

A.03.04 – Modelos de Propriedades Energéticas (Sistemas Fechados)

Prof. C. Naaktgeboren, PhD



<https://github.com/CNThermSci/ApplThermSci>

Compiled on 2020-09-11 00h29m17s UTC

1 Modelos de Propriedades Energéticas

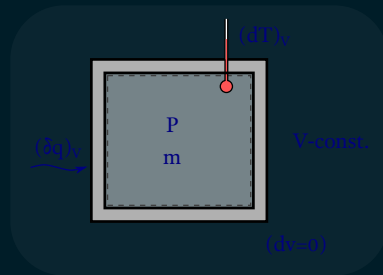
- Energia Interna e Entalpia
- U e H em Modelos de Substâncias

2 Tópicos de Leitura

Energia Interna – Relação com Temperatura

O sistema fechado de massa m , ilustrado:

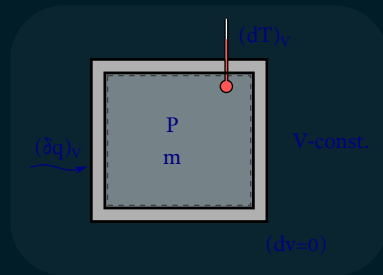
- Recebe uma diferencial de calor a volume constante, $(\delta q)_V$;



Energia Interna – Relação com Temperatura

O sistema fechado de massa m , ilustrado:

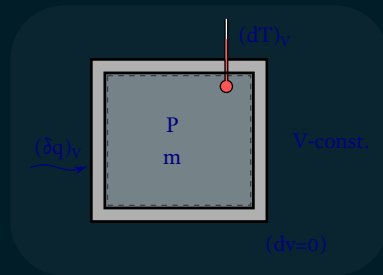
- Recebe uma diferencial de calor a volume constante, $(\delta q)_V$;
- m e V constantes implicam em $v \equiv V/m$ constante, tal que $(\delta q)_V = (\delta q)_v$;



Energia Interna – Relação com Temperatura

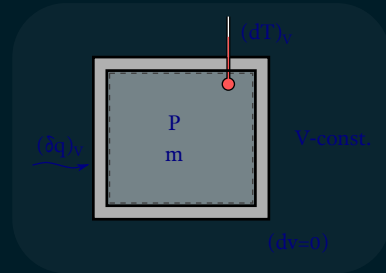
O sistema fechado de massa m , ilustrado:

- Recebe uma diferencial de calor a volume constante, $(\delta q)_V$;
- m e V constantes implicam em $v \equiv V/m$ constante, tal que $(\delta q)_V = (\delta q)_v$;
- A temperatura experimenta uma variação de $(dT)_v$.



Energia Interna – Relação com Temperatura (Cont.)

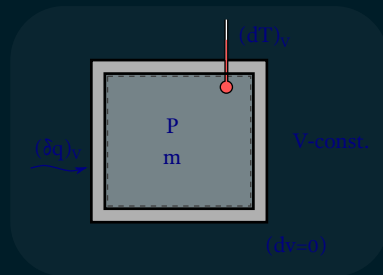
O balanço de energia na forma diferencial do sistema fica:



Energia Interna – Relação com Temperatura (Cont.)

O balanço de energia na forma diferencial do sistema fica:

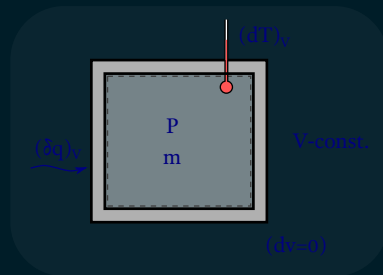
$$\delta e_{ent} - \delta e_{sai} = de_{sist}$$



Energia Interna – Relação com Temperatura (Cont.)

