

Turbomacchine a fluido comprimibile

Stadio di una turbomacchina

➤ Successione delle schiere negli **stadi**

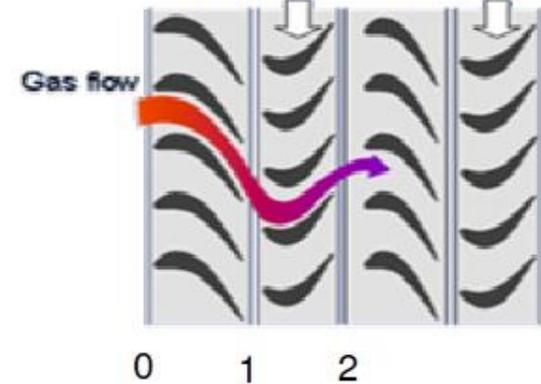
⇒ Macchine motrici

→ Sequenza statore - rotore

- Nello statore (0-1) conversione di entalpia in energia cinetica
- Nel rotore (1-2) : conversione di energia cinetica in lavoro ceduto alla macchina
- Nel rotore (1-2) : conversione di entalpia in energia cinetica relativa e, poi, in lavoro ceduto alla macchina

$$l_m = \frac{c_1^2 - c_2^2}{2} + \frac{w_2^2 - w_1^2}{2}$$

Statore - Rotore - Statore - Rotore

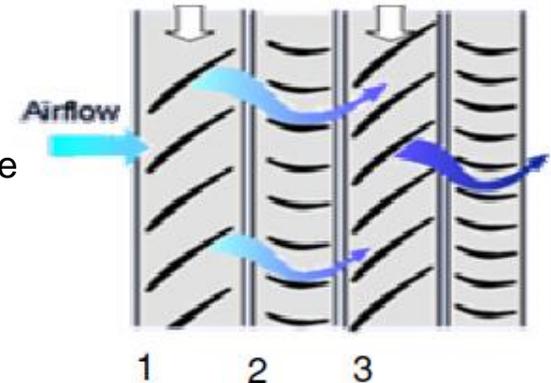


⇒ Macchine operatrici

→ Sequenza rotore - statore

- Nel rotore (1-2) : conversione di lavoro assorbito dalla macchina in energia cinetica e in entalpia/pressione
- Nello statore (2-3) : conversione di energia cinetica in entalpia/pressione

Rotore - Statore - Rotore - Statore



$$l_o = \frac{c_2^2 - c_1^2}{2} + \frac{w_1^2 - w_2^2}{2}$$

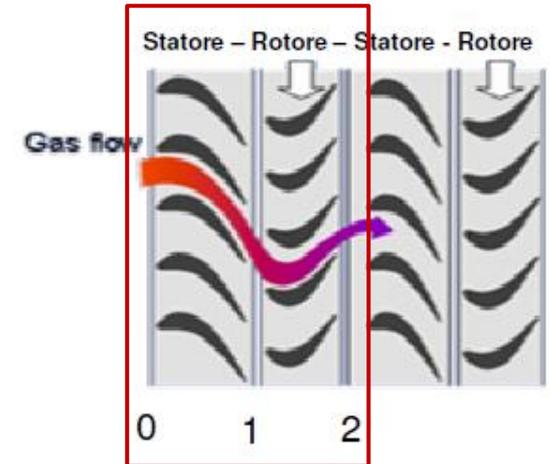
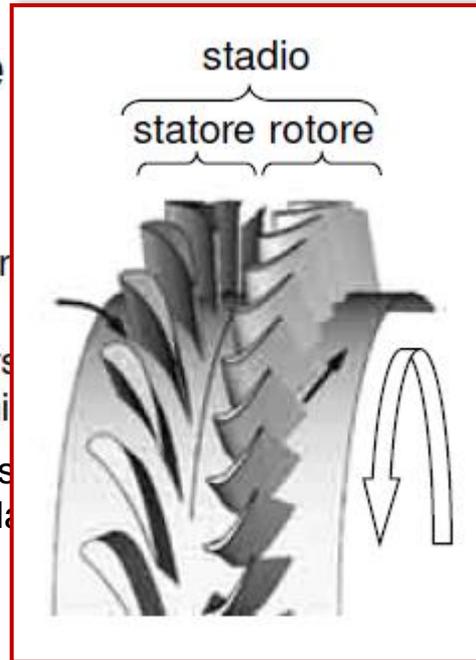
Stadio di una turbomacchina

➤ Successione delle schiere

⇒ Macchine motrici

→ Sequenza statore - rotore

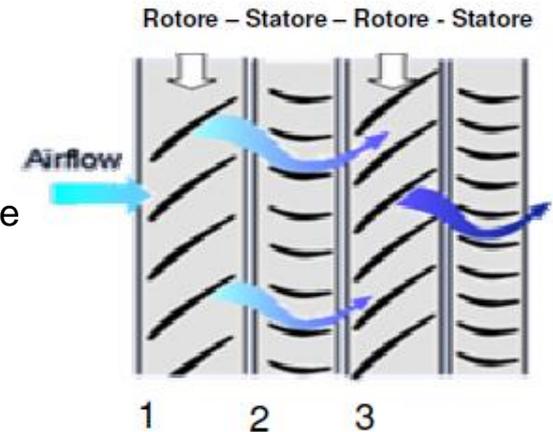
- Nello statore (0-1) conversione di energia cinetica
- Nel rotore (1-2) : conversione di lavoro ceduto alla macchina
- Nel rotore (1-2) : conversione di energia cinetica relativa e, poi, in lavoro



⇒ Macchine operatrici

→ Sequenza rotore - statore

- Nel rotore (1-2) : conversione di lavoro assorbito dalla macchina in energia cinetica e in entalpia/pressione
- Nello statore (2-3) : conversione di energia cinetica in entalpia/pressione



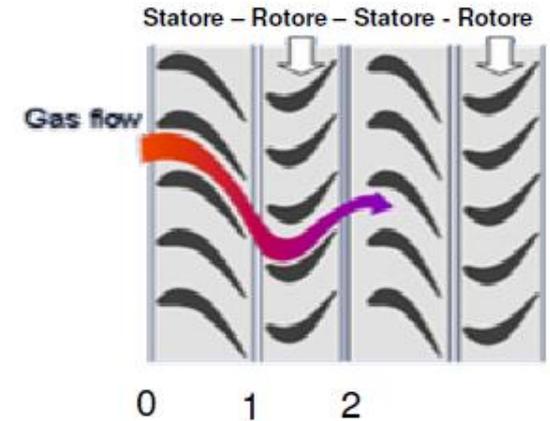
Stadio di una turbomacchina

➤ Successione delle schiere negli stadi

⇒ Macchine motrici

→ Sequenza statore - rotore

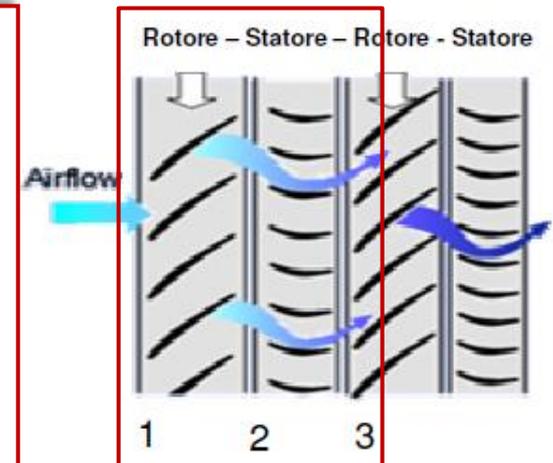
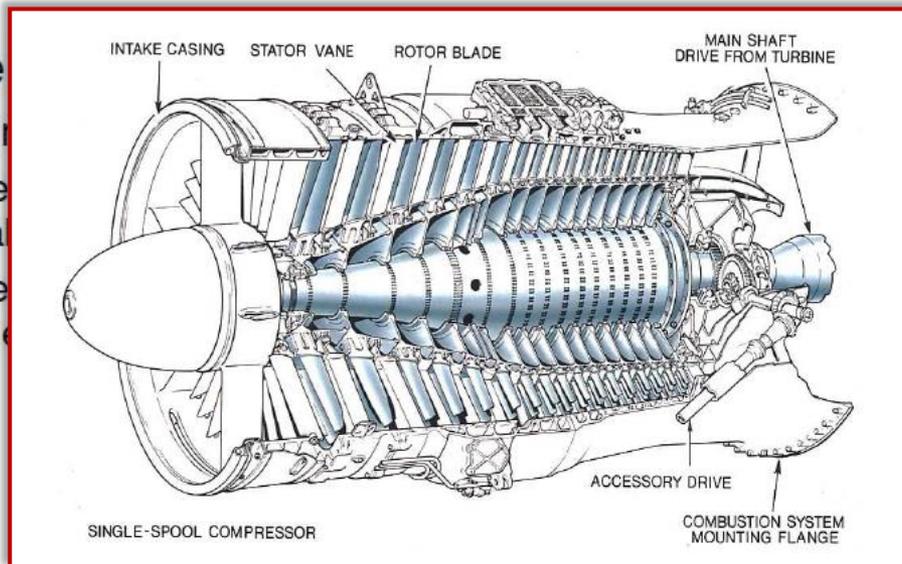
- Nello statore (0-1) conversione di entalpia in energia cinetica
- Nel rotore (1-2) : conversione di energia cinetica in lavoro ceduto alla macchina
- Nel rotore (1-2) : conversione di entalpia in energia cinetica relativa e, poi, in lavoro ceduto alla macchina



⇒ Macchine

→ Sequen

- Ne da
- Ne in



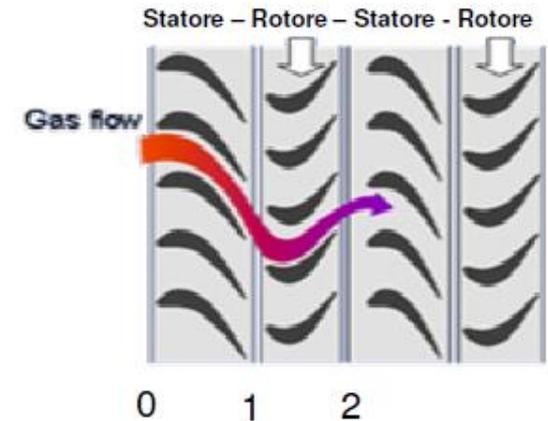
Stadio di una turbomacchina

➤ Successione delle schiere negli stadi

⇒ Macchine motrici

→ Sequenza statore - rotore

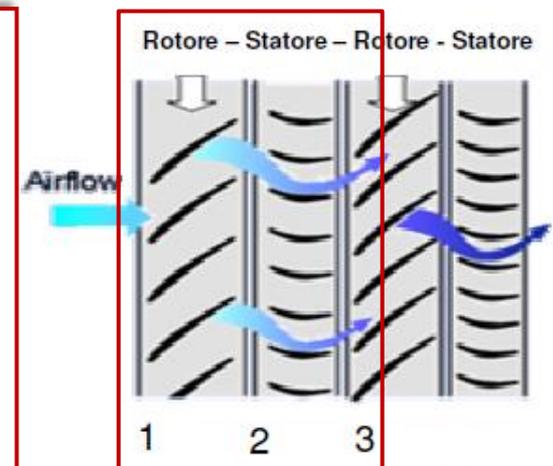
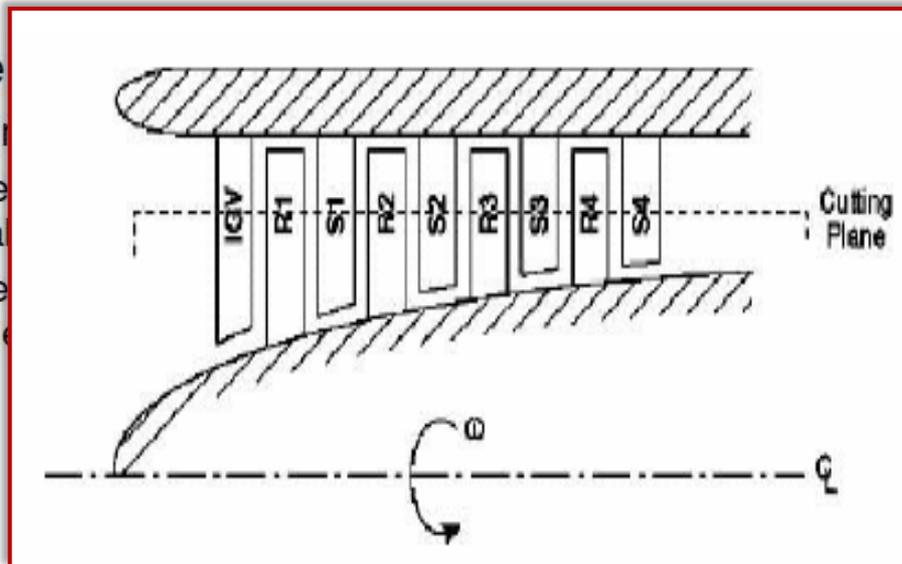
- Nello statore (0-1) conversione di entalpia in energia cinetica
- Nel rotore (1-2) : conversione di energia cinetica in lavoro ceduto alla macchina
- Nel rotore (1-2) : conversione di entalpia in energia cinetica relativa e, poi, in lavoro ceduto alla macchina



⇒ Macchine

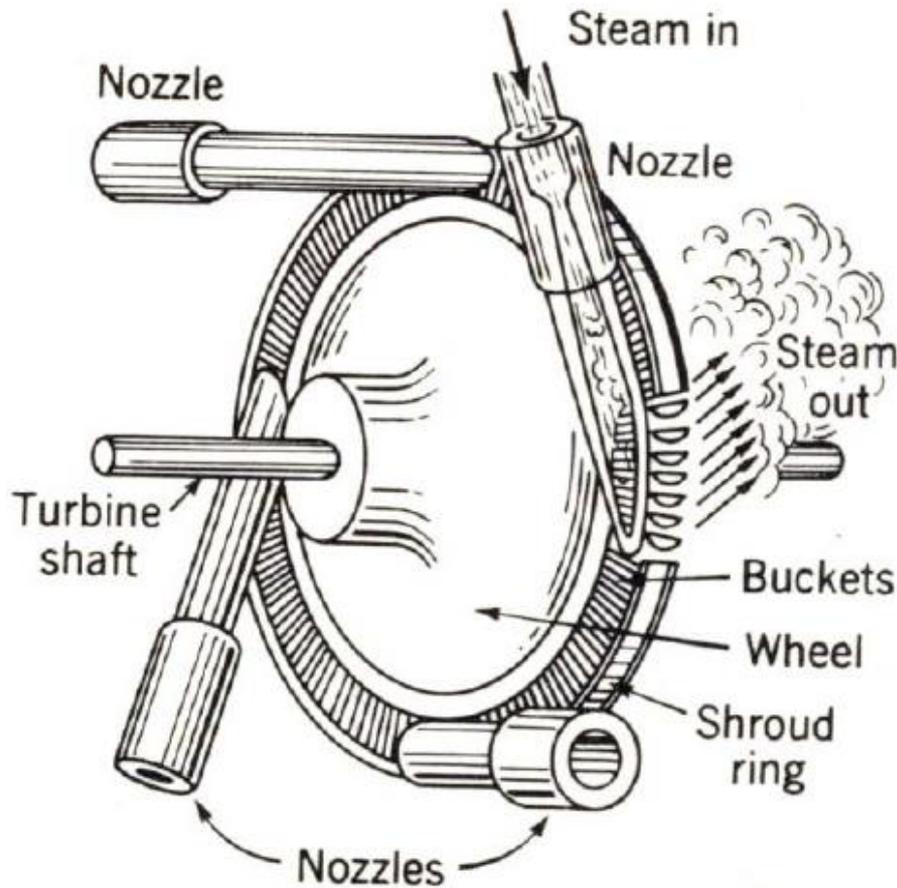
→ Sequenza

- Ne
- da
- Ne
- in

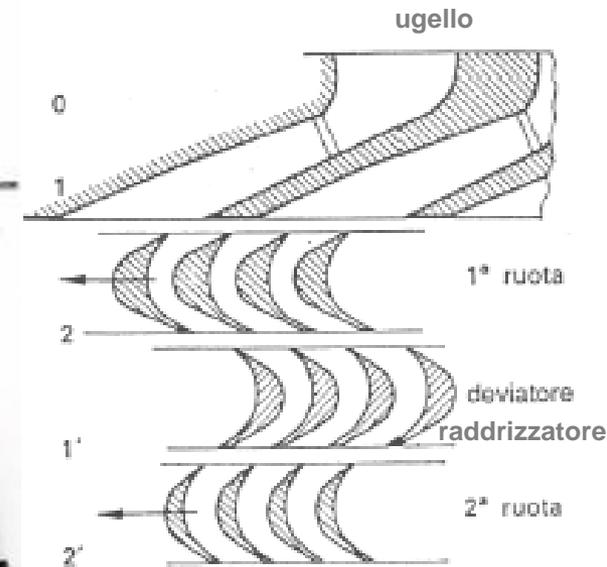
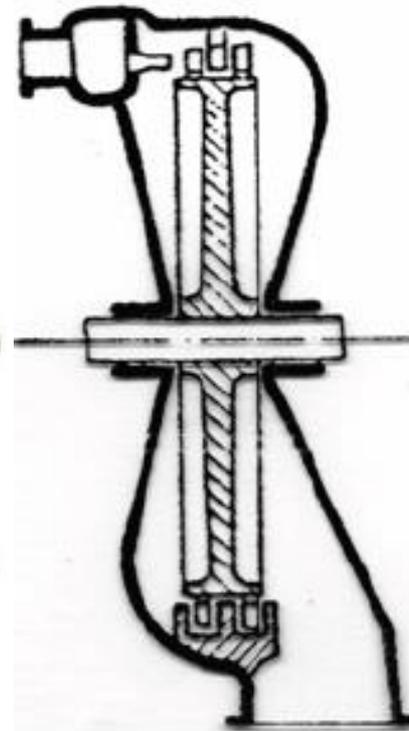


Turbine a vapore e a gas

Turbina a vapore ad azione

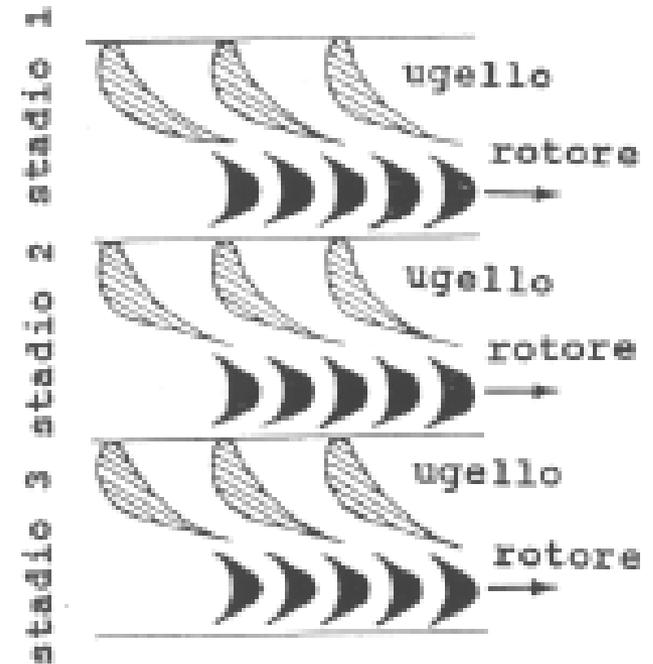
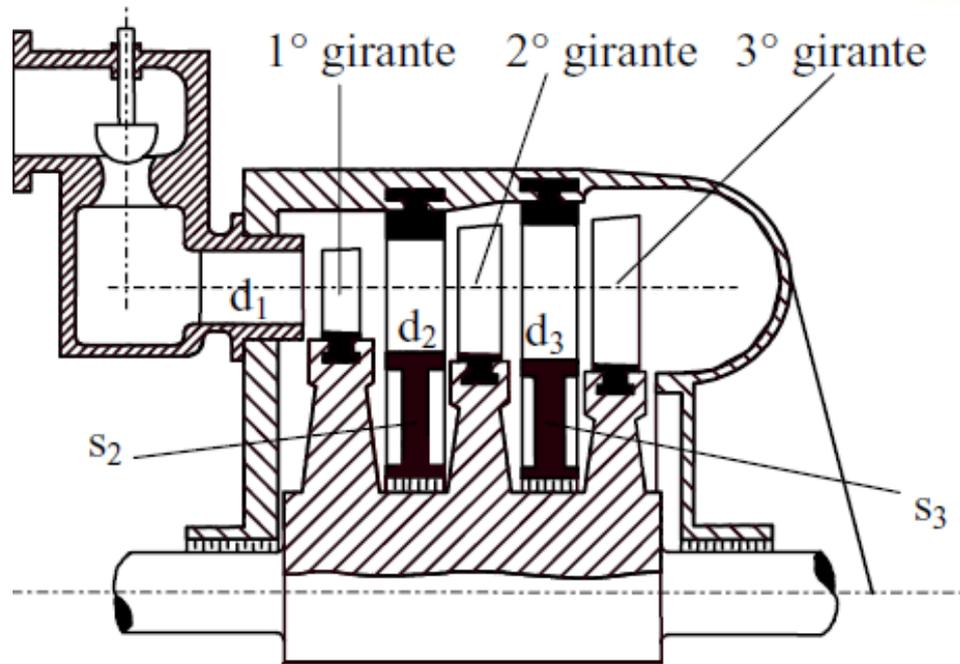


Turbina di De Laval



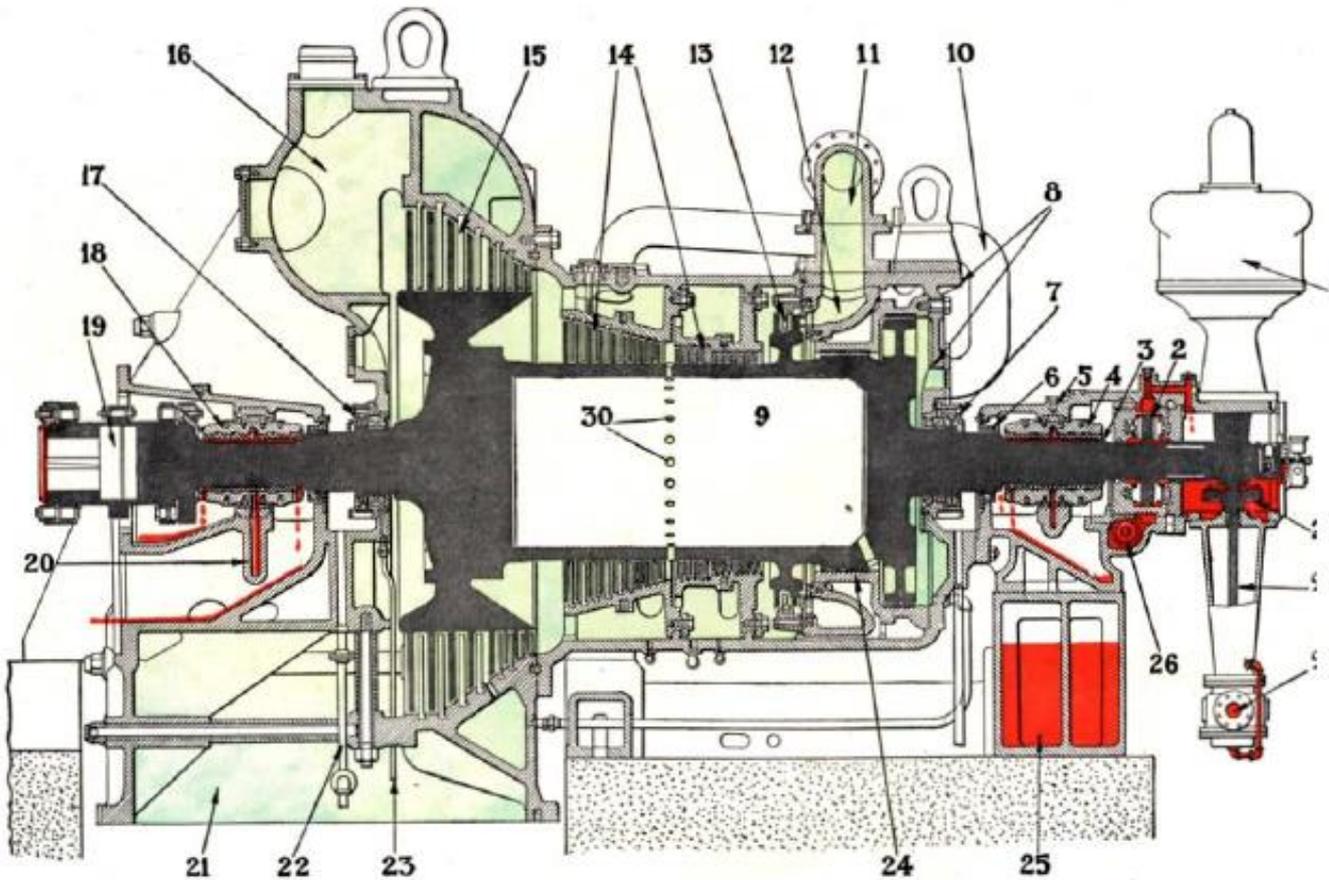
Turbina a salti di velocità

Turbina a vapore ad azione



Turbina a salti di pressione

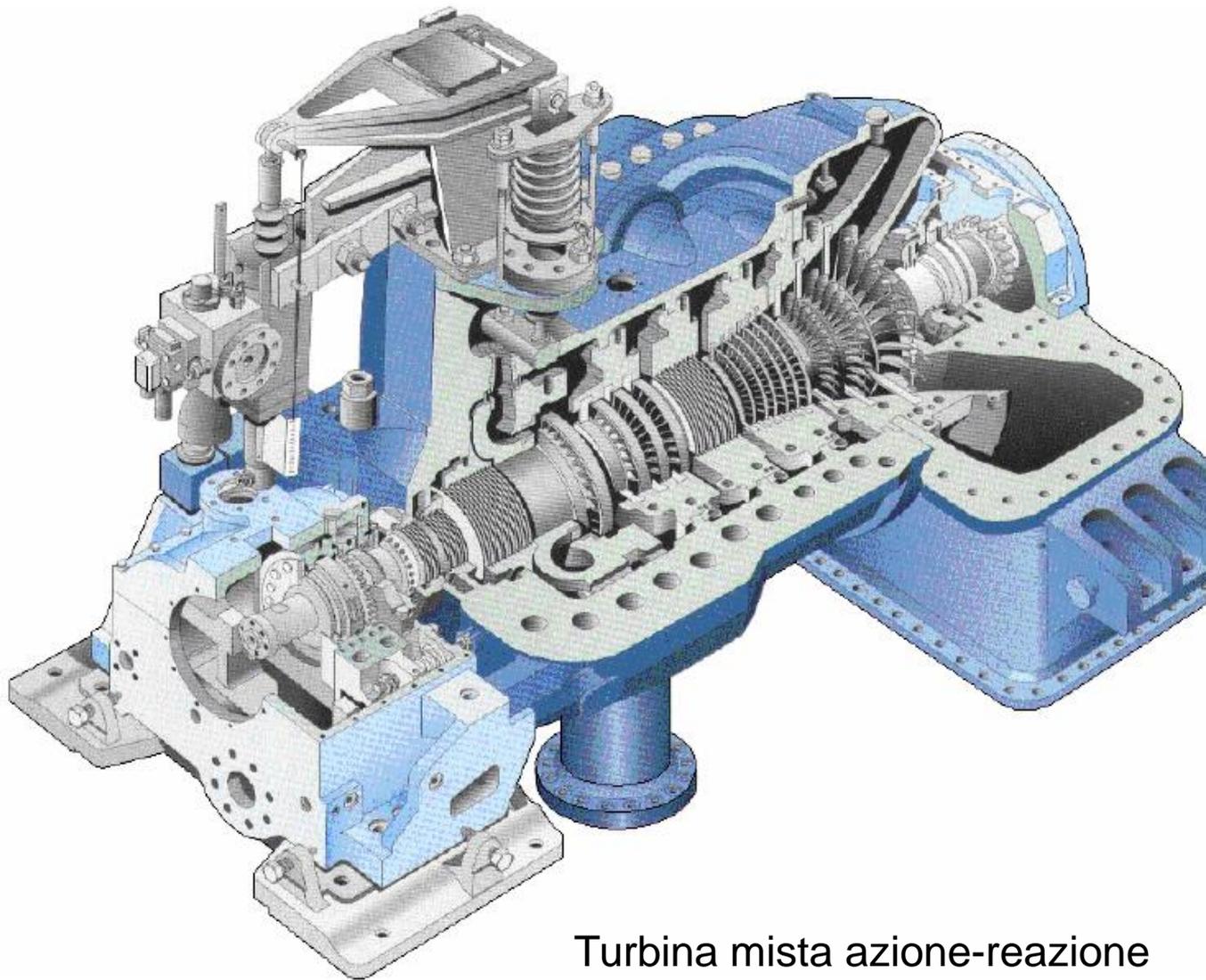
Turbina a vapore mista



1. Regolatore
2. Soppo di spinta
3. Perno della girante
4. Soppo principale N° 1
5. Incastellatura del soppo N° 1
6. Anello paraolio
7. Tenuta ad acqua N° 1
8. Cassa della turbina
9. Tamburo
10. Condotta equilibratrice di pressione
11. Ammissione del vapore
12. Ugello dell'alta pressione
13. Palettamento ad azione
14. Palettamento a reazione; media pressione
15. Palettamento a reazione; bassa pressione
16. Camera di scarico
17. Tenuta ad acqua N° 2
18. Soppo principale N° 2
19. Giunto flessibile
20. Condotta dell'olio al soppo N° 2
21. Scarico al condensatore
22. Scarico della tenuta ad acqua
23. Scarico interno della tenuta ad acqua
24. Tamburo di equilibramento
25. Serbatoio d'olio
26. Vite di registro del soppo di spinta
27. Pompa d'olio principale
28. Alberino della pompa
29. Ingranaggio della pompa
30. Fori di compenso del vapore

