

LA SOVRALIMENTAZIONE DI MOTORI A COMBUSTIONE INTERNA PER AUTOTRAZIONE

Raffaele Tuccillo

*Dipartimento di Ingegneria
Meccanica per l'Energetica (DIME)
Università di Napoli "Federico II"*

tuccillo@unina.it



Scopo della Sovralimentazione

- Potenza di un motore a C.I.

$$P = \dot{m}_f H_i \eta_g = V_t \frac{n}{60\varepsilon} \frac{\rho_a \lambda_v}{\alpha} H_i \eta_g =$$
$$= p_{me} V_t \frac{n}{60\varepsilon}$$

- Coefficiente di riempimento

$$\lambda_v = \frac{m_{a,eff}}{V \rho_a}$$

Scopo della Sovralimentazione

- Coefficiente di riempimento del motore Sovralimentato:

$$\lambda_v = \lambda_{v,ASP} \frac{\rho_{s,eff}}{\rho_{a,eff}} = \lambda_{v,ASP} \cdot DR$$

- $DR = \text{Density Ratio}$

Effetto della Sovralimentazione

Dipendenza di DR dal rapporto di compressione e dall' intercooling

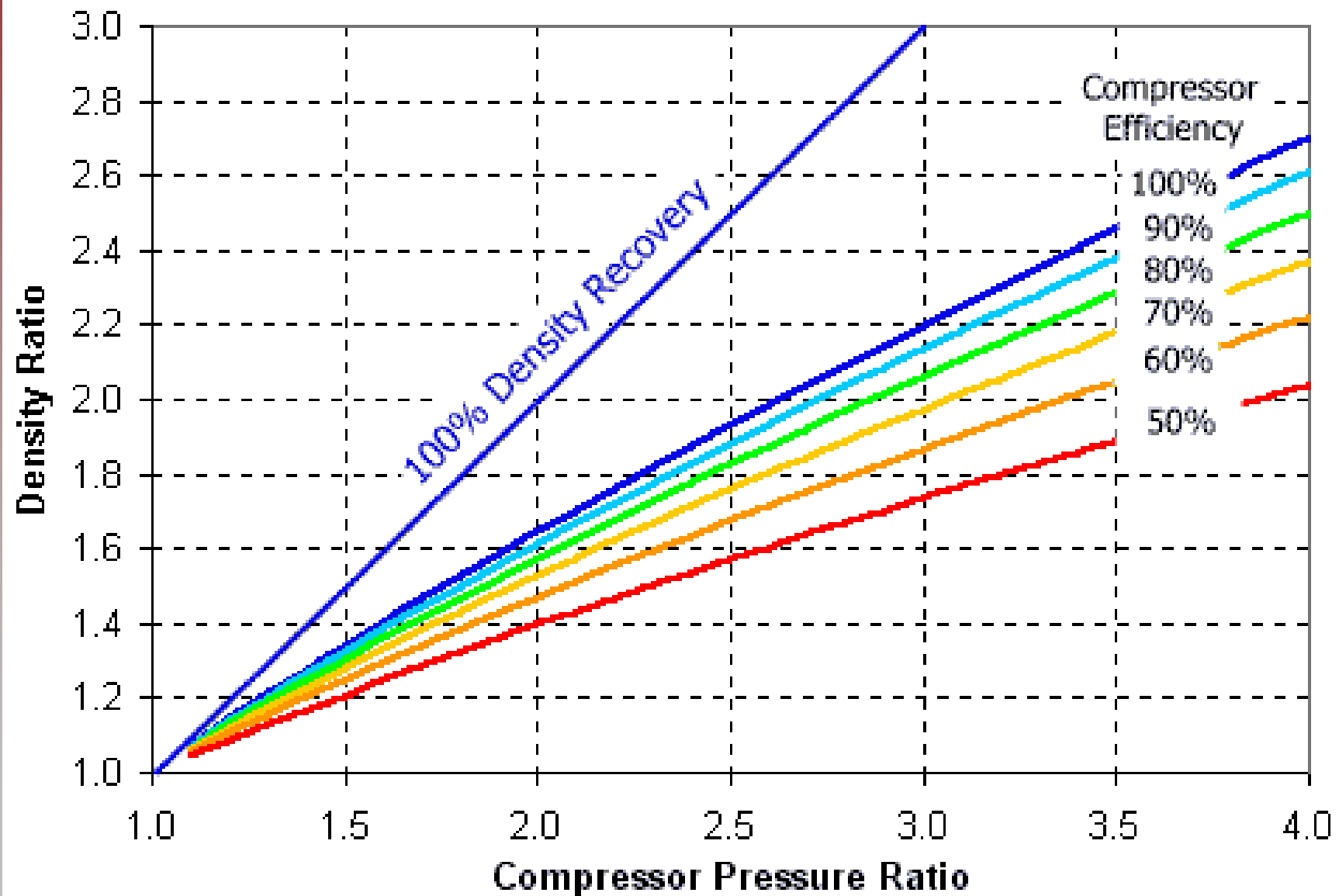
$$DR \propto \beta_c^{1/m} \cdot \varepsilon_{ic}$$

L'esponente m dipende dal rendimento della compressione e da scambi termici

L'efficienza ε_{ic} dipende dalle perdite di carico nello scambiatore e dall'effettivo raffreddamento

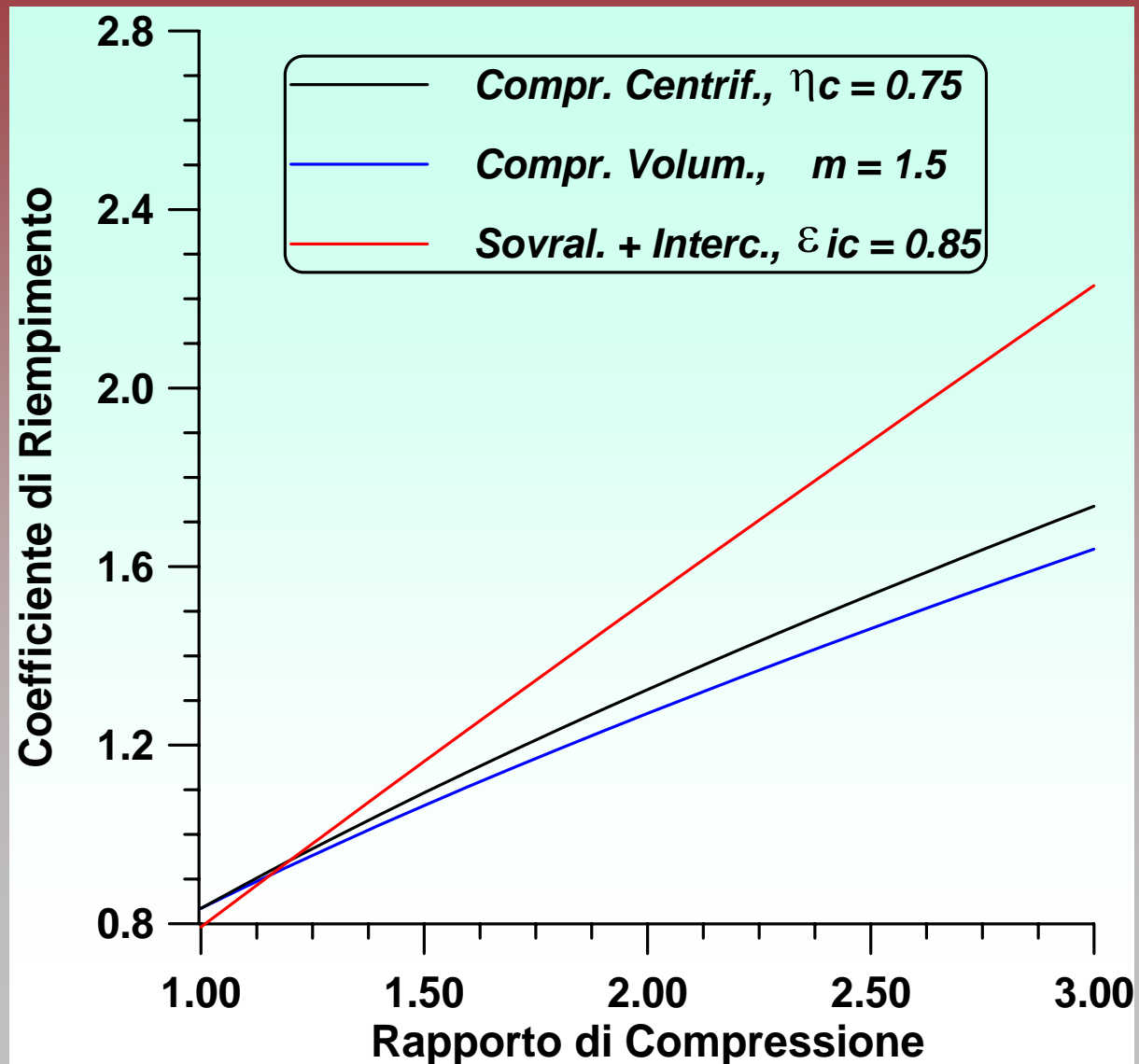
Effetto della Sovralimentazione

Dipendenza di DR dal rapporto di compressione esterno β_C



Effetto della Sovralimentazione

*Dipendenza del Coefficiente di riempimento λ_v
dal rapporto di compressione esterno β_c*



Accoppiamento Motore – Compressore Volumetrico

- Portata di aria al motore

$$\dot{m}_a = V_t \frac{n}{60\varepsilon} \rho_a \lambda_v =$$

= Portata di aria dal compressore

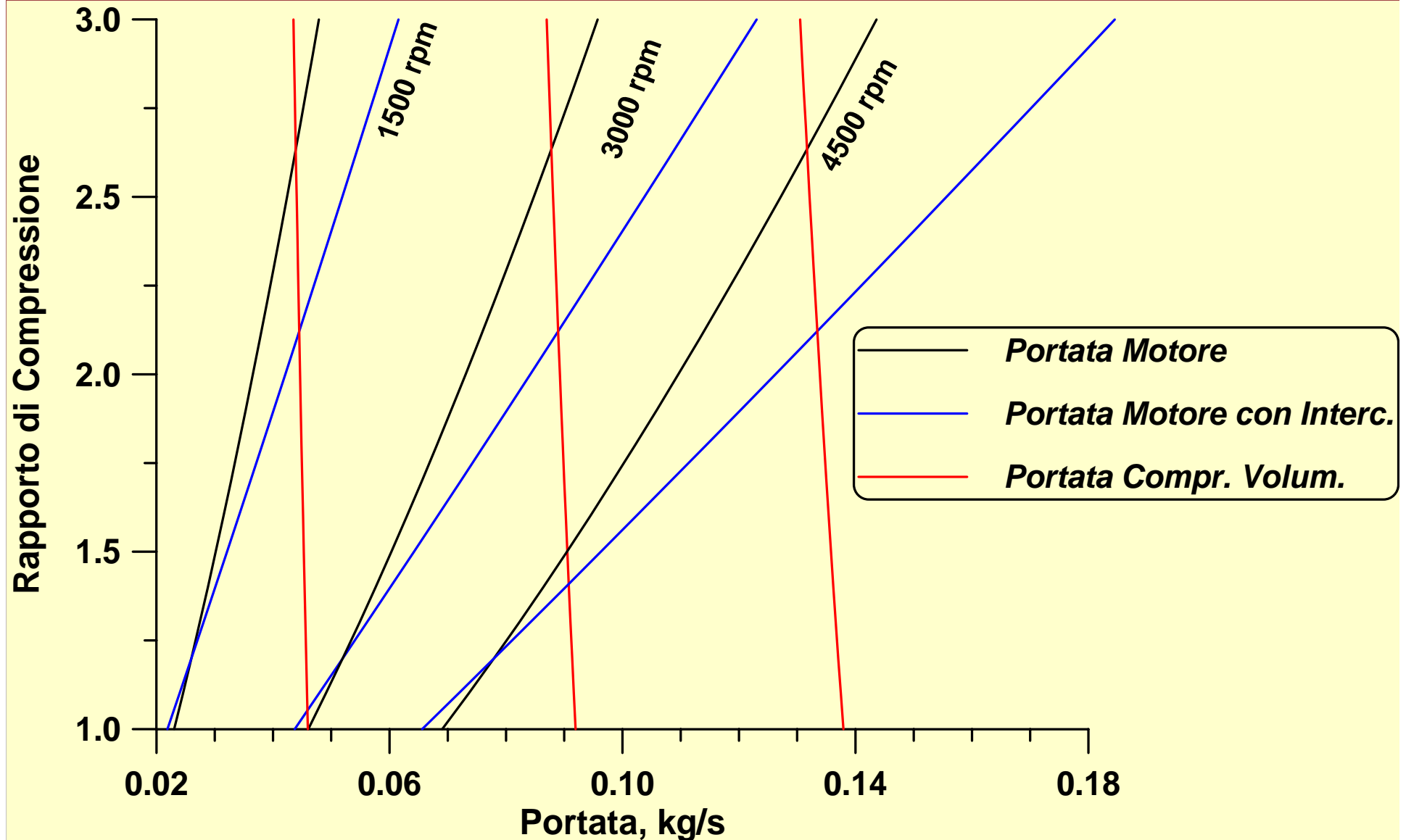
$$\dot{m}_c = V_c \frac{n_c}{60} \rho_a \eta_{vc}$$

- Con:

$$\left\{ \begin{array}{l} \lambda_v \propto \beta_c^{1/m} \cdot \varepsilon_{ic} \\ \eta_{vc} = 1 - \frac{V_{sm}}{V_c + V_{sm}} \left(\beta_c^{1/m} - 1 \right) \end{array} \right.$$

Accoppiamento Motore – Compressore Volumetrico

- $V_t = 2000 \text{ cm}^3$; $V_c / V_t = 0.75$; $n_c = n$



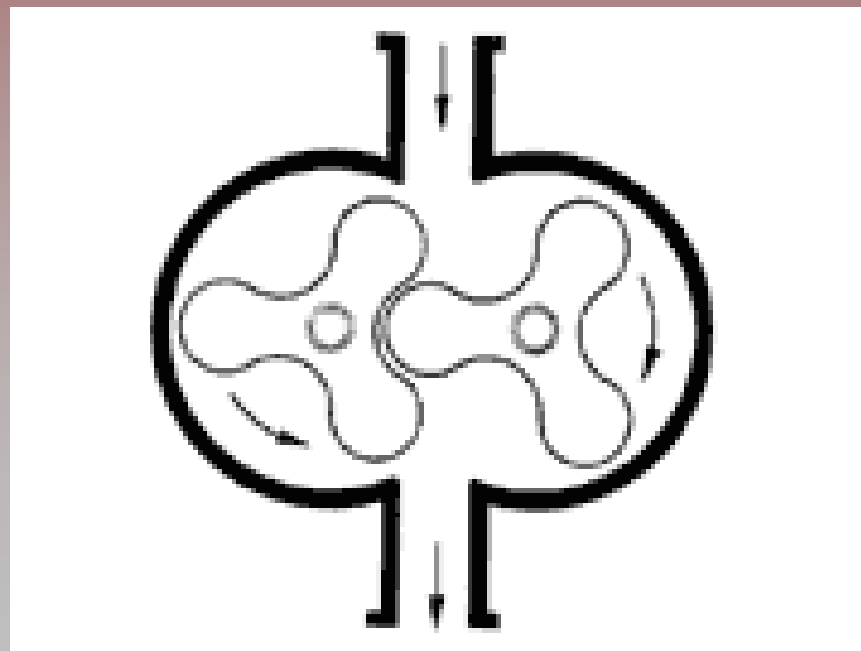
Accoppiamento Motore – Compressore Volumetrico

Potenza assorbita dal compressore volumetrico a comando meccanico:

$$P_c = \dot{m}_c \left[\frac{m}{m-1} \frac{p_a}{\rho_a} \left(\beta_c^{\frac{m-1}{m}} - 1 \right) \right] \frac{1}{\eta_{mc}}$$

Accoppiamento Motore – Compressore Volumetrico

Compressore a Lobi



Accoppiamento Motore – Compressore Volumetrico

Compressore Roots

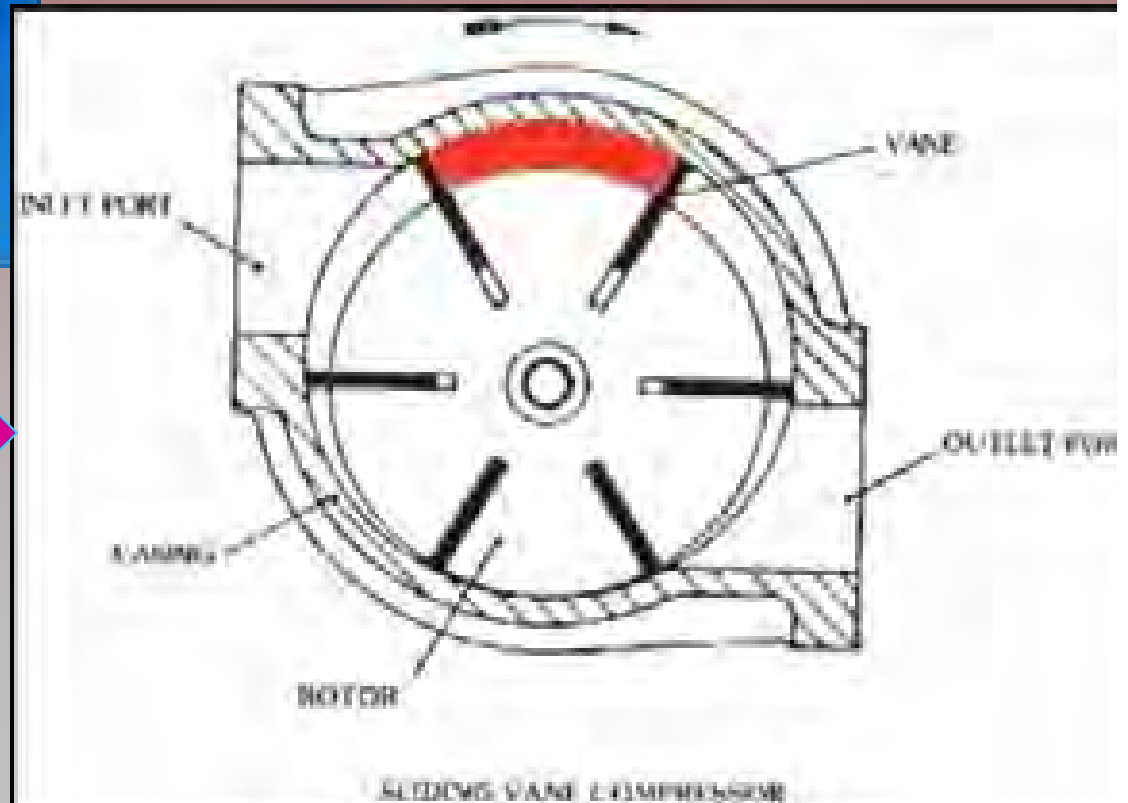


Accoppiamento Motore – Compressore Volumetrico

Compressore a Vite



Compressore
a palette



Accoppiamento Motore –Compressore Centrifugo

- Portata di aria al motore

$$\dot{m}_a = V_t \frac{n}{60\varepsilon} \rho_a \lambda_v = \dot{m}_c = f\left(\frac{p_1}{\sqrt{T_1}}, \frac{N_{tc}}{\sqrt{T_1}}, \beta_c\right)$$

= Portata di aria dal compressore

- Portata Corretta:

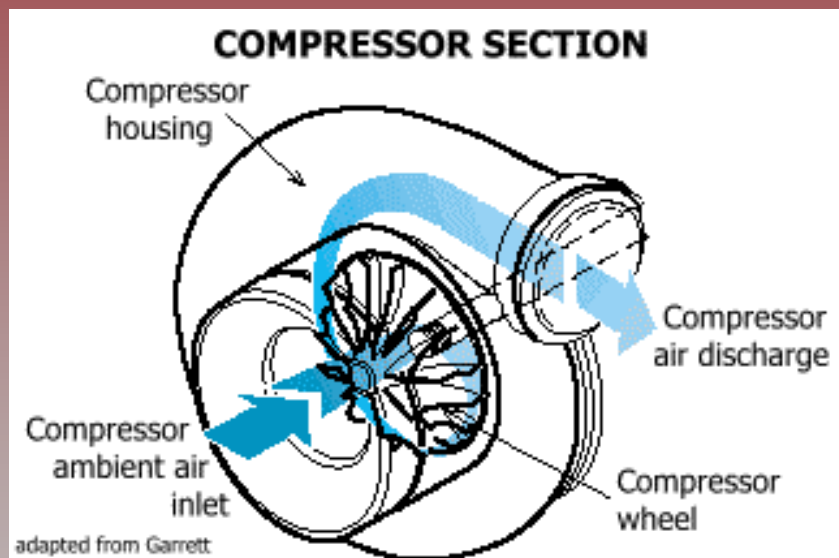
$$\dot{m}_{c,corr.} = \dot{m}_c \frac{\sqrt{T_1/T_{rif}}}{p_1/p_{rif}}$$

- Velocità Corretta:

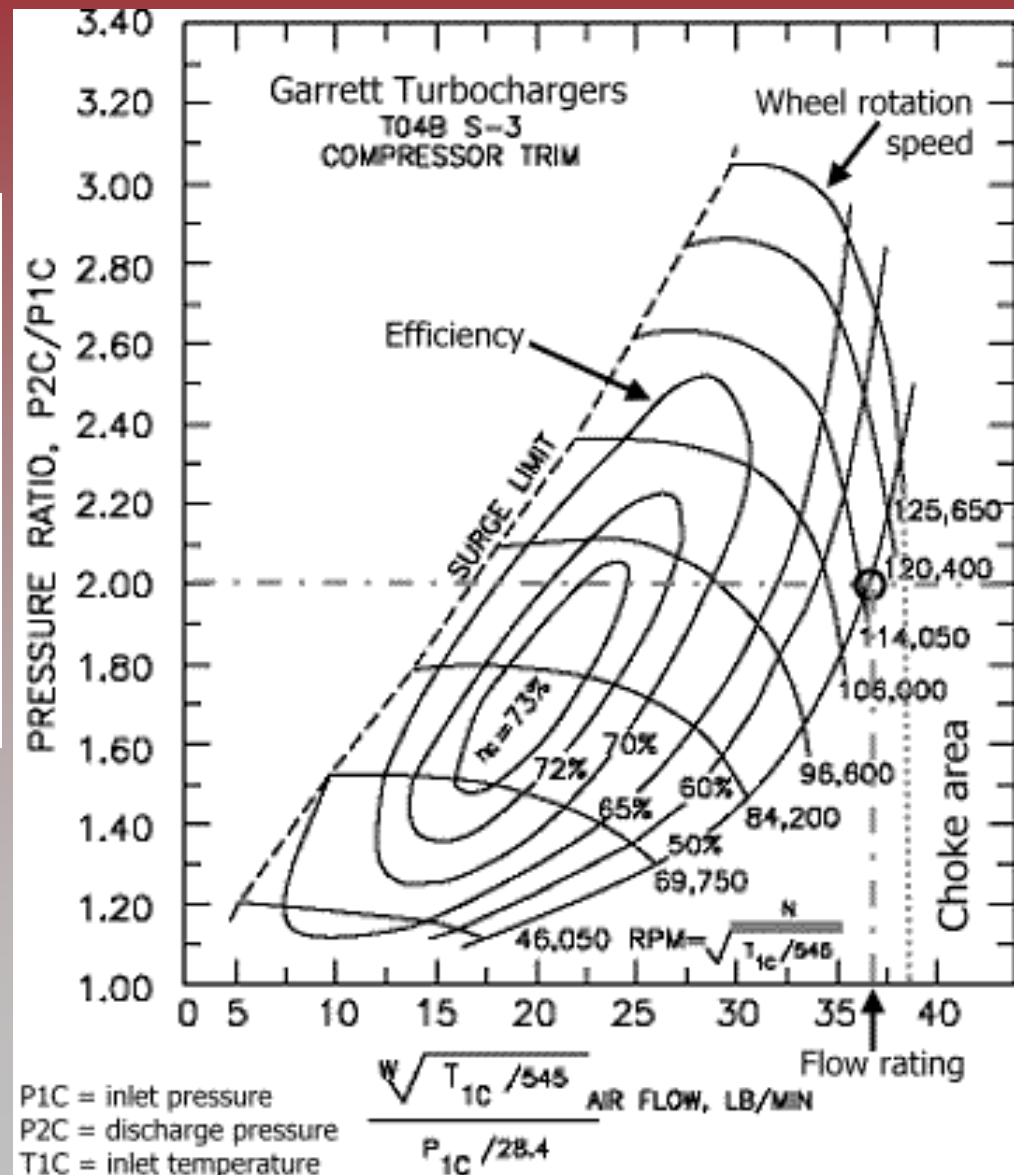
$$N_{tc,corr.} = \frac{N_{tc}}{\sqrt{T_1/T_{rif}}}$$