O balanço de energia na forma diferencial do sistema fica:

$$\delta e_{ent} - \delta e_{sai} = de_{sist} \quad \rightarrow$$
$$(\delta q)_v = du.$$



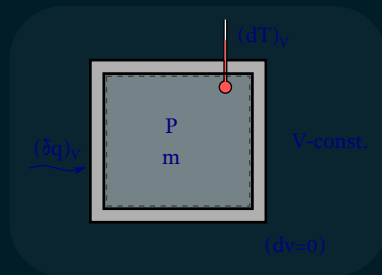
Energia Interna – Relação com Temperatura (Cont.)

O balanço de energia na forma diferencial do sistema fica:

$$\delta e_{ent} - \delta e_{sai} = de_{sist} \quad \rightarrow$$

$$(\delta q)_v = du.$$

Assim, o calor transferido a volume constante a um sistema fechado é a variação de sua energia interna!

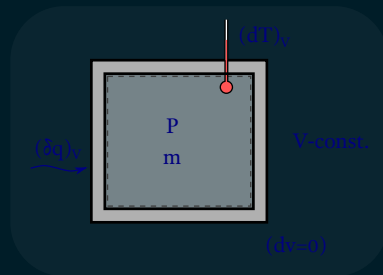


Energia Interna – Relação com Temperatura (Cont.)

Define-se o **calor específico a volume constante** da substância do sistema, c_v , como

$$c_v \equiv \left(\frac{\partial u}{\partial T} \right)_v,$$

uma **propriedade** termodinâmica intensiva.



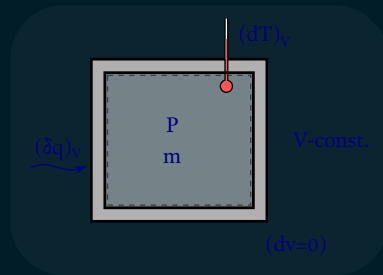
Energia Interna – Relação com Temperatura (Cont.)

Define-se o **calor específico a volume constante** da substância do sistema, c_v , como

$$c_v \equiv \left(\frac{\partial u}{\partial T} \right)_v,$$

uma **propriedade** termodinâmica intensiva.

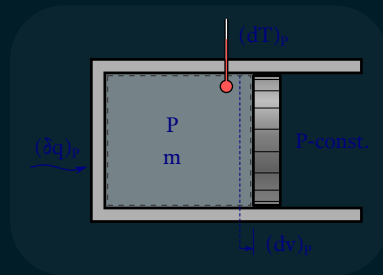
Ainda, $C_v = (\partial U / \partial T)_v = m c_v$ é a **capacidade térmica a volume constante** do sistema.



Entalpia – Relação com Temperatura

O sistema fechado de massa m , ilustrado:

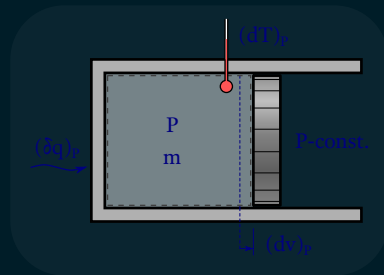
- Recebe uma diferencial de calor a pressão constante, $(\delta q)_P$;



Entalpia – Relação com Temperatura

O sistema fechado de massa m , ilustrado:

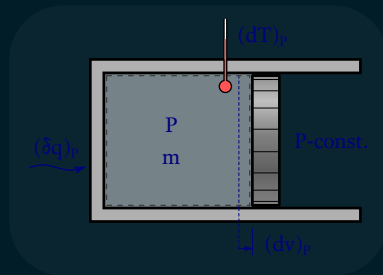
- Recebe uma diferencial de calor a pressão constante, $(\delta q)_P$;
- Realiza uma diferencial de trabalho a pressão constante, $(\delta w)_P = P dv$;



Entalpia – Relação com Temperatura

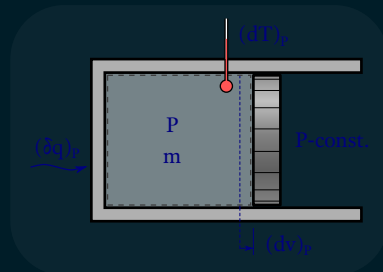
O sistema fechado de massa m , ilustrado:

- Recebe uma diferencial de calor a pressão constante, $(\delta q)_P$;
- Realiza uma diferencial de trabalho a pressão constante, $(\delta w)_P = P dv$;
- A temperatura experimenta uma variação de $(dT)_P$, possivelmente diferente de $(dT)_v$.