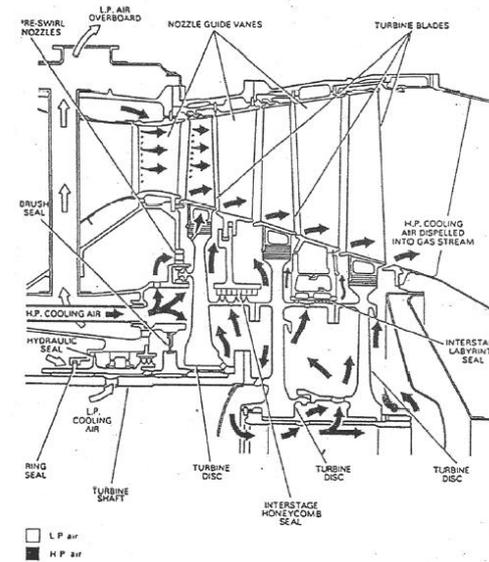
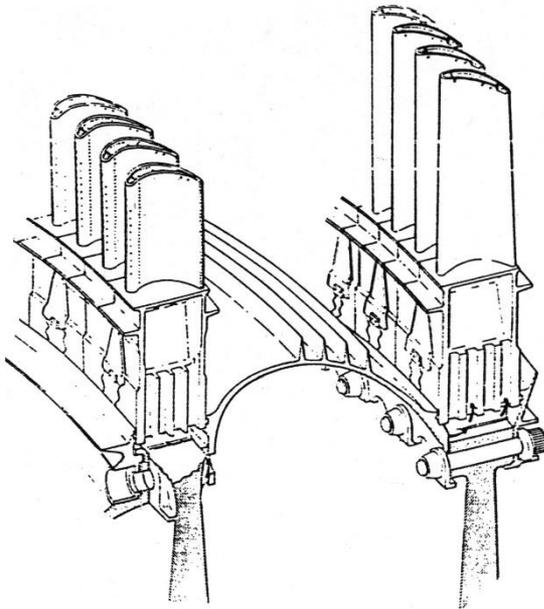
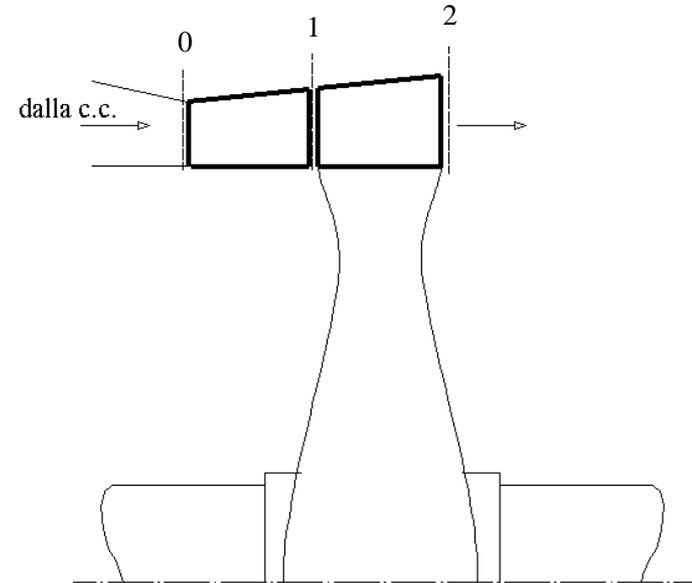
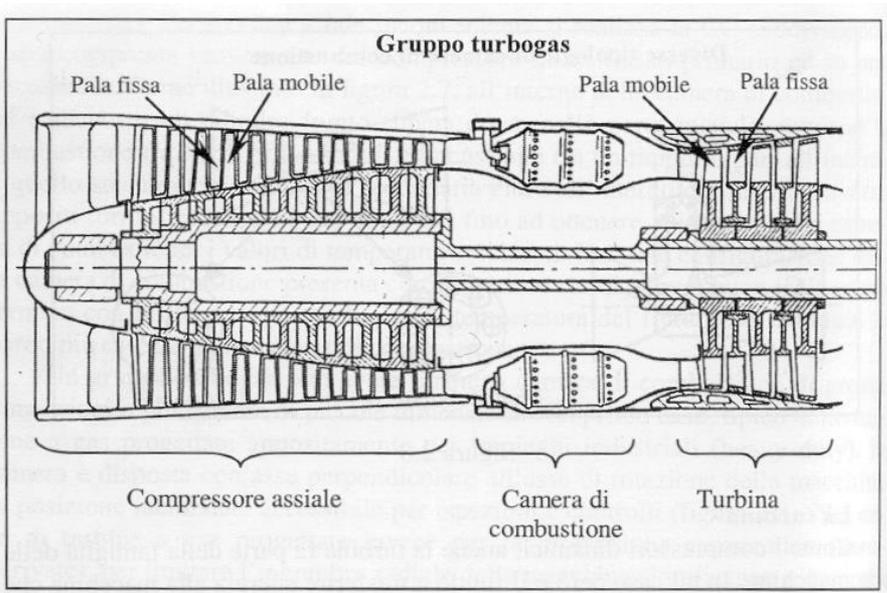
Turbina mista azione-reazione

Turbina a vapore mista

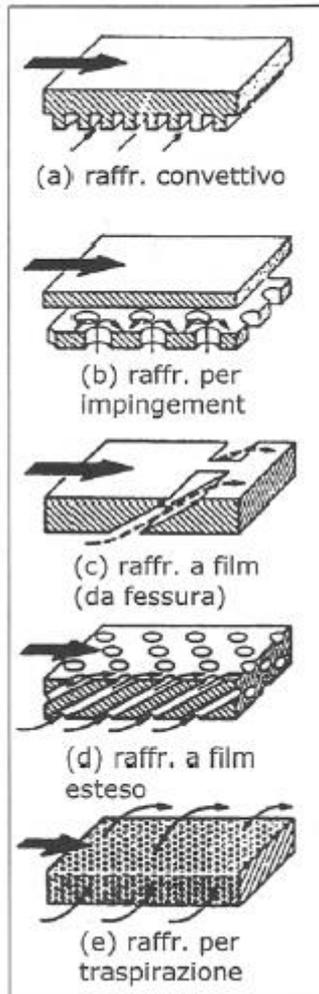


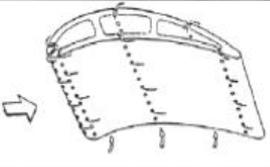
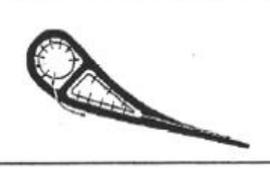
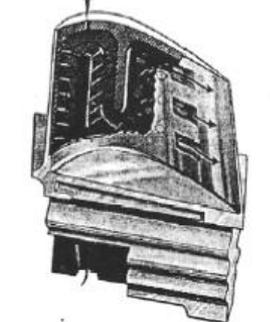
Turbina mista azione-reazione

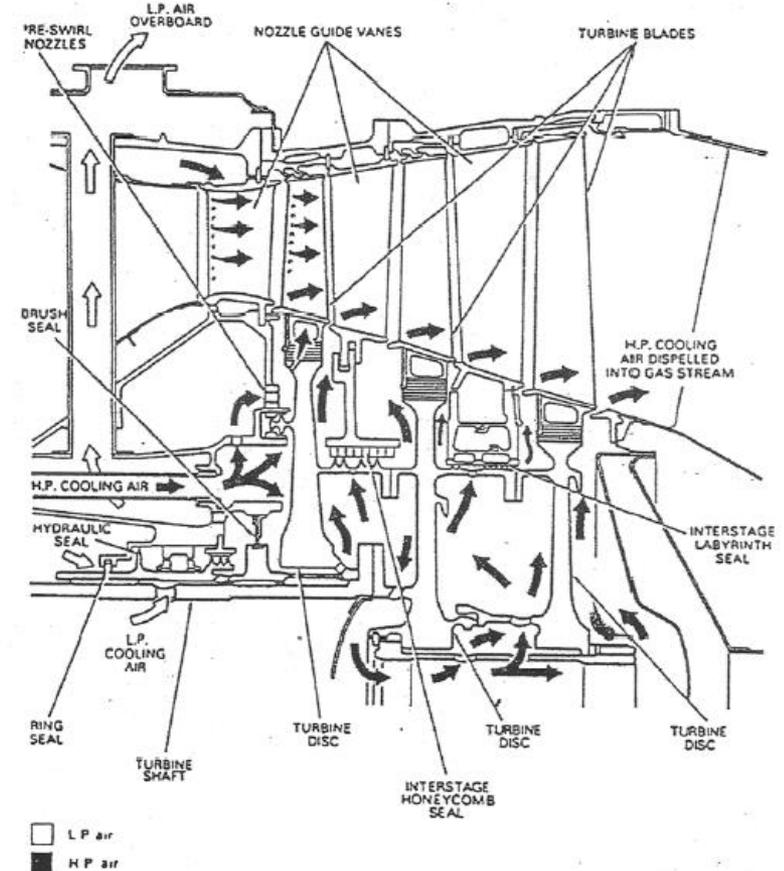
Turbina a gas



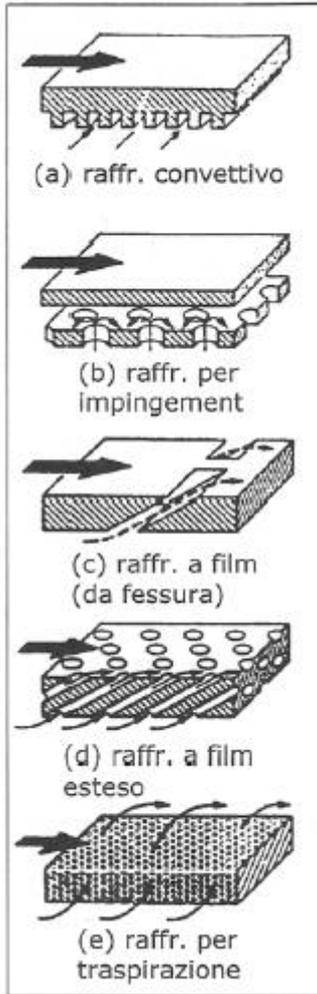
Raffreddamento delle pale della turbina



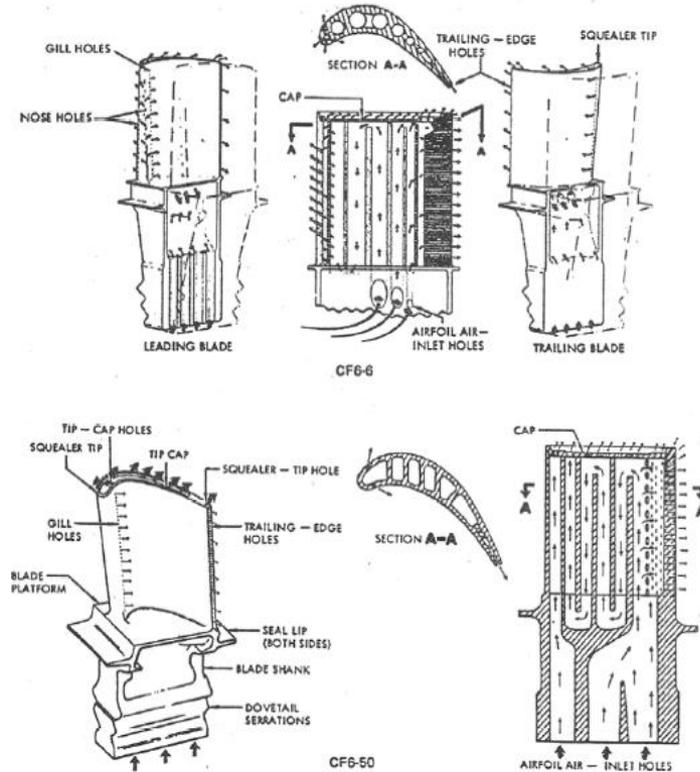
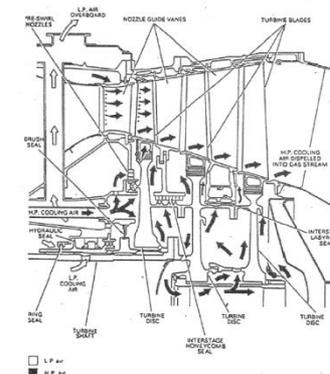
	Palettatura refrigerata a convezione interna e film
	Ugello primo stadio con raffreddamento a convezione interna, impingement e film
	Ugello primo stadio con raffreddamento a convezione interna, impingement e film
	Pala primo stadio rotorico con raffreddamento a convezione interna (con canali multipassaggio e turbolenziatori) e film



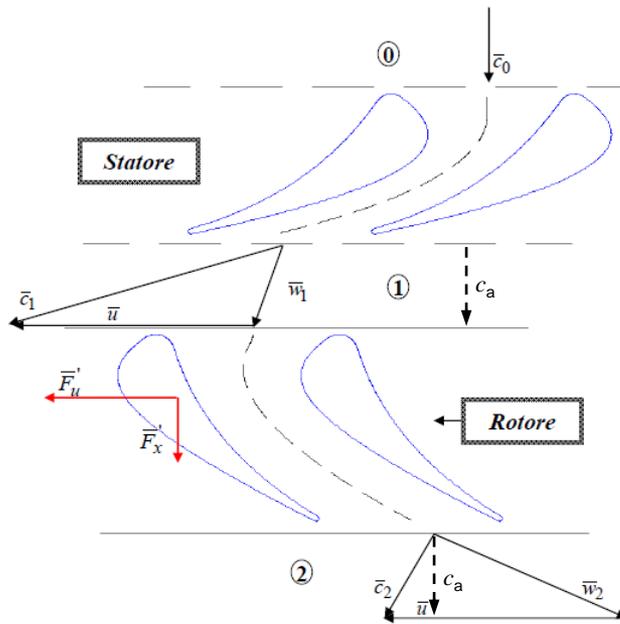
Raffreddamento delle pale della turbina



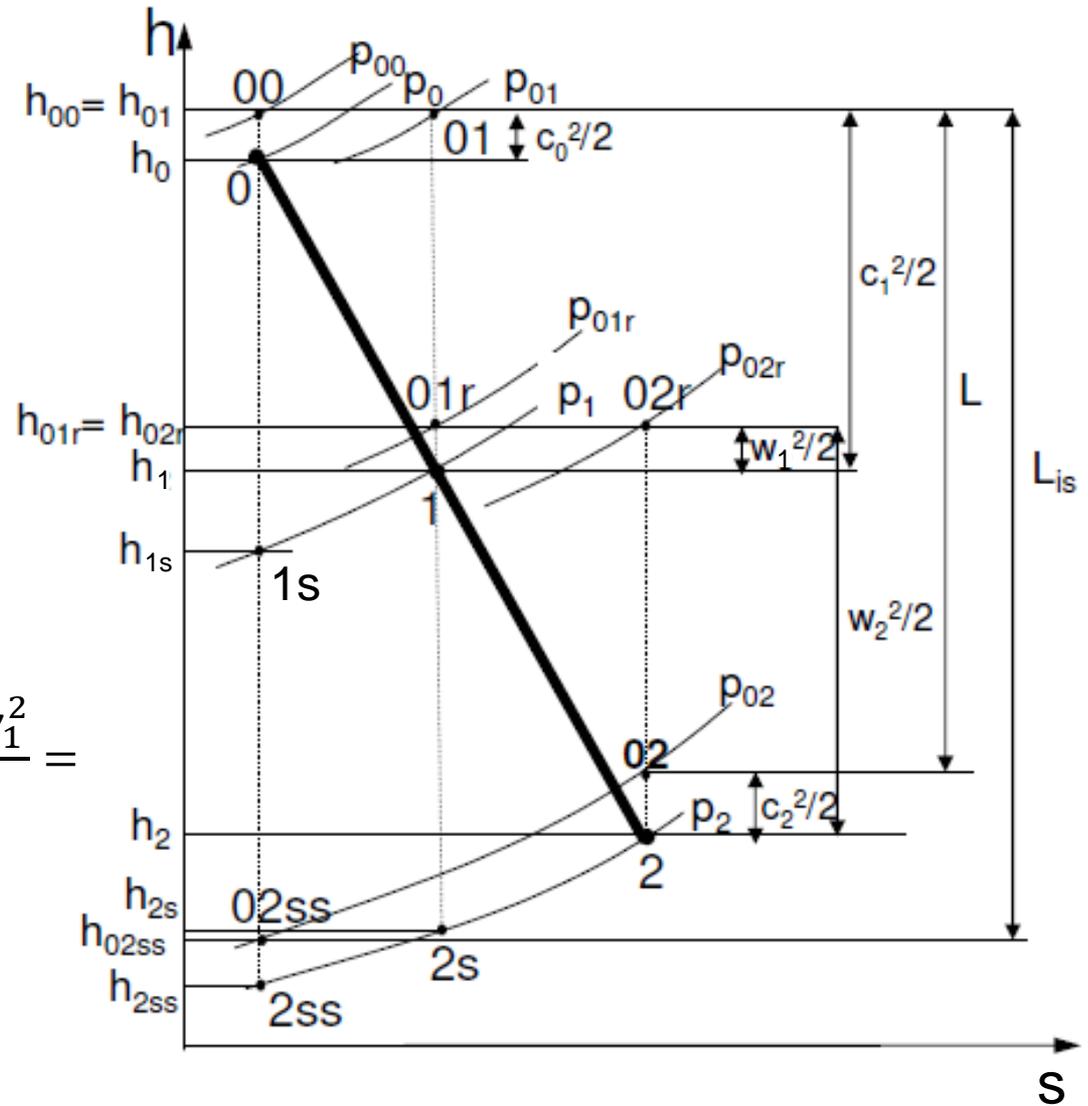
	Palettatura refrigerata a convezione interna e film
	Ugello primo stadio con raffreddamento a convezione interna, impingement e film
	Ugello primo stadio con raffreddamento a convezione interna, impingement e film
	Pala primo stadio rotorio con raffreddamento a convezione interna (con canali multipassaggio e turbolenziatori) e film



Triangoli di velocità e trasformazione termodinamica nello stadio di turbina assiale



$$l = h_{00} - h_{02} = \frac{c_1^2 - c_2^2}{2} + \frac{w_2^2 - w_1^2}{2} = u(c_{u1} - c_{u2})$$



Triangoli di velocità e trasformazione termodinamica nello stadio di turbina assiale

Coefficiente di flusso: $\phi = \frac{c_a}{u}$

Coefficiente di carico:

$$\psi = \frac{h_{00} - h_{02}}{u^2}$$

Grado di Reazione:

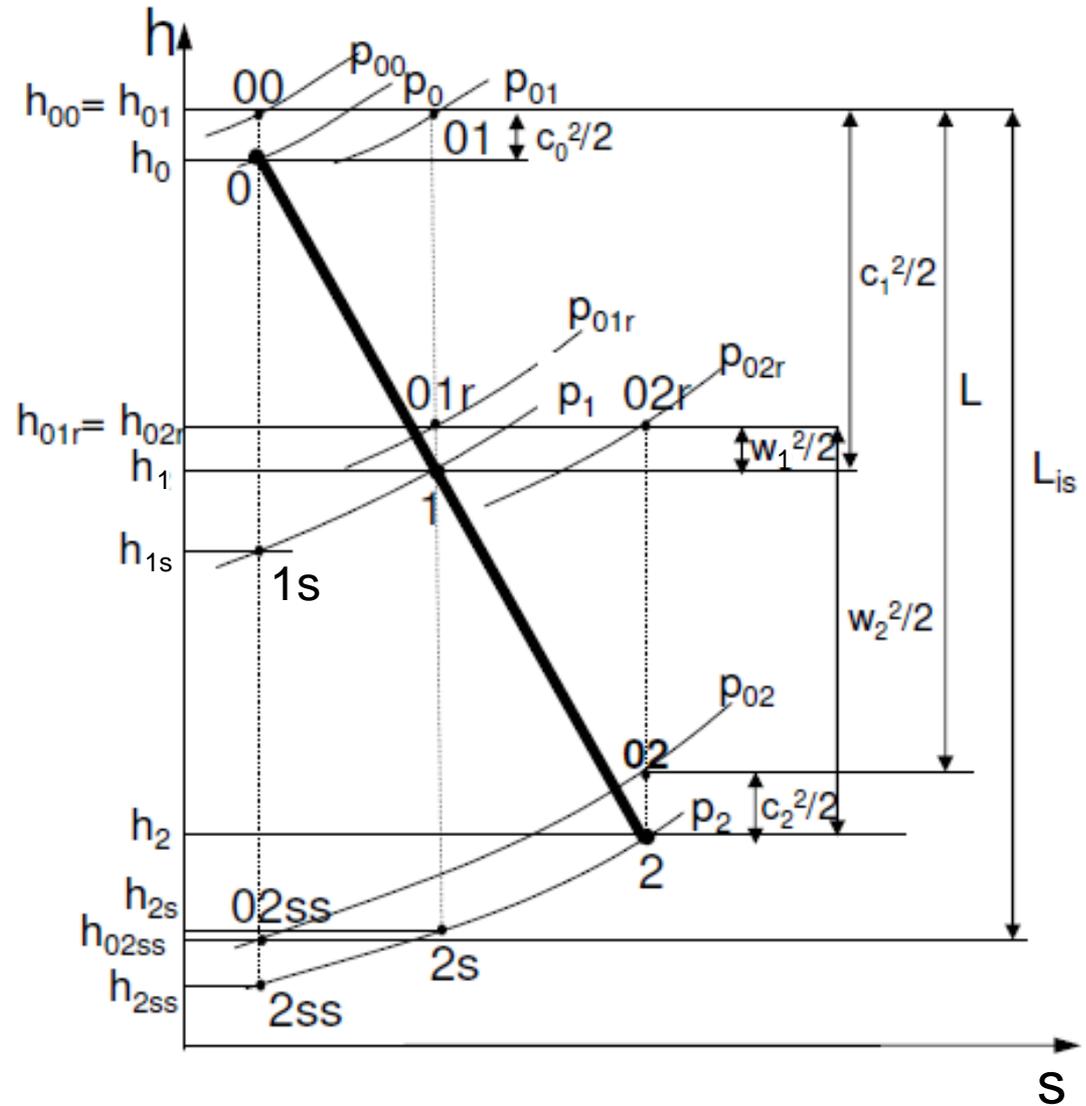
$$R = \frac{h_1 - h_2}{h_{00} - h_{02}} = \frac{w_2^2 - w_1^2}{c_1^2 - c_2^2 + w_2^2 - w_1^2}$$

