

Luca Zappalorti

# MOTORE DIESEL 2T2000HP

per elicottero



Università di Bologna  
Dipartimento di  
Ingegneria Industriale

# Specifiche tecniche

**Configurazione**

8 cilindri a V di 90°

**Alimentazione**

2 tempi Diesel

**Alesaggio x Corsa**

98 x 100 mm

**Cilindrata**

6.034 cc

**Rapporto di compressione**

21:1

**Potenza all'albero**

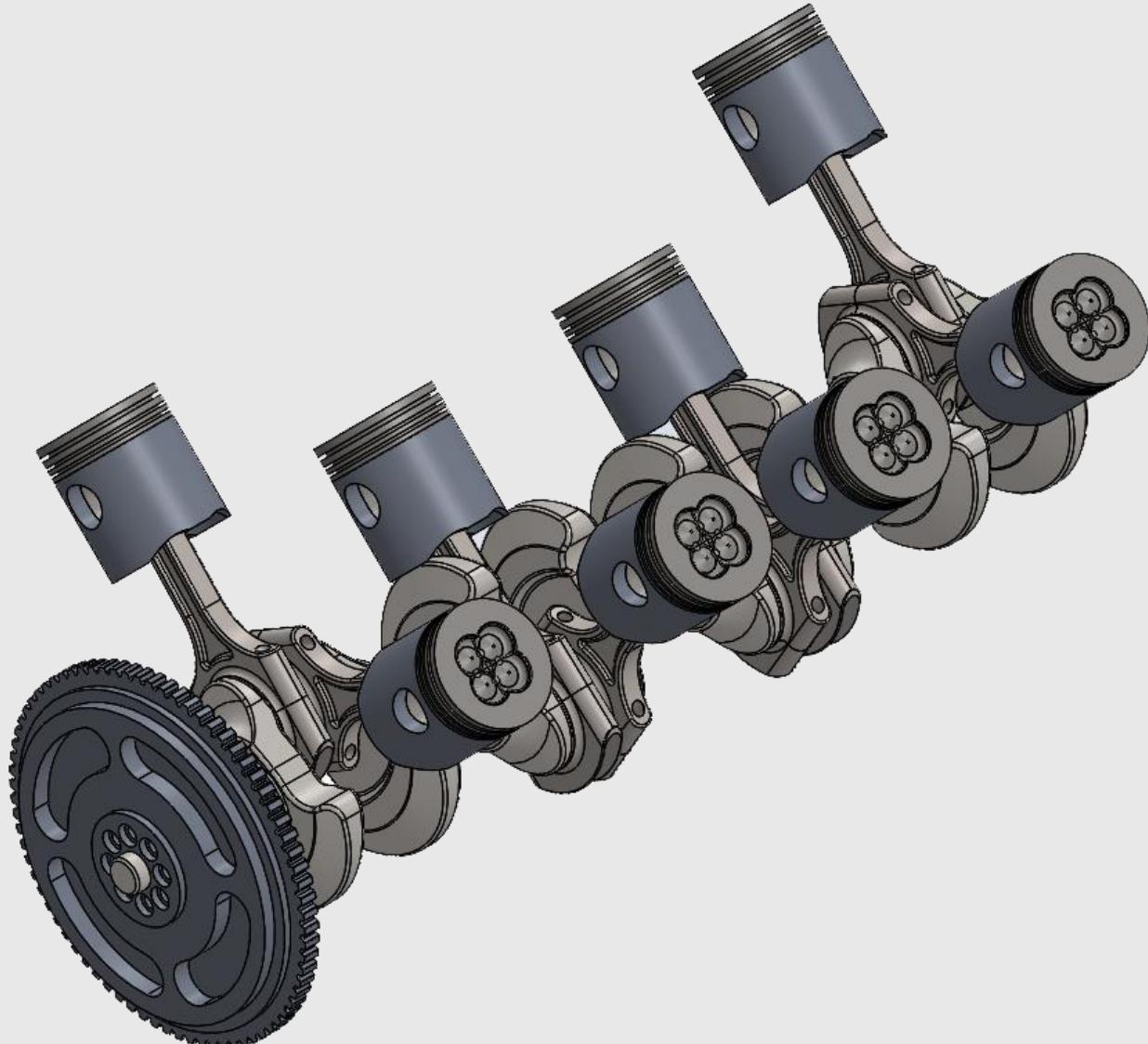
2.041 HP [1.522 kW] @6.000 rpm

**Coppia massima**

2.533 Nm @3.000 rpm

**Peso a secco**

308,8 kg

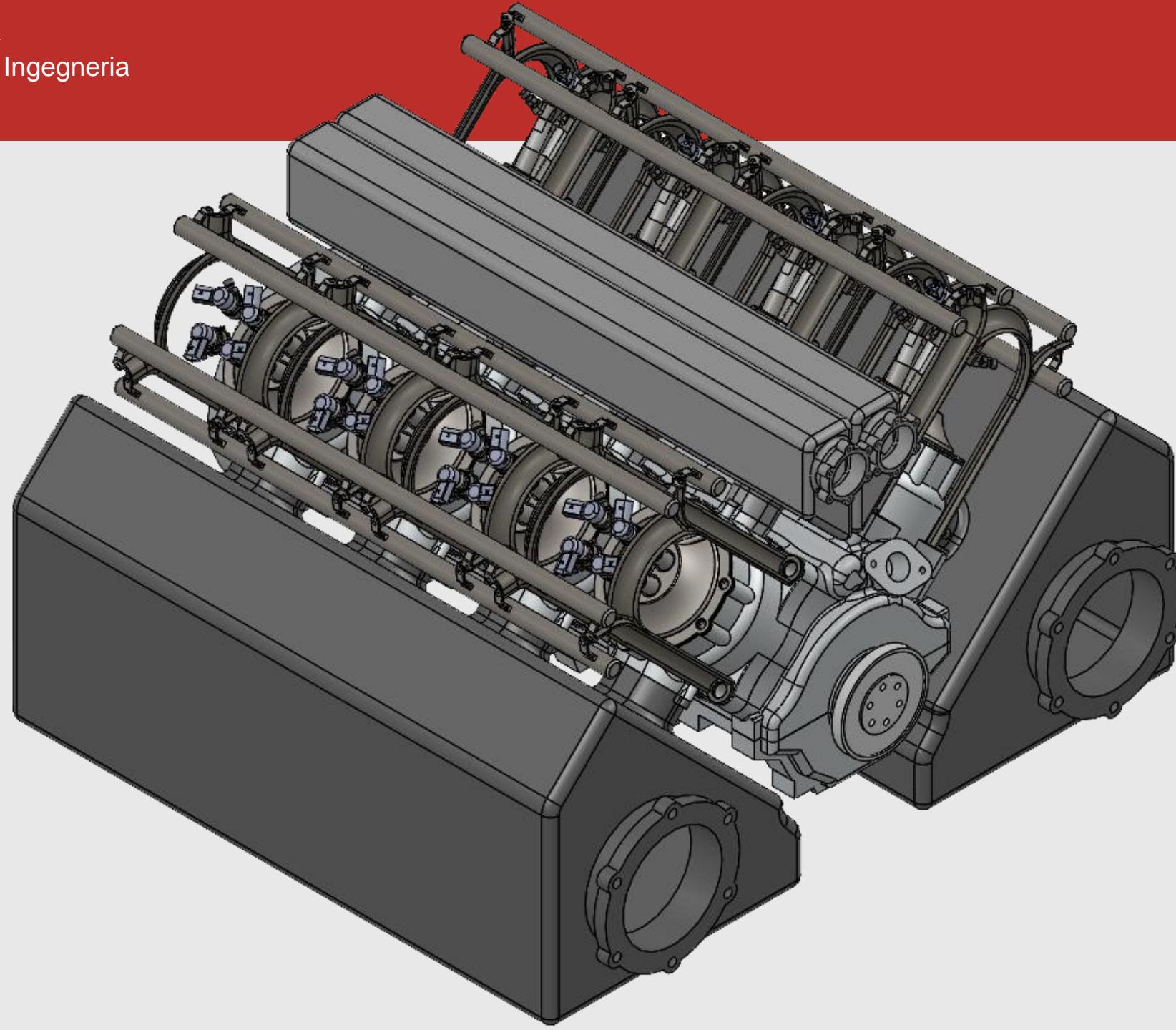


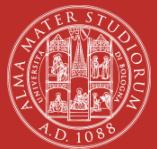


Università di Bologna

Dipartimento di Ingegneria  
Industriale

**MOTORE DIESEL**  
**2T2000HP**  
per elicottero

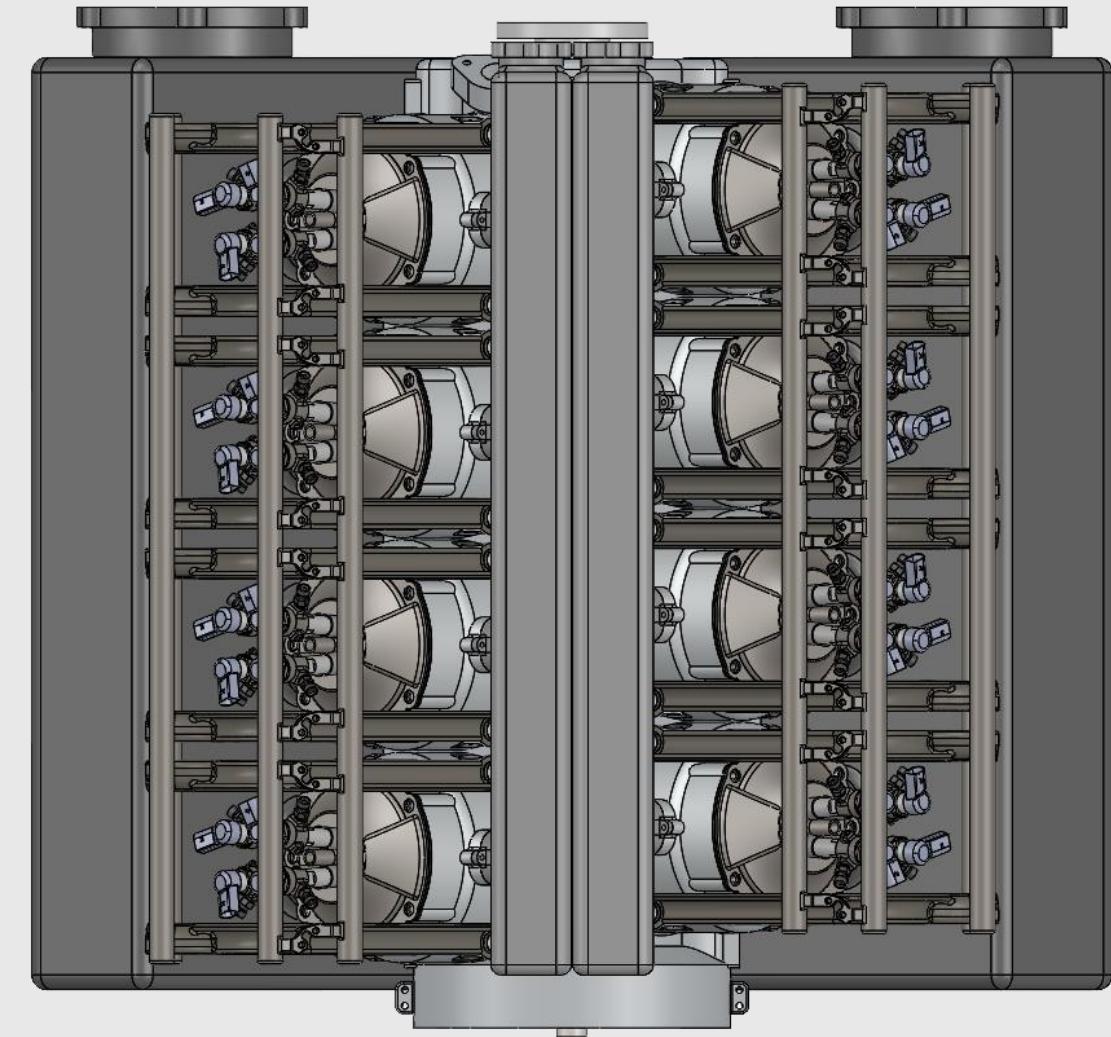
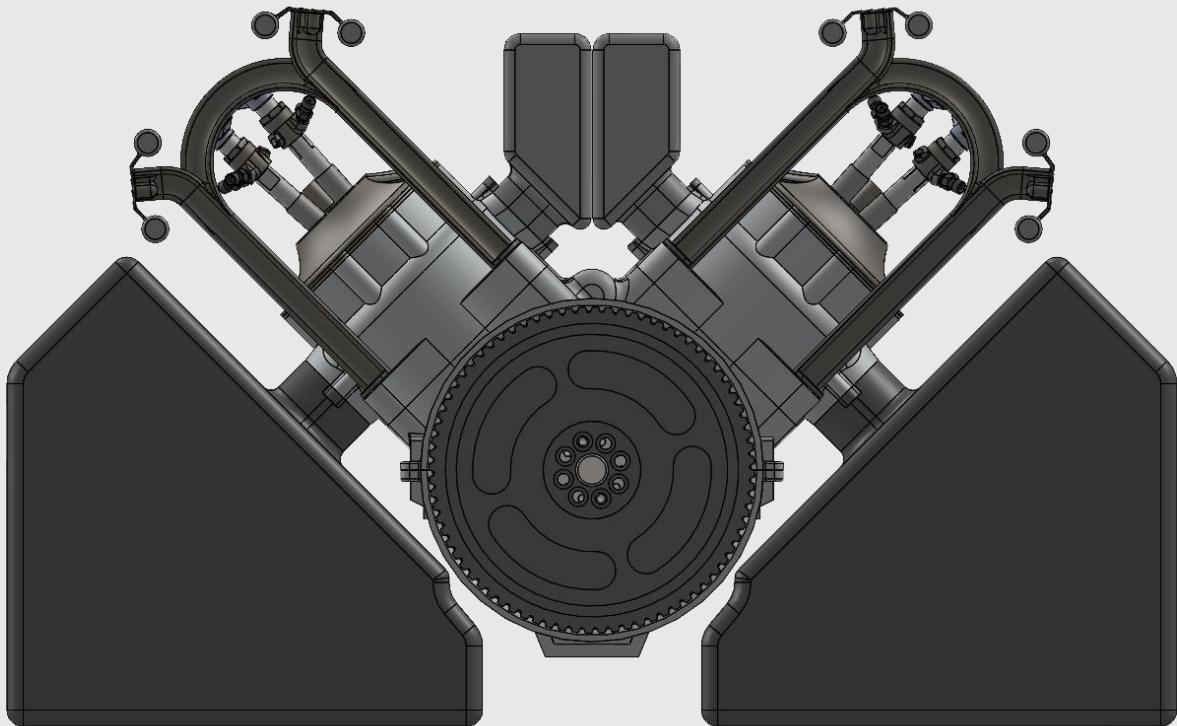




Università di Bologna

Dipartimento di Ingegneria  
Industriale

**MOTORE DIESEL**  
**2T2000HP**  
per elicottero



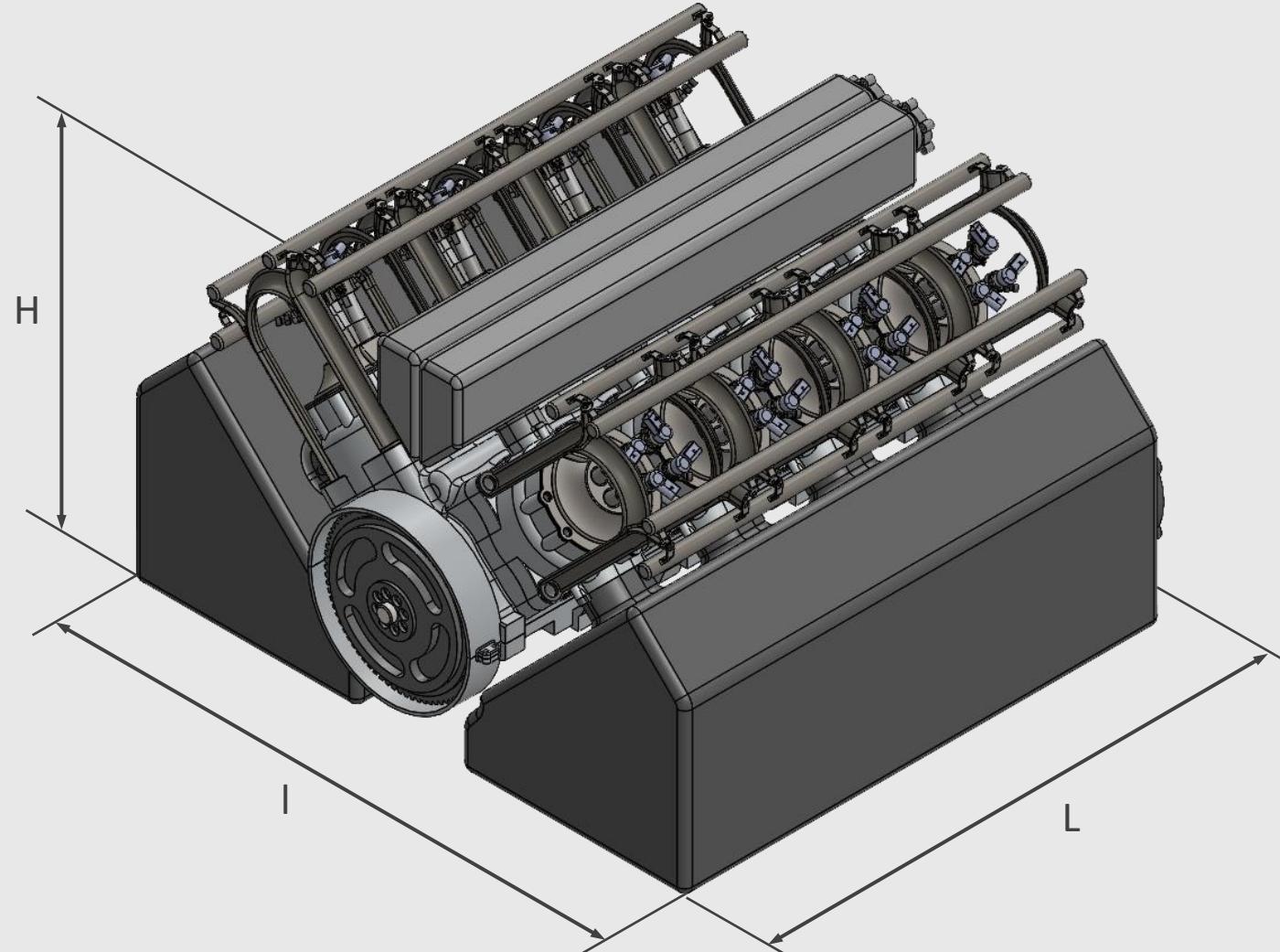
# Ingombri e dimensioni

Nonostante le specifiche di erogazione richieste, soprattutto in termini di potenza da erogare, la configurazione a V e la gestione di aspirazione e scarico priva di valvole ci consentono di contenere sensibilmente gli ingombri, di semplificarne il funzionamento, di ridurre i componenti e di mantenere il motore compatto.