Entalpia – Relação com Temperatura (Cont.)

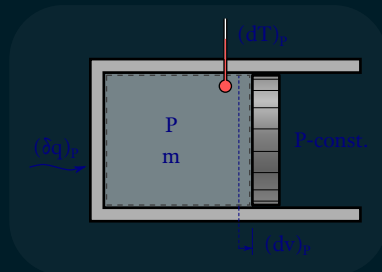
O balanço de energia na forma diferencial do sistema fica:



Entalpia – Relação com Temperatura (Cont.)

O balanço de energia na forma diferencial do sistema fica:

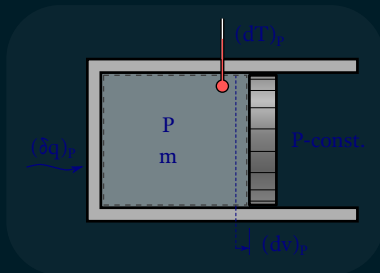
$$\delta e_{ent} - \delta e_{sai} = de_{sist}$$



Entalpia – Relação com Temperatura (Cont.)

O balanço de energia na forma diferencial do sistema fica:

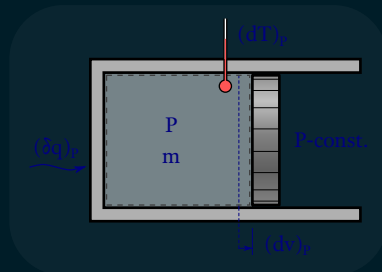
$$\delta e_{ent} - \delta e_{sai} = de_{sist} \quad \rightarrow$$
$$(\delta q)_P - (\delta w)_P = du$$



Entalpia – Relação com Temperatura (Cont.)

O balanço de energia na forma diferencial do sistema fica:

$$\begin{aligned}\delta e_{ent} - \delta e_{sai} &= de_{sist} \quad \rightarrow \\ (\delta q)_P - (\delta w)_P &= du \quad \rightarrow \\ (\delta q)_P &= du + P dv = d(u + Pv).\end{aligned}$$

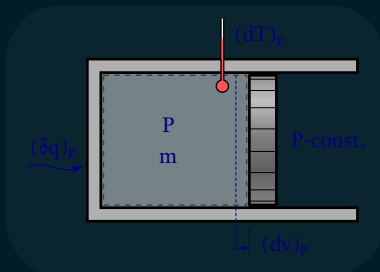


Entalpia – Relação com Temperatura (Cont.)

O balanço de energia na forma diferencial do sistema fica:

$$\begin{aligned}\delta e_{ent} - \delta e_{sai} &= de_{sist} \quad \rightarrow \\ (\delta q)_P - (\delta w)_P &= du \quad \rightarrow \\ (\delta q)_P &= du + P dv = d(u + Pv).\end{aligned}$$

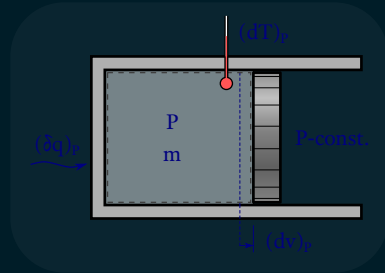
A quantidade $(u + Pv)$ aparece frequentemente o suficiente para ser definida como uma nova propriedade.



Entalpia – Relação com Temperatura (Cont.)

