

**ALMA MATER STUDIORUM – UNIVERSITA' DI BOLOGNA**

---

SECONDA FACOLTA' DI INGEGNERIA  
CON SEDE A CESENA

*CORSO DI LAUREA*  
IN INGEGNERIA MECCANICA  
Classe: L-9 - INGEGNERIA INDUSTRIALE

Sede di Forlì

**ELABORATO FINALE DI LAUREA**

in

Disegno tecnico assistito dal calcolatore

**STUDIO ED OTTIMIZZAZIONE DI PARTI ALLEGGERITE  
PER UN MOTORE DIESEL**

CANDIDATO

Corrado Landini

RELATORE

Prof. Ing. Luca Piancastelli

Anno Accademico 2011/2012

Sessione II



# INDICE

<b>INTRODUZIONE.....</b>	<b>1</b>
<b>CAPITOLO 1 – CONOSCENZE PRELIMINARI.....</b>	<b>4</b>
1.1 Cessna Aircraft Company.....	4
1.2 Cessna 172 Skyhawk.....	5
1.2.1 Caratteristiche tecniche Cessna 172.....	6
1.2.2 Il motore Lycoming.....	7
1.3 Motore FIAT 1.3 JTD multijet.....	9
1.3.1 Caratteristiche tecniche.....	9
1.3.2 Evoluzione tecnologica del motore FPT 1300 JTD.....	10
1.3.3 Il sistema di iniezione common rail.....	11
1.3.4 Il sistema multijet.....	12
1.3.5 Il multijet II.....	13
1.4 Considerazioni generali sulla progettazione aeronautica.....	14
1.5 Confronto in termini di potenza massima.....	15
<b>CAPITOLO 2 – IL MAGNESIO, UNA RISORSA COMPETITIVA.....</b>	<b>17</b>
2.1 Le origini.....	17
2.2 Generalità e proprietà.....	17
2.3 Le leghe di magnesio.....	20
2.4 La sicurezza e i rischi.....	24
2.5 Un metallo ecologico.....	26
<b>CAPITOLO 3 – COLATA IN TERRA DA FONDERIA.....</b>	<b>28</b>
3.1 Generalità sulla fonderia.....	28
3.2 La fusione della lega di magnesio.....	29
3.3 Precisazioni per la colata nelle forme.....	33
3.4 Descrizione del processo di colata.....	34
3.5 Fasi finali del processo fusorio.....	38
<b>CAPITOLO 4 – COMPONENTI AUSILIARI AL MANOVELLISMO.....</b>	<b>40</b>
4.1 Giunto.....	40
4.1.1 Scelta del giunto.....	41
4.1.2 Disegno al CAD.....	42
4.1.3 Assemblaggio.....	45
4.2 Riduttore.....	46
4.2.1 Progetto ruote dentate e disegno al CAD.....	46
4.2.2 Cuscinetti e tenute.....	48

4.2.3	Descrizione dei carter e disegno al CAD.....	49
4.2.4	Montaggio complessivo.....	50
4.3	Telaio tra riduttore e basamento.....	50
4.3.1	Rilievi sul motore.....	51
4.3.2	Montaggio complessivo.....	52
4.4	Volano.....	53
4.4.1	Disegno al CAD.....	55
4.4.2	Progetto volano alleggerito.....	56
<b>CAPITOLO 5 – RAFFREDDAMENTO E LUBRIFICAZIONE.....</b>		<b>58</b>
5.1	Introduzione.....	58
5.2	Il circuito di lubrificazione.....	60
5.3	La coppa dell'olio.....	63
5.3.1	Introduzione all'analisi agli elementi finiti.....	66
5.3.2	Ipotesi di vincolo e di carico.....	68
5.3.3	Definizione della reticolatura.....	68
5.3.4	Verifica statica della coppa dell'olio.....	69
5.4	Seconda versione della coppa dell'olio.....	71
5.4.1	Verifica statica della coppa dell'olio.....	73
5.5	Montaggio complessivo.....	75
<b>CAPITOLO 6 – LA SOVRATESTA.....</b>		<b>77</b>
6.1	La testata.....	77
6.2	Il cinematismo di distribuzione.....	79
6.2.1	Ipotesi di vincolo e di carico.....	85
6.2.2	Definizione della reticolatura.....	85
6.2.3	Verifica statica della sovratesta.....	86
<b>CONCLUSIONI.....</b>		<b>89</b>
<b>BIBLIOGRAFIA.....</b>		<b>90</b>

## Introduzione

E' oramai da almeno un decennio che l'aviazione generale si trova in una situazione di difficoltà, se non in crisi, con ovviamente eccezione diverse per categorie di velivoli e zone geografiche interessate. Questo declino è in parte attribuibile agli oneri fiscali, in parte ai costi di acquisizione e gestione degli aeromobili stessi.

Tuttavia l'aviazione generale rappresenta una fetta importante del mercato aeronautico, e dato che la sottocategoria costituita da velivoli leggeri a motore a pistoncini costituisce una buona parte di essa, non manca l'intenzione di avere a disposizione velivoli più competitivi e allo stesso tempo "sostenibili" durante tutto il ciclo di vita.