Accoppiamento Motore – Compressore Centrifugo

Mappe Caratteristiche di un Compressore Centrifugo

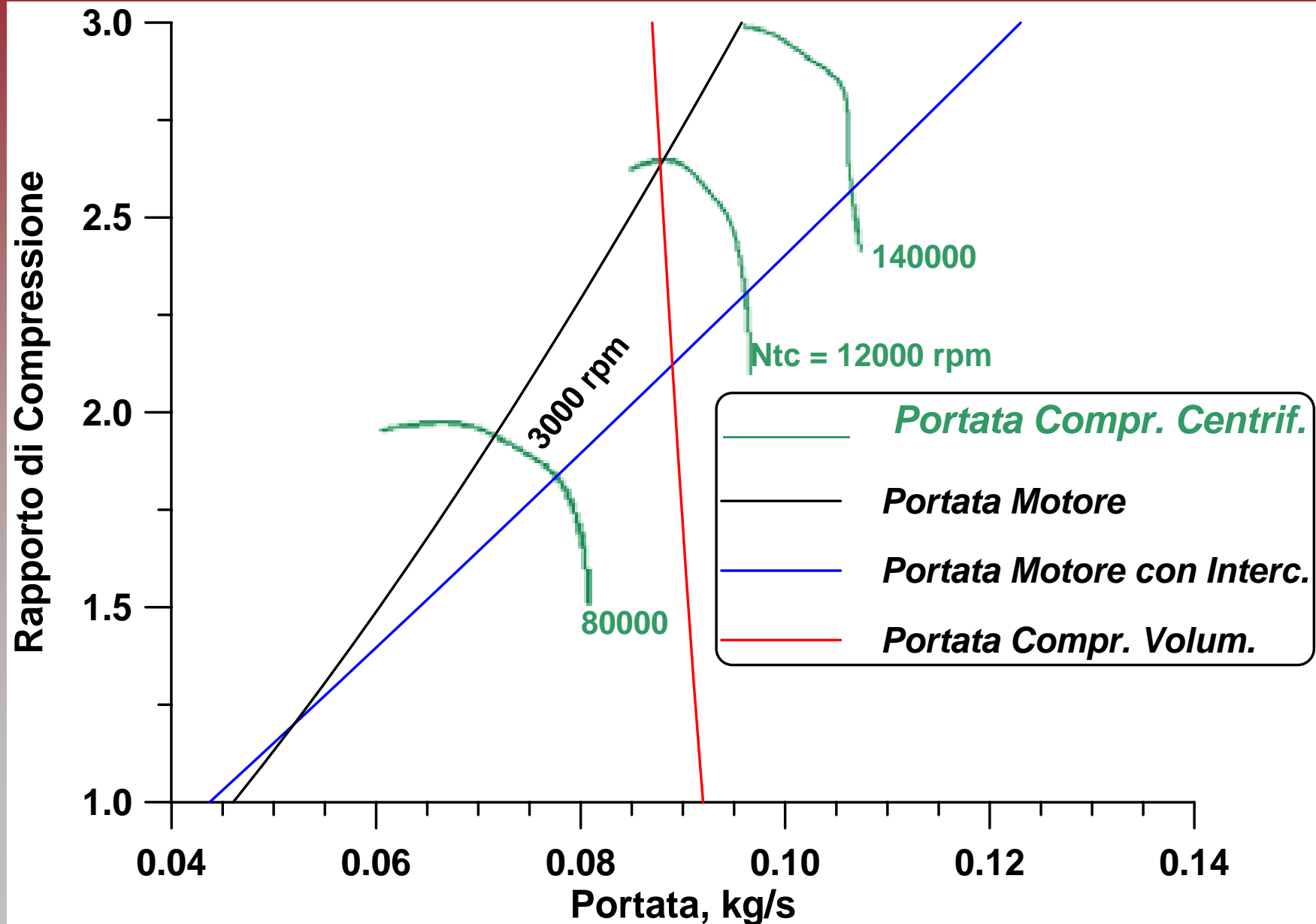


- [Altri esempi](#)



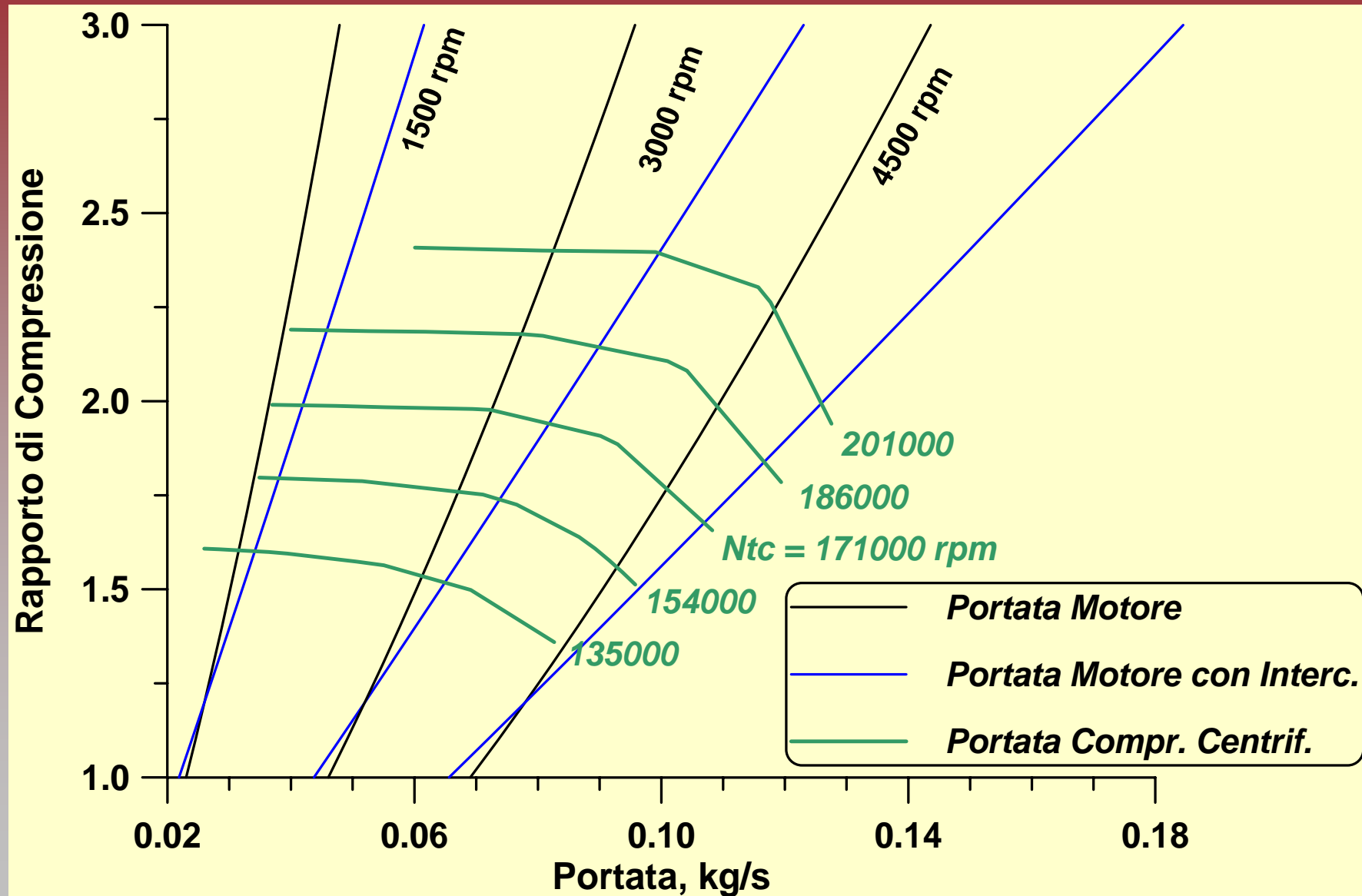
Accoppiamento Motore – Compressore Centrifugo

Confronto con Compressore Volumetrico



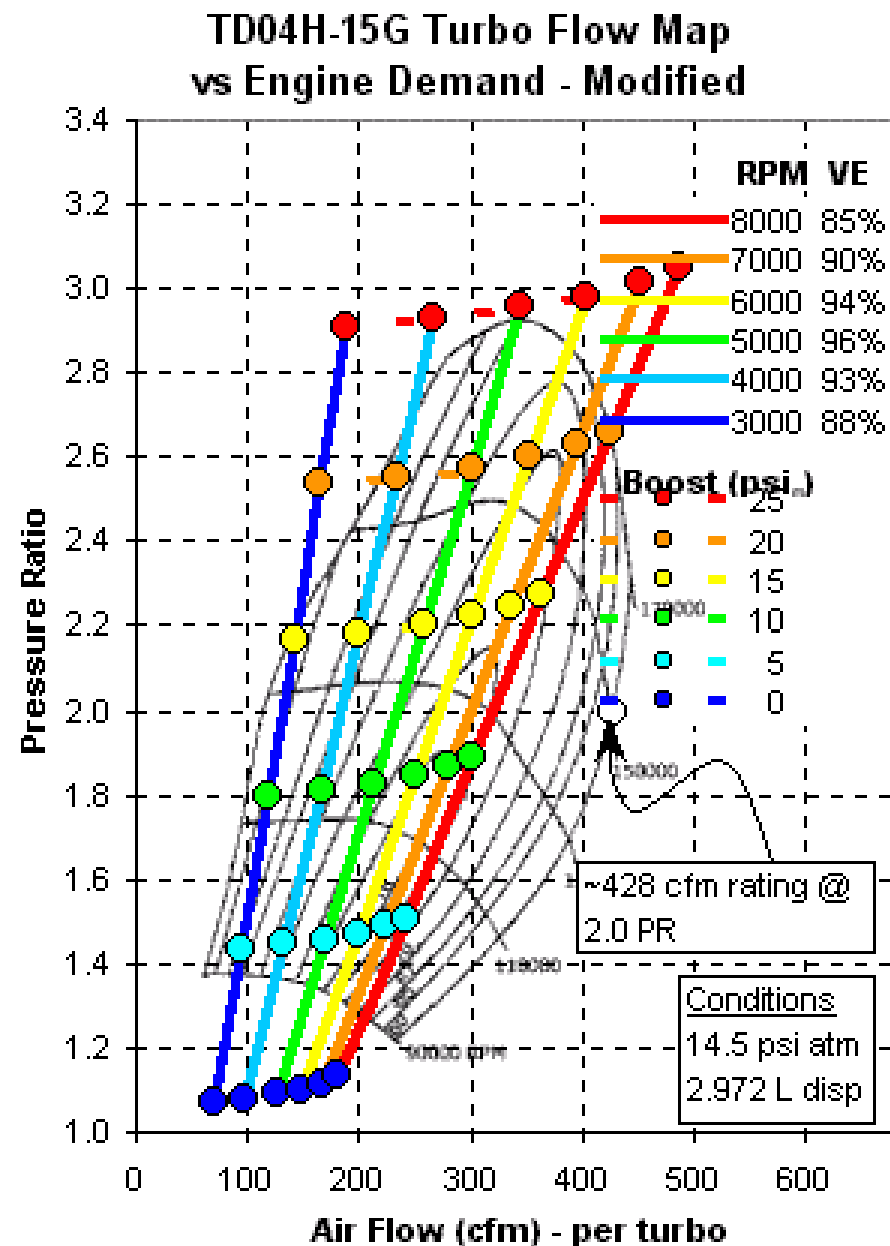
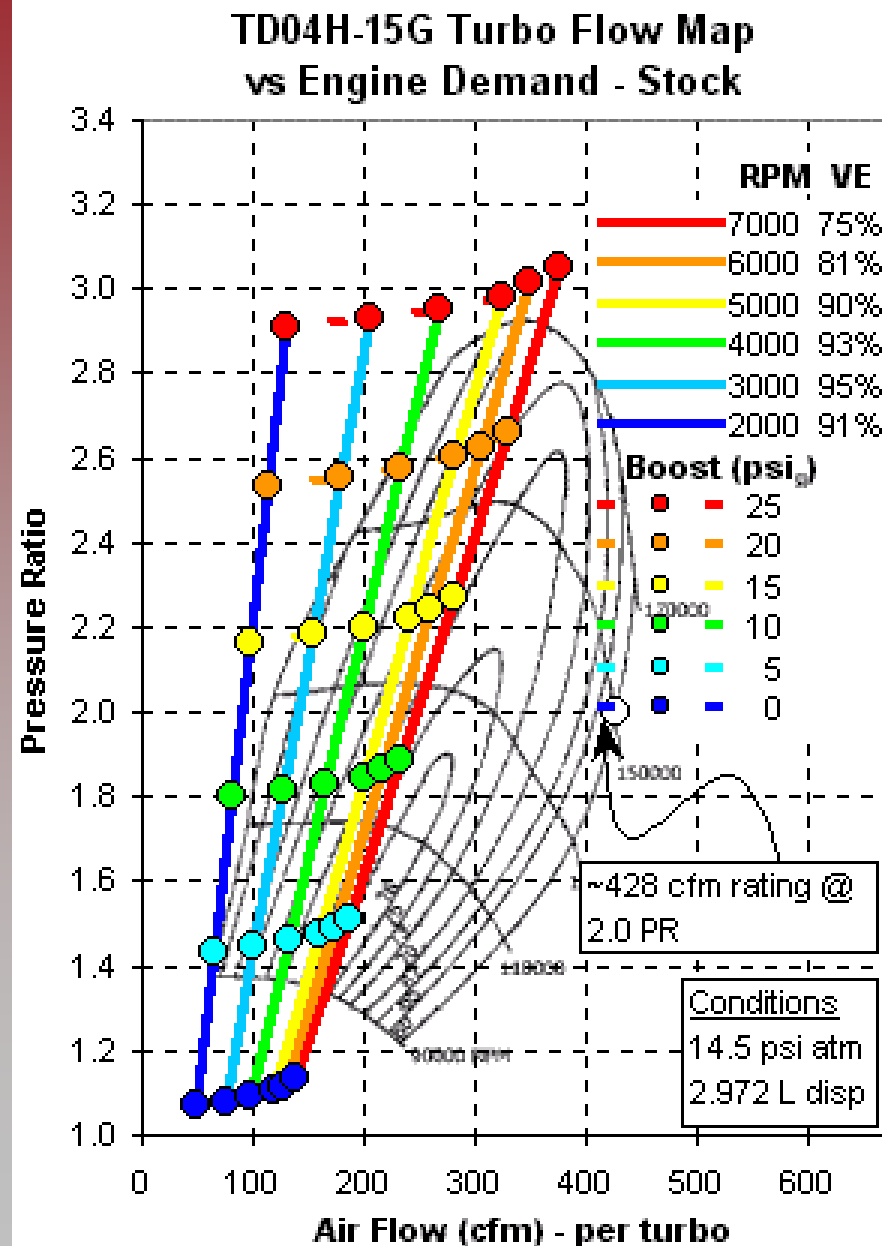
Accoppiamento Motore – Compressore Centrifugo

Piano Completo di Accoppiamento



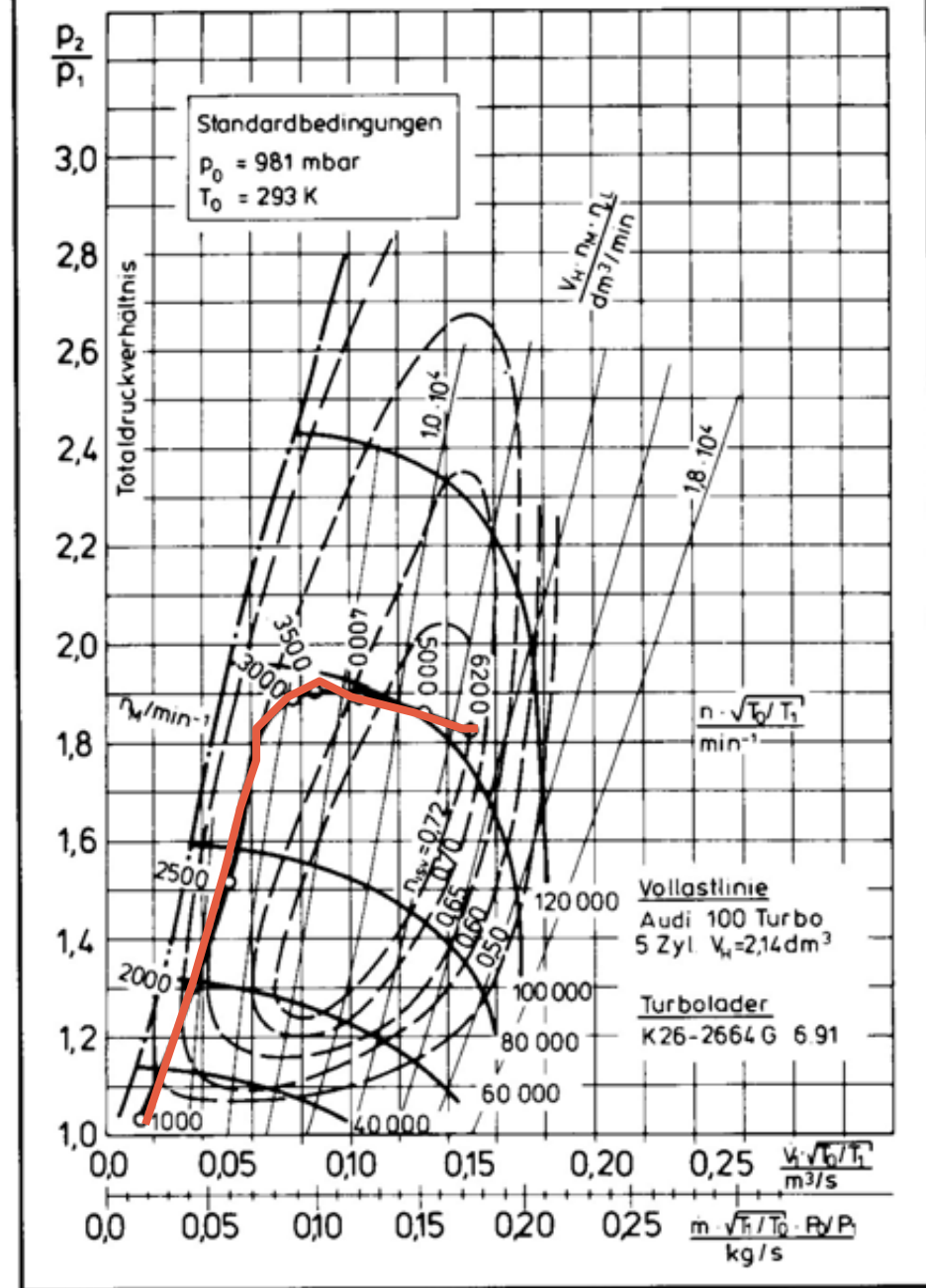
Accoppiamento Motore – Compressore Centrifugo

Esempi di Linee di Accoppiamento



Accoppiamento Motore – Compressore Centrifugo

Esempio di Linea di
Accoppiamento
Effettiva



Example compressor map – five-cylinder Audi engine. [KKK]

Accoppiamento Motore – Compressore - Turbina

Portata Motore

$$\dot{m}_a = V_t \frac{n}{60\varepsilon} \rho_a \lambda_v =$$

Portata Compressore

$$\dot{m}_c = f \left(\frac{p_1}{\sqrt{T_1}}, \frac{N_{tc}}{\sqrt{T_1}}, \beta_c \right)$$

$$\dot{m}_{exh} = \dot{m}_a + \dot{m}_f$$

Portata Gas di Scarico

*Portata
Turbina*

$$\dot{m}_{exh} - \dot{m}_{WG} = \dot{m}_t = f \left(\frac{p_{exh}}{\sqrt{T_{exh}}}, \frac{N_{tc}}{\sqrt{T_{exh}}}, \beta_t \right)$$

*Portata
Corretta*

$$\dot{m}_{t,corr.} = \dot{m}_c \frac{\sqrt{T_{exh}/T_{rif,t}}}{p_{exh}/p_{rif,t}}$$

*Velocità
Corretta*

$$N_{t,corr.} = \frac{N_{tc}}{\sqrt{T_{exh}/T_{rif,t}}}$$

Accoppiamento Compressore - Turbina

Rapporto di Compressione

$$\beta_c \propto \left(\frac{\bar{P}_{boost}}{p_a} \right)$$

Rapporto di Espansione

$$\beta_t \propto \left(\frac{\bar{P}_{exh}}{p_a} \right)$$

Potenza Assorbita dal Compressore

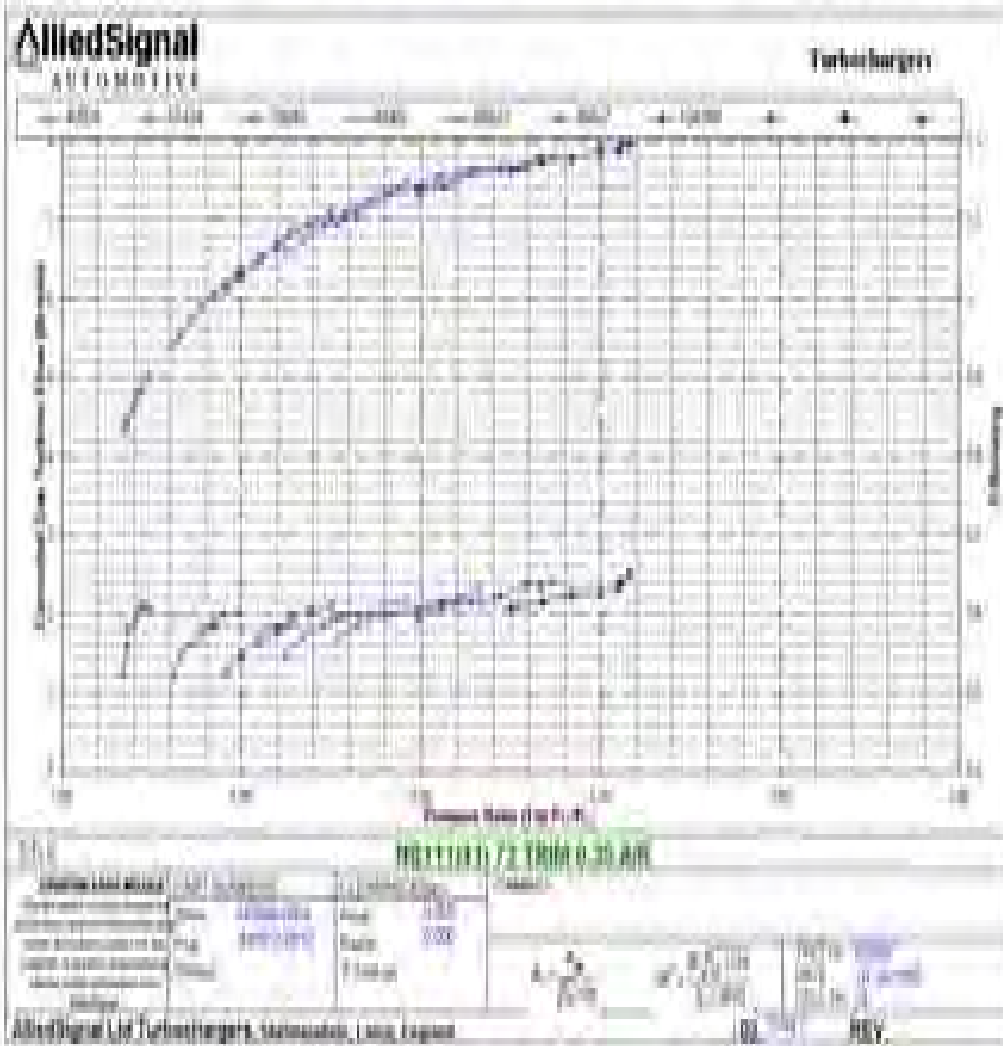
$$P_c = \dot{m}_c \left[c_p T_1 \left(\beta_c^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right) \right] \frac{1}{\eta_{ac}} =$$

Potenza Resa dalla Turbina

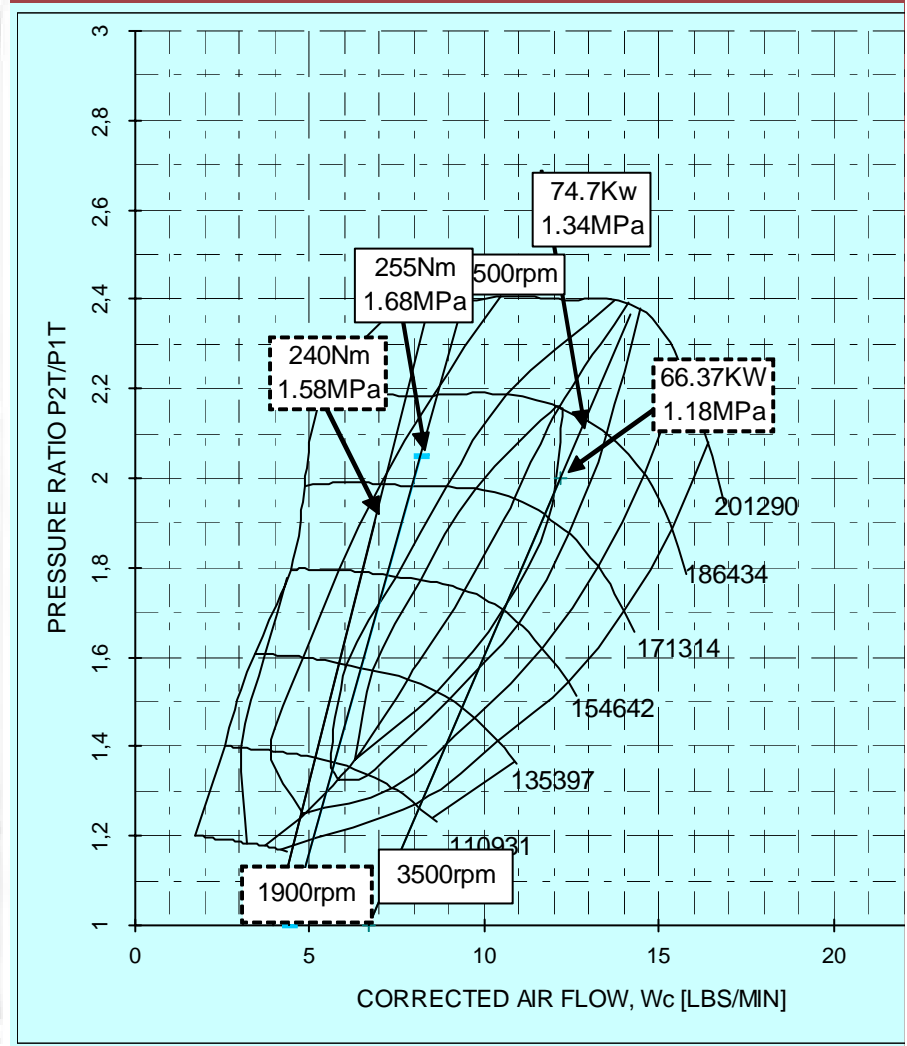
$$= P_t = \dot{m}_t \left[c_{p,t} \bar{T}_{exh} \left(\beta_t^{\frac{k_t-1}{k_t}} - 1 \right) \right] \eta_{at} \eta_{m,tc}$$

