

# LEB0200 - Física do Ambiente agrícola

Prof. Tiago Bueno de Moraes

*tiago.moraes@usp.br*



**ENGENHARIA DE  
BIOSSISTEMAS**  
USP - ESALQ

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**

ESCOLA SUPERIOR DE AGRICULTURA “LUIZ DE QUEIROZ” – ESALQ

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE BIROSSISTEMAS (LEB)



**ESALQ**

2023/01

## LEB0200 - Física do Ambiente agrícola

### Programa:

1. Grandezas Físicas e Sistemas de Unidades;
2. Leis da Termodinâmica;
3. Leis da Radiação Solar;
4. Umidade Relativa do Ar;
5. Física da água no solo.

2023/01

#### **Professores Ministrantes:**

Prof. Tiago Bueno de Moraes      e-mail: [tiago.moraes@usp.br](mailto:tiago.moraes@usp.br)  
Prof. Jarbas Honorio de Miranda      e-mail: [jhmirand@usp.br](mailto:jhmirand@usp.br)

Sala Prof. Tiago (ESALQ): 3447-5041  
Sala Prof. Jarbas (ESALQ): 3447-5040

#### **Estagiária PAE:**

Mestranda Bruna Marques de Queiroz  
(Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Sistemas Agrícolas – PPGESA)  
Email: [bruna.marques.queiroz@usp.br](mailto:bruna.marques.queiroz@usp.br)

## Turma de Segunda e Sexta

### Horário:

Segunda-feira e Sexta-Feira: 10:00 às 11:40

**Local das aulas:** Anfiteatro do Pavilhão de Engenharia (Dept. de Engenharia de Biosistemas)

**Período Letivo:** 13/03/2023 a 15/07/2023

### Avaliação:

Os estudantes serão avaliados por Exercícios e **3 Provas** que ocorrerão nas seguintes datas:

Atividade	Data	Peso
Exercícios		10%
PROVA 1	17/04/2023 (segunda-feira)	30%
PROVA 2	19/05/2023 (sexta-feira)	30%
PROVA 3	30/06/2023 (sexta-feira)	30%
PROVA SUBSTITUTIVA	07/07/2023 (sexta-feira)	(substituirá a menor nota das provas ao longo do semestre)

## Turma de Terça e Quinta

### Horário:

Terça-feira e Quinta-Feira: 14:00 às 15:40

**Local das aulas:** Anfiteatro do Pavilhão de Engenharia (Dept<sup>o</sup>. de Engenharia de Biossistemas)

**Período Letivo:** 13/03/2023 a 15/07/2023

### Avaliação:

Os estudantes serão avaliados por Exercícios e **3 Provas** que ocorrerão nas seguintes datas:

Atividade	Data	Peso
<b>Exercícios</b>		10%
<b>PROVA 1</b>	18/04/2023 (terça-feira)	30%
<b>PROVA 2</b>	18/05/2023 (quinta-feira)	30%
<b>PROVA 3</b>	29/06/2023 (quinta-feira)	30%
<b>PROVA SUBSTITUTIVA</b>	06/07/2023 (quinta-feira)	(substituirá a menor nota das provas ao longo do semestre)

## 3 Provas

- P1 → abril (30%)
- P2 → maio (30%)
- P3 → junho (30%)

+ Lista de exercícios (10%)

Será aprovado se:

**Frequência  $\geq 70\%$**

**Nota Final  $\geq 5$  pontos**

# LEB0200 - Física do Ambiente agrícola

Mês	Dia	Assunto	Aula
Março	13	Início das Aulas (Apresentação da Disciplina)	Prof. Tiago
	17	Aula 1 – Sistemas de Unidades e Análise Dimensional	Prof. Tiago
	20	Aula 2 – Sistemas de Unidades e Análise Dimensional	Prof. Tiago
	24	Aula 3 – Sistemas de Unidades e Análise Dimensional + Exercícios	Prof. Tiago
	27	Aula 4 – Sistemas de Unidades e Análise Dimensional + Exercícios	Prof. Tiago
	31	Aula 5 – Termodinâmica de Sistemas Gasosos	Prof. Tiago
Abril	03	<i>Semana Santa. Não haverá aula.</i>	-
	07	<i>Semana Santa. Não haverá aula.</i>	-
	10	Aula 6 – Termodinâmica de Sistemas Gasosos	Prof. Tiago
	14	Aula 7 – Termodinâmica de Sistemas Gasosos + Exercícios	Prof. Tiago
	17	<b>Prova P1</b>	Prof. Tiago
	21	<i>Feriado Tiradentes. Não haverá aula.</i>	-
	24	Aula 9 – Termodinâmica - Processo Adiabático	Prof. Tiago
	28	Aula 10 – Termodinâmica - Processo Adiabático	Prof. Tiago
Maio	01	<i>Feriado dia do Trabalho. Não haverá aula.</i>	-
	05	Aula 11 – Termodinâmica - Processo Adiabático (Exercícios)	Prof. Tiago
	08	Aula 12 – Leis da Radiação Térmica	Prof. Jarbas
	12	Aula 13 – Leis da Radiação Térmica	Prof. Jarbas
	15	Aula 14 – Leis da Radiação <u>Térmica</u> + Exercícios	Prof. Jarbas
	19	<b>Prova P2</b>	Prof. Jarbas

Seg-Sex

# LEB0200 - Física do Ambiente agrícola

## Calendário

Ter-Qui

Mês	Dia	Assunto	Aula
Março	14	Início das Aulas (Apresentação da Disciplina)	Prof. Tiago
	16	Aula 1 – Sistemas de Unidades e Análise Dimensional	Prof. Tiago
	21	Aula 2 – Sistemas de Unidades e Análise Dimensional	Prof. Tiago
	23	Aula 3 – Sistemas de Unidades e Análise Dimensional + Exercícios	Prof. Tiago
	28	Aula 4 – Sistemas de Unidades e Análise Dimensional + Exercícios	Prof. Tiago
	30	Aula 5 – Termodinâmica de Sistemas Gasosos	Prof. Tiago
Abril	04	<i>Semana Santa. Não haverá aula.</i>	-
	06	<i>Semana Santa. Não haverá aula.</i>	-
	11	Aula 6 – Termodinâmica de Sistemas Gasosos	Prof. Tiago
	13	Aula 7 – Termodinâmica de Sistemas Gasosos + Exercícios	Prof. Tiago
	18	<b>Prova P1</b>	Prof. Tiago
	20	Aula 9 – Termodinâmica - Processo Adiabático	Prof. Tiago
	25	Aula 10 – Termodinâmica - Processo Adiabático	Prof. Tiago
	27	Aula 11 – Termodinâmica Proc. Adiabático + Exercícios	Prof. Tiago
	02	Aula 12 – Leis da Radiação Térmica	Prof. Jarbas
	04	Aula 13 – Leis da Radiação Térmica	Prof. Jarbas
	09	Aula 14 – Leis da Radiação Térmica + Exercícios	Prof. Jarbas

# LEB0140 – Física (Ciências dos Alimentos)

## Calendário

Quarta (noite)

### DISTRIBUIÇÃO DOS TÓPICOS DAS AULAS

Mês	Dia	Assunto	Aula
Março	15	Início das Aulas (Apresentação da Disciplina) Aula 1. Sistemas de Unidades e Análise Dimensional	Prof. Tiago
	22	Aula 2 e 3. Sistemas de Unidades e Análise Dimensional	Prof. Tiago
	29	Aula 4 e 5. Sistemas de Unidades e Análise Dimensional + Exercícios	Prof. Tiago
Abril	05	<i>Semana Santa. Não haverá aula.</i>	-
	12	Aula 6 e 7. Termodinâmica de Sistemas Gasosos	Prof. Tiago
	19	Aula 8 e 9. Termodinâmica de Sistemas Gasosos + Exercícios	Prof. Tiago
	26	<b>Prova P1</b>	Prof. Tiago
Maio	03	Aula 10 e 11. Leis da Radiação Térmica	Prof. Jarbas
	10	Aula 12 e 13. Leis da Radiação Térmica	Prof. Jarbas
	17	Aula 14 e 15. Leis da Radiação Térmica + Exercícios	Prof. Jarbas
	24	Aula 16 e 17. Umidade Relativa do Ar	Prof. Jarbas
	31	<b>Prova P2</b>	Prof. Jarbas
Junho	07	Aula 18 e 19. Umidade Relativa do Ar + Exercícios	Prof. Jarbas
	14	Aula 20 e 21. Hidrodinâmica	Prof. Jarbas
	21	Aula 22 e 23. Hidrodinâmica + Exercícios	Prof. Jarbas
	28	<b>Prova P3</b>	Prof. Tiago
Julho	05	<b>Prova Substitutiva</b>	(Matéria do semestre)



## **Observação importante sobre faltas:**

Não há abono de faltas, pois a frequência de alunos é obrigatória (Parágrafo 3º. do Artigo 47º. /Capítulo 4º da LDB da Educação Nacional, Lei no. 9394 de 20/12/1996).

\* Serão contabilizadas em função do número de aulas lecionadas e dias de prova (70% de frequência)

## **Maiores informações:**

Com o Docente da Disciplina ou com a Secretaria de Graduação do Depto. de Engenharia de Biosistemas (LEB).

## **Literatura Recomendada:**

- Acervo da Biblioteca Central da ESALQ
- GARCIA, E.A.C. Biofísica. Sarvier, 2002. 387p.
- MOURÃO JÚNIOR, C.A.; ABRANOV, D.M. Curso de Biofísica. Guanabara Koogan, Rio de Janeiro, 2008.
- OKUNO, E.; I.L. CALDAS & C. CHOW. Física para Ciências Biológicas e Biomédicas. HARPER & ROW do Brasil, São Paulo, 1982. 490 pp.
- SERWAY, R.A. & JEWETT Jr., J.W. Princípios de Física, volumes 1 e 2. Thomson, São Paulo, 2004.
- SERWAY, R.A. & JEWETT Jr., J.W. Física para Cientistas e Engenheiros – v. 2 – Oscilações, Ondas e Termodinâmica. Cengage Learning, 2011.
- Moodle USP: e-Disciplinas (Moodle do Stoa)

# Fundamentos de Termodinâmica

Termodinâmica: estudo da **energia térmica**, transferência e transformação da energia na matéria macroscópica. Tem muitos termos e conceitos:

- ❑ Sistema de Unidades, Conversões, Grandezas Físicas;
- ❑ Conceitos fundamentais de Termodinâmica: Lei dos gases; Temperatura, Calor, Trabalho, Calor específico; Capacidade térmica; Sistemas Termodinâmicos; etc ...
- ❑ Leis da Termodinâmica; Processos Termodinâmicos: Isotérmico, Isovolumétrico e Isobárico; (aulas 1 → 7) (Cap. e Lista 1 e 2)

## Prova 1

- ❑ Processo Adiabático; Mecanismos de transferência de calor: Condução; Convecção; Radiação; etc... (Aulas 8 → etc.. )

## Prova 2

Aulas 8, 9 e 10

# Processo Adiabático

# Revisão Termodinâmica

Lei dos Gases

$$PV = nRT$$

1º Lei Termod.

$$\Delta U = Q + W$$

Calcular Trabalho:

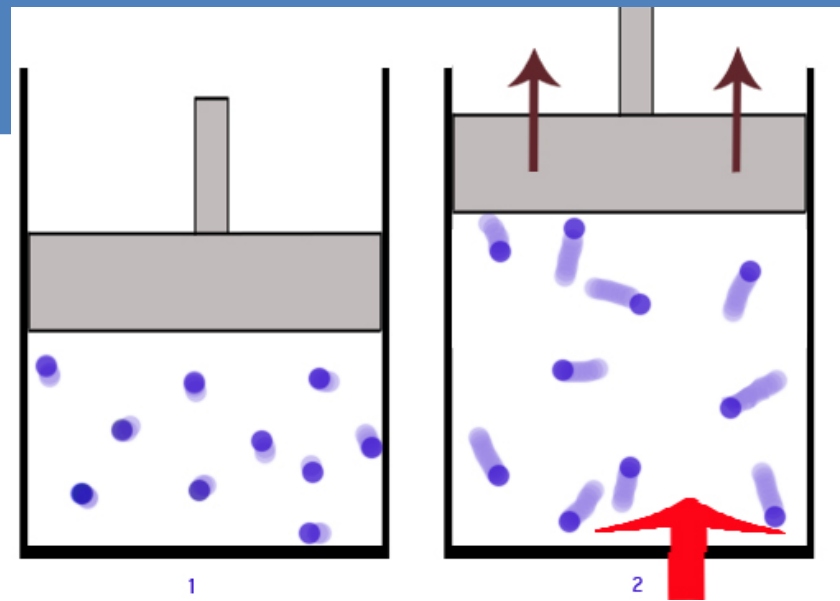
$$W = \int_{V_i}^{V_f} P dV$$

Calcular Calor:

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T$$

Processos termodinâmicos, como calcular o Trabalho (W) realizado e o Calor (Q) transferido em cada caso:

- Processo Isobárico;                    → Pressão const.
- Processo Isocórico;                    → Volume const.
- Processos Isotérmicos;                → Temp. const.



# Processos termodinâmicos

Vamos estudar esses quatro processos termodinâmicos, e como calcular o Trabalho ( $W$ ) realizado e o Calor ( $Q$ ) transferido em cada caso:

- **Processo Isobárico;** → **Pressão const.**
- **Processo Isocório (isovolumétrico);** → **Volume const.**
- **Processos Isotérmicos;** → **Temp. const.**
- **Processo Adiabáticos;** →  **$Q = 0$**

# Resumo das Equações: Processo Adiabático

## ➤ Processos Adiabático:

Ocorre quando não há troca de calor entre o sistema e o meio, portanto  $Q = 0$ , logo:  $(\Delta U = W)$ , ou seja, a Energia Interna é alterada apenas pela troca de energia na forma de trabalho.

$$\Delta U_{\text{int}} = -W$$

Equações:

$$c_p = c_v + R$$

$$\gamma = \frac{c_p}{c_v}$$

$$PV = nRT$$

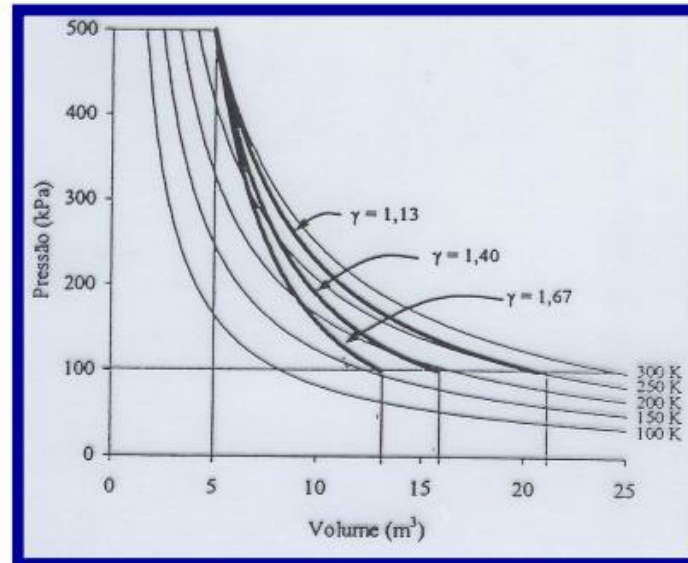
$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2}$$

Ar atmosférico  $\rightarrow \gamma = 1,4$

$$P_1 V_1^\gamma = P_2 V_2^\gamma$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \left( \frac{V_1}{V_2} \right)^{\gamma-1}$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \left( \frac{P_1}{P_2} \right)^{\frac{1-\gamma}{\gamma}}$$



# Processo Adiabático

## ➤ **Processos Adiabático:**

Ocorre quando não há troca de calor entre o sistema e o meio, portanto  $Q = 0$ ,

logo: (  $\Delta U = \overset{0}{Q} + W$  ), ou seja, a Energia Interna é alterada apenas pela troca de energia na forma de trabalho.

$$\Delta U_{\text{int}} = -W$$

Sinal + ou - do trabalho depende da definição utilizada

## Exemplos de Processos Adiabáticos:

- i) **Processos que ocorrem muito rapidamente** (onde não há tempo para trocar calor): Estouro de uma rolha de Champagne.
- ii) Processos que envolvem grandes volumes de matéria e a interface sistema/meio é pequena, não ocorrendo praticamente troca de calor. **Este é o caso de grande massas de ar subindo ou descendo na atmosfera,** sofrendo variações de pressão e temperatura.