H = 660 mm

I = 1.070mm

L = 1.029mm



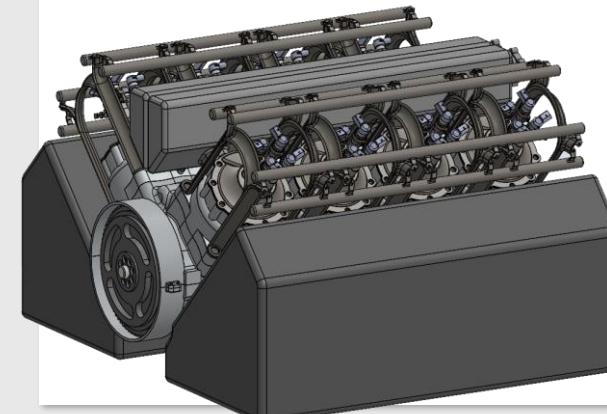
# Confronto con AW129 *Mangusta*

Ricordandone l'impiego come propulsore per elicotteri, per evidenziarne la compattezza e la semplicità costruttiva, lo poniamo in confronto ad un tipico propulsore per una fascia di aeromobili di pari potenza.

Il confronto considera la coppia di propulsori del *Mangusta AW129* di Agusta Westland, ovvero due *Rolls-Royce Gem II*, che, a differenza del nostro motore a pistoni, sono propulsori **turboalbero**.

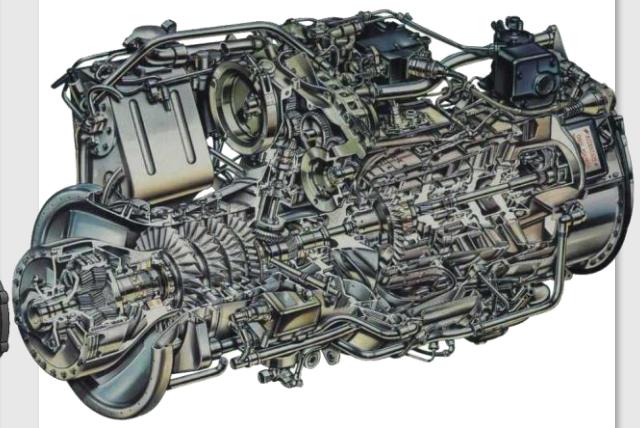
## | G2TD2000

- Motore a pistoni
- Potenza: 2041 HP
- Peso a secco: 303,7 kg
- Lunghezza: 1.029 mm
- Larghezza: 1.070 mm
- Altezza: 660 mm

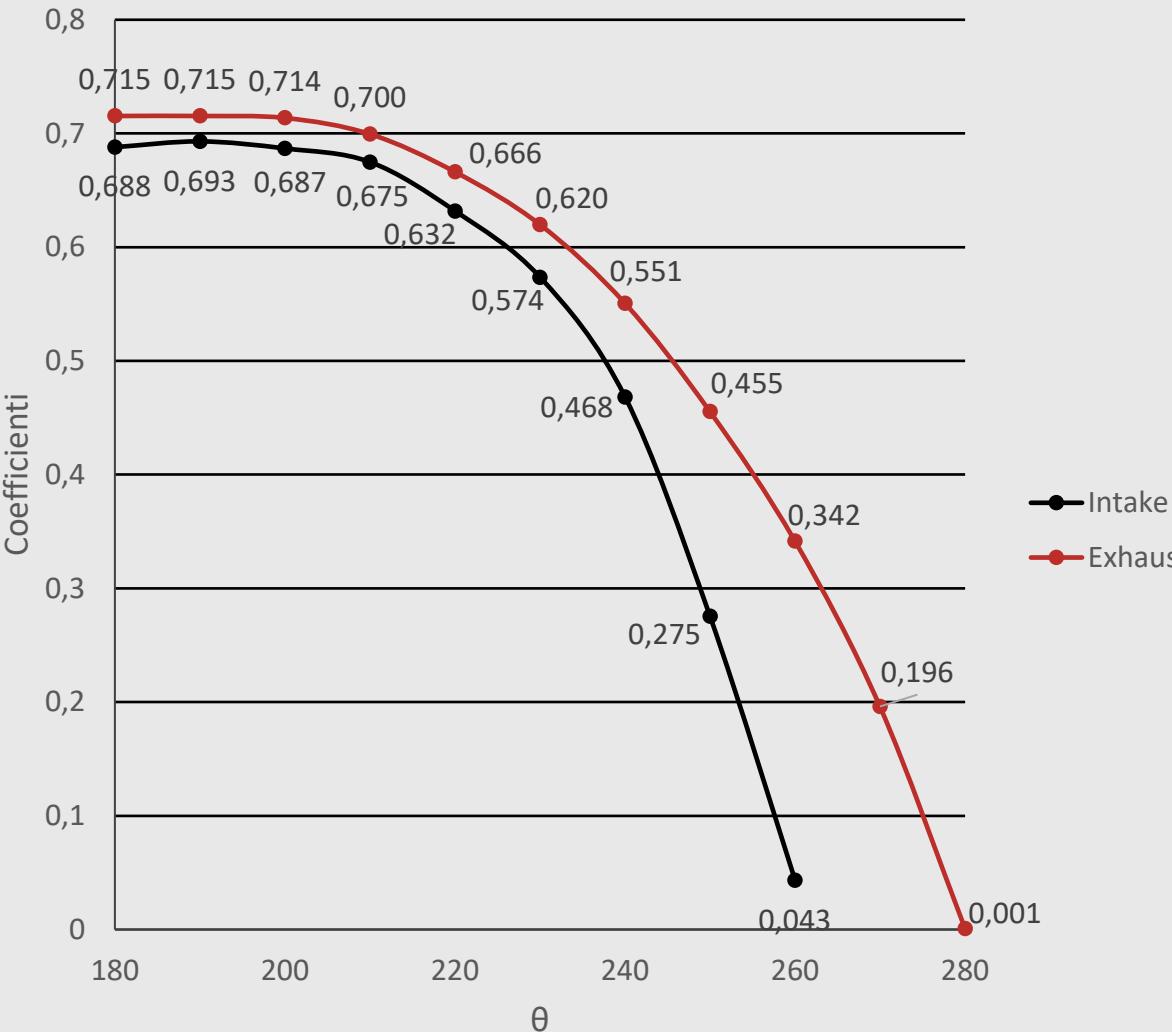


## | AW129 Mangusta 2 Rolls-Royce Gem II

- Motore **turboalbero**
- Potenza: 2.012 HP
- Peso a secco: 2x187 kg
- Lunghezza: 1.090 mm
- Diametro: 590 mm



Coefficienti di efflusso

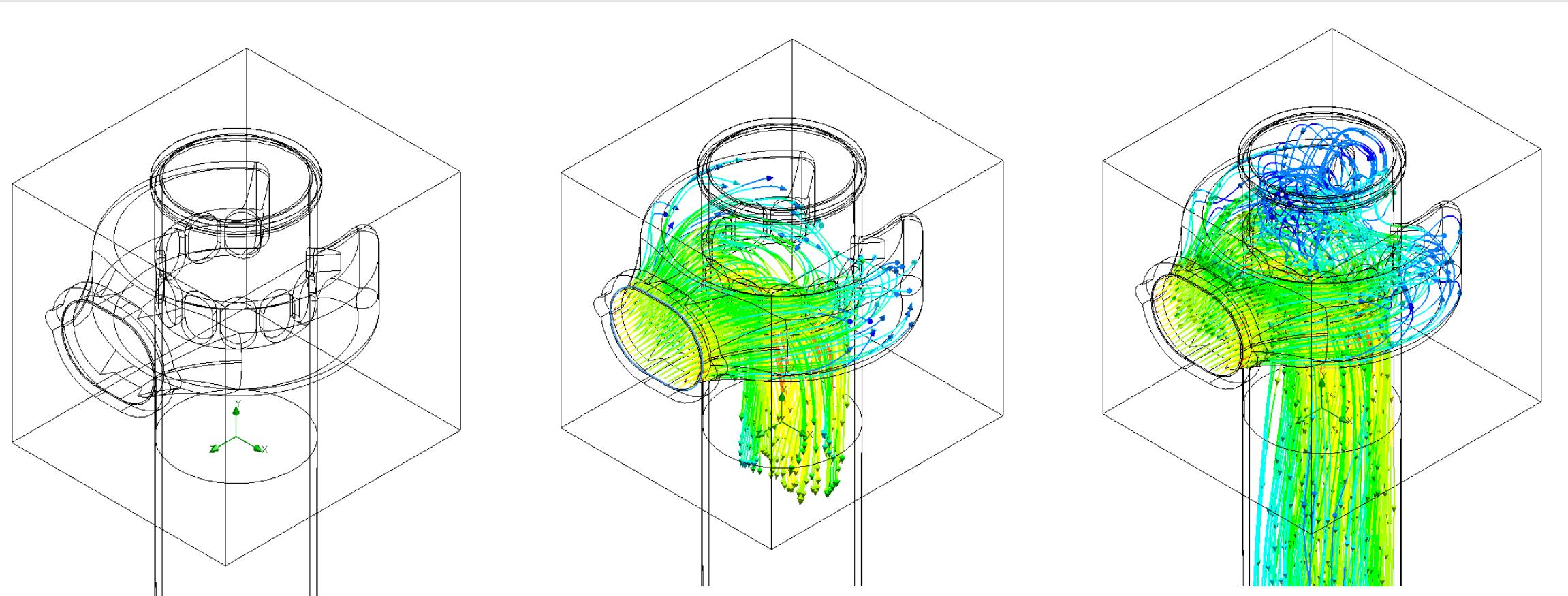


## Fluidodinamica interna

Lo studio fluidodinamico interessa la *canna cilindro* e l'*airbox* ricavato all'interno del corpo cilindro: il flusso in aspirazione dai *manifold* si raccoglie nell'*airbox* e fluisce attraverso le luci del *liner* in camera.

La conformazione delle luci e le loro dimensioni prendono spunto dalla soluzione adottata dalla Detroit Diesel per i motori DD60 Series.

Lo studio interessa sia lo scarico sia l'aspirazione nelle varie posizioni del pistone (gradi di manovella): avendo scelto un sistema privo di valvole è la posizione del pistone che determina il grado di apertura di ciascuna luce.



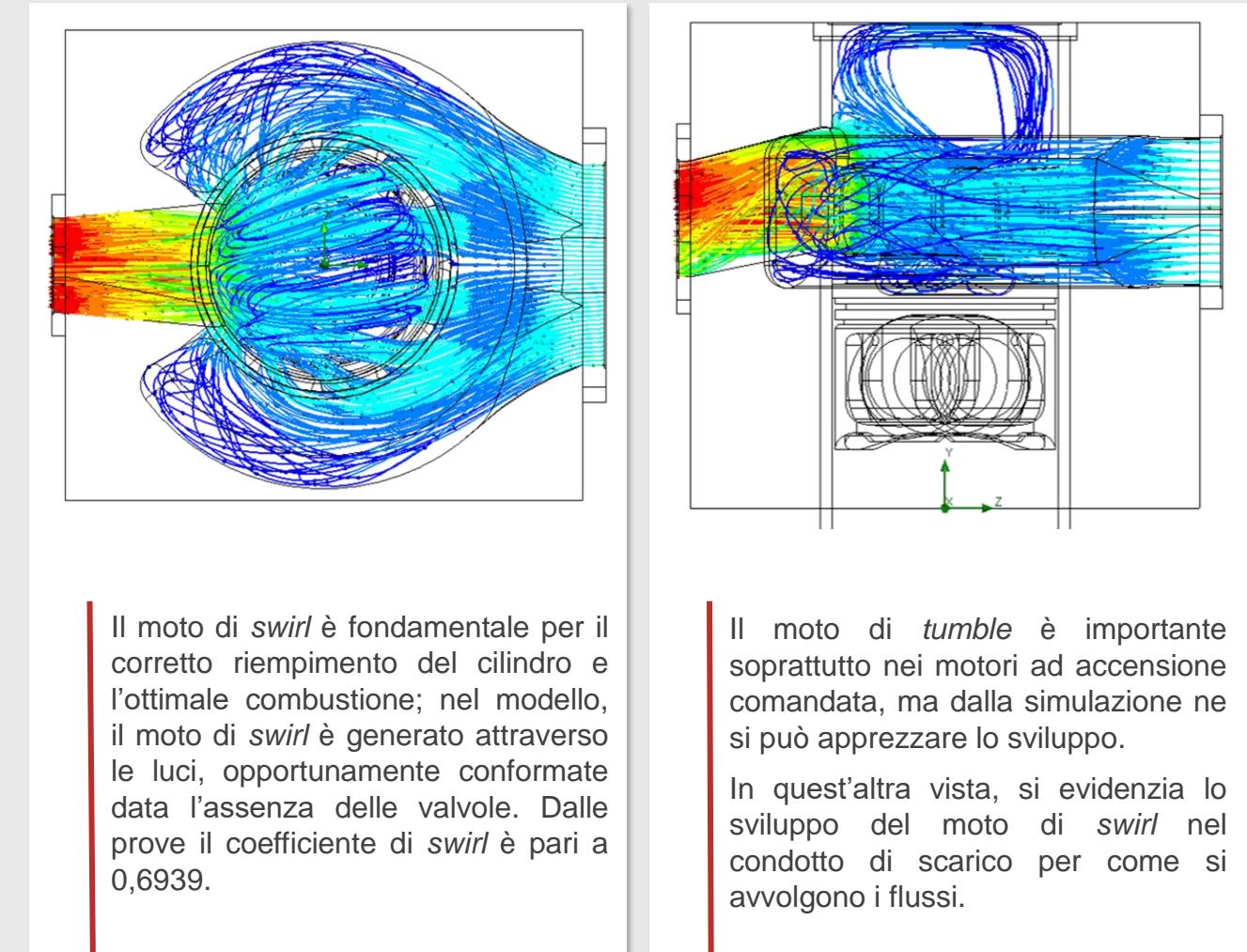
### Calcolo coefficienti di efflusso

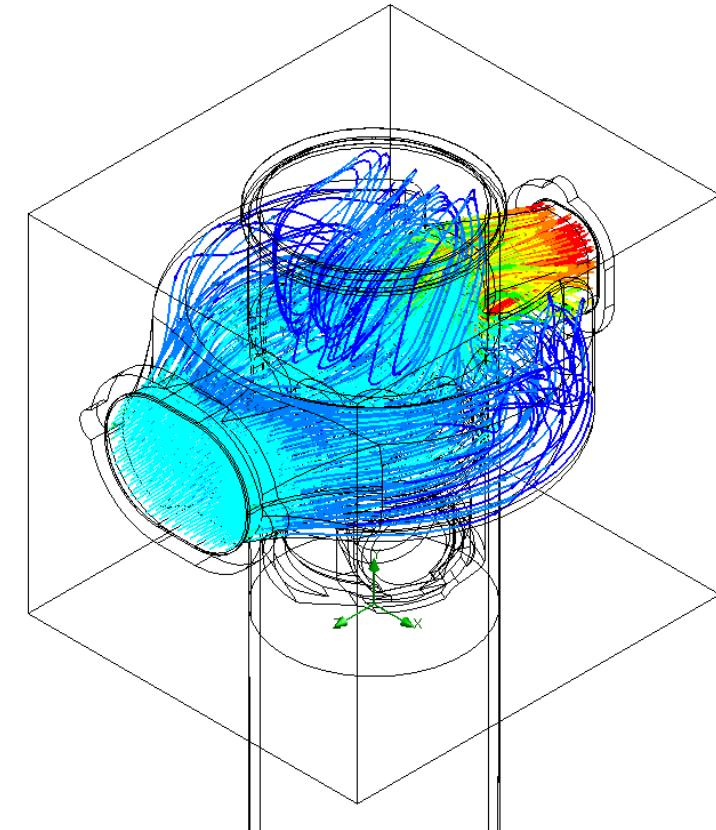
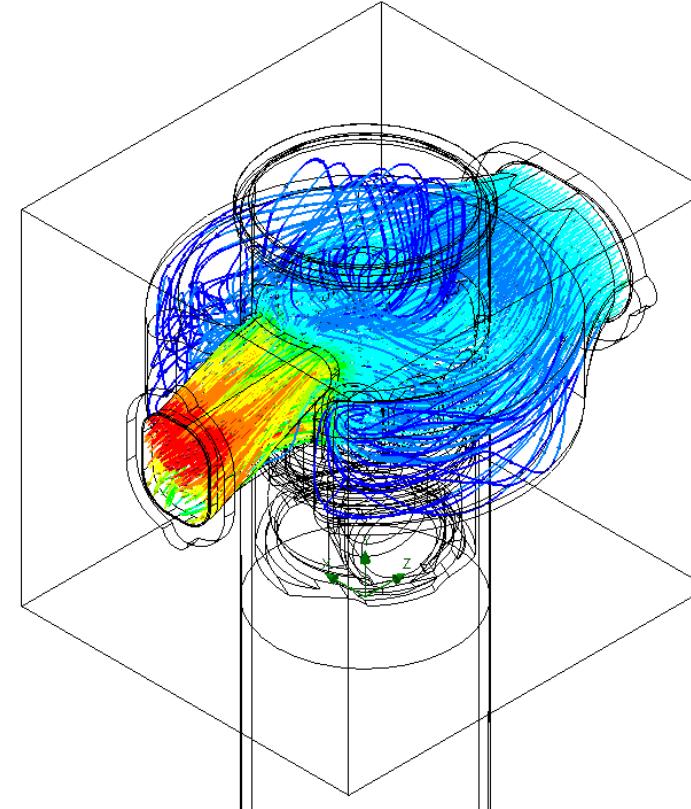
La prova comprendeva la chiusura alternata delle luci di aspirazione e di scarico per ciascuna prova; le condizioni di prova prevedevano l'ingresso allo stato ambiente (101.325, Pa 323 K) e l'uscita dal fondo del *liner* alla pressione ridotta di 96.325 Pa. Fondamentale è considerare un *liner* sufficientemente lungo da avere moto laminare in uscita.