Assim,

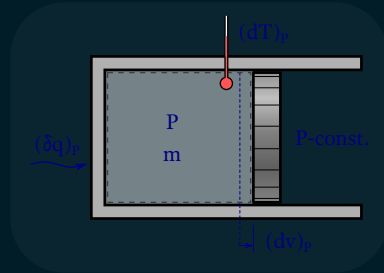
$$H \equiv U + PV \quad [\text{kJ}], \text{ e}$$



Entalpia – Relação com Temperatura (Cont.)

Assim,

$$H \equiv U + PV \quad [\text{kJ}], \text{ e}$$
$$h \equiv u + Pv \quad [\text{kJ/kg}],$$



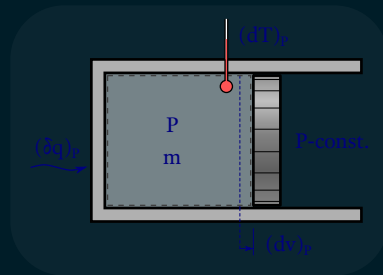
Entalpia – Relação com Temperatura (Cont.)

Assim,

$$H \equiv U + PV \quad [\text{kJ}], \text{ e}$$

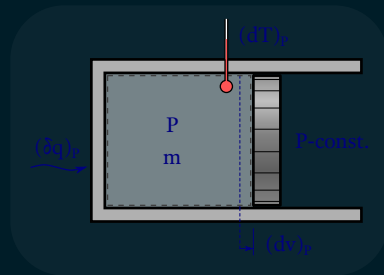
$$h \equiv u + Pv \quad [\text{kJ/kg}],$$

são a **entalpia** e a **entalpia específica**,
respectivamente: novas propriedades
termodinâmicas.



Entalpia – Relação com Temperatura (Cont.)

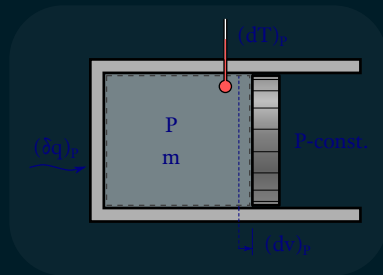
O termo origina do verbo grego “ $\epsilon\nu\theta\acute{\alpha}\lambda\pi\omega$ ”, que significa: “(eu) aqueço”, conforme a própria ilustração.



Entalpia – Relação com Temperatura (Cont.)

O termo origina do verbo grego “ $\epsilon\nu\theta\acute{\alpha}\lambda\pi\omega$ ”, que significa: “(eu) aqueço”, conforme a própria ilustração.

Da expressão $(\delta q)_P = dh$, tem-se que o calor transferido a pressão constante a um sistema fechado é a variação de sua entalpia!

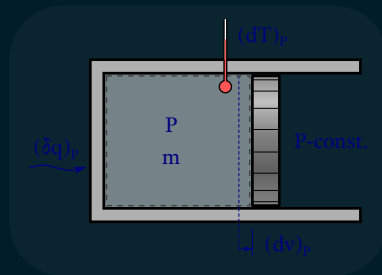


Entalpia – Relação com Temperatura (Cont.)

Define-se o **calor específico a pressão constante** da substância do sistema, c_P , como

$$c_P \equiv \left(\frac{\partial h}{\partial T} \right)_P,$$

uma **propriedade** termodinâmica intensiva.



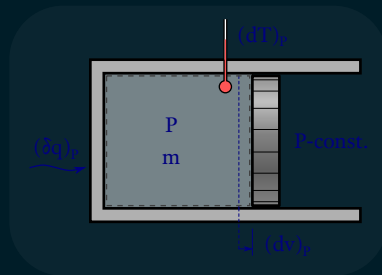
Entalpia – Relação com Temperatura (Cont.)

