

Física Experimental: Termodinâmica

Aula 1

Introdução ao laboratório

Conteúdo desta aula:

- Objetivos slides 3 – 4
- Divisão de grupos slides 5 – 7
- Uso de equipamentos slide 8
- Unidades Internacionais slides 9 – 11
- Algarismos significativos slides 12 – 19
- Incertezas (propagação) slides 20 – 23

Objetivos e funcionamento

Esta disciplina tem como objetivo a obtenção, tratamento e análise de dados obtidos em experimentos de termodinâmica (Física).

Ela introduz o uso de alguns aparelhos de medida e metodologias de apresentação de resultados.

Experimentos realizados neste módulo (e numeração):

- 1. Determinação do calor específico do alumínio;**
- 2. Determinação da capacidade térmica de um calorímetro;**
- 3. Gases ideais;**
- 4. Calibração de um termopar;**
- 5. Calor específico de um gás;**
- 6. Tensão superficial;**
- 7. Equivalente mecânico do calor;**
- 8. Deformação Inelástica e processo irreversível;**
- 9. Ciclos Térmicos – Máquina de Stirling.**

Objetivos e funcionamento

O semestre é composto por 13 aulas: 2 aulas introdutórias + dois blocos de 6 aulas com 4 (ou 5) experimentos cada

- Aula 1: Introdução ao laboratório
- Aula 2: Metodologias.
- Aulas 3 a 7 (experimentos): Salas 2042 ou 2044
 - . Determinação do calor específico do alumínio
 - . Determinação da capacidade térmica de um calorímetro
 - . Gases Ideais
 - . Calibração de um termopar
 - . 1 avaliação.
- Aulas 8 a 13 (experimentos): Salas 2042 ou 2044
 - . Deformação inelástica e processo irreversível
 - . Equivalência força-trabalho
 - . Calor específico de um gás (Método de Rüchhardt).
 - . Tensão superficial
 - . Ciclos Térmicos – Máquina de Stirling
 - . 1 avaliação

Divisão de grupos

Neste módulo os alunos realizarão os experimentos em dupla.

Nas salas ocorrerão dois experimentos em paralelo. É crucial lembrar-se da ordem de execução dos experimentos, determinada para cada grupo. Esta ordem se aplica a todo o semestre (anotar, próximo slide).

Os experimentos (exceto em caso de avaliações) estão fixos em cada sala. Alunos e professores se deslocam e trocam de sala uma vez durante o semestre.

Divisão de grupos

A tabela abaixo sistematiza o percurso de cada grupo:

Turma	Ímpar (ex: PU1, PX3, etc...) Inicia curso na sala 2042				Par (ex: PU2, PX4, etc...) Inicia curso na sala 2044			
	<u>A</u>	<u>B</u>	<u>C</u>	<u>D</u>	<u>E</u>	<u>F</u>	<u>G</u>	<u>H</u>
3ª aula	1	2	3	4	5	6	7	8
4ª aula	2	3	4	1	6	7	8	9
5ª aula	3	4	1	2	7	8	9	5
6ª aula	4	1	2	3	8	9	5	6
7ª aula	<u>1ª Avaliação (definida pelo professor)</u>				9	5	6	7
<u>Turmas trocam de sala 2042 ↔ 2044 (após 7ª semana de aula)</u>								
8ª aula	5	6	7	8	<u>1ª Avaliação (definida pelo professor)</u>			
9ª aula	6	7	8	9	1	2	3	4
10ª aula	7	8	9	5	2	3	4	1
11ª aula	8	9	5	6	3	4	1	2
12ª aula	9	5	6	7	4	1	2	3
13ª aula	2ª avaliação (definida pelo professor)				2ª avaliação (definida pelo professor)			

→ A distribuição de pontos é definida pelo professor.

**Pausa:
divisão dos grupos**

Uso de equipamentos

Sensores PASCO:



Utilizados na aquisição de temperatura e pressão em função do tempo (termômetros digitais e sensores de baixa pressão).

Permitem visualizar tendências nestas variáveis físicas diretamente no computador, utilizando software específico.