# Simulazione fluidodinamica al punto morto inferiore

Nelle immagini è riportata la simulazione fluidodinamica al punto morto inferiore in condizioni di esercizio.

Dalle immagini si denota lo sviluppo dei moti di *swirl* e *tumble* caratteristici: lo sviluppo del fluido all'interno del cilindro è stato studiato in parallelo alla modellazione dell'airbox dell'unità cilindro e delle luci di aspirazione e scarico ricavate sulla canna cilindro o *liner*.

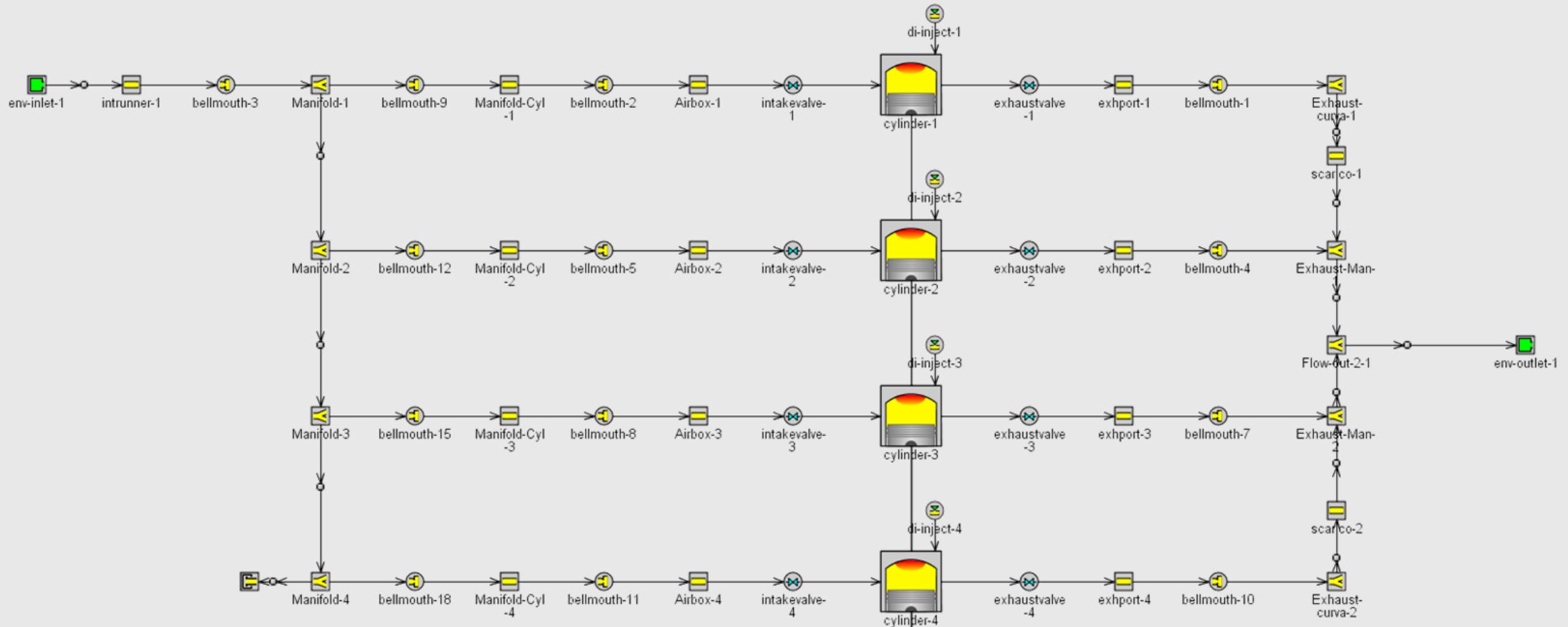


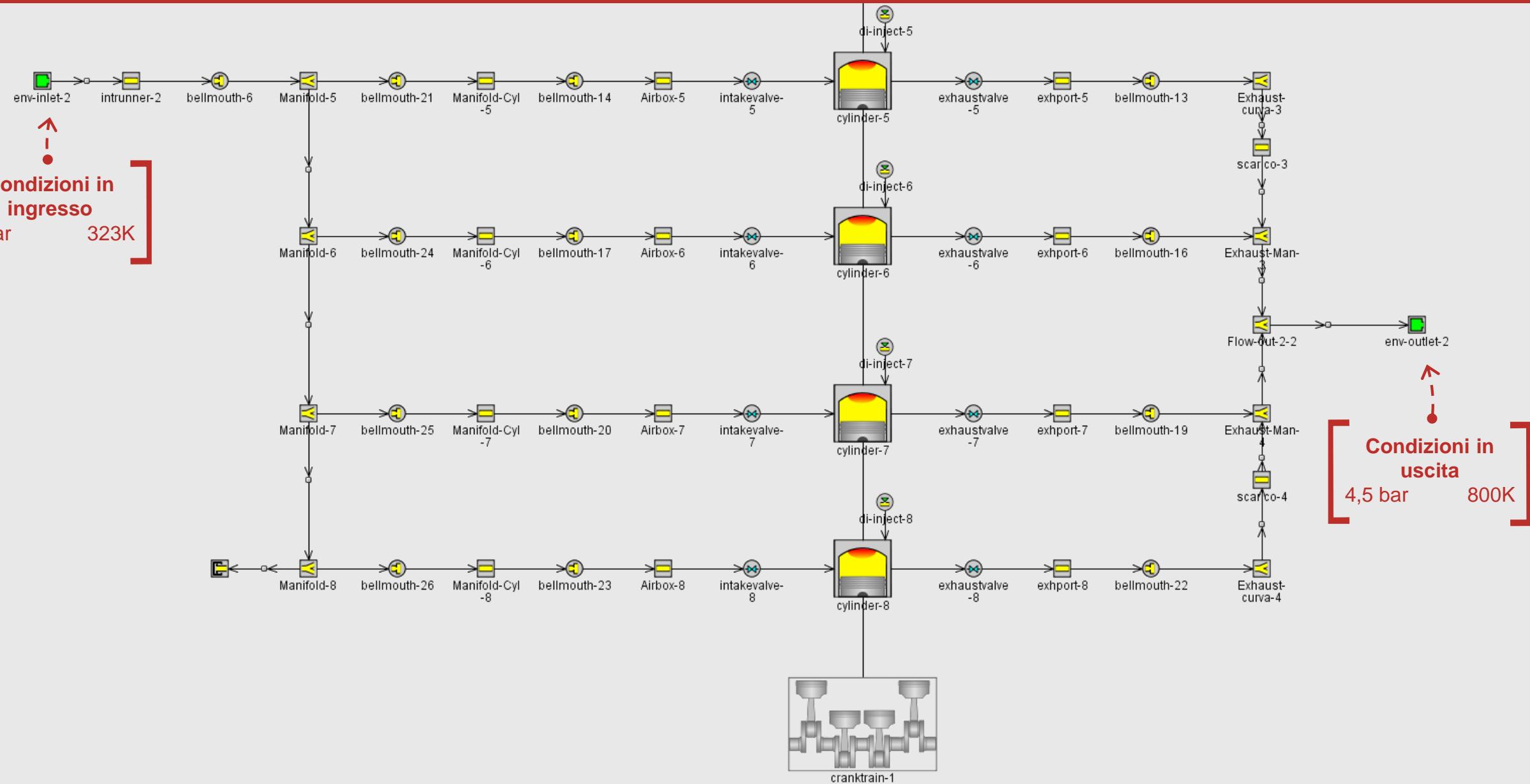
**Airbox e  
unità cilindro**

In evidenza la conformazione dell'airbox ricavato nel corpo dell'unità cilindro, il quale contribuisce alla formazione dei moti di *swirl* e *tumble* oltre ad alimentare la cilindrata. Questa soluzione di airbox anulare al cilindro, prende spunto da quella adottata sui Detroit Diesel serie 60 e successive.

# Modello GT-Power

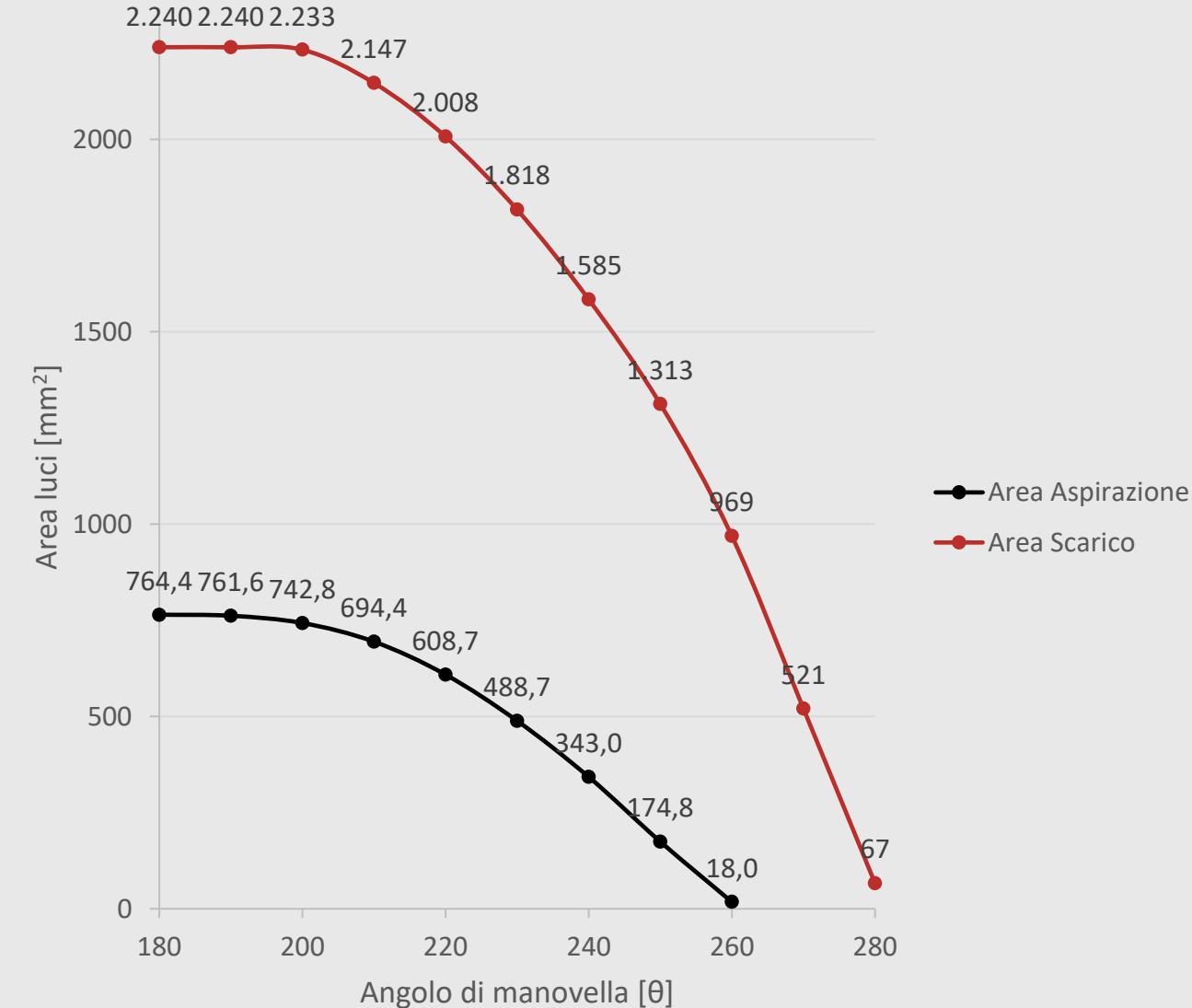
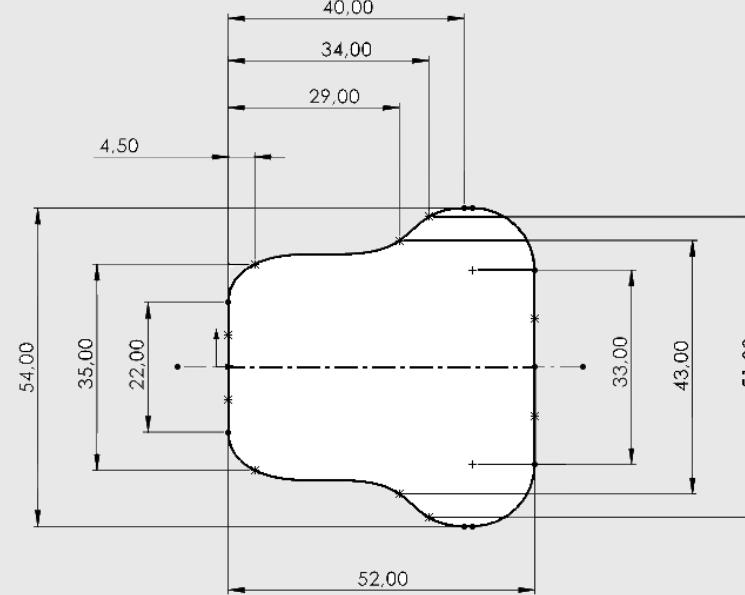
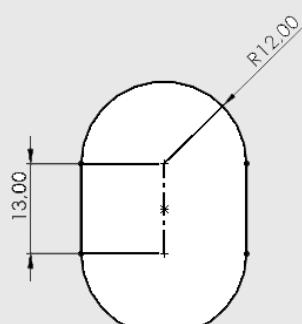
Modello monodimensionale del motore sviluppato su due bancate uguali, ognuna delle quali è dotata di un proprio turbocompressore.





# Fasatura luci

La progettazione è orientata a realizzare un modello privo di valvole, così da ridurre il numero di componenti e semplificare il montaggio: questo comporta che la fasatura di aspirazione e scarico è gestita, come segue, in funzione della posizione del pistone attraverso le luci ricavate sulla canna cilindro.

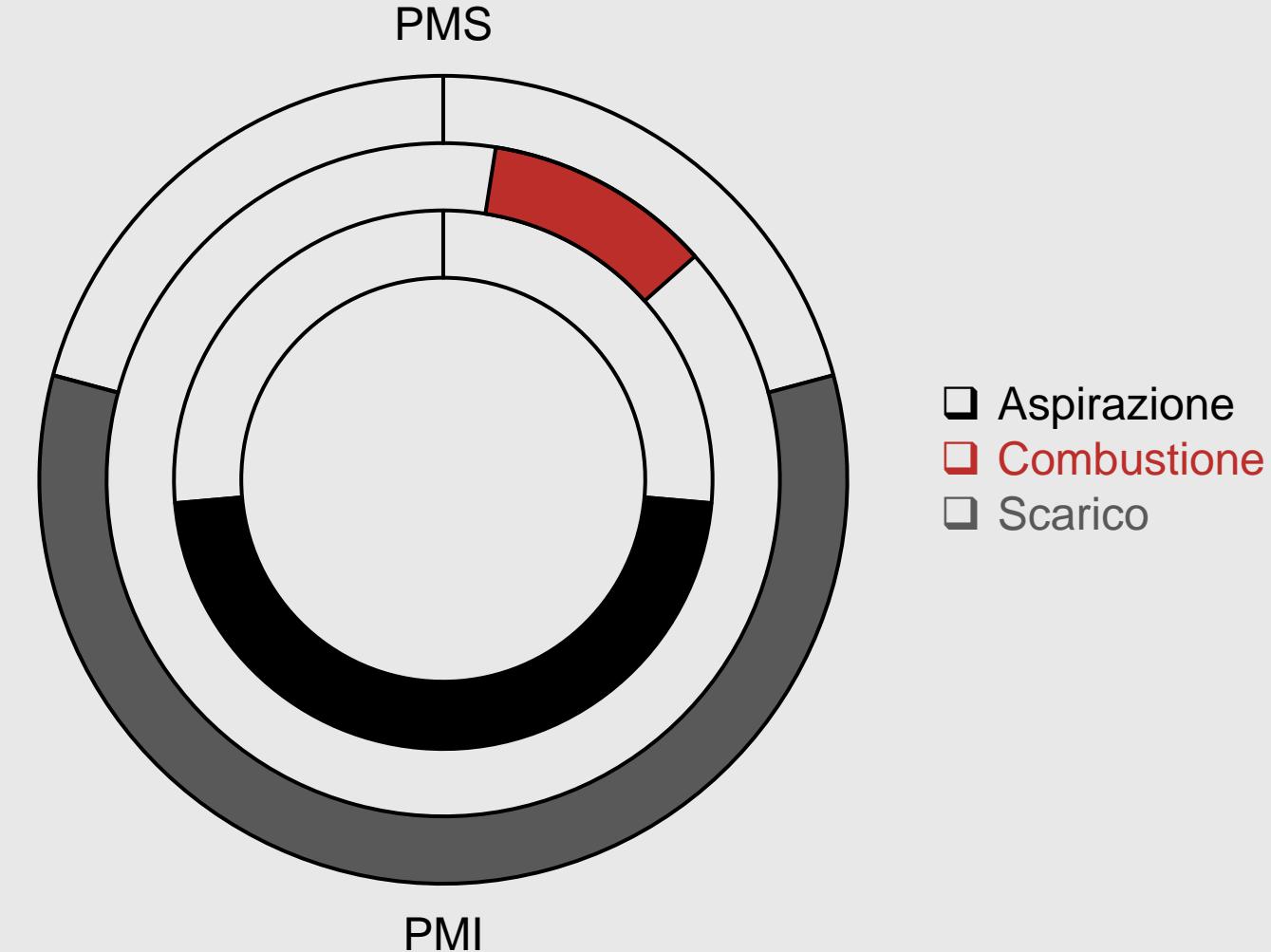


La fase di aspirazione ha inizio in corrispondenza di un angolo di manovella di  $95^\circ$  e le luci di aspirazione vengono chiuse a  $265^\circ$ .