Define-se o **calor específico a pressão constante** da substância do sistema, c_P , como

$$c_P \equiv \left(\frac{\partial h}{\partial T} \right)_P,$$

uma **propriedade** termodinâmica intensiva.

Ainda, $C_P = (\partial H / \partial T)_P = m c_P$ é a **capacidade térmica a pressão constante** do sistema.



Gás Ideal — Substância com $Pv = RT$

Experimentos mostraram que $u:u(T)$, assim,

Gás Ideal — Substância com $Pv = RT$

Experimentos mostraram que $u:u(T)$, assim,

$$\delta q - \delta w = du$$

Gás Ideal — Substância com $Pv = RT$

Experimentos mostraram que $u:u(T)$, assim,

$$\begin{aligned}\delta q - \delta w &= du \quad \rightarrow \\ (\delta q)_T - (\delta w)_T &= (du)_T = 0\end{aligned}$$

Gás Ideal — Substância com $Pv = RT$

Experimentos mostraram que $u:u(T)$, assim,

$$\delta q - \delta w = du \quad \rightarrow$$

$$(\delta q)_T - (\delta w)_T = (du)_T = 0 \quad \rightarrow$$

$$(\delta q)_T = (\delta w)_T.$$

Gás Ideal — Substância com $Pv = RT$

Experimentos mostraram que $u:u(T)$, assim,

$$\delta q - \delta w = du \quad \rightarrow$$

$$(\delta q)_T - (\delta w)_T = (du)_T = 0 \quad \rightarrow$$

$$(\delta q)_T = (\delta w)_T.$$

A definição de c_v simplifica para

$$c_v(T) = \frac{du}{dT}$$

Gás Ideal — Substância com $Pv = RT$

Experimentos mostraram que $u:u(T)$, assim,

$$\delta q - \delta w = du \quad \rightarrow$$

$$(\delta q)_T - (\delta w)_T = (du)_T = 0 \quad \rightarrow$$

$$(\delta q)_T = (\delta w)_T.$$

A definição de c_v simplifica para

$$c_v(T) = \frac{du}{dT} \quad \rightarrow$$

$$u(T) = \int c_v(T) dT.$$

Gás Ideal — Substância com $Pv = RT$

Experimentos mostraram que $u:u(T)$, assim, Ainda,

$$\delta q - \delta w = du \quad \rightarrow$$

$$(\delta q)_T - (\delta w)_T = (du)_T = 0 \quad \rightarrow$$

$$(\delta q)_T = (\delta w)_T.$$

A definição de c_v simplifica para

$$c_v(T) = \frac{du}{dT} \quad \rightarrow$$

$$u(T) = \int c_v(T) dT.$$

Gás Ideal — Substância com $Pv = RT$

Experimentos mostraram que $u:u(T)$, assim, Ainda,

$$\delta q - \delta w = du \quad \rightarrow$$

$$h \equiv u + Pv$$

$$(\delta q)_T - (\delta w)_T = (du)_T = 0 \quad \rightarrow$$

$$(\delta q)_T = (\delta w)_T.$$

A definição de c_v simplifica para

$$c_v(T) = \frac{du}{dT} \quad \rightarrow$$

$$u(T) = \int c_v(T) dT.$$

Gás Ideal — Substância com $Pv = RT$

Experimentos mostraram que $u:u(T)$, assim, Ainda,

$$\delta q - \delta w = du \quad \rightarrow$$

$$(\delta q)_T - (\delta w)_T = (du)_T = 0 \quad \rightarrow$$

$$(\delta q)_T = (\delta w)_T.$$

$$h \equiv u + Pv \quad \rightarrow$$

$$h = u + RT,$$

A definição de c_v simplifica para

$$c_v(T) = \frac{du}{dT} \quad \rightarrow$$

$$u(T) = \int c_v(T) dT.$$

Gás Ideal — Substância com $Pv = RT$

Experimentos mostraram que $u:u(T)$, assim,

Ainda,

$$\begin{aligned}\delta q - \delta w &= du \quad \rightarrow \\ (\delta q)_T - (\delta w)_T &= (du)_T = 0 \quad \rightarrow \\ (\delta q)_T &= (\delta w)_T.\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}h &\equiv u + Pv \quad \rightarrow \\ h &= u + RT,\end{aligned}$$