Rendimento "total-to-total":

$$\eta_{TT} = \frac{h_{00} - h_{02}}{h_{00} - h_{02SS}}$$

Rendimento "total-to-static":

$$\eta_{TS} = \frac{h_{00} - h_{02}}{h_{00} - h_{2SS}}$$

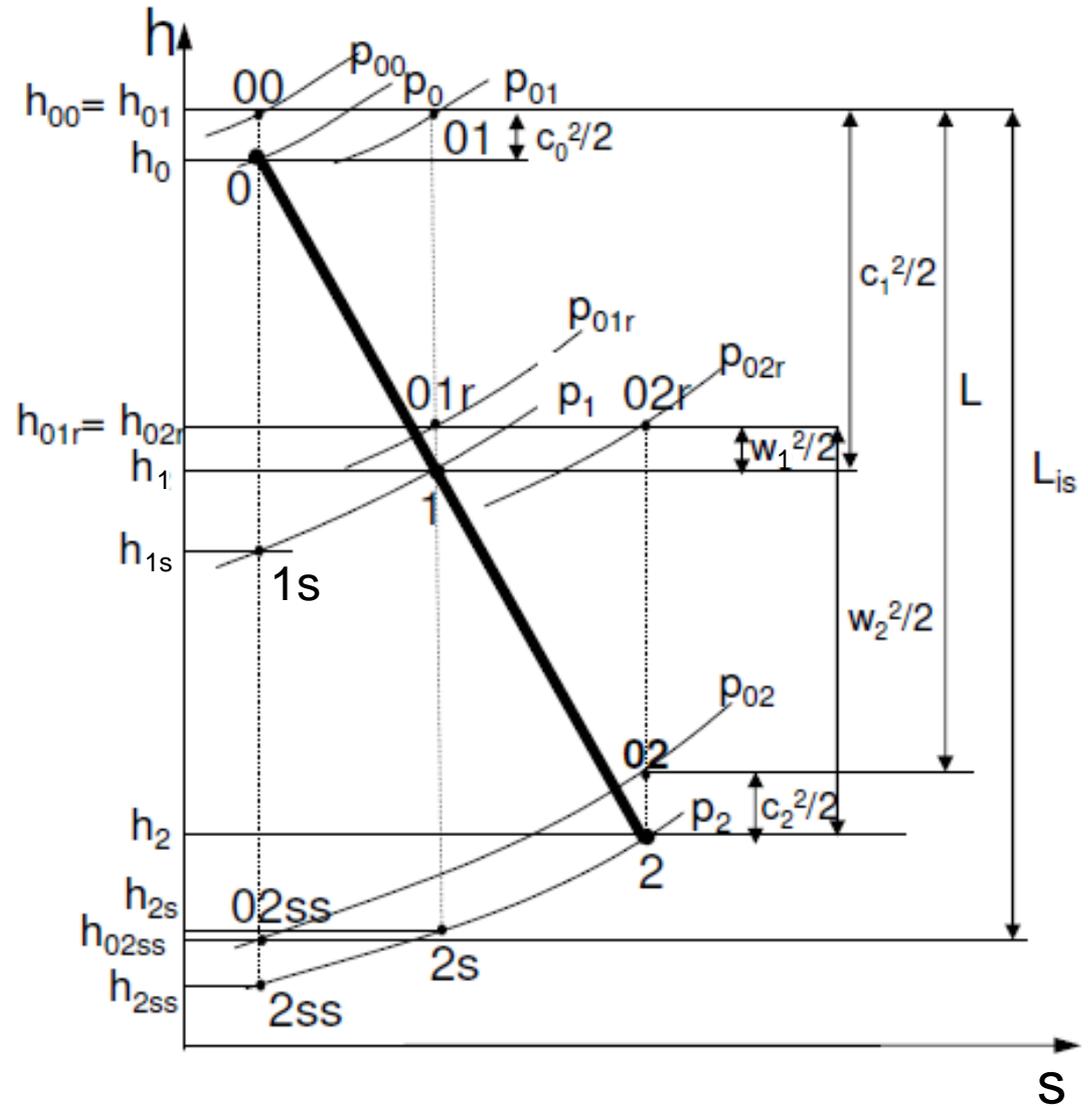
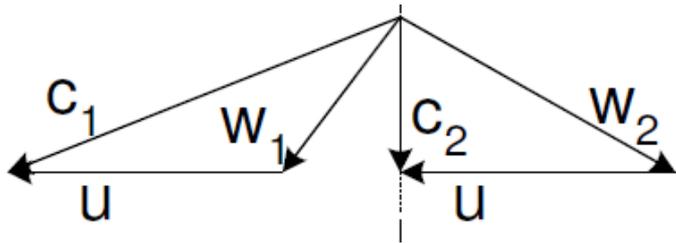


Triangoli di velocità e trasformazione termodinamica nello stadio di turbina assiale

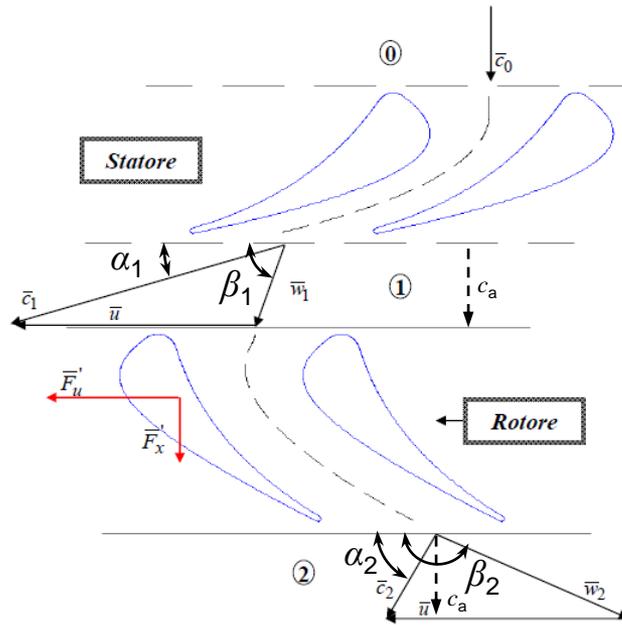
Rendimento "total-to-static":

$$\eta_{TS} = \frac{h_{00} - h_{02}}{h_{00} - h_{2SS}} \cong \frac{h_{00} - h_{02}}{h_{00} - h_{02SS} + \frac{c_2^2}{2}}$$

$$c_2 \downarrow \Rightarrow \eta_{TS} \uparrow$$

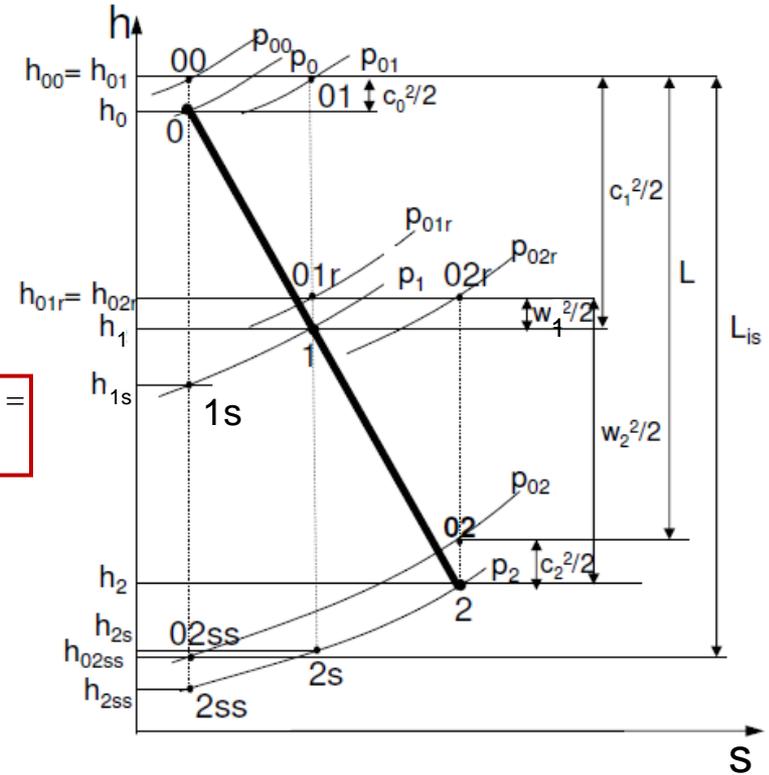


Triangoli di velocità e trasformazione termodinamica nello stadio di turbina assiale

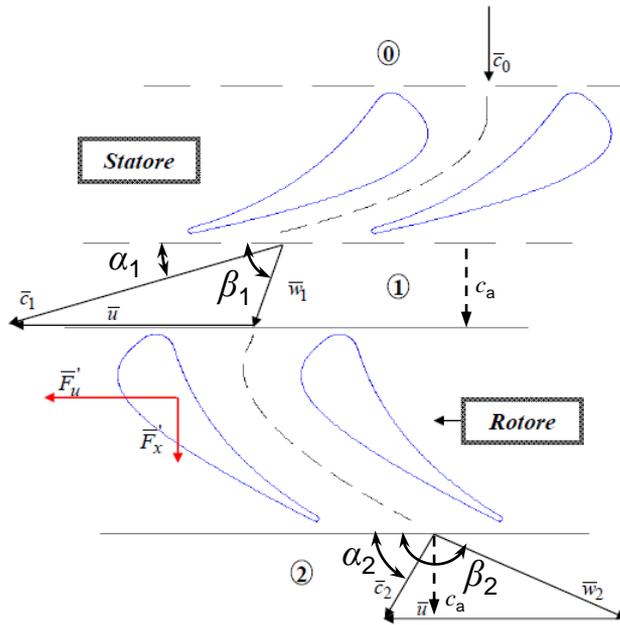


$$c_u = c \cos \alpha = c_a \cotg \alpha = u + w_u = u + w \cos \beta = u + c_a \cotg \beta$$

$$l = u (c_{u1} - c_{u2}) = u (c_1 \cos \alpha_1 - c_2 \cos \alpha_2) = u c_a (\cotg \alpha_1 - \cotg \alpha_2) = u c_a (\cotg \beta_1 - \cotg \beta_2)$$



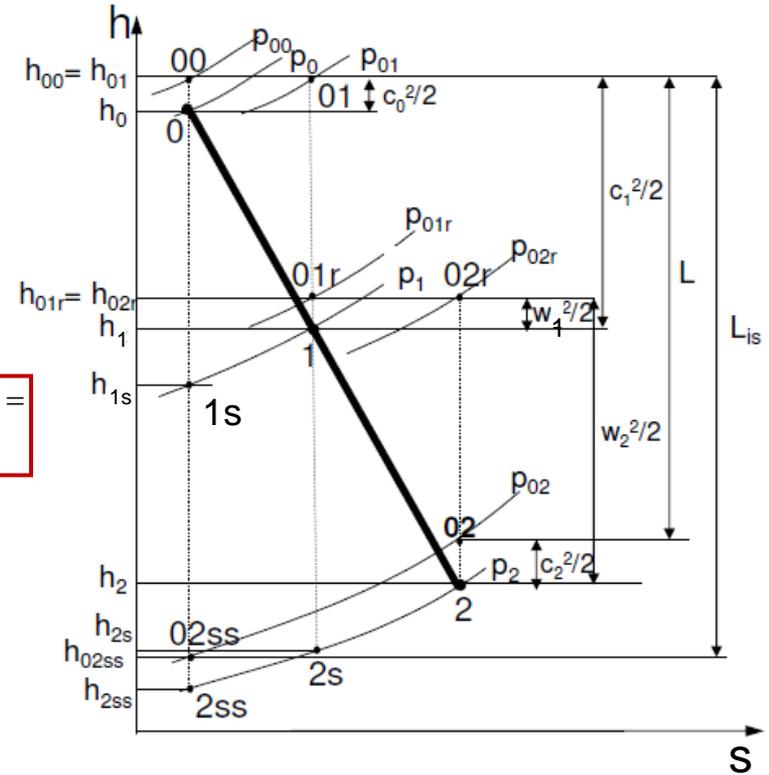
Triangoli di velocità e trasformazione termodinamica nello stadio di turbina assiale



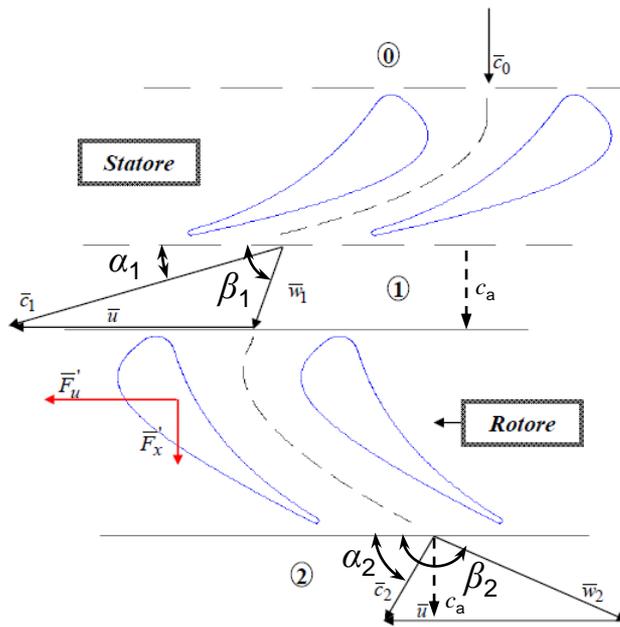
$$c_u = c \cos \alpha = c_a \cotg \alpha = u + w_u = u + w \cos \beta = u + c_a \cotg \beta$$

$$l = u (c_{u1} - c_{u2}) = u (c_1 \cos \alpha_1 - c_2 \cos \alpha_2) = u c_a (\cotg \alpha_1 - \cotg \alpha_2) = u c_a (\cotg \beta_1 - \cotg \beta_2)$$

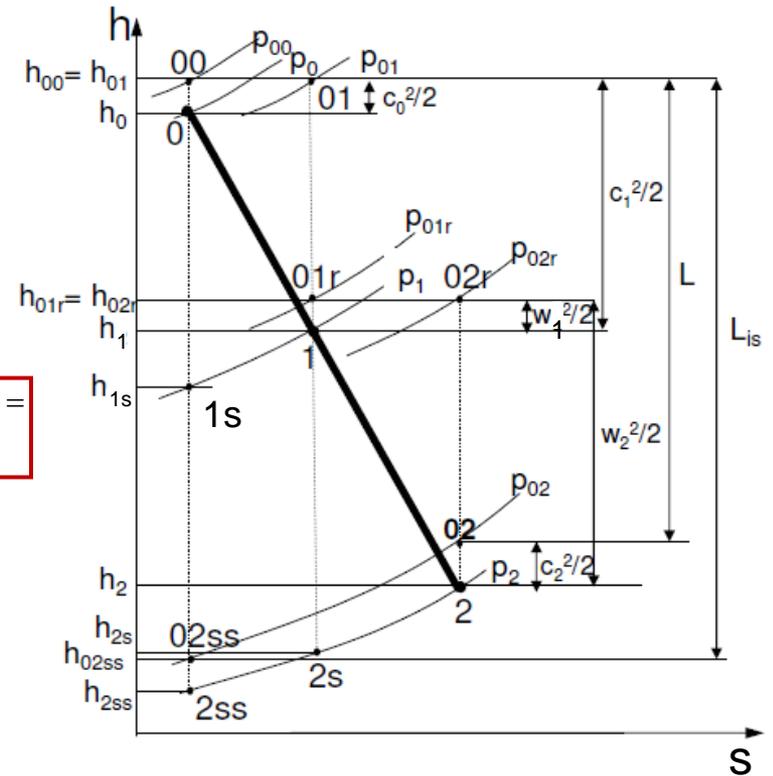
$$\frac{l}{u^2} = \psi = \frac{c_a}{u} (\cotg \beta_1 - \cotg \beta_2) = \phi (\cotg \beta_1 - \cotg \beta_2)$$



Triangoli di velocità e trasformazione termodinamica nello stadio di turbina assiale



$$c_u = c \cos \alpha = c_a \cotg \alpha = u + w_u = u + w \cos \beta = u + c_a \cotg \beta$$

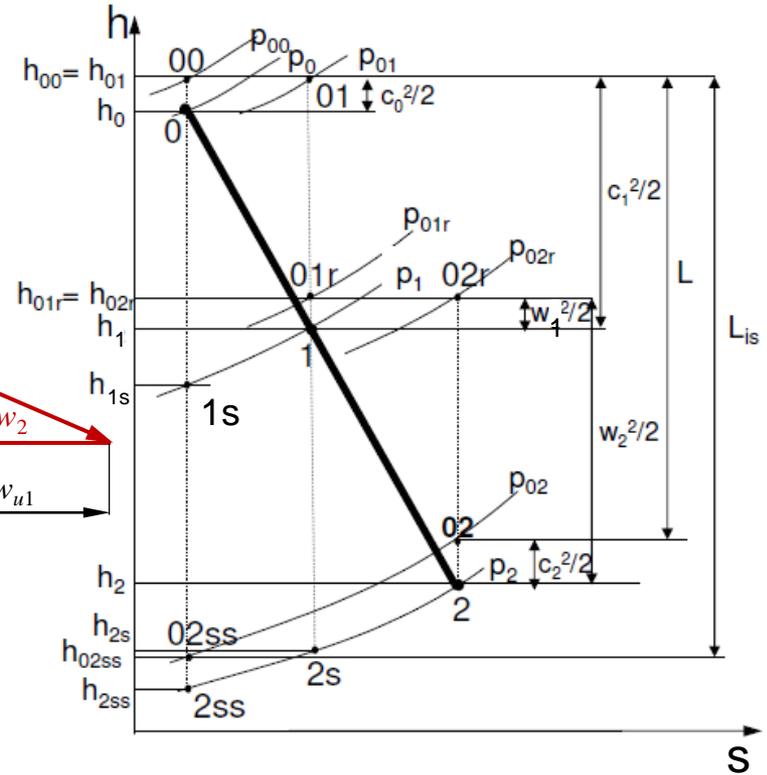
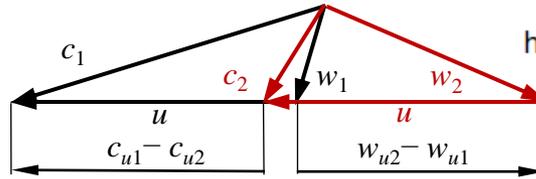
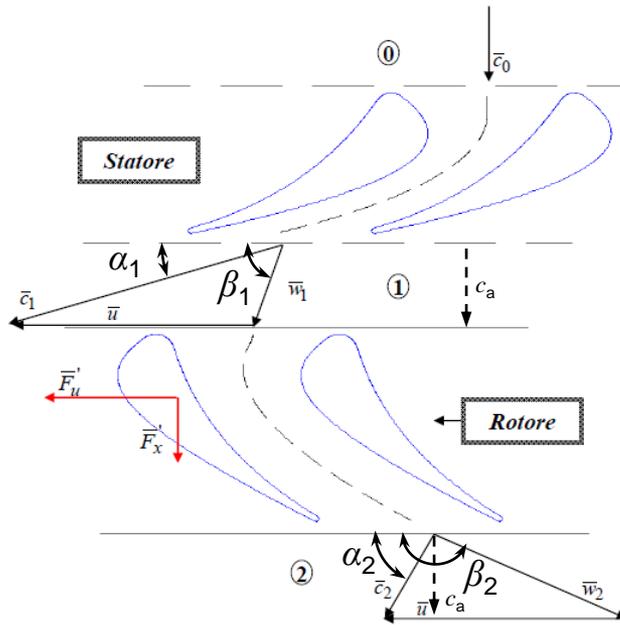


$$l = u (c_{u1} - c_{u2}) = u (c_1 \cos \alpha_1 - c_2 \cos \alpha_2) = u c_a (\cotg \alpha_1 - \cotg \alpha_2) = u c_a (\cotg \beta_1 - \cotg \beta_2)$$

$$\frac{l}{u^2} = \psi = \frac{c_a}{u} (\cotg \beta_1 - \cotg \beta_2) = \phi (\cotg \beta_1 - \cotg \beta_2)$$

$$R = \frac{w_2^2 - w_1^2}{2l} = \frac{w_{u2}^2 + w_{a2}^2 - w_{u1}^2 - w_{a1}^2}{2u(c_{u1} - c_{u2})} = \frac{w_{u2}^2 - w_{u1}^2}{2u(c_{u1} - c_{u2})} = \frac{(w_{u2} - w_{u1})(w_{u1} + w_{u2})}{2u(c_{u1} - c_{u2})} = -\frac{(w_{u1} + w_{u2})}{2u} = -\frac{c_a(\cotg \beta_1 + \cotg \beta_2)}{2u} = -\frac{\phi}{2}(\cotg \beta_1 + \cotg \beta_2)$$

Triangoli di velocità e trasformazione termodinamica nello stadio di turbina assiale



$$l = u(c_{u1} - c_{u2}) = u(c_1 \cos \alpha_1 - c_2 \cos \alpha_2) =$$

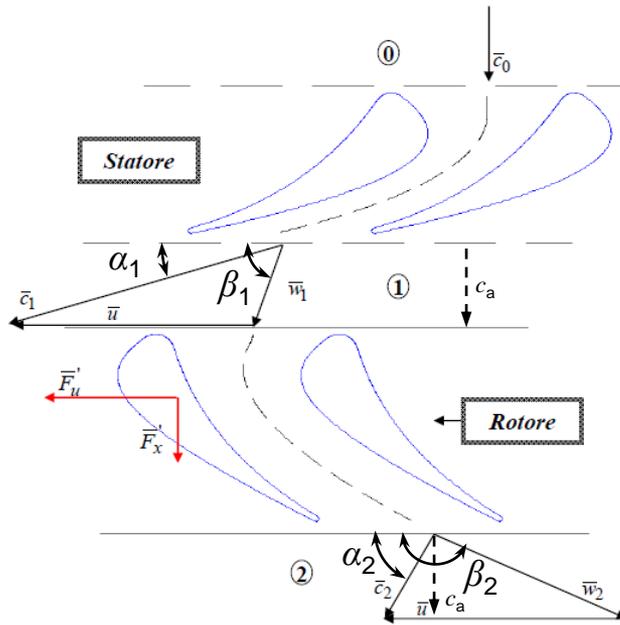
$$= u c_a (\cotg \alpha_1 - \cotg \alpha_2) = u c_a (\cotg \beta_1 - \cotg \beta_2)$$

$$\frac{l}{u^2} = \psi = \frac{c_a}{u} (\cotg \beta_1 - \cotg \beta_2) = \phi (\cotg \beta_1 - \cotg \beta_2)$$

$$R = \frac{w_2^2 - w_1^2}{2l} = \frac{w_{u2}^2 + w_{a2}^2 - w_{u1}^2 - w_{a1}^2}{2u(c_{u1} - c_{u2})} = \frac{w_{u2}^2 - w_{u1}^2}{2u(c_{u1} - c_{u2})} = \frac{(w_{u2} - w_{u1})(w_{u1} + w_{u2})}{2u(c_{u1} - c_{u2})}$$

$$= -\frac{(w_{u1} + w_{u2})}{2u} = -\frac{c_a(\cotg \beta_1 + \cotg \beta_2)}{2u} = -\frac{\phi}{2}(\cotg \beta_1 + \cotg \beta_2)$$

Espressione degli angoli di flusso assoluto e relativo nello stadio di turbina assiale



$$\psi = \phi (\cotg \beta_1 - \cotg \beta_2)$$

$$R = -\frac{\phi}{2} (\cotg \beta_1 + \cotg \beta_2)$$

⇓

$$\cotg \beta_1 = \frac{1}{\phi} \left(\frac{\psi}{2} - R \right)$$

$$\cotg \beta_2 = -\frac{1}{\phi} \left(\frac{\psi}{2} + R \right)$$

$$c_u = c_a \cotg \alpha = u + w_u = u + c_a \cotg \beta \quad \Rightarrow \quad \cotg \alpha = \frac{u}{c_a} + \cotg \beta = \frac{1}{\phi} + \cotg \beta$$

⇓

$$\cotg \alpha_1 = \frac{1}{\phi} \left(1 + \frac{\psi}{2} - R \right)$$

$$\cotg \alpha_2 = \frac{1}{\phi} \left(1 - \frac{\psi}{2} - R \right)$$

$$\begin{aligned}\cotg \alpha_1 &= \frac{1}{\phi} \left(1 + \frac{\psi}{2} - R \right) & \cotg \beta_1 &= \frac{1}{\phi} \left(\frac{\psi}{2} - R \right) \\ \cotg \alpha_2 &= \frac{1}{\phi} \left(1 - \frac{\psi}{2} - R \right) & \cotg \beta_2 &= -\frac{1}{\phi} \left(\frac{\psi}{2} + R \right)\end{aligned}$$

Stadio con $R = 0.5$

$$R = \frac{h_1 - h_2}{h_{00} - h_{02}} = 0.5 \Rightarrow h_1 - h_2 = 0.5 (h_{00} - h_{02})$$

$$\cotg \alpha_1 = \frac{1}{\phi} \left(1 + \frac{\psi}{2} - R \right)$$

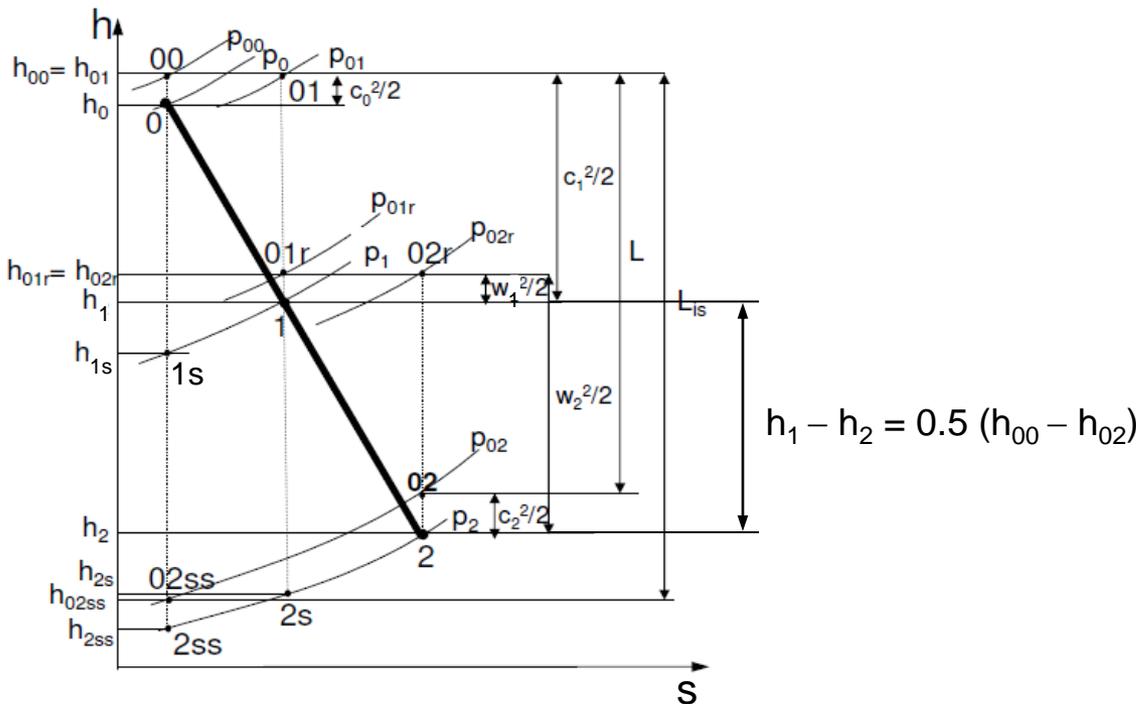
$$\cotg \beta_1 = \frac{1}{\phi} \left(\frac{\psi}{2} - R \right)$$

$$\cotg \alpha_2 = \frac{1}{\phi} \left(1 - \frac{\psi}{2} - R \right)$$

$$\cotg \beta_2 = -\frac{1}{\phi} \left(\frac{\psi}{2} + R \right)$$

Stadio con $R = 0.5$

$$R = \frac{h_1 - h_2}{h_{00} - h_{02}} = 0.5 \Rightarrow h_1 - h_2 = 0.5 (h_{00} - h_{02})$$