Dunque l'obiettivo principale è fissato sul quesito: *da cos'è rappresentato il costo maggiore per un velivolo di questo tipo?*

La risposta in questo caso è tanto semplice quanto intuitiva: il combustibile.

Da sempre, infatti, il consumo di carburante durante il ciclo di vita di un velivolo è stato il principale tra i costi da considerare.

Già da qualche anno si stanno cercando soluzioni al problema e una delle più intraprese è quella dell'adozione di motori che, a parità di peso, riescano ad erogare la stessa potenza mantenendo però dei consumi specifici inferiori. Il motore turbo Diesel è quello che più facilmente rispecchia queste caratteristiche.

I problemi fondamentali che riguardano questo tipo di motorizzazione sono stati, fino a circa due decenni fa, la pressione di sovralimentazione (differente per le diverse quote) e il peso non indifferente dell'intero monoblocco rispetto ai tanto utilizzati motori a benzina. Queste problematiche sono state però ormai superate con l'avvento della tecnologia odierna in campo motoristico.

Di particolare interesse sono i motori turbo Diesel automobilistici che, con le dovute modifiche, si riescono ad adattare in campo aeronautico senza riscontrare particolari problemi permettendo di evitare l'intera progettazione di un motore. Sarà infatti obiettivo di questa trattazione l'installazione su un velivolo di componenti alleggeriti di un motore Diesel, che attualmente è montato su buona parte dei veicoli italiani della classe delle utilitarie: il 1.3 JTD multijet. Si tratta di un motore a ciclo Diesel sovralimentato mediante turbocompressore e che sfrutta un sistema di iniezione del gasolio di tipo common rail controllato elettronicamente. Il sistema è noto col nome di multijet e ha la caratteristica di compiere più iniezioni per ciclo oltre alle due canoniche

di un common rail (iniezione pilota seguita da iniezione effettiva) controllate e tarate di volta in volta dalla centralina del motore. Questo sistema ha permesso di raggiungere discreti livelli di potenza nell'uso automobilistico abbattendo i consumi. L'abbattimento dei consumi è uno dei tanti elementi che hanno portato alla decisione di tentare questa installazione, poiché meno carburante imbarcato implica meno peso.

In passato è già stato effettuato un lavoro simile a questo, ma con il motore FIAT 1.9 JTD. Nel tempo, però, il motore FIAT 1.3 JTD è stato raffinato e oggi è in grado di erogare potenze che sono di poco al di sotto di quelle che erogava il 1900 quando venne fatto lo studio precedente. Quindi, installando il 1300 si ha una riduzione della potenza, ma anche una notevole riduzione del peso, cosa che in aeronautica (soprattutto in quella leggera) è fondamentale.

Come riportato prima, punto chiave del problema è proprio il peso del motore, che in questa trattazione si provvederà a ridurre in parte considerando una lega di Magnesio come materiale sia per la sovratesta sede di alberi a camme che per la coppa dell'olio.

I due componenti sovratesta e coppa dell'olio originari del motore Fiat 1.3 JTD multijet sono rispettivamente realizzati in lega di Alluminio – Silicio (fusione in conchiglia) e lamiera di acciaio stampata; per il velivolo invece, facciamo leva sul Magnesio, un metallo estremamente tradizionale già usato su motori aeronautici negli anni '50.

Il velivolo in questione è il CESSNA 172 conosciuto da decenni come uno dei più pratici velivoli per aviazione civile. Il seguente progetto dunque ha come obiettivo fondamentale quello di motorizzare tale velivolo con il 1.3 JTD-m permettendo di unire i vantaggi di entrambi in unica macchina.

Per svolgere il lavoro si è dovuto procedere su più strade contemporaneamente, in quanto le esigenze di un motore nella sua installazione sono tante e talmente interconnesse da non poter pretendere di affrontare tutte le problematiche una alla volta, ma è necessario studiarle e risolverle in modo integrato.

Il lavoro è cominciato con la presa visione di materiale raccolto in elaborati precedenti a questo, dove si sono trovati disegni tridimensionali dei principali componenti del motore (basamento, sottobasamento, albero a gomiti). Di tutto ciò che è stato possibile reperire nel laboratorio Hangar di facoltà, si sono fatti i rilievi. Per i pezzi che non si sono reperiti in questo modo ci si è affidati a immagini, disegni e fotografie disponibili su manuali FIAT o riviste specializzate nel settore auto.

Il tutto è stato modellato al CAD per studiare gli ingombri, inoltre sono stati realizzati modelli agli elementi finiti della coppa dell'olio e della sovratesta per studiare la

resistenza alle sollecitazioni. Questo è stato fatto tenendo sempre conto della necessità di abbattere il peso nonché di utilizzare strutture il più possibile semplici e compatte, in modo da renderle più sicure e meno costose.

Per realizzare questo elaborato si è fatto uso di alcuni software, in particolare: *SolidWorks 2013* per la realizzazione dei modelli tridimensionali e la funzione *SolidWorks Simulation* di SolidWorks per le verifiche agli elementi finiti.

