TERMODINÂMICA

TRABALHO E CALOR

R. Sobral

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

rodolfo.sobral@cefet-rj.br

CEFET/RJ

Ementa

Programa do Curso - Avaliação 01

- Breve Revisão
- Lei Zero da Termodinâmica
- Trabalho e Calor
- 1º Lei da Termodinâmica
- 2º Lei da Termodinâmica
- Substâncias Puras

Grandezas

- Longitudinal e Angular

$$\delta W = F dx = F r d\theta = T d\theta$$

Derivando

$$\dot{W} = \frac{\delta W}{dt} = F\frac{dx}{dt} = F\boldsymbol{v} = F r \frac{d\theta}{dt} = T\omega$$

Trabalho

Definido por Gaspard-Gustave Coriolis representa a ação de uma força por determinada distância

$$ {}_1W_2 = \int_1^2 \boldsymbol{F}.dx $$

$$ \delta W = \boldsymbol{F}.dx $$

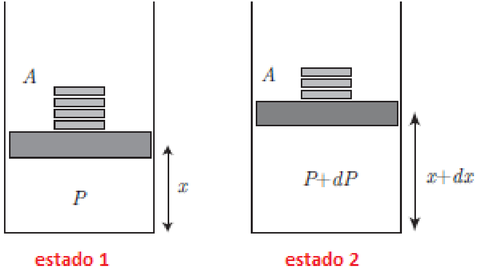
Para sistemas unidimensionais:

$$ {}_1W_2 = \int_1^2 F.dx $$

$$ \delta W = F.dx $$

Note que o trabalho representa uma diferencial inexata (δ) com integral dependente da trajetória, portanto o trabalho não pode ser definido como variável de estado.

Trabalho de substância simples compressível



$$\delta W = F.dx$$

Para $P = F/A$, tem-se

$$F \equiv \frac{1}{2}(PA + (P + dP)A) = PA + \frac{dP}{2}A$$

Então

$$\delta W = \left(PA + \frac{dP}{2}A\right)dx = PAdx + \frac{A}{2}dPdx$$

Trabalho de substância simples compressível

Considerando $dPdx \approx 0$

$$\delta W = PAdx$$

Sendo $Adx = dV$

$$\delta W = PdV$$

Integrando

$${}_1W_2 = \int_1^2 P.dV$$

A notação ${}_1W_2$ foi utilizada para enfatizar que o trabalho depende da trajetória do estado 1 para o estado 2. Usualmente a incorreta notação $\int_1^2 \delta W = W_2 - W_1$ é apresentada, violando assim o princípio de estado.

Processo Politrópico

Descrito pela equação $PV^n = constante = C$.

Isolando a pressão:

$$P(V) = \frac{C}{V^n}$$

Sabendo que o trabalho do estado 1 para 2 para substância simples e compressível

$${}_1W_2 = \int_1^2 P.dV$$

Substituindo

$${}_1W_2 = \int_1^2 \frac{C}{V^n} dV = C \int_1^2 \frac{dV}{V^n}$$

Processo Politrópico

Integrando

$$= \frac{C}{1-n} V^{1-n}\Big|_1^2$$

$$= \frac{C}{1-n}\left(V_2^{1-n} - V_1^{1-n}\right)$$

Como $C = P_1 V_1^n = P_2 V_2^n$, então

$$_1W_2 = \frac{P_2V_2 - P_1V_1}{1-n}$$

Para gases ideais:

$$_1W_2 = \frac{mR\,(T_2 - T_1)}{1-n}$$

Processo Isotérmico

Para $n = 1$ tem-se $PV = C$, correspondendo ao processo isotérmico de um gás ideal.

$$P(V) = \frac{C}{V}$$

Sabendo que o trabalho do estado 1 para 2 para substância simples e compressível

$${}_1W_2 = \int_1^2 P.dV$$

Substituindo

$${}_1W_2 = \int_1^2 C\frac{dV}{V} = C\ln\frac{V_2}{V_1}$$

Como $C = P_1V_1 = P_2V_2$, então

$${}_1W_2 = P_1V_1\ln\frac{V_2}{V_1}$$

Processo Isobárico

Para $n = 0$ tem-se $P(V) = C = P$, correspondendo ao processo isobárico.