# Processo Adiabático

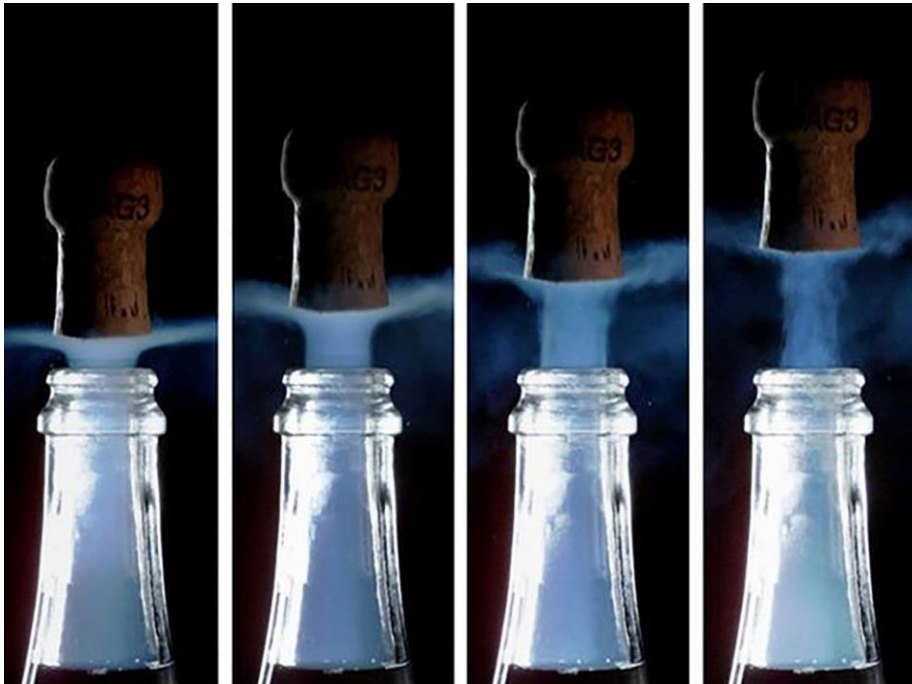
➤ **Processos Adiabático:**

$$Q = 0$$

$$\Delta U_{\text{int}} = -W$$

Exemplo:

i) **Processos que ocorrem muito rapidamente** (onde não há tempo para trocar calor), estouro rolha champagne.



Processo ocorre tão rápido que a expansão do gás reduz rapidamente energia interna do gás, condensando vapor de água...



# Processo Adiabático

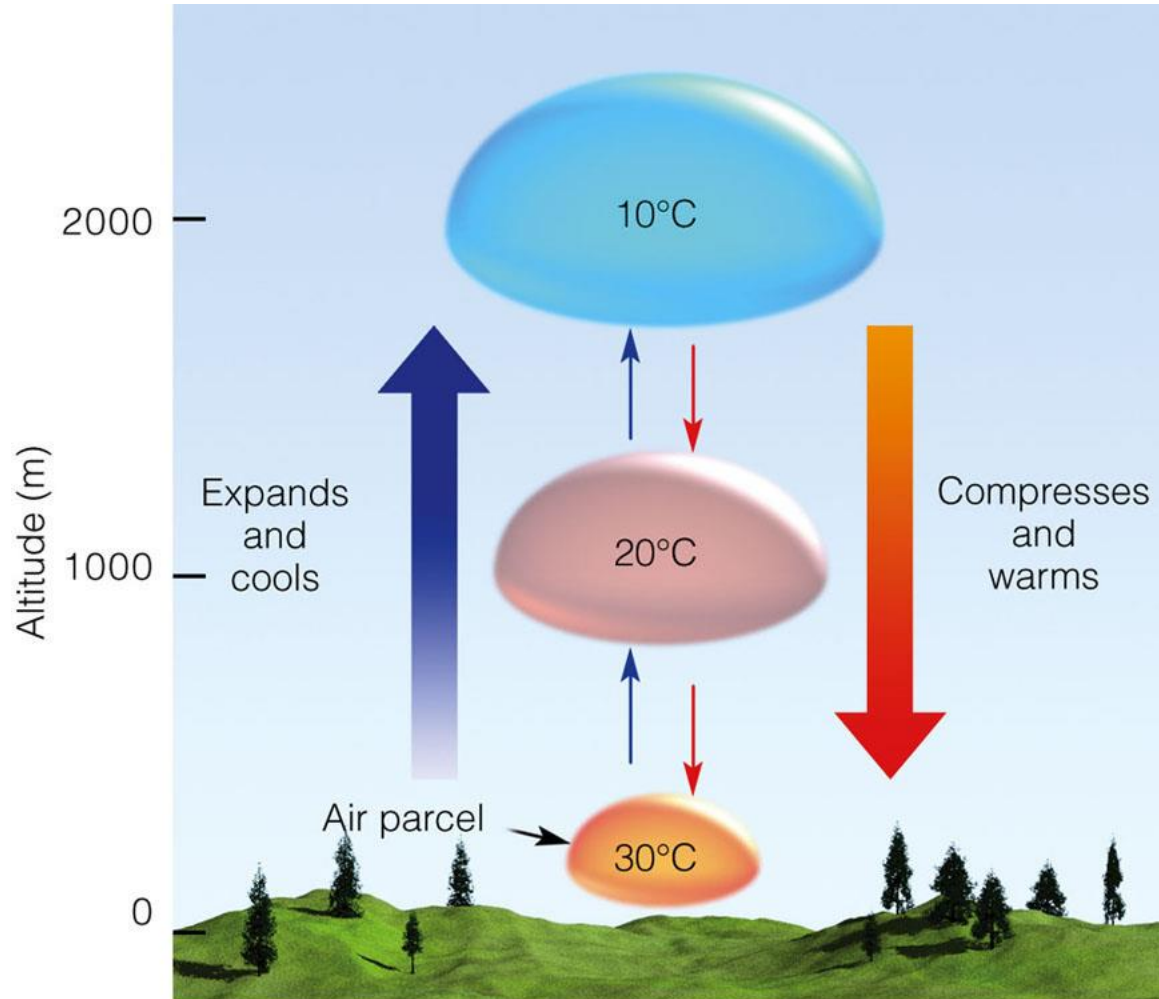
## ➤ Processos Adiabáticos:

$$\Delta U_{\text{int}} = -W$$

Exemplo:

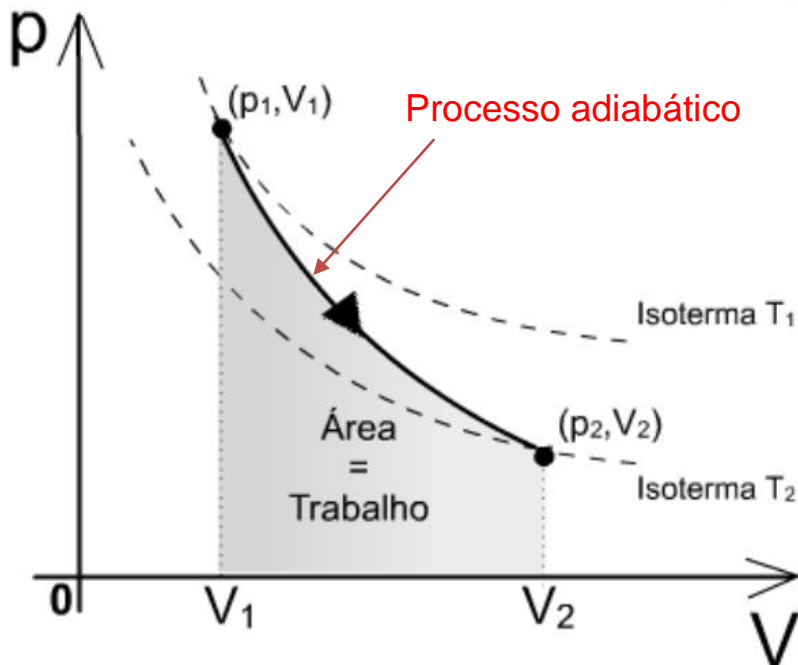
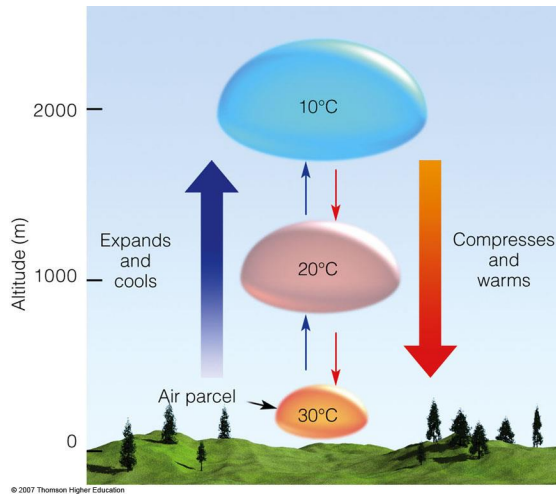
ii) **Processos que envolvem grandes volumes de matéria e a interface sistema/meio é pequena, não ocorrendo praticamente troca de calor.**

Este é o caso de grande massas de ar subindo ou descendo na atmosfera, sofrendo variações de pressão e temperatura.



© 2007 Thomson Higher Education

# Processo Adiabático



A **transformação adiabática** é aquela em que não há trocas de energia térmica entre o sistema e o meio exterior. Embora o gás não estabeleça trocas de energia térmica com o sistema externo, durante o processo a pressão, o volume, a temperatura e a energia interna do gás variam, não permanecendo nenhuma dessas grandezas com o valor constante.

Quando um gás se dilata adiabaticamente, como qualquer outra expansão, ele efetua trabalho externo, sendo necessária energia para efetuar trabalho. Nesse processo isotérmico, o gás tem que absorver energia térmica de uma fonte externa para efetuar trabalho. Se no processo adiabático não há essa troca de energia de uma fonte externa o próprio gás deve realizar trabalho às custas de sua própria energia.

Uma expansão adiabática sempre vem acompanhada por uma diminuição da temperatura do gás, devido ao simples fato de que este necessita utilizar parte de sua energia interna para a realização deste trabalho.

# Capacidade térmica

## Capacidade térmica (ou capacidade calorífica)

Geralmente é representada pela letra C maiúscula, onde  $C_p$  (ocorre à pressão constante) e  $C_v$  (à volume const.)

$$C = \frac{Q}{\Delta T}$$

*“ mede quanto calor é necessário para elevar a temperatura dessa substância em 1°C ”*

Processos:

$C_v$  (volume constante):

$$C_v = \frac{Q_v}{\Delta T} = \frac{\Delta U}{\Delta T}$$

$C_p$  (pressão constante):

$$C_p = \frac{Q_p}{\Delta T} = \frac{\Delta H}{\Delta T}$$

## Capacidade térmica dividida pelo número de moles: ( $\bar{c}$ )

A partir da definição de entalpia, é possível demonstrar que:

$$C_p = C_v + nR$$

Logo temos que:

$$\bar{c}_p = \bar{c}_v + R$$

Verificamos que a diferença entre  $\bar{c}_v$  e  $\bar{c}_p$  é exatamente a constante universal de gases  $R$ , ou seja,  $8,314 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$ .

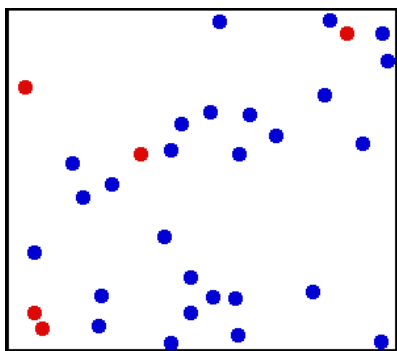
- Leia Cap. 2 Apostila: Física do Ambiente Agrícola

## Gases diferentes, absorvem calor de forma diferente ( $\bar{c}$ )

O valor do calor específico de gases ideais pode ser deduzido teoricamente. Não detalhamos, aqui, essa dedução, mas apresentaremos apenas o resultado final:

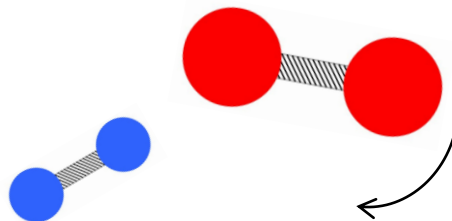
para gases ideais monoatômicos:  $\bar{c}_v = \frac{3}{2}R$  e  $\bar{c}_p = \frac{5}{2}R$

para gases ideais diatômicos:  $\bar{c}_v = \frac{5}{2}R$  e  $\bar{c}_p = \frac{7}{2}R$

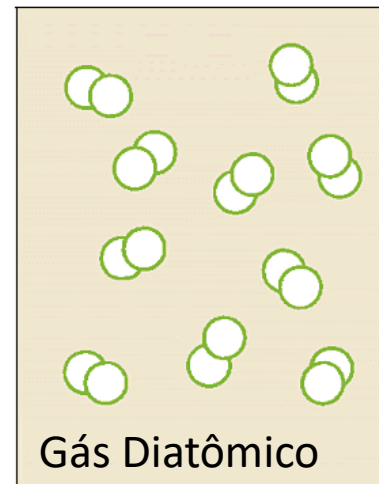


➤ Monoatômico

Moléculas diatômicas absorvem calor para girar, vibrar, etc..






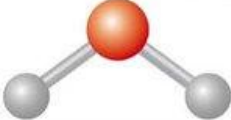
Exemplos moléculas:  $H_2$ ,  $O_2$ ,  $N_2$



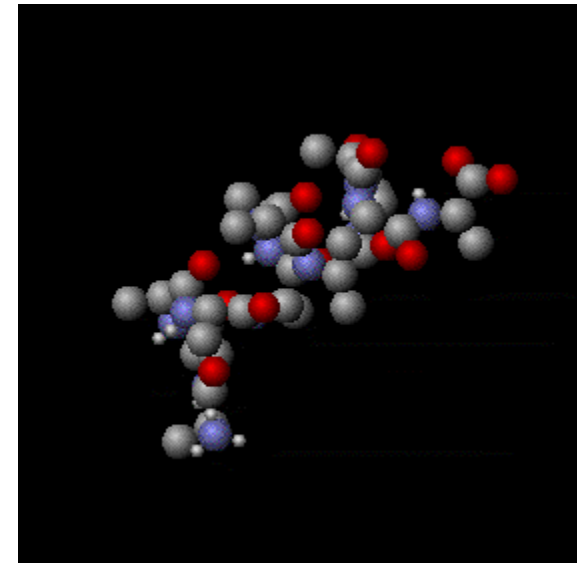
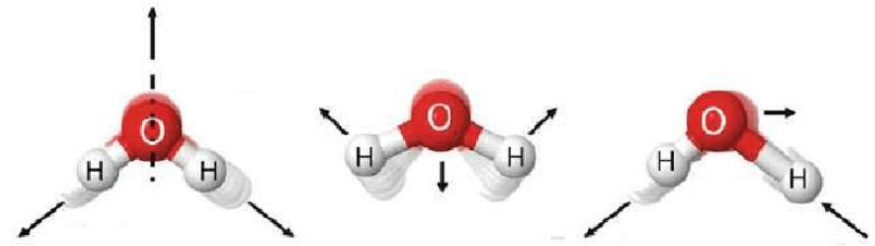
Gás Diatômico

# Processo Adiabático: Capacidade térmica

Para moléculas com mais átomos, valor de  $c_p$  e  $c_v$  será outro:

Type of molecule	$N$	Degrees of freedom	Modes
Monatomic, e.g. Ne 	1	3	3 translational 0 rotational 0 vibrational
Diatomic, e.g. HCl 	2	6	3 translational 2 rotational 1 vibrational
Triatomic linear, e.g. CO <sub>2</sub> 	3	9	3 translational 2 rotational 4 vibrational
Triatomic non-linear, e.g. H <sub>2</sub> O 	3	9	3 translational 3 rotational 3 vibrational

Molécula da água (tri-atômica) pode transladar, rotacionar, vibrar, etc..



Outras mais complexas:

# Coeficiente $\gamma$

Coeficiente  $\gamma$

$$\gamma = \frac{\bar{c}_p}{\bar{c}_v}$$

Para gases monoatômicos:  
ex: Hélio, Ne, Ar, etc..

$$\gamma = 1,67$$

Para gases diatômicos:  
ex: gás  $O_2$ ,  $N_2$ ,  $F_2$ , CO, etc..

$$\gamma = 1,40$$

Gases compostos por moléculas maiores, que possuem calor específico maior, têm valores de  $\gamma$  menores:  $\gamma_{CO_2} = 1,31$ ;  $\gamma_{C_3H_8} = 1,13$ ;  $\gamma_{H_2O} = 1,33$ .