# Capitolo 1

## CONOSCENZE PRELIMINARI

### 1.1 – CESSNA AIRCRAFT COMPANY

La storia del trasporto aereo Cessna è iniziata nel giugno 1911, quando Clyde Cessna, un agricoltore di Rago, Kansas, ha costruito un aereo di legno e tessuto e divenne la prima persona a costruire e far volare un aereo motorizzato nel cuore d'America, tra il fiume Mississippi e le Rocky Mountains. Clyde Cessna ha iniziato le sue imprese aeromobili in Enid, Oklahoma, dove prova molti dei suoi primi progetti sulle saline.

Quando i banchieri a Enid esitano a fornirgli capitale si trasferì a Wichita. Nel 1924, Cessna ha collaborato con Lloyd C. Stearman e Walter H. Beech per formare Travel Air Manufacturing Co., di cui è stato il presidente.



Fig. 1.1 – Catena di montaggio Cessna Aircraft Company

Nel gennaio del 1927 ha lasciato Travel Air in modo da formare una propria attività, la Cessna Aircraft Company. Il primo tra i suoi nuovi progetti riguardanti monoplani, il Phantom, ha volato il 13 agosto 1927. In seguito, la società ha creato una serie di successi tra i monoplani a quattro e sei posti.

## 1.2 – CESSNA 172 SKYHAWK

Il Cessna 172 Skyhawk è un monomotore quadriposto ad ala alta da turismo e da addestramento prodotto dalla statunitense Cessna Aircraft Company dal 1950 ed ancora in produzione. Probabilmente il più famoso aereo da addestramento mondiale, il Cessna 172 è stato prodotto in quantità di esemplari maggiore di qualsiasi altro velivolo mai costruito.



Fig. 1.2 – *Cessna 172 Skyhawk*

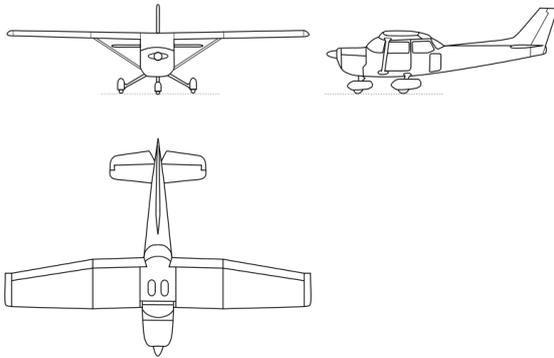
Misurato per la sua longevità e popolarità, il Cessna 172 è l'aeroplano leggero prodotto nella storia che ha avuto più successo. I primi modelli di produzione furono consegnati nel 1956 e ne sono stati costruiti più di 43000.

Il Cessna 172 iniziò la sua vita come un aggiornamento del Cessna 170 da cui differiva per la sostituzione del carrello d'atterraggio triciclo posteriore con uno a triciclo anteriore. Il primo volo del prototipo fu nel novembre del 1955. Il 172 divenne quindi un successo di vendite e ne furono costruiti oltre 1400 nel 1956, il suo primo anno di produzione a pieno ritmo.

I primi 172 erano simili al 170, con la stessa fusoliera dritta e le alte gambe del carrello, sebbene il 172 avesse un timone trapezoidale mentre il 170 aveva i piani di coda ellissoidali. Le ultime versioni del 172 incorporavano un carrello d'atterraggio riprogettato, la fusoliera posteriore riprofilata che permetteva l'installazione di un finestrino posteriore. La Cessna pubblicizzò questa visibilità posteriore come "Omni-

Vision". L'ultimo miglioramento estetico fu a metà degli anni sessanta; era il timone a freccia che è in uso ancora oggi. Questa configurazione strutturale è rimasta sostanzialmente invariata da allora, tranne per gli aggiornamenti nell'avionica e nei motori. La produzione si è arrestata a metà degli anni ottanta, per riprendere nel 1996 con il Cessna 172R Skyhawk da 160 hp e fu rinvigorita nel 1998 con il Cessna 172S Skyhawk SP a 180 hp.

### 1.2.1 – Caratteristiche tecniche Cessna 172



<b>Lunghezza</b>	8.28 m (27.2 ft)
<b>Apertura alare</b>	11.0 m (36.1 ft)
<b>Altezza</b>	2.72 m (8.11 ft)
<b>Superficie alare</b>	16.2 m <sup>2</sup> (174 ft <sup>2</sup> )
<b>Massa a vuoto</b>	736 kg (1620 lb)
<b>Peso max al decollo</b>	1113 kg (2450 lb)
<b>Passeggeri</b>	3
<b>Capacità</b>	376 kg (830 lb)

## 1.2.2 – Il motore Lycoming

Il Lycoming O-360 ed i suoi derivati formano una famiglia di motori aeronautici a cilindri contrapposti (quattro cilindri raffreddati ad aria) prodotto dagli anni quaranta dall'azienda statunitense AVCO Lycoming ed attualmente ancora in produzione nelle versioni più recenti con le successive realtà aziendali Textron Lycoming e l'attuale Lycoming Engines.