La fase di combustione è stata ricavata attraverso i dati calcolati da GT-Power, in funzione della temperatura, della quantità di combustibile introdotto (115 mg per ciclo) e dell'inizio e fine dell'iniezione (rispettivamente  $-5^\circ$  e  $13^\circ$  rispetto al PMS).

Si è ottenuto che la combustione ha inizio con un ritardo angolare di  $14^\circ$ , in corrispondenza di un angolo di manovella di  $9^\circ$ , ed ha una durata di  $39,4^\circ$ .

Per quanto riguarda la fase di scarico, questa inizia e finisce rispettivamente a  $75^\circ$  e  $285^\circ$  di angolo di manovella.

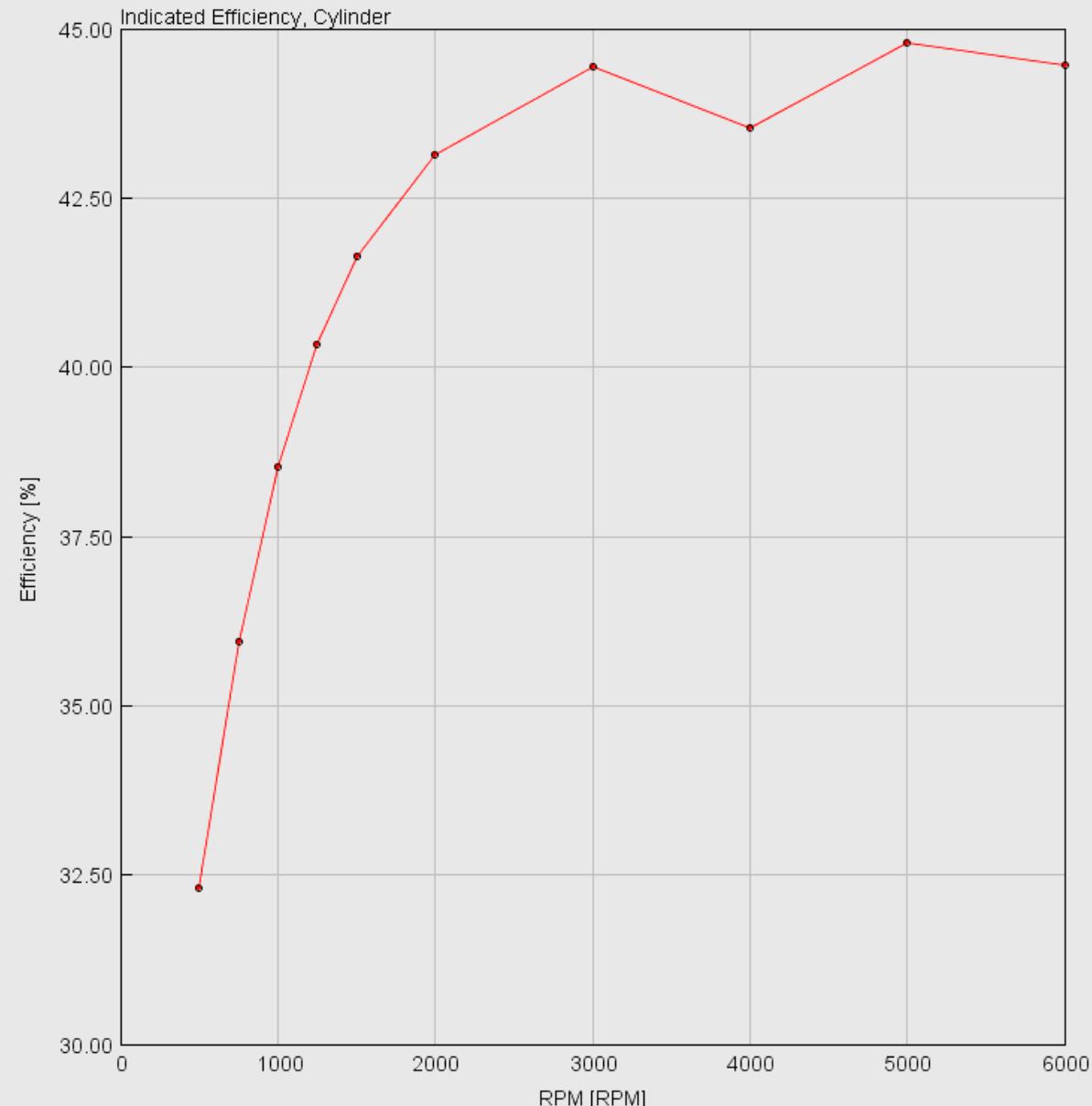


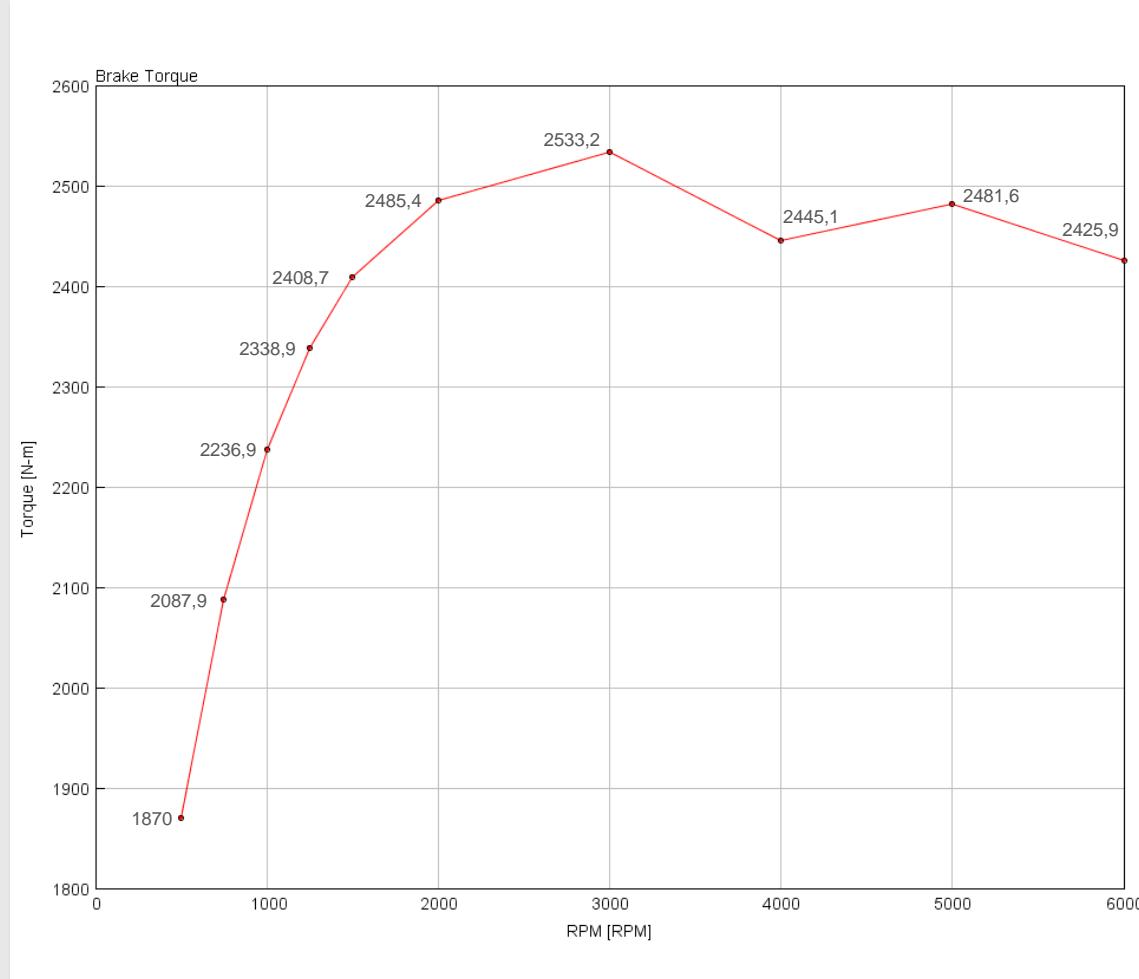
# Curve caratteristiche

A partire dal modello monodimensionale del motore le simulazioni sono state un supporto necessario per la modellazione dei componenti al fine di ottenere le prestazioni richieste in termini di potenza e di efficienza.

Per l'impiego designato è importante che il motore raggiunga le massime prestazioni nelle condizioni di pieno carico, in quanto queste sono le normali condizioni di funzionamento dopo il decollo dell'aeromobile.

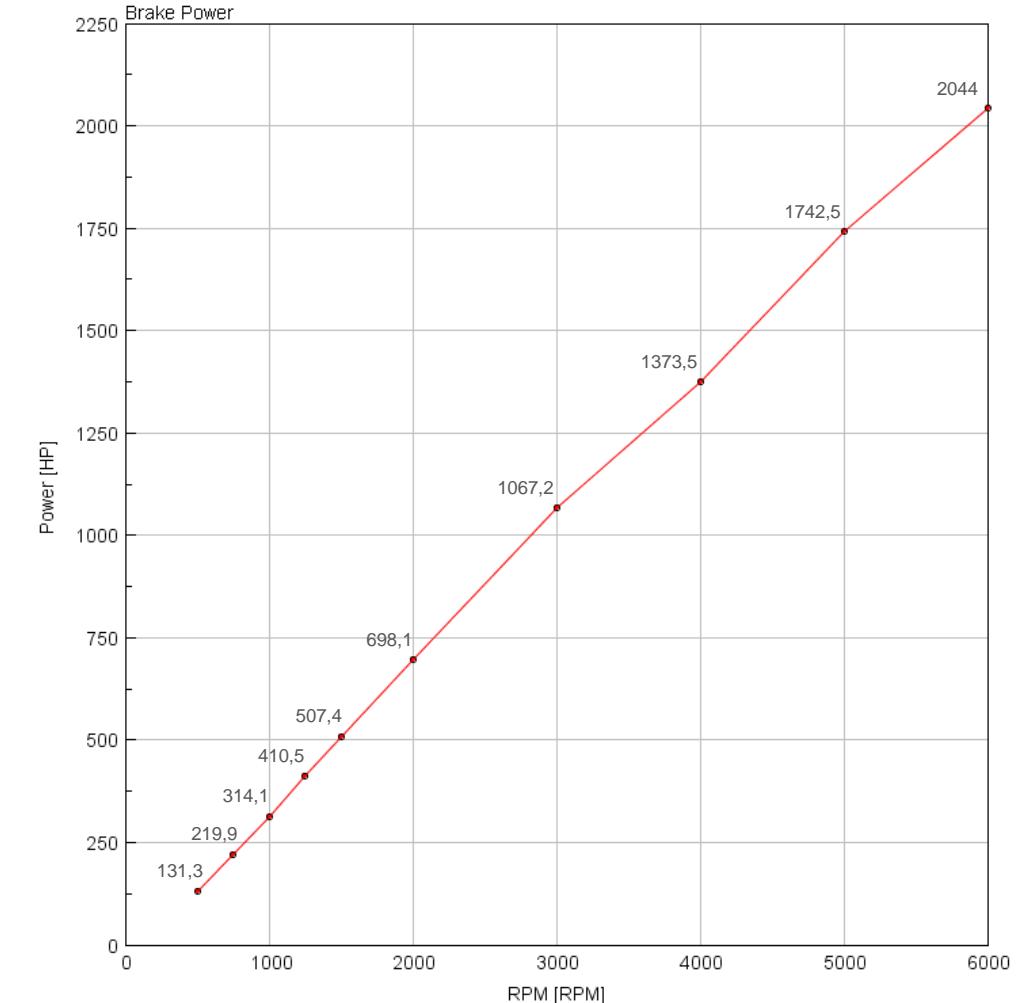
Nel diagramma di fianco è riportato l'andamento dell'efficienza indicata: questa è massima e pressoché costante nei regimi di massimo carico.





### Curva di coppia

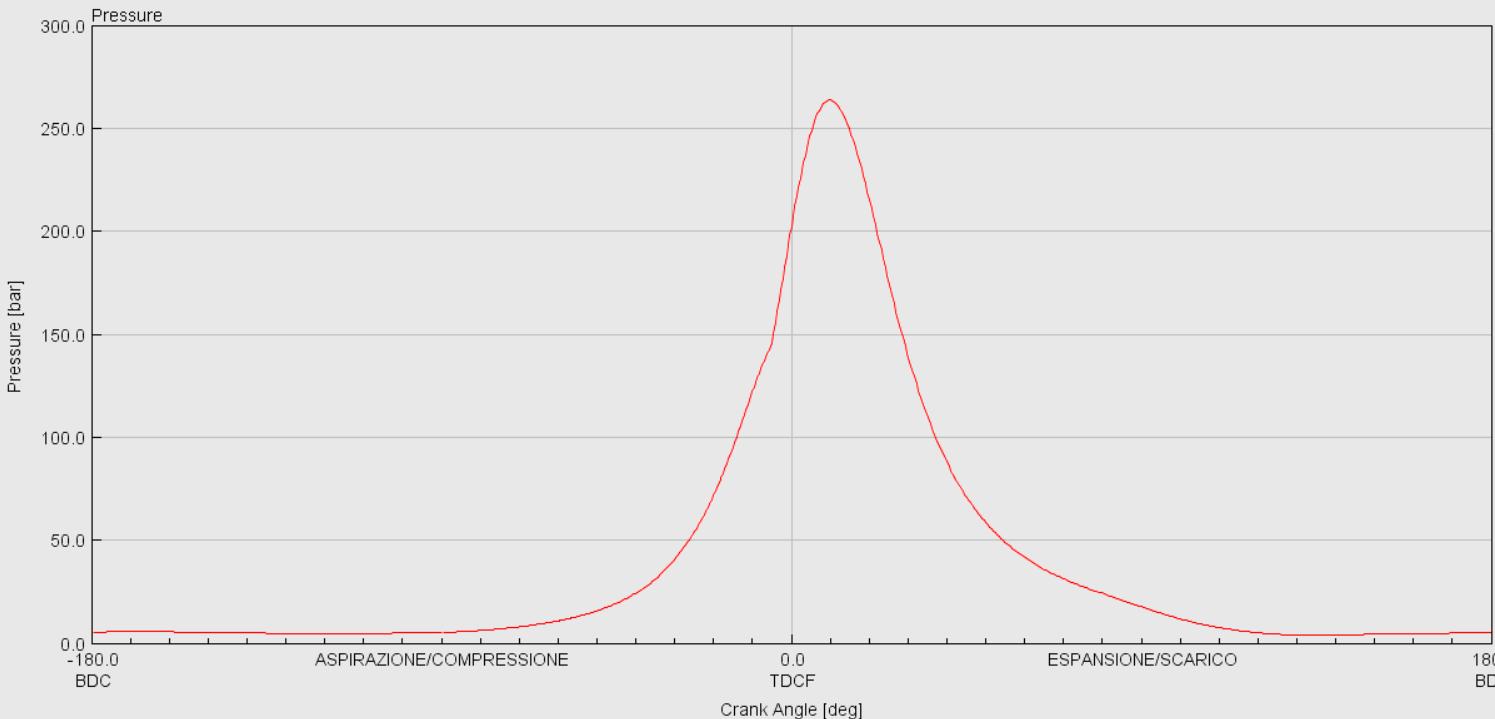
La curva ha un picco di 2.533 Nm a 3.000 rpm e poi decresce con un gradiente ridotto.



### Curva di potenza

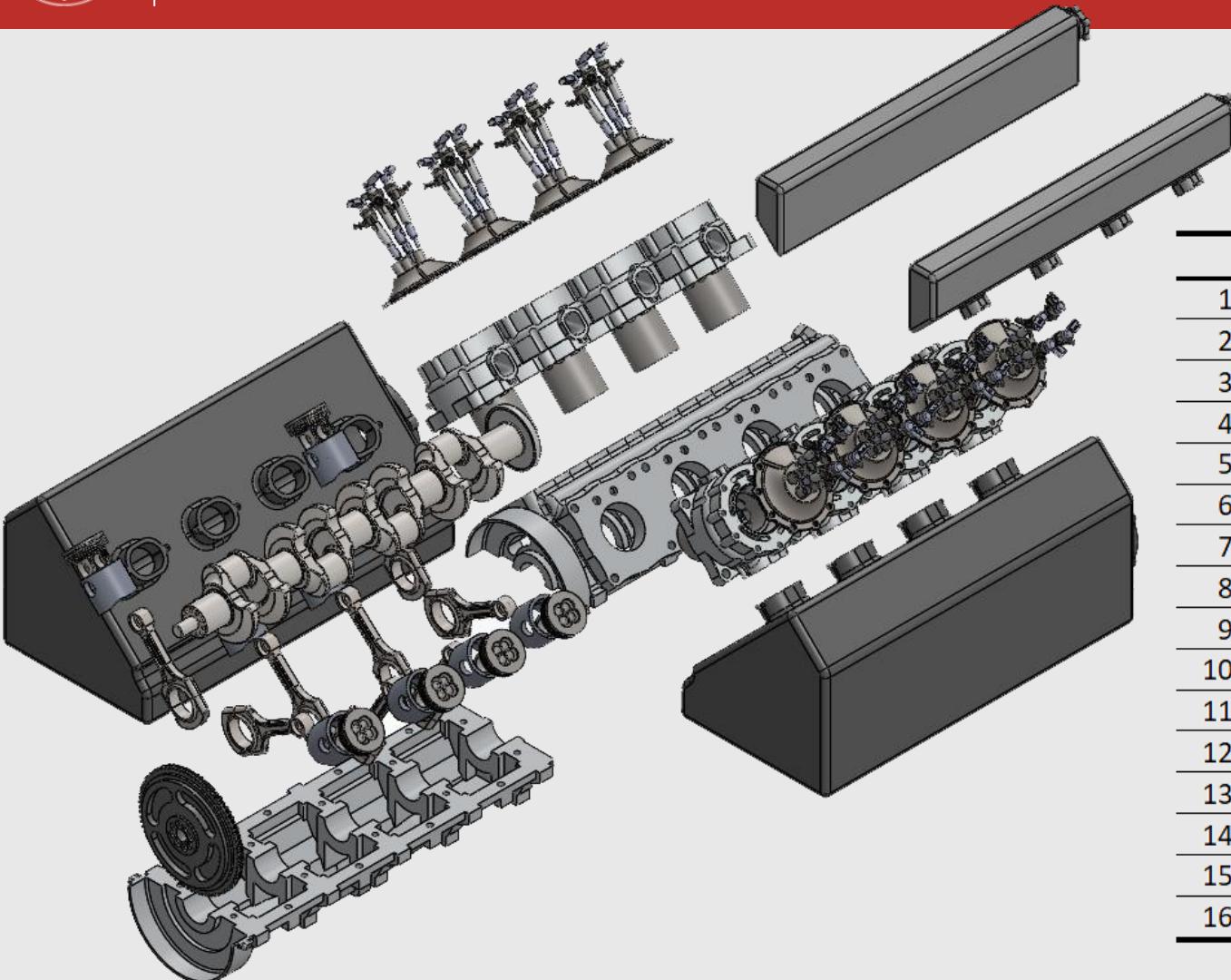
La curva ha un picco di 2.041 HP a 6.000 rpm, soddisfacendo le prestazioni richieste.