Unidades internacionais

Nos experimentos realizados durante o curso deve-se expressar resultados (valores) e utilizá-los nos cálculos no sistema de unidades internacionais.

Unidades Fundamentais do SI:

Grandeza	Nome	Símbolo
comprimento	metro	m
tempo	segundo	s
Massa	quilograma	kg
Quantidade de matéria	mol	mol
Corrente elétrica	ampère	A
temperatura	Kelvin	K

*Intervalos de temperatura em graus Celsius equivalem a intervalos em Kelvin, e são comumente utilizados em experimentos de termodinâmica

Unidades internacionais

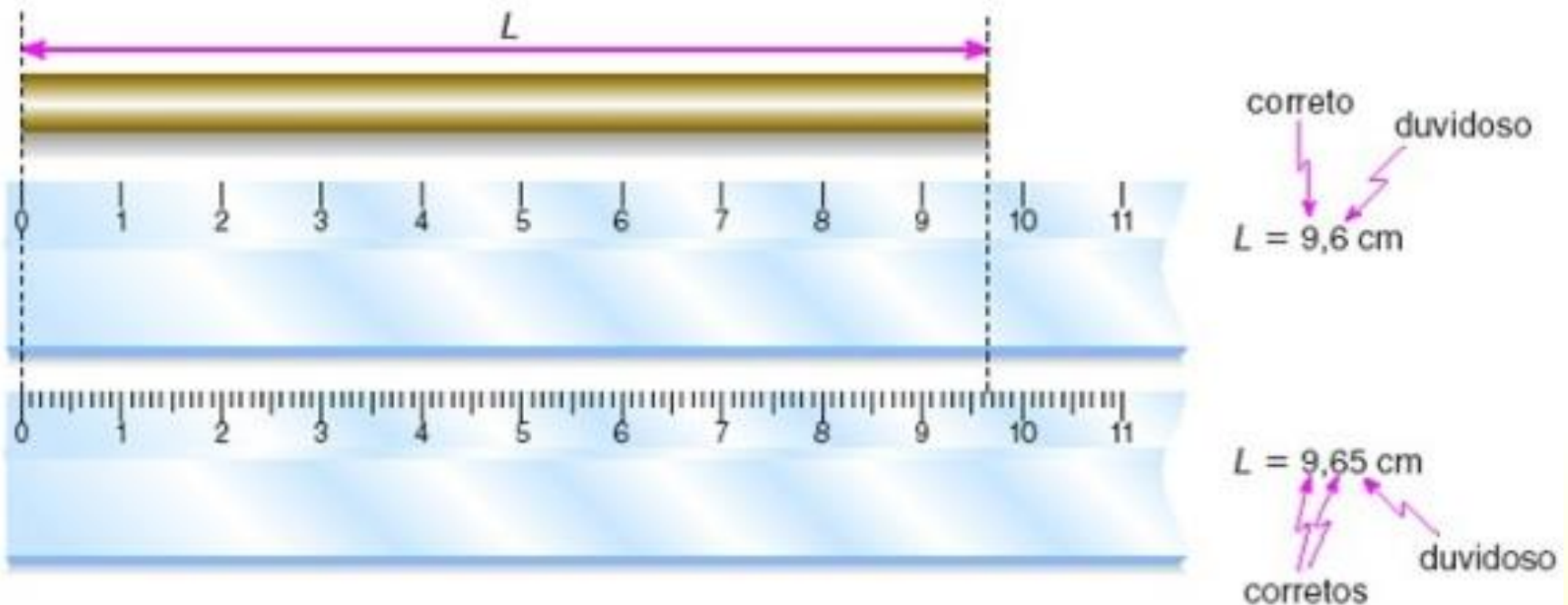
Algumas unidades internacionais utilizadas são obtidas pela combinação das unidades fundamentais