# Coeficiente $\gamma$ : Ar atmosférico

O coeficiente  $\gamma$  do **ar atmosférico** é importante para nós em muitas aplicações.

$$\gamma = \frac{\bar{c}_p}{\bar{c}_v}$$

Como ele é composto por:

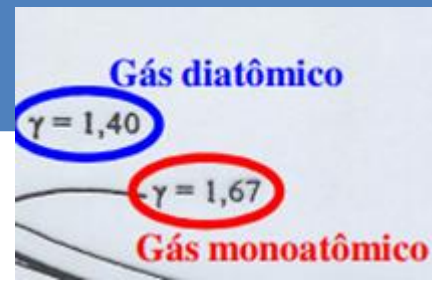
- 21% de Oxigênio ( $O_2$ ) ;
- 78 % de Nitrogênio ( $N_2$ ) ;
- etc..

podemos considerar o ar atmosférico praticamente como um **gás diatômico**:

$$\gamma = 1,40$$



# Processo Adiabático



- No Cap. 2 da Apostila: Física do Ambiente Agrícola é demonstrada as equações do processo adiabático:

**Equações:**

$$\bar{c}_p = \bar{c}_v + R$$

$$\gamma = \frac{\bar{c}_p}{\bar{c}_v}$$

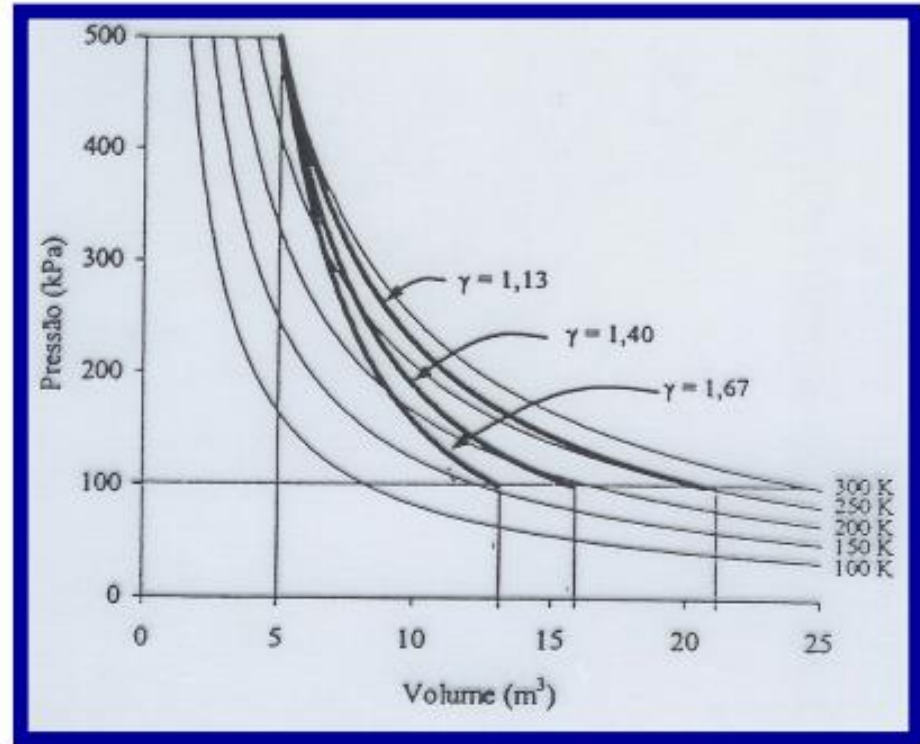
$$PV = nRT$$

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2}$$

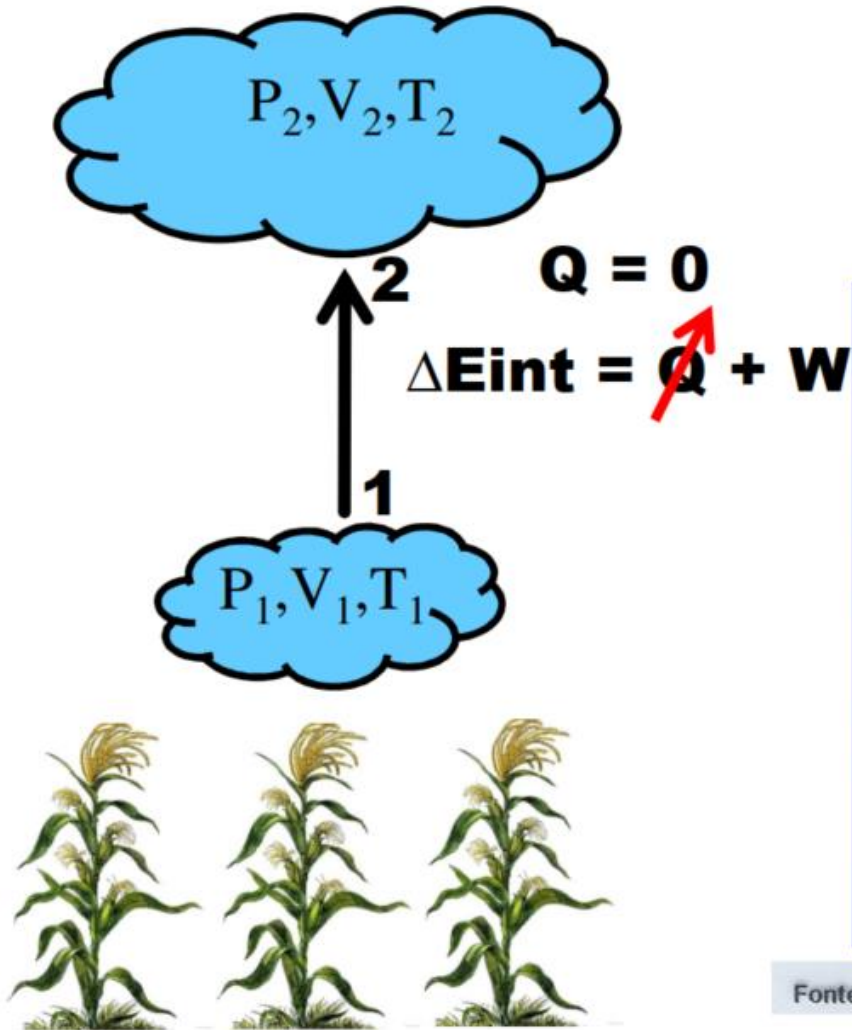
$$P_1 V_1^\gamma = P_2 V_2^\gamma$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \left( \frac{V_1}{V_2} \right)^{\gamma-1}$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \left( \frac{P_1}{P_2} \right)^{\frac{1-\gamma}{\gamma}}$$

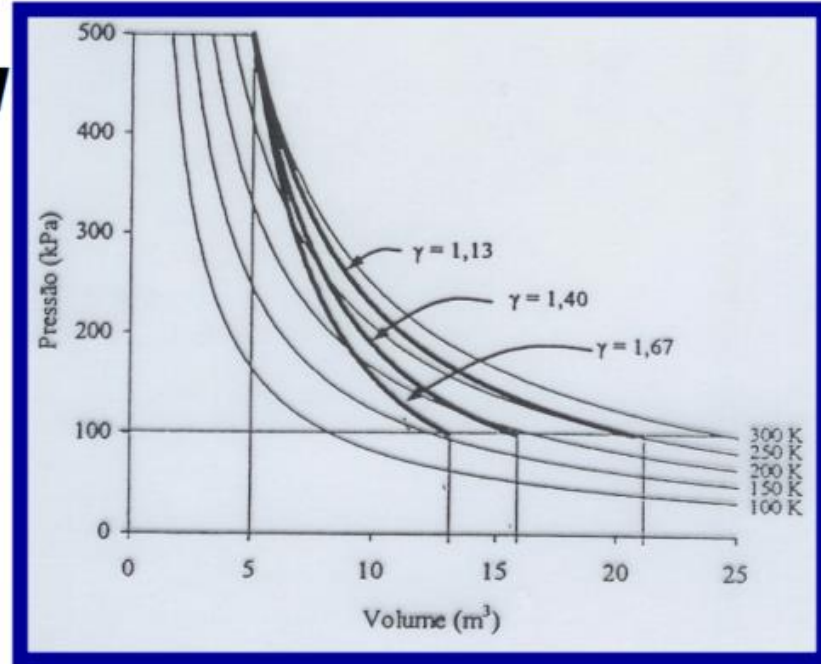


# Processo Adiabático



## Objetivos:

- Relacionar calor específico ( $\bar{c}_p$  e  $\bar{c}_v$ )
- Expressão Geral do Processo Adiabático

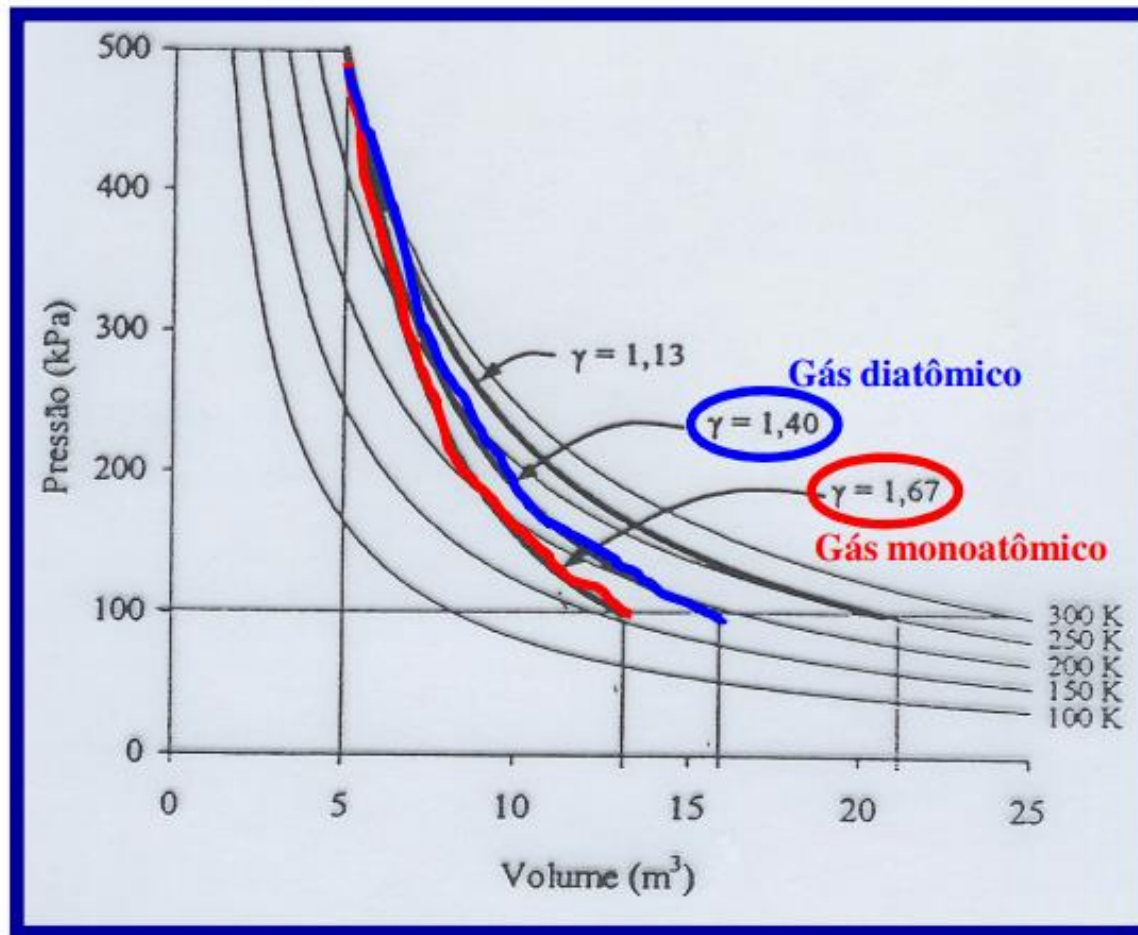


Fonte: REICHARDT, K.; LIBARDI, P.L.; MORAES, S.O.; NASCIMENTO FO. V.F. 1997.

# Processo Adiabático

Se o gás for monoatômico (exemplo: He, Ne, etc...) ou diatômico (exemplo: O2, N2, etc..) faz diferença no processo adiabático.. **Muda a absorção de energia interna das partículas do gás..**

$$\Delta U_{\text{int}} = -W$$



Fonte: REICHARDT, K.; LIBARDI, P.L.; MORAES, S.O.; NASCIMENTO FO. V.F. 1997.

# Exemplos: Processo Adiabático

## Ar ascendente

Resfria-se por expansão adiabática

Expande-se porque diminui a pressão atmosférica exercida sobre ele

Diminui a energia interna do ar

Resfria

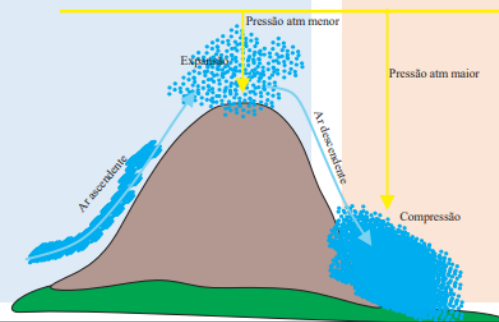
## Ar descendente (subsidente)

Aquece-se por compressão adiabática

Comprime-se porque aumenta a pressão atmosférica exercida sobre ele

Aumenta a energia interna do ar

Aquece

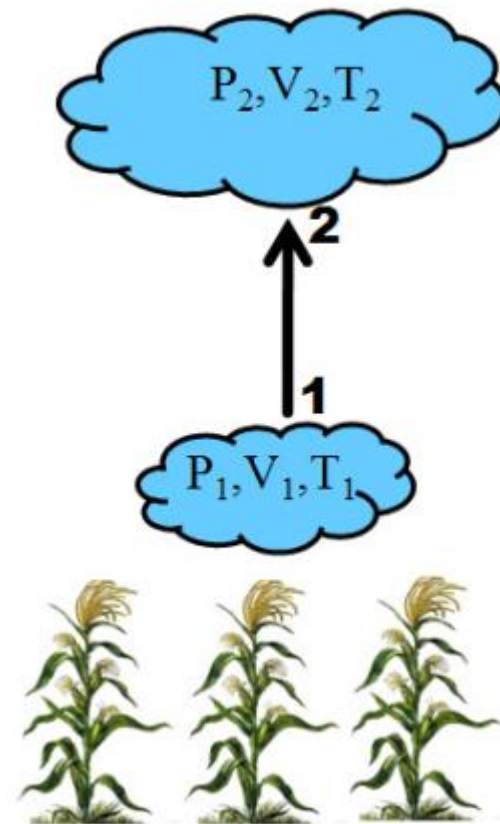


# Exemplos Ar Atmosférico: Processo Adiabático

Considere um volume de **ar atmosférico**, com  $n = 10$  moles, inicialmente com temperatura de 300 K, sob pressão de  $1,2 \cdot 10^5$  Pa, que sofre um processo adiabático até atingir pressão final de  $0,9 \cdot 10^5$  Pa. **Sabendo que para o ar atmosférico  $\gamma = 1,4$** . Calcule:

- O volume inicial ( $V_1$ )
- O volume final ( $V_2$ )
- A temperatura final ( $T_2$ )

**Resposta:  $V_1 = 207,85$  L;  $V_2 = 255,64$  L e  $T_2 = 276,33$  K**



$$R = 8,314 \text{ m}^3 \text{ Pa/mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$$

# Raiz fracionária

Atenção com as contas:

Nesses exercícios de Processo adiabático é comum ter que resolver raízes fracionárias, lembre que:

$$\sqrt[5]{2^3} = 2^{\frac{3}{5}}$$

Exemplo:

Calculando o Volume final ( $V_2$ ), como resolver essa etapa? ( $\gamma = 1,4$ )

$$V_2^\gamma = 2343,0889 \qquad V_2 = ?$$

Aplica raiz  $\sqrt[\gamma]{\quad}$  dos dois lados da equação

$$\sqrt[\gamma]{V_2^\gamma} = \sqrt[\gamma]{2343,0889}$$

$$V_2 = \sqrt[\gamma]{2343,0889}$$

$$V_2 = (2343,0889)^{1/\gamma}$$

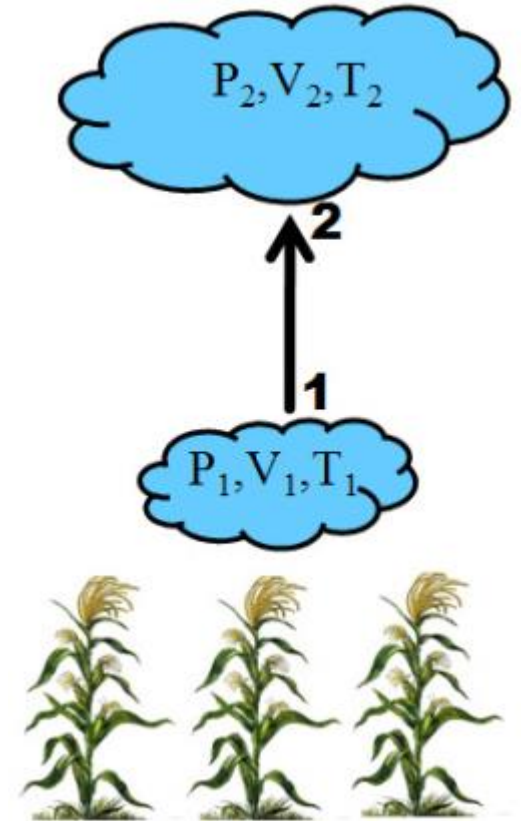
$$V_2 = (2343,0889)^{1/1,4}$$

$$V_2 = 255,26 \text{ litros}$$

# Exemplos outros gases: Processo Adiabático

Considere um **gás 1**, com  $n = 1000$  moles, inicialmente com volume de  $5 \text{ m}^3$ , sob pressão de  $500 \text{ kPa}$ , que sofre um processo adiabático até atingir pressão final de  $100 \text{ kPa}$ . **Considere que para esse gás  $c_v = (7/3)R$ .** Calcule:

- A temperatura inicial ( $T_1$ )
- A temperatura final ( $T_2$ )
- O volume final ( $V_2$ )

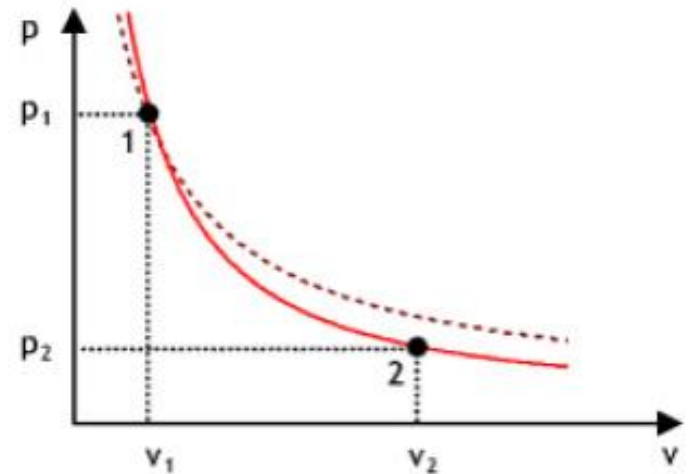


**Respostas:  $T_1 = 300,69 \text{ K}$   $T_2 = 185,64 \text{ K}$  e  $V_2 = 15,42 \text{ m}^3$**

# Exemplos: Processo Adiabático

Considere agora um segunda gás (**gás 2**) com  $n = 1000$  moles, inicialmente com volume de  $5 \text{ m}^3$ , sob pressão de  $500 \text{ kPa}$ , que sofre um processo adiabático até atingir pressão final de  $100 \text{ kPa}$ . Considere que para esse gás tem  $c_v = (23/3)R$ . Calcule:

- A temperatura inicial ( $T_1$ )
- A temperatura final ( $T_2$ )
- O volume final ( $V_2$ )
- Compare os valores de  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $V_2$ , do gás 1 e do gás 2. Interprete os resultados pensando no gráfico  $P \times V$ .



