

# **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 14 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 aula terá conteúdo definido pelo professor (1 avaliação).
- Aulas 8 a 14 (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
  - . 2 aulas com conteúdo definido pelo prof. (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			
Grupo (tipo)	<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	Atividade definida pelo professor				9	5	6	7
<b><u>Turmas trocam de sala 2042 ↔ 2044 (após 7ª semana de aula)</u></b>								
8ª aula	<u>1ª Avaliação (definida pelo professor)</u>				<u>1ª Avaliação (definida pelo professor)</u>			
9ª aula	5	6	7	8	1	2	3	4
10ª aula	6	7	8	9	2	3	4	1
11ª aula	7	8	9	5	3	4	1	2
12ª aula	8	9	5	6	4	1	2	3
13ª aula	9	5	6	7	Atividade definida pelo professor			
14ª 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

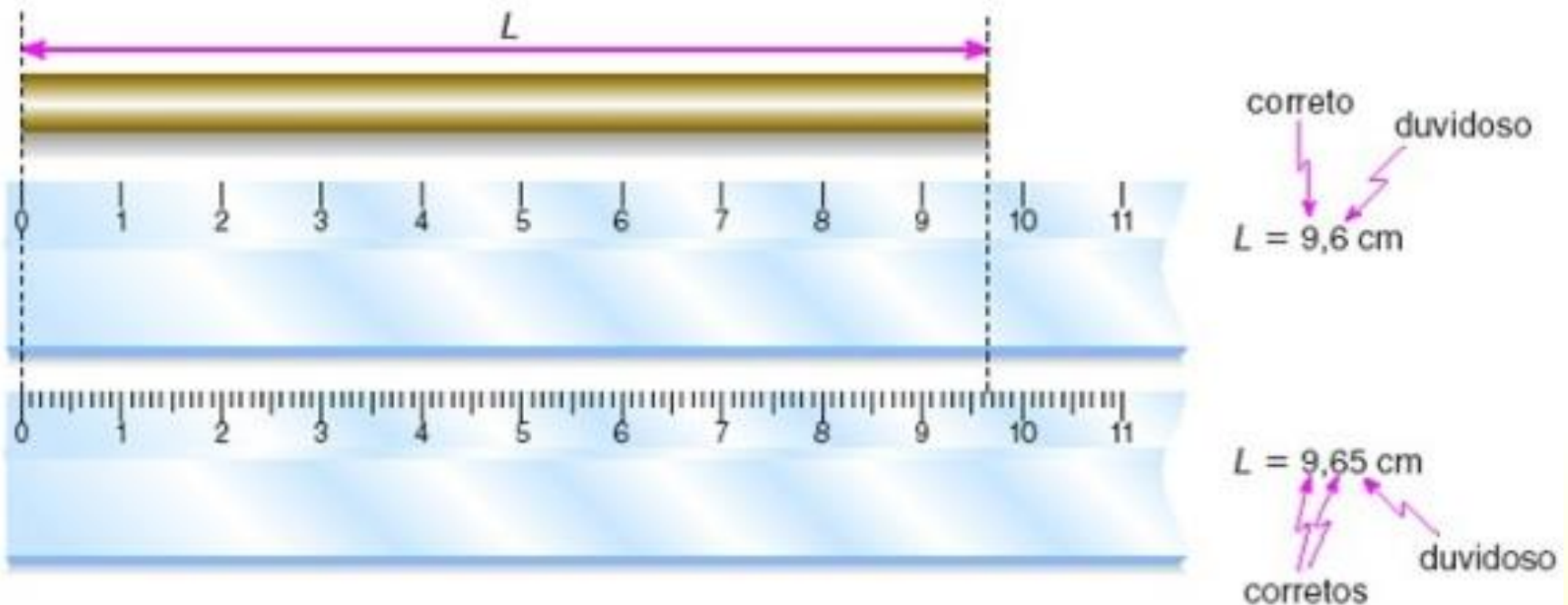
Algumas unidades internacionais utilizadas são obtidas pela combinação das unidades fundamentais

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

# 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

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

# Algarismos significativos

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

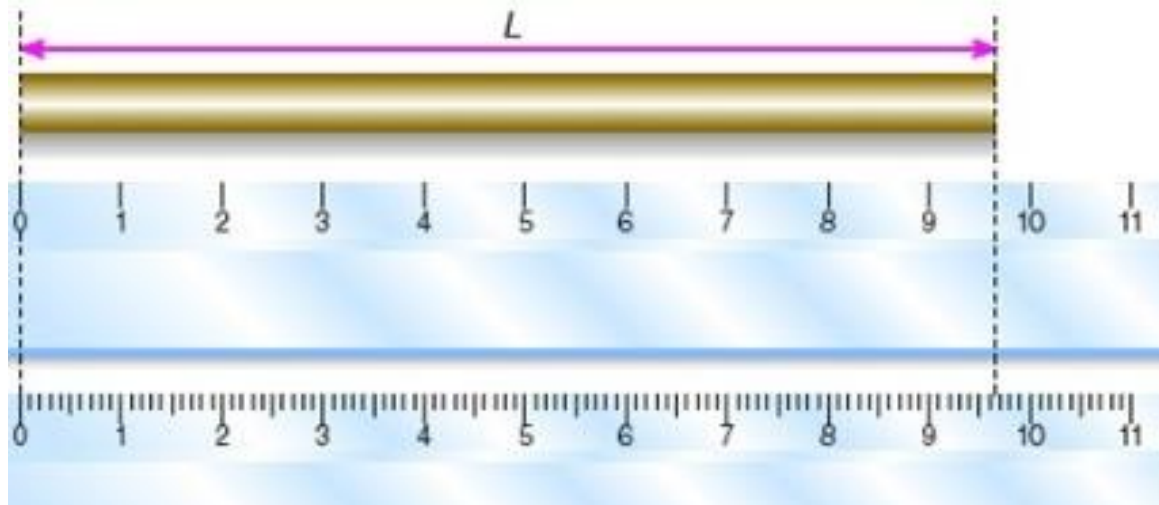
$$\begin{array}{r} 4,32 \text{ cm} \\ + 2,1 \text{ cm} \\ \hline 6,42 \text{ cm} \end{array}$$