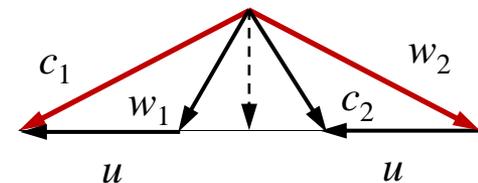
$$\cotg \alpha_1 = \frac{1}{2\phi} (1 + \psi) = -\cotg \beta_2$$

$$\cotg \alpha_2 = \frac{1}{2\phi} (1 - \psi) = -\cotg \beta_1$$

⇓

$$\beta_2 = \pi - \alpha_1$$

$$\alpha_2 = \pi - \beta_1$$



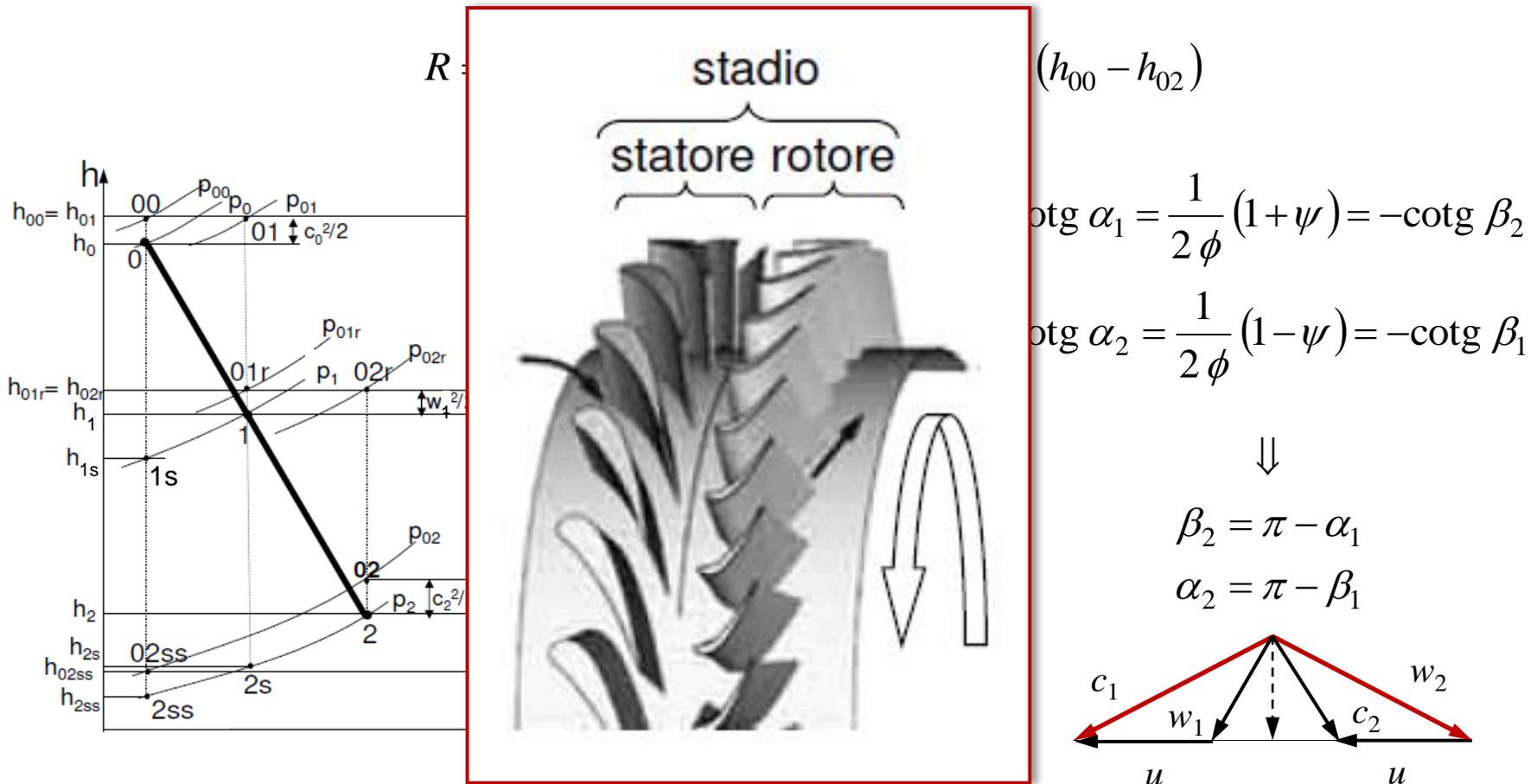
$$\cotg \alpha_1 = \frac{1}{\phi} \left(1 + \frac{\psi}{2} - R \right)$$

$$\cotg \beta_1 = \frac{1}{\phi} \left(\frac{\psi}{2} - R \right)$$

$$\cotg \alpha_2 = \frac{1}{\phi} \left(1 - \frac{\psi}{2} - R \right)$$

$$\cotg \beta_2 = -\frac{1}{\phi} \left(\frac{\psi}{2} + R \right)$$

Stadio con $R = 0.5$



$$\cotg \alpha_1 = \frac{1}{\phi} \left(1 + \frac{\psi}{2} - R \right)$$

$$\cotg \beta_1 = \frac{1}{\phi} \left(\frac{\psi}{2} - R \right)$$

$$\cotg \alpha_2 = \frac{1}{\phi} \left(1 - \frac{\psi}{2} - R \right)$$

$$\cotg \beta_2 = -\frac{1}{\phi} \left(\frac{\psi}{2} + R \right)$$

Stadio con $R = 0$

$$R = \frac{h_1 - h_2}{h_{00} - h_{02}} = \frac{w_2^2 - w_1^2}{2l} = 0 \Rightarrow h_1 = h_2 \quad , \quad w_1 = w_2$$

$$\cotg \alpha_1 = \frac{1}{\phi} \left(1 + \frac{\psi}{2} - R \right)$$

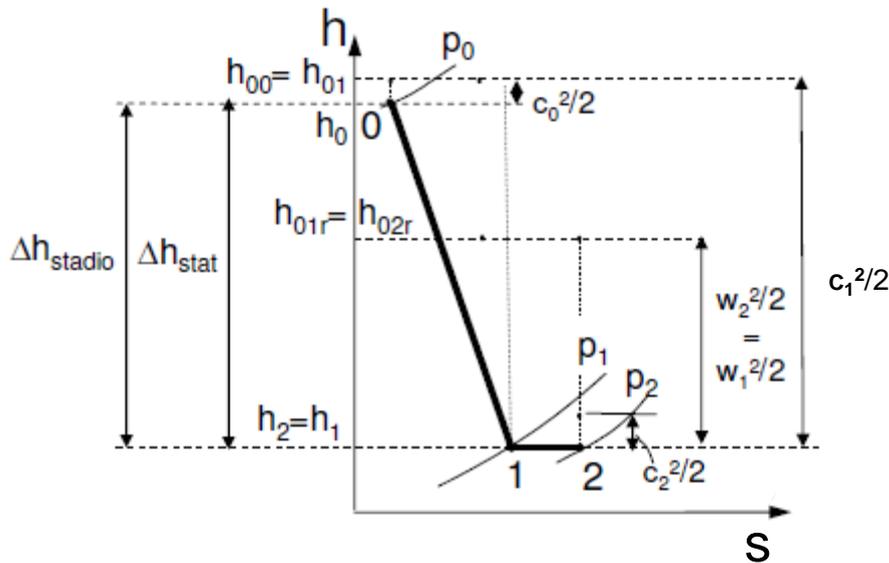
$$\cotg \beta_1 = \frac{1}{\phi} \left(\frac{\psi}{2} - R \right)$$

$$\cotg \alpha_2 = \frac{1}{\phi} \left(1 - \frac{\psi}{2} - R \right)$$

$$\cotg \beta_2 = -\frac{1}{\phi} \left(\frac{\psi}{2} + R \right)$$

Stadio con $R = 0$

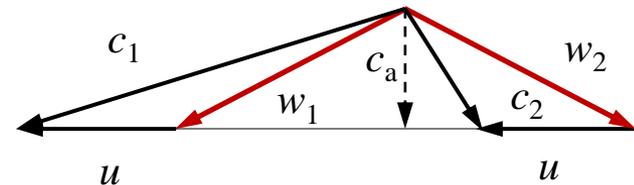
$$R = \frac{h_1 - h_2}{h_{00} - h_{02}} = \frac{w_2^2 - w_1^2}{2l} = 0 \Rightarrow h_1 = h_2, \quad w_1 = w_2$$



$$\cotg \beta_1 = \frac{\psi}{2\phi} = -\cotg \beta_2$$

\Downarrow

$$\beta_2 = \pi - \beta_1$$



$$\cotg \alpha_1 = \frac{1}{\phi} \left(1 + \frac{\psi}{2} - R \right)$$

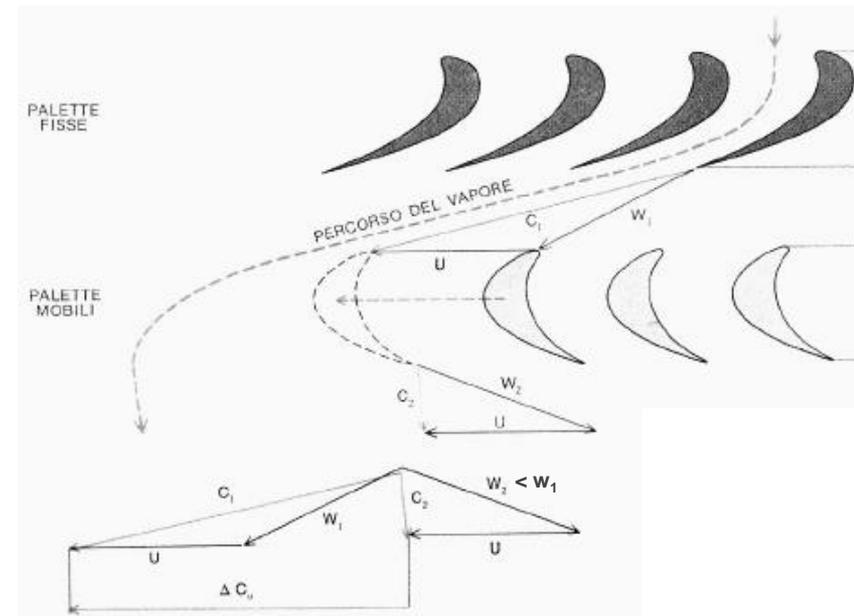
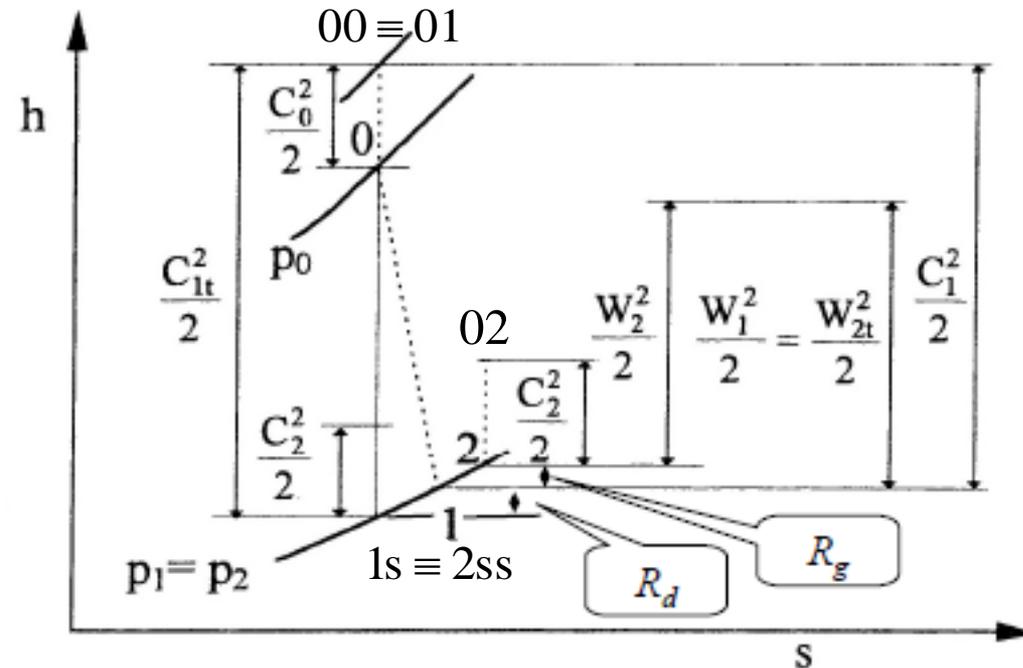
$$\cotg \beta_1 = \frac{1}{\phi} \left(\frac{\psi}{2} - R \right)$$

$$\cotg \alpha_2 = \frac{1}{\phi} \left(1 - \frac{\psi}{2} - R \right)$$

$$\cotg \beta_2 = -\frac{1}{\phi} \left(\frac{\psi}{2} + R \right)$$

Stadio ad azione (impulse stage, $p_1 = p_2$)

$$R = \frac{h_1 - h_2}{h_{00} - h_{02}} = \frac{w_2^2 - w_1^2}{2l} < 0$$



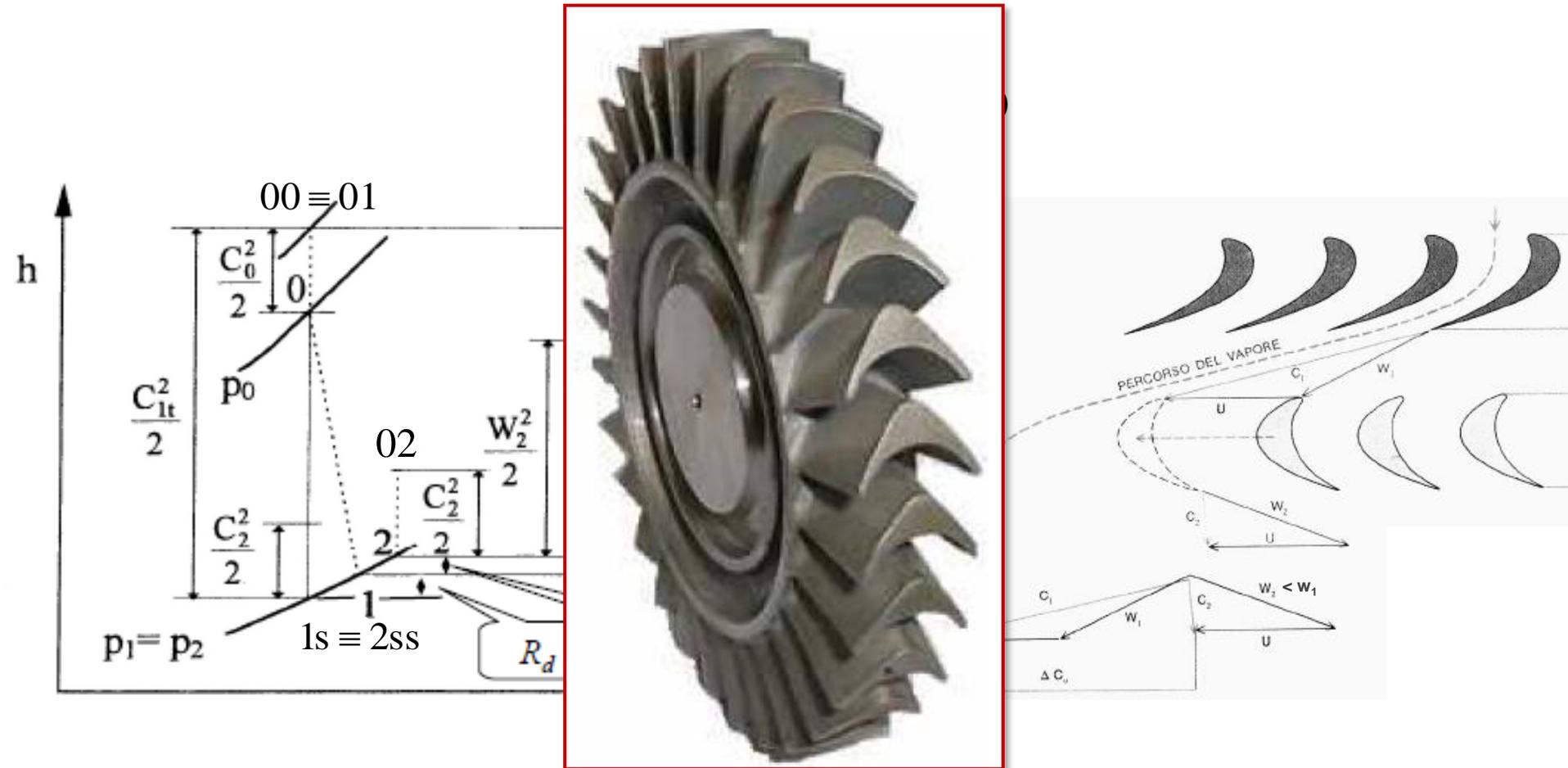
$$\cotg \alpha_1 = \frac{1}{\phi} \left(1 + \frac{\psi}{2} - R \right)$$

$$\cotg \beta_1 = \frac{1}{\phi} \left(\frac{\psi}{2} - R \right)$$

$$\cotg \alpha_2 = \frac{1}{\phi} \left(1 - \frac{\psi}{2} - R \right)$$

$$\cotg \beta_2 = -\frac{1}{\phi} \left(\frac{\psi}{2} + R \right)$$

Stadio ad azione (impulse stage, $p_1 = p_2$)



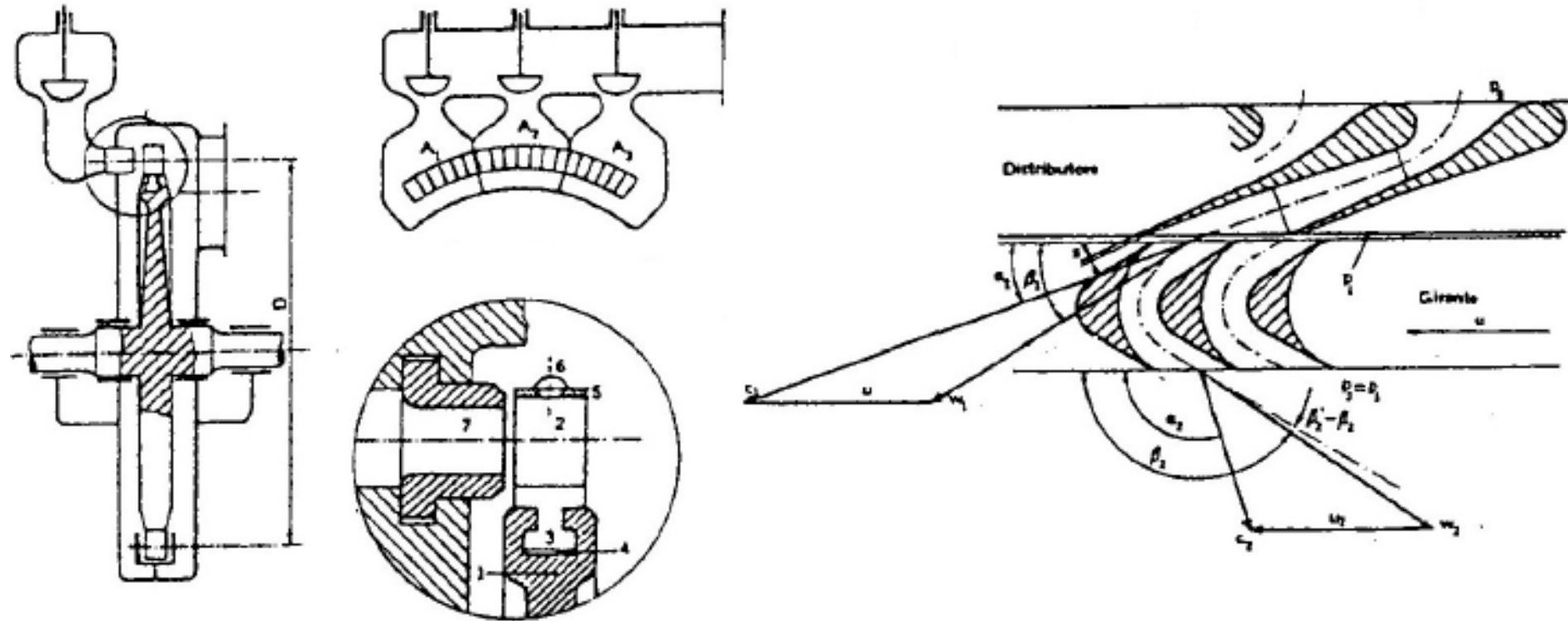
$$\cotg \alpha_1 = \frac{1}{\phi} \left(1 + \frac{\psi}{2} - R \right)$$

$$\cotg \beta_1 = \frac{1}{\phi} \left(\frac{\psi}{2} - R \right)$$

$$\cotg \alpha_2 = \frac{1}{\phi} \left(1 - \frac{\psi}{2} - R \right)$$

$$\cotg \beta_2 = -\frac{1}{\phi} \left(\frac{\psi}{2} + R \right)$$

Stadio ad azione (impulse stage, $p_1 = p_2$)



$$\cotg \alpha_1 = \frac{1}{\phi} \left(1 + \frac{\psi}{2} - R \right)$$

$$\cotg \beta_1 = \frac{1}{\phi} \left(\frac{\psi}{2} - R \right)$$

$$\cotg \alpha_2 = \frac{1}{\phi} \left(1 - \frac{\psi}{2} - R \right)$$

$$\cotg \beta_2 = -\frac{1}{\phi} \left(\frac{\psi}{2} + R \right)$$

Stadio con velocità assoluta allo scarico assiale ($\alpha_2 = 90^\circ$)

$$\cotg \alpha_2 = \frac{1}{\phi} \left(1 - \frac{\psi}{2} - R \right) = 0 \quad \Rightarrow \quad \begin{cases} R = 1 - \frac{\psi}{2} \\ \psi = 2(1 - R) \end{cases}$$

$$\cotg \alpha_1 = \frac{1}{\phi} \left(1 + \frac{\psi}{2} - R \right)$$

$$\cotg \beta_1 = \frac{1}{\phi} \left(\frac{\psi}{2} - R \right)$$

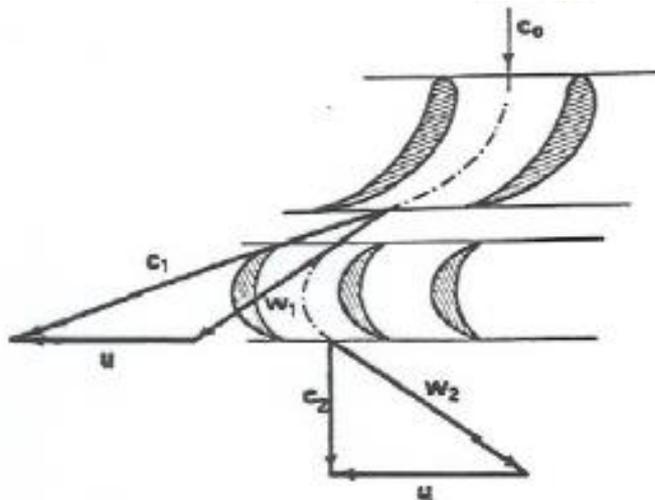
$$\cotg \alpha_2 = \frac{1}{\phi} \left(1 - \frac{\psi}{2} - R \right)$$

$$\cotg \beta_2 = -\frac{1}{\phi} \left(\frac{\psi}{2} + R \right)$$

Stadio con velocità assoluta allo scarico assiale ($\alpha_2 = 90^\circ$)

$$\cotg \alpha_2 = \frac{1}{\phi} \left(1 - \frac{\psi}{2} - R \right) = 0 \quad \Rightarrow \quad \begin{cases} R = 1 - \frac{\psi}{2} \\ \psi = 2(1 - R) \end{cases}$$