Grandeza	Nome da Unidade Derivada no SI	Símbolo	Equivalências
Frequência	hertz	Hz	$1 \text{ Hz} = 1 \text{ s}^{-1}$
Força	newton	N	$1 \text{ N} = 1 \text{ kg.m/s}^2$
Pressão, tensão mecânica	pascal	Pa	$1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$
Energia, trabalho, quantidade de calor	joule	J	$1 \text{ J} = 1 \text{ N.m}$
Potência e fluxo de energia	watt	W	$1 \text{ W} = 1 \text{ J/s}$
Carga elétrica	coulumb	C	$1 \text{ C} = 1 \text{ A.s}$
Potencial elétrico, diferença de potencial, tensão elétrica, força eletromotriz	volt	V	$1 \text{ V} = 1 \text{ J/C}$
Capacitância	farad	F	$1 \text{ F} = 1 \text{ C/V}$
Resistência elétrica	ohm	Ω	$1 \Omega = 1 \text{ V/A}$
Condutância elétrica	siemens	S	$1 \text{ S} = \Omega^{-1}$
Fluxo de indução magnética, fluxo magnético	weber	Wb	$1 \text{ Wb} = 1 \text{ V.s}$
Densidade de fluxo magnético, indução magnética	tesla	T	$1 \text{ T} = 1 \text{ Wb/m}^2$
Indutância	henry	H	$1 \text{ H} = 1 \text{ Wb/A}$

Potências de dez vs unidades

Prefixo		1000 ^m	10 ⁿ	Equivalente numérico
Nome	Símbolo			
yotta	Y	1000 ⁸	10 ²⁴	1 000 000 000 000 000 000 000 000
zetta	Z	1000 ⁷	10 ²¹	1 000 000 000 000 000 000 000
exa	E	1000 ⁶	10 ¹⁸	1 000 000 000 000 000 000
peta	P	1000 ⁵	10 ¹⁵	1 000 000 000 000 000
tera	T	1000 ⁴	10 ¹²	1 000 000 000 000
giga	G	1000 ³	10 ⁹	1 000 000 000
mega	M	1000 ²	10 ⁶	1 000 000
quilo	k	1000 ¹	10 ³	1 000
hecto	h	1000 ^{2/3}	10 ²	100
deca	da	1000 ^{1/3}	10 ¹	10
<i>nenhum</i>		1000 ⁰	10 ⁰	1
deci	d	1000 ^{-1/3}	10 ⁻¹	0,1
centi	c	1000 ^{-2/3}	10 ⁻²	0,01
mili	m	1000 ⁻¹	10 ⁻³	0,001
micro	μ	1000 ⁻²	10 ⁻⁶	0,000 001
nano	n	1000 ⁻³	10 ⁻⁹	0,000 000 001
pico	p	1000 ⁻⁴	10 ⁻¹²	0,000 000 000 001
femto	f	1000 ⁻⁵	10 ⁻¹⁵	0,000 000 000 000 001
atto	a	1000 ⁻⁶	10 ⁻¹⁸	0,000 000 000 000 000 001
zepto	z	1000 ⁻⁷	10 ⁻²¹	0,000 000 000 000 000 000 001
yocto	y	1000 ⁻⁸	10 ⁻²⁴	0,000 000 000 000 000 000 000 001

Algarismos significativos



Na 1ª régua temos medidas com 2 algarismos significativos, mas temos 3 algarismos significativos na 2ª régua (mais precisa).

O último algarismo de uma medida é o algarismo duvidoso (menor divisão de escala acessível para uma medida direta) 12

Algarismos significativos

São algarismos significativos todos aqueles contados, da esquerda para a direita, a partir do primeiro algarismo diferente de zero.

Exemplos:

- **45,30**cm > tem quatro algarismos significativos;
- **0,0595**m > tem três algarismos significativos; e
- **0,0450**kg > tem três algarismos significativos.