**Respostas:  $T_1 = 300,69 \text{ K}$   $T_2 = 249,86 \text{ K}$  e  $V_2 = 20,77 \text{ m}^3$**



# Exemplos: Processo Adiabático

- 6) Um volume de ar seco é aquecido pela superfície da Terra, a uma altitude de 550 m acima do nível do mar, onde a pressão atmosférica equivale a  $0,94 \cdot 10^5$  Pa, atingindo a temperatura de 310 K. O volume de ar começa então a subir, expandindo-se adiabaticamente, até chegar à altitude de 1550 m acima do nível do mar, onde a pressão atmosférica equivale a  $0,84 \cdot 10^5$  Pa. Calcular a temperatura do ar ao chegar a essa altitude. Qual é o gradiente térmico? (R: 300,2 K; 9,8 K/km)

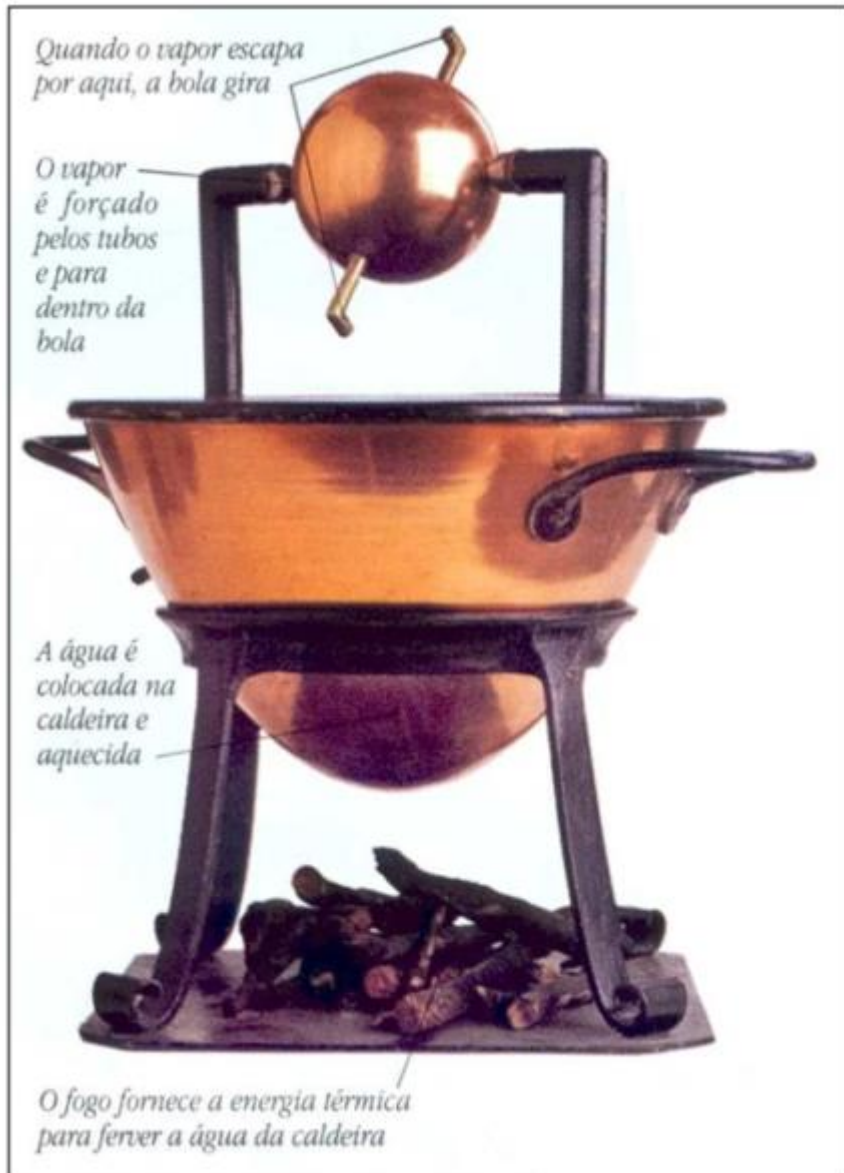
**Resposta:  $T = 300,2$  K    $GT = 9,8$  K km<sup>-1</sup>**

# Tarefas

- Leia o Cap. 2 da Apostila:
  - Física do Ambiente Agrícola  
(tem no e-disciplinas pdf)
- Treine exercícios de Processo Adiabático da Lista 2, do Cap. 2 e dos Livros recomendados.

# História Máquinas a vapor

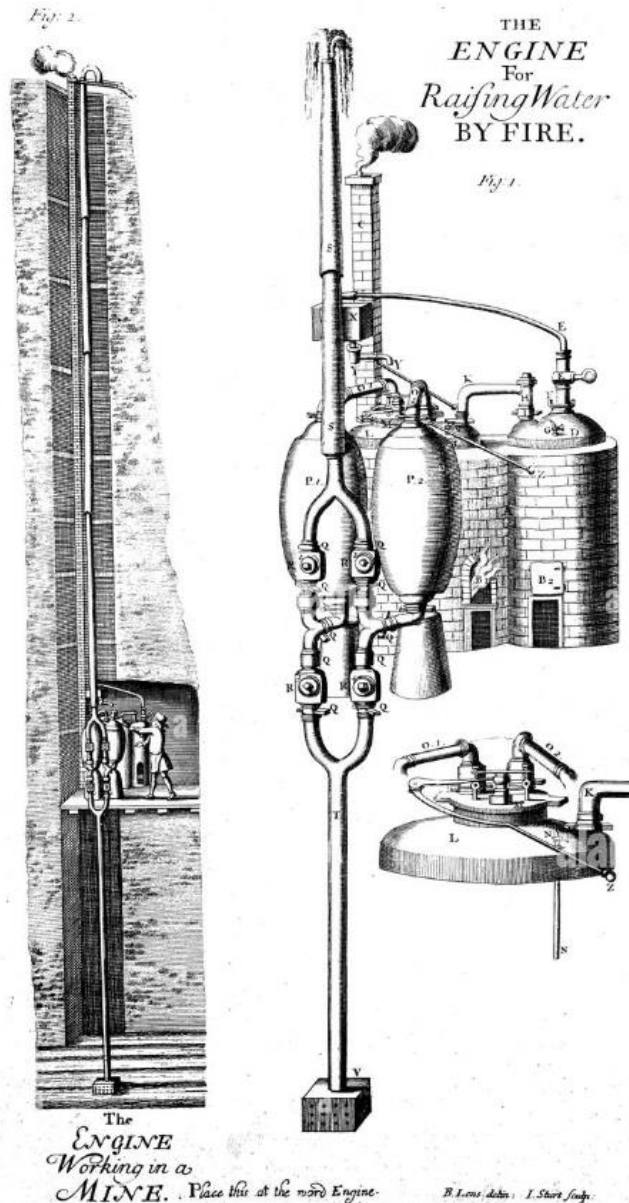
# Desenvolvimento de Máquinas a vapor



O engenheiro grego **Hero de Alexandria** (100 d.C.) inventou a **aelolípila**, um motor a vapor simples. O vapor liberado pela água fervida dentro de uma esfera saía por bicos recurvos, fazendo a esfera girar.

Energia. Coleção Aventura na Ciência Invenções. Coleção Aventura Visual (Editora Globo, 1994)

# Desenvolvimento de Máquinas a vapor



## Bomba de água de Savery (1650-1715)

Esta bomba de água desenvolvida por Thomas Savery era usada para drenar a água de minas inundadas.

### Bomba D'água

Thomas Savery patenteou em 1698 a máquina para bombear água de minas. O vapor de uma caldeira passava para um par de vasos, onde se condensava e voltava ao estado líquido, sugando água do fundo. Depois, a pressão do vapor era direcionada para fazer a água subir por um cano. Thomas Newcomen (1663-1729) produziu um motor mais aperfeiçoado em 1712.

# Desenvolvimento de Máquinas a vapor

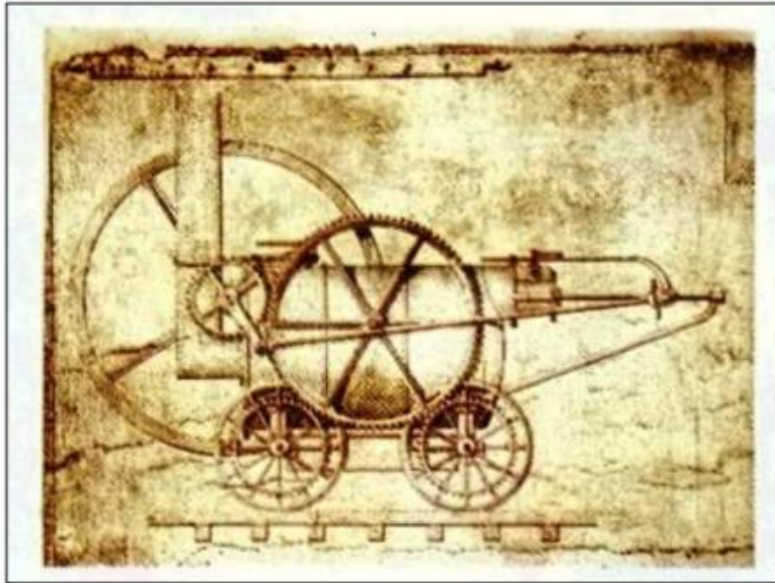


James Watt (1736 – 1819)



Engenheiro escocês que desenvolveu a primeira máquina a vapor eficiente. Estas máquinas impulsionaram a Revolução Industrial. Suas máquinas faziam uso de um tipo de engrenagem de dentes retos, que transformava o movimento de cima para baixo do pistão em um movimento giratório que acionava um eixo.

# Desenvolvimento de Máquinas a vapor

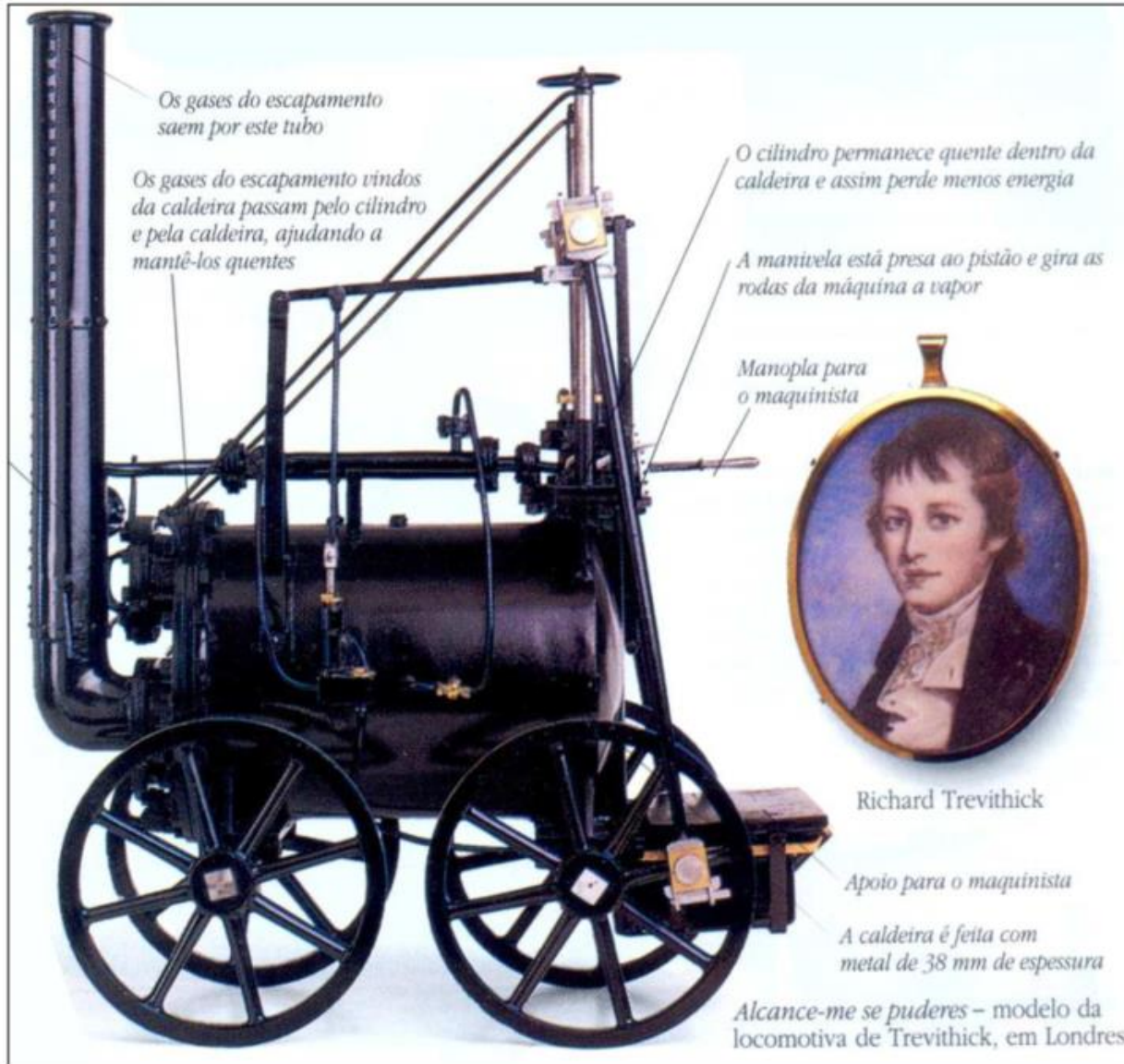


Richard Trevithick (1771 – 1833)

Construiu a **primeira locomotiva a vapor** em 1803. A figura mostra o desenho original da sua versão de 1805. O movimento para trás e para frente do pistão fazia as rodas girarem por meio de engrenagens. A primeira locomotiva Trevithick foi testada numa mina de carvão no sul do País de Gales, onde puxou cinco vagões e setenta homens por uma distância de 15 km a uma velocidade de 8 km/h.