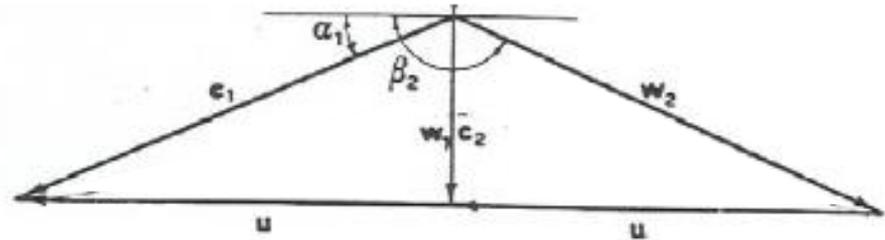
$$R = 0.0 \Rightarrow \psi = 2$$



$$R = 0.5$$

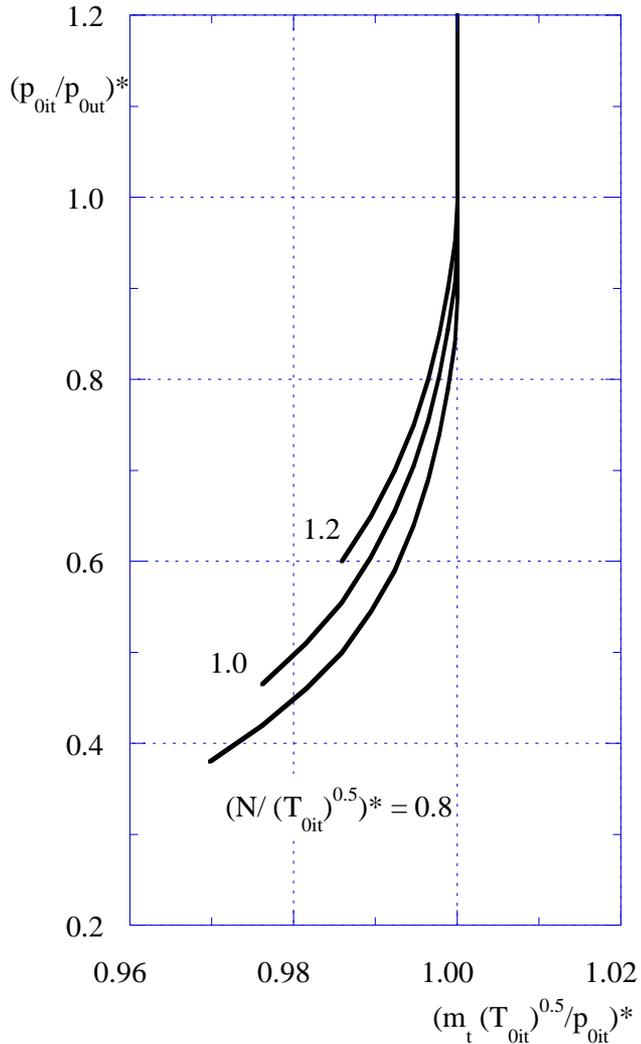


$$\psi = 1$$

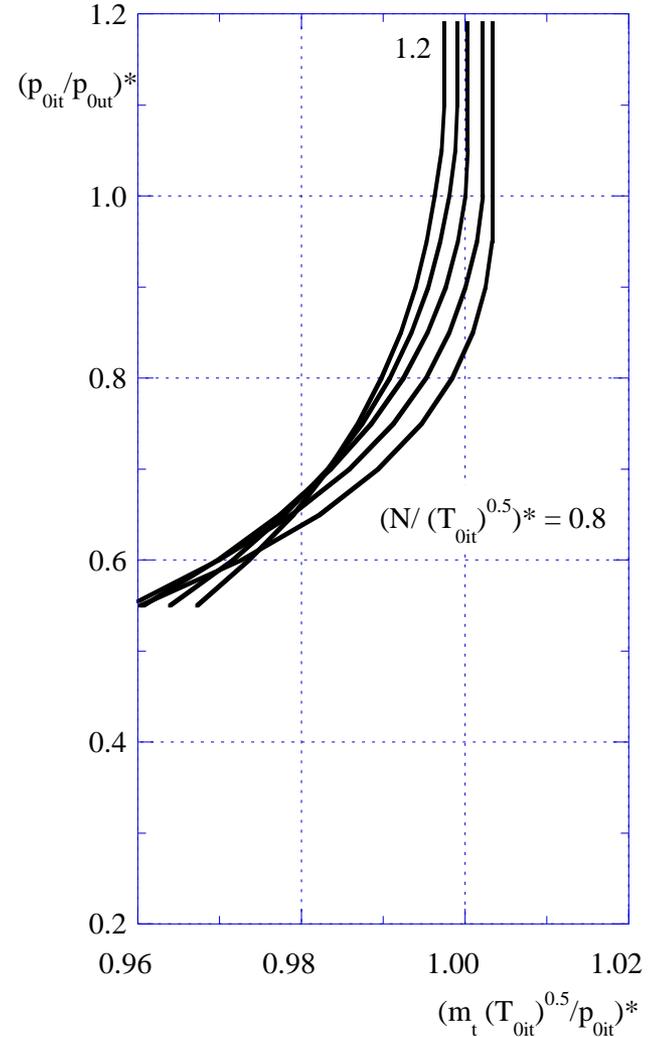


Funzionamento della turbina al di fuori dalle condizioni di progetto

I statore in blocco per primo

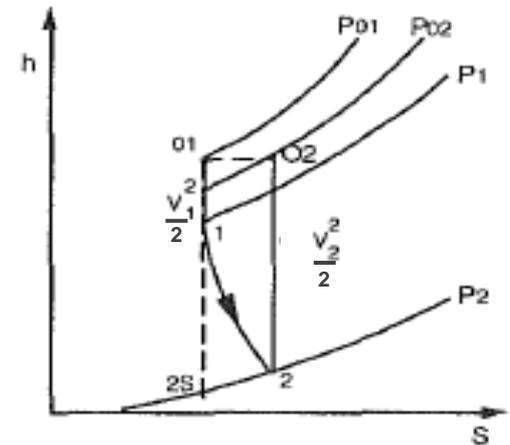
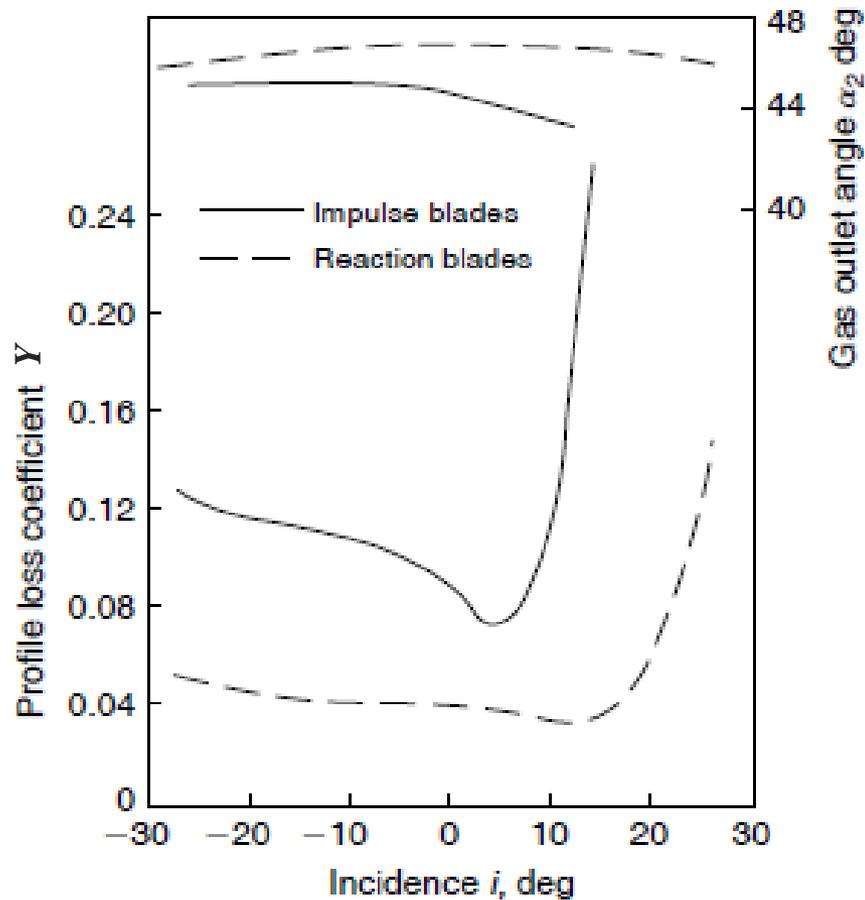


Rotore (o statore successivo) in blocco per primo



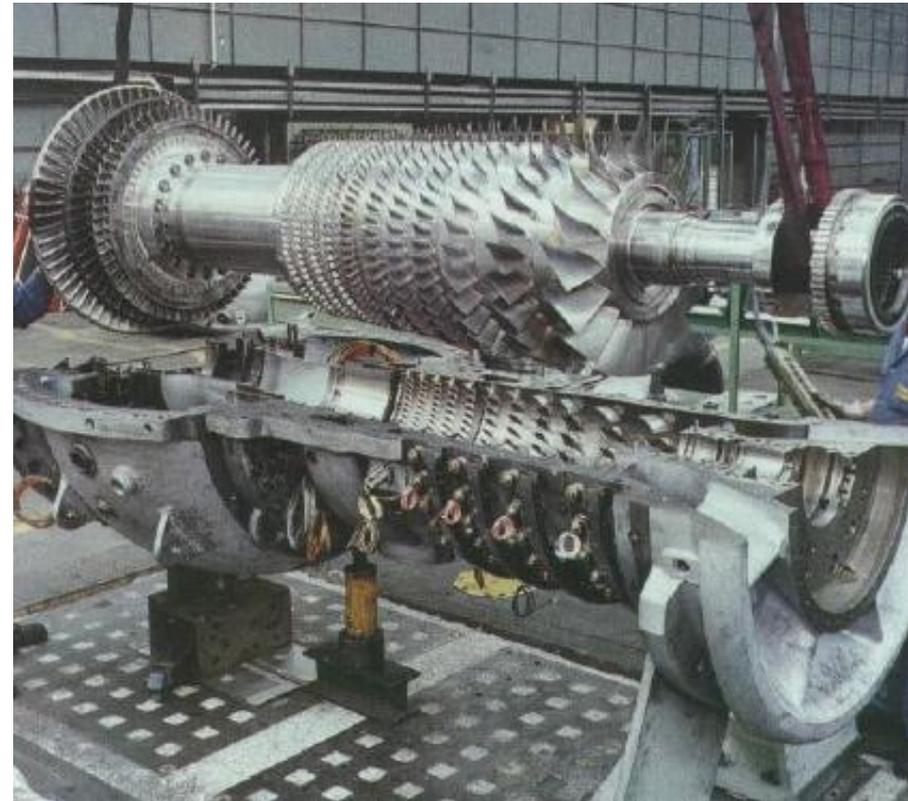
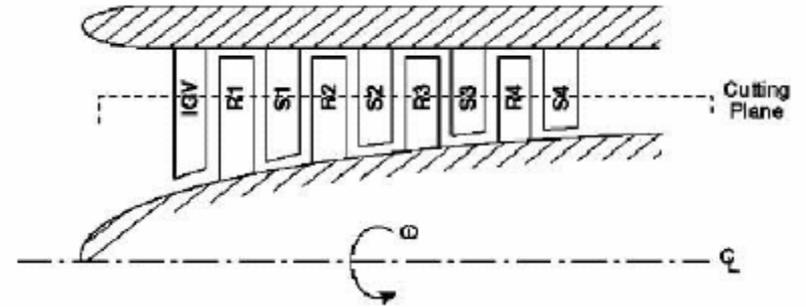
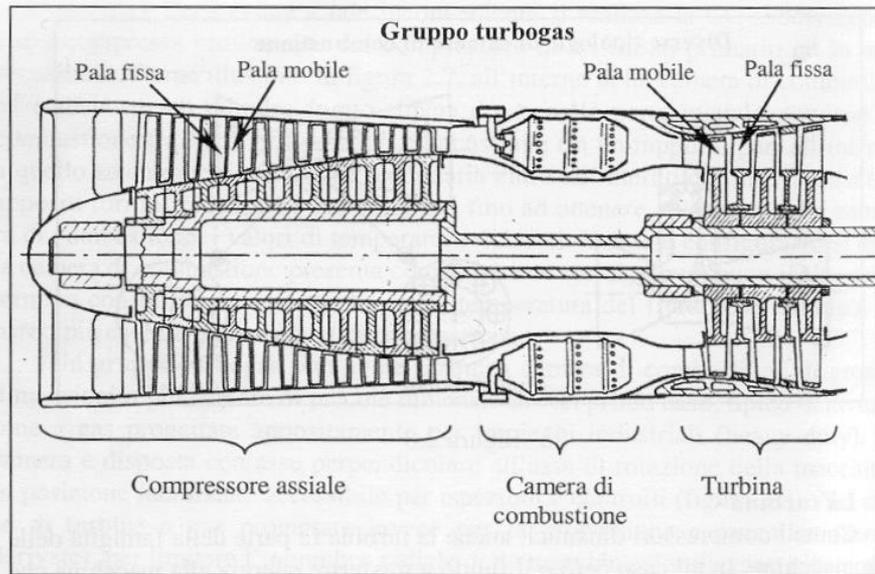
Funzionamento della turbina al di fuori dalle condizioni di progetto

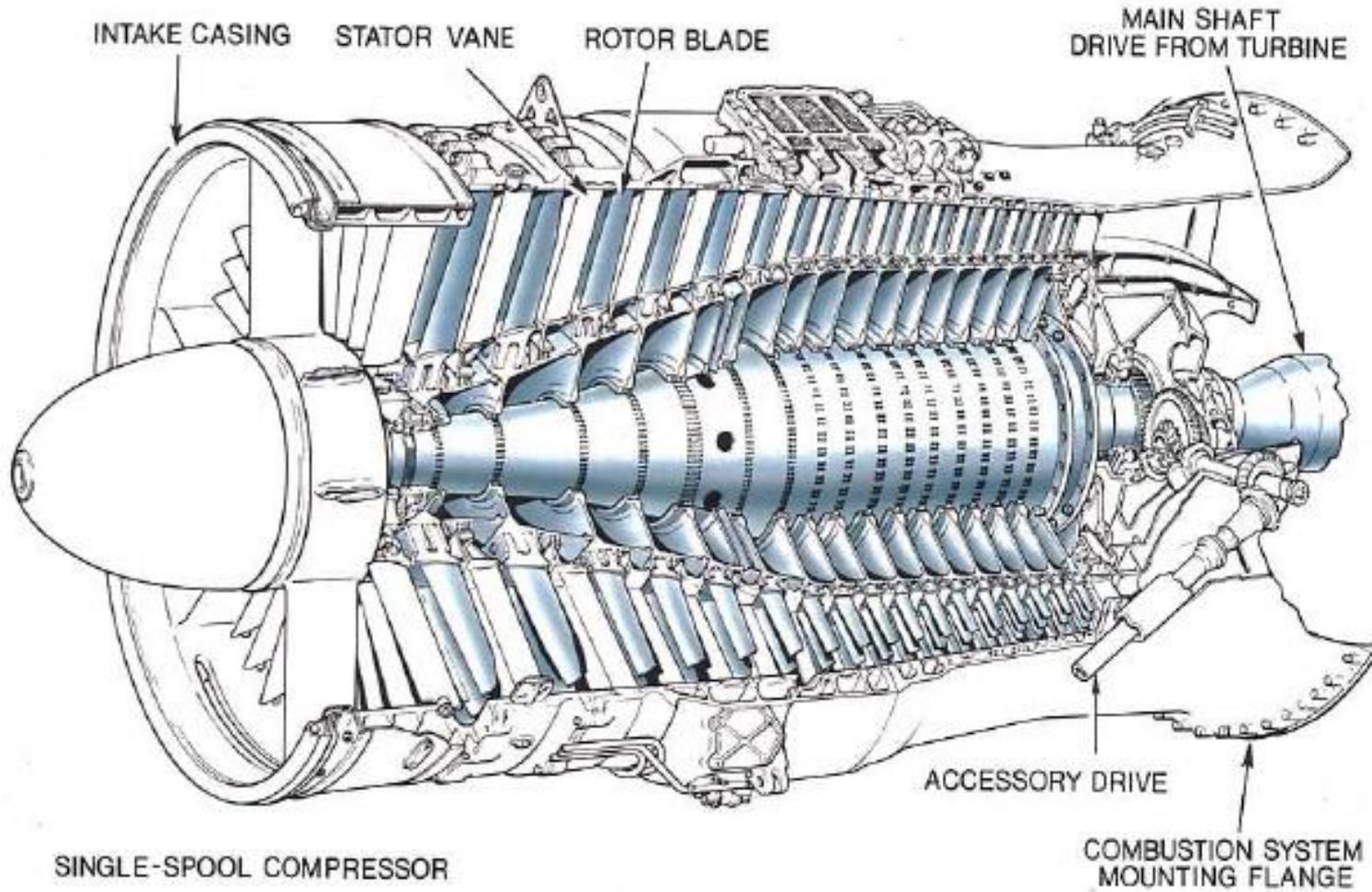
Andamento delle perdite di profilo al variare dell'angolo di incidenza



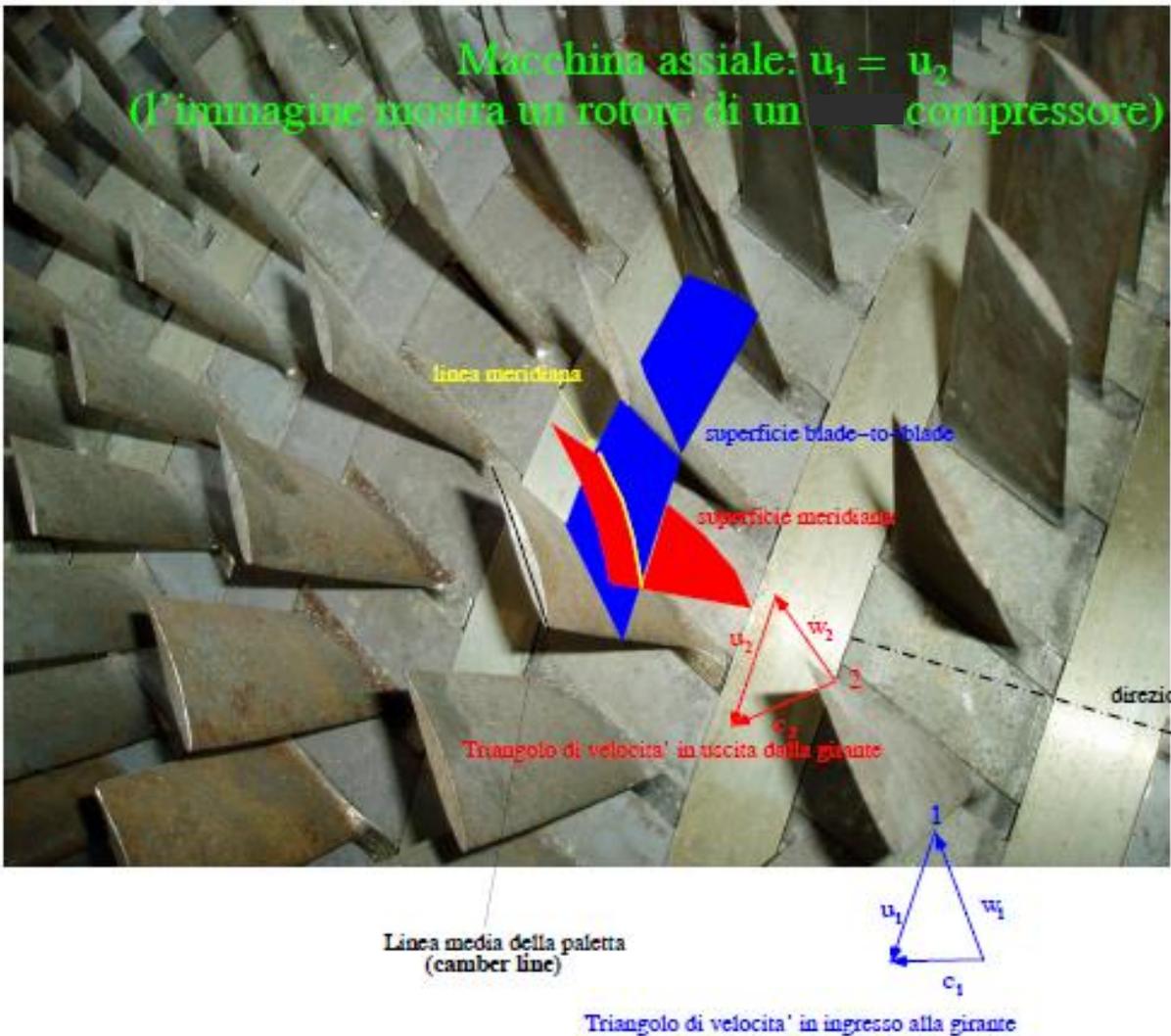
$$Y = \frac{P_{01} - P_{02}}{P_{02} - P_2}$$

Compressore assiale



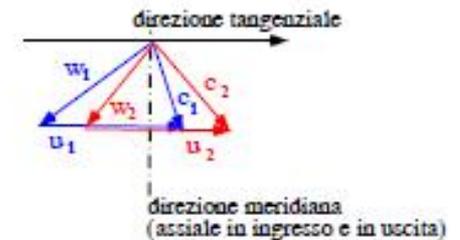
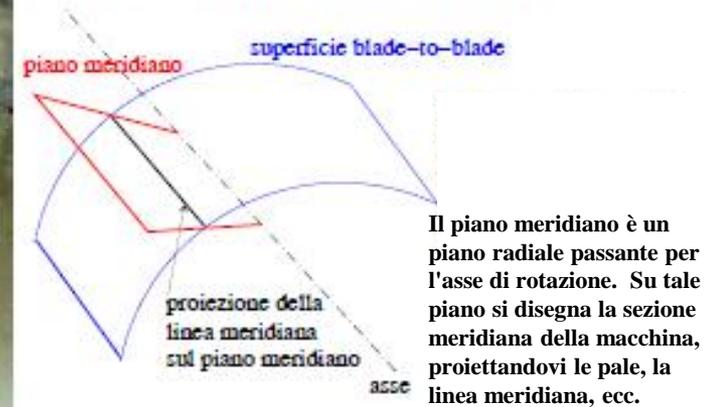


Triangoli di velocità all'ingresso e all'uscita del rotore di un compressore assiale



Flusso unidimensionale

La superficie blade-to-blade è assialsimmetrica; per una macchina assiale è una superficie cilindrica

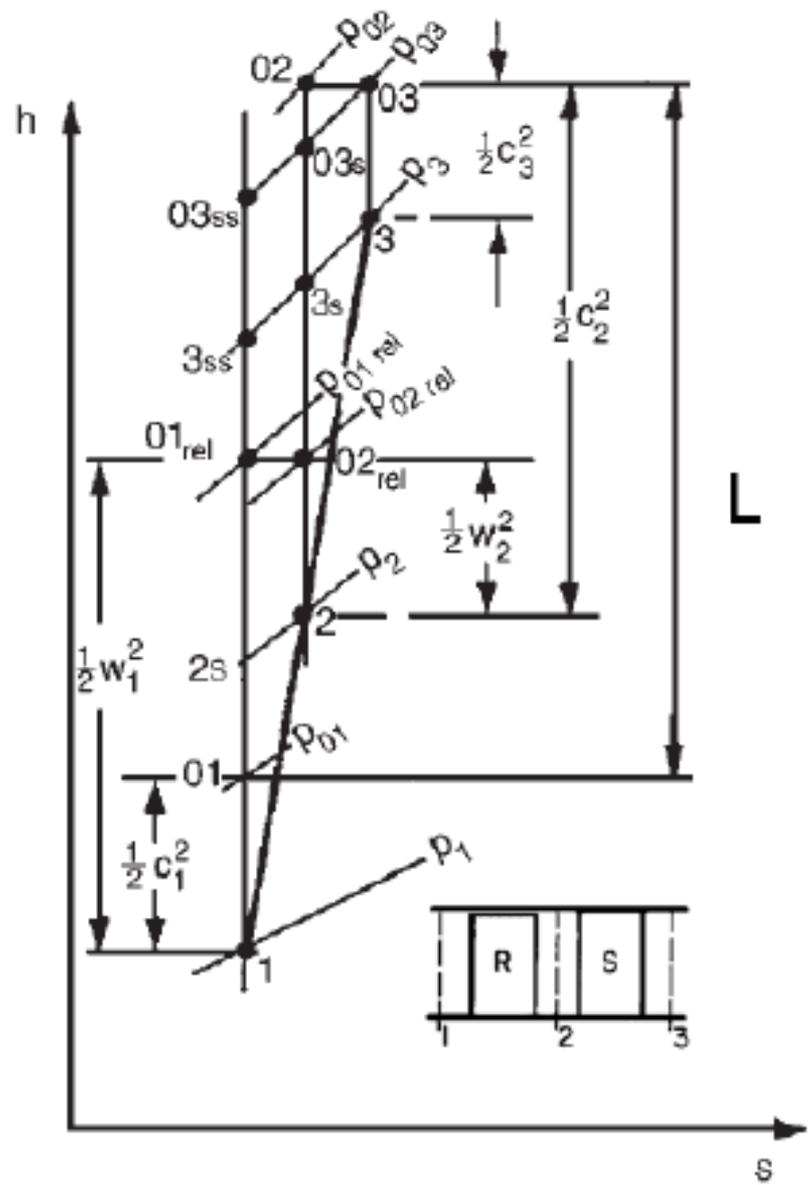
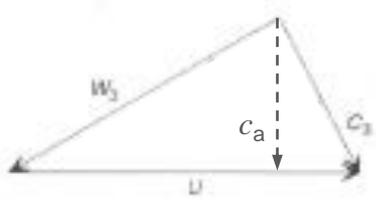
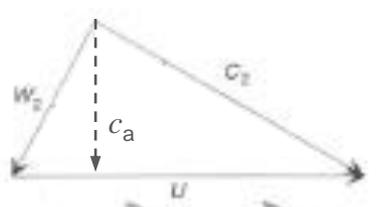
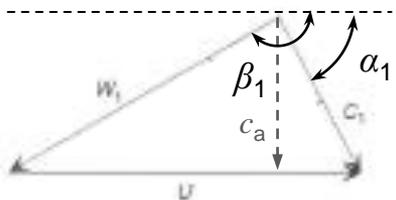


Ciascun triangolo di velocità giace su un piano tangente alla superficie assialsimmetrica blade-to-blade nel punto di ingresso (1) e nel punto di uscita (2).

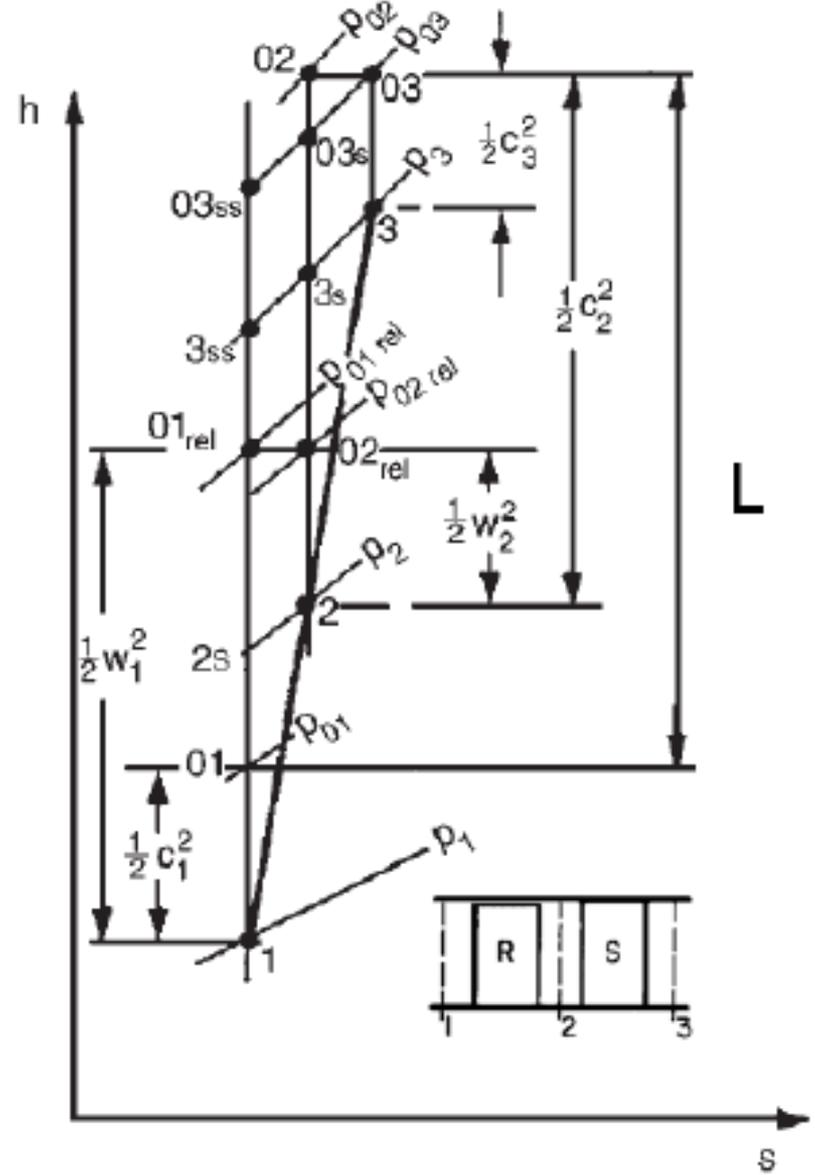
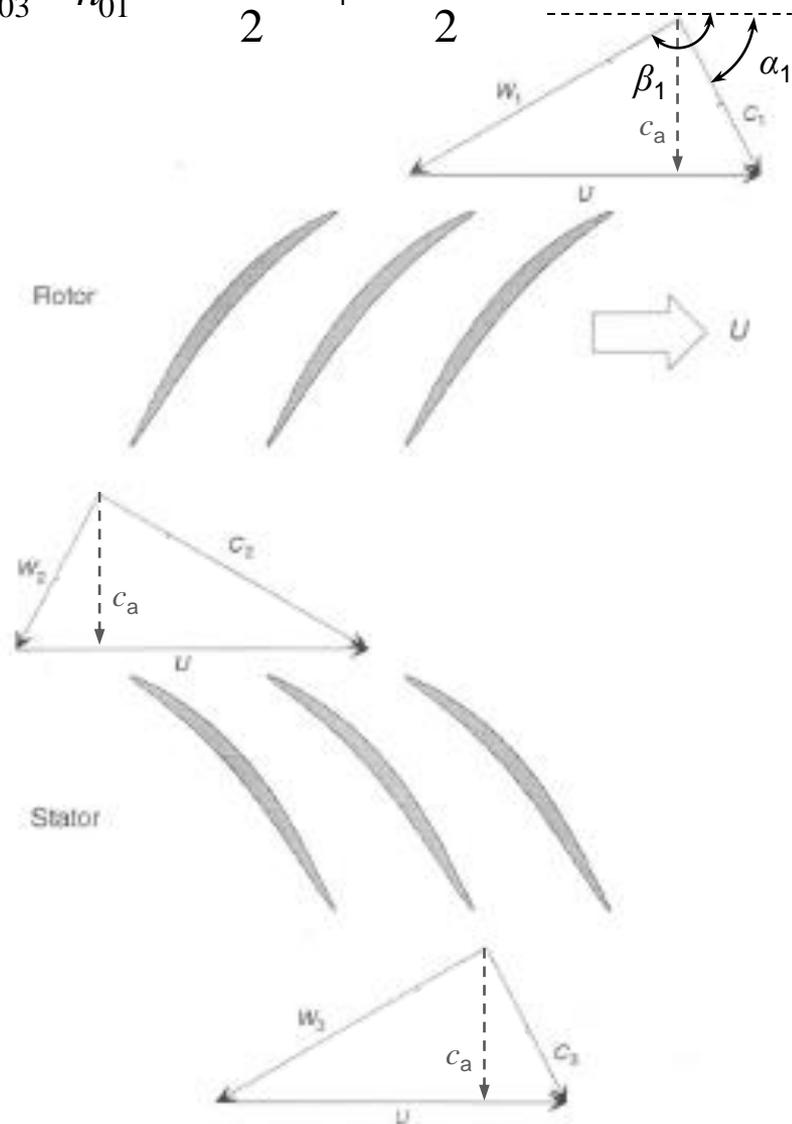
Le velocità relative sono tangenti rispettivamente in ingresso e in uscita alla paletta.