Ao se efetuar mudanças de unidade o número de algarismos significativos não se altera.

$$4,94 \text{ cm} = 0,0494 \text{ m}$$

Algarismos significativos

Potências de 10 não são parte dos algarismos significativos

raio (mm)	significativos
57,896	5
$5,79 \times 10^1$	3
$5,789600 \times 10^1$	7
6×10^2	1

Algarismos significativos

$$4,32 \text{ cm} + 2,1 \text{ cm} = ?$$

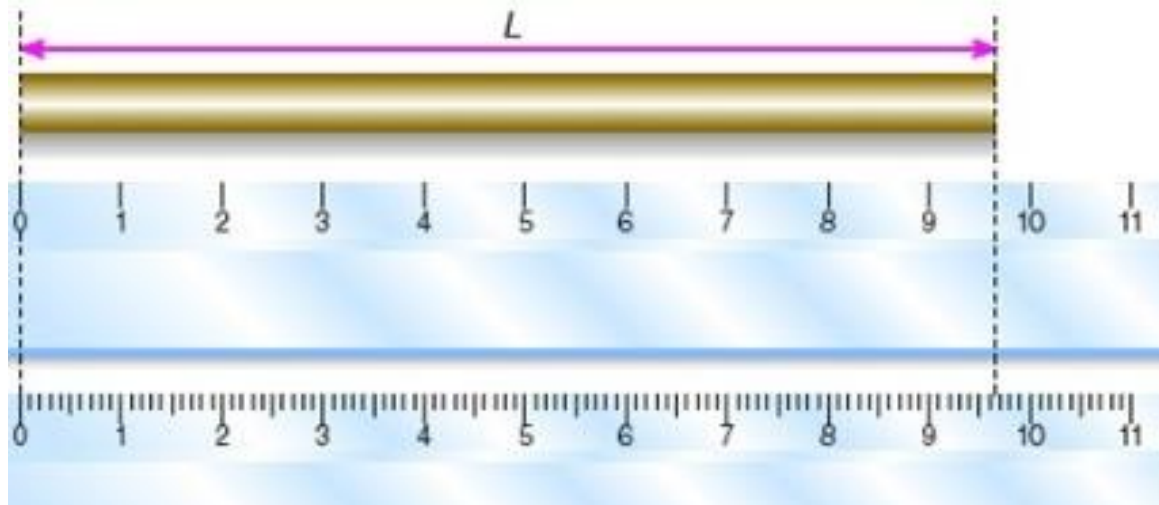
$$\begin{array}{r} 4,32 \text{ cm} \\ + 2,1 \text{ cm} \\ \hline 6,42 \text{ cm} \end{array}$$

Resultado:

6,4 cm

Ao efetuar a soma de resultados deve-se expressar valores que sejam compatíveis com o valor de menor número de algarismos significativos (dentro os originalmente obtidos).

Incertezas (diretas)



- **Forma correta**

- $(2,74 \pm 0,05)$ cm
- $2,74(5)$ cm
- $(123,4 \pm 1,2)$ kg ou (123 ± 1) kg

- **Forma incorreta**

- $(2,7455 \pm 0,0532)$ cm (incerteza com muitos algarismos)
- $(2,7 \pm 0,05)$ cm (a representação da medida não é compatível com a incerteza)

Incertezas (diretas)

Em alguns casos uma variável do experimento é medida muitas vezes, tornando a aferição de um processo mais precisa. Deve-se então expressar o valor médio e a incerteza como o desvio da média.

Ex: Medida do tempo até um projétil lançado atingir o chão

Lançamento	Tempo (s)
1	1,93
2	1,89
3	2,01
4	1,95
5	2,02

$$t_{\text{médio}} = (t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5) / 5$$

$$t_{\text{médio}} = \langle t \rangle = 1,96 \text{ s}$$

$$\text{Incerteza } \Delta t = [|\langle t \rangle - t_1| + |\langle t \rangle - t_2| + |\langle t \rangle - t_3| + |\langle t \rangle - t_4| + |\langle t \rangle - t_5|] / 5$$

$$\Delta t = 0,044\text{s}$$

Declare então: $t = (1,96 \pm 0,04) \text{ s}$

Incertezas (gráficos)

Utilizamos análise gráfica (discutida em detalhes na 2ª aula do curso) para obter um resultado mais preciso e eficaz em relação à análise de uma tabela de dados (usada apenas em medidas diretas).