La sigla O-360 identifica il modello in base alla sua architettura (orizzontale) ed alla cilindrata espressa in pollici cubi, circa 360 in<sup>3</sup> (5900 cm<sup>3</sup>).

La serie O-360, sviluppata in ben 167 differenti modelli, copre la fascia tra i 145 ed i 225 hp (109-168 kW).



Fig. 1.3 – *Motore Lycoming O-360*

Di seguito si riportano i dati tecnici del motore Lycoming:

<b>Descrizione</b>	
Costruttore	AVCO Lycoming
Tipo	Motore a cilindri contrapposti
Numero cilindri	4
Raffreddamento	Aria
Alimentazione	Carburatore
Distribuzione	OHV 2 valvole per cilindro

<b>Prestazioni</b>	
Potenza	160 hp (120 kW) a 2400 giri/min a livello del mare
Consumo specifico	-10 U.S. gal (37.9 l/h) al 65% della potenza max -10.5 U.S. gal (39.8 l/h) al 75% della potenza max
Potenza specifica	22.9 kW/l (0.50 hp/in <sup>3</sup> )
Combustibile	Avgas 100LL

<b>Peso</b>	
A vuoto	127/137 Kg (280/301 lb)

## 1.3 – MOTORE FIAT 1.3 JTD MULTIJET

### 1.3.1 – Caratteristiche tecniche

Il propulsore in esame è di derivazione FIAT e la sua denominazione commerciale è 1.3 JTD multijet (JTD-m); la sigla JTD-m sta per *MultiJet Turbo Diesel* e indica l'utilizzo del sistema di iniezione common rail, unito alla particolare tecnologia di iniettare il gasolio più volte per ogni ciclo, sviluppato dal gruppo Fiat – General Motors Powertrain. La cilindrata è pari a 1248 cm<sup>3</sup>, frazionata in 4 cilindri in linea, con un alesaggio di 69.6 mm ed una corsa di 82 mm. Le valvole sono quattro per cilindro e sono azionate direttamente da un doppio albero a camme in testa tramite bilancieri a dito con rullo. Il motore, nella sua configurazione originale, sviluppa una potenza massima di 51 kW (70 CV) ad un regime di rotazione pari a 4000 rpm con una coppia motrice pari a 180 Nm a 1750 rpm.



Fig. 1.4 – Motore Fiat 1.3 JTD multijet

Tipo	Diesel "Common Rail"
Numero cilindri	4 in linea
Cilindrata	1248 cm <sup>3</sup>
Alesaggio x Corsa	69.6 x 82.0 mm
Testa cilindri	a 4 valvole
Distribuzione	2 assi a camme in testa, bilancieri a dito, comando a catena
Basamento	in ghisa con sottobasamento in alluminio
Sistema di iniezione	"Common Rail" 1400 bar – Multijet
Turbocompressore	a geometria fissa
Sistema EGR	valvola EGR elettrica e scambiatore di calore
Potenza	70 CV a 4000 giri/min
Coppia	180 Nm a 1750 giri/min
Dimensioni: lunghezza x larghezza x altezza	460 x 500 x 650 mm

Tab. 1.5 – Scheda tecnica del 1.3 JTD

### 1.3.2 – Evoluzione tecnologica del motore FPT 1300 JTD

Il motore FPT 1300 JTD, primo di serie ad adottare il sistema multijet fin dall'origine, è stato classificato come uno dei più potenti small Diesel a geometria fissa. Per realizzarlo i progettisti hanno preso tutta la tecnologia contenuta nel motore 1.9 multijet da 140 CV: dal dispositivo common rail ad alta pressione alle iniezioni multiple, dalle 16 V all'intercooler, alla camera di combustione di forma particolarmente efficiente. Hanno aggiunto poi, un sistema di aspirazione con collettore in plastica e condotti direzionali. Infine hanno ridotto massa e dimensioni del motore senza nulla perdere in raffinatezza e qualità tecnica. Presenta così gli stessi vantaggi dei motori grandi perché non è stato ridotto, ma miniaturizzato (racchiude in un cilindro di 70 mm sei componenti di

dimensioni normali: 4 valvole, un iniettore e una candele). E' dotato nella sua versione originale di turbocompressore a geometria fissa e intercooler con doppio albero a camme. Si tratta di un motore compatto e dal peso ridotto: le dimensioni sono abbastanza ridotte, rispettivamente 460 mm di lunghezza, 500 mm di larghezza e 650 mm di altezza, con basamento in ghisa, sottobasamento di alluminio, testa in alluminio e albero motore e bielle in acciaio.

Altre due caratteristiche molto interessanti del motore 1.3 multijet "automobilistico" sono i consumi estremamente ridotti, solo 3.3 litri per 100 km, e la catena di distribuzione che annulla letteralmente la manutenzione straordinaria fino 250000 km.

Dal punto di vista della potenza una delle maggiori evoluzioni è stata effettuata tramite l'adozione della turbina a geometria variabile che ha permesso di ottenere un incremento della potenza massima fino a 95 CV per una coppia massima di 200 Nm a 1500 rpm.