**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 (dentre os originalmente obtidos).

# Incertezas (diretas)



- **Forma correta**

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

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

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

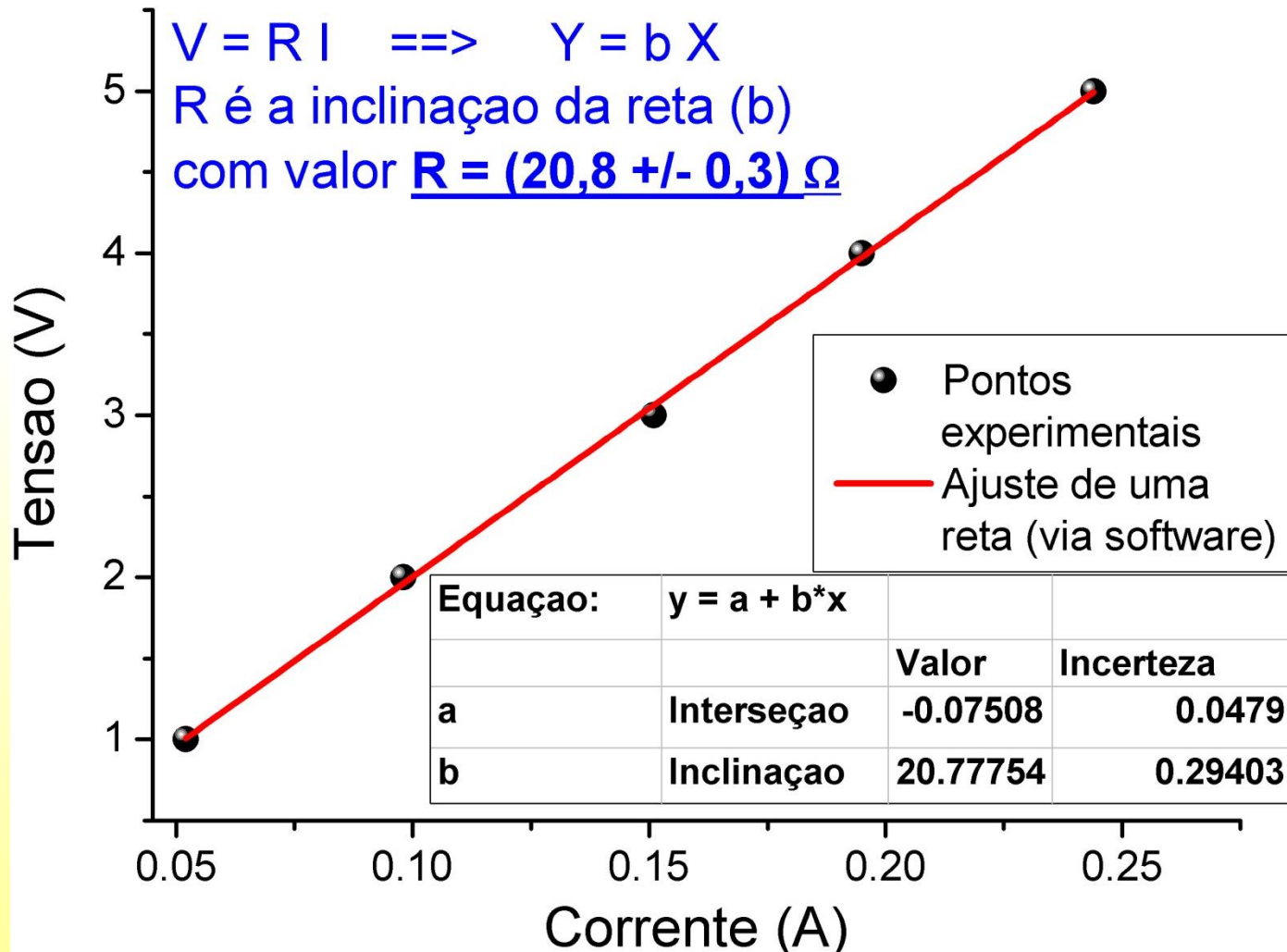
**Incerteza pela tabela (Não fazer!!!)**

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

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

# 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  $\Delta V$

# 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  $\pi r^2 h$

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

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