



**Universidade Federal do Paraná**  
**Setor de Tecnologia**  
**Departamento de Engenharia Mecânica**

# TEM701

# Termodinâmica dos Materiais

Introdução Histórica

*Prof. Rodrigo Perito Cardoso*

# Onde estamos

- **Introdução histórica.**
- Leis da Termodinâmica.
- Potenciais Termodinâmicos.
- Conceitos de Termodinâmica estatística.
- Termodinâmica de sólidos.
- Termodinâmica de transformação de fase.
- Termodinâmica química.
- Diagramas de fases.
- Cinética de transformações

# Em que contexto/escala pode estar a termodinâmica

- Estrutura de átomos e moléculas -> Explica comportamento desde átomos/moléculas até corpos sólidos baseado nas leis do movimento e propriedades das partículas
- Mecânica estatística-> Liga propriedades das moléculas com propriedades macroscópicas
- Termodinâmica clássica -> Macroscópica e não se interessa diretamente com os mecanismos atômicos/moleculares (hipótese do contínuo)
  - No curso, vamos adotar a descrição macroscópica da matéria, fazendo uso das ideais microscópicas para interpretar os resultados
  - Complexidade da descrição microscópica -> 3 posições e 3 velocidades  $\Rightarrow 6n$  variáveis

- Onde a termodinâmica dos materiais “já esteve ou está presente” em outras disciplinas?

# Termodinâmica em Ciência dos materiais (TEM 700)

1. Introdução
2. Estrutura Atômica e Ligações Interatômicas
3. Estruturas de Metais e Cerâmicas
4. Estruturas de Polímeros
5. Imperfeições em Sólidos
6. Difusão
7. Propriedades Mecânicas
8. Mecanismos de Deformação e Endurecimento
9. Mecanismos de Falha
10. Diagramas de Fase
11. Transformações de Fase
12. Compósitos
13. Corrosão e Degradação de Materiais
14. Propriedades Elétricas
15. Propriedades Térmicas
16. Propriedades Magnéticas
17. Propriedades Ópticas

# Metalurgia física (TEM 703)

- EMENTA:
  - Introdução.
  - Estrutura Cristalina.
  - Defeitos.
  - Difusão.
  - Deformação.
  - Nucleação e Crescimento.
  - Precipitação.
  - Transformação de fases.
  - Soluções Sólidas

# O que é?

- Do grego, *therme* = calor, *dynamis* = potência
  - reflete os esforços para converter *calor* em *trabalho mecânico*
- Enrico Fermi definiu a Termodinâmica Clássica como:  
“Ramo da mecânica que descreve o estado de um sistema com um número elevado de partículas (átomos, moléculas) com base no *comportamento médio* das partículas”.

# Onde se aplica?

- Sua generalidade lhe confere uma ampla gama de aplicações:
  - máquinas térmicas, bombas de calor, propulsão (Eng. Mecânica/química, ...)
  - radiação / eletromagnetismo / termoeletricidade (Física, ...)
  - Reações químicas, transformação de fases e bioquímicas / evolução dos seres vivos (Engenharias, Materiais, Química, Biologia, ...)
  - Etc ...

# Quando e como nasceu

- origem na revolução industrial – mecanização do trabalho (sec. XIX)
- formalizada como ciência ~1850 (Kelvin, Clausius)
  - Ramo das ciências naturais
- junção da Mecânica com a Termologia
- Problemas típicos de termodinâmica em materiais:
  - Equilíbrio químico -> reações/transformações e seu rendimento (Função dos parâmetros de estado: T, P, composição ...)
  - Ligações químicas (reatividade, compatibilidade, estrutura)
    - Ex. Redução de óxidos, suportes em fornos, mudança de fase, tratamento térmicos e termoquímicos, etc ...

# Linha do tempo

- Pré-clássico (1600-1800) -> “anterior a formalização”
  - ~1600 – Galileu – quantificar sensações de frio/quente  $\Rightarrow$  termologia
  - ~1660 – Boyle –  $p \sim v^{-1} \Rightarrow$  cinética
  - ~1680 – Newton – inércia, velocidade, quantidade de movimento  $\Rightarrow$  mecânica
    - Leibnitz – energias cinética (vis viva – força viva) e potencial (vis morta)
  - ~1700 – Newton –  $q \sim \Delta T \Rightarrow$  transferência de calor
  - ~1730 – Bernoulli (Daniel) – conservação da energia mecânica
  - ~1760 – Black – capacidade térmica  $\Rightarrow$  calorimetria
  - 1769 – Patente do motor a vapor (Watt)
  - ~1770 – Lavoisier – conservação da massa  $\Rightarrow$  refuta teoria do **flogístico** (“elemento” que era liberado na queima, presente em combustíveis), publica teoria do **calórico** (fluido invisível e inodoro) (calcinação de madeira, carvão e metais -> existência do oxigênio)
  - ~1800 – Rumford – calórico não se conserva – trabalho mecânico é uma fonte inesgotável de calórico (atrito) -> “calor é energia em movimento”
  - ~1800 – Gay-Lussac –  $p \sim T$

# Linha do tempo

- Clássico (1800-1850) -> formalização
  - 1807 – Young – inventa o termo *energia*, que significa *força efetiva*
  - 1824 – Carnot – estabelece os limites teóricos para conversão de calor em trabalho (base da 2ª lei)
  - ~1840 – Mayer/Joule – equivalência entre calor e trabalho (bases da 1ª lei)
  - ~1850 – Clausius/Rankine/Kelvin – princípio de conservação da energia (1ª lei)
  - ~1850 – Clausius/Kelvin – enunciados da 2ª lei para motores e refrigeradores
- Moderno (1850-1950)
  - ~1870 – Boltzmann/Maxwell/Gibbs – abordagem probabilística da entropia  $\Rightarrow$  mecânica estatística (“microscópica”)
  - ~1910 – Nerst – intangibilidade do zero absoluto
  - ~1930 – Fowler – cunha a lei zero
- Contemporâneo (1950- ... )
  - ~1960 – Prigogine – estruturas dissipativas, caos composto de fatores ordenados
  - ~1980 – Bejan – projeto termodinâmico  $\rightarrow$  teoria constructal

# Leis da termodinâmica - Base

- Termodinâmica é baseada em leis
- Na Termodinâmica, cada lei implica na definição de uma nova propriedade:
  - lei zero  $\Rightarrow$  temperatura
  - 1ª lei  $\Rightarrow$  energia interna
  - 2ª lei  $\Rightarrow$  entropia
  - 3ª lei  $\Rightarrow$  zero absoluto

Elas são derivadas de generalizações de observações  $\Rightarrow$  independem das hipóteses microscópicas!

# É importante lembrar

- De onde vem a termodinâmica
- Quais suas bases
- Em que escala tratamos os problemas