# Andamento delle pressioni



Considerando i risultati della simulazione a pieno carico si ricava il seguente andamento delle pressioni: il modello monodimensionale utilizzato non risulta completamente affidabile, perciò si è scelto arbitrariamente di considerare un valore massimo di pressione in camera di combustione pari a 250 bar.

Su questo valore di pressione si svilupperanno tutte le verifiche successive sui componenti.



## Esploso e distinta base

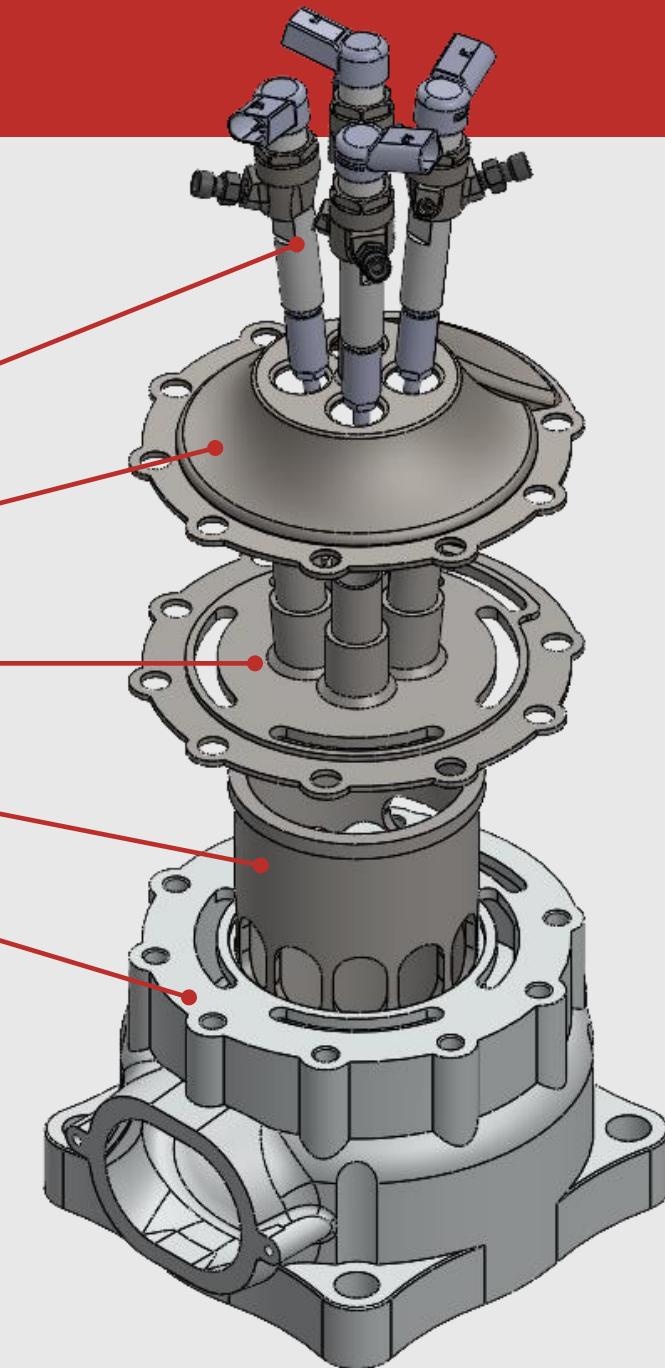
	Parte	Materiale	Peso [kg]	Qtà
1	Albero motore	36NiCrMo16	53,271	1
2	Basamento	Al 201.0-T6	58,855	1
3	Biella	Ti 6 Al 4V	0,873	8
4	Cielo pistone	X17CrNi16-2	1,526	8
5	Coperchio testa	Al 201.0-T6	0,38	8
6	Coppa basamento	Al 201.0-T6	28,06	1
7	Corpo cilindro	Al 201.0-T6	5,395	8
8	Liner	X17CrNi16-2	2,166	8
9	Manifold aspirazione	PEEK	7,653	2
10	Manifold scarico	X17CrNi16-2	11,253	2
11	Mantello pistone	Al 201.0-T6	0,527	8
12	Piatto fiamma	Acciaio al carbonio da fusione	1,55	8
13	Puleggia	Al 201.0-T6	0,6	1
14	Rail	Acciaio al carbonio da fusione	4,328	4
15	Supporti rail	Al 201.0-T6	0,44	16
16	Volano	Al 201.0-T7	41,78	1
<b>Totale</b>				<b>303,657</b>
				<b>85</b>

Il peso complessivo a secco non tiene conto degli iniettori, ma anche tenendone conto il peso rimarrebbe al di sotto del motore di confronto.

# Unità cilindro

L'unità cilindro è composta da:

- Iniettori
- Coperchio testa
- Piatto fiamma
- Liner
- Blocco cilindro

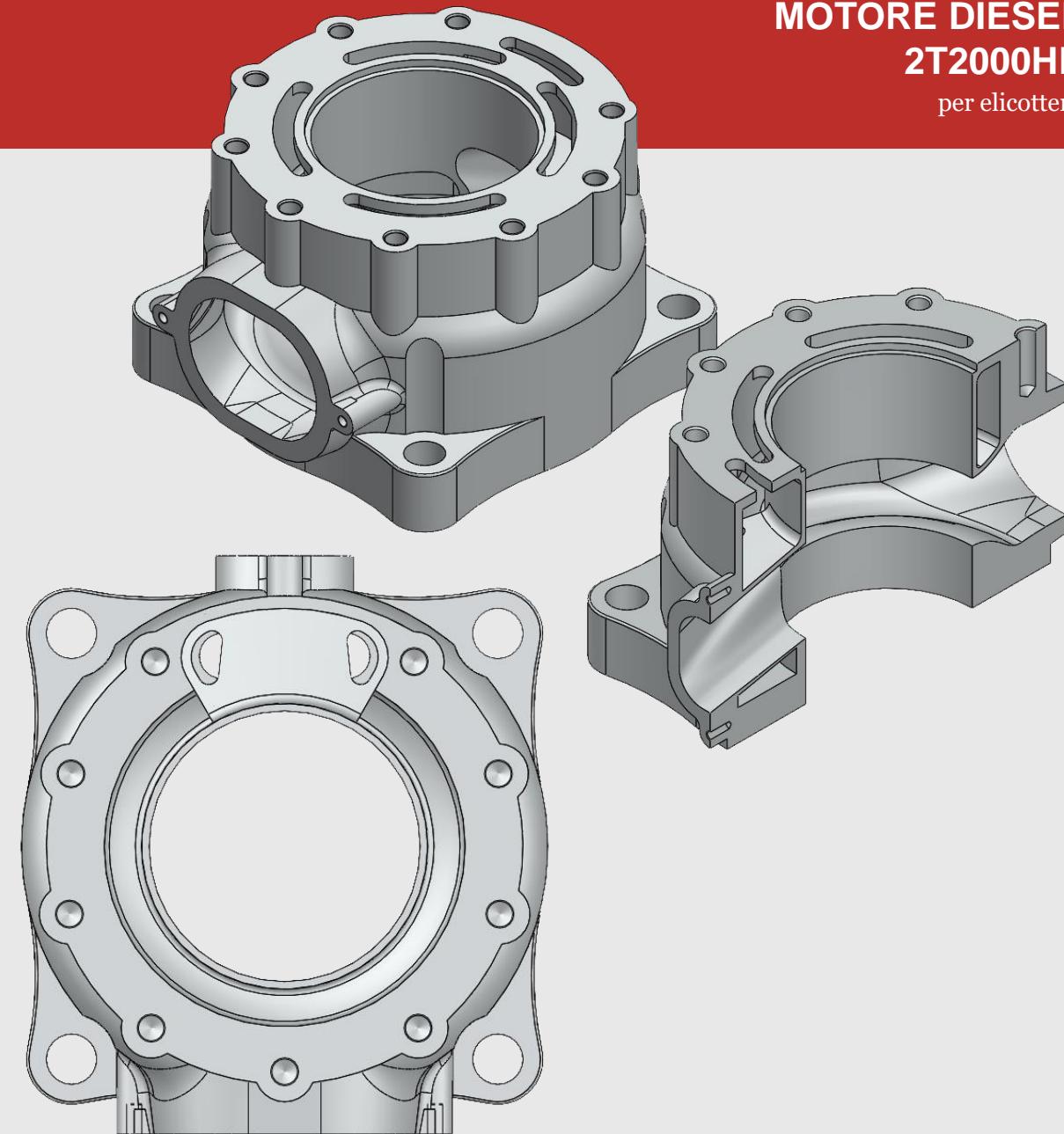


# Blocco cilindro

Il **blocco** presenta un *airbox* interno che avvolge il cilindro: l'*airbox* è fondamentale per l'alimentazione del combustibile.

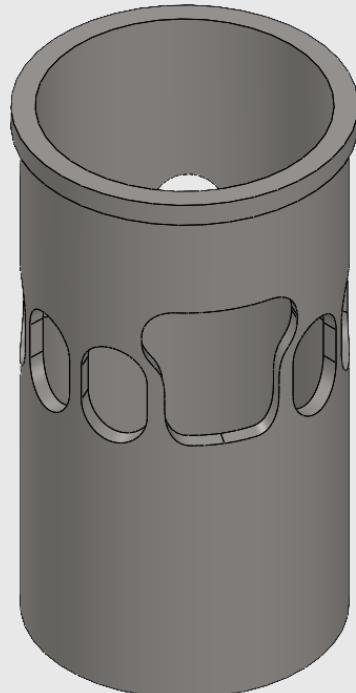
Il cilindro è refrigerato attraverso una *camicia* circolare. Il fluido refrigerante viene introdotto dalla testa, attraverso la guarnizione, e fuoriesce, verso il basamento, mediante un condotto ricavato attorno allo scarico.

Il fissaggio del blocco sul basamento è assicurato da 4 prigionieri di dimensione M18 che garantiscono anche il posizionamento dei supporti per i *rail*.

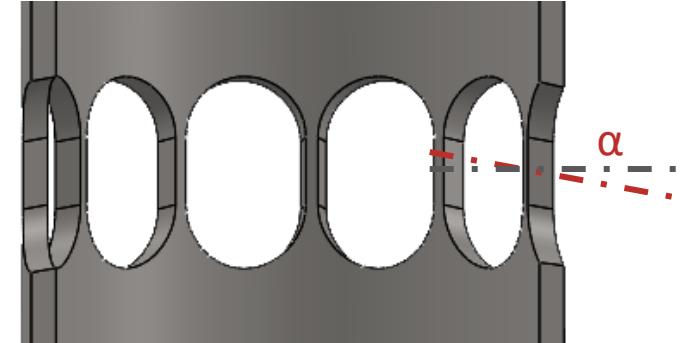


# Liner o canna cilindro

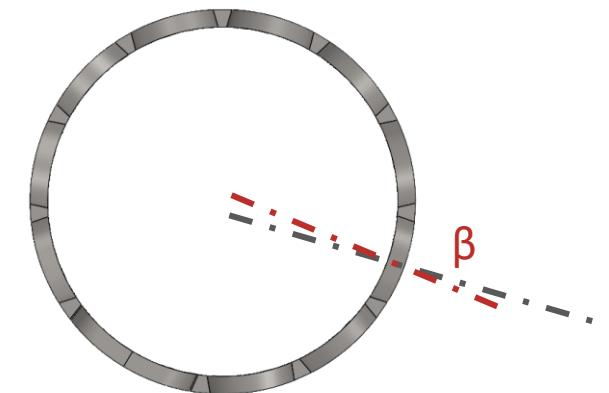
Il *liner* prende spunto da quelli impiegati per i motori Detroit Diesel serie 60. Le luci di aspirazione sono ricavate con due principali inclinazioni: la prima verticale, per un miglior riempimento del cilindro, e la seconda radiale, per accentuare il moto di *swirl*.



La luce di scarico ha una conformazione integrata da due *booster* laterali, importanti per i moti turbolenti dei fluidi di scarico.



L'angolo di inclinazione è, come da manuale Detroit Diesel, di 10°.



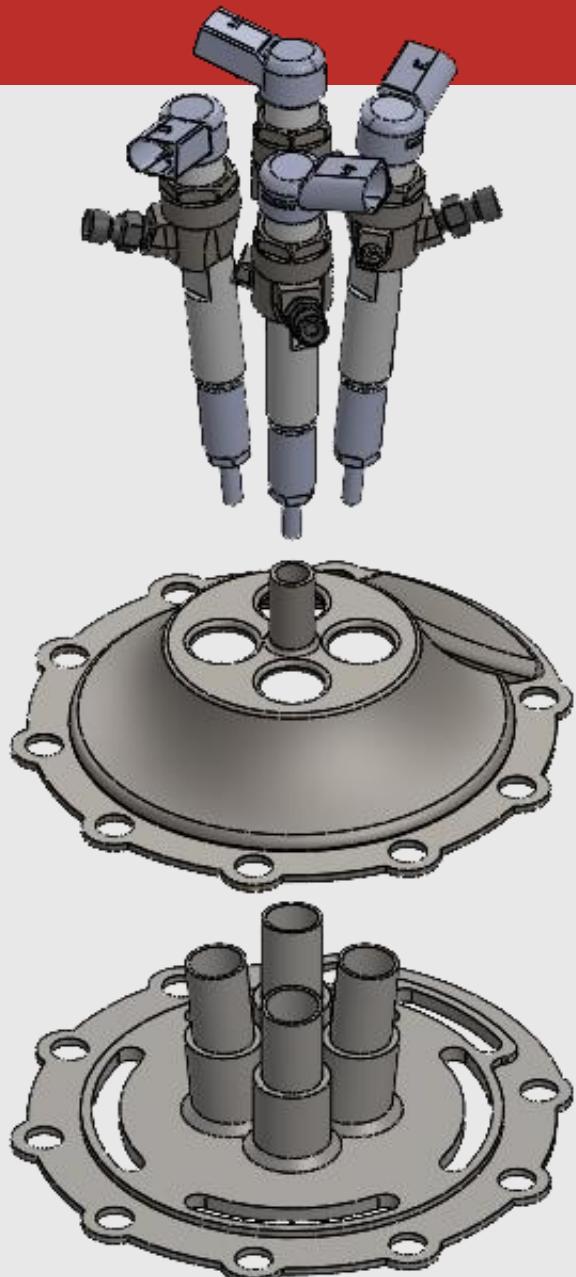
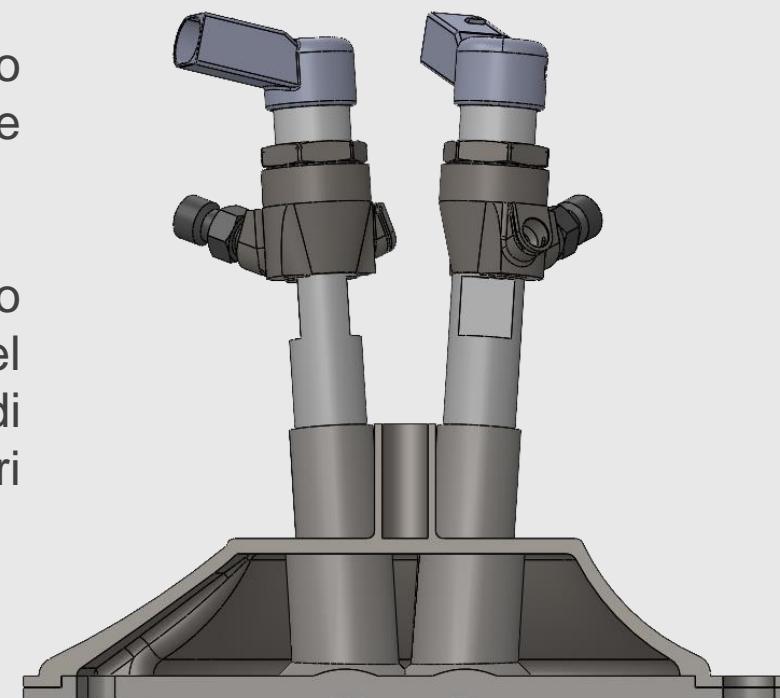
L'angolo di inclinazione è, come da manuale Detroit Diesel, di 19°.

# Testa e iniezione

Per gli elevati regimi di rotazione si rende necessario l'utilizzo di più di un iniettore; in particolare si considerano quattro iniettori per cilindro con iniezione alternata a coppie.

Il piatto fiamma è realizzato mediante saldatura per includere le quattro sedi degli iniettori inclinate.