$$P(V) = P_1 = P_2$$

Sabendo que o trabalho do estado 1 para 2 para substância simples e compressível

$$_1W_2 = \int_1^2 P.dV$$

Substituindo

$$_1W_2 = \int_1^2 PdV = P\int_1^2 dV = P\left(V_2 - V_1\right)$$

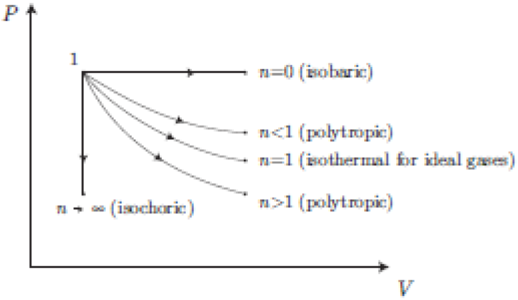
Processo Isocórico

Processos isocóricos possuem $dV = 0$, portanto

$$_1W_2 = \int_1^2 P.dV = 0$$

Não há geração de trabalho num processo isocórico, semelhante ao processo politrópico com $n \to \infty$

Diagrama *PxV*



Utilizado no estudo de compressores

Outras formas de trabalho

Há outras forças além das de pressão que são capazes de realizar trabalho.

- um fio esticado por uma força tensional τ ao longo da variação de comprimento dL

$$\delta W = -\tau dL$$

- superfície com tensão superficial ζ

$$\delta W = -\zeta dA$$

- trabalho elétrico com ϵ comprimento do campo elétrico, q carga da partícula e x a distância

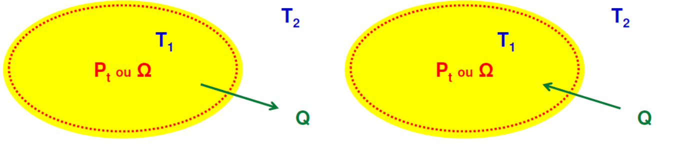
$$\delta W = -q\epsilon dx$$

Quanto mais modos de trabalho, mais variáveis termodinâmicas independentes são necessárias para especificar o estado do sistema.

Calor

Forma de energia transferida entre sistema e vizinhança decorrente da diferença de temperatura existente entre eles, semelhante ao trabalho, o calor é função de processo pois depende da trajetória.

Calor



$T_2 < T_1 \rightarrow Q < 0$

Calor dissipado pelo sistema ou volume de controle

$T_2 > T_1 \rightarrow Q > 0$

Calor fornecido ao sistema ou volume de controle

Calor

Sistemas ou volume de controle não contém calor, visto que calor não é forma de energia armazenada, ou seja, não é propriedade termodinâmica. Durante um processo termodinâmico, não há variação de calor de um sistema ou volume de controle, mas sim transferência de calor.

Um processo no qual não há transferência de calor entre o sistema ou volume de controle e sua vizinhança é denominado de processo adiabático.

Formas de Transmissão de Calor

- Condução
- Convecção
- Radiação

As formas de transmissão de calor serão abordadas com toda riqueza de detalhes na disciplina Transferência de Calor I

Condução

$$q = -k\nabla T$$

$$q = -k\frac{dT}{dx}$$

$$\dot{Q} = -kA\frac{dT}{dx} \approx -kA\frac{T_h - T_l}{L}$$

Convecção

$$q = h\left(T_h - T_l\right)$$

$$\dot{Q} = qA = hA\left(T_h - T_l\right)$$

Radiação

$$q = \sigma \left(T_h^4 - T_l^4 \right)$$

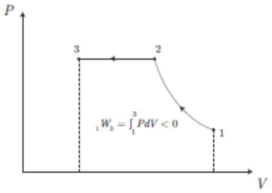
$$\dot{Q} = qA = \sigma A \left(T_h^4 - T_l^4 \right)$$

