



Fisica Tecnica (Modulo 1)- LM4

Fisica Tecnica – L23

A.A. 2021-2022





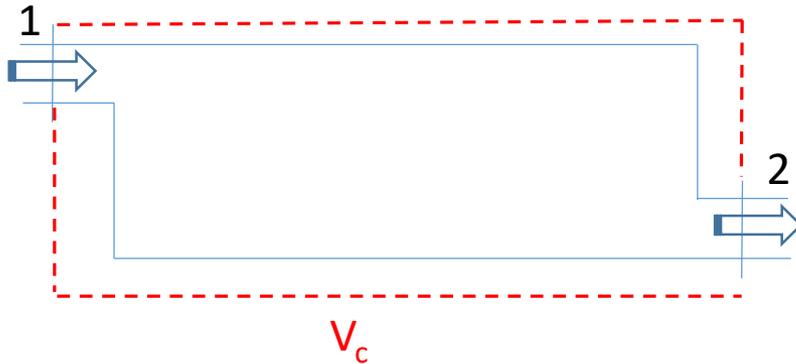
Lezione n. 7

I Principio della TERMODINAMICA per SISTEMI APERTI



Equazioni di bilancio di massa:

Sistema aperto → flussi di massa attraverso sezioni di ingresso e di uscita.



dM_1 : **massa entrante** attraverso la sezione 1 nel tempo dt ;

dM_2 : **massa uscente** attraverso la sezione 2 nel tempo dt ;

M_V : **massa del volume di controllo**;

dM_V : **variazione della massa all'interno del volume di controllo** nel tempo dt .

$$dM_1 - dM_2 = dM_V \Rightarrow \frac{dM_1}{dt} - \frac{dM_2}{dt} = \frac{dM_V}{dt} \Rightarrow \dot{M}_1 - \dot{M}_2 = \frac{dM_V}{dt}$$

\dot{M}_1 : **portata entrante** attraverso la sezione 1 $\left[\frac{kg}{s} \right]$

\dot{M}_2 : **portata uscente** attraverso la sezione 2 $\left[\frac{kg}{s} \right]$

$\frac{dM_V}{dt}$: **variazione di massa all'interno del volume di controllo nell'unità di tempo** $\left[\frac{kg}{s} \right]$

Generalizzando (**n ingressi ed m uscite**):

$$\sum_{i=1}^n \dot{M}_i - \sum_{j=1}^m \dot{M}_j = \frac{dM_V}{dt}$$

Regime **permanente o stazionario**:

$$\frac{dM_V}{dt} = 0 \Rightarrow \sum_{i=1}^n \dot{M}_i - \sum_{j=1}^m \dot{M}_j = 0 \Rightarrow \sum_{i=1}^n \dot{M}_i = \sum_{j=1}^m \dot{M}_j$$

Un solo ingresso ed una sola uscita:

$$\dot{M}_1 = \dot{M}_2 \Rightarrow \dot{M} = \text{costante}$$

Regime stazionario: stesso valore della portata in qualunque sezione del tubo.

ρ : **densità** del fluido

$$\dot{M} = \rho \cdot \dot{V}$$

Regime **stazionario** e **fluido incompressibile** ($\rho = \text{costante}$):

$$\dot{V} = \text{costante}$$

Essendo:

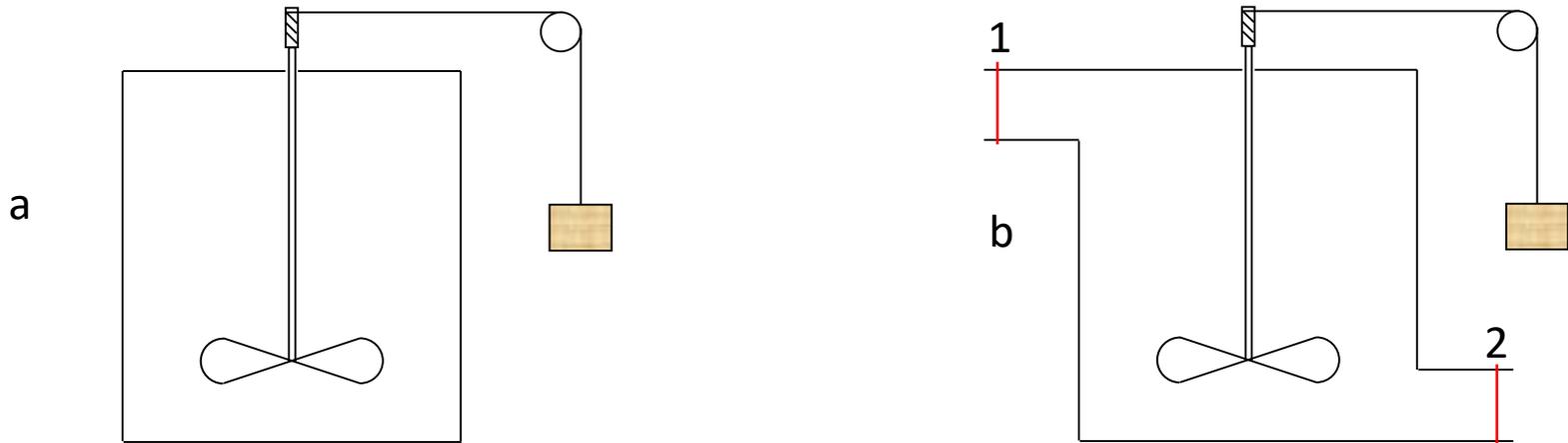
$$\dot{V} = A \cdot w$$

Regime **stazionario**, **fluido incompressibile**, tubo a **sezione costante**:

$$w = \text{costante}$$

Al variare della sezione del condotto, la **velocità** del fluido **aumenta** se la **sezione diminuisce** e viceversa.

Lavoro d'elica o lavoro tecnico



Lavoro tecnico: scambiato dal sistema con l'esterno mediante un **albero dotato di elica** (es. turbina, pompa di circolazione, ventilatore...)

Caso a) Sistema chiuso

Albero messo in moto da agente meccanico esterno

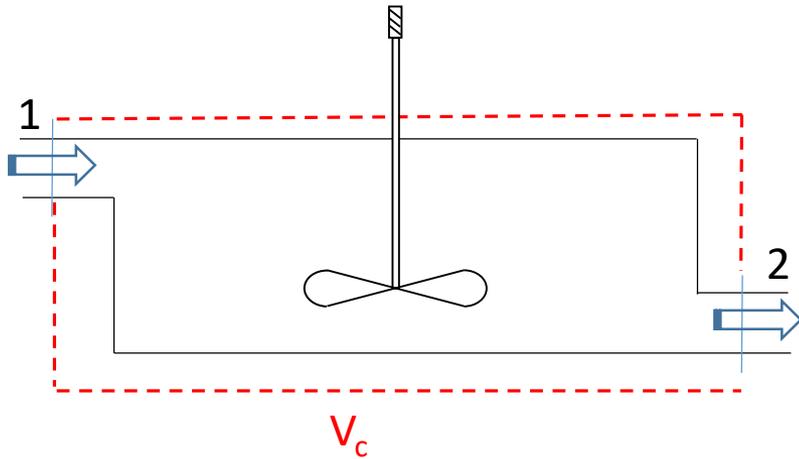
Lavoro solo subito dal sistema (<0)

Caso b) Sistema aperto

Albero messo in moto da agente meccanico esterno: lavoro subito dal sistema (<0)

Albero messo in moto dall'azione del fluido sull'elica: lavoro compiuto dal sistema (>0)

Sistema aperto con **un ingresso** ed **una uscita** dotato di organo meccanico con elica



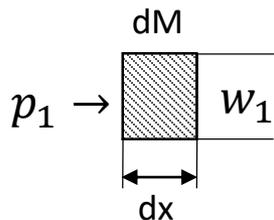
Lavoro scambiato con l'esterno attraverso:

Sezione di **ingresso** (<0)

Sezione di **uscita** (>0)

Albero (> 0 o < 0)