fazendo com que $h:h(T)$, e ainda

A definição de c_v simplifica para

$$\begin{aligned}c_v(T) &= \frac{du}{dT} \quad \rightarrow \\ u(T) &= \int c_v(T) dT.\end{aligned}$$

$$c_P(T) = \frac{dh}{dT} = \frac{du + R dT}{dT}$$

Gás Ideal — Substância com $Pv = RT$

Experimentos mostraram que $u:u(T)$, assim,

$$\delta q - \delta w = du \quad \rightarrow$$

$$(\delta q)_T - (\delta w)_T = (du)_T = 0 \quad \rightarrow$$

$$(\delta q)_T = (\delta w)_T.$$

A definição de c_v simplifica para

$$c_v(T) = \frac{du}{dT} \quad \rightarrow$$

$$u(T) = \int c_v(T) dT.$$

Ainda,

$$h \equiv u + Pv \quad \rightarrow$$

$$h = u + RT,$$

fazendo com que $h:h(T)$, e ainda

$$c_P(T) = \frac{dh}{dT} = \frac{du + R dT}{dT} \quad \rightarrow$$

$$h(T) = \int c_P(T) dT$$

Gás Ideal — Substância com $Pv = RT$

Experimentos mostraram que $u:u(T)$, assim,

Ainda,

$$\begin{aligned}\delta q - \delta w &= du \quad \rightarrow \\ (\delta q)_T - (\delta w)_T &= (du)_T = 0 \quad \rightarrow \\ (\delta q)_T &= (\delta w)_T.\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}h &\equiv u + Pv \quad \rightarrow \\ h &= u + RT,\end{aligned}$$

fazendo com que $h:h(T)$, e ainda

A definição de c_v simplifica para

$$\begin{aligned}c_v(T) &= \frac{du}{dT} \quad \rightarrow \\ u(T) &= \int c_v(T) dT.\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}c_P(T) &= \frac{dh}{dT} = \frac{du + R dT}{dT} \quad \rightarrow \\ h(T) &= \int c_P(T) dT \quad \text{and} \\ c_P(T) &= c_v(T) + R.\end{aligned}$$