$$c_u = c \cos \alpha = c_a \cotg \alpha = u + w_u =$$

$$= u + w \cos \beta = u + c_a \cotg \beta$$

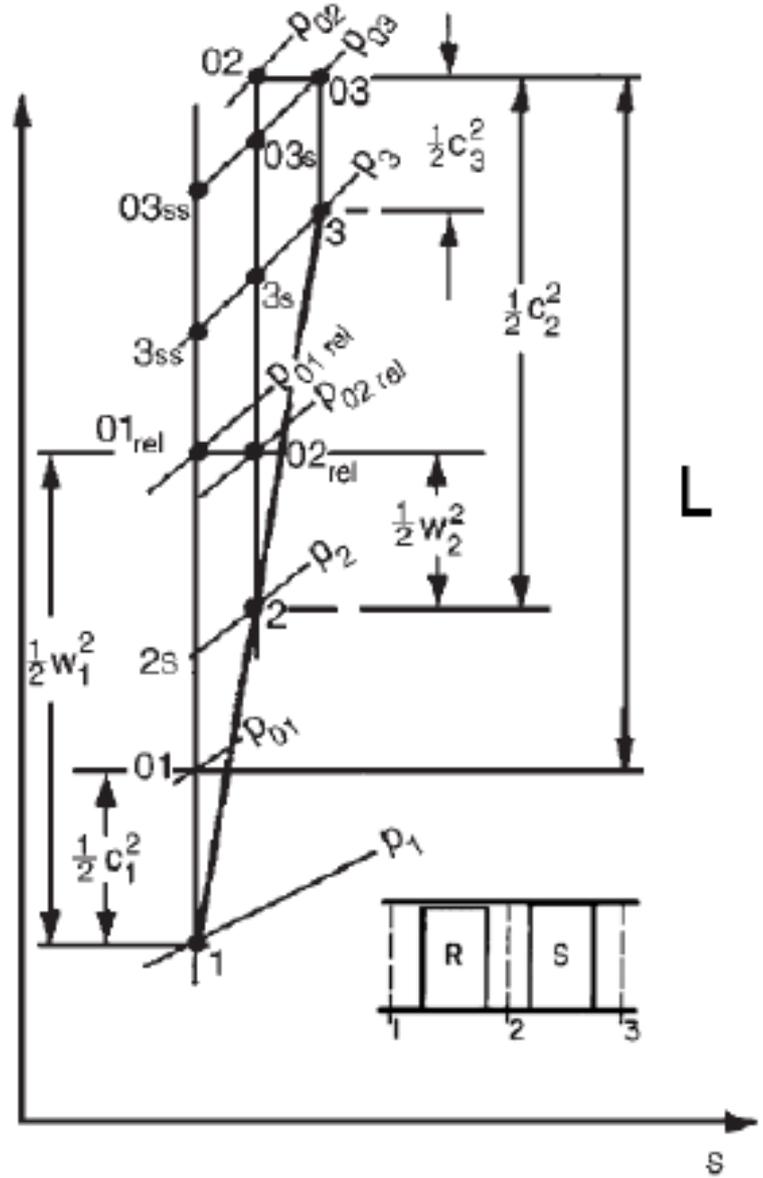
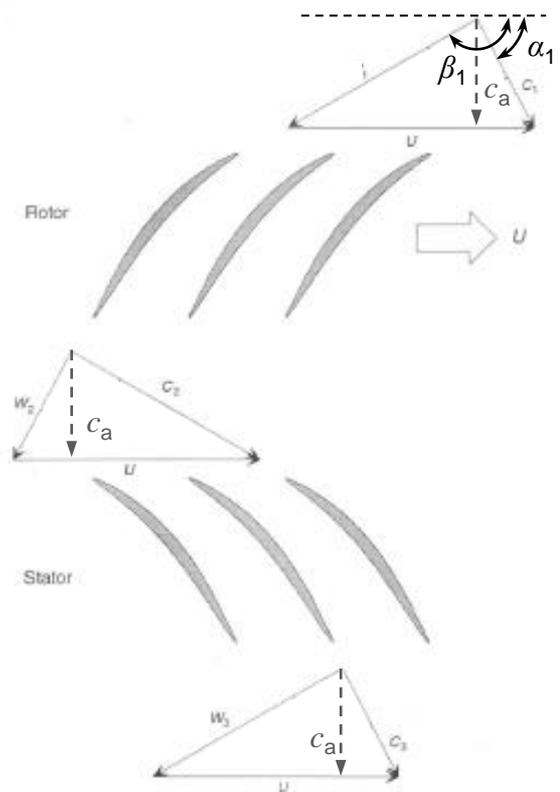


$$l = h_{03} - h_{01} = \frac{c_2^2 - c_1^2}{2} + \frac{w_1^2 - w_2^2}{2}$$



$$l = h_{03} - h_{01} = \frac{c_2^2 - c_1^2}{2} + \frac{w_1^2 - w_2^2}{2} = u(c_{u2} - c_{u1}) =$$

$$= u c_a (\cotg \alpha_2 - \cotg \alpha_1) = u c_a (\cotg \beta_2 - \cotg \beta_1) h$$



$$l = h_{03} - h_{01} = \frac{c_2^2 - c_1^2}{2} + \frac{w_1^2 - w_2^2}{2} = u (c_{u2} - c_{u1}) =$$

$$= u c_a (\cotg \alpha_2 - \cotg \alpha_1) = u c_a (\cotg \beta_2 - \cotg \beta_1) \quad h$$

Coefficiente di flusso: $\phi = \frac{c_a}{u}$

Coefficiente di carico:

$$\psi = \frac{l}{u^2} = \frac{h_{03} - h_{01}}{u^2} = \frac{c_a}{u} (\cotg \alpha_2 - \cotg \alpha_1) =$$

$$= \phi (\cotg \beta_2 - \cotg \beta_1)$$

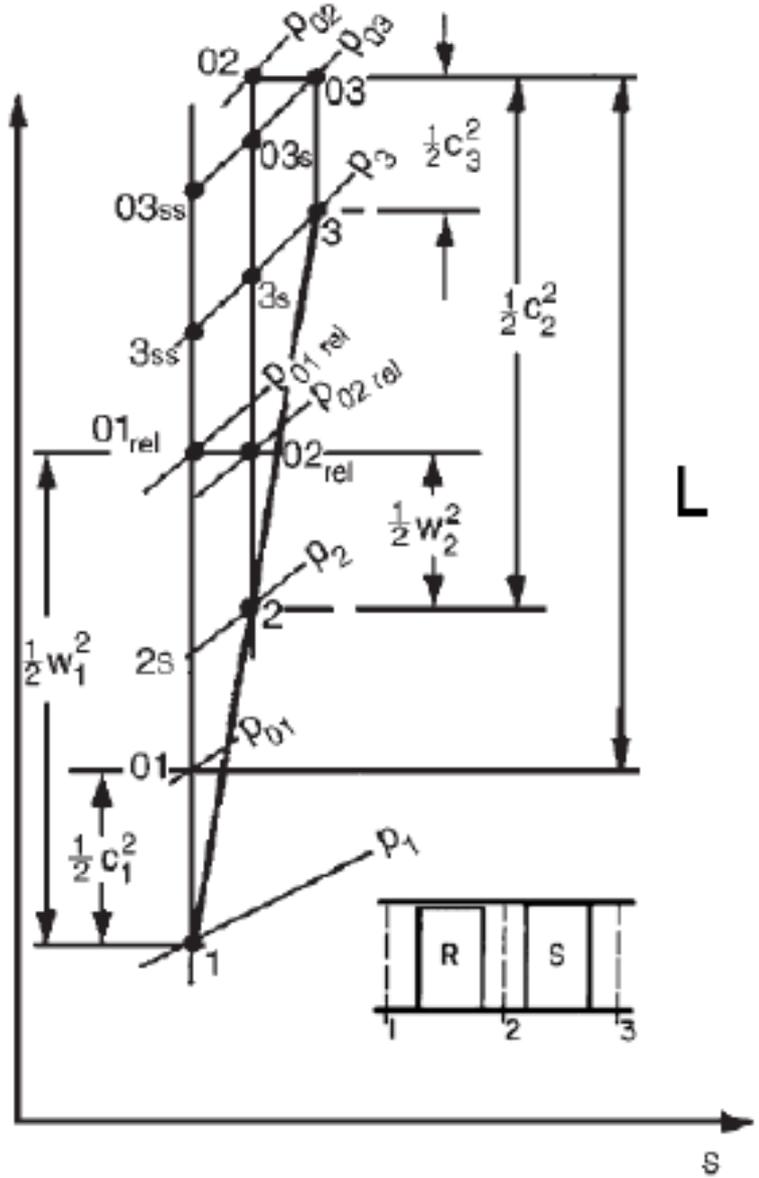
Grado di Reazione:

$$R = \frac{h_2 - h_1}{h_{03} - h_{01}} = \frac{w_1^2 - w_2^2}{2l} = \frac{w_{u1}^2 + w_{a1}^2 - w_{u2}^2 - w_{a2}^2}{2u(c_{u2} - c_{u1})} =$$

$$= \frac{w_{u1}^2 - w_{u2}^2}{2u(c_{u2} - c_{u1})} = \frac{(w_{u1} - w_{u2})(w_{u1} + w_{u2})}{2u(c_{u2} - c_{u1})} =$$

$$= -\frac{(w_{u1} + w_{u2})}{2u} = -\frac{c_a(\cotg \beta_1 + \cotg \beta_2)}{2u} =$$

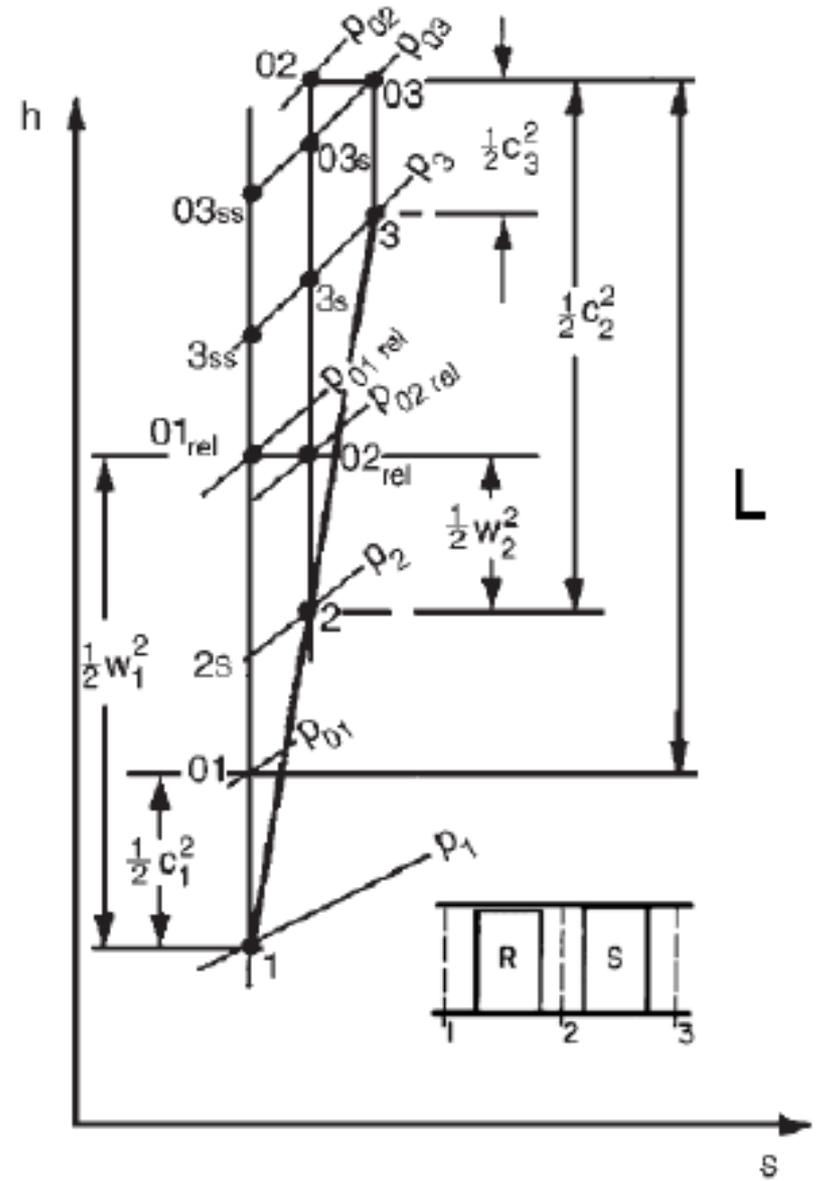
$$= -\frac{\phi}{2}(\cotg \beta_1 + \cotg \beta_2)$$



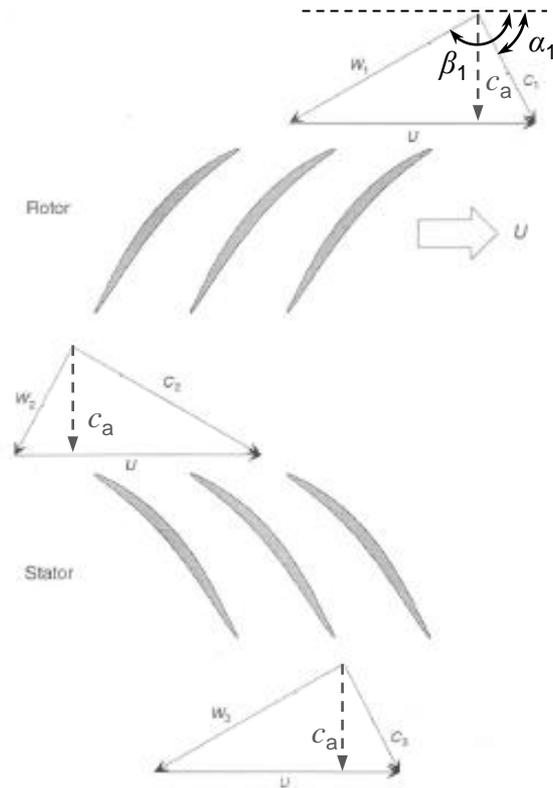
Rendimento "total-to-total": $\eta_{TT} = \frac{h_{03ss} - h_{01}}{h_{03} - h_{01}}$

Coefficiente di incremento di pressione:

$$\psi_p = \frac{h_{03ss} - h_{01}}{u^2} = \eta_{TT} \psi$$



Espressione degli angoli di flusso assoluto e relativo nello stadio di compressore assiale



$$\psi = \phi (\cotg \beta_2 - \cotg \beta_1)$$

$$R = -\frac{\phi}{2} (\cotg \beta_1 + \cotg \beta_2)$$

⇓

$$\cotg \beta_1 = -\frac{1}{\phi} \left(R + \frac{\psi}{2} \right)$$

$$\cotg \beta_2 = -\frac{1}{\phi} \left(R - \frac{\psi}{2} \right)$$

$$c_u = c_a \cotg \alpha = u + w_u = u + c_a \cotg \beta$$

⇓

$$\cotg \alpha = \frac{u}{c_a} + \cotg \beta = \frac{1}{\phi} + \cotg \beta \quad \Rightarrow$$

$$\cotg \alpha_1 = \frac{1}{\phi} \left(1 - R - \frac{\psi}{2} \right)$$

$$\cotg \alpha_2 = \frac{1}{\phi} \left(1 - R + \frac{\psi}{2} \right)$$

Incremento di temperatura e pressione totale nello stadio di compressore

$$l = c_p (T_{03} - T_{01}) = \psi u^2 \quad \Rightarrow \quad \frac{l}{c_p T_{01}} = \frac{\psi u^2}{c_p T_{01}} = \left(\frac{T_{03}}{T_{01}} - 1 \right)$$

$$\frac{T_{03}}{T_{01}} - 1 = (\gamma - 1) \psi \frac{u^2}{\gamma R T_{01}}$$

$$M_u^2$$

Incremento di temperatura e pressione totale nello stadio di compressore

$$l = c_p (T_{03} - T_{01}) = \psi u^2 \quad \Rightarrow \quad \frac{l}{c_p T_{01}} = \frac{\psi u^2}{c_p T_{01}} = \left(\frac{T_{03}}{T_{01}} - 1 \right)$$

$$\frac{T_{03}}{T_{01}} - 1 = (\gamma - 1) \psi \frac{u^2}{\gamma R T_{01}} \quad \Rightarrow \quad \frac{T_{03}}{T_{01}} - 1 = \psi (\gamma - 1) M_u^2$$

$$\frac{p_{03}}{p_{01}} = \left(\frac{T_{03ss}}{T_{01}} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \quad \Rightarrow \quad \frac{p_{03}}{p_{01}} = \left[1 + \eta_{\text{TT}} \left(\frac{T_{03}}{T_{01}} - 1 \right) \right]^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}$$

$$\eta_{\text{TT}} = \frac{T_{03ss} - T_{01}}{T_{03} - T_{01}} = \frac{\frac{T_{03ss}}{T_{01}} - 1}{\frac{T_{03}}{T_{01}} - 1} \quad \Rightarrow \quad \frac{T_{03ss}}{T_{01}} = 1 + \eta_{\text{TT}} \left(\frac{T_{03}}{T_{01}} - 1 \right)$$

Incremento di temperatura e pressione totale nello stadio di compressore

$$l = c_p (T_{03} - T_{01}) = \psi u^2 \quad \Rightarrow \quad \frac{l}{c_p T_{01}} = \frac{\psi u^2}{c_p T_{01}} = \left(\frac{T_{03}}{T_{01}} - 1 \right)$$

$$\frac{T_{03}}{T_{01}} - 1 = (\gamma - 1) \psi \frac{u^2}{\gamma R T_{01}} \quad \Rightarrow \quad \frac{T_{03}}{T_{01}} - 1 = \psi (\gamma - 1) M_u^2$$

$$\begin{aligned} \frac{p_{03}}{p_{01}} &= \left(\frac{T_{03ss}}{T_{01}} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \quad \Rightarrow \quad \frac{p_{03}}{p_{01}} = \left[1 + \eta_{TT} \left(\frac{T_{03}}{T_{01}} - 1 \right) \right]^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} = \\ &= \left(1 + \eta_{TT} \frac{l}{c_p T_{01}} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \end{aligned}$$

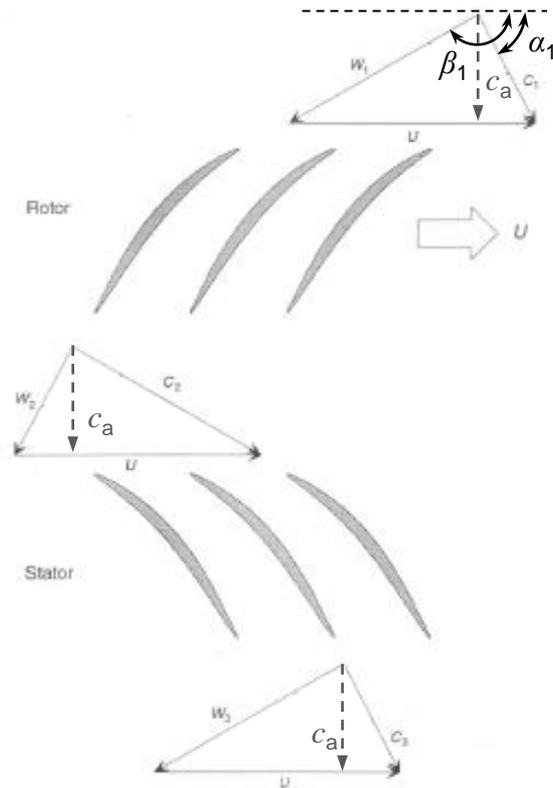
Incremento di temperatura e pressione totale nello stadio di compressore

$$l = c_p (T_{03} - T_{01}) = \psi u^2 \quad \Rightarrow \quad \frac{l}{c_p T_{01}} = \frac{\psi u^2}{c_p T_{01}} = \left(\frac{T_{03}}{T_{01}} - 1 \right)$$

$$\frac{T_{03}}{T_{01}} - 1 = (\gamma - 1) \psi \frac{u^2}{\gamma R T_{01}} \quad \Rightarrow \quad \frac{T_{03}}{T_{01}} - 1 = \psi (\gamma - 1) M_u^2$$

$$\begin{aligned} \frac{p_{03}}{p_{01}} &= \left(\frac{T_{03ss}}{T_{01}} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \quad \Rightarrow \quad \frac{p_{03}}{p_{01}} = \left[1 + \eta_{TT} \left(\frac{T_{03}}{T_{01}} - 1 \right) \right]^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} = \\ &= \left(1 + \eta_{TT} \psi (\gamma - 1) M_u^2 \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} = \\ &= \left(1 + \psi_p (\gamma - 1) M_u^2 \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \end{aligned}$$

Funzionamento dello stadio al di fuori dalle condizioni di progetto



$$\psi = \phi (\cotg \beta_2 - \cotg \beta_1)$$

$$c_u = c_a \cotg \alpha = u + w_u = u + c_a \cotg \beta$$

⇓

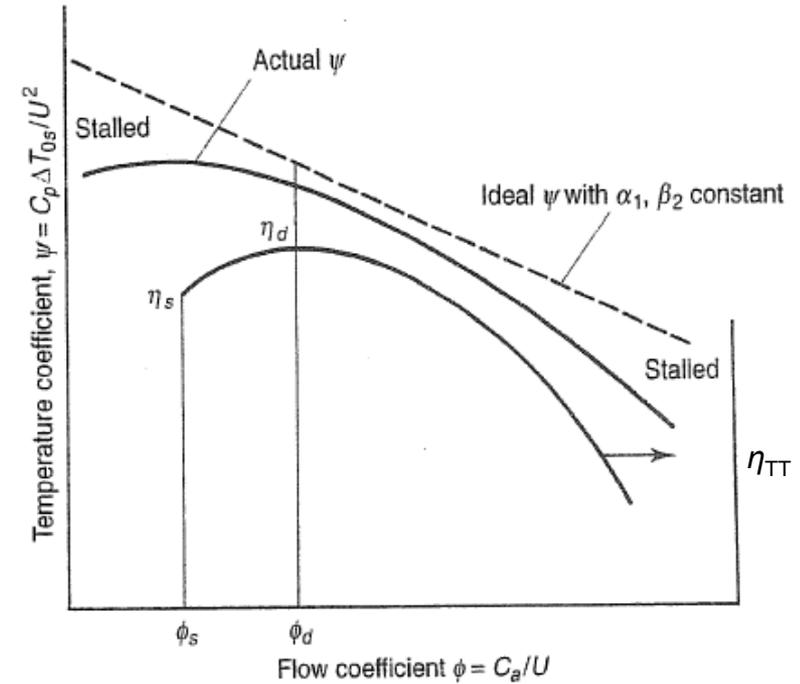
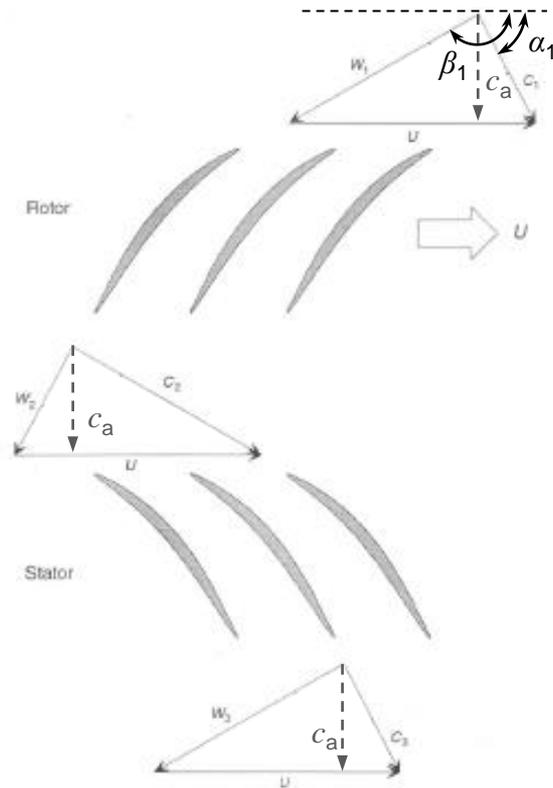
$$\cotg \beta = \cotg \alpha - \frac{u}{c_a} = \cotg \alpha - \frac{1}{\phi}$$

⇓

$$\psi = 1 + \phi (\cotg \beta_2 - \cotg \alpha_1) = 1 - \phi (\cotg \alpha_1 - \cotg \beta_2)$$

In prima approssimazione gli angoli α_1 e β_2 si mantengono costanti al variare di ϕ

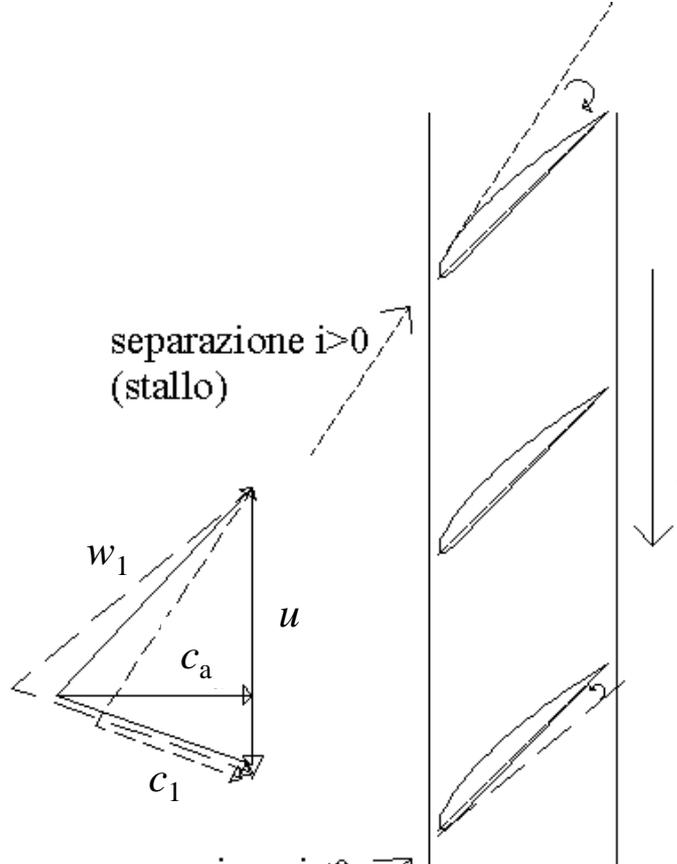
Funzionamento dello stadio al di fuori dalle condizioni di progetto