Convenção de Sinais

- Trabalho
  - Positivo: realizado pelo sistema ou volume de controle sobre a vizinhança
  - Negativo: realizado pela vizinhança sobre o sistema ou volume de controle
- Calor
  - Positivo: absorvido pelo sistema ou dispensado pela vizinhança
  - Negativo: dispensado pelo sistema ou absorvido pela vizinhança

Exemplo 01

A figura a seguir apresenta a compressão de um gás ideal em duas etapas (isotérmica-isobárica), como mostra a figura:



$${}_1W_3 = {}_1W_2 + {}_2W_3$$

$$= \int_1^2 PdV + \int_2^3 PdV$$

$$= mRT_1 \int_1^2 \frac{dV}{V} + P_2 \int_2^3 dV$$

Exemplo 01

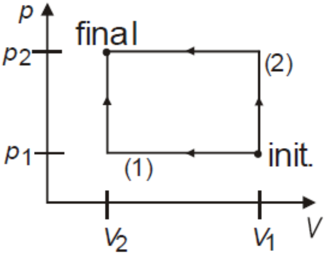
$$= mRT_1 \ln \frac{V_2}{V_1} + P_2 \left(V_3 - V_2\right)$$

$$= P_1 V_1 \ln \frac{V_2}{V_1} + P_2 \left(V_3 - V_2\right)$$

Note que ${}_1W_3 < 0$, desde que $V_2 < V_1$ e $V_3 < V_2$, portanto o trabalho é realizado sobre o sistema no processo de compressão. Repare também que o problema tem solução mesmo que a variável temperatura seja desconhecida, isto ocorre porque trabalho somente requer informação sobre o estado $P - V$ de um sistema.

Exemplo 02

- Processo reversível $p_{ext} = p$



Inicial Ar (g, p_1, V_1)

Final - Ar (g, p_2, V_2);

Exemplo 02

- Caminho (1)

$$V_1 \rightarrow V_2 \text{ e } p = p_1$$

$$p_1 \rightarrow p_2 \text{ e } V = V_2$$

$$\text{Ar } (g, p_1, V_1) = \text{Ar } (g, p_1, V_2) = \text{Ar } (g, p_2, V_2)$$

$$W = -\int_{V_1}^{V_2} p_{ext} dV - \int_{V_2}^{V_2} p_{ext} dV$$

$$= -\int_{V_1}^{V_2} p_1 dV = -p_1(V_2 - V_1)$$

$$W_{(1)} = p_1(V_1 - V_2)$$

Exemplo 02

- Caminho (2)

$$p_1 \to p_2 \text{ e } V = V_1$$

$$V_1 \to V_2 \text{ e } p = p_2$$

$$\text{Ar } (g, p_1, V_1) = \text{Ar } (g, p_2, V_1) = \text{Ar } (g, p_2, V_2)$$

$$W = -\int_{V_1}^{V_1} p_{ext} dV - \int_{V_1}^{V_2} p_{ext} dV$$

$$= -\int_{V_1}^{V_2} p_2 dV = -p_2(V_2 - V_1)$$

$$W_{(2)} = p_2(V_1 - V_2)$$

Exemplo 02

$$W_{(1)} \neq W_{(2)}$$

$$\oint dW \neq 0$$

W não é função de estado

Ou seja, não é possível escrever a equação a seguir:

$$W = f(p, V)$$

Recapitulando ...

Um engenheiro sabe que a distribuição de temperaturas ao longo de uma parede de área $10m^2$ e $0.8m$ de espessura, em certo instante, corresponde a $T(x) = a + bx + cx^2$, $a = 780^0C$, $b = -250^0C/m$ e $c = -70^0C/m^2$.

Considerando condutividade térmica dada por $30W/(m^0C)$, determine a taxa de transferência de calor que entra na parede $(x = 0)$ em kW.

Recapitulando . . .

Vídeo 01

Someone's sitting in the shade today because someone planted a tree a long time ago

Warren Buffett