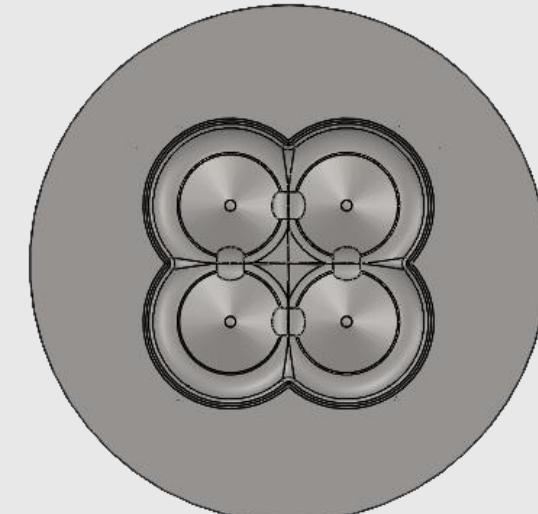
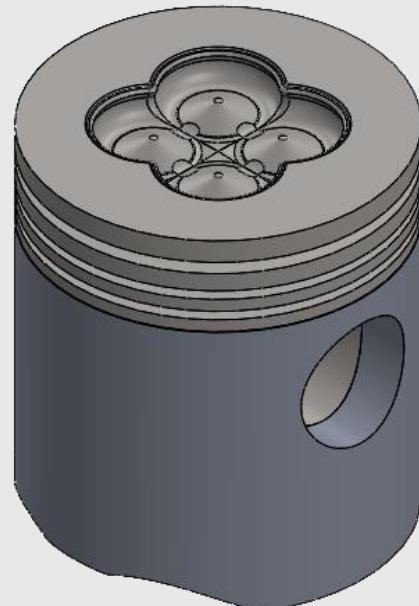
Il refrigerante fa il suo ingresso dall'apposito attacco al centro del piatto: in questo modo è in grado di refrigerare la testa e gli iniettori prima di fluire verso il corpo cilindro.



# Pistone

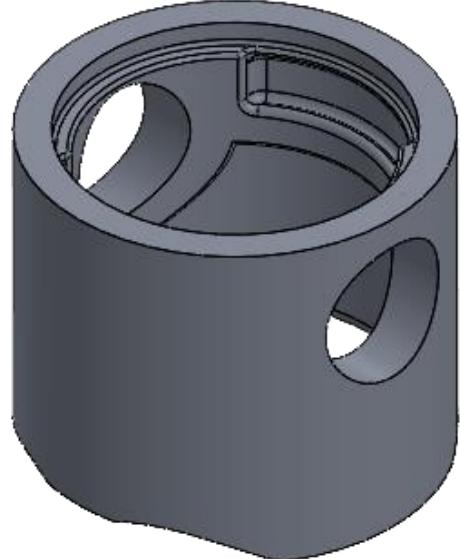
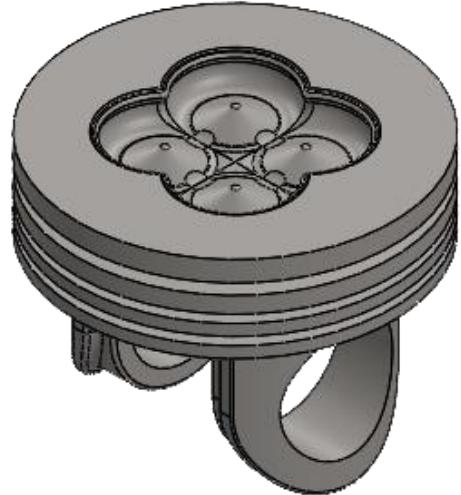
Il pistone bimetallico è progettato per avere una maggior resistenza termica e durezza sul cielo e maggior duttilità e minor attrito con la canna sul mantello.

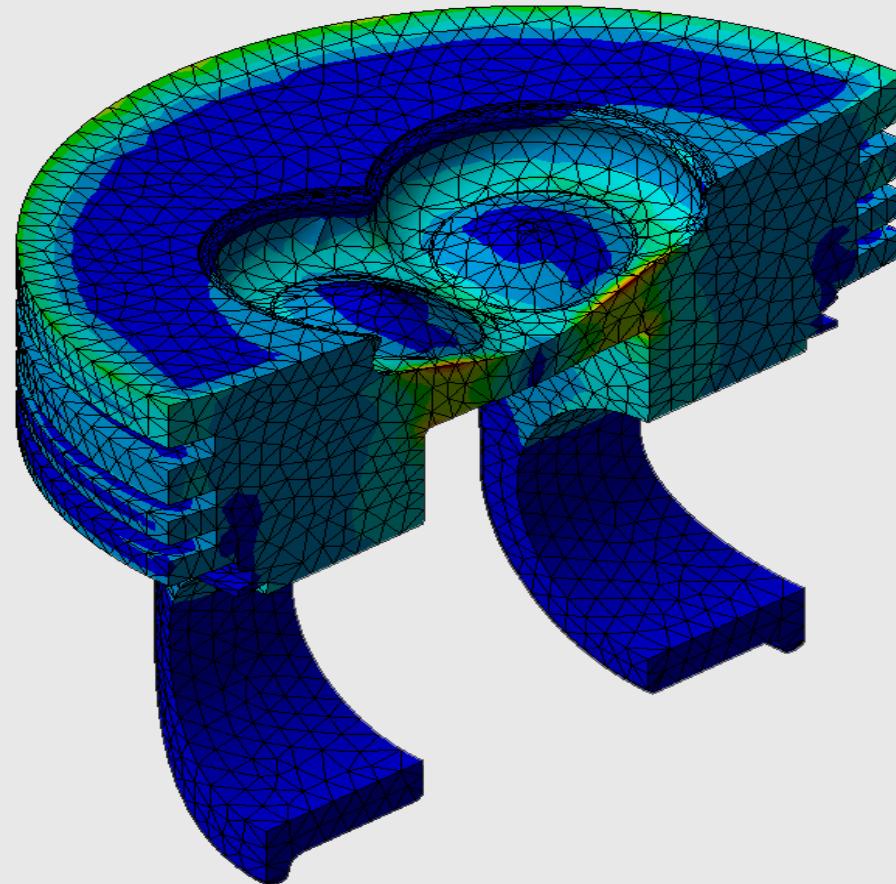
Per ottenere un pistone *bimetallico* si è optato per un cielo in acciaio e in un mantello in alluminio.



## Camera di combustione multipla

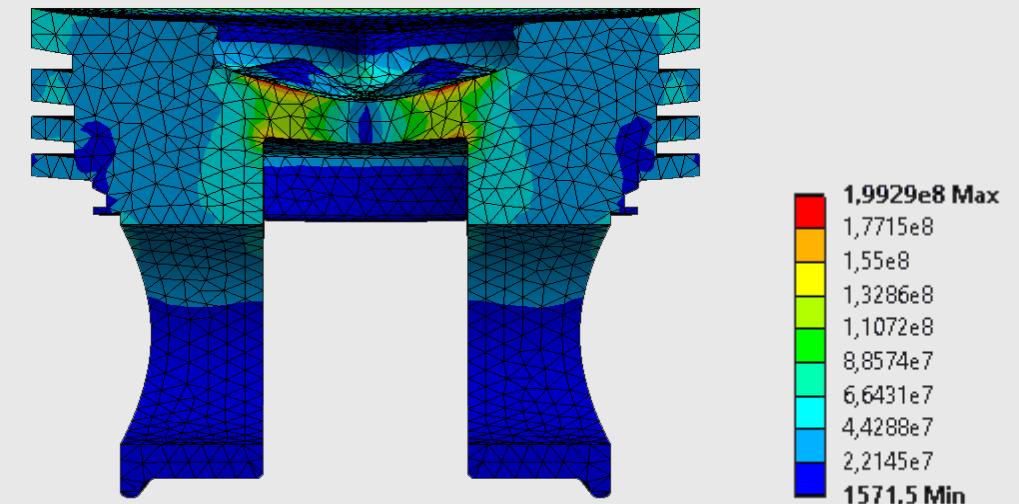
Il sistema multi-iniettore richiede una camera di combustione multipla, con una conformazione *quatrefoil-shape* ricavata sul cielo del pistone.





## Verifica del pistone

Verifica strutturale del pistone che prevede l'applicazione di una pressione sul cielo di 218 bar e sulla camera di combustione di 250 bar. La tensione massima equivalente di Von Mises vale 199 MPa, dalla quale risulta un coefficiente di sicurezza risulta pari a 3,77.

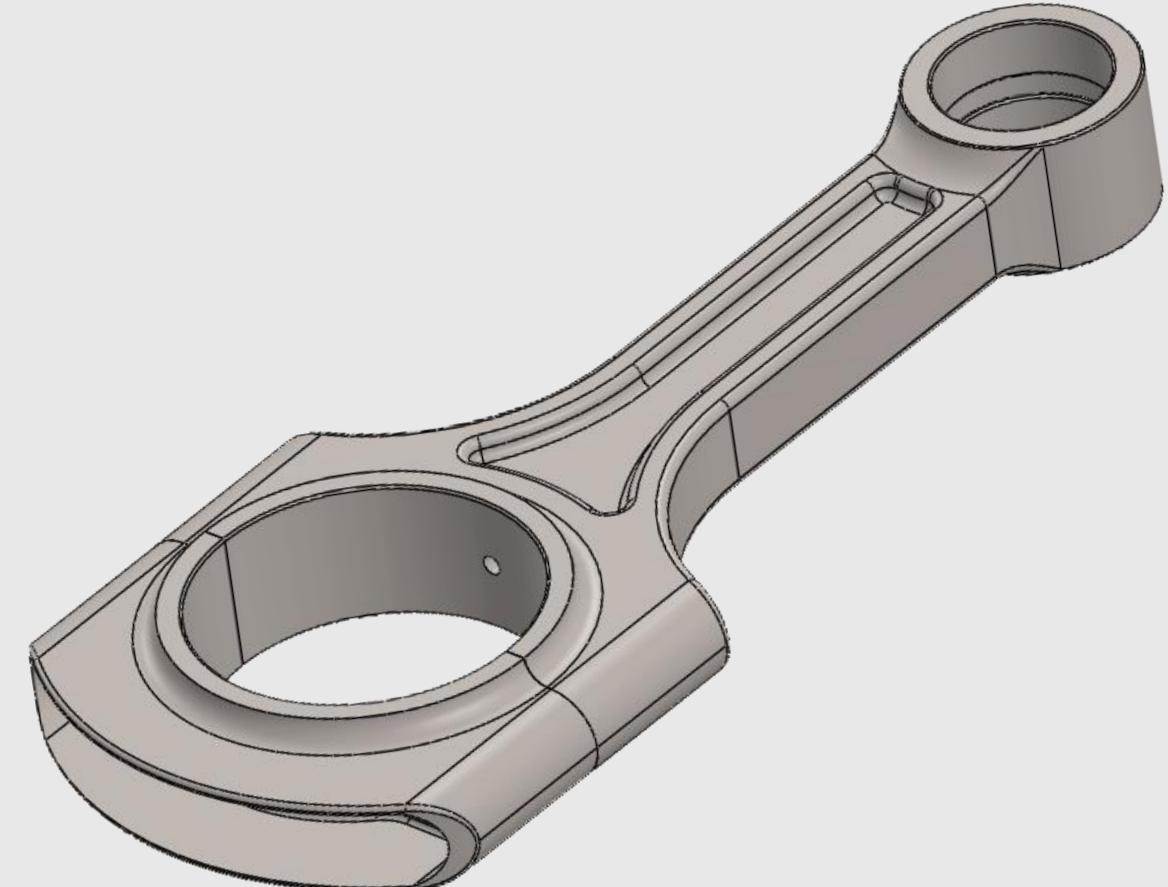


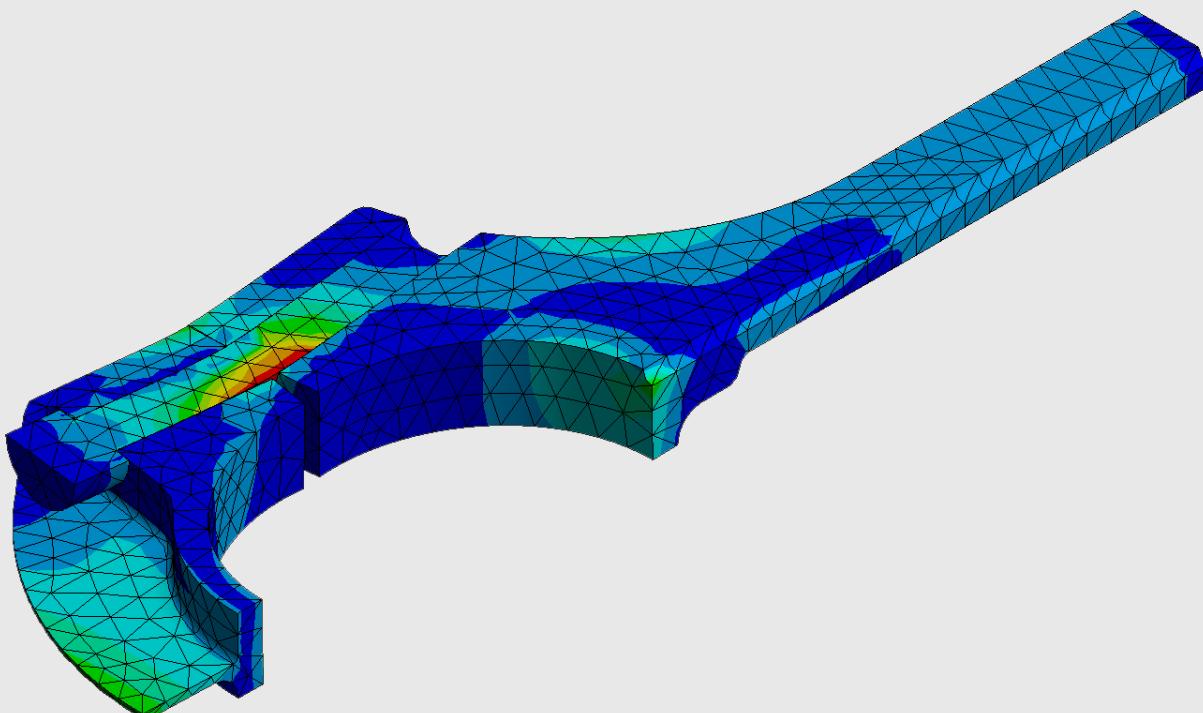
# Biella

La biella ha sezione ad «I» ed è ispirata a quelle impiegate nei motori Detroit Diesel serie 60. Il cappello utilizzato presenta una conformazione tale da consentire l'incasso delle viti *pank* adoperate per collegare le due parti.

La biella ha le seguenti dimensioni caratteristiche:

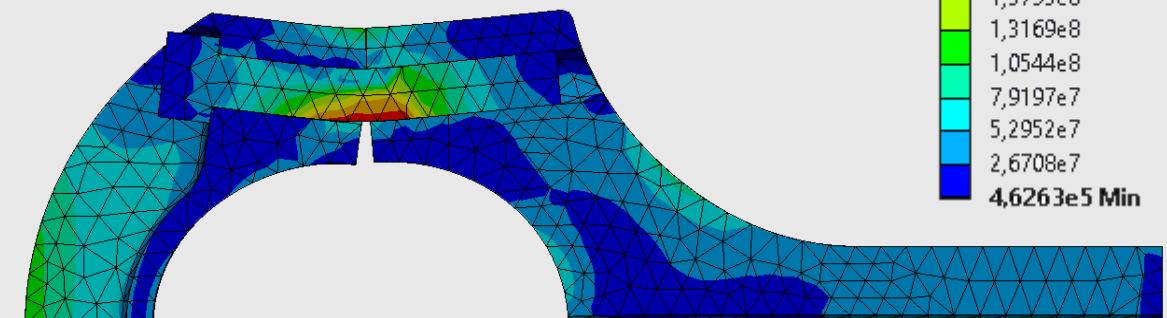
- Interasse 195 mm
- Diametro perno di manovella 70 mm
- Diametro spinotto 35 mm





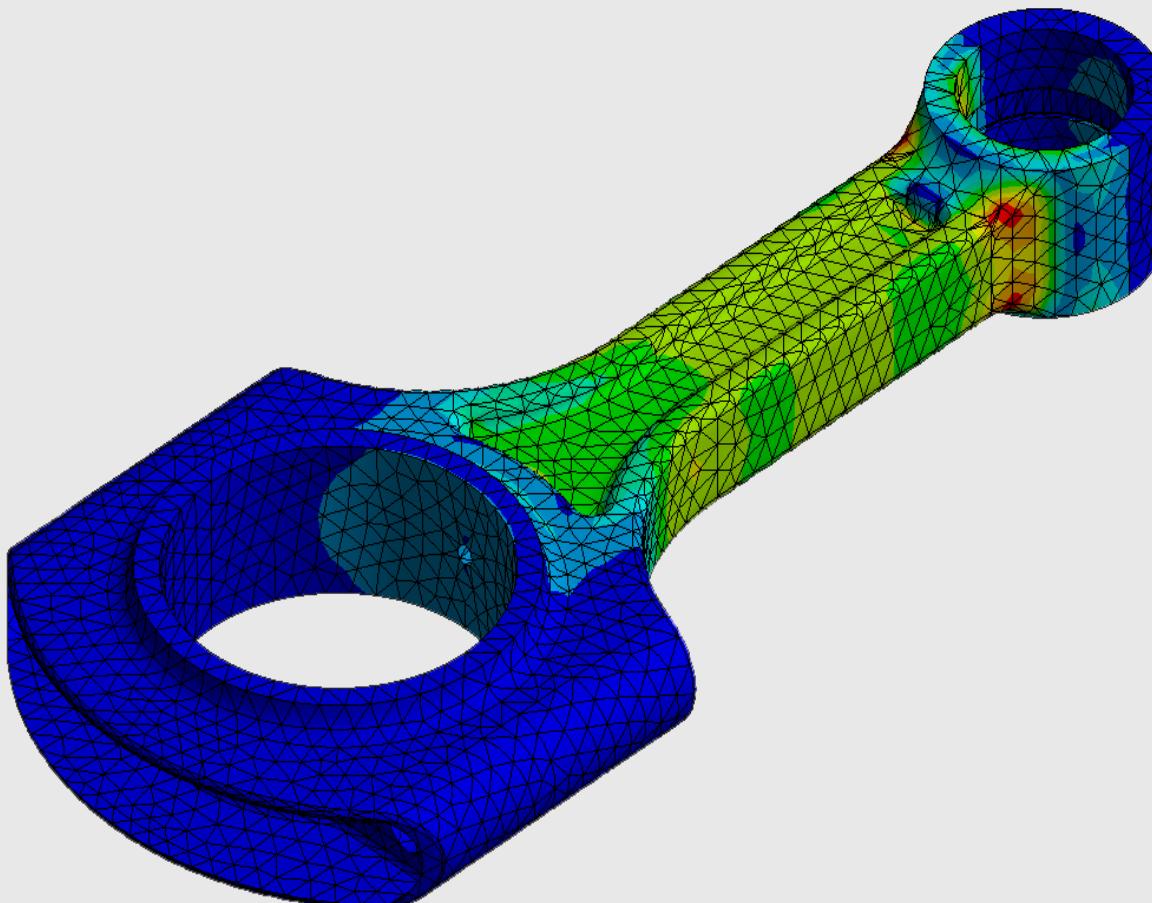
## Verifica cappello biella

Verifica strutturale sul cappello di biella che prevede l'applicazione di un carico (definito in due step fino a 3.750 N) sulla superficie interna del cappello e di un precarico sulla vite (definito in due step fino a 5.625 N), tenendo conto dell'attrito tra cappello e fusto e tra la testa della vite e il cappello stesso. La tensione massima equivalente di Von Mises vale 237 Mpa, dalla quale risulta un coefficiente di sicurezza risulta pari a 4,43.