Sezione 1



Lavoro subito dal sistema a causa della pressione esercitata dal fluido in ingresso

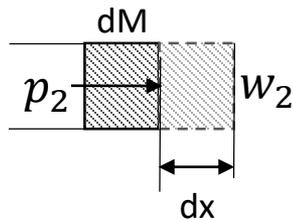
$$dL = p_1 \cdot A \cdot dx = p_1 \cdot A \cdot w_1 \cdot dt = p_1 \cdot \dot{V}_1 \cdot dt$$

\dot{M}_1 : portata in massa $\left[\frac{kg}{s} \right]$; v_1 : volume specifico $\left[\frac{m^3}{kg} \right]$

$$\dot{V}_1 = \dot{M}_1 \cdot v_1 \Rightarrow dL = p_1 \cdot v_1 \cdot \dot{M}_1 \cdot dt = p_1 \cdot v_1 \cdot \frac{dM}{dt} dt \Rightarrow \frac{dL}{dM} = p_1 \cdot v_1 \Rightarrow l_1 = p_1 \cdot v_1$$

$$l_1 < 0$$

Sezione 2



Lavoro compiuto dal sistema a causa della pressione esercitata dal fluido in uscita

$$dL = p_2 \cdot A \cdot dx = p_2 \cdot A \cdot w_2 \cdot dt = p_2 \cdot \dot{V}_2 \cdot dt$$

\dot{M}_2 : portata in massa $\left[\frac{kg}{s} \right]$; v_2 : volume specifico $\left[\frac{m^3}{kg} \right]$

$$\dot{V}_2 = \dot{M}_2 \cdot v_2 \Rightarrow dL = p_2 \cdot v_2 \cdot \dot{M}_2 \cdot dt = p_2 \cdot v_2 \cdot \frac{dM}{dt} dt \Rightarrow \frac{dL}{dM} = p_2 \cdot v_2 \Rightarrow l_2 = p_2 \cdot v_2$$

$$l_2 > 0$$

Lavoro scambiato **complessivamente** con l'esterno da un sistema aperto:

$$l_{12} = p_2 \cdot v_2 - p_1 \cdot v_1 + l'_{12}$$

dove: l'_{12} : lavoro tecnico

Espressione di **validità generale** del **I principio della Termodinamica**:

$$q_{12} = u_2 - u_1 + l_{12}$$

Sostituiamo al lavoro l'espressione calcolata **per i sistemi aperti**:

$$q_{12} = u_2 - u_1 + p_2 \cdot v_2 - p_1 \cdot v_1 + l'_{12} = h_2 - h_1 + l'_{12}$$

Espressione del **I principio di validità generale per i sistemi aperti**:

$$q_{12} = h_2 - h_1 + l'_{12}$$

In termini infinitesimi:

$$dq = dh + dl'$$

Trasformazione **reversibile**:

$$dq = du + dl \Rightarrow dq = du + p \cdot dv = du + d(p \cdot v) - v \cdot dp = d(u + p \cdot v) - v \cdot dp$$

Da cui:
$$dq = dh - v \cdot dp$$

Confrontando la $dq = dh + dl'$

con la $dq = dh - v \cdot dp$

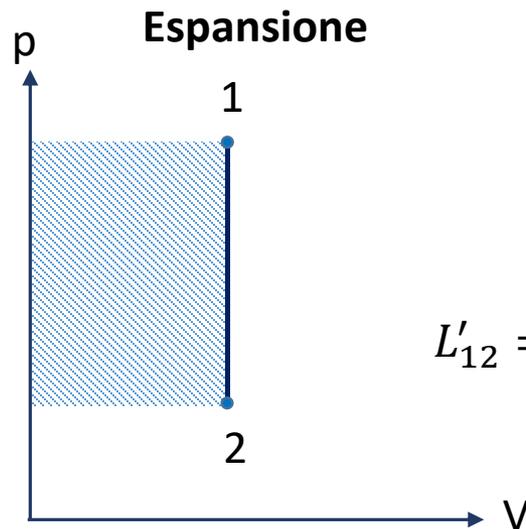
Si deduce $dl' = -v \cdot dp$

Analogamente: $dL' = -V \cdot dp$

In forma finita: $l'_{12} = - \int_1^2 v \cdot dp$ $L'_{12} = - \int_1^2 V \cdot dp$