Accoppiamento Compressore - Turbina

Mappa Turbina

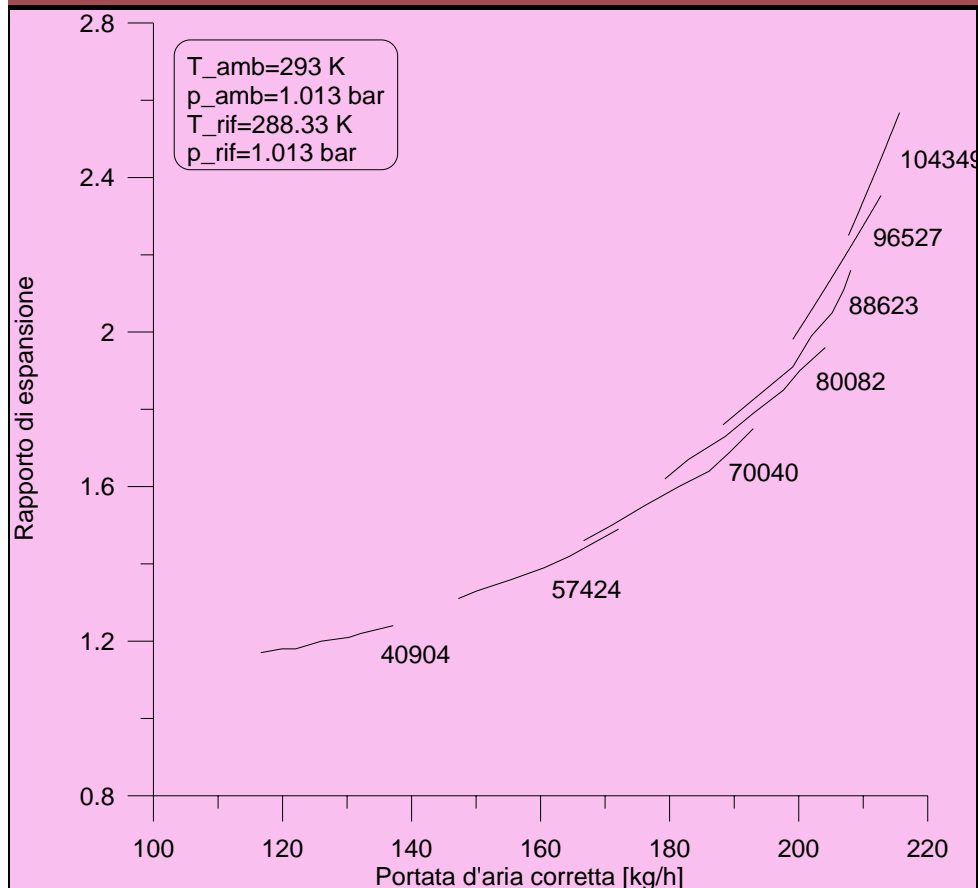


Mappa Compressore

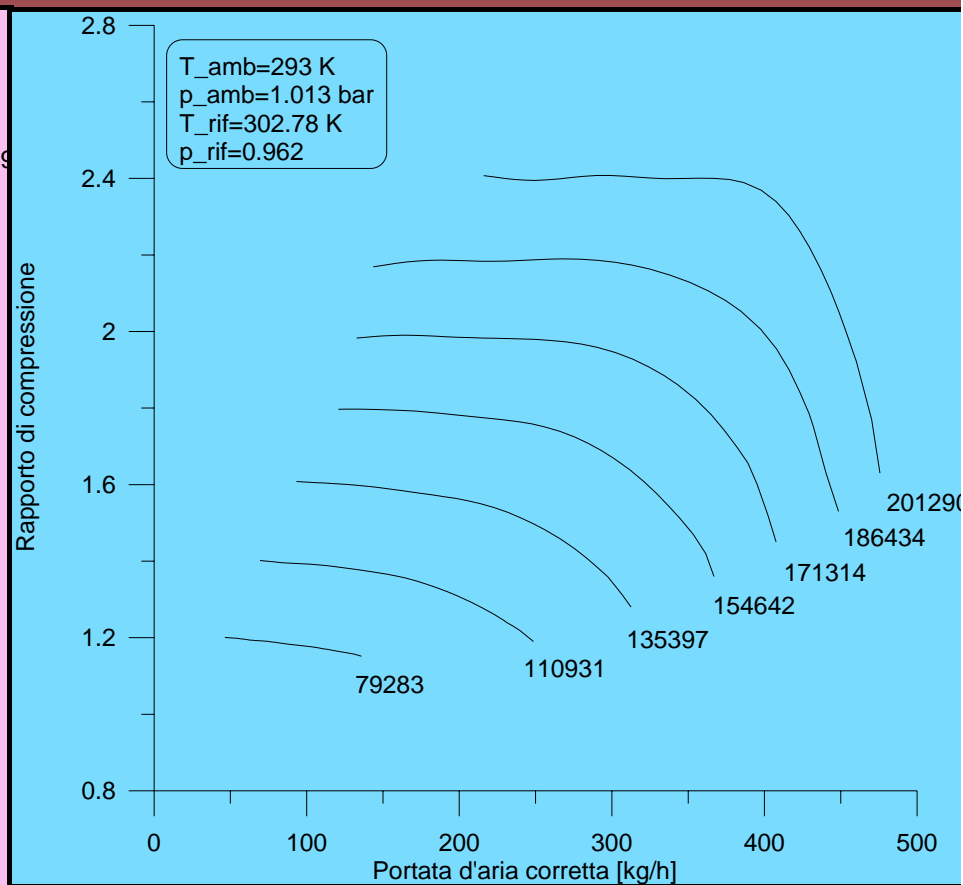


Accoppiamento Compressore - Turbina

Mappa Turbina

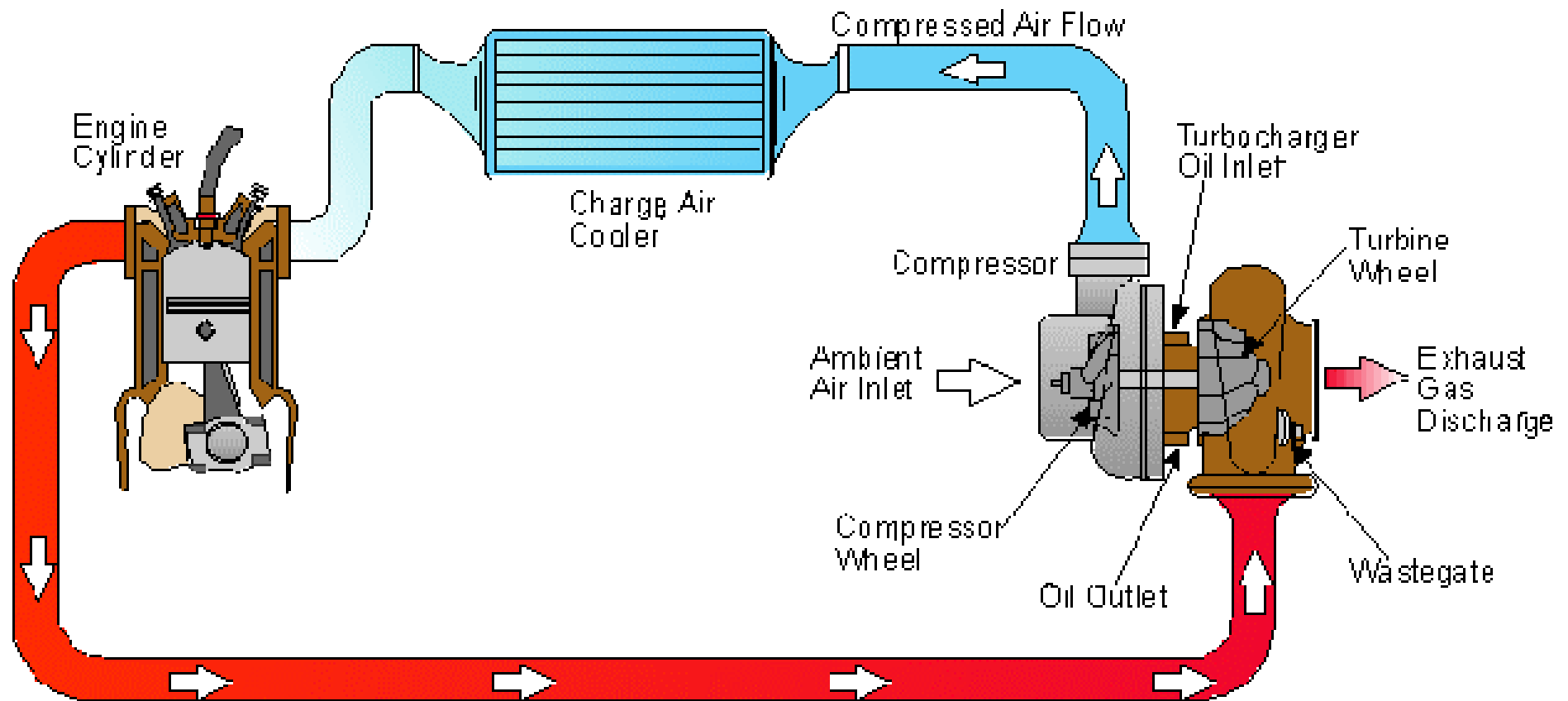


Mappa Compressore



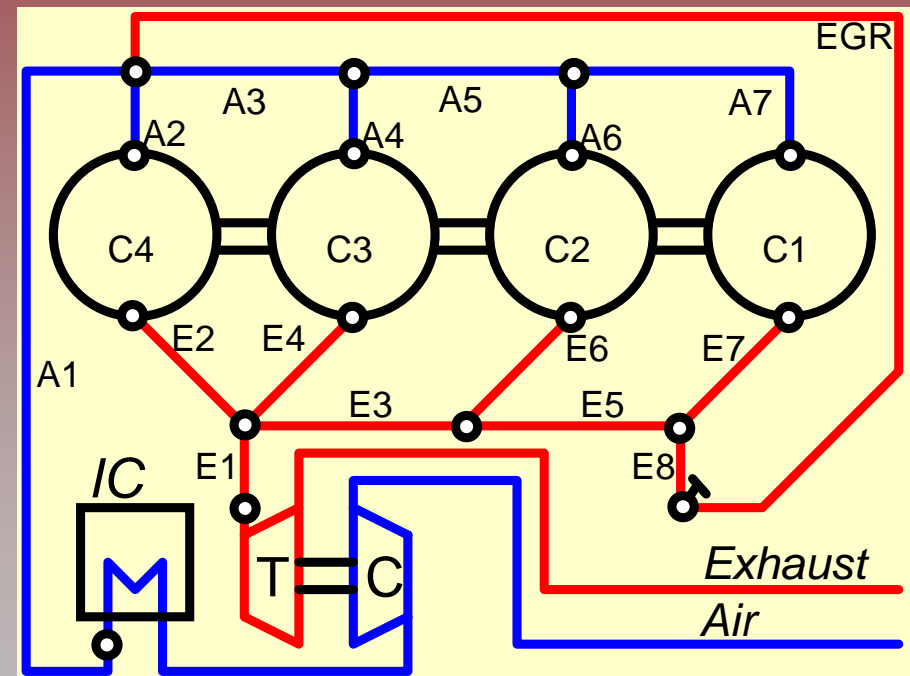
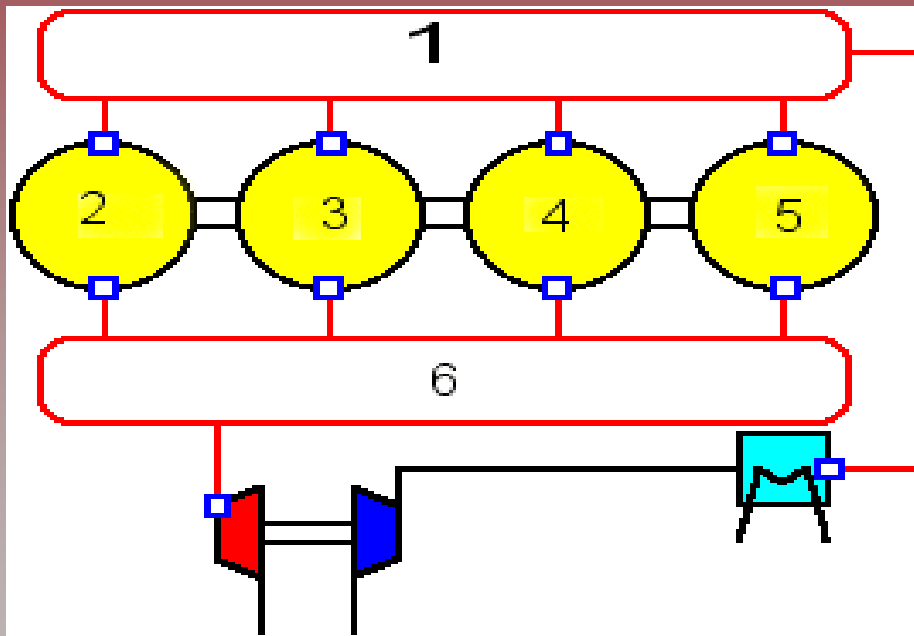
Il Motore con Turbocompressore a gas di scarico

Schema di principio



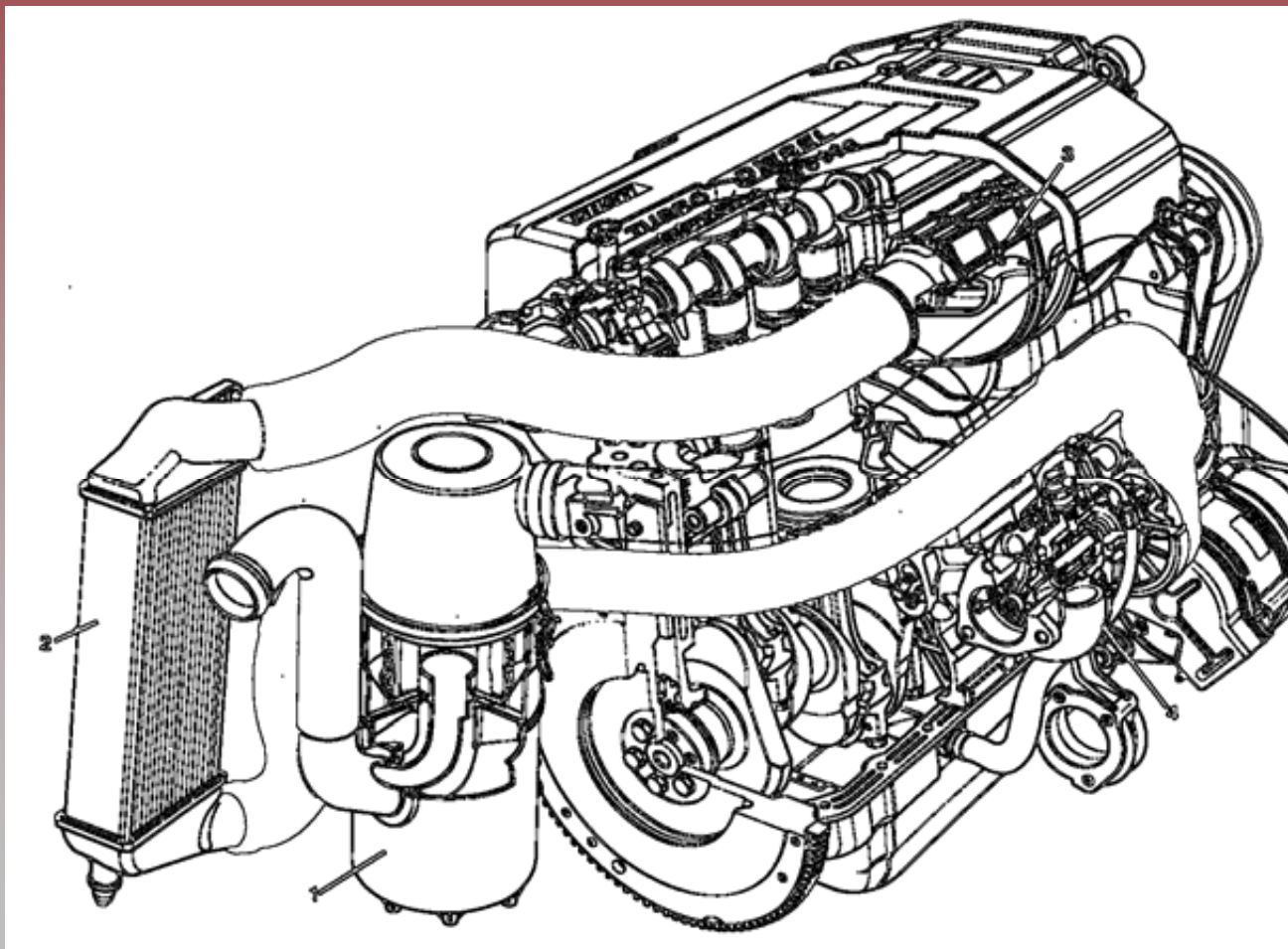
Il Motore con Turbocompressore a gas di scarico

Schema di principio per motore multi-cilindro



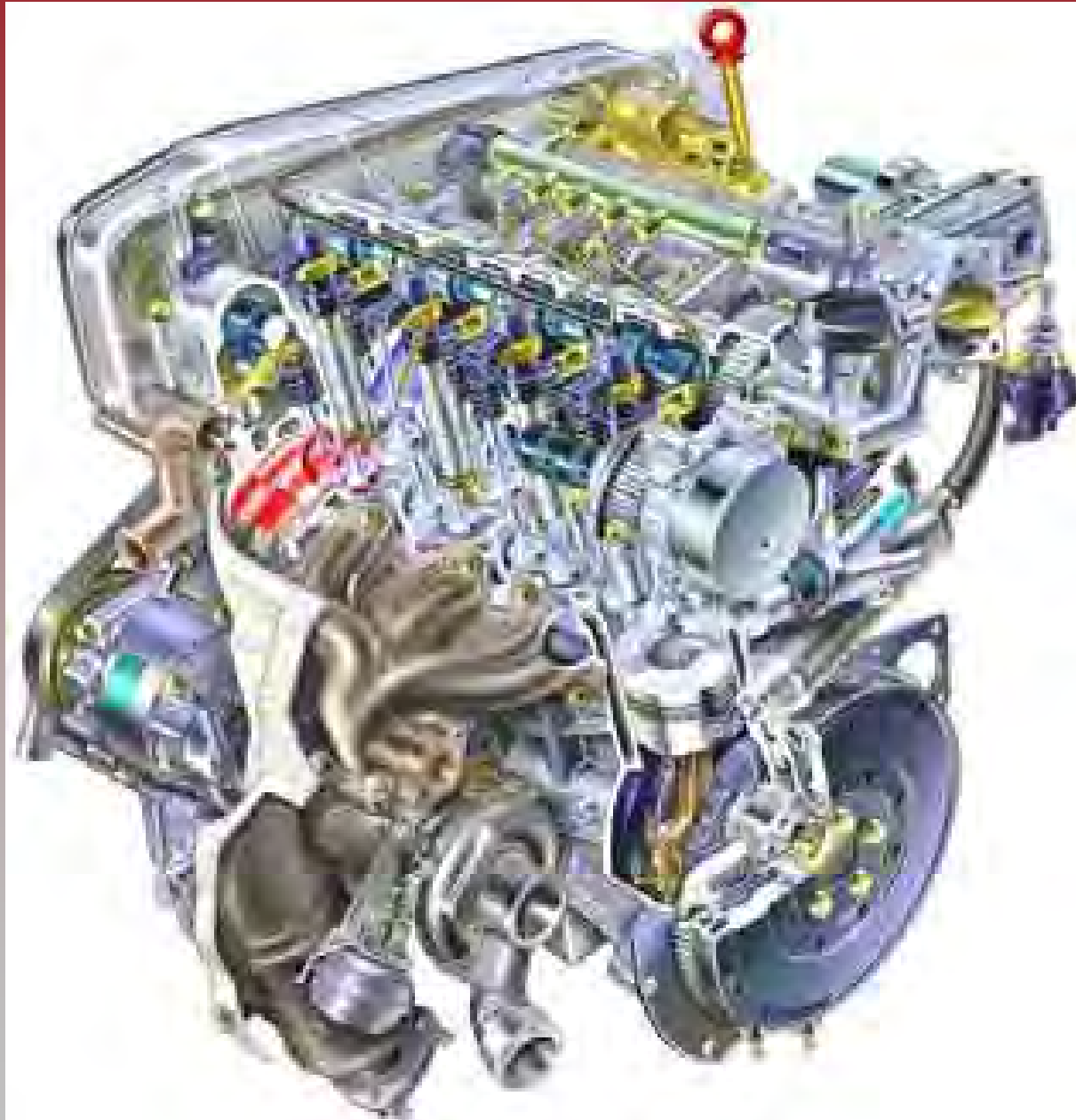
Il Motore con Turbocompressore a gas di scarico

FIAT Croma 1.9 TD (1993)



Il Motore con Turbocompressore a gas di scarico

*FIAT –
ALFA ROMEO
1.9 JTD*



Il Motore con Turbocompressore a gas di scarico

*Alfa Romeo
1.9 JTD*

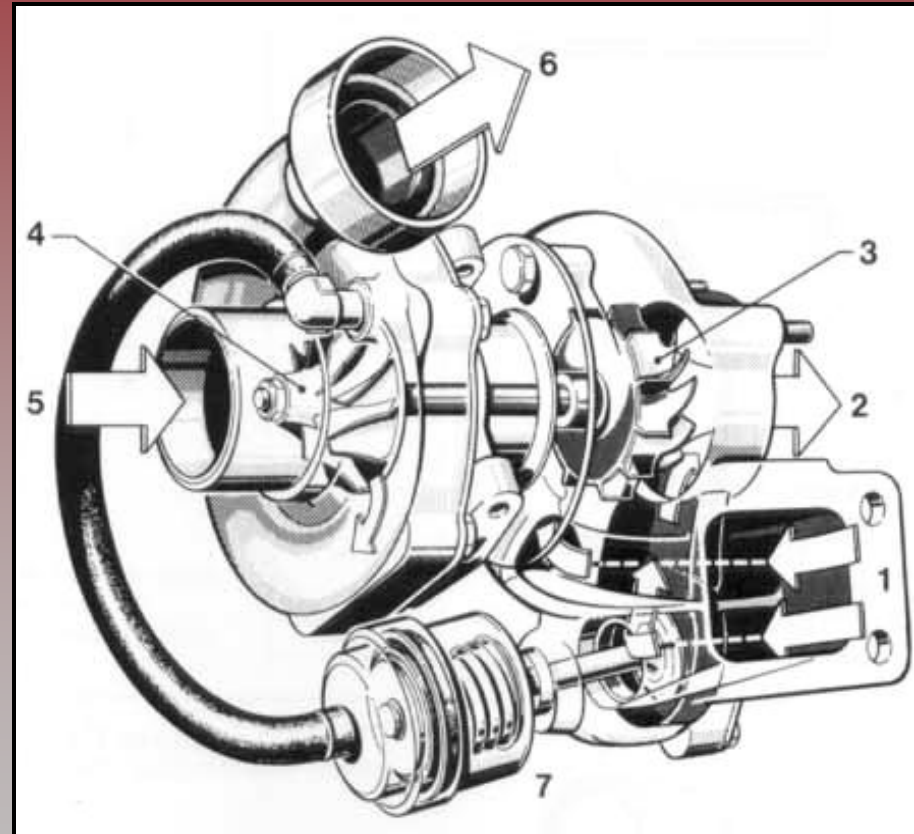
*Esempi vari
di MCI
Sovralimentati
(1) (2)*



Il Turbocompressore a gas di scarico

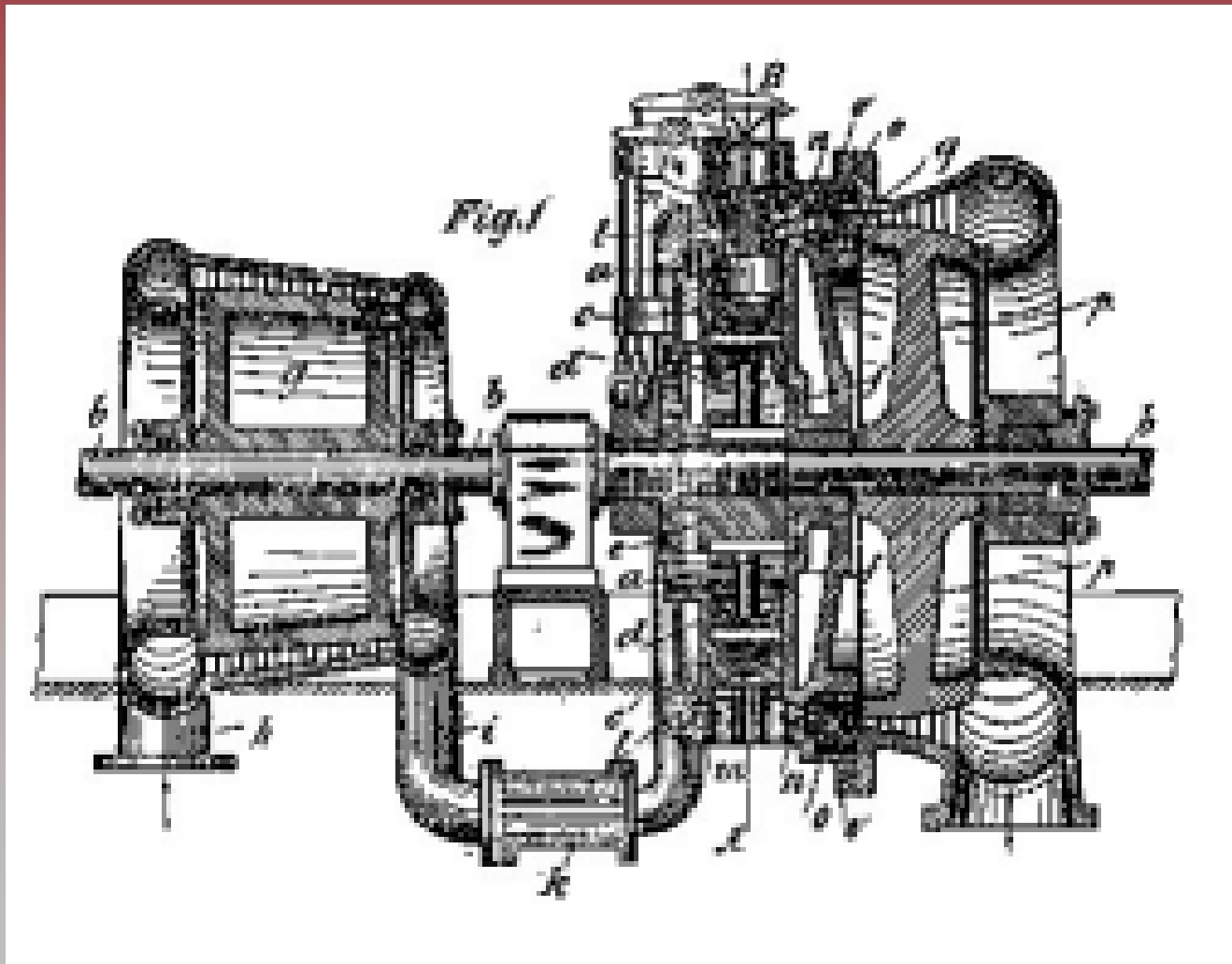
Il Turbocompressore

1. gas di scarico in turbina;
2. uscita dei gas di scarico;
3. girante della turbina;
4. girante del compressore;
5. ingresso aria nel compressore;
6. aria compressa al motore;
7. attuatore per valvola di regolazione ("Waste-Gate").



