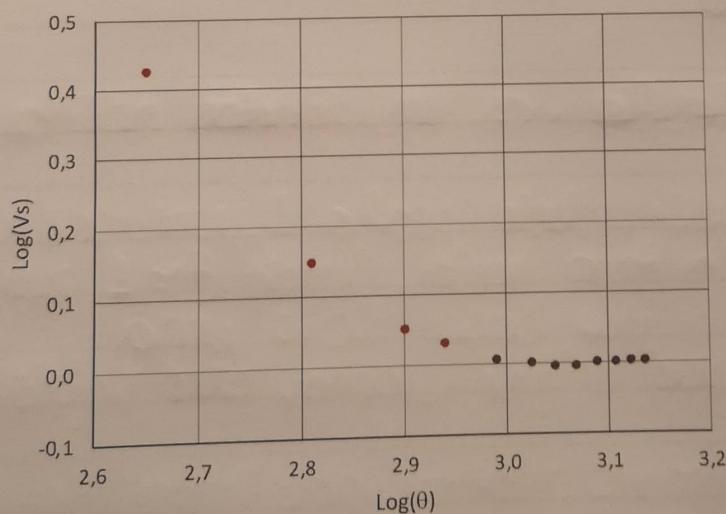
$$\log(V_s) = \log(T^m) + b$$

$$\Leftrightarrow V_s = T^m + 10^b$$

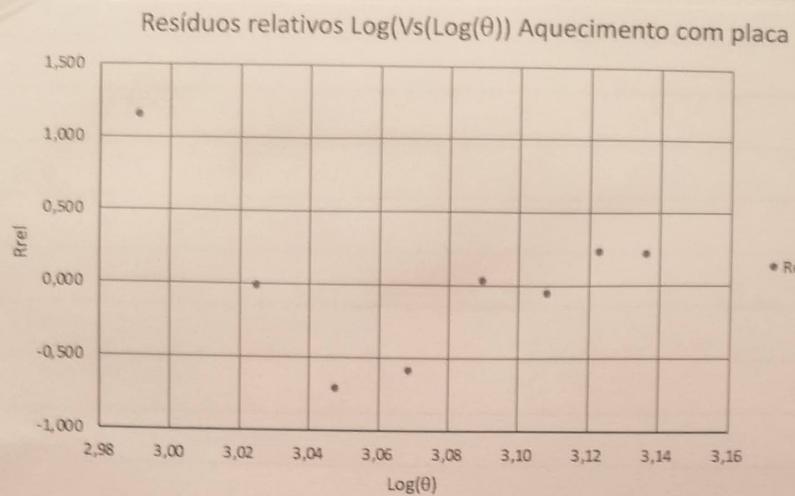
$$\Leftrightarrow V_s = T^{4,36} + 10^b$$

$$E_{relativo} = \frac{|4,36 - 4|}{4} \times 100 = 9\%$$

Resíduos Log(V_s(Log(θ))) Aquecimento com placa



● Resíduos
 ● Pontos duvidosos



Os resíduos apresentam pontos duvidosos, e uma certa tendência parabólica

Comparando os erros relativos, podemos dizer que o arrefecimento é o mais próximo de prever a lei, com um erro de 4%, seguido do aquecimento com um método tapete, com erro de 9%, e, por último, o aquecimento, com erro de 12%.

Discussão e conclusão

Falando do cubo de Leslie, os resultados obtidos estão dentro do esperado. A face preta, ~~tem~~ ^{convencionando ter} emissividade igual a 1, ~~tem~~ ^(boa aproximação ao corpo negro) dentro do boxe, e a face branca, tendo $E=1$ era esperado, uma vez que a face branca teria uma emissividade maior que a face preta, que reflete mais luz.

A face metalizada é a mais próxima que temos de um espelho que, por definição tem $E=0$, então faz sentido ter o valor mais baixo de todas as emissividades quantificadas em ordem de grandeza

$$E_{\text{preta}} \approx E_{\text{branca}} > E_{\text{metalizada}}$$

~~Mat~~ é o esperado

Focando na parte da Lei de Stefan-Boltzmann, os diferentes resultados obtidos estão dentro do esperado. O valor para o aquecimento foi de $VdT = 4,48$, com uma incerteza relativa de 1,17%, e um erro relativo de 12%. entre os diferentes ensaios considerados, este foi o que apresentou o maior erro relativo. O valor para o arrefecimento foi $VdT = 3,84$, com uma incerteza relativa de 1,20%, em erro relativo de 11%, o menor de todos os ensaios. Por último, o ensaio efetuado para o aquecimento com placa de- nos o valor $VdT = 4,36$, com uma incerteza relativa de 1,15%, e um erro relativo de 9%. Os valores que foram obtidos para os diferentes erros relativos são razoáveis, provavelmente resultado de erros sistemáticos.

último resultado aceitável