Gás Ideal — Calores Específicos

$$c_P(T) = c_v(T) + R \quad (\text{kJ/kg})$$

Gás Ideal — Calores Específicos

$$c_P(T) = c_v(T) + R$$

$$(\text{kJ/kg}) \rightarrow$$

$$\bar{c}_P(T) = \bar{c}_v(T) + \bar{R}$$

$$(\text{kJ/kmol})$$

Gás Ideal — Calores Específicos

$$c_P(T) = c_v(T) + R \quad (\text{kJ/kg}) \quad \rightarrow$$

$$\bar{c}_P(T) = \bar{c}_v(T) + \bar{R} \quad (\text{kJ/kmol})$$

$$\gamma(T) \equiv \frac{c_P(T)}{c_v(T)} = 1 + \frac{R}{c_v(T)} \quad (—)$$

Gás Ideal — Calores Específicos

$$c_P(T) = c_v(T) + R \quad (\text{kJ/kg}) \quad \rightarrow$$

$$\bar{c}_P(T) = \bar{c}_v(T) + \bar{R} \quad (\text{kJ/kmol})$$

$$\gamma(T) \equiv \frac{c_P(T)}{c_v(T)} = 1 + \frac{R}{c_v(T)} \quad (—)$$

$$\bar{c}_{P,monatom.} = 5/2 \bar{R}$$

Gás Ideal — Calores Específicos

$$c_P(T) = c_v(T) + R \quad (\text{kJ/kg}) \quad \rightarrow$$

$$\bar{c}_P(T) = \bar{c}_v(T) + \bar{R} \quad (\text{kJ/kmol})$$

$$\gamma(T) \equiv \frac{c_P(T)}{c_v(T)} = 1 + \frac{R}{c_v(T)} \quad (—)$$

$$\bar{c}_{P,monatom.} = 5/2\bar{R}$$

$$\bar{c}_{P,di-atom.} = 7/2\bar{R}$$

Gás Ideal — Calores Específicos

$$c_P(T) = c_v(T) + R \quad (\text{kJ/kg}) \quad \rightarrow$$

$$\bar{c}_P(T) = \bar{c}_v(T) + \bar{R} \quad (\text{kJ/kmol})$$

$$\gamma(T) \equiv \frac{c_P(T)}{c_v(T)} = 1 + \frac{R}{c_v(T)} \quad (—)$$

$$\bar{c}_{P,monatom.} = 5/2 \bar{R}$$

$$\bar{c}_{P,di-atom.} = 7/2 \bar{R}$$

$$\gamma_{He} = 5/3 \approx 1,667$$

Gás Ideal — Calores Específicos

$$c_P(T) = c_v(T) + R \quad (\text{kJ/kg}) \quad \rightarrow$$

$$\bar{c}_P(T) = \bar{c}_v(T) + \bar{R} \quad (\text{kJ/kmol})$$

$$\gamma(T) \equiv \frac{c_P(T)}{c_v(T)} = 1 + \frac{R}{c_v(T)} \quad (—)$$

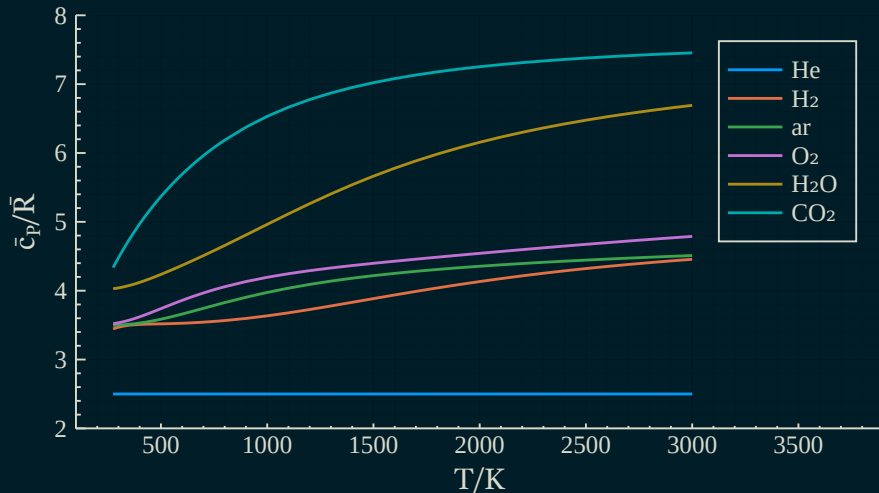
$$\bar{c}_{P,monatom.} = 5/2 \bar{R}$$

$$\bar{c}_{P,di-atom.} = 7/2 \bar{R}$$

$$\gamma_{He} = 5/3 \approx 1,667$$

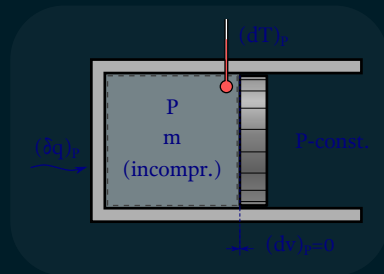
$$\gamma_{ar}(300 \text{ K}) \approx 7/5 = 1,4.$$