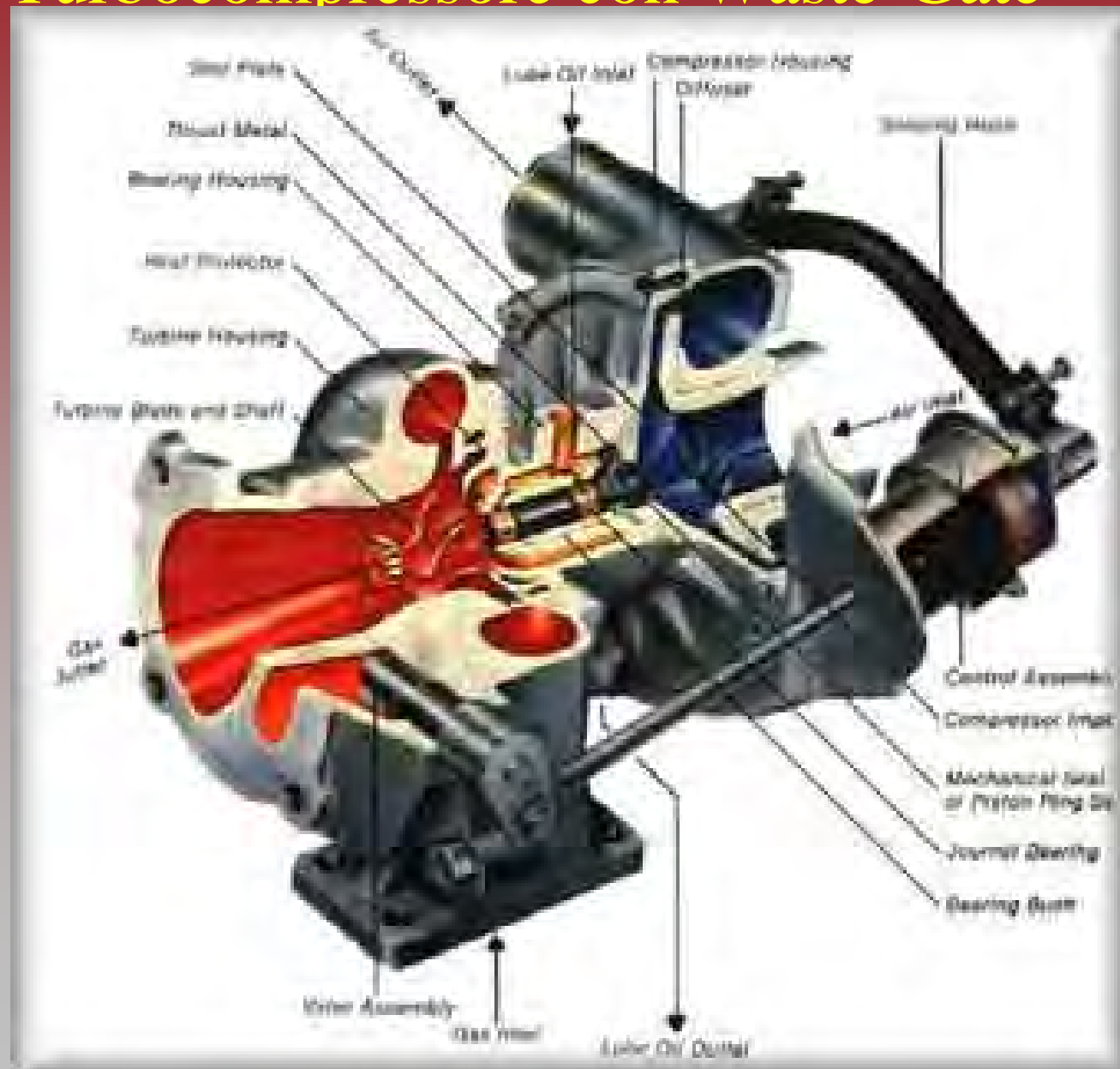
Il Turbocompressore a gas di scarico

Il Primo Turbocompressore (A. Buchi, 1912)



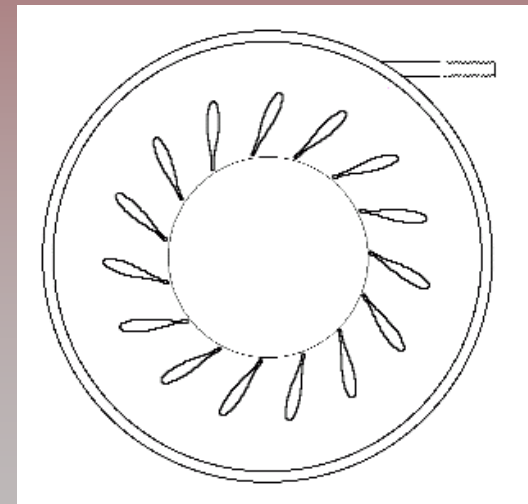
Il Turbocompressore a gas di scarico

Turbocompressore con Waste-Gate



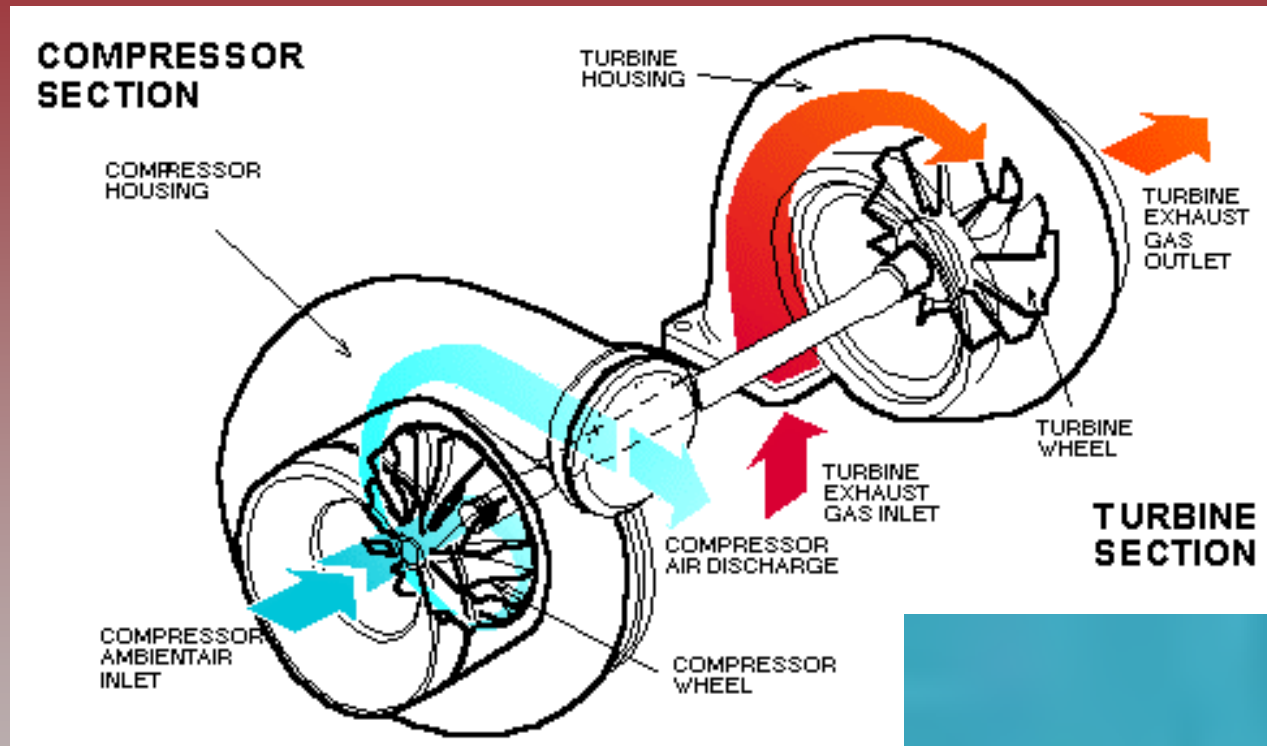
Il Turbocompressore a gas di scarico

Turbocompressore con Turbina a Geometria Variabile



Il Turbocompressore a gas di scarico

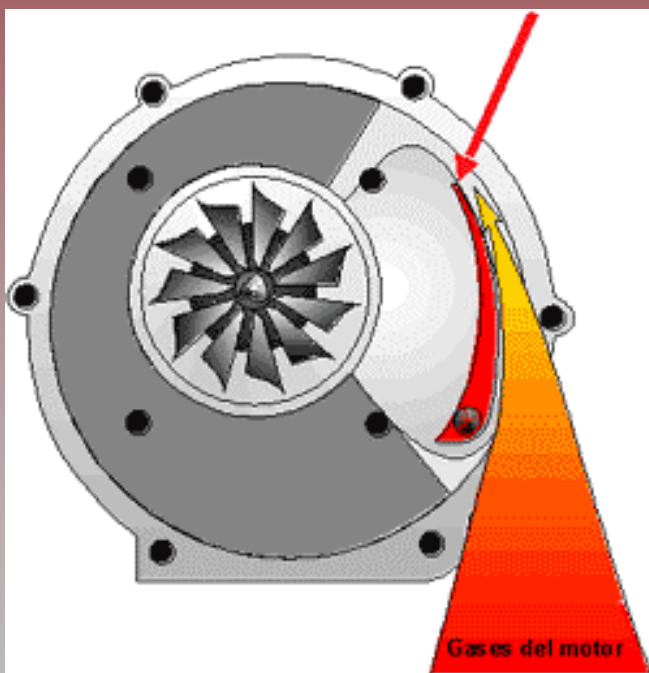
Dettagli del Turbocompressore



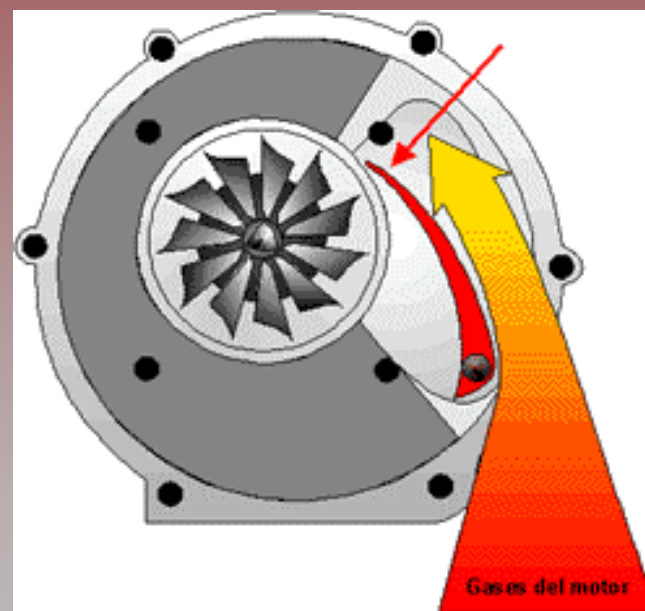
Il Turbocompressore a gas di scarico

Turbina a Geometria Variabile V.A.T.

Variable Area Turbochargers VAT



At low motor r.p.m.

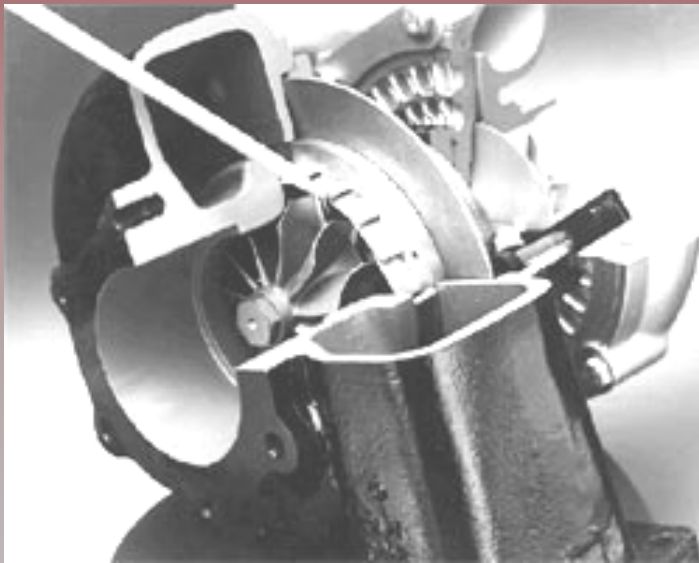


At high motor r.p.m.

Il Turbocompressore a gas di scarico

Turbina a Geometria Variabile V.N.T.

Variable Nozzle Turbochargers VNT



At low motor r.p.m.



At high motor r.p.m.

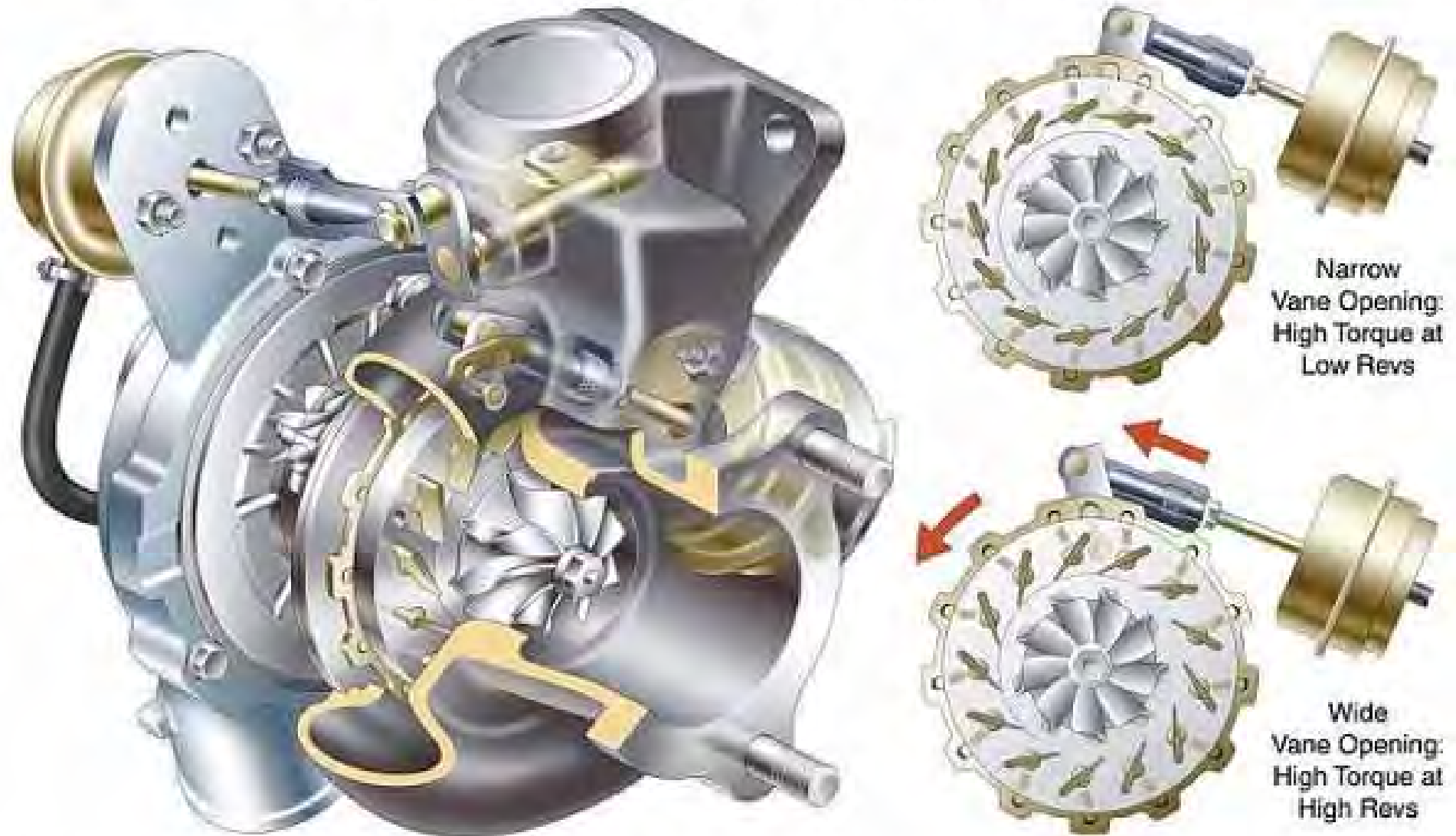
Il Turbocompressore a gas di scarico

Turbina a Geometria Variabile Garrett VNT25



Il Turbocompressore a gas di scarico

VNT (Variable Nozzle Turbine) Turbo

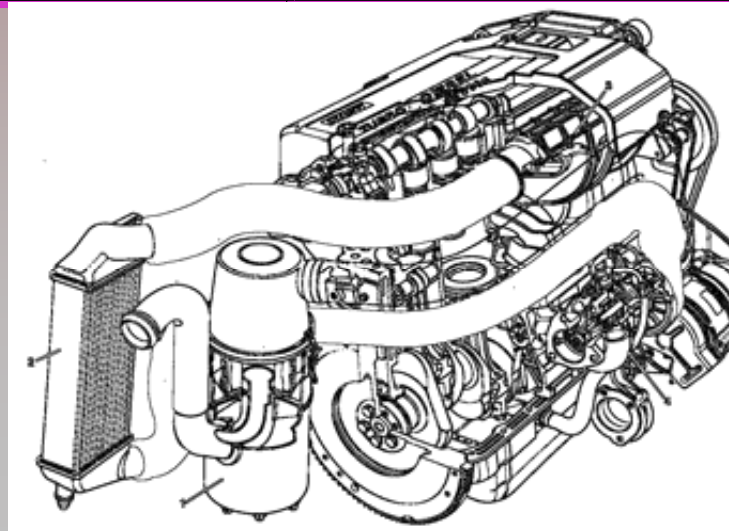


Volvo 5-cylinder Common Rail Diesel

Un esempio di motore con turbocompressore

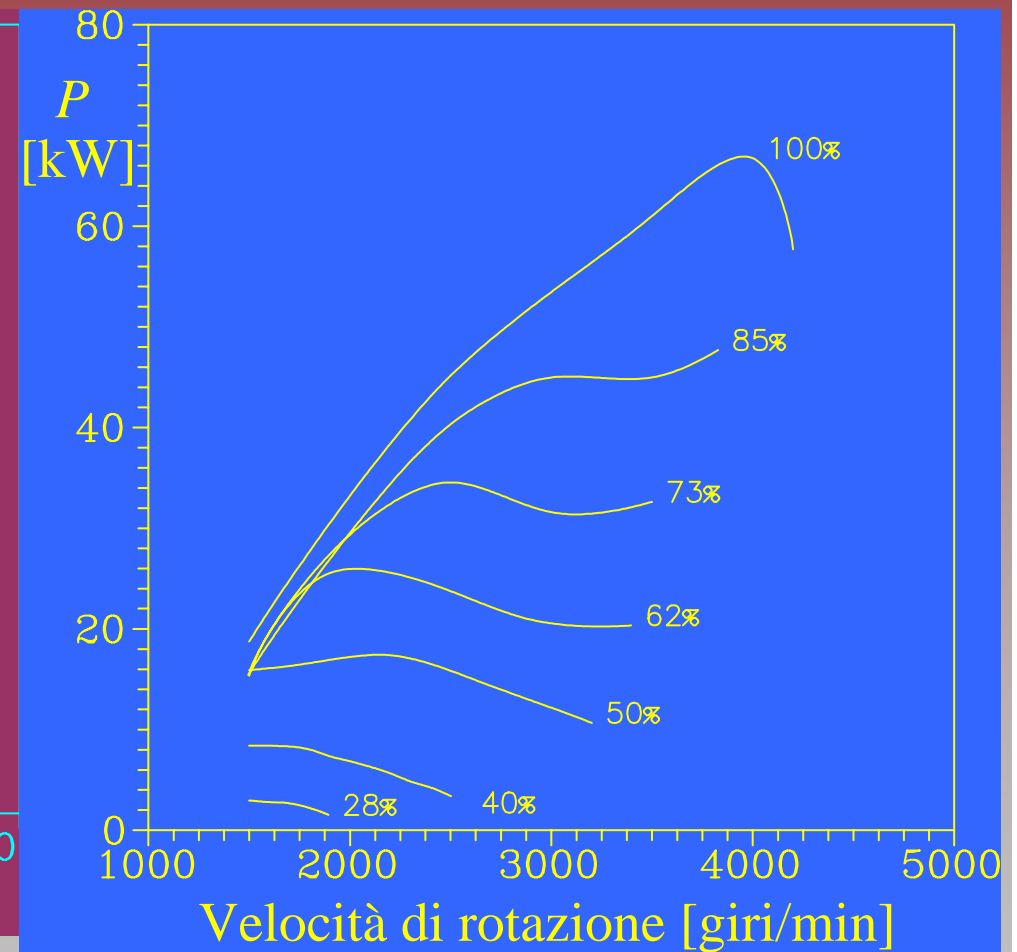
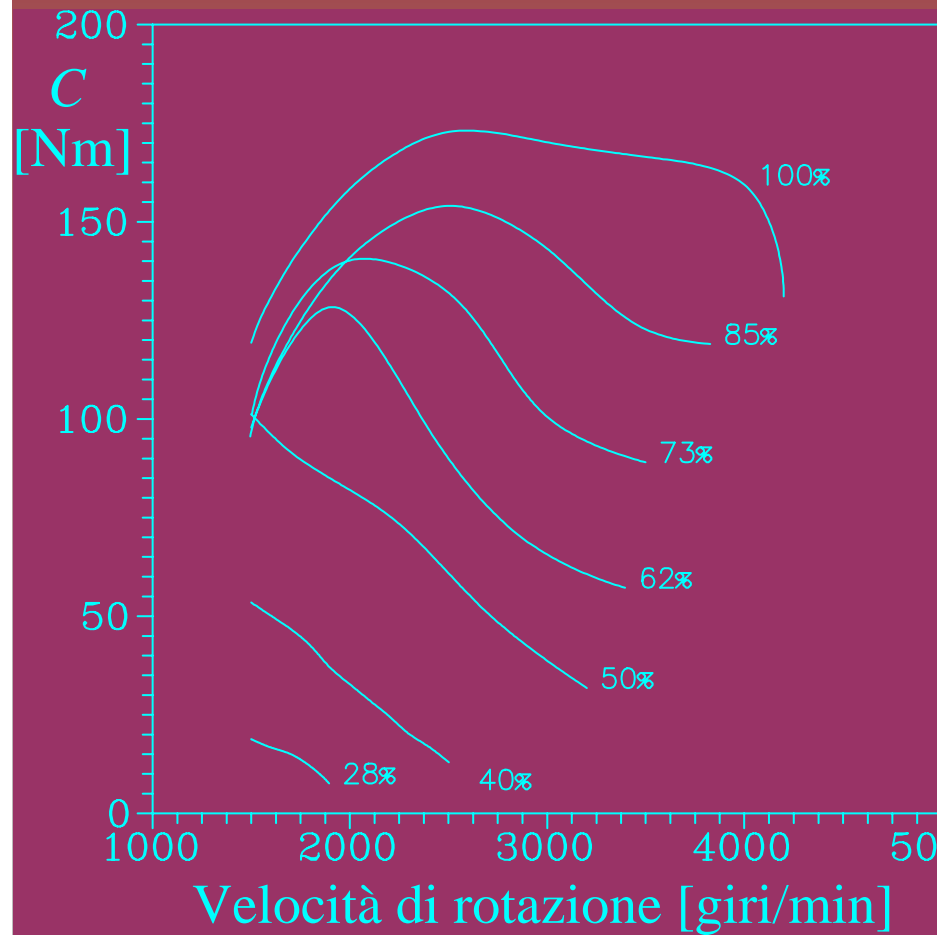
FIAT Croma 1.9 TD