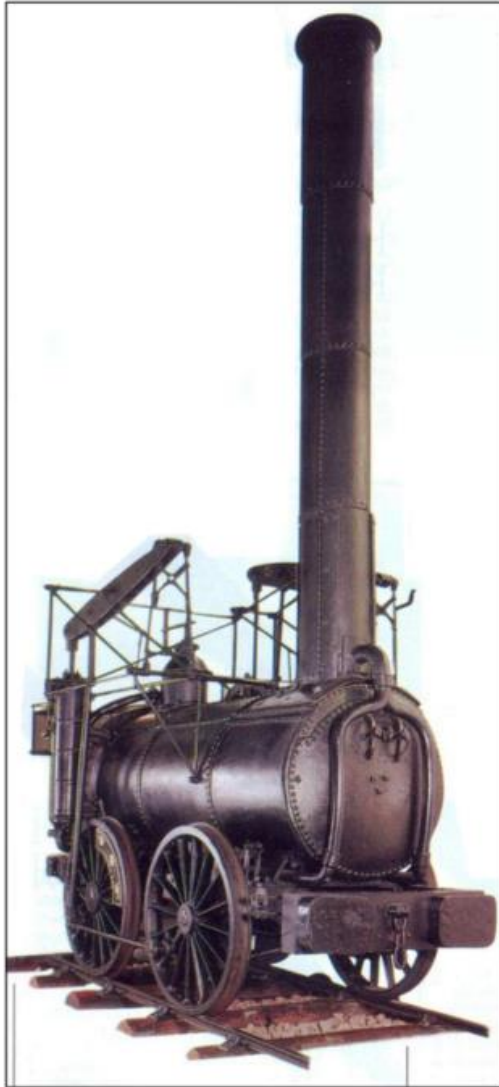


# Desenvolvimento de Máquinas a vapor

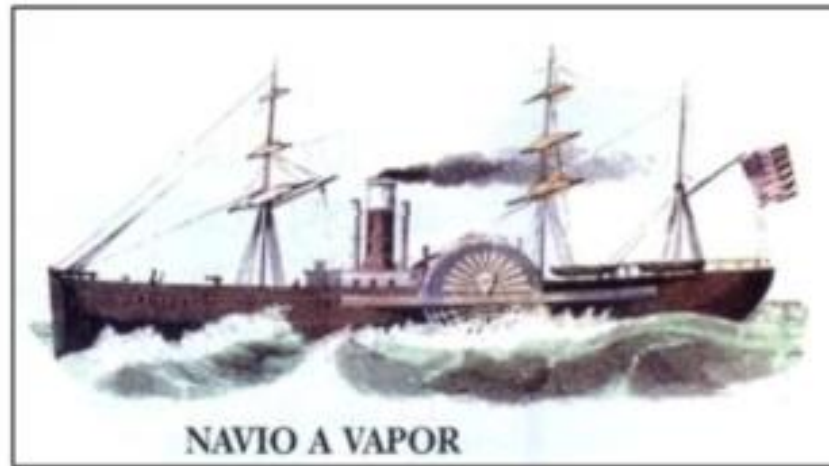




# Desenvolvimento de Máquinas a vapor



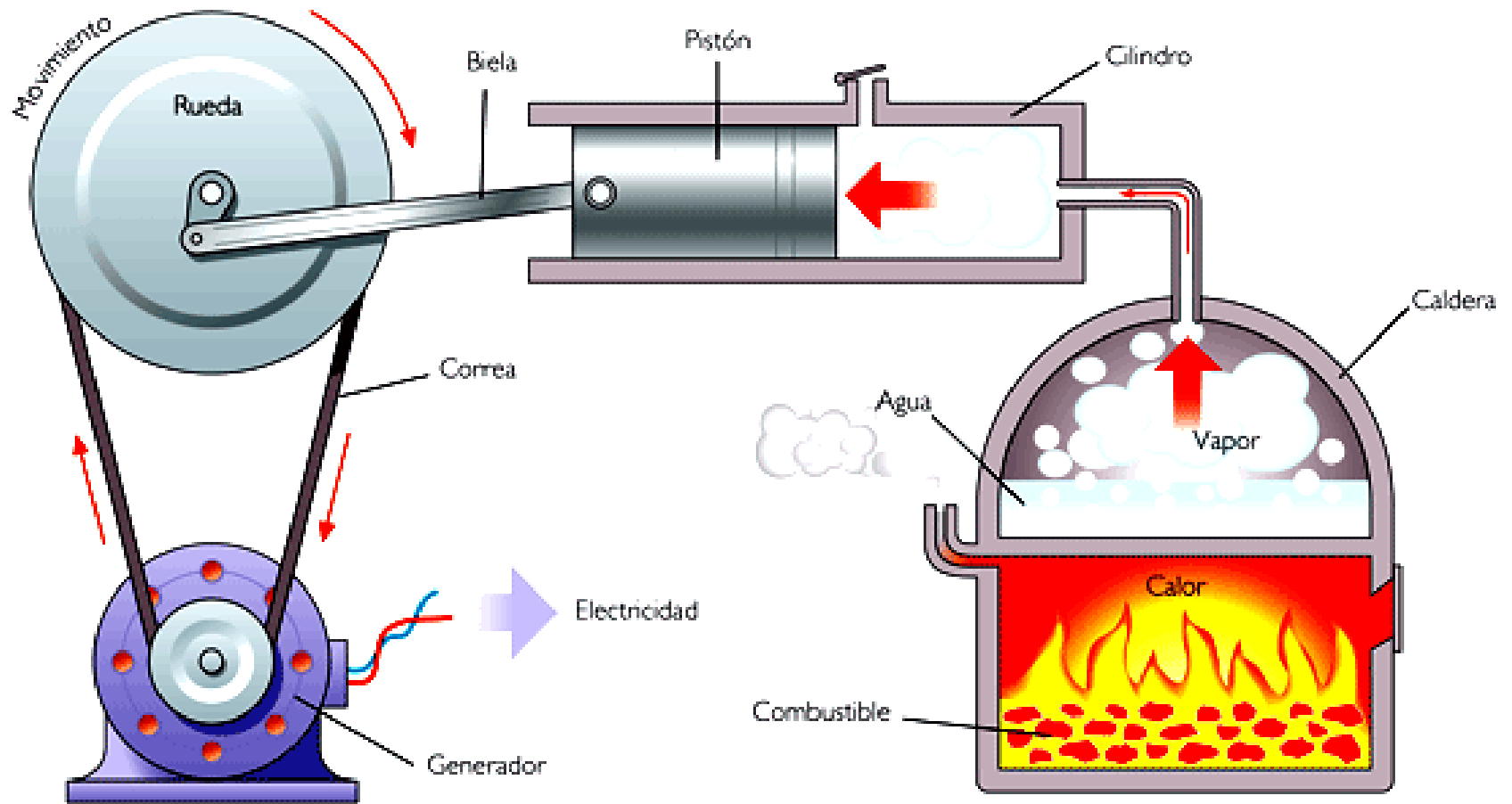
A locomotiva **Agenoria** surgiu em 1829. Possuía quatro rodas, uma caldeira e uma chaminé bem alta. Esta melhorava o fluxo de ar sobre o fogo e tornava a locomotiva mais eficiente.



O primeiro navio a cruzar o Atlântico foi o **Savannah**, em 1819. Ele partiu de New York (USA) para Liverpool (Inglaterra), numa viagem de 21 dias. O navio usava motor e velas. O primeiro navio movido apenas a vapor foi o **Sirius**, que cruzou o Canal da Mancha em 1838

# Máquina térmica

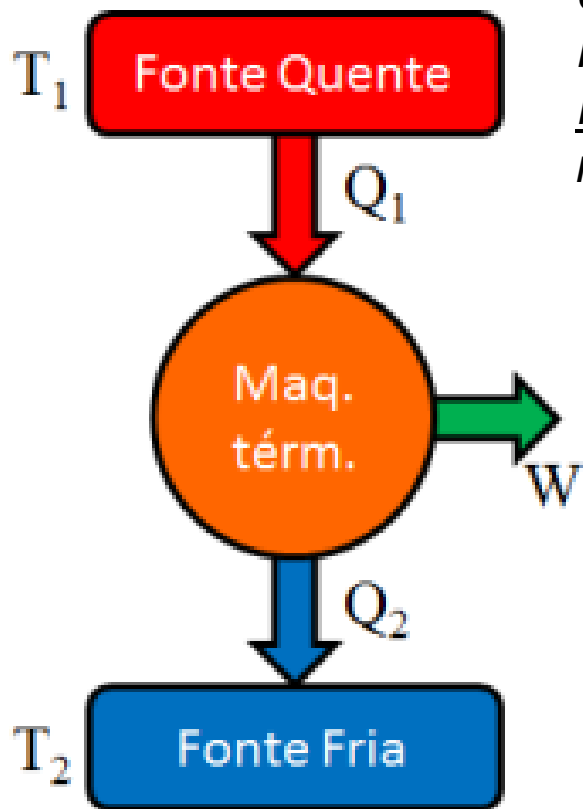
## Motor térmico



# Máquina térmica: Ciclo de Carnot



$$T_1 > T_2$$



## Teorema de Carnot

“Nenhuma máquina trabalhando entre dois reservatórios térmicos pode ser mais eficiente do que uma máquina reversível trabalhando entre os dois reservatórios”

- Transferência de calor deve ser feita isotermicamente;
- Expansão adiabática quase-estática;

Em um ciclo reversível o rendimento da máquina de Carnot é:

$$\eta = \frac{W_{liq}}{Q_1} \rightarrow \eta = 1 - \frac{Q_2}{Q_1}$$

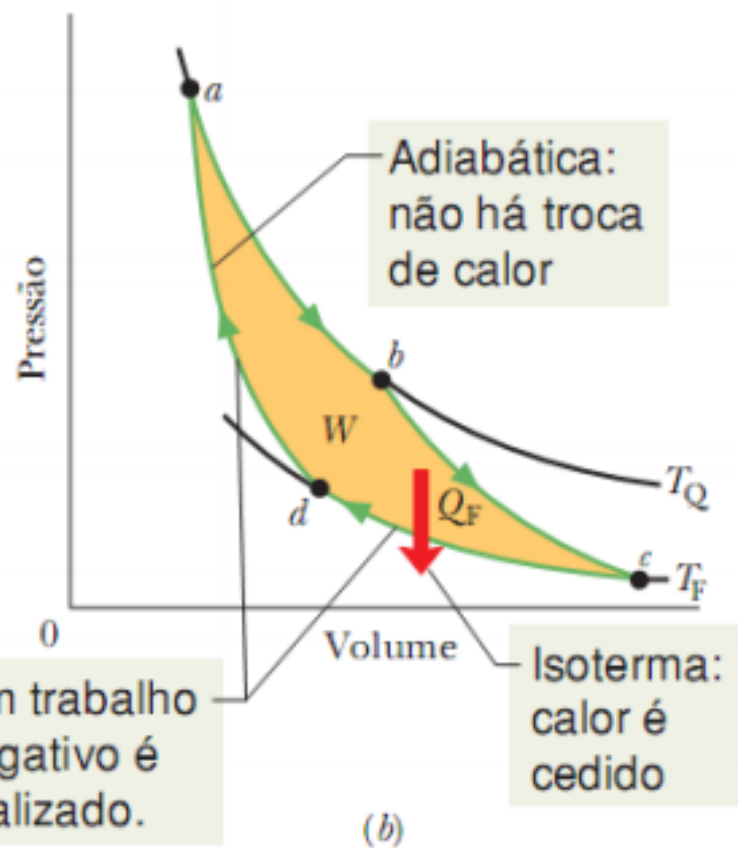
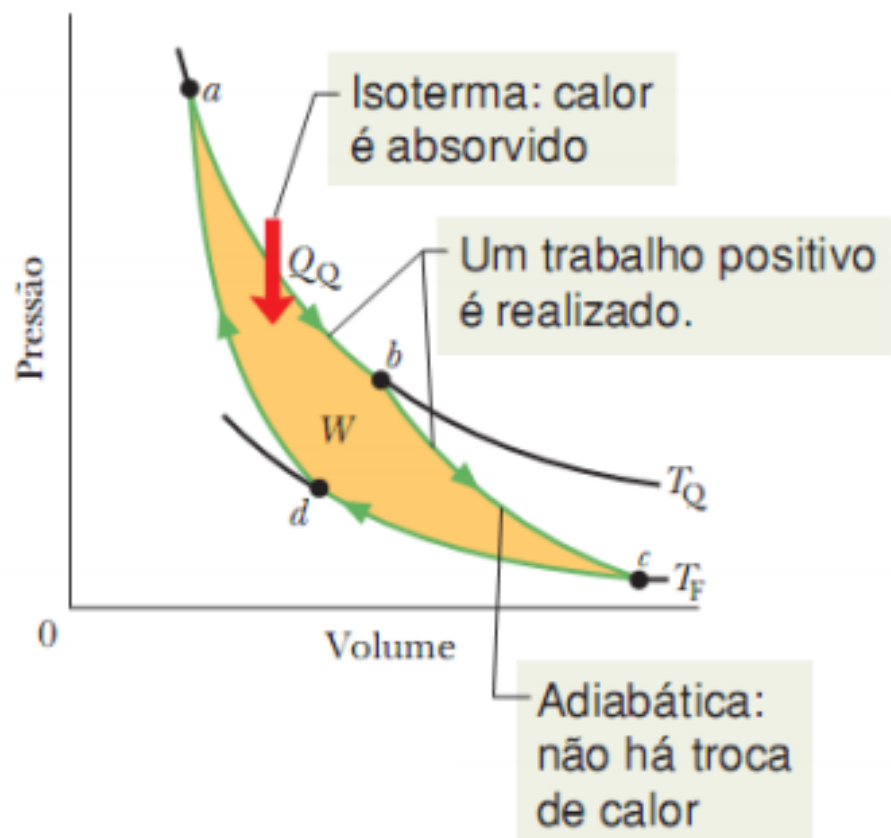
Rendimento = Trabalho líquido produzido dividido pelo calor total fornecido

$$\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

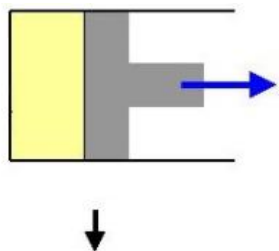
# Ciclo da Máquina de Carnot

- Transferência de calor deve ser feita isotermicamente;
- Expansão adiabática quase-estática;

Tempos de uma máquina de Carnot

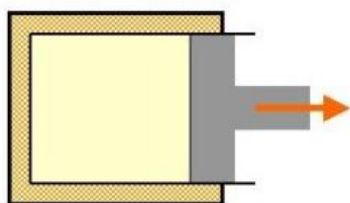


# Máquina de Carnot



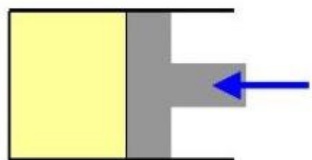
a) Processo isotérmico

$$\Delta U = 0$$
$$Q_1 = W = nRT_1 \ln\left(\frac{V_b}{V_a}\right)$$



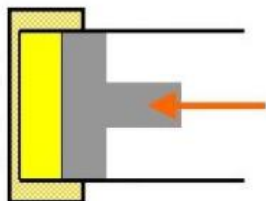
b) Expansão adiabática

$$\text{Não há trocas de calor } Q = 0$$



c) Processo isotérmico

$$\Delta U = 0$$
$$Q_2 = W = nRT_1 \ln\left(\frac{V_c}{V_d}\right)$$



d) Compressão adiabática

$$\text{Não há trocas de calor } Q = 0$$

$$\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

Considerando essas equações.. Demonstra-se que o rendimento da máquina de Carnot é dado por:

# Termodinâmica

Processos de Transferência de Calor:

- Condução
- Convecção
- Radiação

# Conceitos fundamentais

- **Calor:** É a energia que entra ou sai do sistema (“*energia em movimento*”), em virtude da diferença de temperatura entre o sistema termodinâmico e as suas vizinhanças.



Existem três processos de transferência de Calor:

- ✓ condução
- ✓ convecção
- ✓ radiação

Unidade de medida (Energia):  
[ Joules ] , [ cal ] , etc

# Sistema Aberto

Imagine uma estufa com sistema de ventilação que expulsa ar quente de dentro da estufa.  
Nessa situação, como você descreveria o balanço térmico do sistema?

Vários processos ocorrem...

- ✓ condução
- ✓ convecção
- ✓ radiação





# Condução

## ➤ Condução

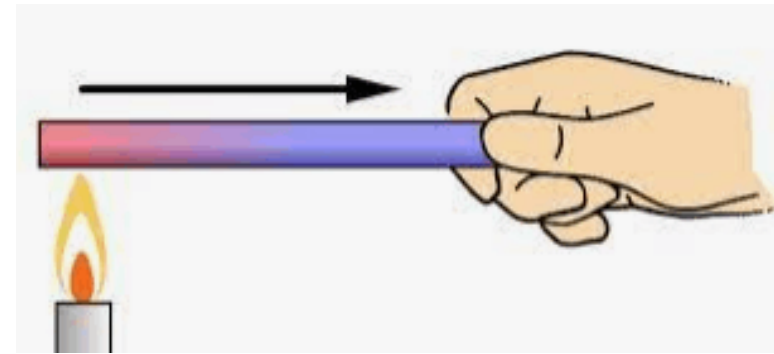
A condução é uma forma de transferência de energia térmica (calor), e somente ocorre quando os corpos estão em contato, sendo descrita matematicamente pela Lei de Fourier:

$$q = -\lambda \frac{\Delta T}{\Delta x}$$

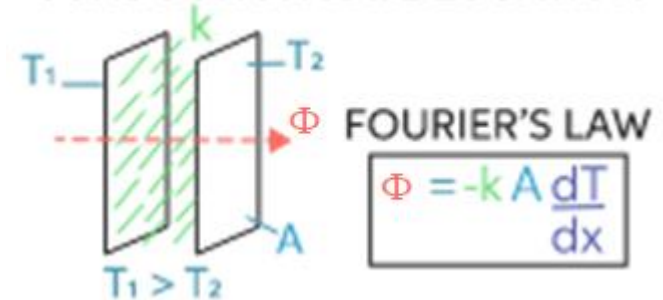
$\lambda \rightarrow$  condutividade térmica do material [w/m.K]

$\Delta T \rightarrow$  variação de temperatura [K]

$\Delta X \rightarrow$  distância [m]



CONDUCTION RATE EQUATION

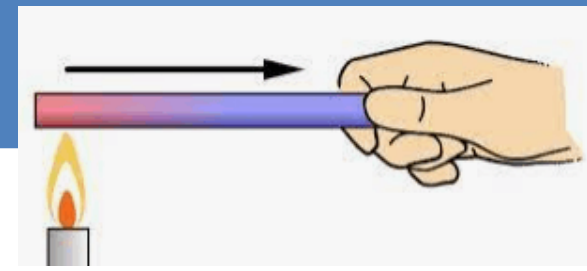


$A = \text{área [m}^2\text{]}$

$$q \rightarrow [W/m^2]$$

$$\Phi \rightarrow [W]$$

# Condução



## ➤ Fluxo de Calor ( $\phi$ )

→ calor em movimento.. Calor (energia) por unidade de tempo:

$$\Phi \rightarrow \left[ \frac{\text{Energia}}{\text{Tempo}} \right]$$

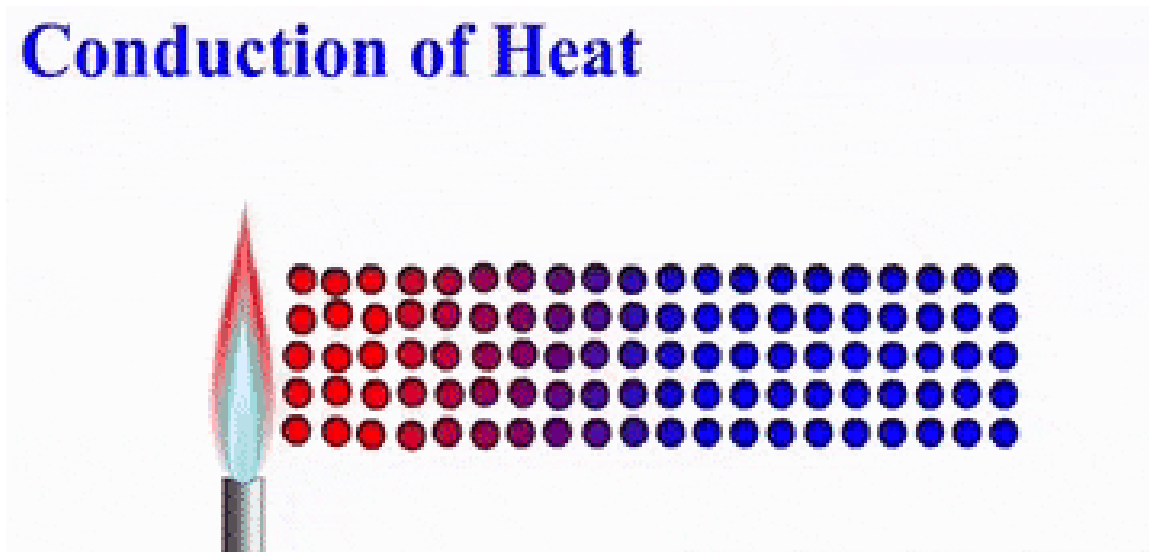
Unidades:

$$\left[ \frac{\text{Joules}}{\text{s}} \right]$$

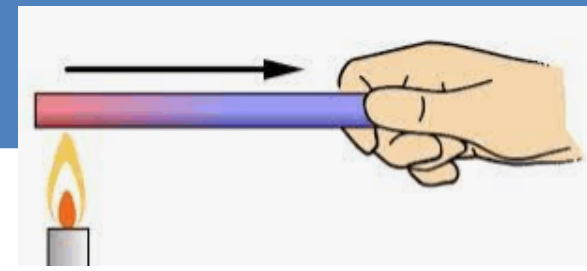
$$\left[ \frac{\text{cal}}{\text{s}} \right]$$