2,3667e8 Max
2,1042e8
1,8418e8
1,5793e8
1,3169e8
1,0544e8
7,9197e7
5,2952e7
2,6708e7
4,6263e5 Min

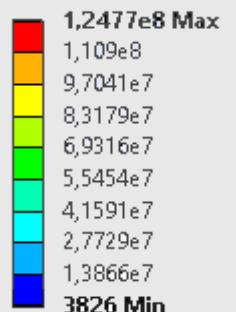
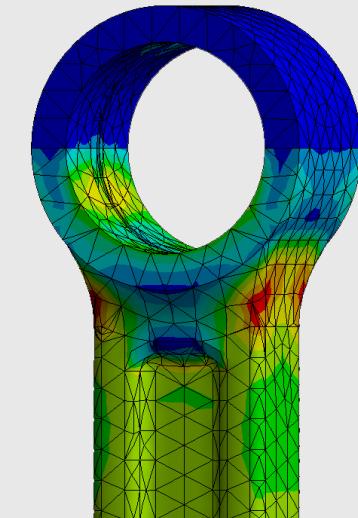
# Verifica a compressione

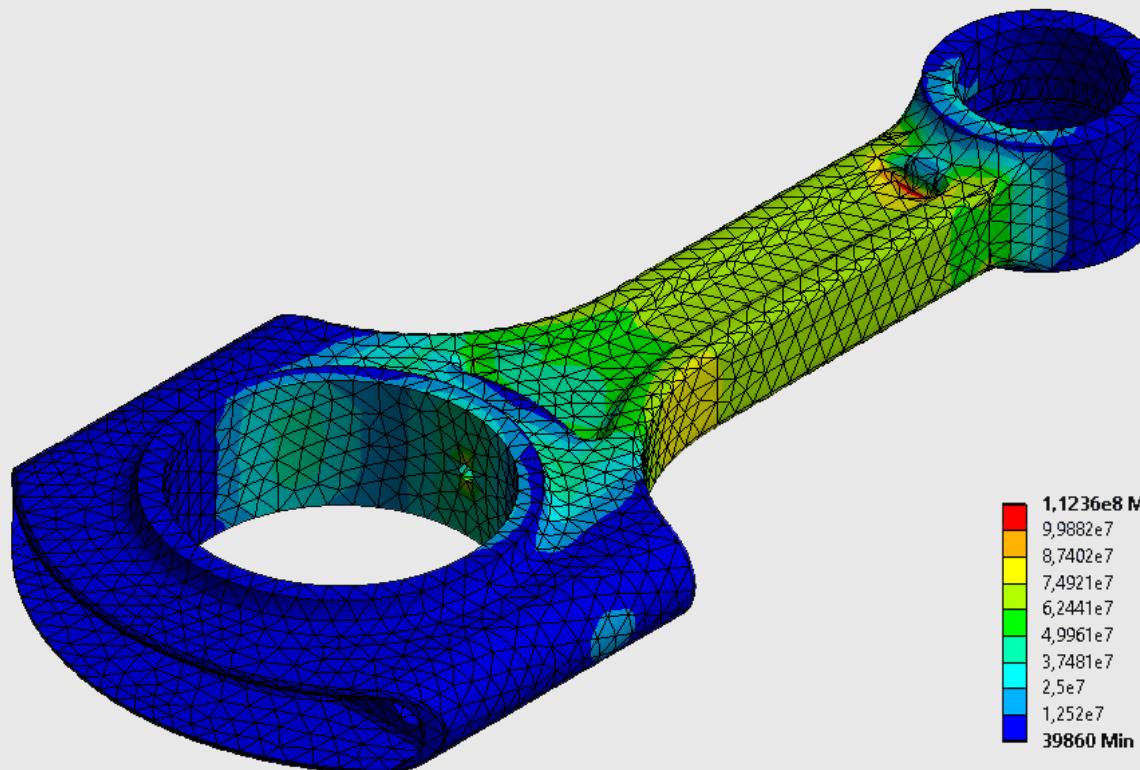


Verifica strutturale del fusto di biella che prevede l'applicazione di una forza di compressione al piede di biella pari a:

$$F_{max} = p_{max} / A_{pistone} = 33.143,5 \text{ N}$$

La tensione massima equivalente di Von Mises vale 124 MPa, dalla quale risulta un coefficiente di sicurezza risulta pari a 8,47.



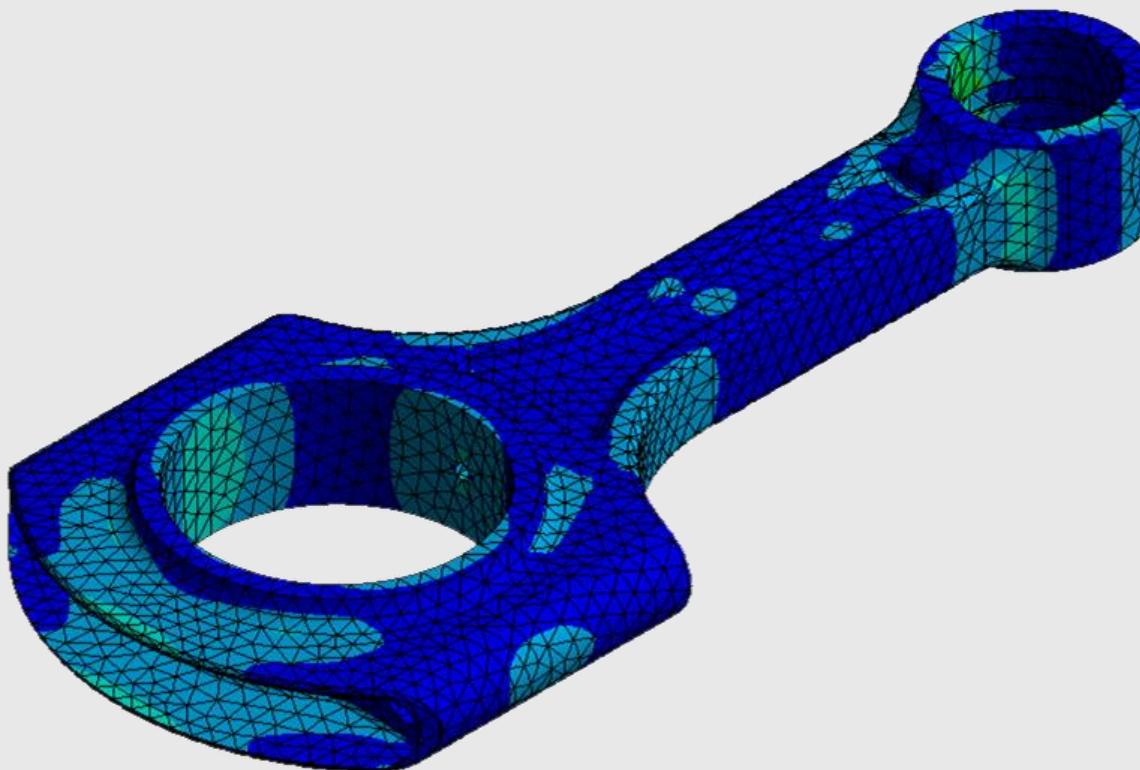


## Verifica a compressione

Verifica strutturale del fusto di biella che prevede l'applicazione di una forza di compressione alla testa di biella pari a:

$$F_{max} = p_{max} / A_{pistone} = 33.143,5 \text{ N}$$

La tensione massima equivalente di Von Mises vale 112 MPa, dalla quale risulta un coefficiente di sicurezza risulta pari a 9,38.

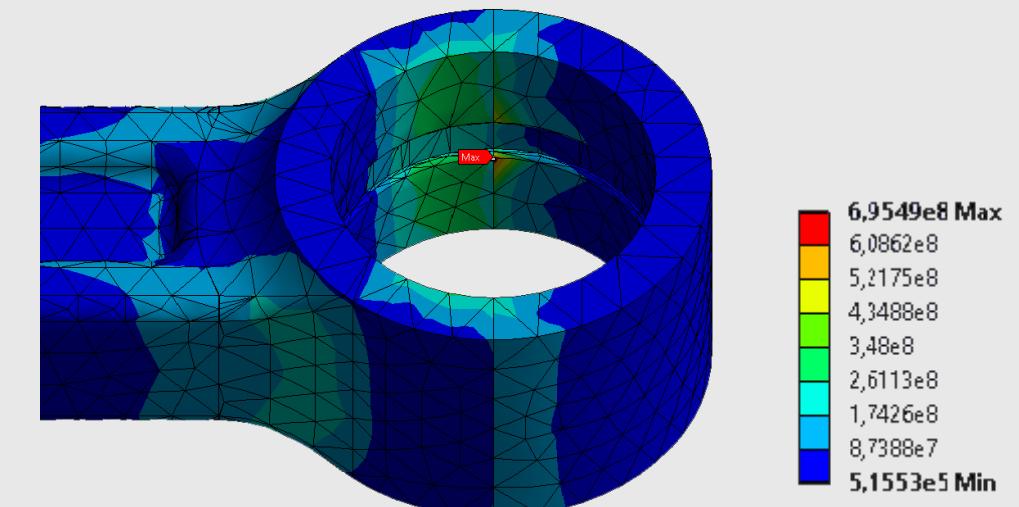


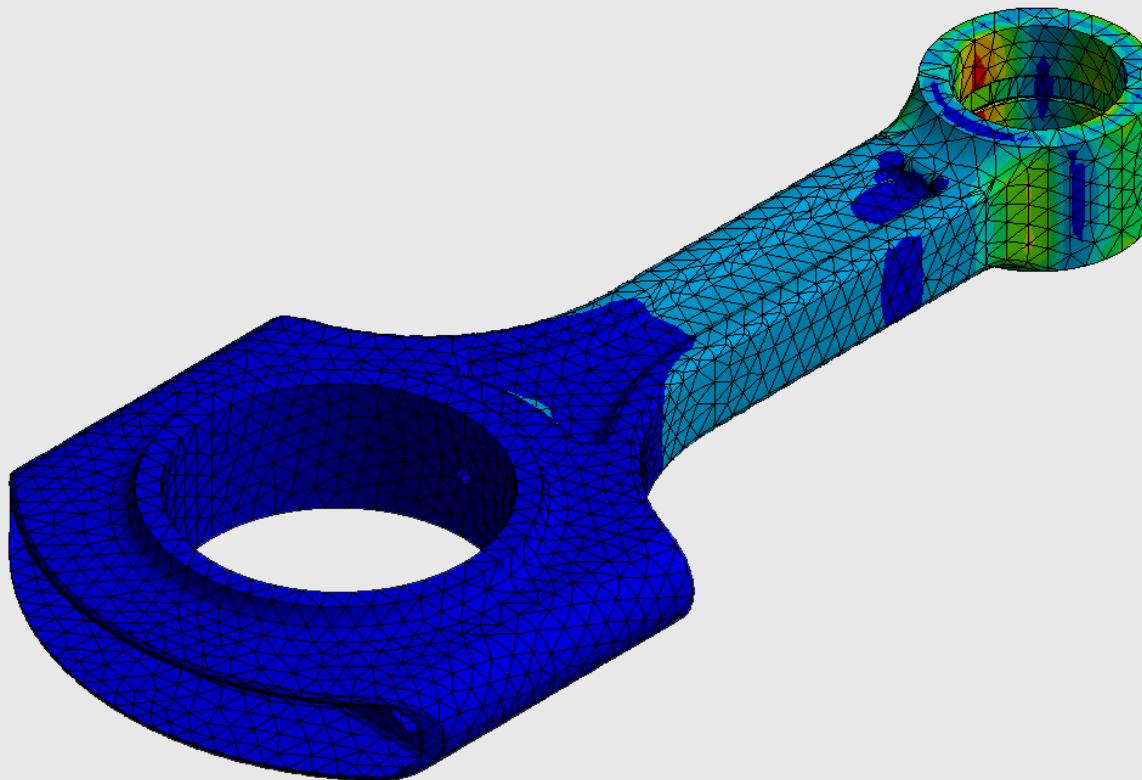
## Verifica a trazione

Verifica strutturale del fusto di biella che prevede l'applicazione di una forza di trazione alla testa di biella pari a:

$$F = m_{pistone} \cdot R \cdot \omega^2 = 40.525 \text{ N}$$

La tensione massima equivalente di Von Mises vale 695 MPa, dalla quale risulta un coefficiente di sicurezza risulta pari a 1,51.



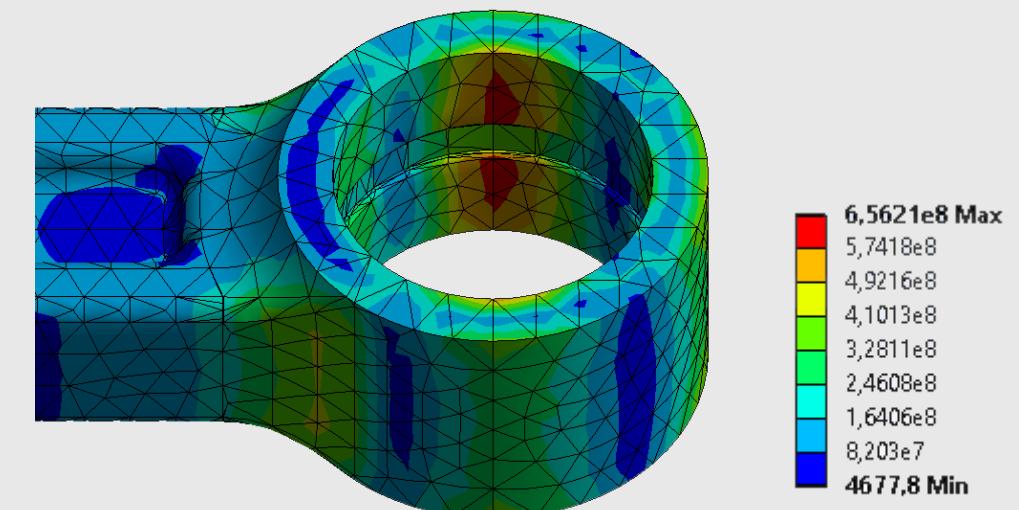


## Verifica a trazione

Verifica strutturale del fusto di biella che prevede l'applicazione di una forza di trazione al piede di biella pari a:

$$F = m_{pistone} \cdot R \cdot \omega^2 = 40.525 \text{ N}$$

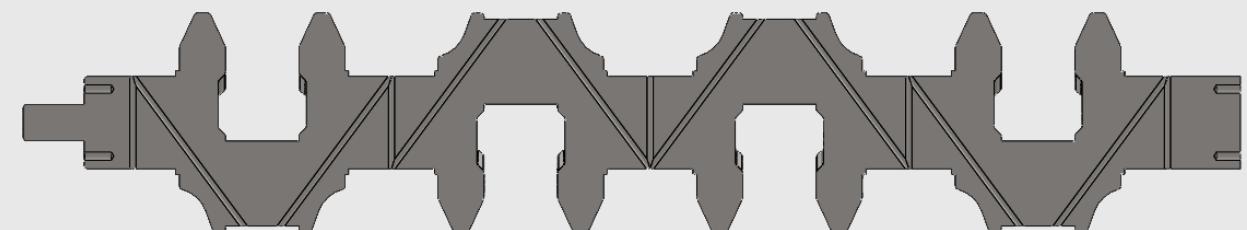
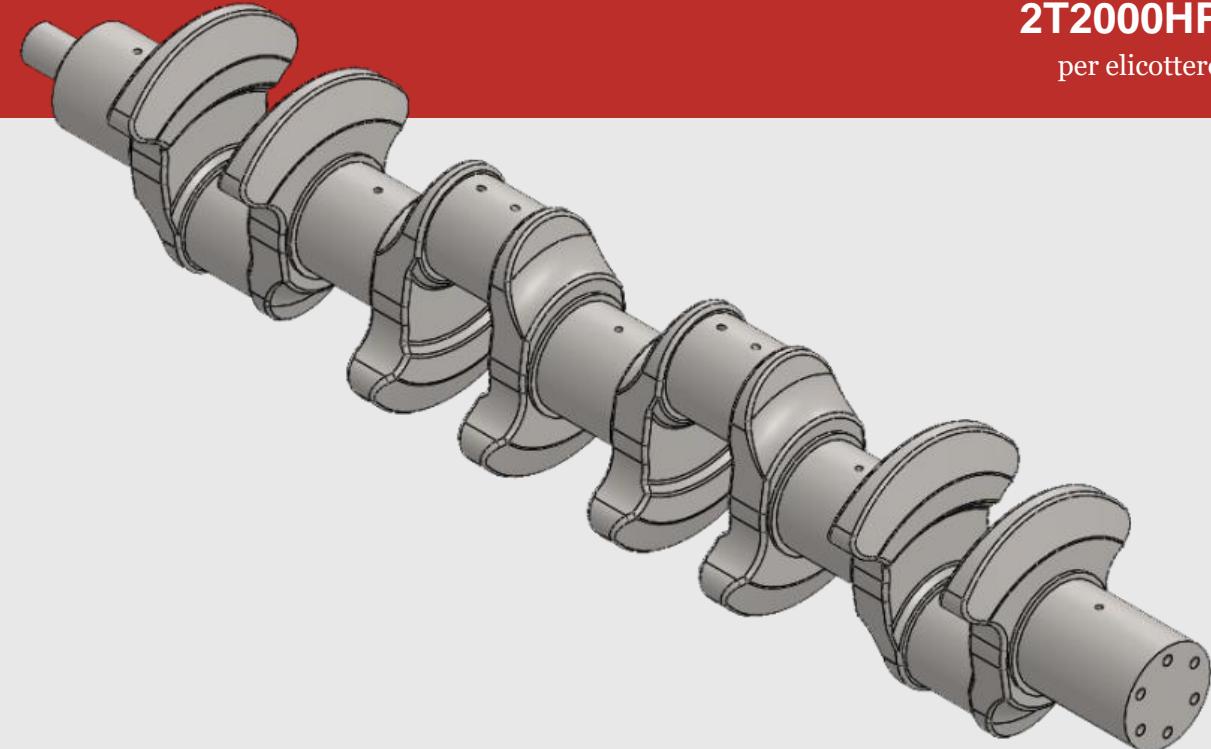
La tensione massima equivalente di Von Mises vale 656 MPa, dalla quale risulta un coefficiente di sicurezza risulta pari a 1,60.