Motore	Diesel -Turbo Interc. - FIAT 154 D1.000
Alimentazione	iniezione mecc. diretta - Bosch VER 493
Numero di cilindri	4
Alesaggio x corsa	82.6 mm x 90.0 mm
Lunghezza di biella	145 mm
Cilindrata totale	1929 cm ³
Rapporto di compress.	19.8
Turbocompressore	Turbina a geom. variabile - Garret VNT025



Un esempio di motore con turbocompressore

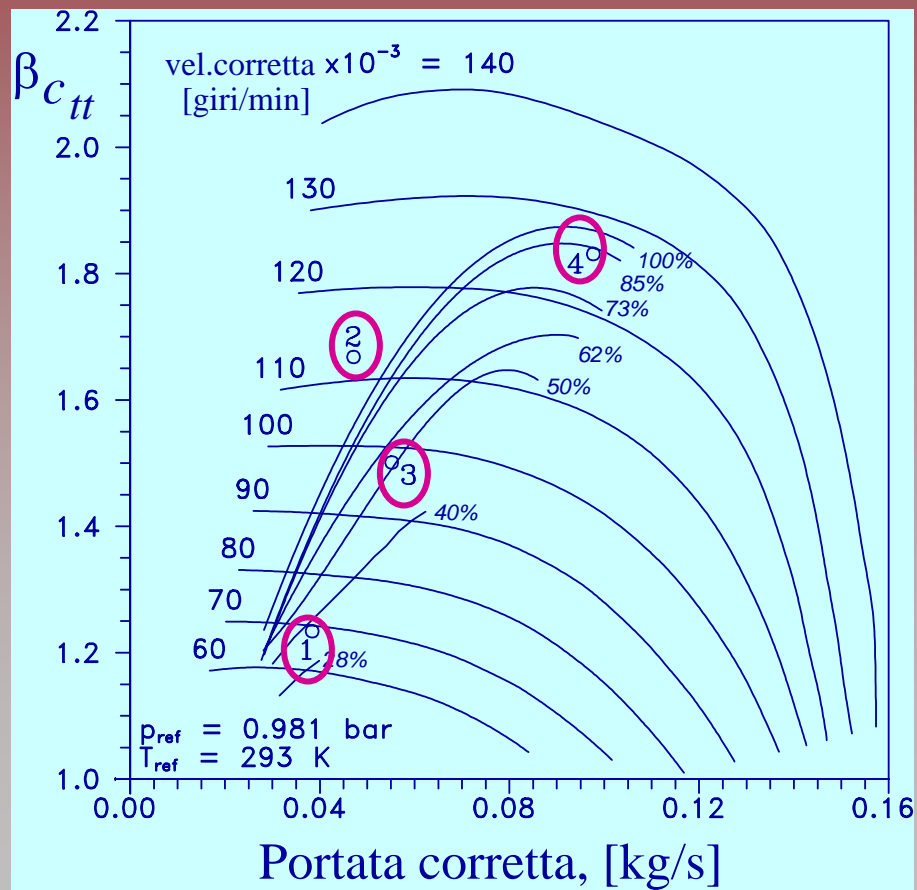
FIAT Croma 1.9 TD



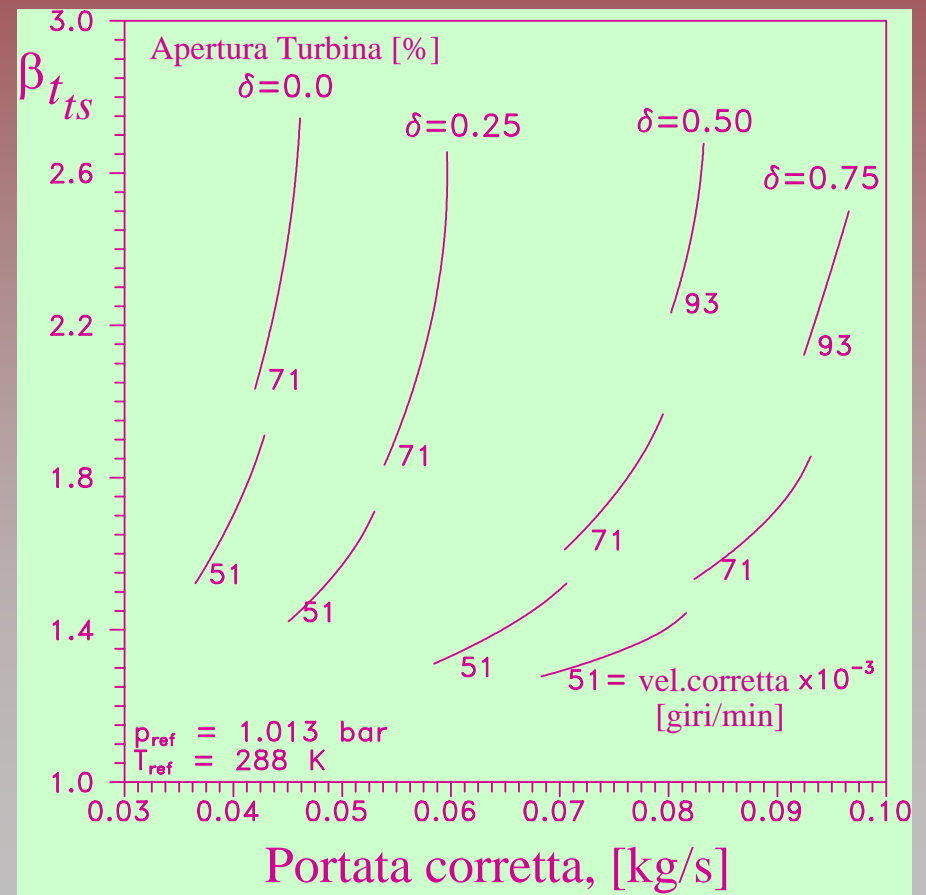
Un esempio di motore con turbocompressore

FIAT Croma 1.9 TD

Compressore



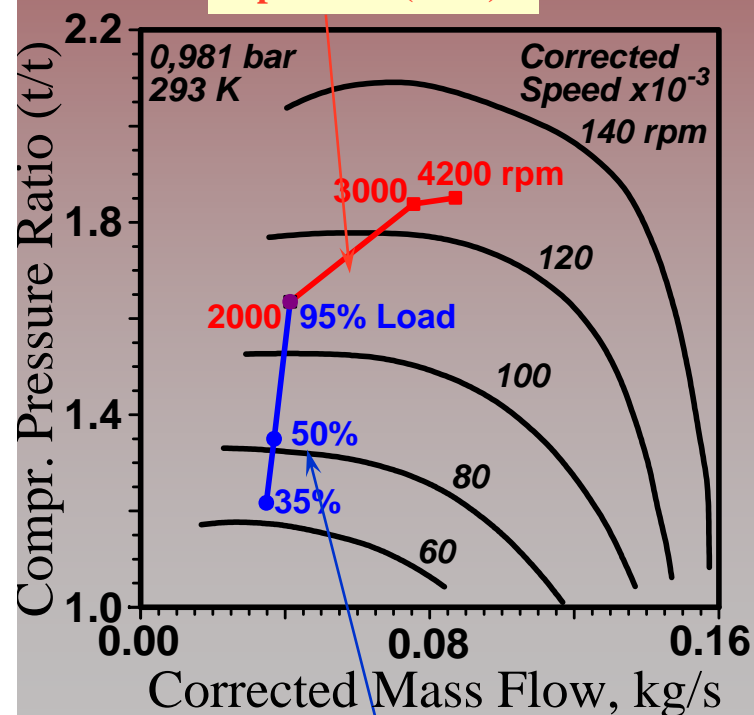
Turbina



Un esempio di motore con turbocompressore

FIAT Croma 1.9 TD

Constant Load
Operation (95%)

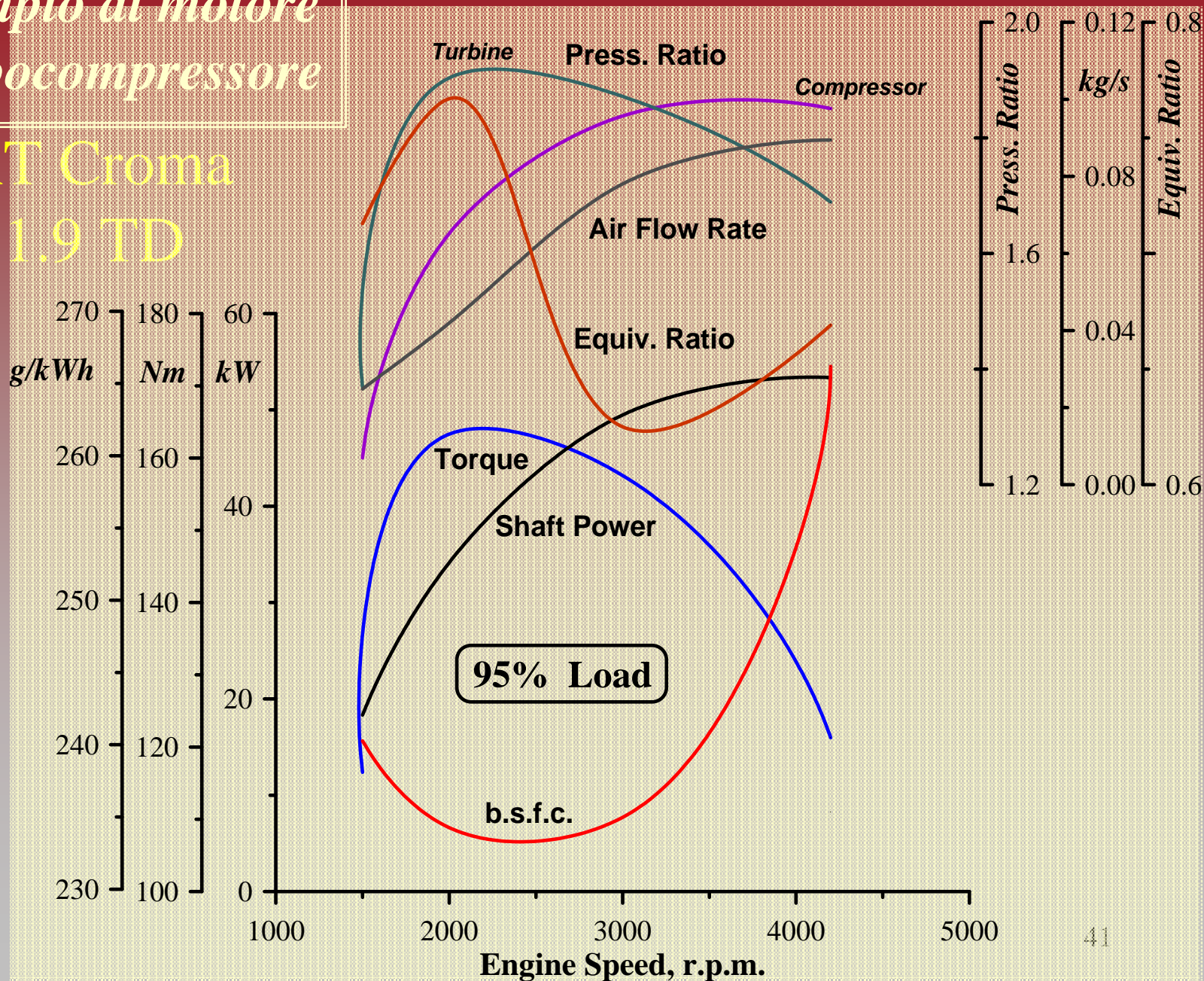


Constant Speed
Operation (2000 rpm)

Punto operativo	1	2	3	4
Vel. rotaz. [giri/min]	2002	2002	2605	4203
Carico [%]	35	100	50	100
Coppia [Nm]	30.8	167.9	62.6	131.1
Potenza [kW]	6.7	35.4	17.2	58.6
p.m.i. [bar]	2.7	11.5	4.7	9.8
p.m.e [bar]	2.0	10.9	4.1	8.5
Cons. spec. [g/kWh]	313.3	232.4	264.9	327.1
Rendimento globale	0.270	0.364	0.320	0.327
Rendimento mecc.	0.750	0.950	0.873	0.871
Rapporto aria/comb.	69.8	21.6	44.45	23.19
Portata comb. [kg/h]	2.02	8.18	4.52	14.97
Portata aria [kg/h]	141.0	172.3	200.9	347.2
Rapp. di compress.	1.23	1.67	1.50	1.83
Rapp. di esp. in Turb.	1.52	1.96	1.95	1.64
Vel. Turbo. [giri/min]	69296	114510	99533	128741
Apert. Turbina [%]	0	7	4	55
T _{c1} [K]	301.6	302.3	303.4	306.0
T _{c2} [K] (dopo l'inter.)	317.5	332.8	334.8	358.2
T _{t1} [K]	463	781	569	898
T _{t2} [K]	447	706	534	813

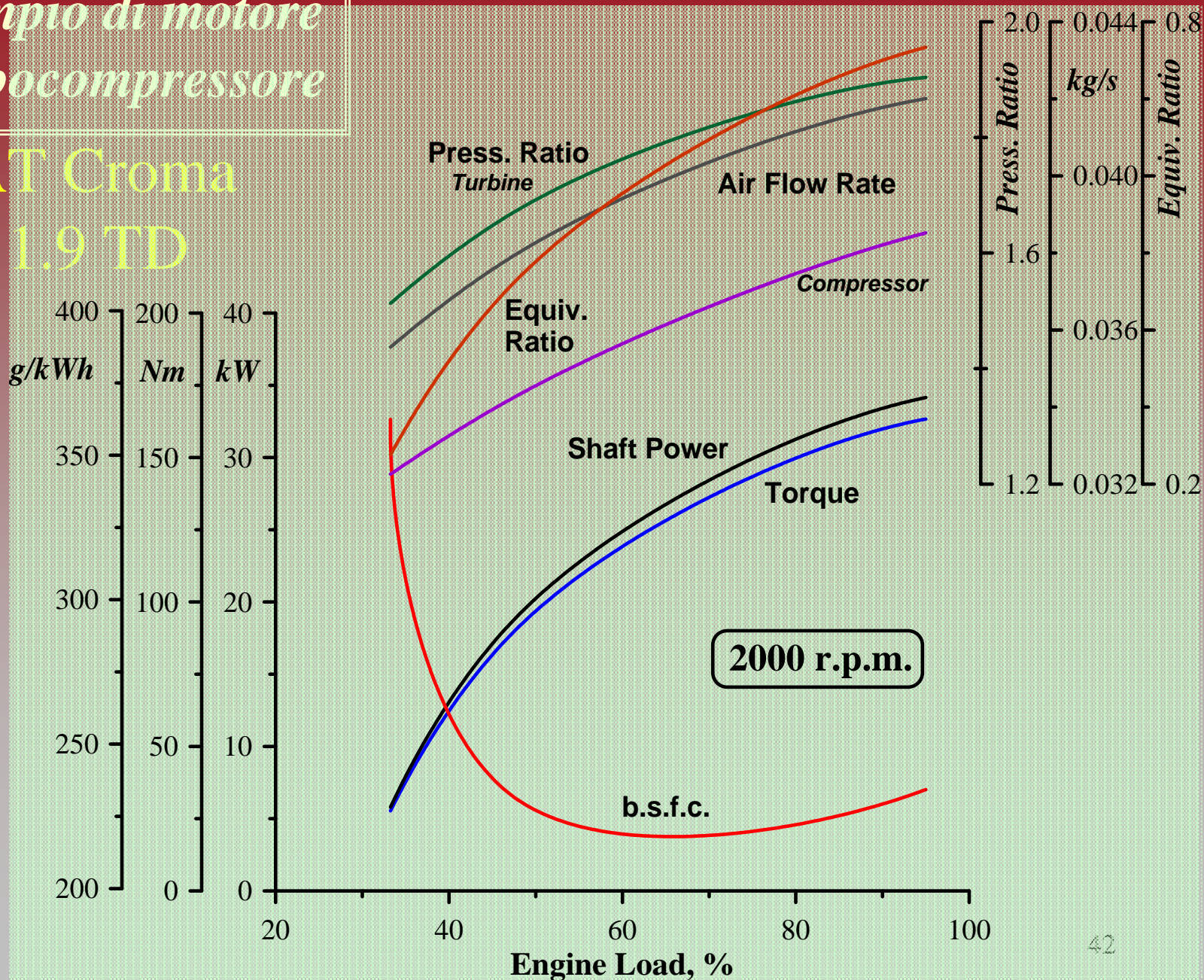
Un esempio di motore con turbocompressore

FIAT Croma 1.9 TD



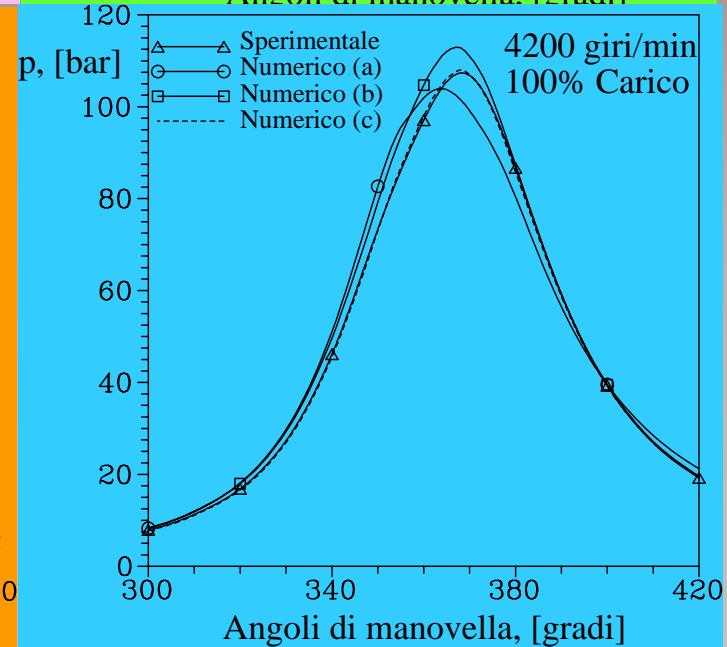
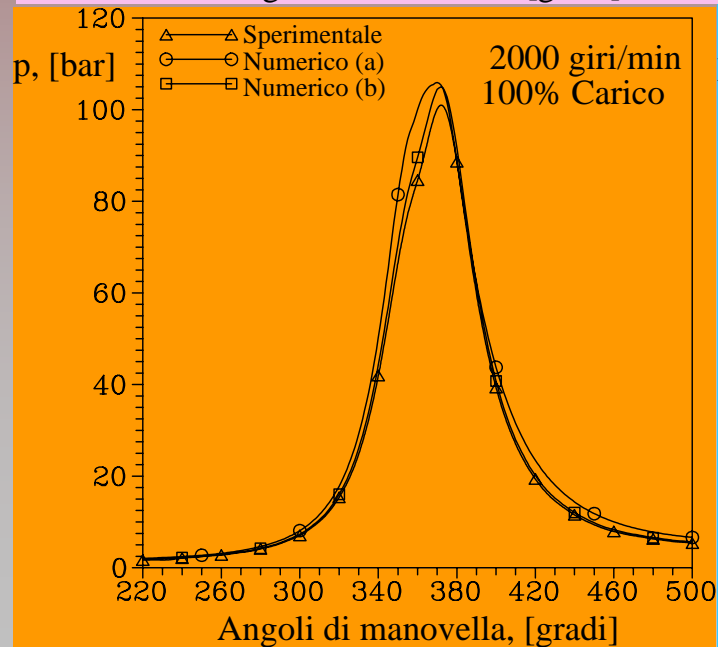
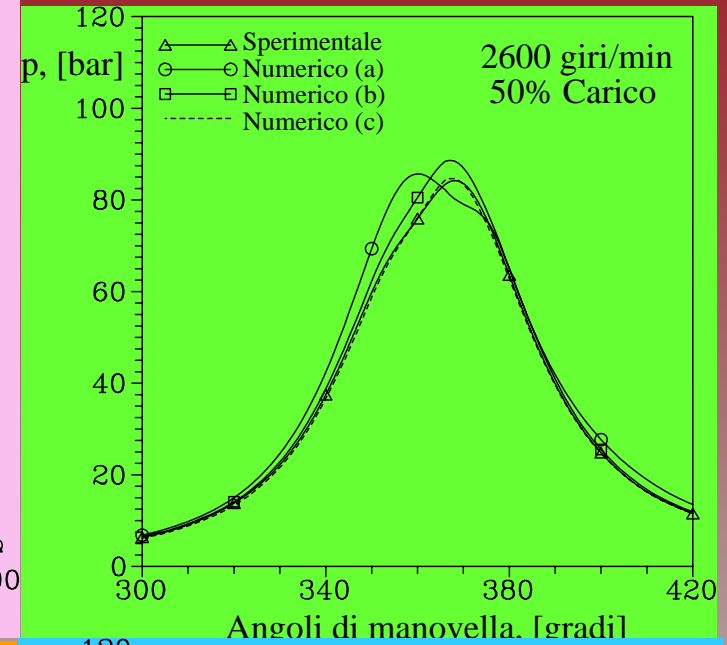
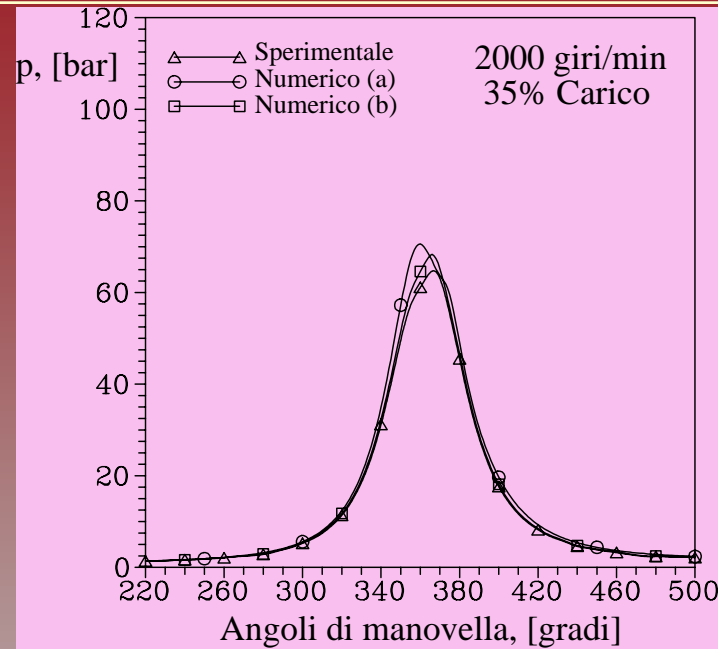
Un esempio di motore con turbocompressore