[Watts]

## Conduction of Heat



# Condução



## ➤ Fluxo de Calor ( $\phi$ )

→ calor em movimento.. Calor (energia) por unidade de tempo:

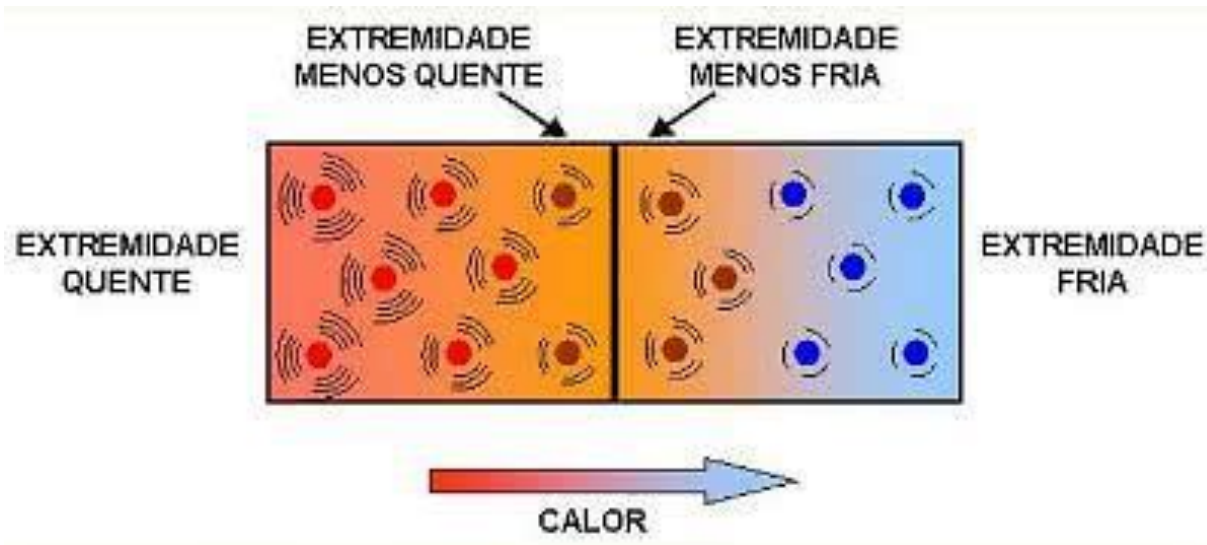
$$\Phi \rightarrow \left[ \frac{\text{Energia}}{\text{Tempo}} \right]$$

Unidades:

$$\left[ \frac{\text{Joules}}{s} \right]$$

$$\left[ \frac{\text{cal}}{s} \right]$$

[Watts]



# Condução

## ➤ Densidade de Fluxo de Calor ( $q$ )

→ calor em movimento por área.. calor por unidade de tempo e área:

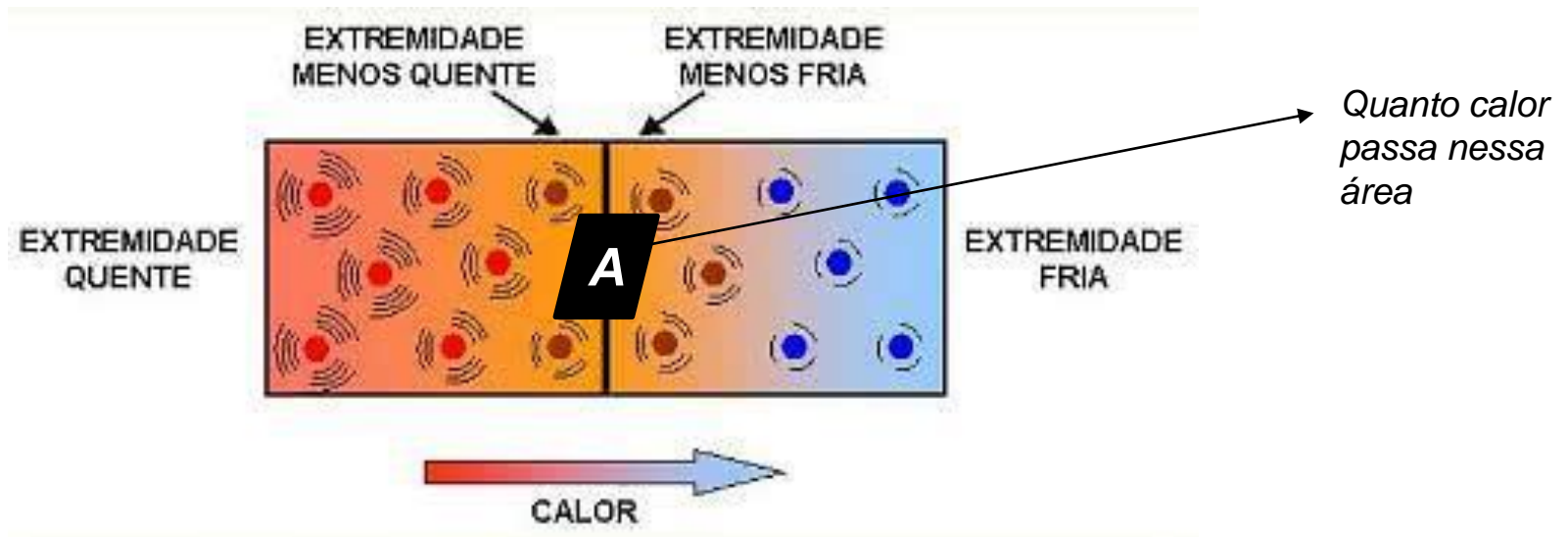
$$q = \frac{\Phi}{[\text{Área}]} \rightarrow \left[ \frac{\text{Energia}}{\text{Tempo} \cdot \text{Área}} \right]$$

Unidades:

$$\left[ \frac{\text{Joule}}{\text{s} \cdot \text{m}^2} \right]$$

$$\left[ \frac{\text{cal}}{\text{s} \cdot \text{m}^2} \right]$$

$$\left[ \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right]$$



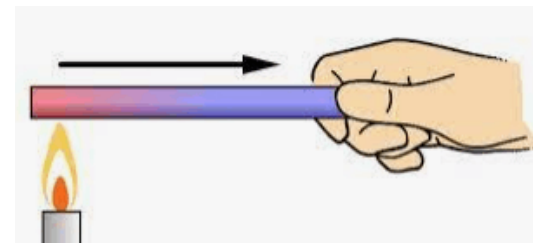
# Condutividade térmica de alguns materiais

$\lambda \rightarrow$  condutividade térmica do material [w/m.K]

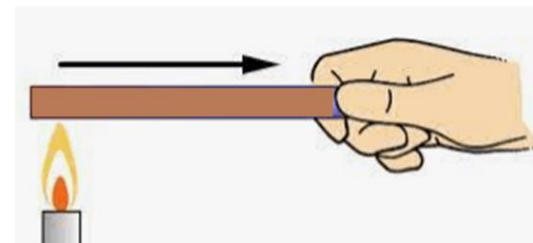
Tabela 5.1 - Condutividade térmica de alguns materiais

Tipo	Material	Condutividade térmica $\lambda$ (W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )
Metais sólidos	Alumínio	220
	Ferro	75
	Cobre	390
	Prata	420
Outros sólidos	Vidro	0,93
	Acrílico	1,9
	PVC	0,04
	Polietileno ("plástico")	0,06
	Náilon	0,3
	Gelo	2,1
Líquidos	Água	0,60
	Etanol	0,17
	Petróleo	0,15
	Mercúrio	10,4
Gases	Ar	0,024
	Vapor d'água	0,016
Materiais compostos	Madeira seca	0,06
	Isopor	0,03
	Solo seco	0,3
	Solo úmido	2,0

alumínio

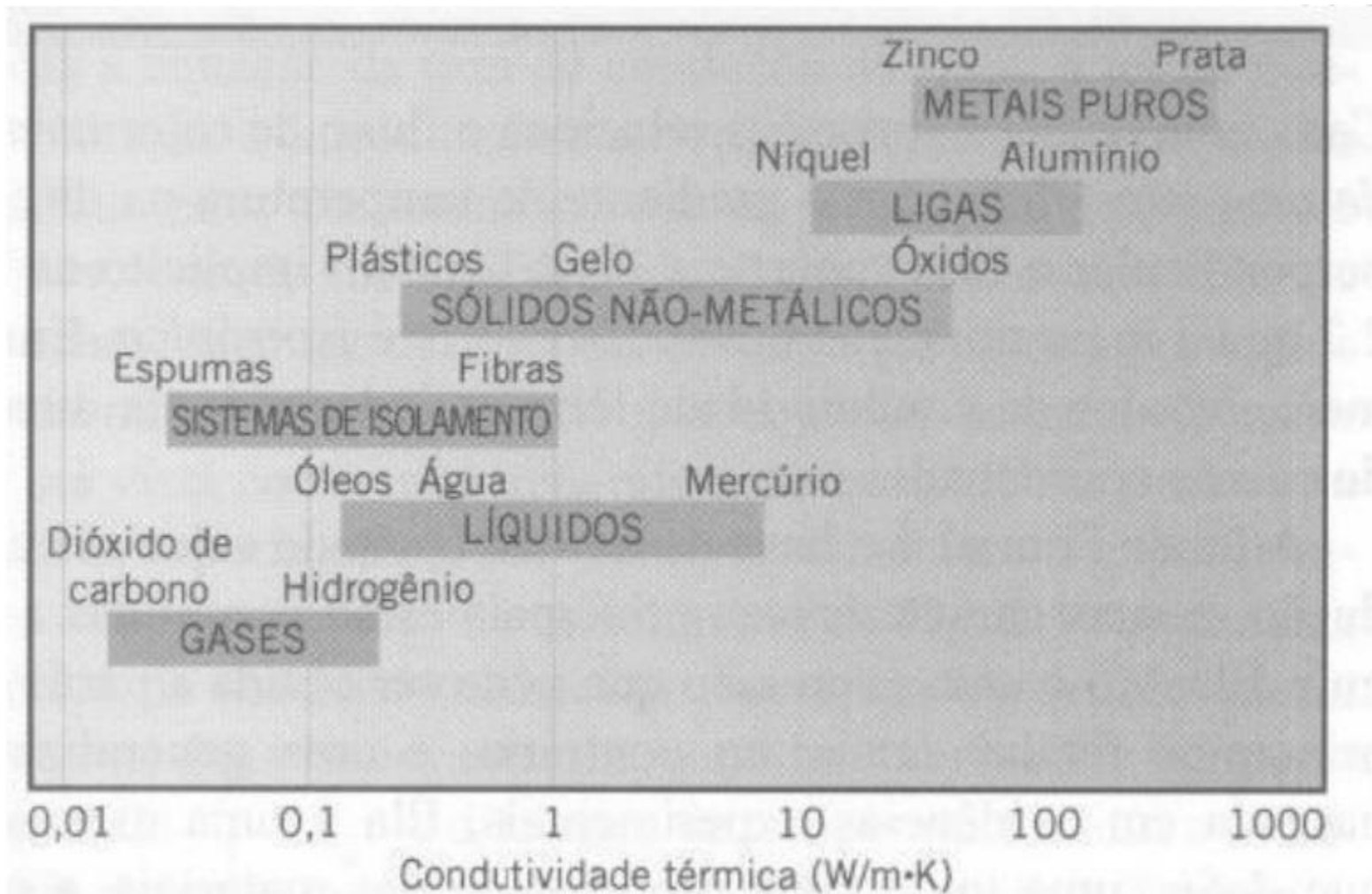


madeira



# Condutividade térmica de alguns materiais

O diagrama a seguir ilustra qualitativamente as ordens de grandeza da condutividade térmica dos materiais. Nota-se que, em geral, a condutividade aumenta na sequência de gases, líquidos e sólidos e que os metais puros são os de maior condutividade térmica.



# Exemplos: Condutividade térmica

## ➤ Condutividade térmica

Unidade de medida:

[ W / m K ] , etc

<b>Tipo</b>	<b>Material</b>	<b><math>\lambda</math> (W/m K)</b>
Material Sólido	Prata	420
	Cobre	390
	Alumínio	220
	Vidro	0,93
Líquidos	Mercúrio	10,4
	Água	0,6
Gases	Ar	0,024
Material Composto	Solo úmido	2,0
	Solo seco	0,3
	isopor	0,03

# Condutividade térmica

Demonstre que a unidade da condutividade térmica é:

$$\left[ \frac{J}{s \cdot m \cdot ^\circ C} \right]$$

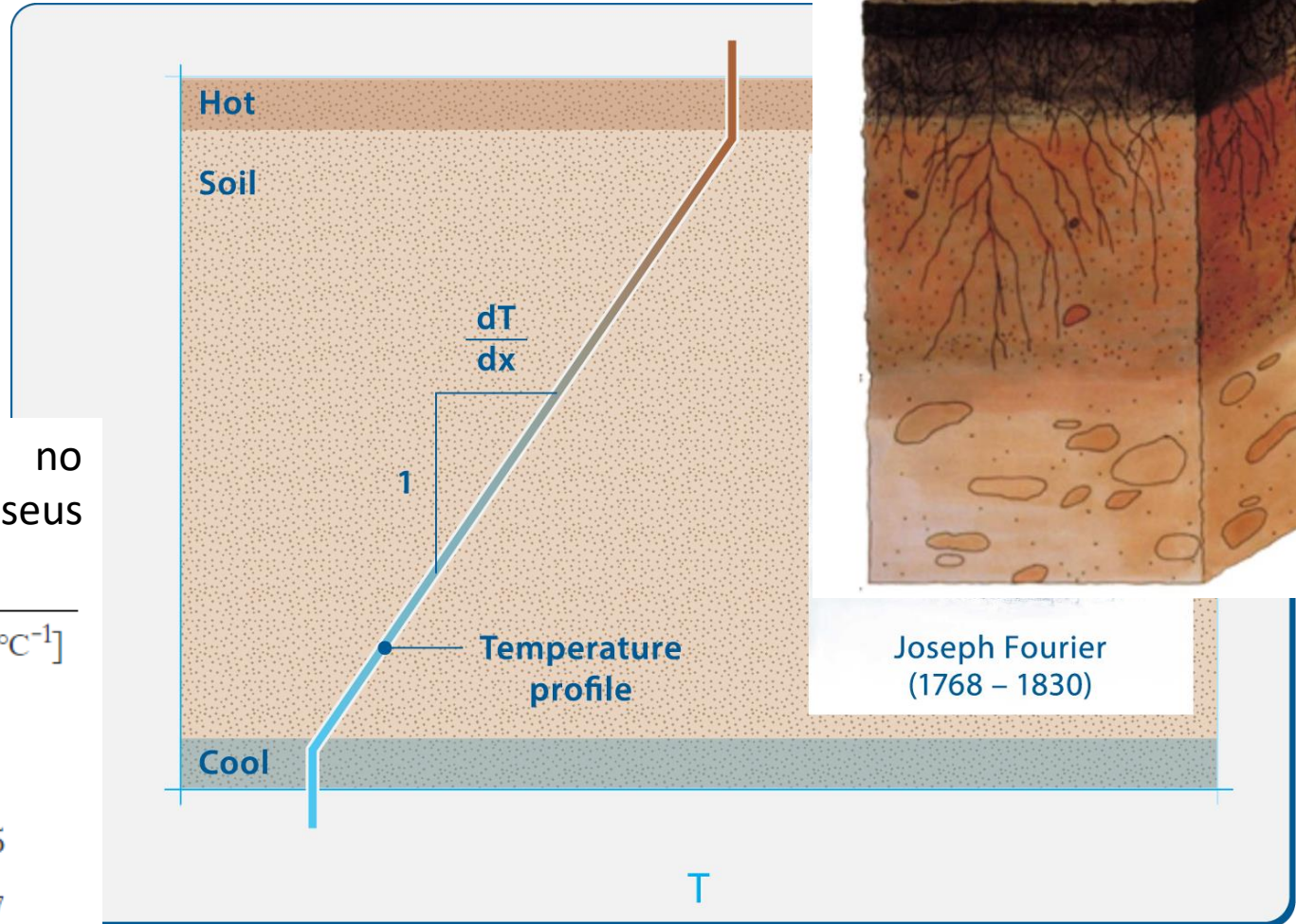


# Condutividade térmica

Converta a unidade de condutividade térmica:

$$0,15 \left[ \frac{\text{kcal}}{\text{h} \cdot \text{m} \cdot ^\circ\text{C}} \right] \longrightarrow \left[ \frac{\text{J}}{\text{s} \cdot \text{m} \cdot ^\circ\text{C}} \right]$$