In seguito sono stati ottenuti risultati d'eccezione in termini di rispetto per l'ambiente con l'introduzione del nuovo Multijet II. Si tratta di un'evoluzione del precedente sistema multijet basata su un nuovo sistema di iniettori più veloci e precisi (infatti si possono ottenere fino a otto iniezioni consecutive in vista delle precedenti cinque) e un nuovo filtro antiparticolato in posizione ravvicinata al motore, in modo da migliorare la combustione delle particelle inquinanti all'interno del filtro stesso, grazie alla maggiore temperatura raggiunta e quindi migliorare l'efficienza del propulsore.

Di seguito sarà descritto il sistema di iniezione del motore 1300 common rail multijet.

### **1.3.3 – Il sistema di iniezione common rail**

Il sistema common rail (fig. 1.6) è un sistema a iniezione con accumulatore. La differenza decisiva da ogni altro sistema di iniezione sta nel fatto che la pressurizzazione e i processi di iniezione sono completamente indipendenti l'uno dall'altro. La strategia di questo sistema permette una maggiore flessibilità di adattamento dei processi di iniezione, al fine di rispondere alle richieste di ogni specifica applicazione. Essa serve come base per sviluppare motori estremamente semplici ed economici che offrono livelli notevoli di risposta dinamica.

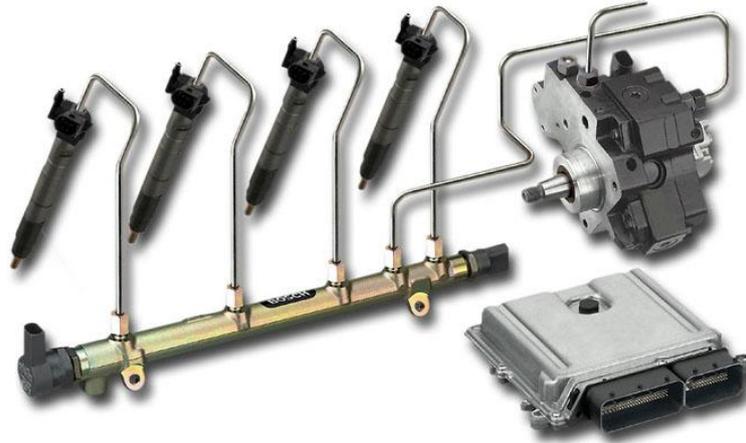


Fig. 1.6 – Sistema common rail

### 1.3.4 – Il sistema multijet

Il sistema multijet utilizza il controllo elettronico per suddividere l'iniezione principale in iniezioni minori multiple (da 3 a 5) finalizzate ad ottenere una combustione più omogenea, emissioni ridotte e maggior rendimento. Questo sistema è stato introdotto da Fiat nelle proprie automobili Diesel a common rail. Si tratta di un sistema capace di gestire in modo completamente flessibile il numero di iniezioni, il loro posizionamento angolare e la quantità introdotta, che consente di definire in ogni condizione motore la strategia di iniezione ottimale, in termini di emissioni, rumorosità, prestazioni e consumo.

Il principio motoristico è lo stesso del sistema unijet: l'iniezione pilota innalza la temperatura e la pressione all'interno del cilindro, consentendo così, al momento dello scoppio principale, una migliore combustione. Potendo suddividere l'iniezione principale stessa in tante iniezioni più piccole, la quantità di gasolio bruciata all'interno del cilindro resta la medesima, ma si ottiene una combustione ancora più graduale e completa (fig. 1.7). Si raggiungono così ulteriori traguardi nel controllo del rumore, nella riduzione delle emissioni e nell'incremento delle prestazioni (fig. 1.8). Con questo approccio la durata dell'iniezione principale può essere gestita indipendentemente dalla pressione di iniezione.