FIAT Croma 1.9 TD



Un esempio di motore con turbocompressore

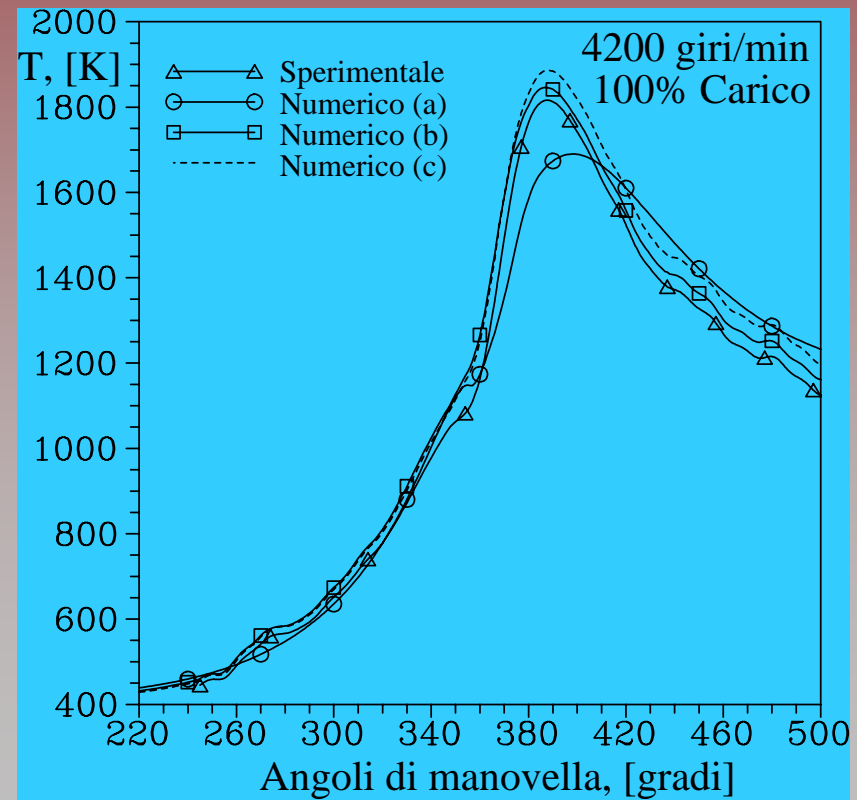
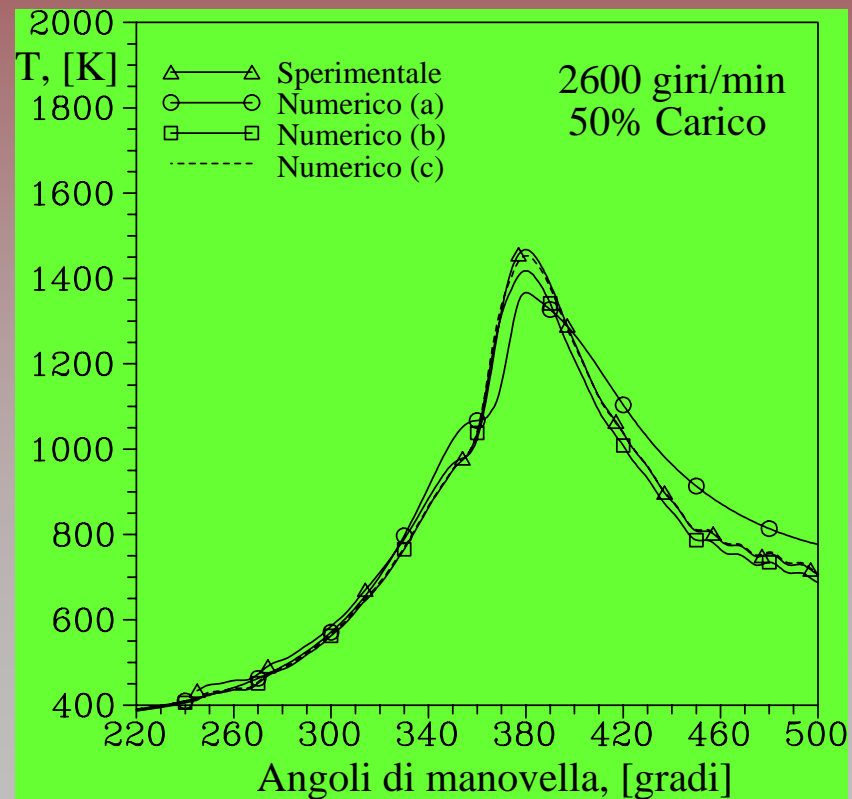
FIAT
Croma
1.9 TD
Pressione
Nei cilindri



Un esempio di motore con turbocompressore

FIAT Croma 1.9 TD

Temperatura nei cilindri

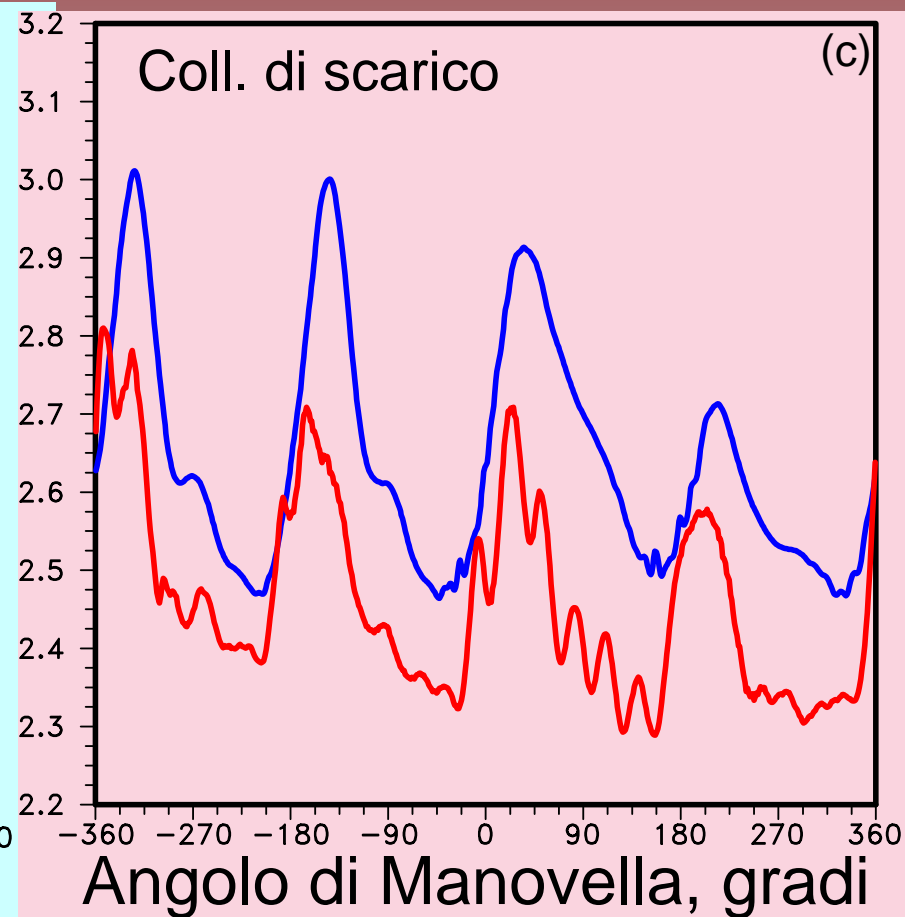
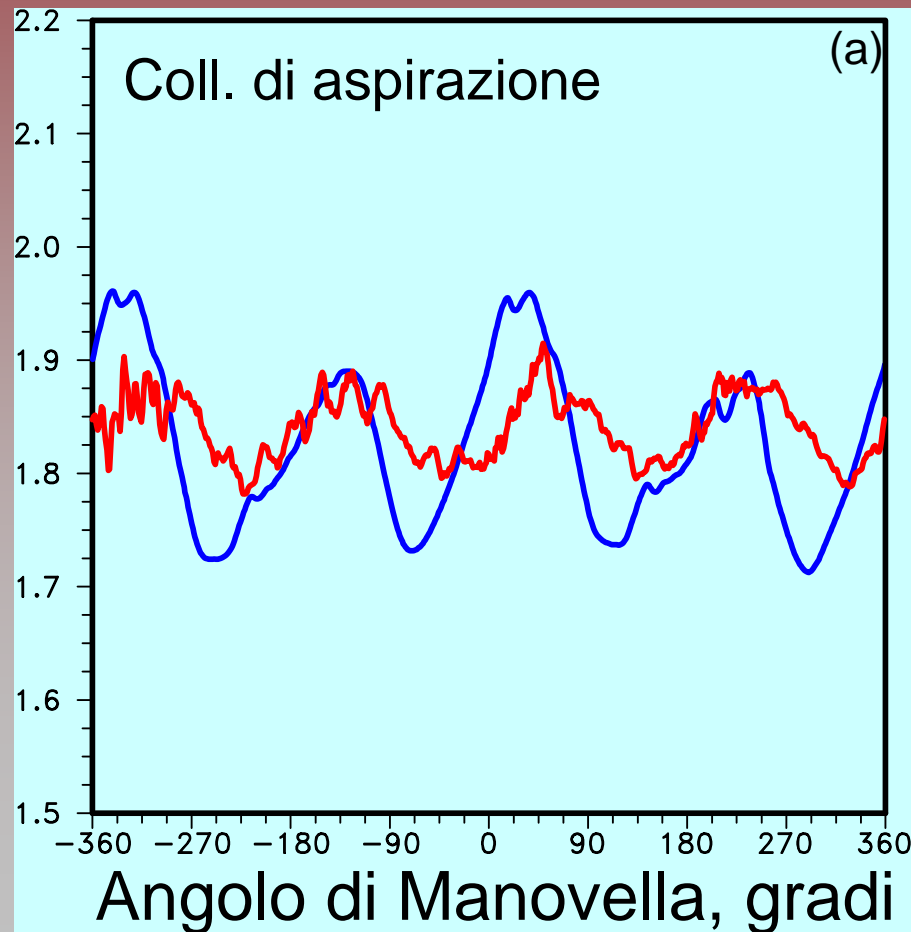


Un esempio di motore con turbocompressore

FIAT Croma 1.9 TD

Pressione nei Collettori

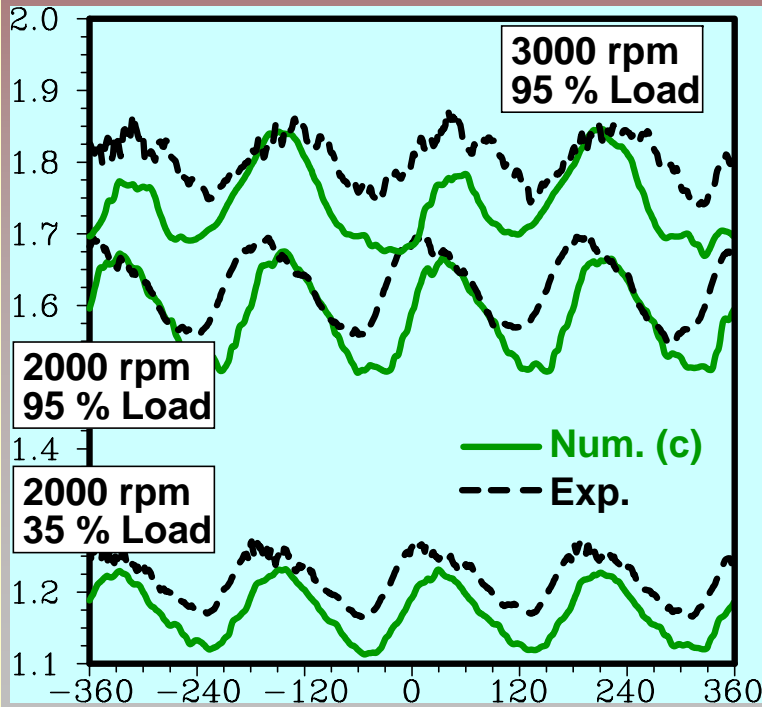
Pressione, bar



Un esempio di motore con turbocompressore

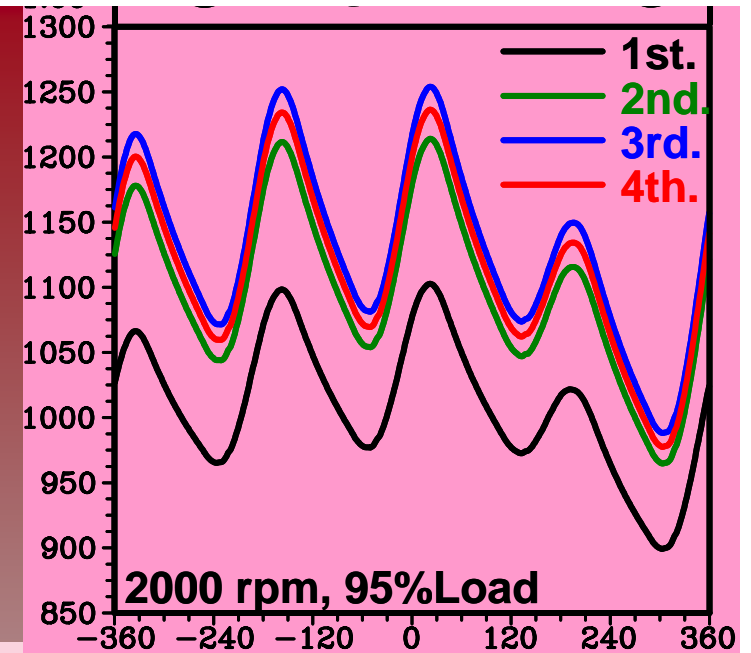
FIAT Croma 1.9 TD Pressione e Temperatura nei Collettori

Intake Plenum Pressure, bar

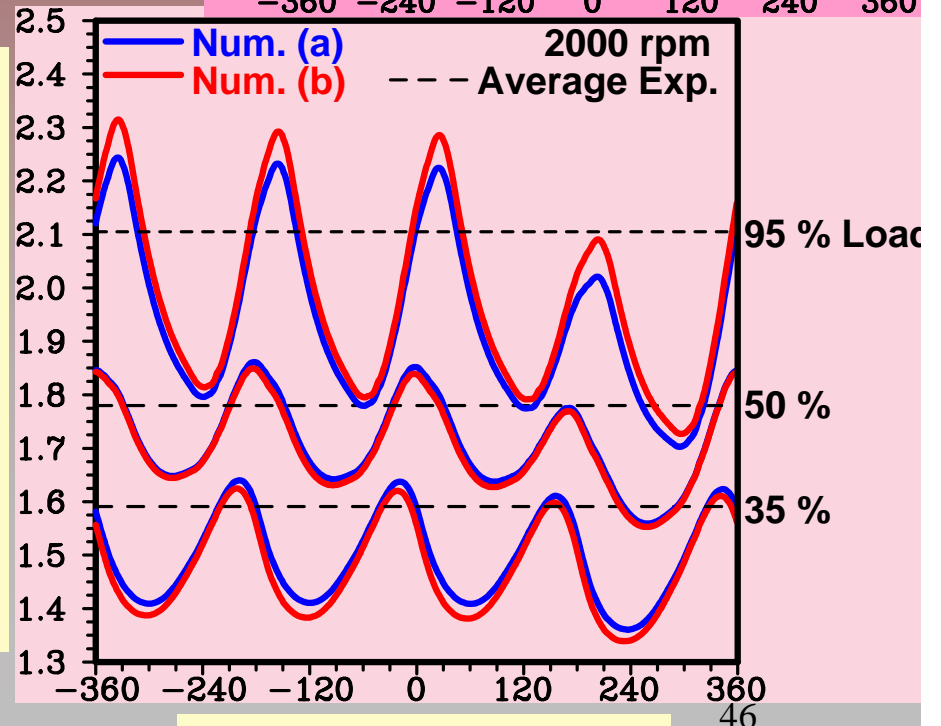


Crank Angle, deg

Exhaust Temperature, K



Exhaust Pressure, bar

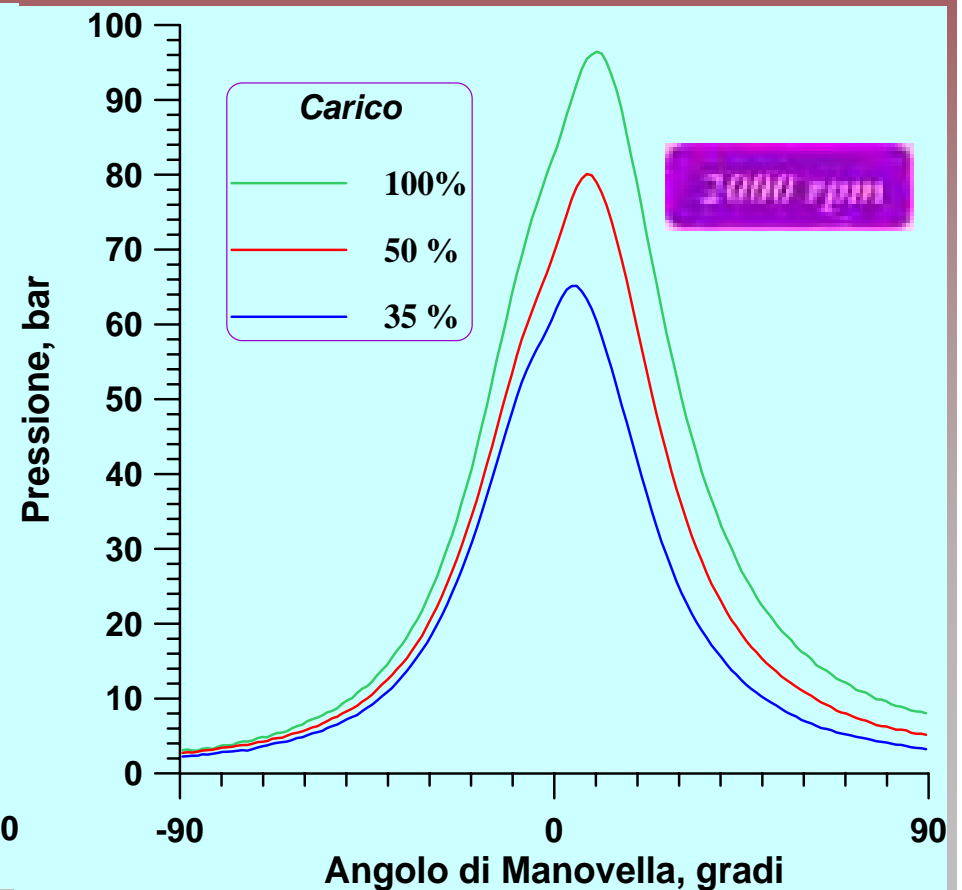
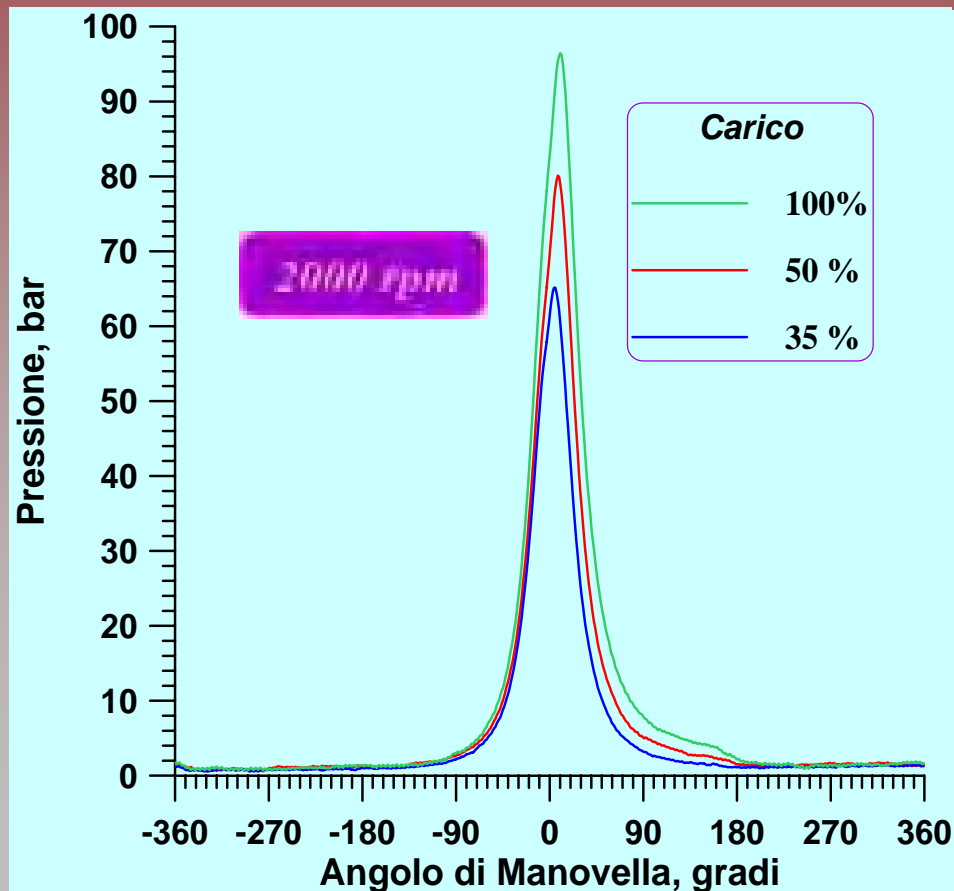


Crank Angle, deg

Un esempio di motore con turbocompressore

FIAT Croma 1.9 TD

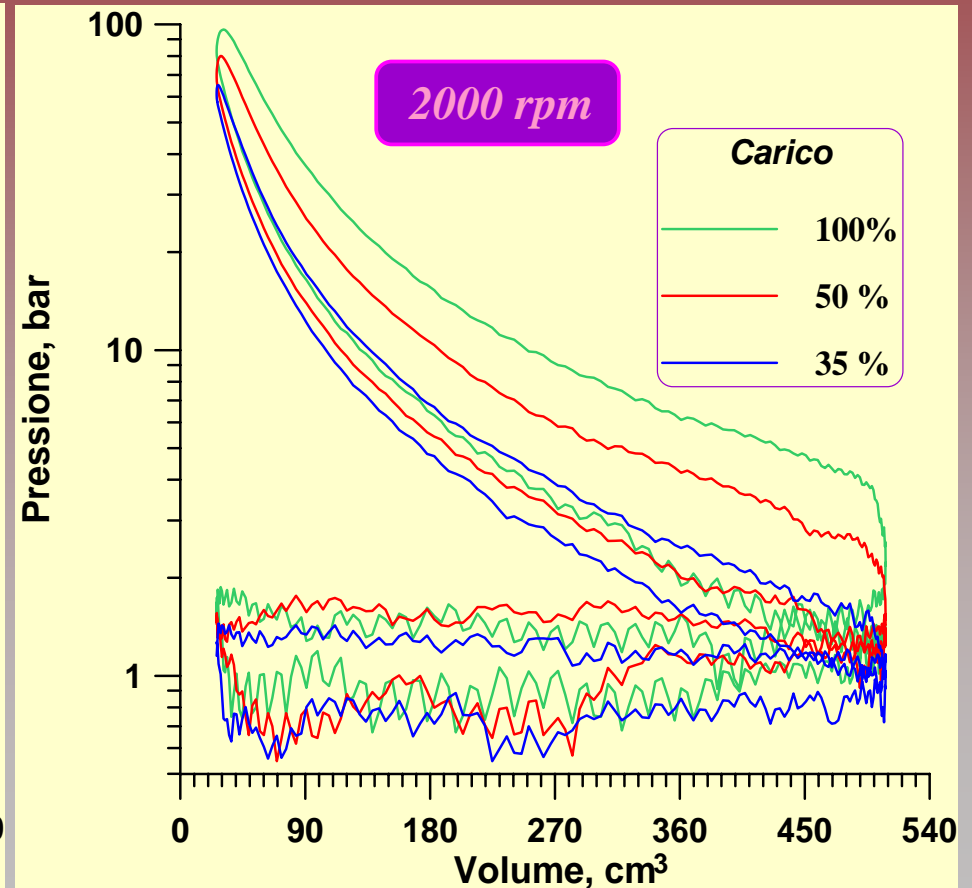
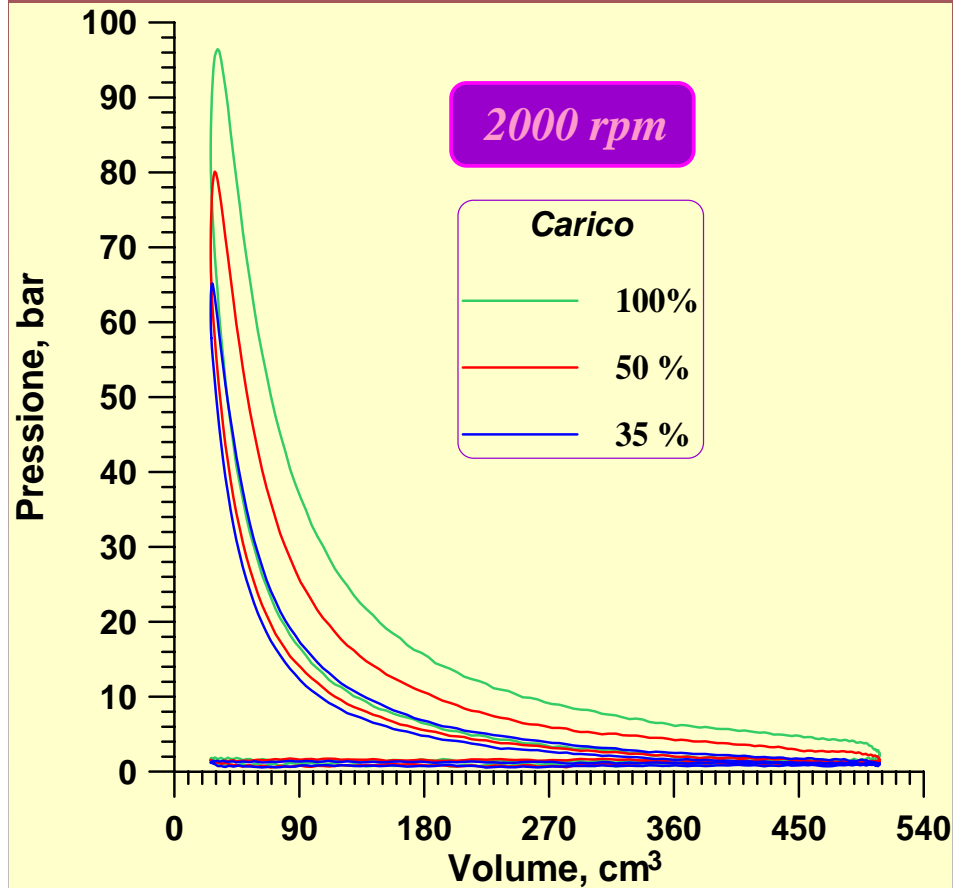
Pressione nei Cilindri al Variare del Carico