Gás Ideal — Comportamento de $\bar{c}_P(T)$



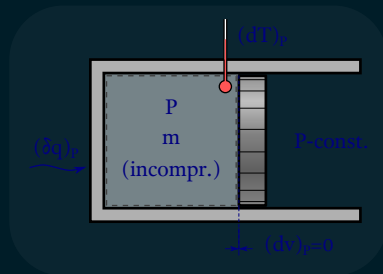
Substância Incompressível — com $dv = 0$

- Comportamento *aproximado* por **sólidos** e **líquidos**;



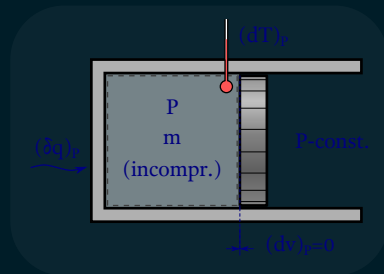
Substância Incompressível — com $dv = 0$

- Comportamento *aproximado* por **sólidos** e **líquidos**;
- Processos a **P -const.** idênticos aos a **v -const.**;



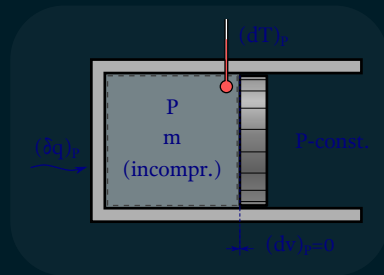
Substância Incompressível — com $dv = 0$

- Comportamento *aproximado* por **sólidos** e **líquidos**;
- Processos a **P -const.** idênticos aos a **v -const.**;
- Portanto: $c_P = c_v = c$ o **calor específico de substância incompressível**;



Substância Incompressível — com $dv = 0$

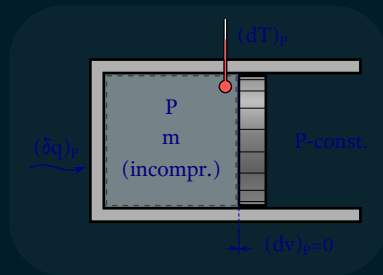
- Comportamento *aproximado* por **sólidos** e **líquidos**;
- Processos a **P -const.** idênticos aos a **v -const.**;
- Portanto: $c_P = c_v = c$ o **calor específico de substância incompressível**;
- Tem-se $c:c(T)$, $u:u(T)$, porém $h:h(T,P)$.



Substância Incompressível — com $dv = 0$

- Comportamento *aproximado* por **sólidos** e **líquidos**;
- Processos a **P -const.** idênticos aos a **v -const.**;
- Portanto: $c_P = c_v = c$ o **calor específico de substância incompressível**;
- Tem-se $c:c(T)$, $u:u(T)$, porém $h:h(T,P)$.

$$\Delta u = u_2 - u_1 = \int_1^2 c(T) dT,$$

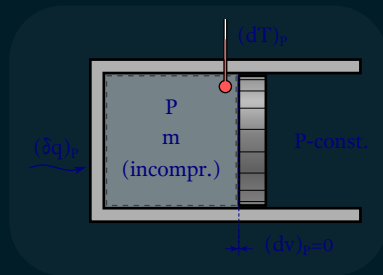


Substância Incompressível — com $dv = 0$

- Comportamento *aproximado* por **sólidos** e **líquidos**;
- Processos a **P -const.** idênticos aos a **v -const.**;
- Portanto: $c_P = c_v = c$ o **calor específico de substância incompressível**;
- Tem-se $c:c(T)$, $u:u(T)$, porém $h:h(T, P)$.

$$\Delta u = u_2 - u_1 = \int_1^2 c(T) dT,$$

$$\Delta h = \Delta u + v\Delta P.$$



Tópicos de Leitura I



Çengel, Y. A. e Boles, M. A.

Termodinâmica 7ª Edição. Seções 4-3 a 4-5.

AMGH. Porto Alegre. ISBN 978-85-8055-200-3.



Photo by Emiliano Arano from Pexels