# Albero motore

L'albero motore ha una geometria che permette la configurazione dei pistoni a V di 90°. Questa disposizione ci permette di contenere notevolmente gli ingombri del motore, in particolare la lunghezza: così facendo l'albero ha un'estensione di poco superiore a quella che si avrebbe con un 4 cilindri in linea ottenuto con le stesse unità cilindro.

Le dimensioni dei perni di banco e di manovella riprendono quelle originali del Detroit Diesel serie 60.



Nell'immagine in sezione si noti il particolare dei condotti di lubrificazione che percorrono l'albero nella sua interezza.

# Equilibramento forze alterne del 1° ordine

- Velocità angolare massima

$$\frac{2\pi}{60} \cdot n_{max} = 628,3 \text{ rad/s}$$

- Raggio di manovella

$$R = 50 \text{ mm}$$

- Interasse tra due cilindri

$$I = 2b = 212 \text{ mm}$$

- Massa biella

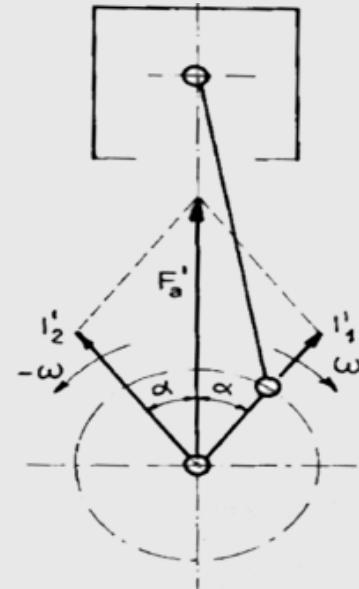
$$M_b = 0,873 \text{ kg}$$

- Massa pistone

$$m_p = 2,053 \text{ kg}$$

- Massa complessiva

$$m_a = 2,926$$



Forze alterne del primo ordine:

$$I'_{1a} = I'_{1b} = I'_{2a} = I'_{2b} = I' = 1/2 \cdot m_a \cdot R\omega^2 = 28.878 \text{ N}$$

Forze del primo ordine:

$$F_1' = 2I' * \cos\left(\frac{\delta}{2}\right) = 2I' = 57757 \text{ N}$$

$$F_2' = 2I' * \cos\left(\gamma + \frac{\delta}{2}\right) = 0 \text{ N}$$

Vettori del momento del primo ordine:

$$M'_2 = I' \cdot b \cdot \sin\left(\frac{\delta}{2}\right) = 0 \text{ N}$$

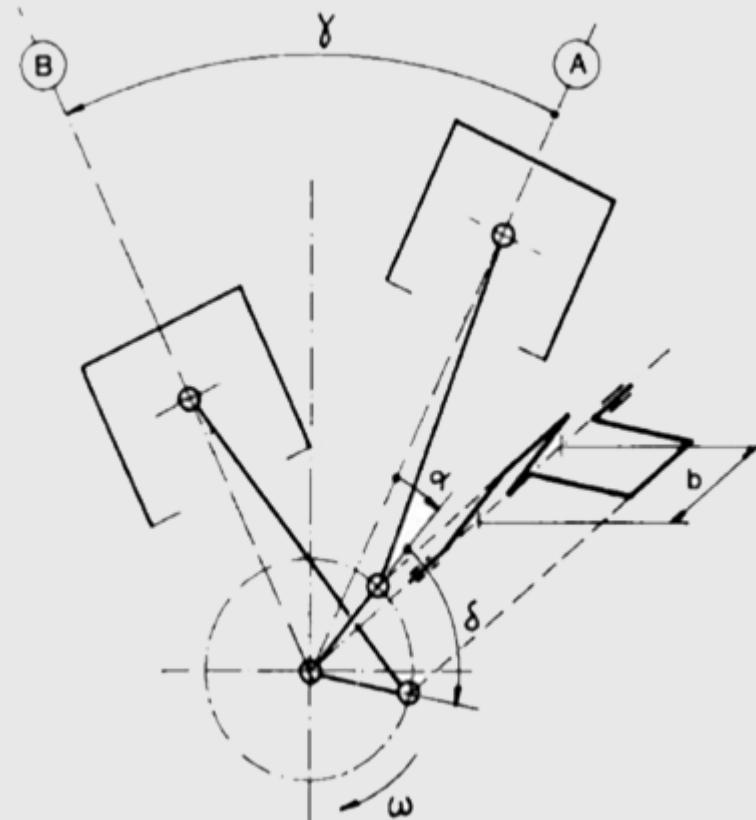
$$M'_2 = I' \cdot b \cdot \sin\left(\gamma + \frac{\delta}{2}\right) = I' \cdot b \cdot \sin(90^\circ) = 3.061,1 \text{ N}$$

Massa dei contrappesi posti a una distanza  $R_C = 90 \text{ mm}$  dall'asse di rotazione:

$$M_c = \frac{2I'}{\frac{\sin \gamma}{R_C \omega^2}} = 1,63 \text{ kg}$$

Per bilanciare la forza centrifuga  $F_1'$  si costruiscono due contrappesi di massa  $M_c/2 = 0.82 \text{ kg}$  da montare sull'albero a gomiti.

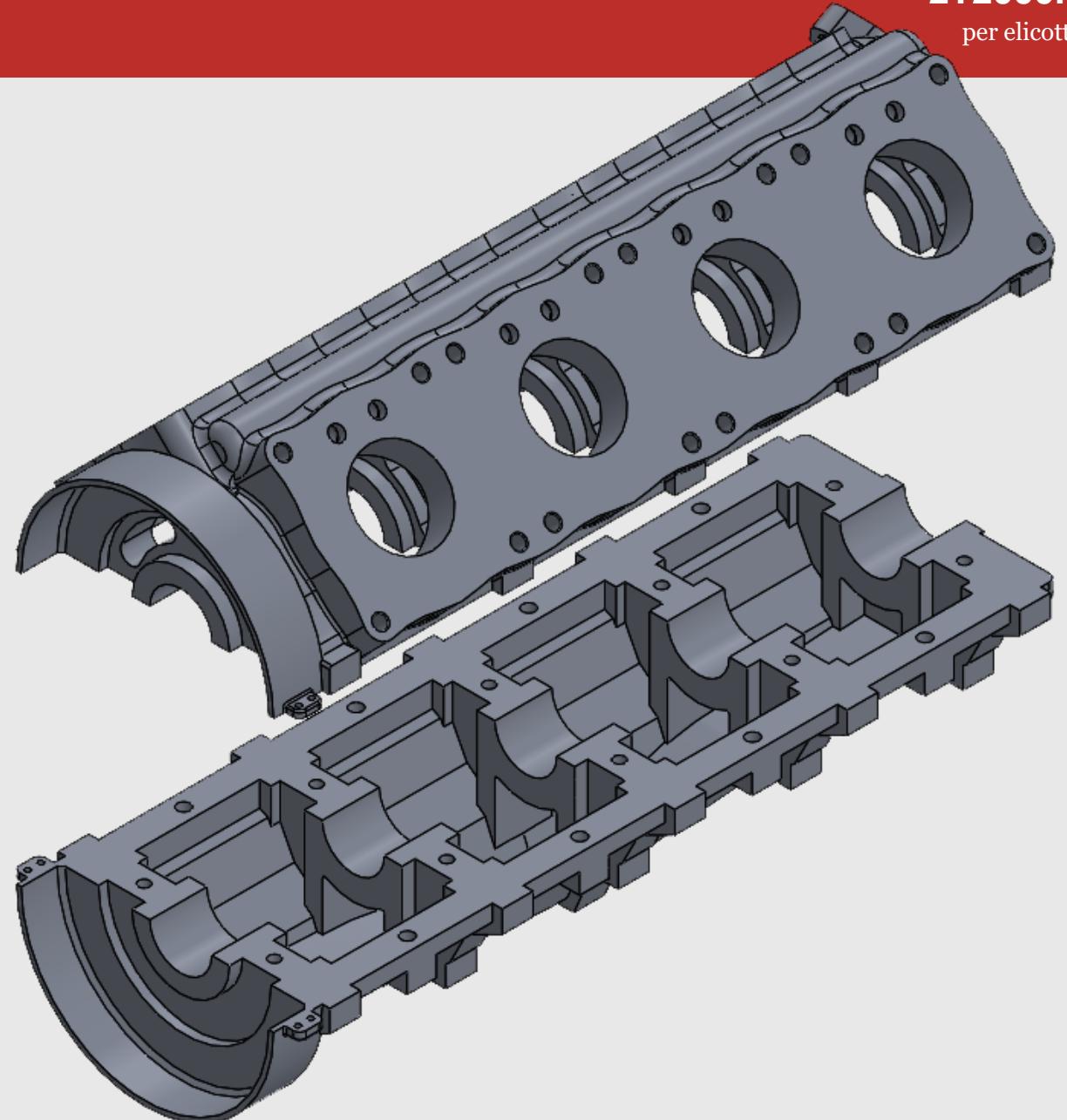
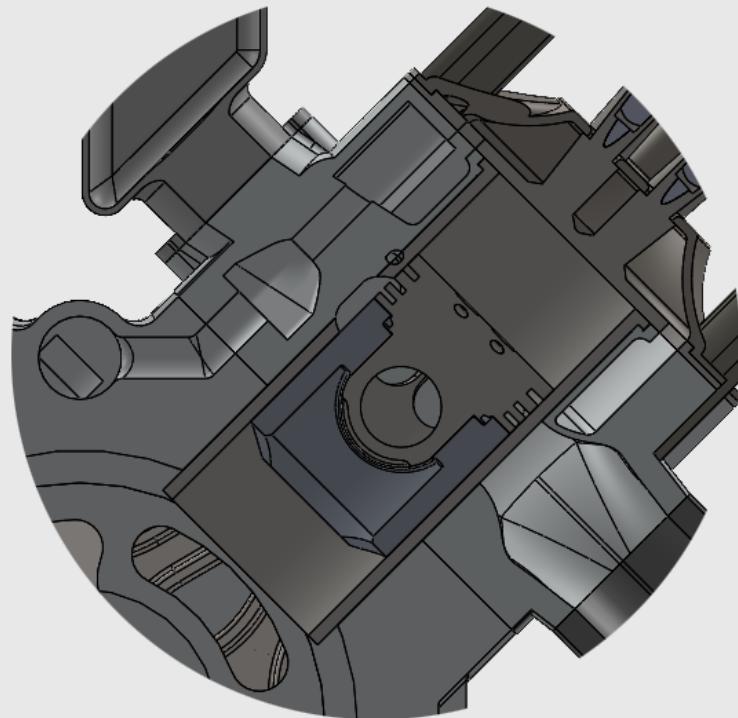
Il momento invece è sempre presente e non equilibrabile poiché controrotante rispetto all'albero a gomiti.



# Basamento

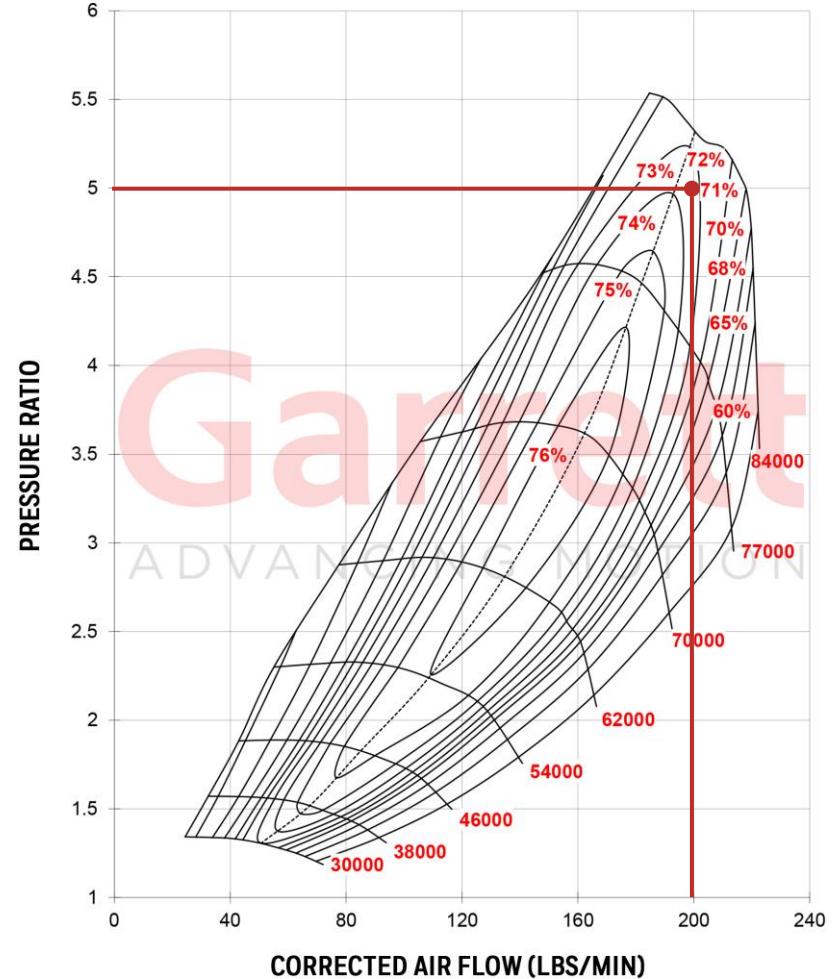
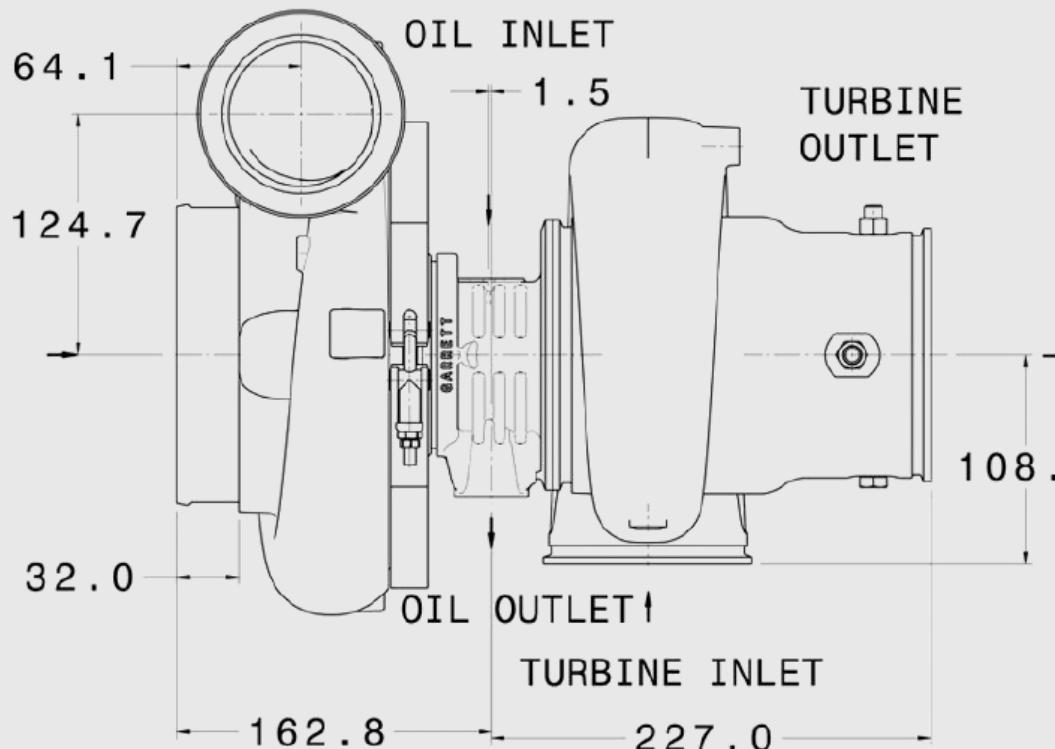
Il basamento è costituito di due parti, corpo basamento e coppa dell'olio, collegate con viti M14.

In sezione è rappresentato il particolare dei condotti di refrigerazione.



# Scelta turbocompressore

Da catalogo Garrett si è scelto in virtù delle nostre esigenze l'impiego di due turbocompressori modello GTX5533R Gen II.



Nell'immagine è rappresentato il punto di funzionamento a cui corrisponde un rendimento del 73%.