In prima approssimazione gli angoli α_1 e β_2 si mantengono costanti al variare di ϕ

$$\psi = 1 - \phi (\cotg \alpha_1 - \cotg \beta_2) = 1 - \phi [\cotg \alpha_1 + \cotg (\pi - \beta_2)]$$

Funzionamento dello stadio al di fuori dalle condizioni di progetto

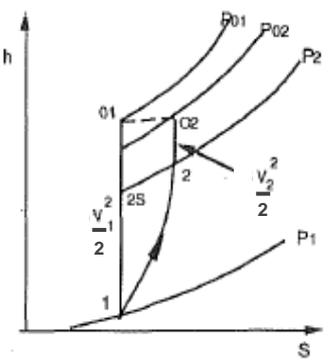
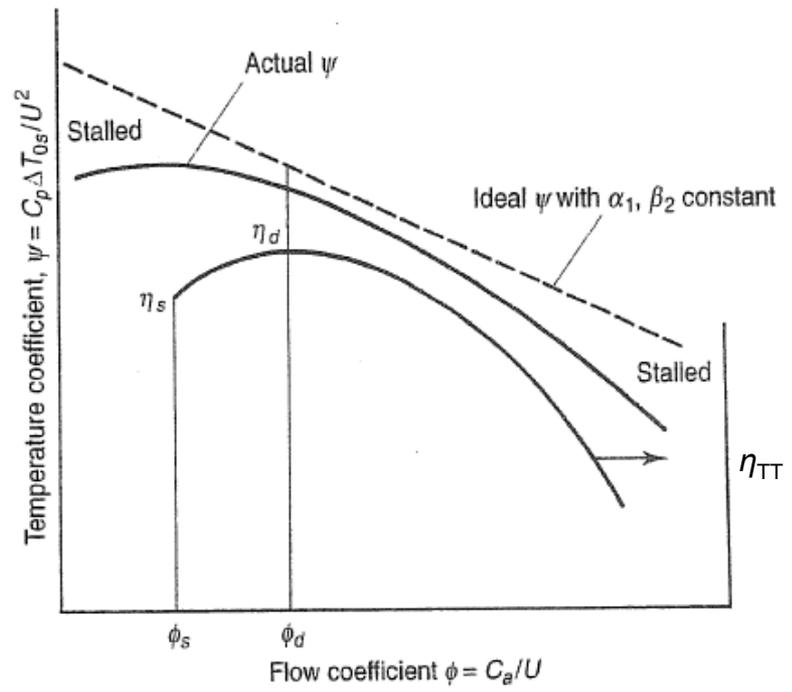


$$\phi = \frac{C_a}{u} \uparrow \Rightarrow i \downarrow$$

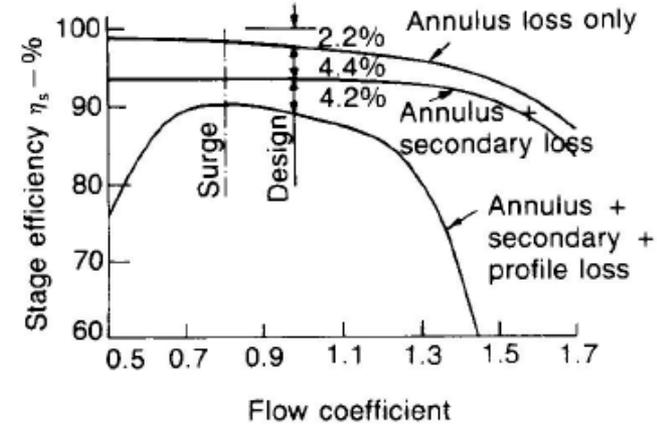
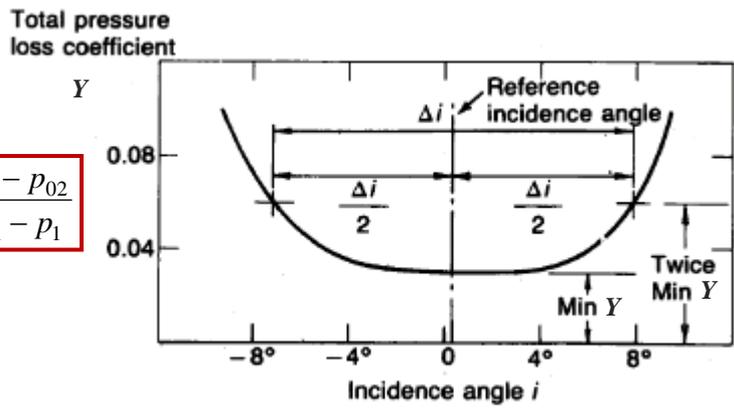
$$\phi = \frac{C_a}{u} \downarrow \Rightarrow i \uparrow$$

separazione $i > 0$
(stallo)

separazione $i < 0$
(choking)



$$Y = \frac{P_{01} - P_{02}}{P_{01} - P_1}$$



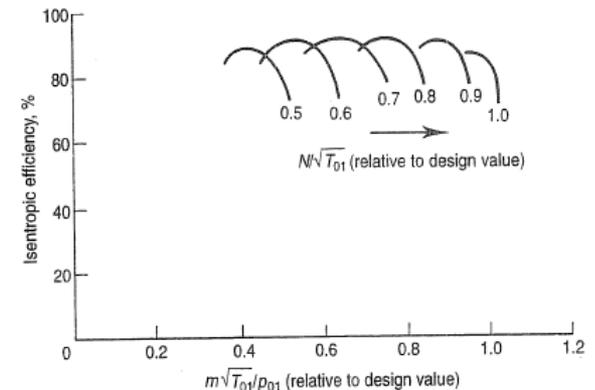
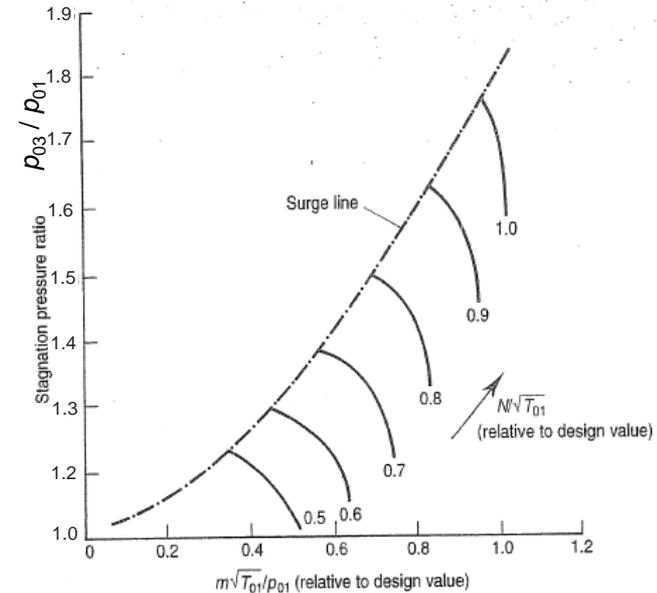
Funzionamento dello stadio al di fuori dalle condizioni di progetto

$$\eta_{\text{TT}} = f_{\eta}(\phi) = f_{\eta}\left(\frac{c_a}{u}\right) = f_{\eta}\left(\frac{\dot{M} R T_{01}}{A p_{01}} \cdot \frac{1}{N}\right) = f_{\eta}\left(\frac{\dot{M} \sqrt{R T_{01}}}{A p_{01}} \cdot \frac{\sqrt{R T_{01}}}{N}\right)$$

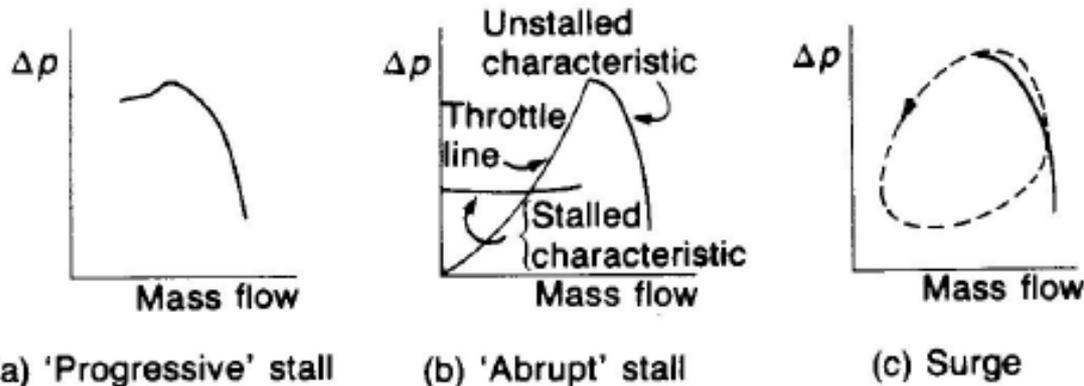
$$= f_{\eta}\left(\frac{\dot{M} \sqrt{R T_{01}}}{A p_{01}}, \frac{N}{\sqrt{R T_{01}}}\right)$$

$$\frac{p_{03}}{p_{01}} = \left(1 + \eta_{\text{TT}} \psi (\gamma - 1) M_u^2\right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}} = \left(1 + \psi_p (\gamma - 1) M_u^2\right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}} =$$

$$= f_{\beta}(\phi, M_u) = f_{\beta}\left(\frac{\dot{M} \sqrt{R T_{01}}}{A p_{01}}, \frac{N}{\sqrt{R T_{01}}}\right)$$



Funzionamento dello stadio di compressore in condizioni instabili

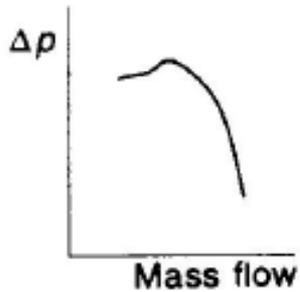


a) Progressive stall: le prestazioni globali si riducono di poco (fenomeno locale)

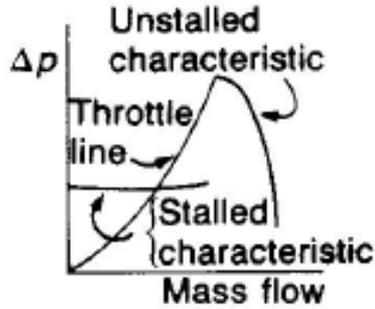
b) Abrupt stall: la riduzione del rapporto di compressione è molto forte e il compressore opera sulla curva di funzionamento in condizioni di stallo (*stalled characteristic*)

c) Surge: l'intera portata subisce una variazione ciclica con eventualmente inversione (pompaggio)

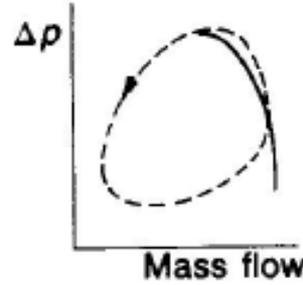
Funzionamento dello stadio di compressore in condizioni instabili - Stallo



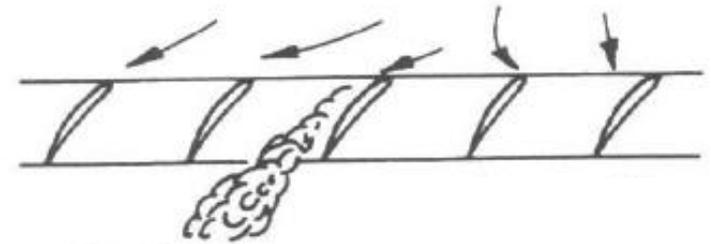
(a) 'Progressive' stall



(b) 'Abrupt' stall

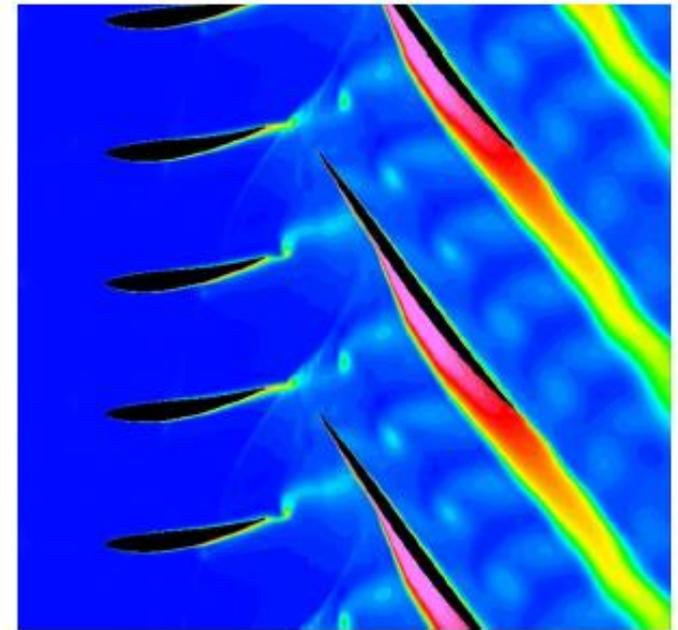


(c) Surge

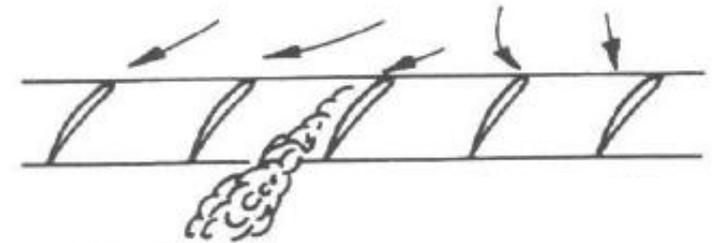
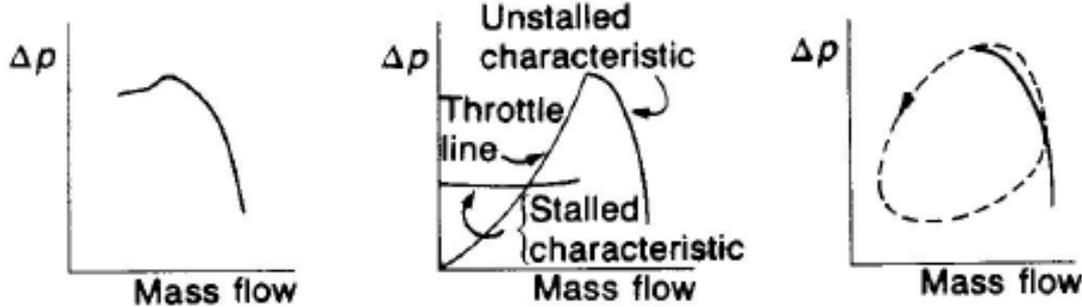


Stall inception

- All'aumentare dell'incidenza (positiva) aumenta il carico sul profilo
- Per carichi troppo elevati (incidenze positive troppo elevate) si verifica la separazione dello strato limite, a cui è associato un rilevante incremento della dissipazione viscosa
- In condizioni di flusso separato un aumento di incidenza determina essenzialmente solo un aumento delle perdite

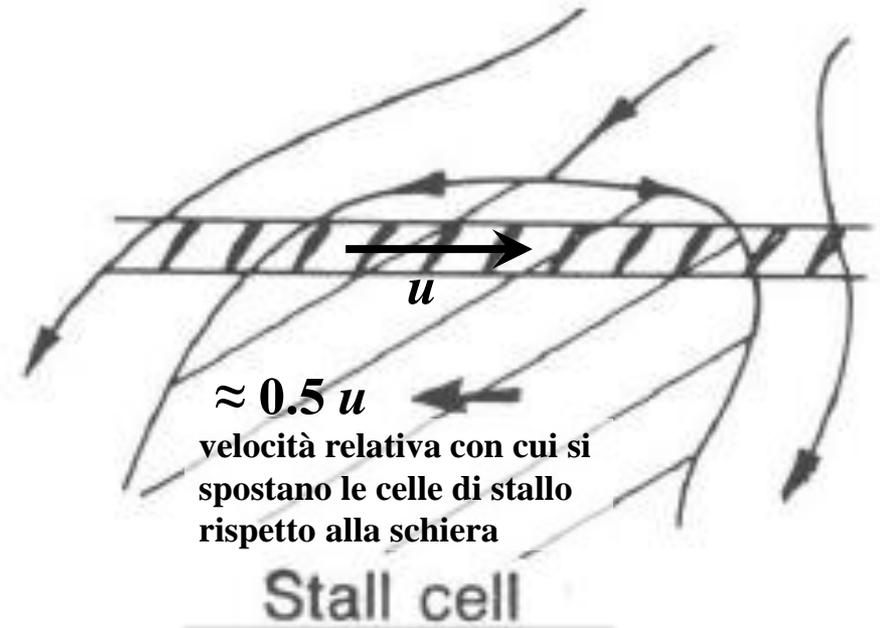


Funzionamento dello stadio di compressore in condizioni instabili – Stallo rotante



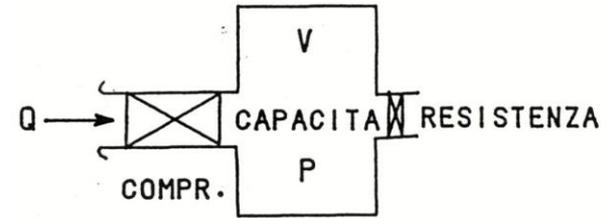
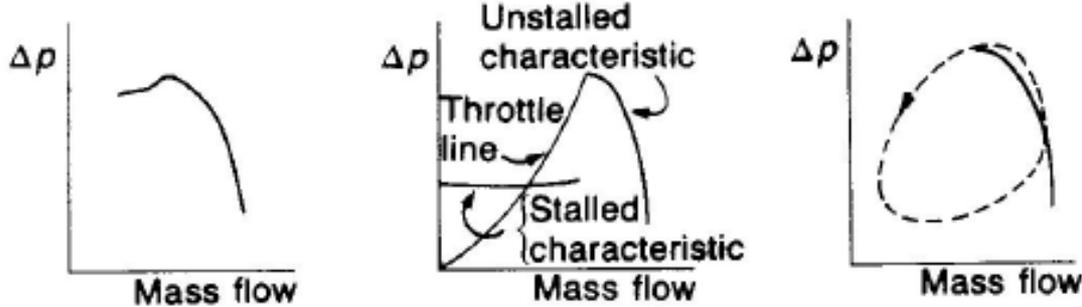
Stall inception

- La condizione di **stallo rotante** ha origine in uno o più vani rotorici (cella di stallo), “più sensibili” di altri, per imperfezioni costruttive o per disuniformità del flusso
- Il *bloccaggio* associato ai vani interessati dalla cella di stallo provoca un aumento di incidenza sui vani che seguono (cioè nel senso inverso a quello di rotazione) e una riduzione di incidenza su quelli che precedono
- Questo comporta che la cella di stallo si muova in senso contrario a quello di rotazione occupando via via vani diversi



Stallo rotante

Funzionamento dello stadio di compressore in condizioni instabili – Surge

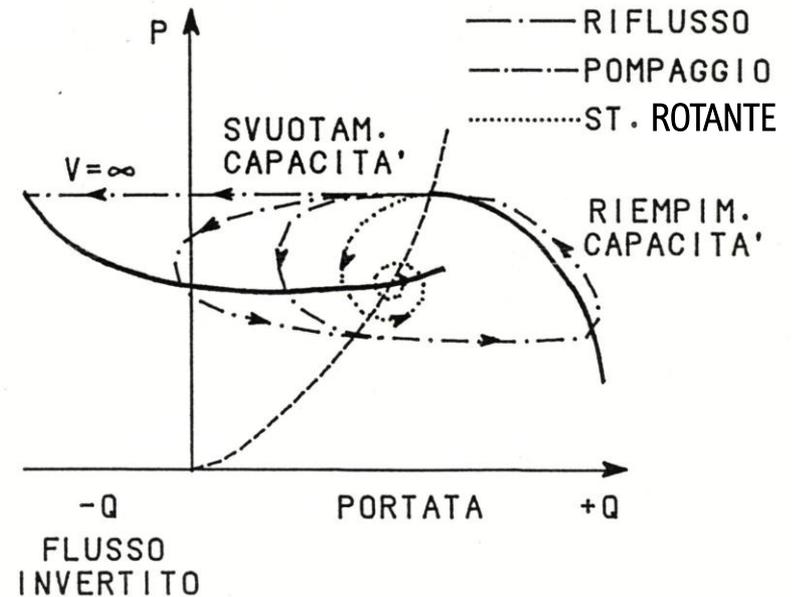


(a) 'Progressive' stall

(b) 'Abrupt' stall

(c) Surge

- In base alle caratteristiche del sistema compressore-capacità-resistenza sono possibili due diversi tipi di funzionamento:
 - uscita dallo stallo e ripetizione ciclica (riflusso o pompaggio)
 - stabilizzazione in condizioni di stallo rotante



Condizioni all'uscita dello stadio al variare di portata volumetrica e velocità di rotazione

$$\frac{p_{03}}{p_{01}} = \left(1 + \psi_p (\gamma - 1) M_u^2\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} = \left(\frac{\rho_{03}}{\rho_{01}}\right)^n$$

$$N = \text{cost.} \Rightarrow u = \text{cost.} , \quad Q \neq \text{cost.} \Rightarrow c_a \neq \text{cost.}$$

$$c_a \uparrow \Rightarrow \phi = \frac{c_a}{u} \uparrow \Rightarrow \psi_p \downarrow \Rightarrow \frac{p_{03}}{p_{01}} \downarrow \Rightarrow \frac{\rho_{03}}{\rho_{01}} \downarrow \Rightarrow \frac{Q_3}{Q_1} = \frac{\dot{M} / \rho_3}{\dot{M} / \rho_1} \uparrow \Rightarrow \frac{\phi_3}{\phi_1} \uparrow$$

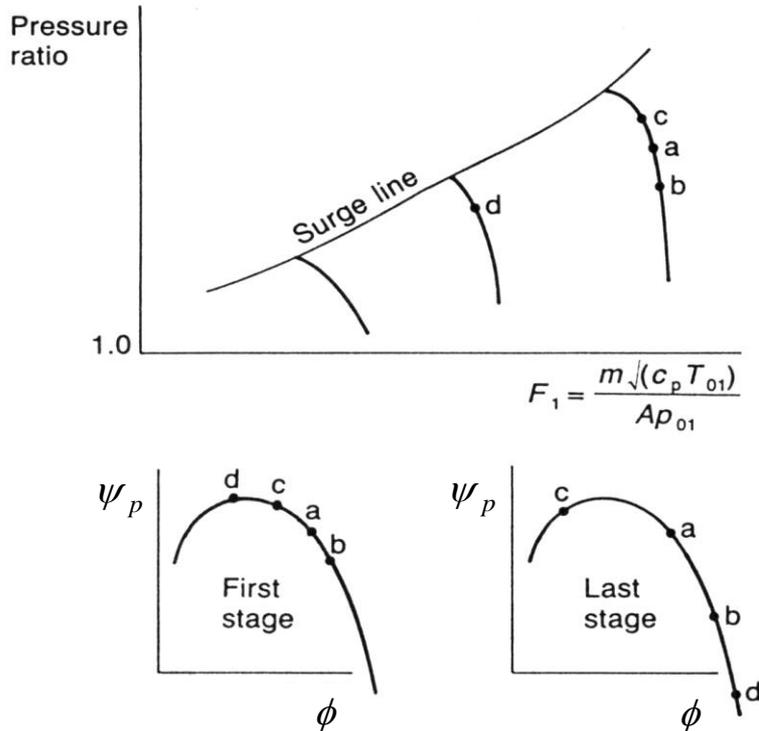
$$c_a \downarrow \Rightarrow \phi = \frac{c_a}{u} \downarrow \Rightarrow \psi_p \uparrow \Rightarrow \frac{p_{03}}{p_{01}} \uparrow \Rightarrow \frac{\rho_{03}}{\rho_{01}} \uparrow \Rightarrow \frac{Q_3}{Q_1} = \frac{\dot{M} / \rho_3}{\dot{M} / \rho_1} \downarrow \Rightarrow \frac{\phi_3}{\phi_1} \downarrow$$

$$N \neq \text{cost.} \Rightarrow u \neq \text{cost.} , \quad \phi_1 = \text{cost.} \text{ (condizioni di similitudine)}$$

$$u \uparrow \Rightarrow M_u \uparrow \Rightarrow \frac{p_{03}}{p_{01}} \uparrow \Rightarrow \frac{\rho_{03}}{\rho_{01}} \uparrow \Rightarrow \frac{Q_3}{Q_1} = \frac{\dot{M} / \rho_3}{\dot{M} / \rho_1} \downarrow \Rightarrow \frac{\phi_3}{\phi_1} \downarrow$$