Exemplo: considere as medidas de corrente e tensão para aferição da resistência elétrica de um elemento resistivo ôhmico ($V = R I$)

Tensão (V)	Corrente (A)
1,0	0,052
2,0	0,098
3,0	0,151
4,0	0,195
5,0	0,244

PELA TABELA (NÃO FAZER!!)

$$R_{\text{médio}} = (V_1/I_1 + V_2/I_2 + V_3/I_3 + V_4/I_4 + V_5/I_5) / 5$$

$$R_{\text{médio}} = \langle R \rangle = 20,7 \, \Omega$$

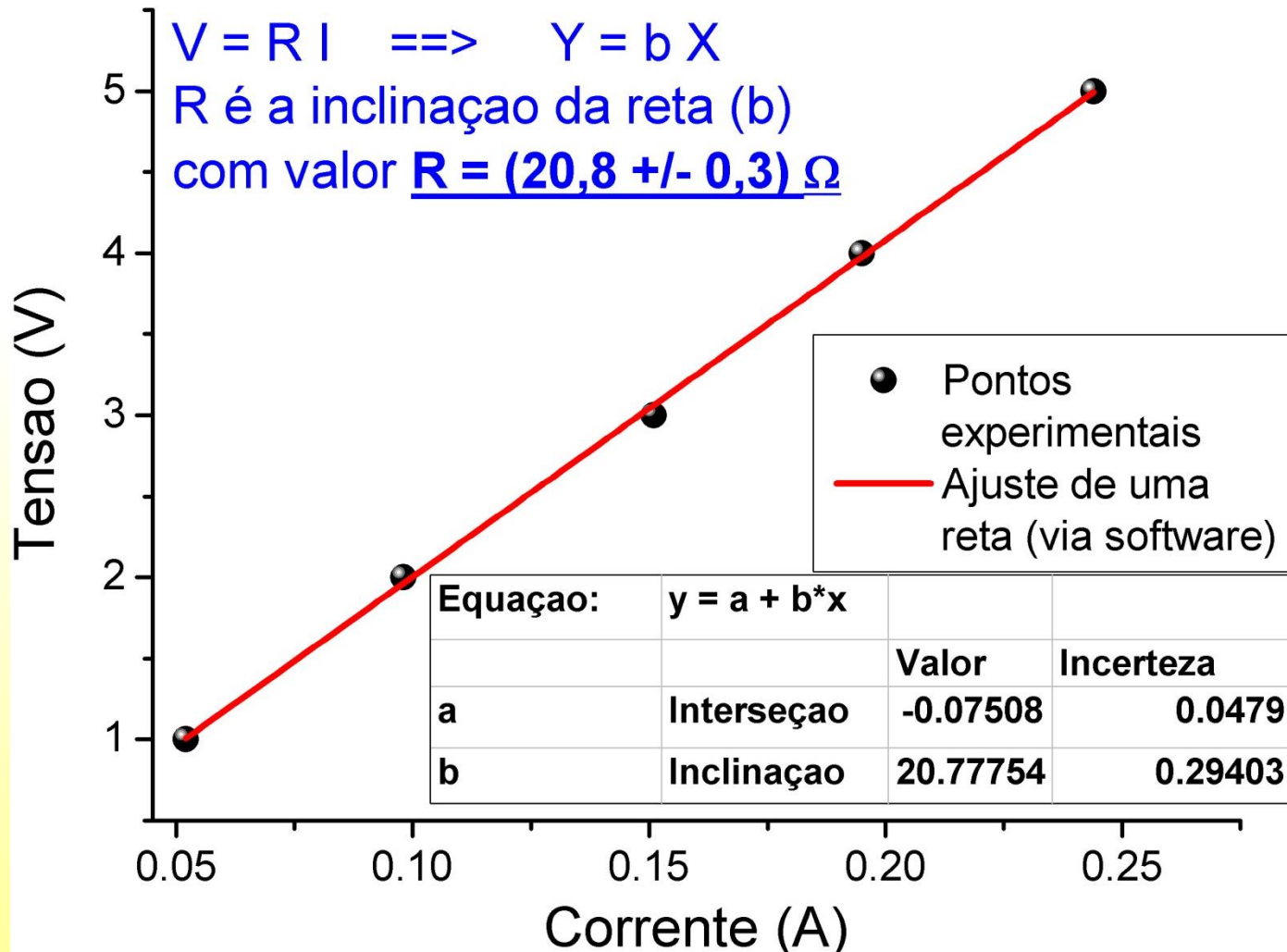
Incerteza pela tabela (Não fazer!!!)