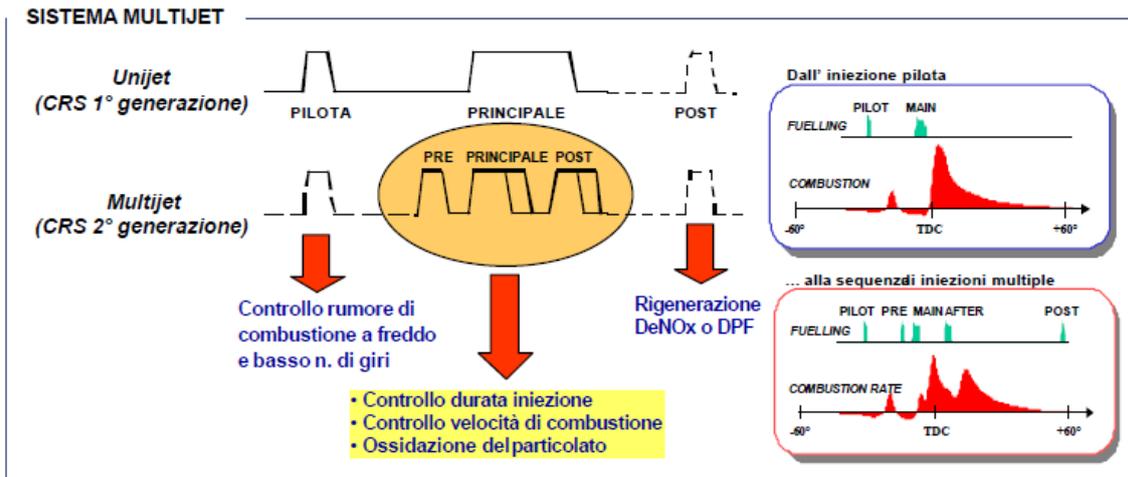


Fig. 1.7 – Concetto di iniezioni multiple

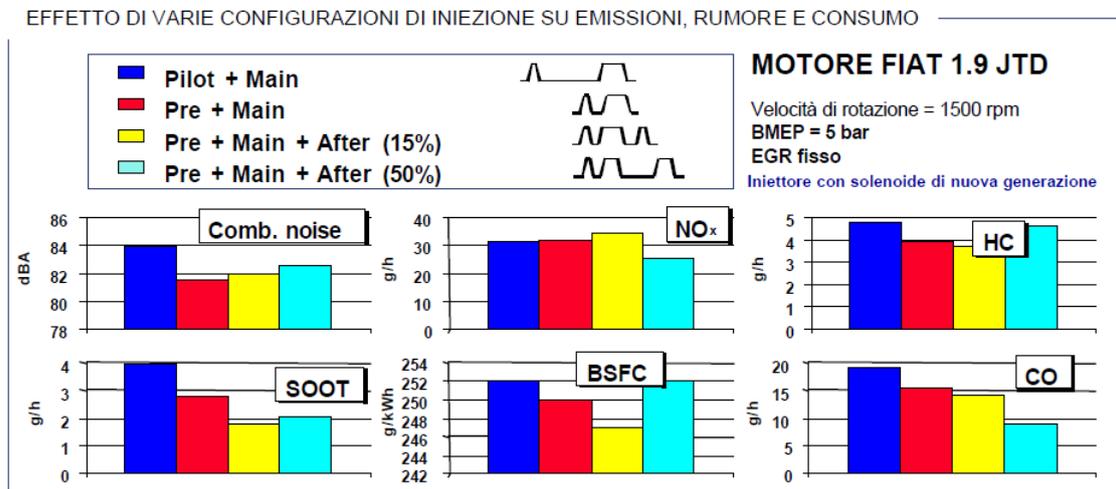


Fig. 1.8 – Effetto delle iniezioni multiple su emissioni, rumore e consumo specifico

### 1.3.5 – Il multijet II

Mantenendo la robusta architettura elettro-idraulica, Fiat Powertrain sviluppa nel 2009 il nuovo iniettore multijet II, in grado di gestire fino a 8 iniezioni durante la stessa combustione. In questo sistema l'otturatore è equilibrato idraulicamente, ottenendo maggiori diametri di tenuta e ridotte corse dell'otturatore stesso. Grazie a questa nuova servo valvola, è possibile controllare la quantità di combustibile iniettato nella camera di combustione, in modo più preciso e con una velocità superiore. E' proprio questo che

rende possibile la gestione di ben 8 iniezioni consecutive, con una misurazione molto precisa.

In particolare la corsa dell'otturatore ridotta permette di diminuire notevolmente l'intervallo di tempo minimo tra due iniezioni consecutive, fino al raggiungimento del tempo zero a livello idraulico (generazione di un profilo continuo e modulato dell'erogazione del combustibile nei cilindri). Con queste due iniezioni consecutive è possibile modulare la velocità di iniezione per ottenere un miglior controllo del processo di combustione. Questa nuova modalità di iniezione, denominata *injection rate shaping* permette di ridurre la rumorosità, il consumo di carburante e le emissioni di particolato e di ossidi di azoto.

L'innovativa servo valvola multijet II permette quindi un controllo più veloce e flessibile delle fasi dell'iniezione, che si trova alla base di strategie di controllo combustione sempre più avanzate.

Il nuovo multijet inoltre fornisce una maggiore potenza e coppia fin dai bassi regimi, che si tramutano in una migliore guidabilità e consumi più bassi, garantendo allo stesso tempo una semplicità costruttiva superiore rispetto al multijet di prima generazione.

## **1.4 – CONSIDERAZIONI GENERALI SULLA PROGETTAZIONE AERONAUTICA**

In ambito aeronautico la progettazione segue parametri profondamente diversi rispetto a quella automobilistica; infatti sono previste normative aeronautiche specifiche che si discostano completamente da quelle utilizzate per le autovetture.

Se si procede in ordine di importanza, il fattore che si deve tenere in maggiore considerazione è il peso, perché esso influisce in termini di prestazioni dell'intero velivolo, sia in termini di potenza che di carico.

Per ragioni di sicurezza requisito indispensabile è l'affidabilità dei componenti, e di conseguenza la loro durata, definita come tempo di vita durante il quale viene assicurata l'affidabilità specificata.