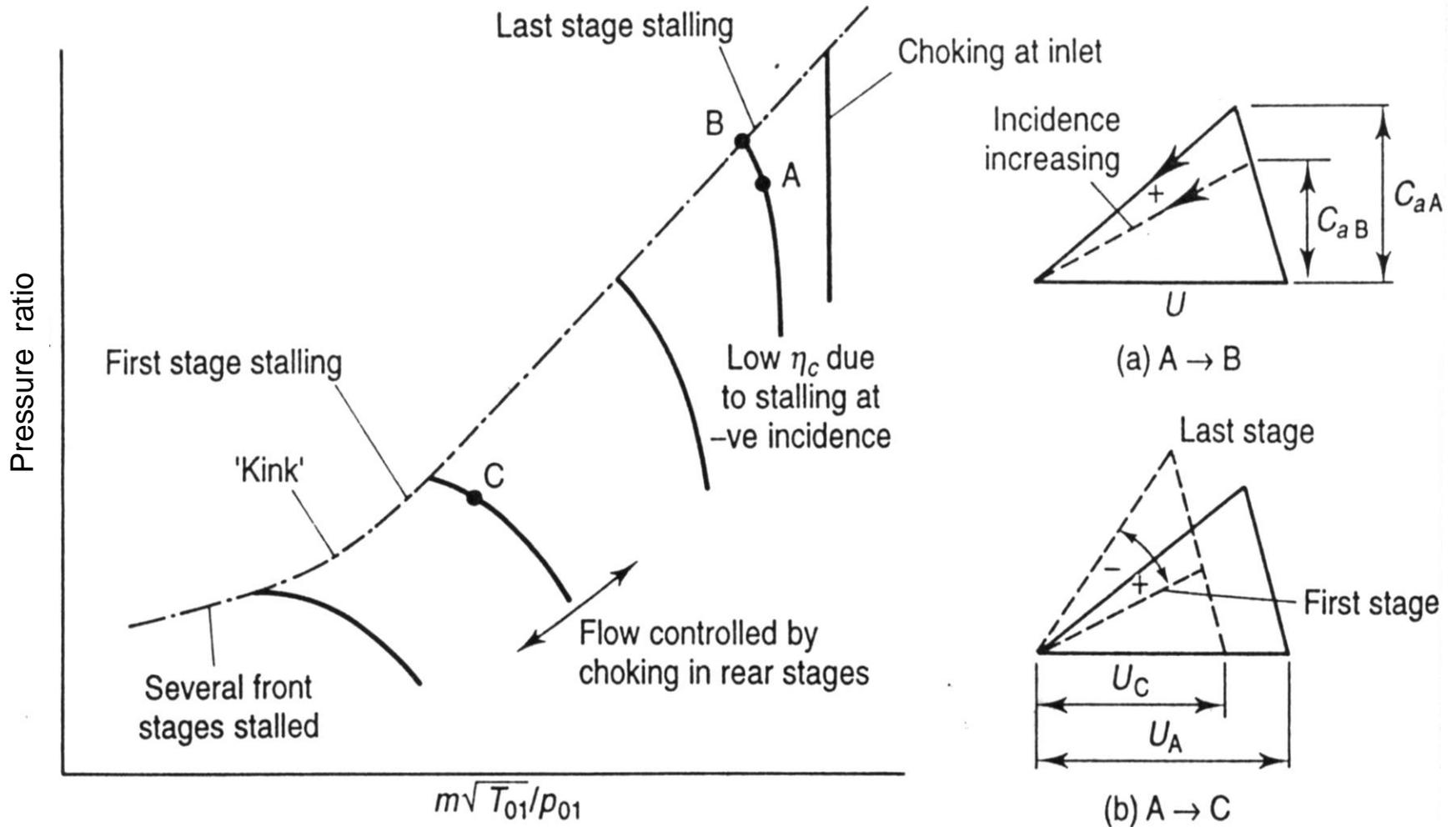
$$u \downarrow \Rightarrow M_u \downarrow \Rightarrow \frac{p_{03}}{p_{01}} \downarrow \Rightarrow \frac{\rho_{03}}{\rho_{01}} \downarrow \Rightarrow \frac{Q_3}{Q_1} = \frac{\dot{M} / \rho_3}{\dot{M} / \rho_1} \uparrow \Rightarrow \frac{\phi_3}{\phi_1} \uparrow$$

Funzionamento del compressore al di fuori dalle condizioni di progetto



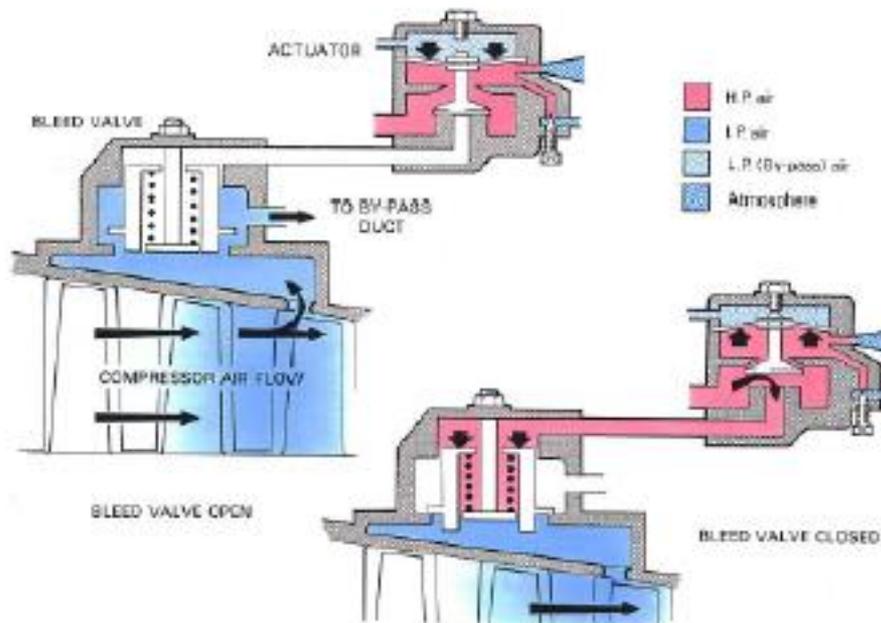
- A **velocità di rotazione costante** aumenti (b) o riduzioni (c) della portata al primo stadio si amplificano dal primo all'ultimo stadio
- Il campo di funzionamento regolare del compressore è limitato dallo stallo e dal *choking* degli ultimi stadi
- La **riduzione della velocità di rotazione** (d) comporta una riduzione del rapporto di compressione di stadio, con conseguente minor compressione del fluido elaborato e maggiori portate volumetriche agli ultimi stadi
- Il punto di funzionamento degli ultimi stadi si sposta verso condizioni di *choking*, mentre il punto di funzionamento dei primi stadi si sposta verso condizioni di stallo
- L'**aumento della velocità di rotazione** comporta un aumento del rapporto di compressione di stadio, con conseguente maggior compressione del fluido elaborato e minori portate volumetriche agli ultimi stadi
- Il punto di funzionamento degli ultimi stadi si sposta verso condizioni di stallo, mentre il punto di funzionamento dei primi stadi si sposta verso condizioni di *choking*

Funzionamento del compressore al di fuori dalle condizioni di progetto



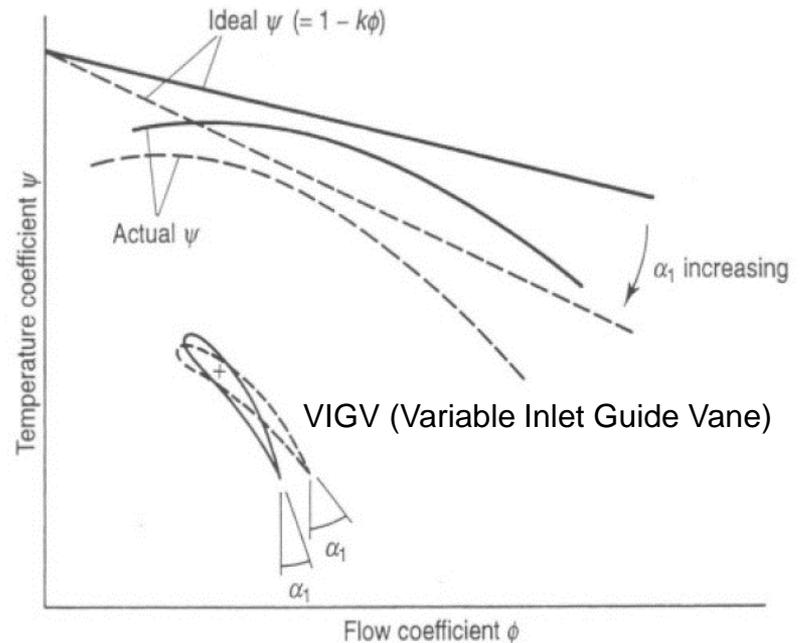
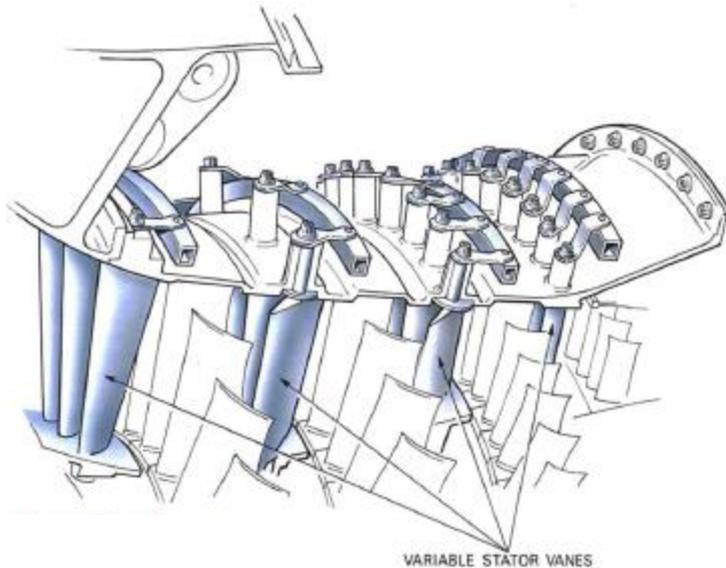
Miglioramento dei limiti di stabilità del compressore

- A. Riduzione della portata elaborata dagli stadi finali mediante estrazioni di aria sugli stadi intermedi



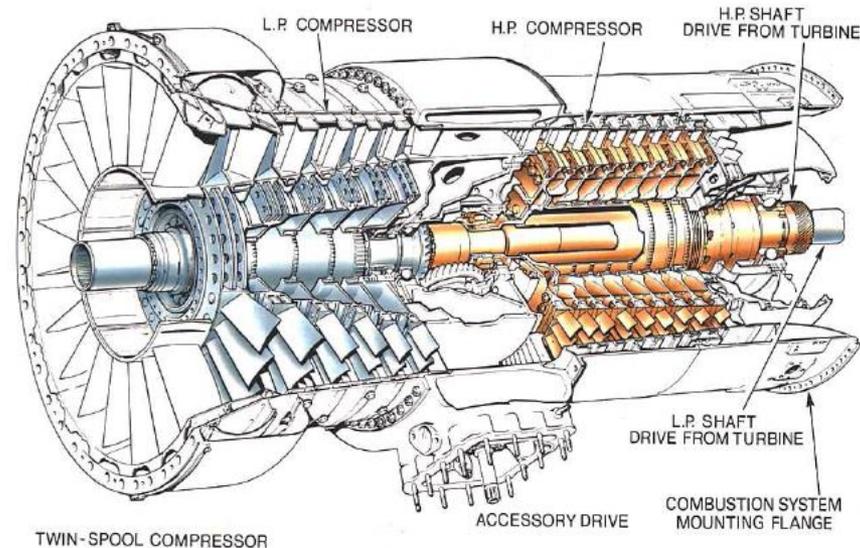
Miglioramento dei limiti di stabilità del compressore

- A. Riduzione della portata elaborata dagli stadi finali mediante estrazioni di aria sugli stadi intermedi
- B. Impiego di uno o più stadi (2÷6) con palettature statoriche a geometria variabile, per compensare gli effetti legati a variazioni del coefficiente di flusso

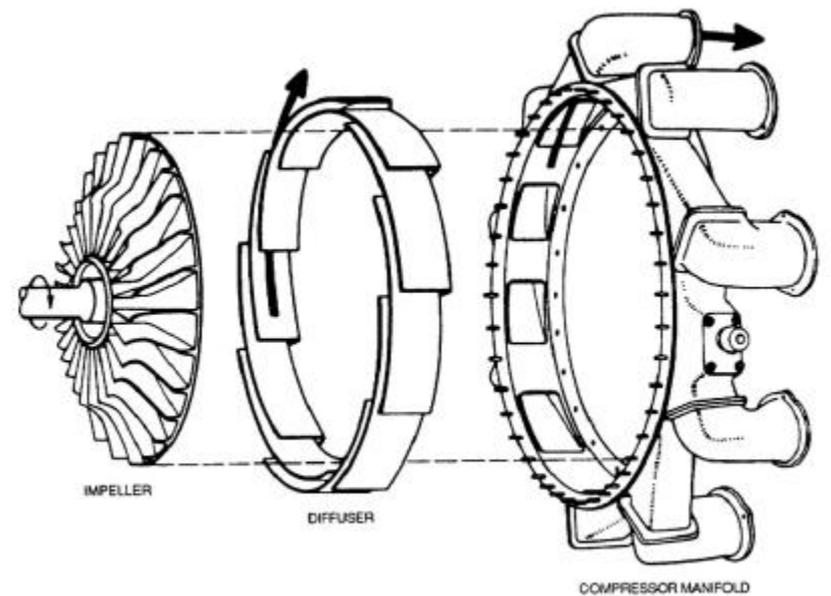
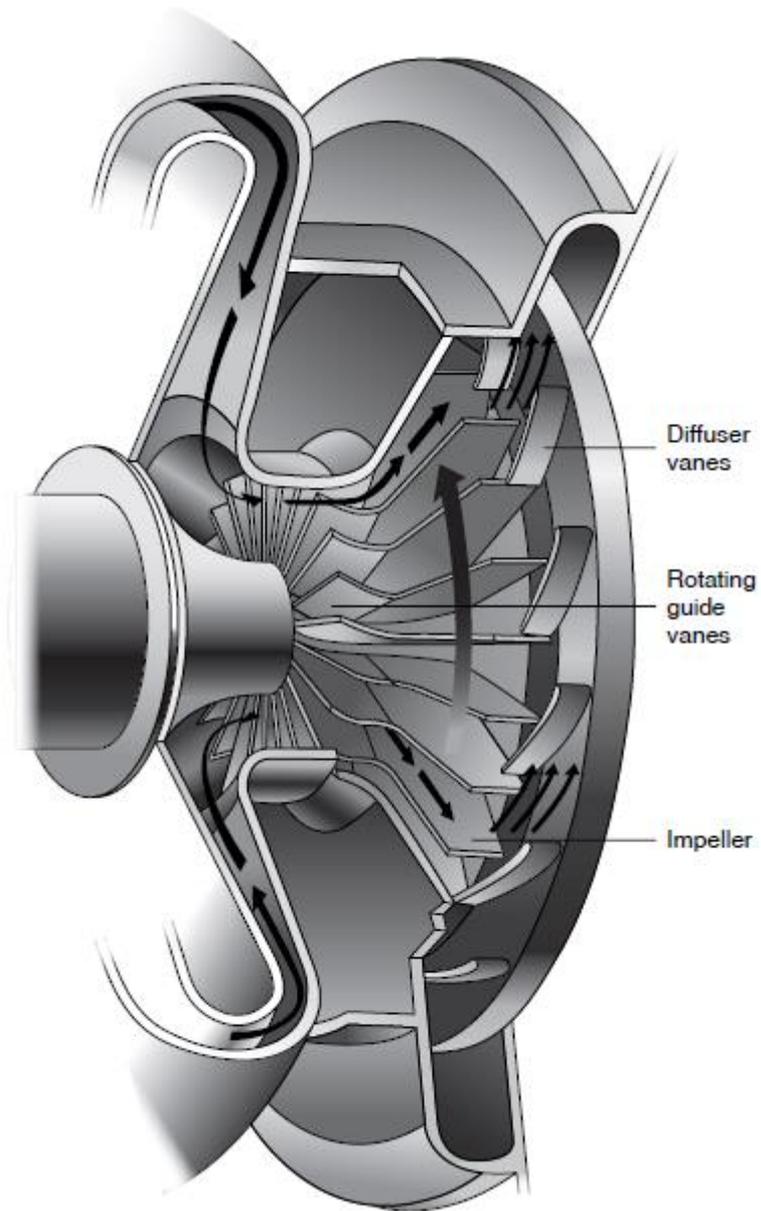


Miglioramento dei limiti di stabilità del compressore

- A. Riduzione della portata elaborata dagli stadi finali mediante estrazioni di aria sugli stadi intermedi
- B. Impiego di uno o più stadi (2÷6) con palettature statoriche a geometria variabile, per compensare gli effetti legati a variazioni del coefficiente di flusso
- C. Adozione di compressori su più alberi ruotanti con accelerazioni e velocità diverse

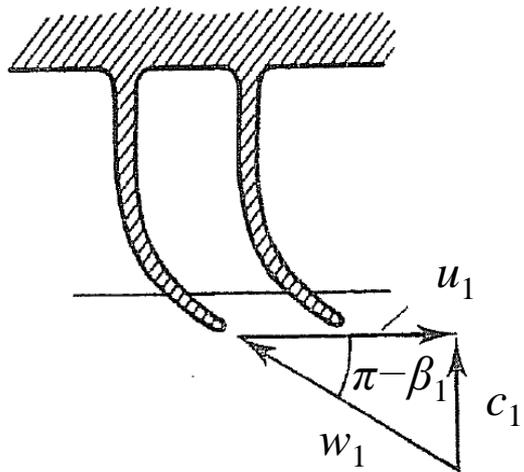
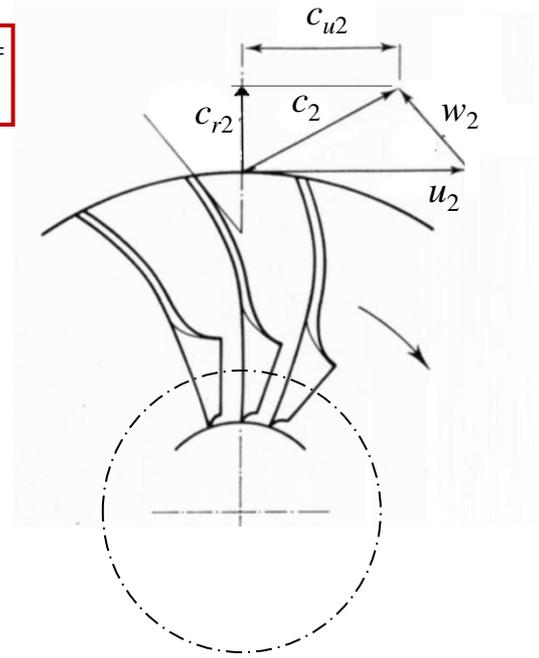


Compressore radiale



$$c_u = c \cos \alpha = c_r \cotg \alpha = u + w_u =$$

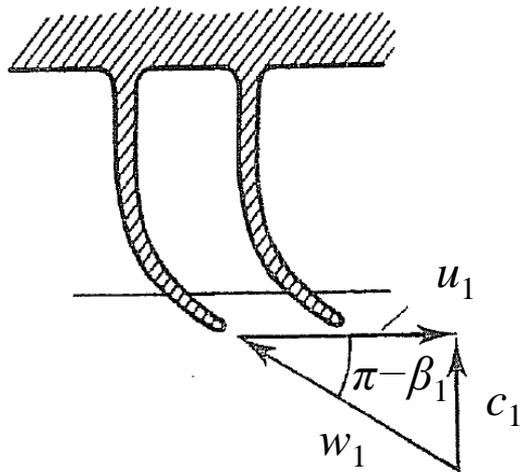
$$= u + w \cos \beta = u + c_r \cotg \beta$$



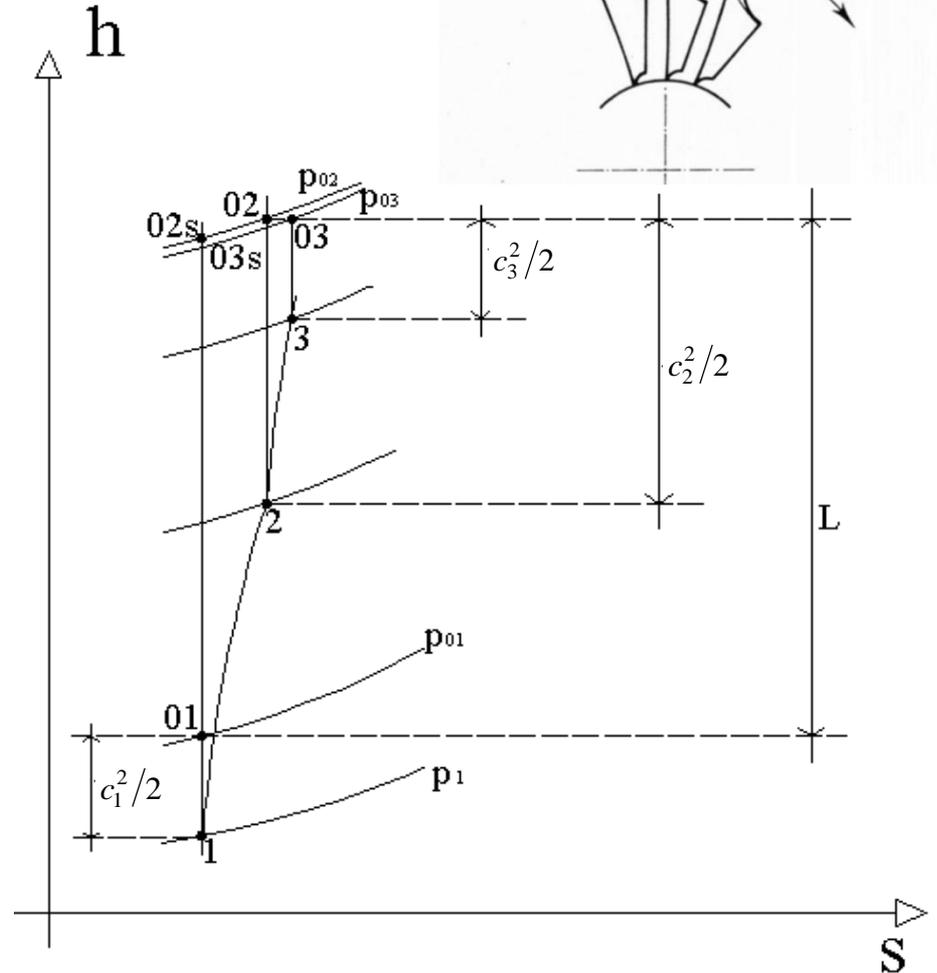
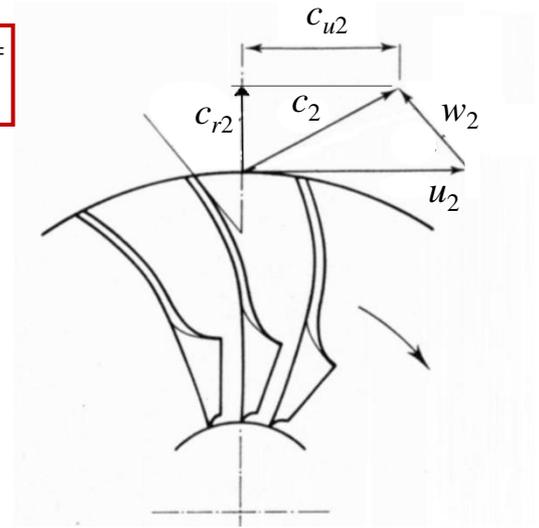
$$l = h_{03} - h_{01} = u_2 c_{u2} - u_1 c_{u1}$$

Se il flusso all'ingresso non ha componenti tangenziali ($c_{u1} = 0$):

$$l = h_{03} - h_{01} = u_2 c_{u2} = u_2 (u_2 + c_{r2} \cotg \beta_2)$$



$$c_u = c \cos \alpha = c_r \cotg \alpha = u + w_u = u + w \cos \beta = u + c_r \cotg \beta$$



$$l = h_{03} - h_{01} = u_2 c_{u2} - u_1 c_{u1}$$

Se il flusso all'ingresso non ha componenti tangenziali ($c_{u1} = 0$):

$$l = h_{03} - h_{01} = u_2 c_{u2} = u_2 (u_2 + c_{r2} \cotg \beta_2)$$

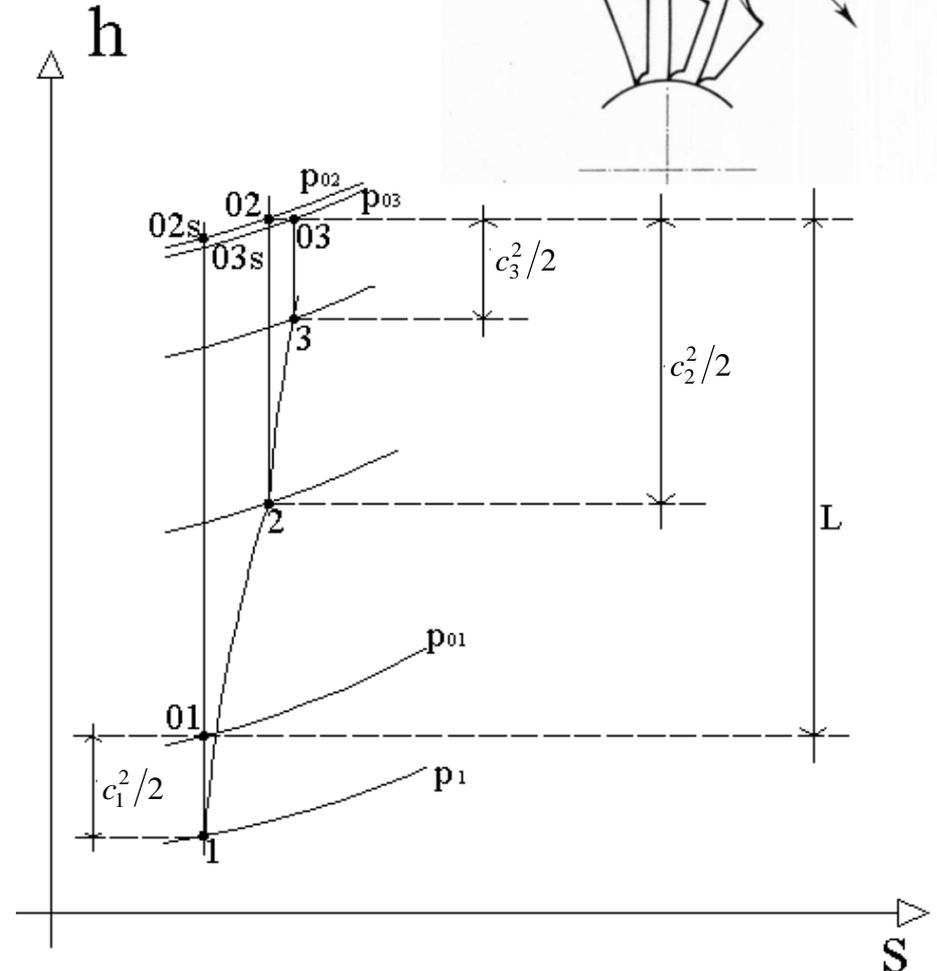
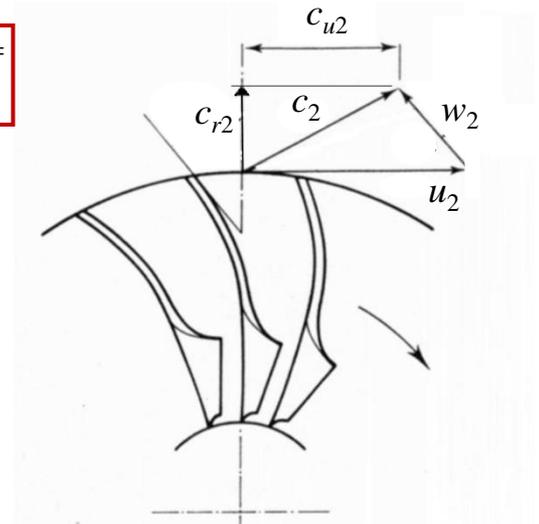
Coefficiente di flusso: $\phi = \frac{c_{r2}}{u_2}$

Coefficiente di carico:

$$\psi = \frac{l}{u_2^2} = \frac{h_{03} - h_{01}}{u_2^2}$$

$$\begin{aligned} \psi &= \frac{l}{u_2^2} = \frac{h_{03} - h_{01}}{u_2^2} = \frac{c_{u2}}{u_2} = 1 + \frac{c_{r2}}{u_2} \cotg \beta_2 = \\ &= 1 + \phi \cotg \beta_2 = 1 - \phi \cotg (\pi - \beta_2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} c_u &= c \cos \alpha = c_r \cotg \alpha = u + w_u = \\ &= u + w \cos \beta = u + c_r \cotg \beta \end{aligned}$$



Funzionamento dello stadio al di fuori dalle condizioni di progetto