# Transferência de calor no Solo



Condutividade térmica no Solo para alguns de seus constituintes:

Constituent	$[W m^{-1} \text{ } ^\circ C^{-1}]$
Quartz	8.8
Soil minerals (avg.)	2.9
Soil organic matter	0.25
Water (liquid)	0.57
Ice (at 0°C)	2.2
Air	0.025

# Transferência de calor no Solo

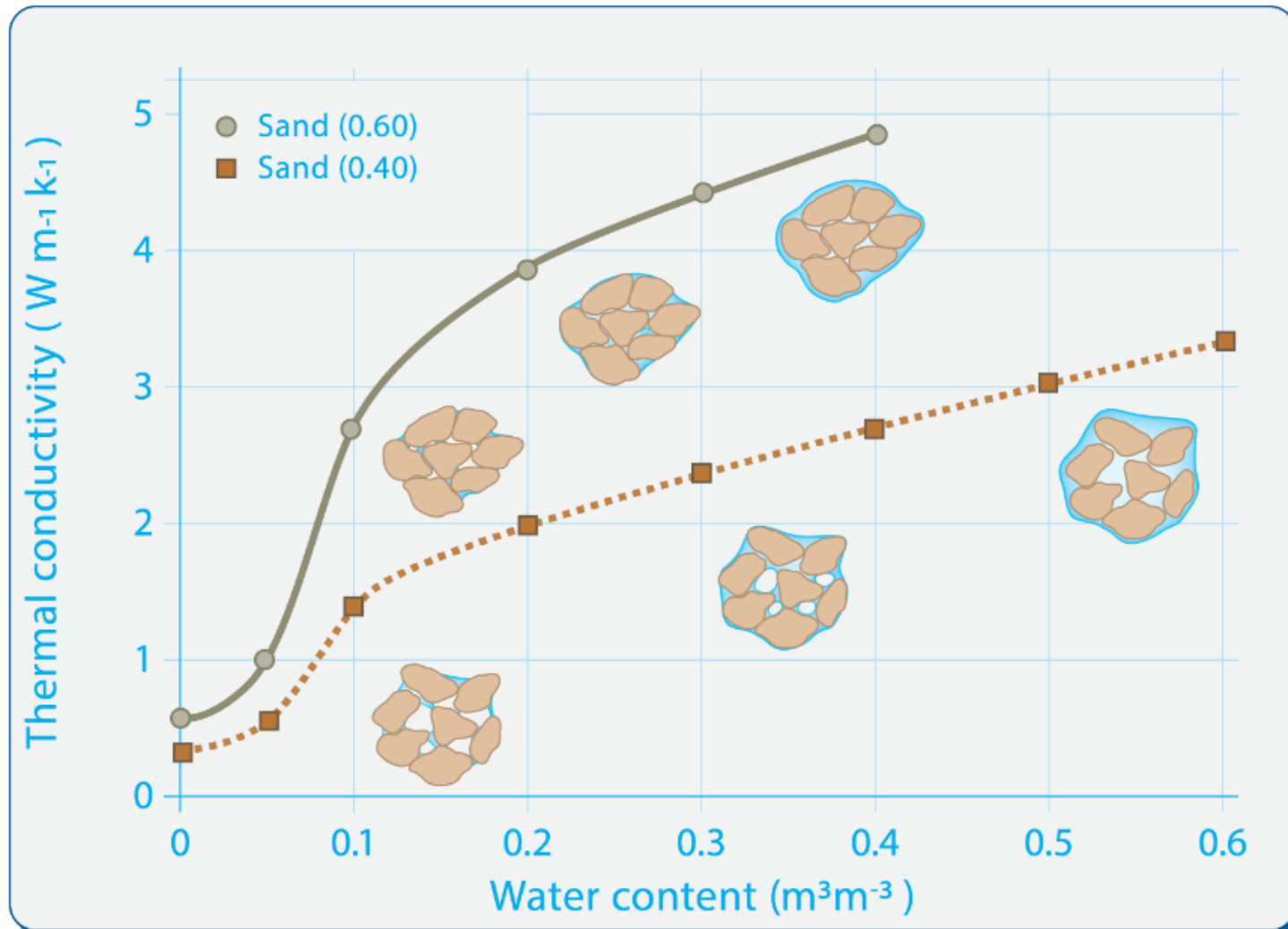
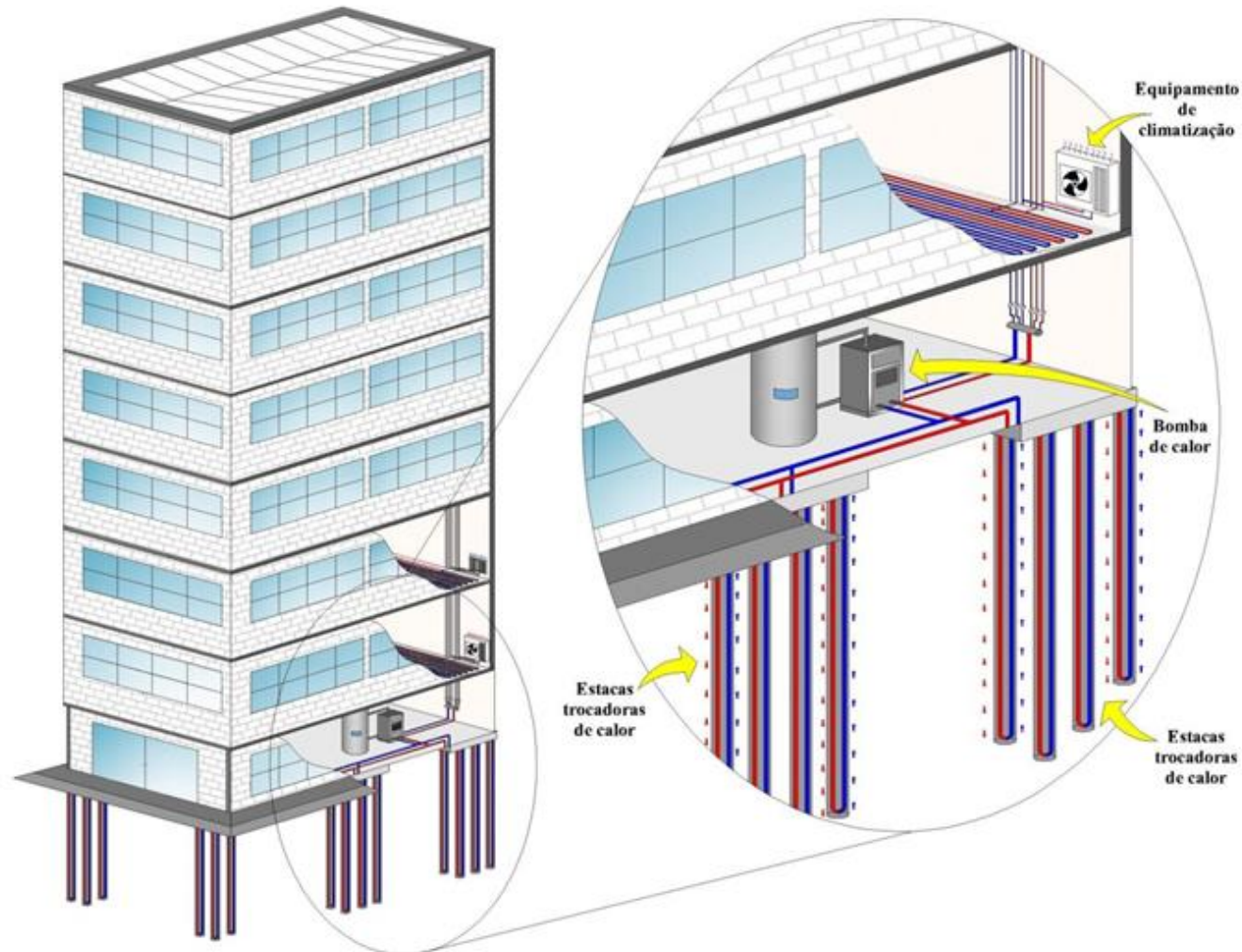


Figure 5.7 Typical values of thermal conductivity of sand and clay soils as a function of water content. Note the disproportionately large impact of the first 10% of volumetric water content which bridges between grains, providing the key pathways for heat flow.

# Troca de energia térmica entre o prédio e o subsolo

Esquema ilustra como funciona o sistema de aproveitamento de energia geotérmica para climatizar ambientes



<https://jornal.usp.br/ciencias/pesquisa-pioneira-no-brasil-propoe-o-uso-de-energia-do-solo-para-climatizar-edificios/>

# Gradiente térmico

$$q = -\lambda \frac{\Delta T}{\Delta x}$$

$\lambda \rightarrow$  condutividade térmica do material [w/m.K]

$\Delta T \rightarrow$  variação de temperatura [K]

$\Delta X \rightarrow$  distância [m]

$$\frac{\Delta T}{\Delta x}$$

Gradiente térmico  $\rightarrow$  [Kelvin / metro ]

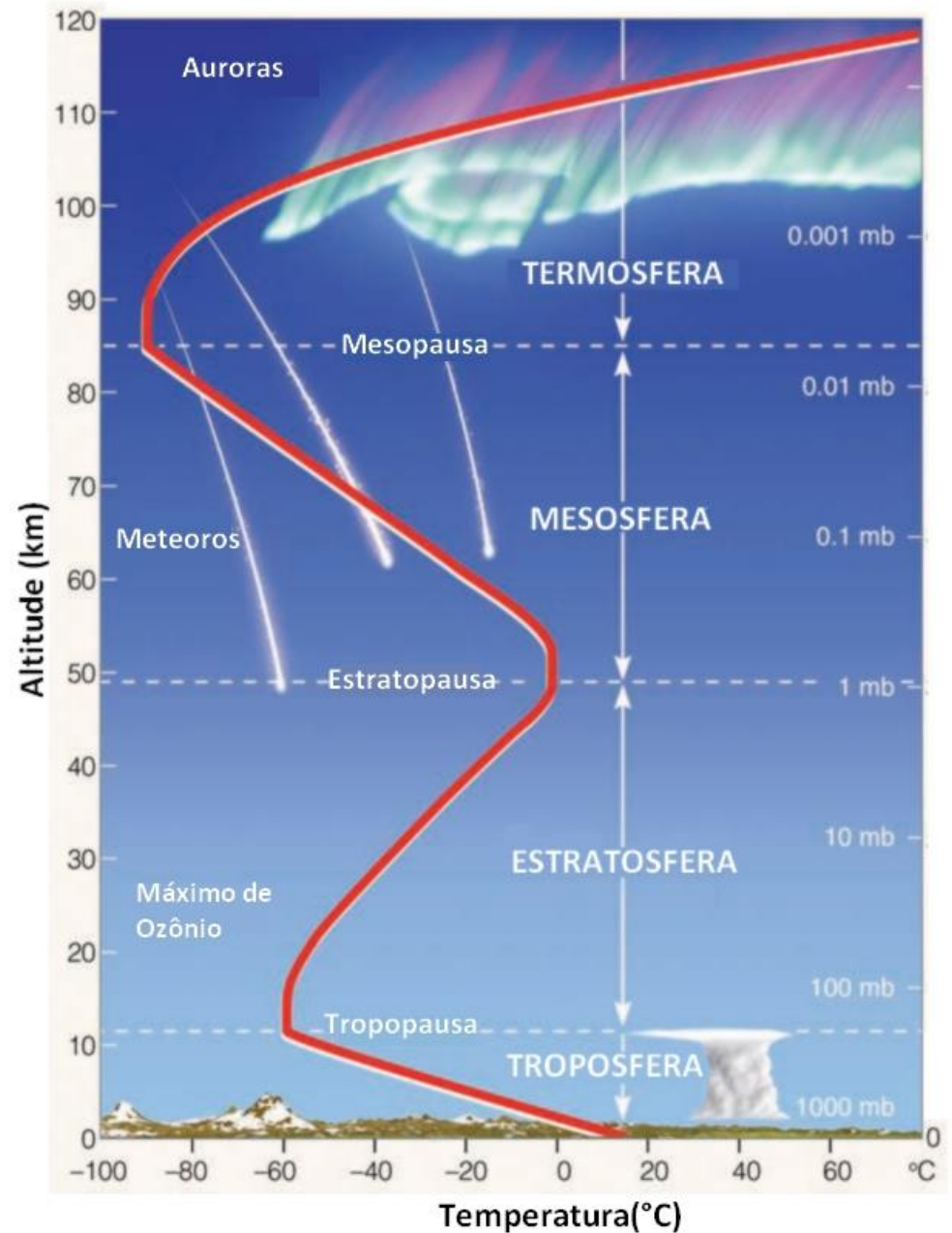
# Gradiente térmico

Gradiente térmico:

→ [ Kelvin / metro ]

$$\frac{\Delta T}{\Delta x}$$

Ex: Calcule o gradiente térmico aproximado de cada uma das 4 camadas ao lado:  
Apresente a resposta da variação em °C a cada 100 m.

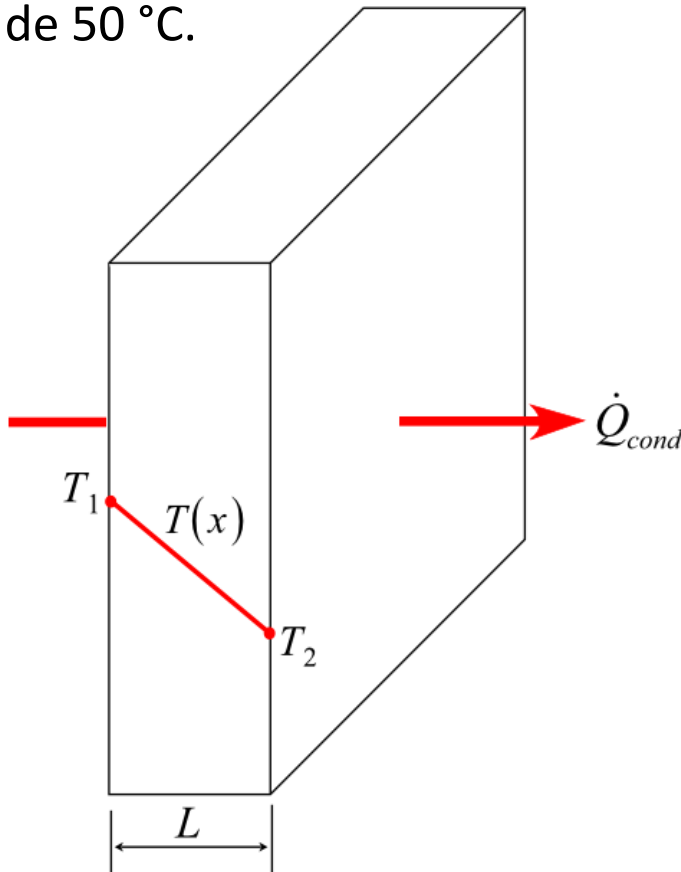


R: Troposfera: 0,8 °C/100m

# Exemplo: Lei de Fourier

1) Determine a densidade de fluxo de calor por unidade de área, que atravessa uma parede de aço muito fina, com  $L = 60$  mm de um material isolante.

A temperatura interna da parede metálica é de  $200$  °C e a temperatura externa do isolante é de  $50$  °C.



$$\lambda_{\text{material isolante}} = 0,15 \text{ kcal/h.m.}^{\circ}\text{C.}$$

$$1 \text{ cal} = 4,1868 \text{ J}$$

**Respostas:**

$$q = 436,125 \text{ W m}^{-2}$$

$$\text{ou } q = -436,125 \text{ W m}^{-2}$$

(depende da referência horizontal)

# Exemplo

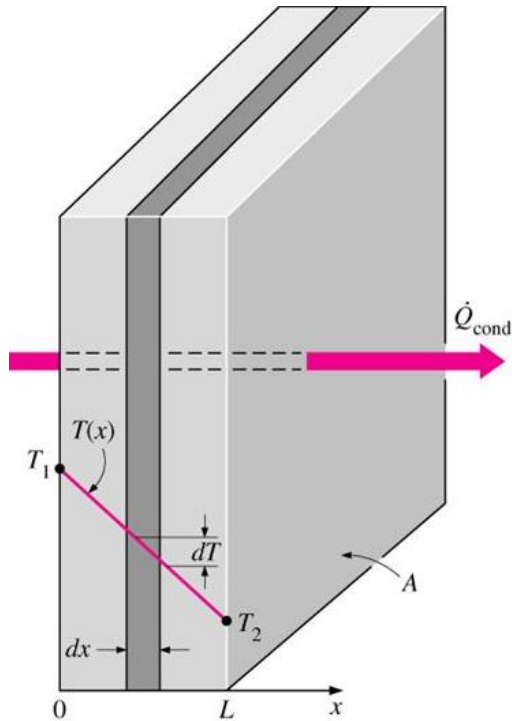
2) Um vidro plano, com coeficiente de condutividade térmica de  $0,00183 \text{ cal/s.cm.}^\circ\text{C}$ , tem uma área de  $1000 \text{ cm}^2$  e espessura de  $3,66 \text{ mm}$ . Sendo o fluxo de calor por condução através do vidro de  $2000$  calorias por segundo, calcule a diferença de temperatura entre suas faces.