In definitiva possiamo dire che il peso proprio del pezzo meccanico deve essere ridotto al minimo senza comprometterne la funzione e la sicurezza di funzionamento. Tutto questo senza trascurare l'ambito economico.

Le costruzioni leggere infatti sono solitamente molto più costose per quanto riguarda la

progettazione, la fabbricazione e le prove di collaudo. Nonostante ciò possono essere economicamente vantaggiose se, grazie alla riduzione di peso, si riescono a realizzare ulteriori risparmi o miglioramenti di carattere funzionale.

A tale scopo si può:

- modificare l'impostazione del problema, attraverso una riduzione ed una limitazione delle forze esterne ed interne, ed adottando misure che consentono coefficienti di sicurezza minori;
- utilizzare materiali di minore massa volumica e di maggiore resistenza o a bassa deformazione;
- progettare sezioni sollecitate correttamente grazie ad un flusso ottimale degli sforzi.

Bisogna inoltre considerare in fase di progetto la predisposizione dei componenti in modo che siano facilmente accessibili, poiché in ambito aeronautico essi sono oggetto di frequenti controlli, revisioni e regolazioni.

I motori aeronautici devono rispondere a specifiche tecniche molto più restrittive rispetto ai motori per l'autotrazione, come affidabilità, lunga durata, peso limitato, consumo di carburante contenuto, ingombri e aree frontali ridotti. Inoltre si differenziano anche per il tipo di funzionamento. In aeronautica la regolazione del numero di giri, e quindi la velocità, viene espressa in termini percentuali della potenza massima, che solitamente varia tra il 65% e 100% e che rimane pressoché costante per tutta la durata del viaggio, mentre in autotrazione si considera la coppia richiesta per una certa velocità del veicolo che, per ovvie necessità, varia spesso obbligando dunque il motore a spaziare continuamente in un campo di giri più o meno ampio.

## **1.5 – CONFRONTO IN TERMINI DI POTENZA MASSIMA**

Confrontando i dati tecnici del Lycoming e del Fiat si può notare immediatamente la differenza fondamentale che sta nella potenza massima erogata e nel numero di giri alla quale la si ottiene promuovendo il Lycoming come quello più conveniente in questi termini. Infatti esso è in grado di erogare una potenza massima di 162 CV a soli 2400 giri/min mentre per il Fiat sono solamente 90 CV a 4000 giri/min.

Già in argomentazioni precedenti alla seguente si è cercata una soluzione al problema. A disposizione della facoltà c'era un motore 1.3 JTD-m completo di tutti gli accessori

che poteva essere utilizzato per effettuare alcuni test. Si è dunque voluto vedere quale potenza massima si poteva raggiungere sostituendo la turbina originale con una più grande. Sostanzialmente sono state montate tre turbine che provenivano da tre modelli di motori per autoveicoli differenti e si è effettuato un test al banco prova per verificare quale delle tre poteva fare al caso nostro.

Dal test è emerso che la turbina migliore ha permesso al 1.3 di erogare 150 CV.

A questo punto la potenza massima tra i due motori è paragonabile anche se si può comunque affermare che il motore avio rimanga sicuramente molto più flessibile garantendo una potenza sufficiente anche ad un numero di giri molto basso. Per il 1.3 invece abbiamo a disposizione ora una potenza massima di 150 CV a 6000 giri/min rendendolo sicuramente meno pronto a bassi regimi ove la turbina, data la sua inerzia maggiore rispetto a quella originale, non ruota ancora ad una velocità tale da garantire una pressione di sovralimentazione sufficientemente alta. In qualsiasi caso bisogna però tenere in considerazione che il tipo di funzionamento in campo aeronautico non ponga particolari problemi al 1.3 JTD così configurato per il fatto che il regime a cui sarebbe sottoposto in volo sarà pressoché costante e tale da garantire una potenza sufficiente.

## Capitolo 2

### IL MAGNESIO, UNA RISORSA COMPETITIVA

#### 2.1 – LE ORIGINI

Fra la prima e la seconda guerra mondiale il magnesio fu usato per applicazioni di nicchia nell'industria nucleare e nella produzione di aerei militari. Dopo la guerra la Volkswagen, nata sulle macerie dell'industria metallurgica bellica, ha impiegato, per esempio nell'autovettura Maggiolino molte componenti costruite in magnesio.

La sempre maggiore richiesta di ridurre il peso dei componenti dei veicoli in accordo con la legislazione che limita le emissioni ha portato ad un nuovo interesse nei confronti del magnesio. Il consumo di questo metallo nel 1944 era approssimativamente di 228000 tonnellate ed è crollato, alla fine della Seconda Guerra mondiale, a 10000 tonnellate/annue. Negli anni '70 l'impiego del Magnesio segnò un forte calo nell'industria automobilistica, tanto da far pensare che questi non era il materiale del futuro; le ragioni di questa conclusione erano l'elevato e fluttuante costo della materia prima, i costi di trasformazione ed i grossi problemi di resistenza alla corrosione.

La crisi energetica della fine degli anni '70, indusse le case automobilistiche a concentrare le ricerche e gli investimenti verso i metalli leggeri.