Un esempio di motore con turbocompressore

FIAT Croma 1.9 TD

Pressione nei Cilindri al Variare del Carico



Un esempio di motore con turbocompressore

FIAT Croma 1.9 JTD

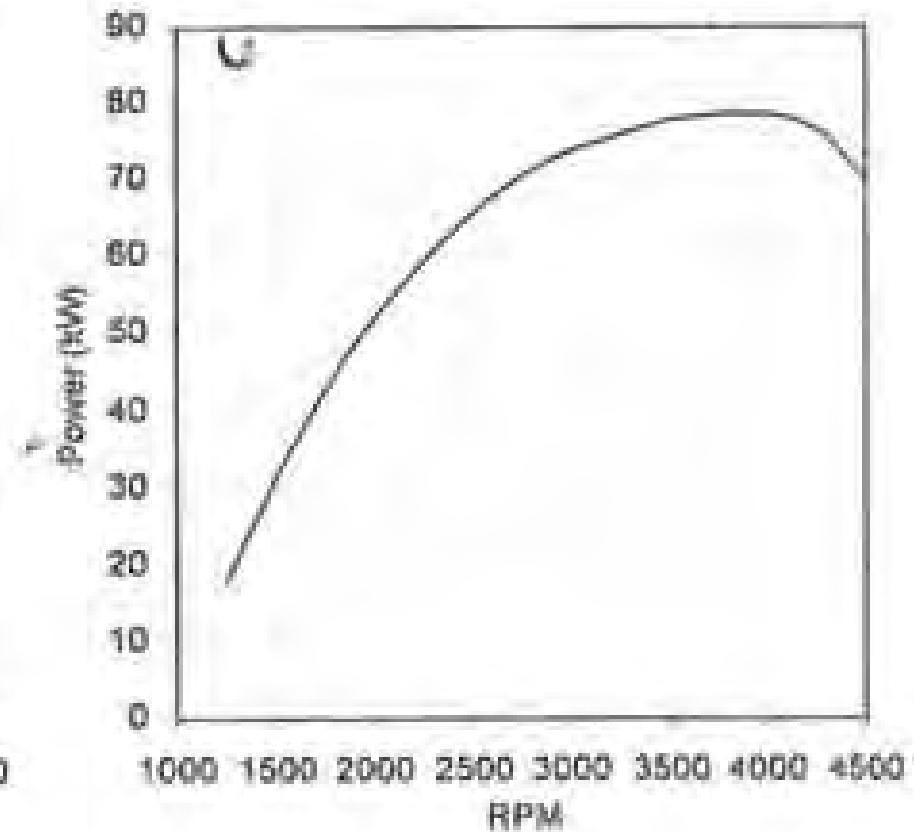
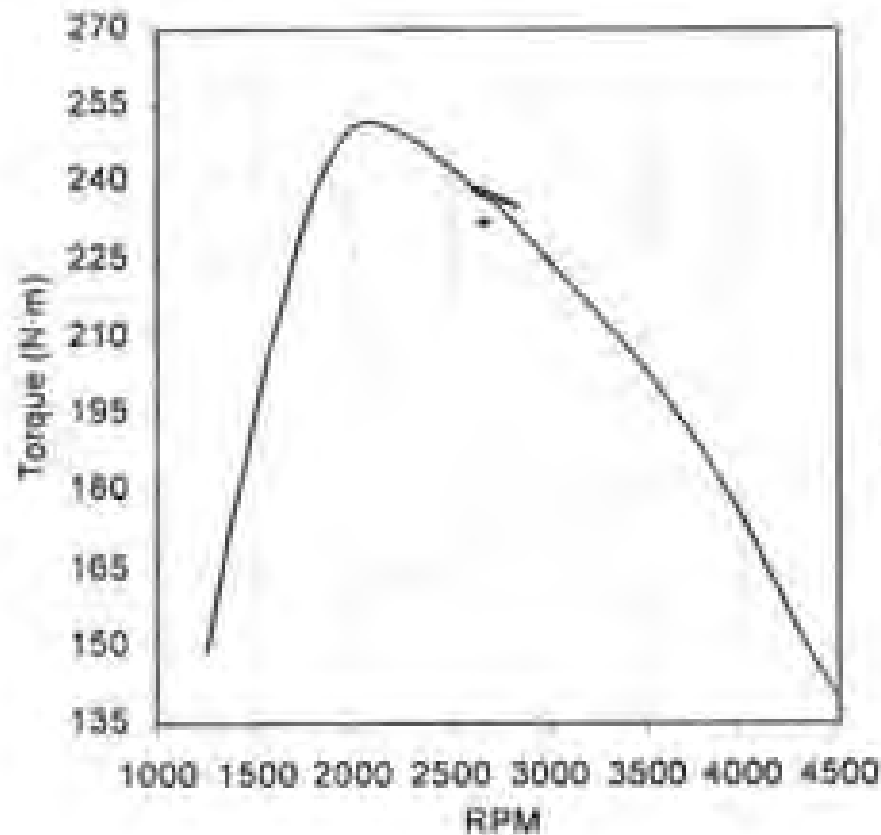


MOTORE FIAT 1910 JTD 8V	
Numero cilindri e disposizione	4 in linea
Alesaggio x corsa	82x90,40mm
Cilindrata	1910 cm ³
Rapporto di compressione	18,45:1
Potenza max	77,2 kW a 4000 giri/min
Coppia massima	251 Nm a 2000 giri/min
Alimentazione	Common Rail UNIJET(BOSCH) con pompa ad elettroiniettori BOSCH EDC15; (max p inj: 1350 bar)
Sovralimentazione	1 turbocompressore Garrett T15 con valvola <i>Waste Gate</i> e intercooler aria-aria

Un esempio di motore con turbocompressore

FIAT Croma 1.9 JTD

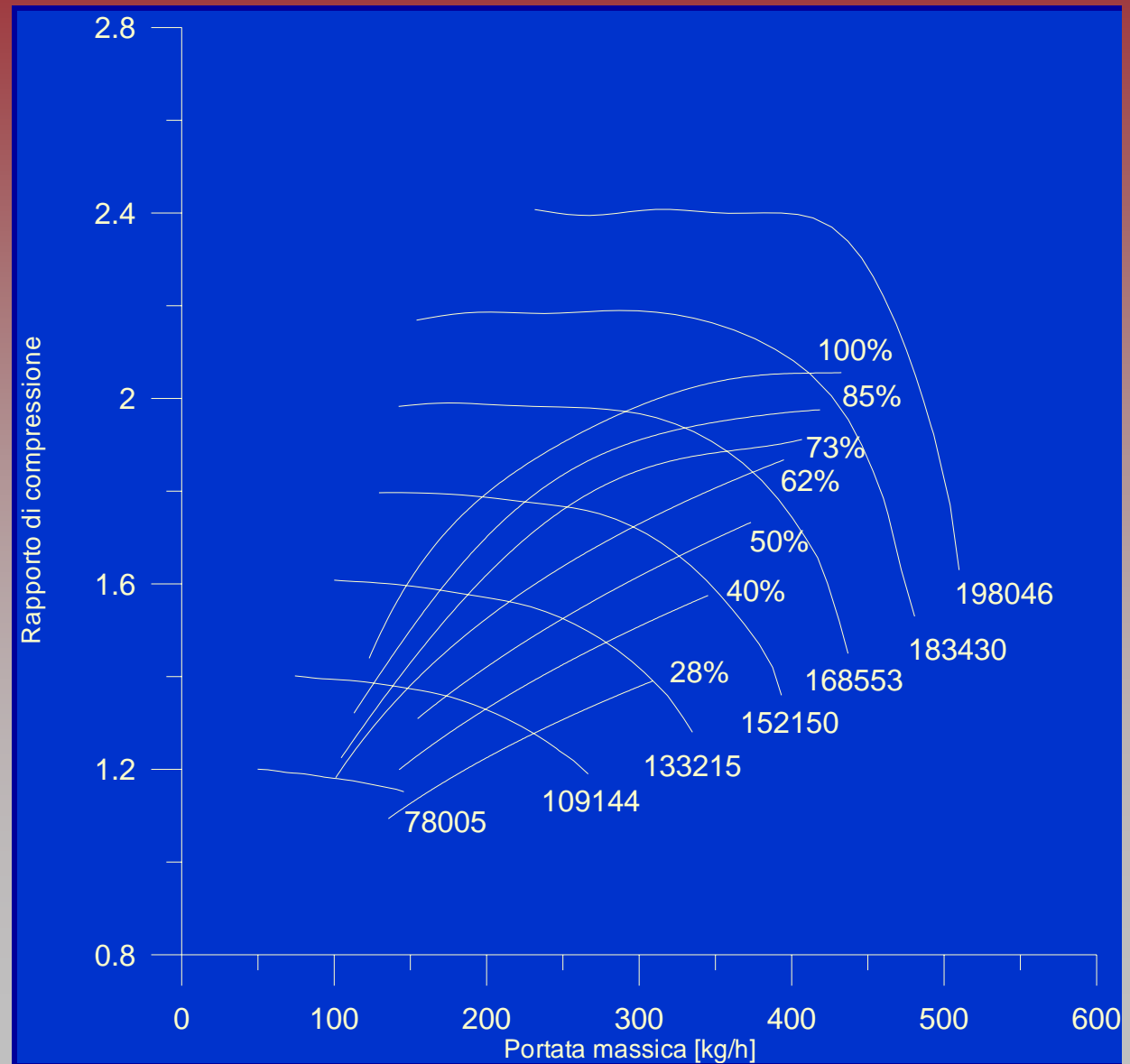
Curve caratteristiche a pieno carico



Un esempio di motore con turbocompressore

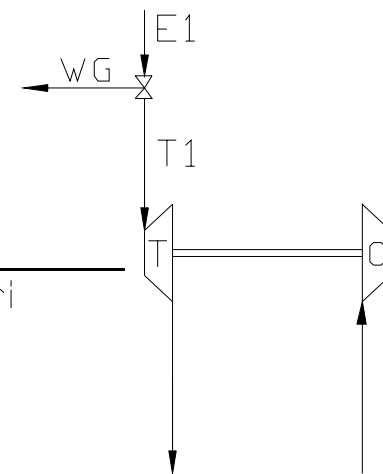
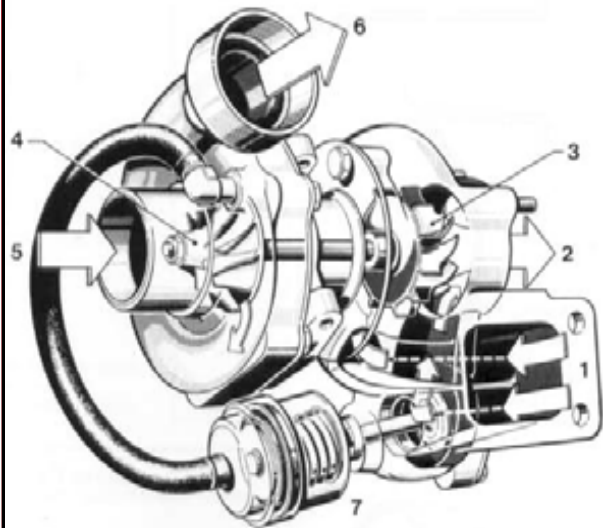
FIAT Croma 1.9 JTD

*Accoppiamento
Motore –
Compresore*



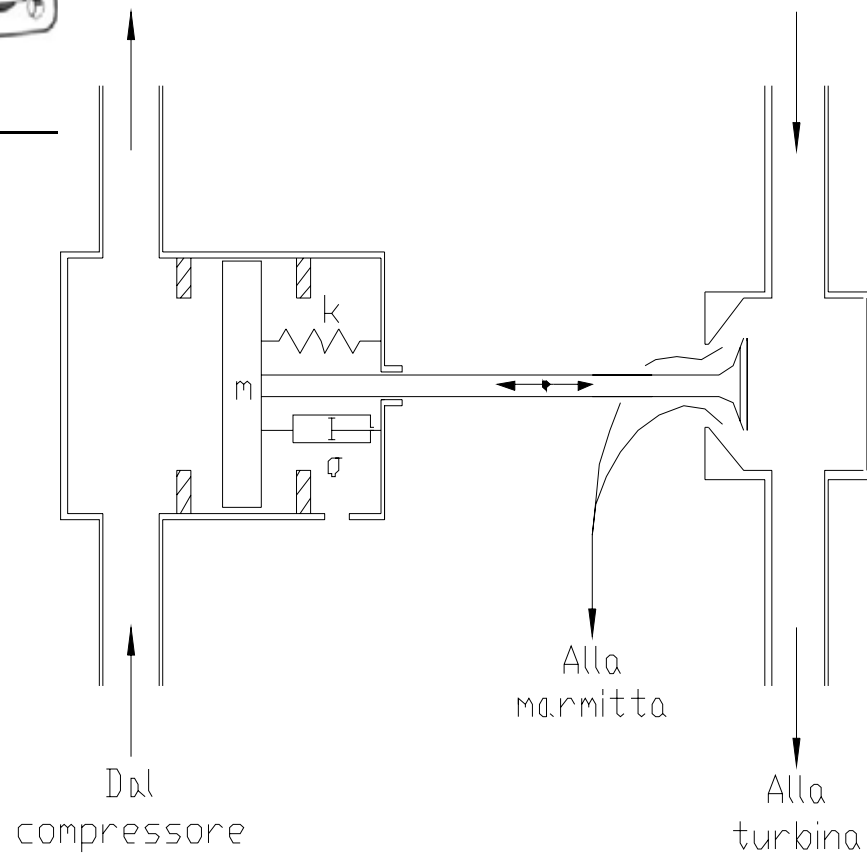
Un esempio di motore con turbocompressore

FIAT Croma 1.9 JTD *La Waste - Gate*



Ai cilindri

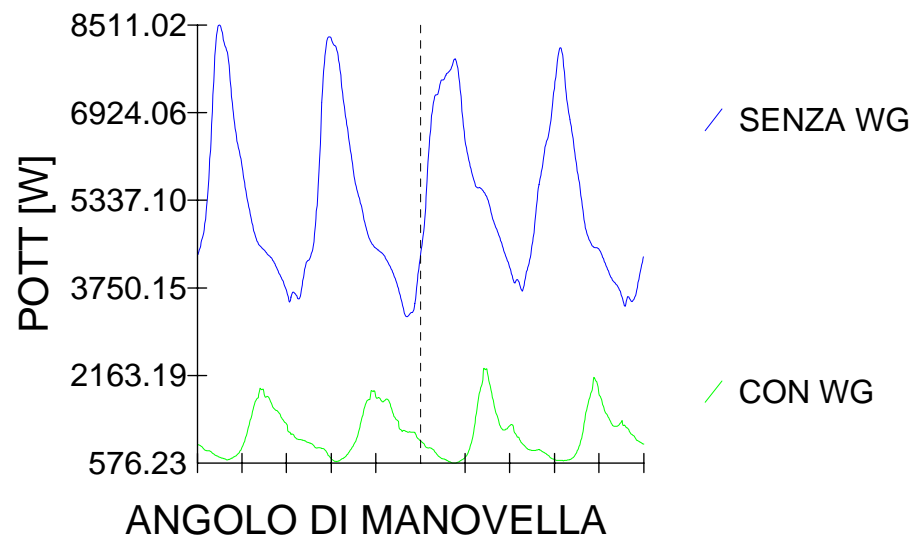
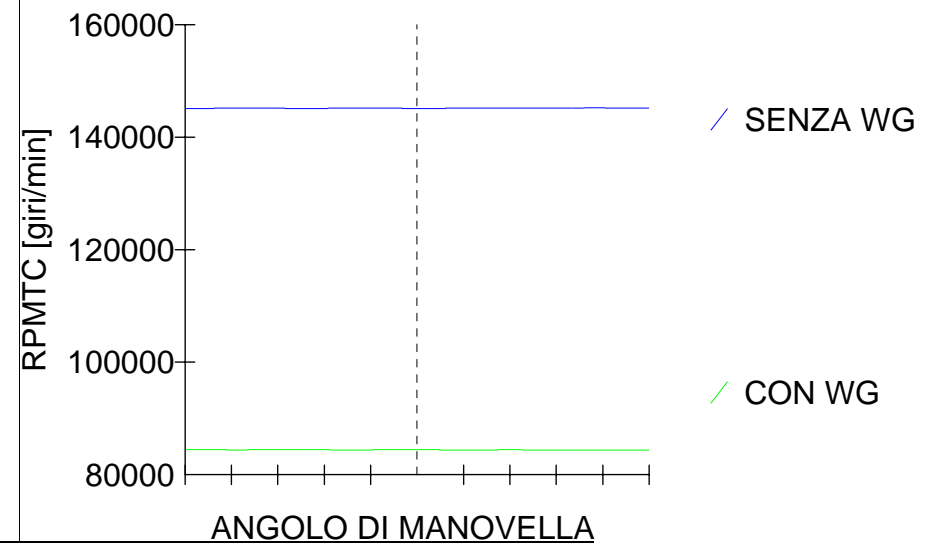
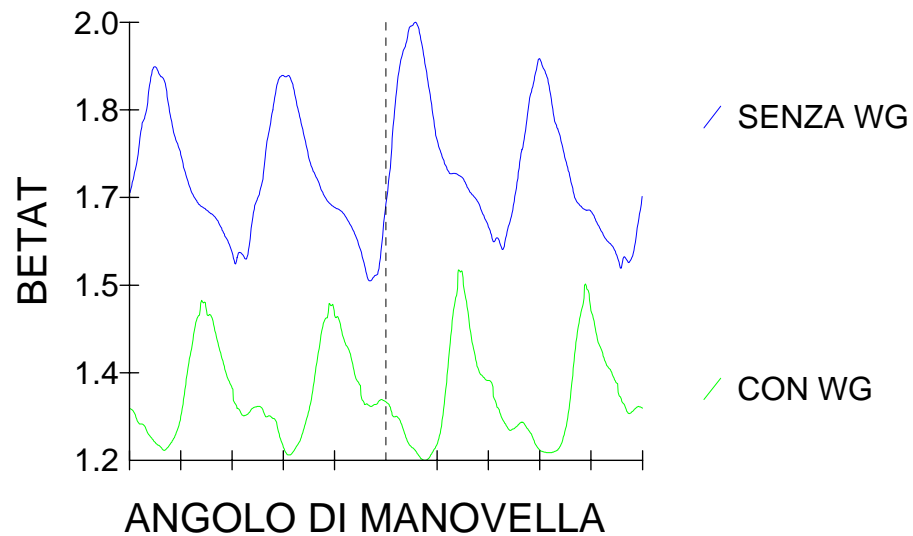
Dai cilindri



Un esempio di motore con turbocompressore

FIAT Croma 1.9 JTD

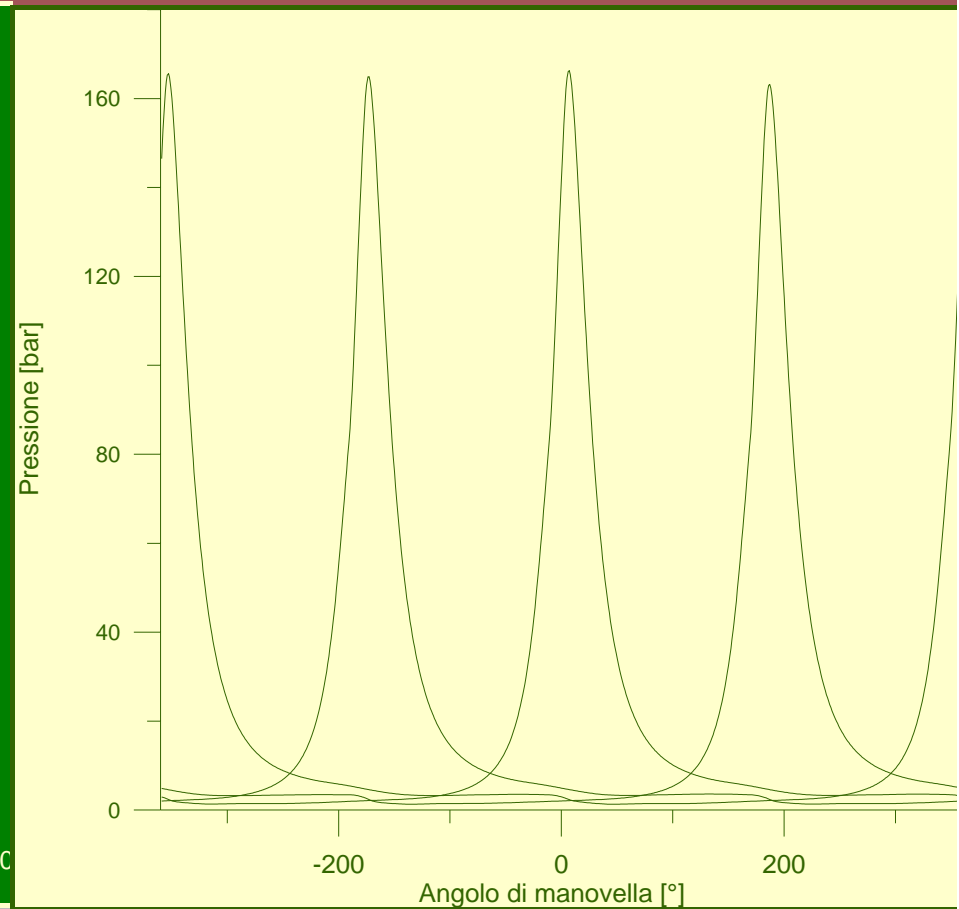
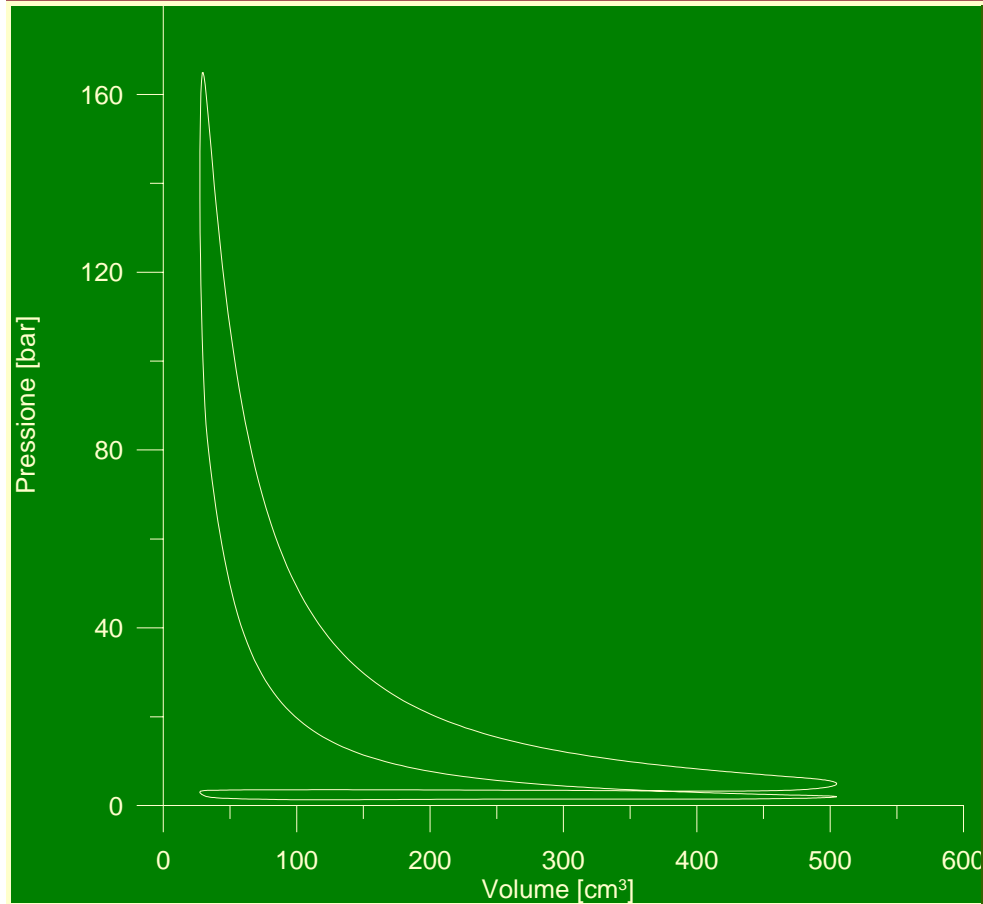
La Waste - Gate



Un esempio di motore con turbocompressore

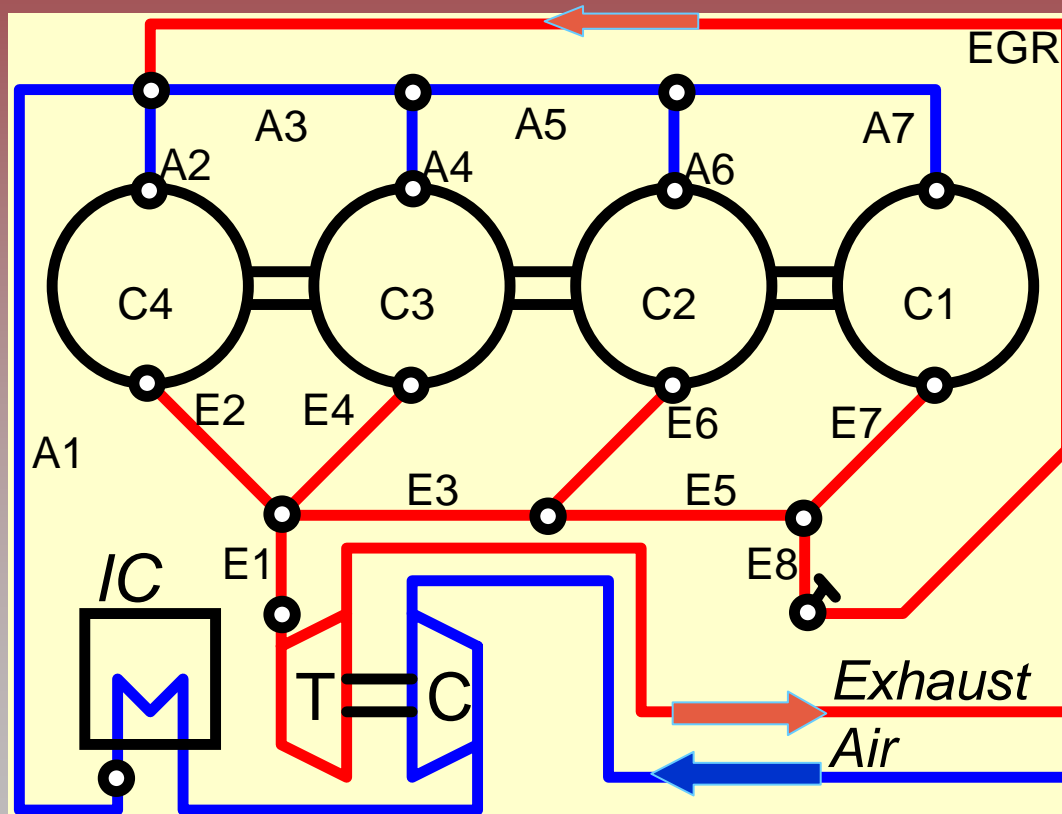
FIAT Croma 1.9 JTD

Pressione nei Cilindri



Modellistica del Motore Sovralimentato

Schema del Sistema Completo



Possibili Approcci:

- *Ai Volumi di Controllo* (0D)
- *Propagazione (x,t)* (1D)
- *Sistemi Multifase Reagenti* (3D)
- *Integrazione con Informazioni Sperimentali*

Modellistica del Motore Sovralimentato

Approccio ai Volumi di Controllo (0D)

Incognite : ρ , T , p

➤ *Equazione di Bilancio di Massa*

$$\frac{dM}{dt} = V \frac{d\rho}{dt} + \rho \frac{dV}{dt} = \dot{m}_f^{inj} + \sum_i \dot{m}_i \quad \dot{m}_i = (\dot{m}_a + \dot{m}_r + \dot{m}_f)_i$$

➤ *Equazione di Bilancio di Energia*

$$\frac{dT}{dt} = \frac{\frac{1}{M} \left[-p\dot{V} - \dot{Q}_w + \dot{m}_f^{inj} h_f^{(o)} + \sum_i \dot{m}_i h_i^{vlv} - e\dot{m} - M \frac{\partial e}{\partial x_r} \dot{x}_r \right] - \frac{p}{A_p} \frac{\partial e}{\partial p} \left(\frac{\dot{m}}{M} - \frac{\dot{V}}{V} + \frac{1}{R} \frac{\partial R}{\partial x_r} \dot{x}_r \right)}{c_v + \frac{p}{T} \frac{A_T}{A_p} \frac{\partial e}{\partial p}}$$

➤ *Equazione di Stato*

$$\left(A_p = 1 - \frac{p}{R} \frac{\partial R}{\partial p} \quad ; \quad A_T = 1 + \frac{T}{R} \frac{\partial R}{\partial T} \right) \quad p = \frac{MRT}{V} = \rho RT$$

Modellistica del Motore Sovralimentato

Approccio (1D)

Incognite : ρ , u , E , x_r , x_f

➤ *Sistema di Equazioni differenziali nel dominio (x,t)*

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} [\mathbf{F}(\mathbf{U})]_x = \mathbf{S}$$

$$\mathbf{U} = \begin{Bmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho E \\ \rho x_r \\ \rho x_f \end{Bmatrix} \quad \mathbf{F} = \begin{Bmatrix} \rho u \\ \rho u^2 + p \\ \rho u H \\ \rho u x_r \\ \rho u x_f \end{Bmatrix} \quad \mathbf{S} = - \begin{Bmatrix} \rho u \alpha \\ \rho u^2 (\alpha + 2 f / D u / |u|) \\ \rho u H \alpha - 4 q / D \\ \rho u x_r \alpha \\ \rho u x_f \alpha \end{Bmatrix}$$

➤ *Equazioni di Stato*

$$E = c_v T + u^2/2, \quad H = c_p T + u^2/2, \quad p = \rho R T$$

Modellistica del Motore Sovralimentato

Equilibrio Dinamico del Turbocompressore

$$P_c = \dot{m}_c \left[c_p T_1 \left(\beta_c^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right) \right] \frac{1}{\eta_{ac}}$$

$$\dot{m}_c = f \left(\frac{P_1}{\sqrt{T_1}}, \frac{N_{tc}}{\sqrt{T_1}}, \beta_c \right)$$

$$P_t = \dot{m}_t \left[c_{p,t} \bar{T}_{exh} \left(\beta_t^{\frac{k_t-1}{k_t}} - 1 \right) \right] \eta_{at} \eta_{m,tc}$$

$$\dot{m}_t = f \left(\frac{P_{exh}}{\sqrt{T_{exh}}}, \frac{N_{tc}}{\sqrt{T_{exh}}}, \beta_t \right)$$

$$\frac{dN_{tc}}{dt} = \frac{P_t - P_c}{N_{tc} J_{tc}} \left(\frac{60}{2\pi} \right)^2$$

Modellistica del Motore Sovralimentato

Flussi Multifase Reagenti (3D)

➤ *Equazione della Massa*

$$\frac{\partial \rho_m}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_m \mathbf{v}) = \nabla \cdot (\rho D \nabla Y_m) + \rho'_c + \rho'_s \delta_{m1} \quad (m=1, \text{NSP})$$

➤ *Equazione della Quantità di Moto*

$$\frac{\partial(\rho \mathbf{v})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} \mathbf{v}) = -\frac{1}{\alpha^2} \nabla p - A_0 \nabla \left(\frac{2}{3} \rho k \right) + \nabla \cdot \overline{\overline{\boldsymbol{\sigma}}} + \mathbf{F}^s + \rho \mathbf{g}$$

➤ *Equazione dell'Energia*

$$\frac{\partial(\rho E)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} E) = -p \nabla \cdot \mathbf{v} + (1 - A_0) \overline{\overline{\boldsymbol{\sigma}}} : \nabla \mathbf{v} - \nabla \cdot \mathbf{J} + A_0 \rho \varepsilon + Q'c + Q's$$

➤ *Modello di Turbolenza*

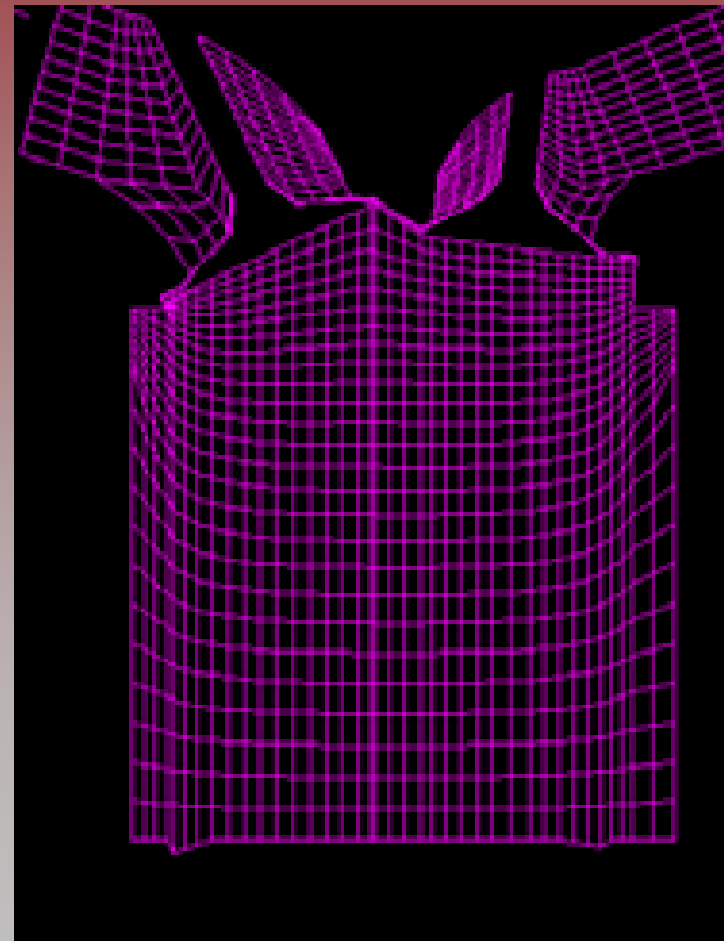
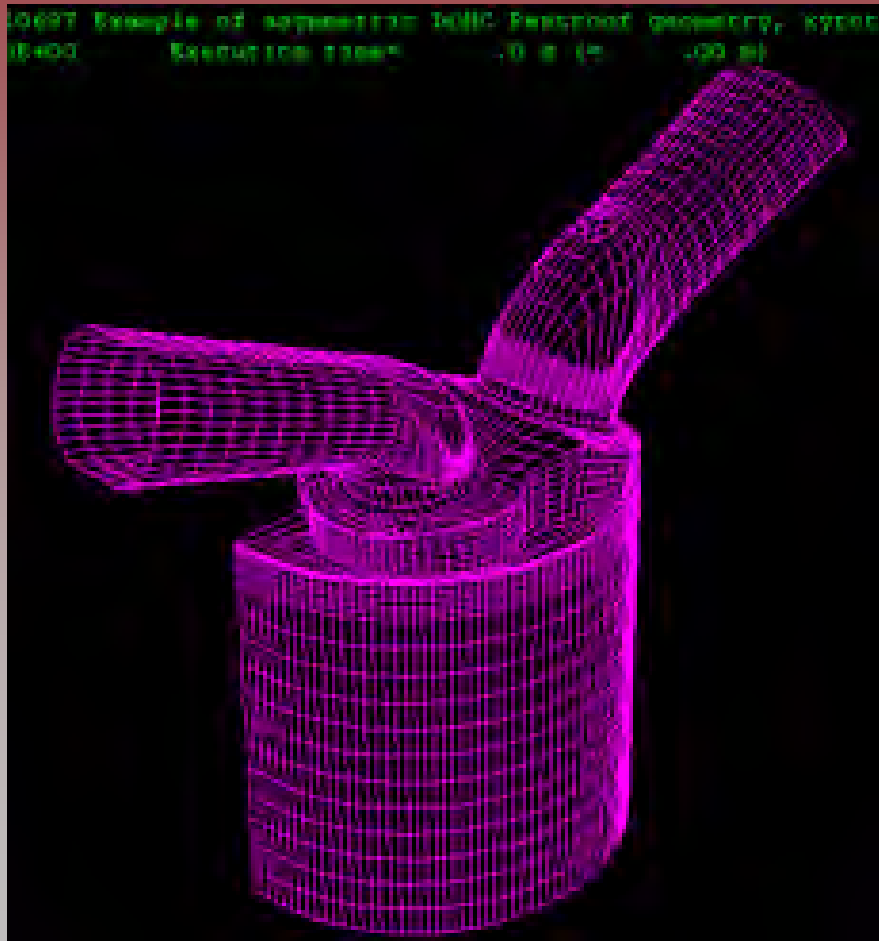
$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} k) = -\frac{2}{3} \rho k \nabla \cdot \mathbf{v} + \overline{\overline{\boldsymbol{\sigma}}} : \nabla \mathbf{v} + \nabla \cdot \left[\left(\frac{\mu}{P_{rk}} \right) \nabla k \right] - \rho \varepsilon + W'^s$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} \varepsilon) = -\left(\frac{2}{3} c_{\varepsilon 1} - c_{\varepsilon 3} \right) \rho \varepsilon \nabla \cdot \mathbf{v} + \nabla \cdot \left[\left(\frac{\mu}{P_{rk}} \right) \nabla \varepsilon \right] + \frac{\varepsilon}{k} \left(c_{\varepsilon 1} \overline{\overline{\boldsymbol{\sigma}}} : \nabla \mathbf{v} - c_{\varepsilon 2} \varepsilon \rho + c_s W'^s \right)$$

Modellistica del Motore Sovralimentato

Flussi Multifase Reagenti (3D)

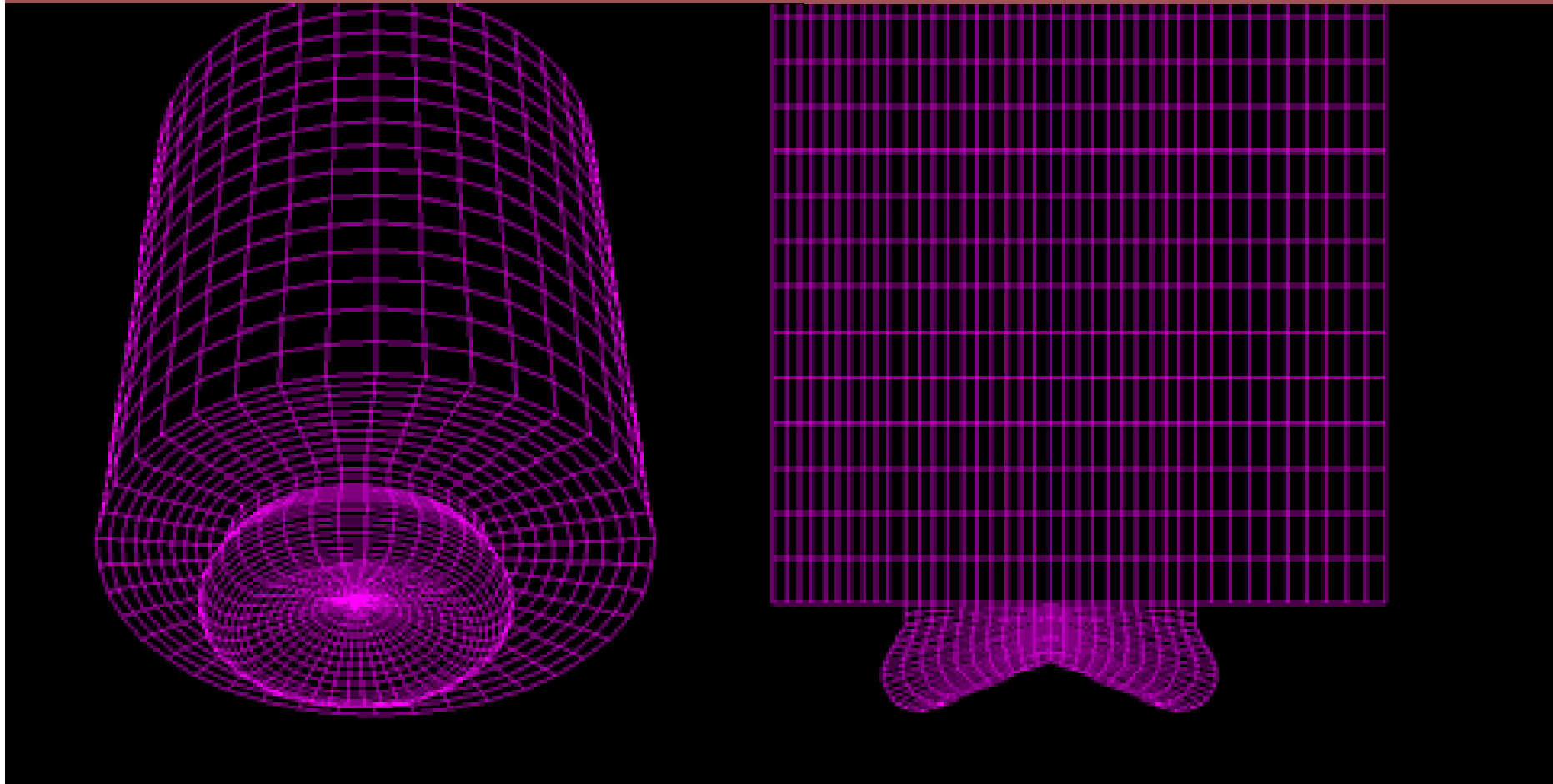
➤ *Esempi di Domini Computazionali*



Modellistica del Motore Sovralimentato

Flussi Multifase Reagenti (3D)

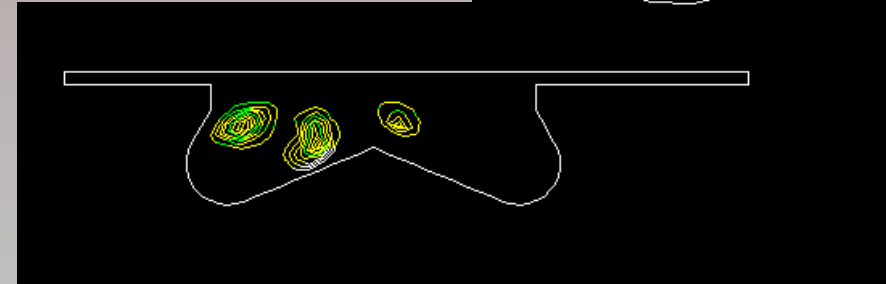
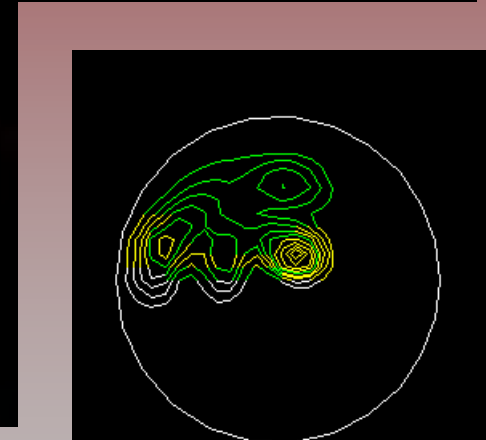
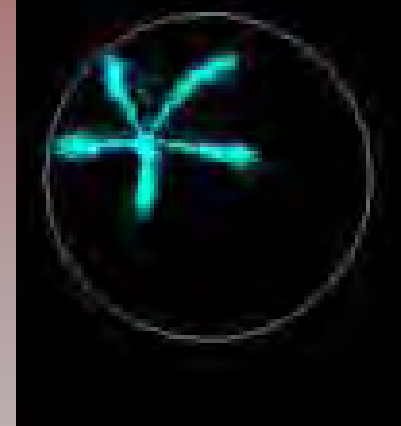
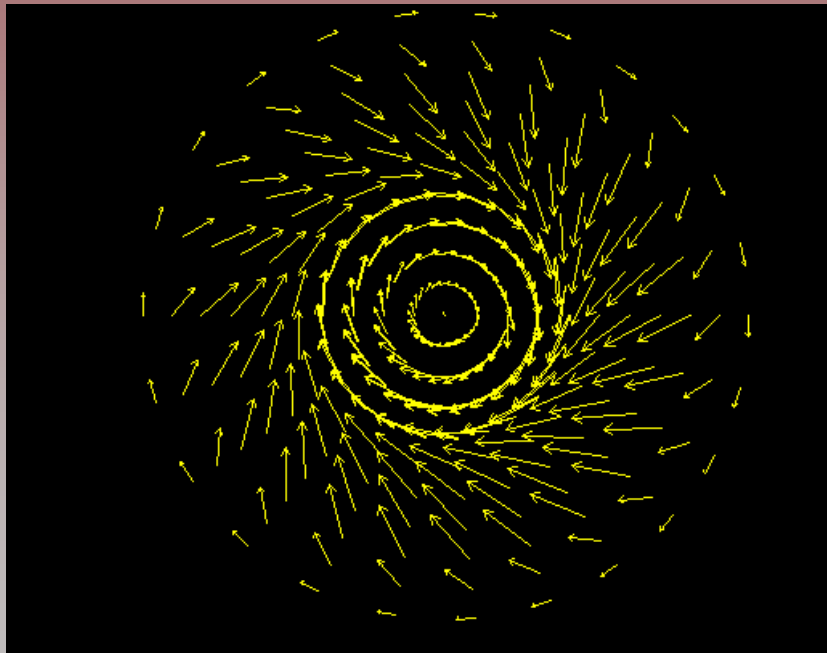
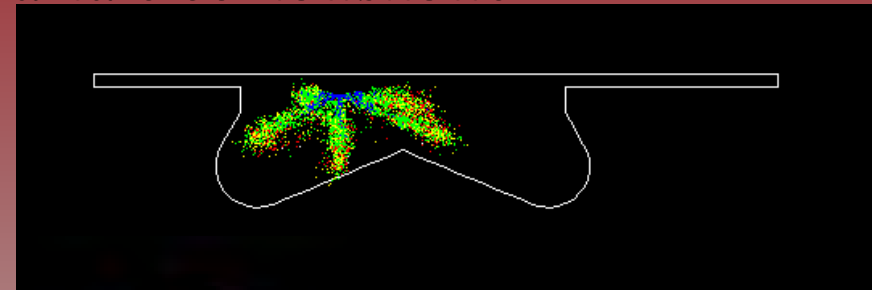
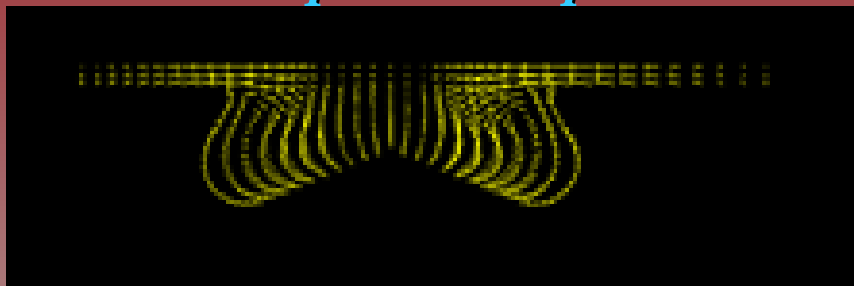
➤ *Esempi di Domini Computazionali*



Modellistica del Motore Sovralimentato

Flussi Multifase Reagenti (3D)

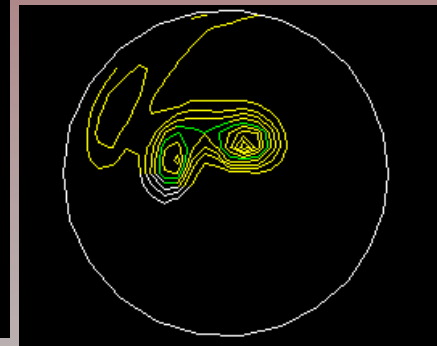
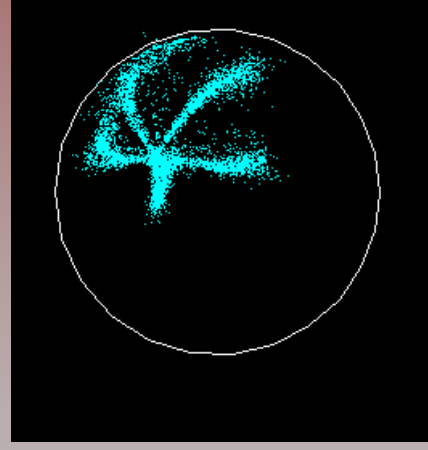
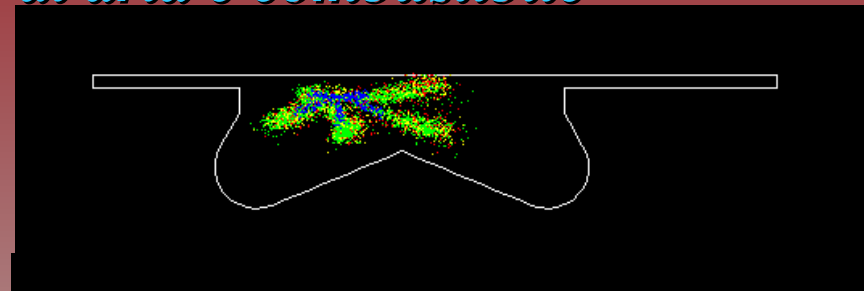
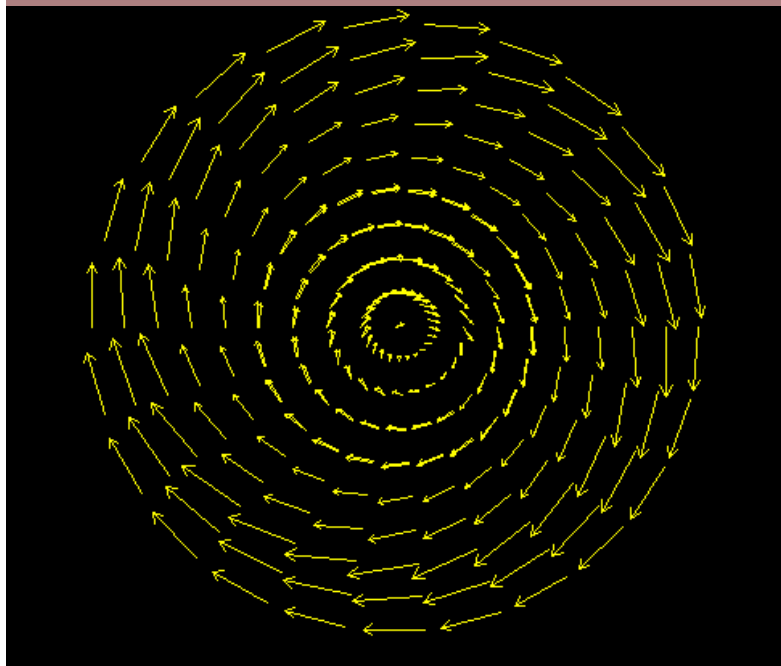
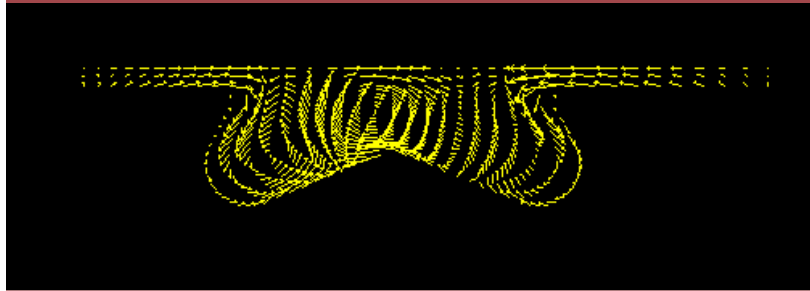
➤ *Esempi di Campi di Moto di aria e combustibile*



Modellistica del Motore Sovralimentato

Flussi Multifase Reagenti (3D)

➤ *Esempi di Campi di Moto di aria e combustibile*



Grazie dell'Attenzione