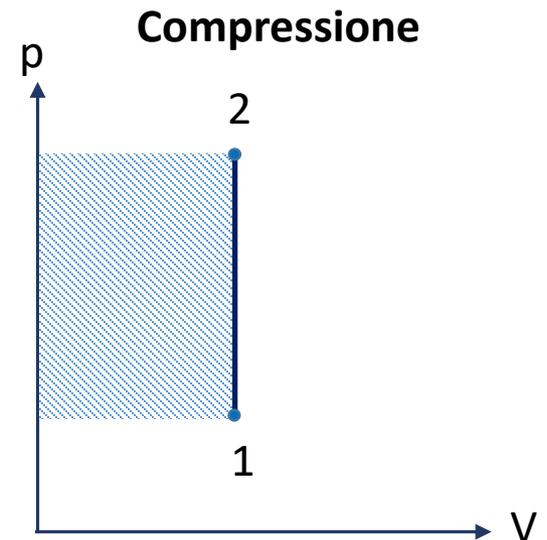
Espressioni del **lavoro tecnico** in funzione delle variabili termodinamiche p e V (v) **nelle trasformazioni reversibili.**

Trasformazione ISOCORA reversibile (V = costante)



$$L_{12} = \int_1^2 p \cdot dV = 0$$

$$L'_{12} = - \int_1^2 V \cdot dp = V \cdot (p_1 - p_2)$$



Lavoro totale nullo

Lavoro tecnico: differenza tra i valori dell'**energia di pressione** che possiede il fluido in **ingresso** ed in **uscita**.

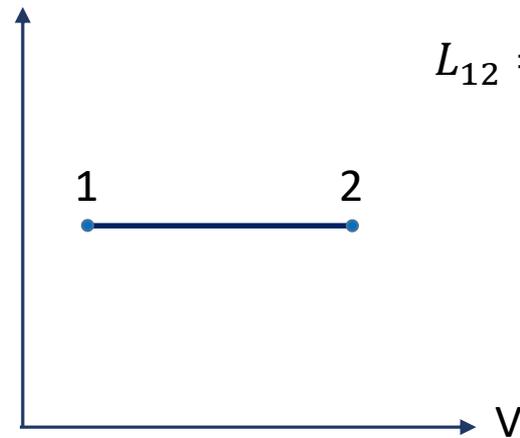
Area sottesa dalla trasformazione sul verso positivo dell'asse delle pressioni (sistema di riferimento sinistrorso \Rightarrow presenza del segno -)

Espansione: $p_1 > p_2 \rightarrow$ lavoro tecnico **positivo:** il fluido esercita un'azione sulle pale dell'albero trasferendo ad esse parte della sua energia di pressione.

Compressione: $p_1 < p_2 \rightarrow$ lavoro tecnico **negativo:** il fluido subisce un'azione da parte dell'albero attraverso la girante azionata da un motore esterno.

Trasformazione ISOBARA reversibile ($p = \text{costante}$)