**Respostas:**  
 $\Delta T = 400 \text{ }^\circ\text{C}$

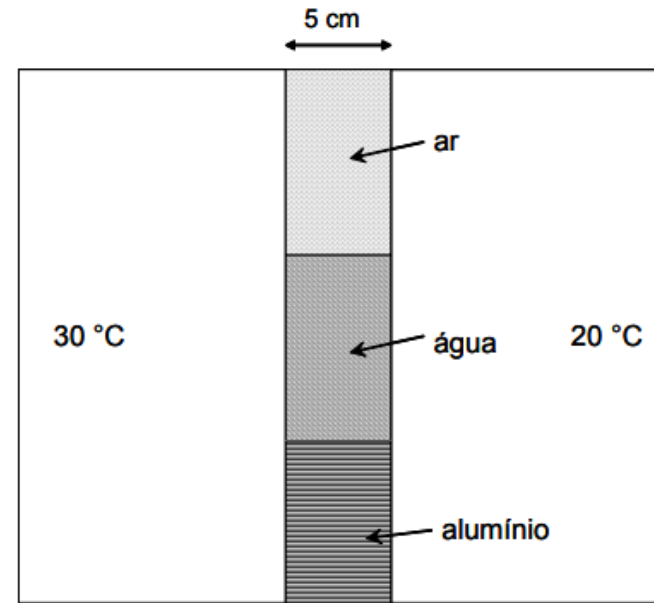


# Combinação de diferentes materiais

Como calcular o fluxo de calor em situações que temos materiais diferentes em “série” (um após outro) ou alinhados em “paralelo” ?



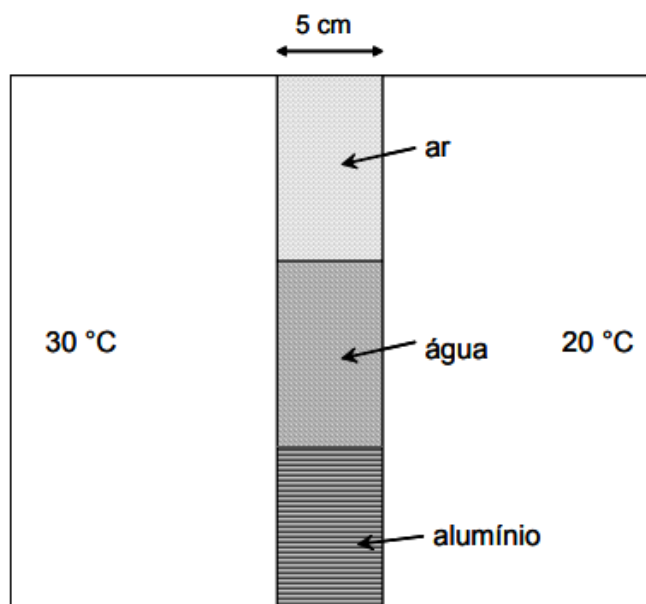
materiais diferentes em “série”



e em “paralelo”

# Exemplo

3) Na figura abaixo se observa uma divisão entre um reservatório a 30 °C e outro a 20 °C. A divisão tem uma espessura de 5 cm e é subdividida em uma parte com ar, outra com água e outra com alumínio. Solicita-se calcular a densidade de fluxo de calor ( $q$ ) por condução através de cada parte da divisão.



$$\lambda_{(ar)} = 0,024 \text{ [w/m.K]}$$

$$\lambda_{(água)} = 0,60 \text{ [w/m.K]}$$

$$\lambda_{(alumínio)} = 200 \text{ [w/m.K]}$$

## Solução:

Calcula-se em primeiro lugar o gradiente térmico. Se olharmos, na figura acima, da esquerda para a direita,  $\Delta T = 20 - 30 = -10 \text{ °C}$  e  $\Delta T / \Delta x = -10 \text{ °C} / 0,05 \text{ m} = -200 \text{ °C m}^{-1}$ . Utilizando a equação 5.1 e os dados da Tabela 5.1 verifica-se portanto que:

$$\text{Pelo ar: } q = -0,024 \cdot -200 = 4,8 \text{ W m}^{-2}$$

$$\text{Pela água: } q = -0,60 \cdot -200 = 120 \text{ W m}^{-2}$$

$$\text{Pelo alumínio: } q = -200 \cdot -200 = 44.000 \text{ W m}^{-2}$$

Os valores são positivos, o que significa que o sentido do fluxo é o mesmo que consideramos para calcular o gradiente, ou seja, da esquerda à direita.

# Resistência térmica

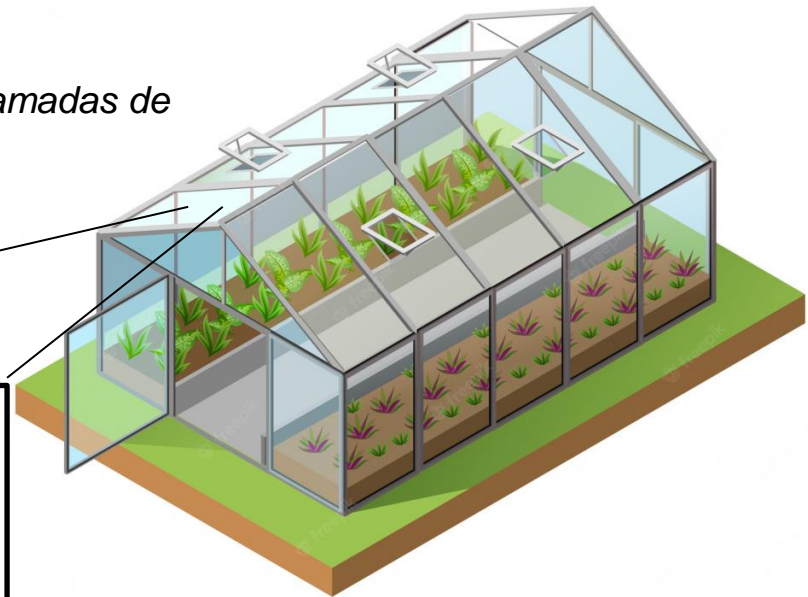
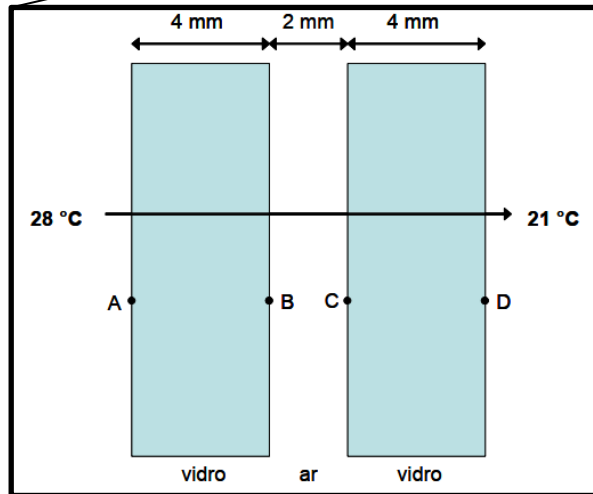
Definir a Resistência Térmica ( $R_T$ ) dos materiais é útil para avaliar algumas situações, é definida por:

$$R_T = \frac{\Delta x}{\lambda}$$

Unidades:

$$\left[ \frac{m^2 \cdot K}{W} \right]$$

Estufa com várias camadas de diferentes materiais



# Resistência térmica

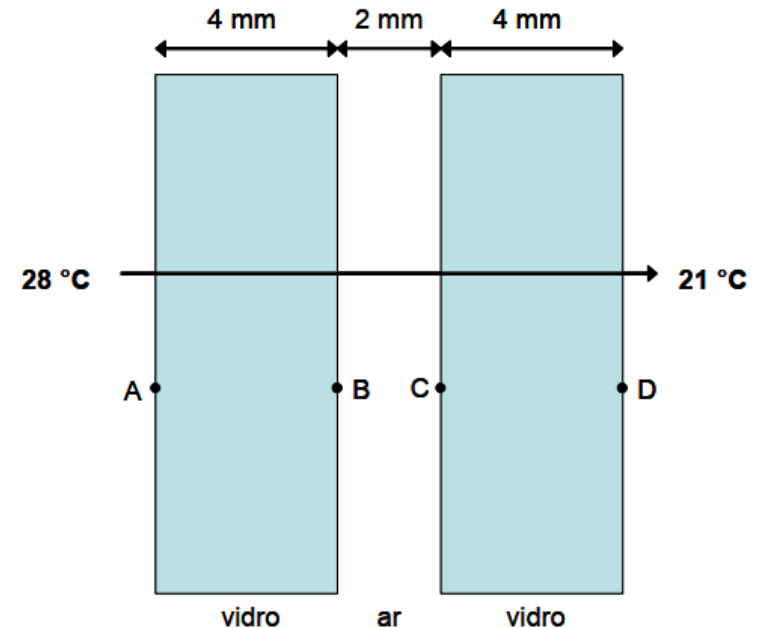
Com isso, fica fácil calcular o fluxo de calor em um sistema composto por várias camadas em série a resistência total é a soma das resistências de cada material

$$R_T = R_1 + R_2 + R_3$$

$$R_T = \frac{\Delta x_1}{\lambda_1} + \frac{\Delta x_2}{\lambda_2} + \frac{\Delta x_3}{\lambda_3}$$

E a Lei de Fourier pode ser reescrita como:

$$q = -\frac{\Delta T}{R}$$

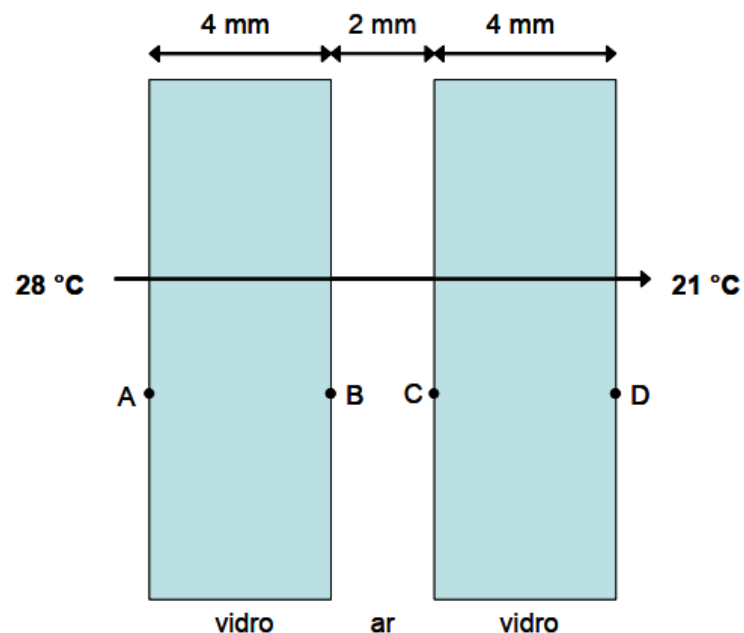


Estufa com várias camadas de diferentes materiais

# Exemplo

3) Um vidro duplo é composto por duas lâminas de vidro de 4 mm de espessura, separadas por uma camada de 2 mm de ar (veja figura a seguir). De um lado do vidro a temperatura é 28 °C, do outro lado 21 °C. Calcular a densidade de fluxo de calor por condução através do vidro duplo.

$\lambda_{\text{vidro}} = 0,93 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$        $\lambda_{\text{ar}} = 0,024 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$



Inicialmente calculamos a resistência térmica de cada parte do sistema pela equação 5.3, utilizando os valores de  $\lambda$  da Tabela 5.1:

$$\text{Vidro (4 mm = 0,004 m):} \quad R_T = 0,004 / 0,93 = 0,0043 \text{ m}^2 \text{ K W}^{-1}$$

$$\text{Ar (2 mm = 0,002 m):} \quad R_T = 0,002 / 0,024 = 0,083 \text{ m}^2 \text{ K W}^{-1}$$

A resistência térmica total do sistema é a soma das resistências parciais, e assim:

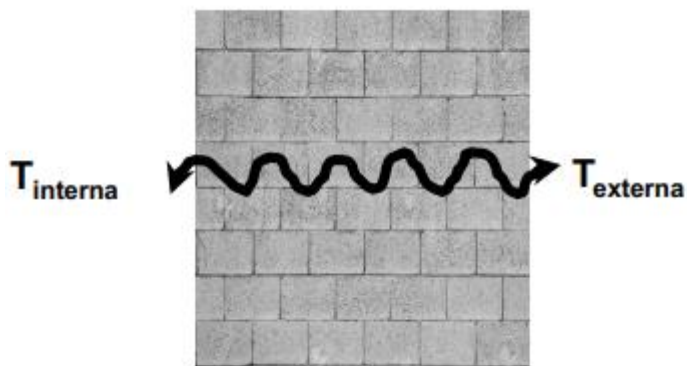
$$R_{T,\text{total}} = R_{T,\text{vidro}} + R_{T,\text{ar}} + R_{T,\text{vidro}} = 0,0043 + 0,083 + 0,0043 = 0,092 \text{ m}^2 \text{ K W}^{-1}$$

Agora, aplicando a equação 5.3:

$$q = -\frac{\Delta T}{R_T} = -\frac{21 - 28}{0,092} = 76,1 \text{ W m}^{-2}$$

# Exemplo (Lei de Fourier)

4) Uma parede de concreto com  $9 \text{ m}^2$  de área e  $10 \text{ cm}$  de espessura tem  $\lambda_{\text{concreto}} = 2 \cdot 10^{-3} \text{ cal/s.cm.}^\circ\text{C}$ . Sabendo-se que a diferença de temperatura entre as faces (lado direito) é de  $-5^\circ\text{C}$  (temperatura interna maior do que a externa), pergunta-se: Qual a quantidade de calor (em calorias) que flui pela parede durante 10 minutos?



$$q = \frac{\Phi}{[\text{Área}]} \rightarrow \left[ \frac{\text{Energia}}{\text{Tempo. Área}} \right]$$

$$q = -\lambda \frac{\Delta T}{\Delta x}$$

**Respostas:**

**Calor = 54000 calorias ou**

**Calor transferido = 90 cal/s**

# Convecção

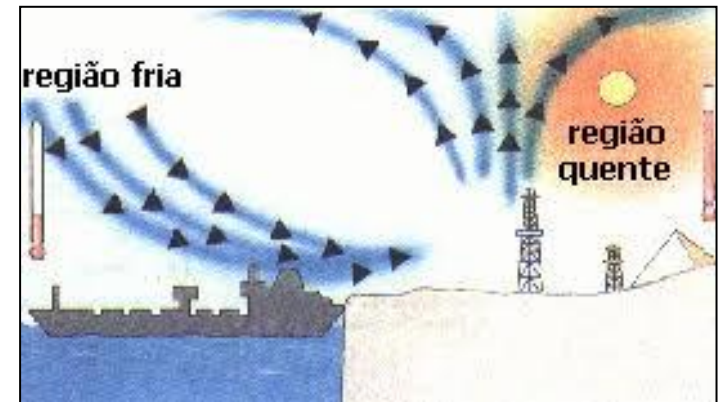
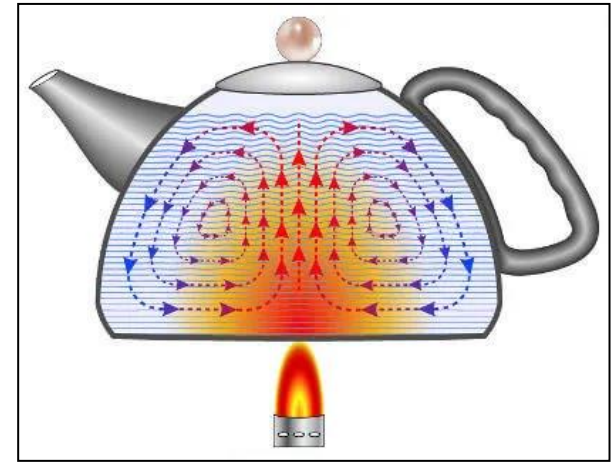
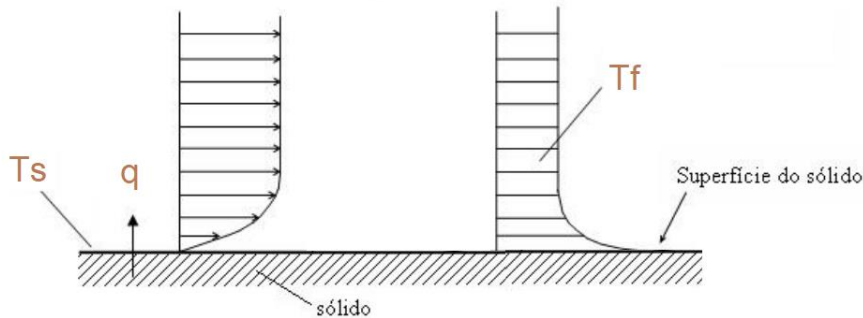
# Convecção

A convecção é um modo de transferência de energia térmica que envolve fluxo de matéria e efeitos combinados de condução e fluxo.

Em muitas situações pode ser descrita pela

Lei do Resfriamento de Newton:

$$q = \frac{\Phi}{A} = h(T_s - T_f)$$



$h \rightarrow$  coeficiente de transferência de calor por convecção; Unidade:  $[W / m^2 \cdot K]$   
É um parâmetro determinado experimentalmente para cada situação e depende das características do fluido e da geometria do sistema.



# Exercícios ...

# Tarefas de Processo Adiabático

- Leia o Cap. 2 da Apostila:
  - Física do Ambiente Agrícola  
(tem no e-disciplinas pdf)
- Treine exercícios de Processo Adiabático da Lista 2, do Cap. 2 e dos Livros recomendados.

# Tarefas: Transferência de Calor por condução e convecção

- Leia o Cap. 5 da Apostila:
  - Física do Ambiente Agrícola  
(tem no e-disciplinas pdf)
- Treine exercícios da Lista 3, do Cap. 5 e dos Livros recomendados.