$$\Delta R = [|\langle R \rangle - R_1| + |\langle R \rangle - R_2| + |\langle R \rangle - R_3| + |\langle R \rangle - R_4| + |\langle R \rangle - R_5|] / 5$$

$$\Delta R = 0,4 \, \Omega$$

Incertezas (gráficos)

Ao fazer um gráfico dos dados experimentais de V e I, encontra-se o valor de R como a inclinação da reta, cuja incerteza é diretamente fornecida pelo processo de regressão linear (2ª aula).



Propagação de incertezas

Em muitos casos não é possível aferir diretamente o valor da incerteza de uma medida cujo resultado é obtido a partir de um grupo de variáveis (e valores).

É necessário então utilizar alguns cálculos simples para se obter a incerteza final.

Ex: queremos saber o volume de um cilindro de gás cujas dimensões estão declaradas abaixo

Raio da base – $r = (0,14 \pm 0,01) \text{ m}$

Altura do cilindro – $h = (1,38 \pm 0,05) \text{ m}$

Sabendo que $V = \pi h r^2$ calcule ΔV

Propagação de incertezas

Cálculo simplificado para uma função polinomial:

ex: $Y = a^{p1} b^{p2} c^{p3}$

$$\frac{\Delta Y}{Y} = \sqrt{\left(p1 \frac{\Delta a}{a}\right)^2 + \left(p2 \frac{\Delta b}{b}\right)^2 + \left(p3 \frac{\Delta c}{c}\right)^2}$$

ou

$$\left|\frac{\Delta Y}{Y}\right| = \left|p1 \frac{\Delta a}{a}\right| + \left|p2 \frac{\Delta b}{b}\right| + \left|p3 \frac{\Delta c}{c}\right|$$

para

$$V = \pi r^2 h \quad \rightarrow \quad \frac{\Delta V}{V} = \sqrt{\left(2 \frac{\Delta r}{r}\right)^2 + \left(1 \frac{\Delta h}{h}\right)^2}$$

Propagação de incertezas

Método geral para uma função qualquer (derivadas parciais)

$$Y = a^{p1} b^{p2} c^{p3}$$

$$\Delta Y = \sqrt{\left(\frac{\partial Y}{\partial a}\right)^2 \Delta a^2 + \left(\frac{\partial Y}{\partial b}\right)^2 \Delta b^2 + \left(\frac{\partial Y}{\partial c}\right)^2 \Delta c^2}$$

para

$$V = \pi r^2 h \quad \rightarrow \quad \frac{\partial V}{\partial r} = 2\pi r h \quad \frac{\partial V}{\partial h} = \pi r^2$$

$$\Delta V = \sqrt{(2\pi r h)^2 \Delta r^2 + (\pi r^2)^2 \Delta h^2}$$

Propagação de incertezas

Note que, partindo de:

$$\Delta V = \sqrt{(2\pi r h)^2 \Delta r^2 + (\pi r^2)^2 \Delta h^2}$$

Dividindo-se os dois lados por $\pi r^2 h$

$$\frac{\Delta V}{\pi r^2 h} = \sqrt{\frac{4\pi^2 r^2 h^2}{\pi^2 r^4 h^2} \Delta r^2 + \frac{\pi^2 r^4}{\pi^2 r^4 h^2} \Delta h^2}$$

$$\Rightarrow \frac{\Delta V}{V} = \sqrt{\left(2 \frac{\Delta r}{r}\right)^2 + \left(1 \frac{\Delta h}{h}\right)^2}$$