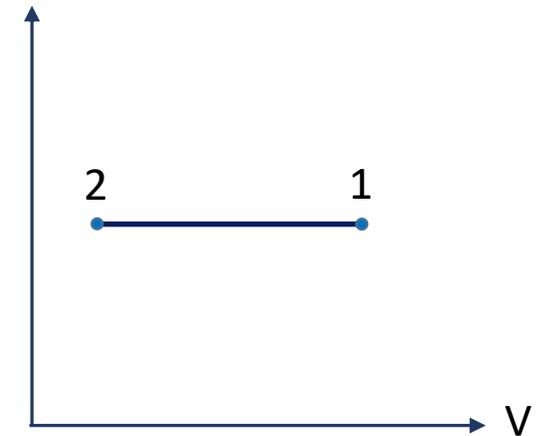
p **Espansione**



$$L_{12} = \int_1^2 p \cdot dV = p \cdot (V_2 - V_1)$$

$$L'_{12} = - \int_1^2 V \cdot dp = 0$$

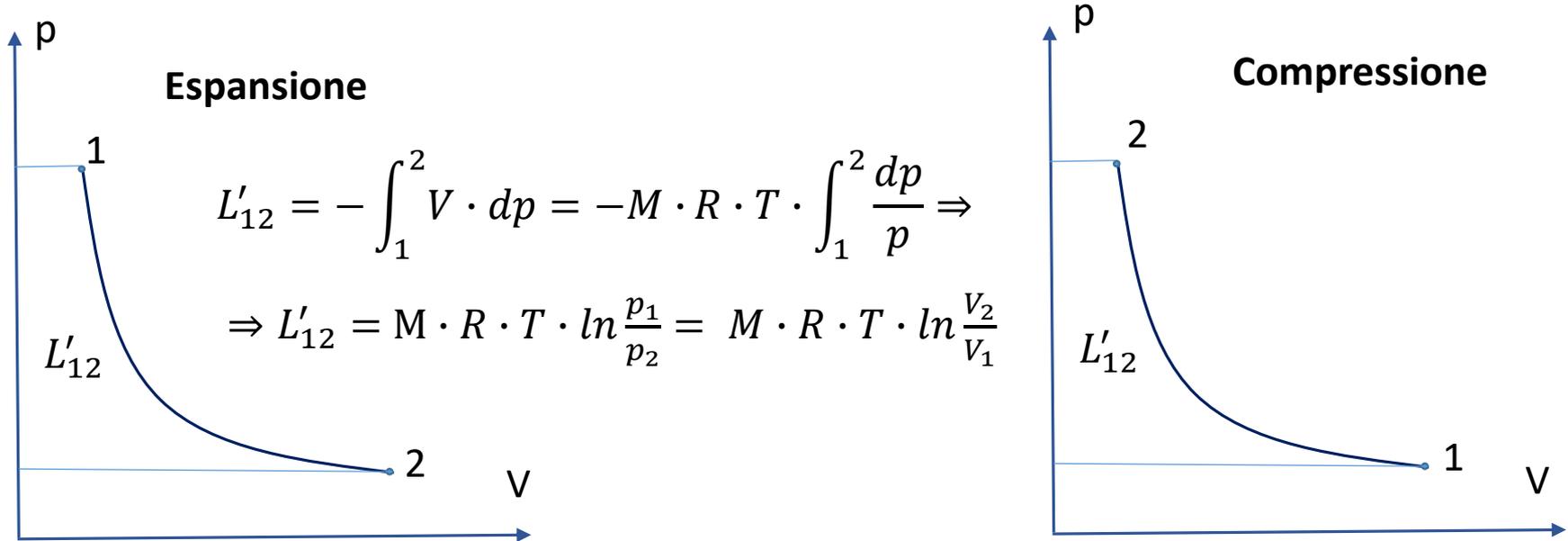
p **Compressione**



Lavoro totale: differenza tra i valori dell'energia di pressione che possiede il fluido in ingresso ed in uscita.

Lavoro tecnico nullo

Trasformazione ISOTERMA di un gas ideale



Lavoro totale e lavoro tecnico coincidono (simmetria dell'iperbole equilatera)

$$L_{12} = L'_{12} + p_2 \cdot V_2 - p_1 \cdot V_1 \Rightarrow p_1 \cdot V_1 = p_2 \cdot V_2 \text{ (I legge di stato)}$$

Espansione: $p_1 > p_2$ e $V_1 < V_2 \rightarrow$ **lavoro tecnico positivo:** il fluido esercita un'azione sulle pale dell'albero trasferendo ad esse parte della sua energia di pressione.

Compressione: $p_1 < p_2$ e $V_1 > V_2 \rightarrow$ **lavoro tecnico negativo:** il fluido subisce un'azione da parte dell'albero attraverso la girante azionata da un motore esterno.