Nel 1998, con il rinnovato interesse, la richiesta di magnesio è saltata a 40000 tonnellate/annue e la velocità di crescita, negli ultimi 10 anni si aggira intorno al 7% annuo.

#### 2.2 – GENERALITA' E PROPRIETA'

Il magnesio possiede caratteristiche estremamente interessanti, è considerato il metallo che pesa meno in assoluto e con la minore densità rispetto a qualsiasi materiale metallico per impieghi strutturali:  $1.74 \text{ g/cm}^3$  a  $20^\circ\text{C}$ .

Abbondante in natura, è presente per il 2.7% della crosta terrestre e nei mari, da cui viene estratto con particolari processi industriali. Per questa ragione viene definito inesauribile.



Fig. 2.1 – *Aspetto del magnesio, color bianco argenteo*

Questo metallo alcalino terroso viene ottenuto principalmente per via elettrolitica. Tale procedimento si svolge secondo le seguenti fasi:

1. calcinazione del carbonato di magnesio: in tal modo si ottiene l'ossido di magnesio;
2. clorurazione: alla temperatura di  $800\div 1050^{\circ}\text{C}$  l'ossido di magnesio con carbone viene trattato con cloro. In tal modo si ottiene il cloruro di magnesio ( $\text{MgCl}_2$ );
3. elettrolisi del cloruro: con una corrente elettrica sino a una intensità di 20 kA e una tensione di 7 V. Il consumo è di  $20\div 35$  kWh per ogni kilogrammo di magnesio prodotto. Nelle celle di elettrolisi il cloruro di magnesio è immesso allo stato fuso e aggiungendo appositi fondenti. Il magnesio così ottenuto ha una purezza del 99.85%.

Il magnesio si può produrre industrialmente allo stato metallico anche per via termica. L'ossido di magnesio prodotto per calcinazione, come nel processo per via elettrolitica, viene ridotto a elevata temperatura nel vuoto, mediante silicio, oppure carbonio, oppure alluminio. Si ottiene in tal modo magnesio allo stato di vapore che viene poi condensato e periodicamente estratto.

Considerato appunto il metallo strutturale più leggero in assoluto e dalle straordinarie doti di riciclabilità a costi contenuti, trova applicazione nei seguenti settori industriali:

- militare;
- aeronautica/elicotteristica;
- automotive;
- elettronica/elettrotensili;
- ciclo e motociclo;
- biomeccanica;

- accessoristica;
- oggettistica sportiva.

Le principali caratteristiche che lo rendono così interessante per usi industriali sono:

- leggerezza (30% più leggero dell'alluminio);
- resistenza alla forza dinamica e statica;
- carico di snervamento analogo alle leghe di alluminio;
- ottima capacità di smorzamento delle vibrazioni;
- ottima capacità di assorbire urti;
- ottima capacità di schermatura elettro-magnetica;
- ottima capacità di dissipare il calore (conducibilità termica più alta della plastica);
- riciclabilità completa;
- bassa resistenza agli utensili da taglio;
- possibilità di lavorare ad alte velocità di taglio;
- ottima saldabilità senza perdita di resistenza (in atmosfera controllata);
- buona resistenza alla corrosione (con agenti leganti);
- resistente all'invecchiamento.

Il magnesio presenta notevoli vantaggi, infatti è un metallo strutturale economico perché ha una minore densità rispetto a qualsiasi materiale metallico usato per impieghi strutturali; a parità di dimensioni è il più leggero in assoluto (-30% rispetto all'alluminio, -70% rispetto all'acciaio); a parità di volume ha costi di trasporto inferiori perché meno pesante.

Nei vari processi di lavorazione che riguardano l'asportazione di truciolo, il magnesio e le sue leghe si caratterizzano per:

- l'ottima finitura superficiale anche a velocità di taglio elevate e con grandi spessori di truciolo;
- minore usura degli utensili;
- possibilità di ottenere rugosità di 0,1  $\mu\text{m}$  (ottima finitura superficiale).

Le caratteristiche fisiche del magnesio permettono di classificarlo come ottimo metallo da fonderia. Per realizzare un componente in magnesio si possono utilizzare gli stessi processi degli altri metalli:

- estrusione;
- forgiatura (deformazione plastica post estrusione);

- saldatura (in atmosfera controllata);
- assemblaggio;
- colata/pressofusione (anche per particolari complessi a parete sottile): il magnesio è dotato di alta stabilità dimensionale a motivo della sua velocità di ritiro costante, inoltre la colata e le tolleranze della lavorazione alle macchine utensili possono essere ottenute senza stress di ritiro. Al basso punto di fusione (650°C) si affianca l'elevata fluidità allo stato liquido, che consente di produrre getti di forma complessa a pareti sottili, e il basso calore specifico, che permette di accelerare il raffreddamento dei getti e di limitare i carichi termici sulle forme metalliche. Un altro vantaggio dei pezzi fusi del magnesio è il possibile aumento della velocità di colata.

### **2.3 – LE LEGHE DI MAGNESIO**

Negli ultimi 5 anni l'utilizzo del magnesio e delle sue leghe nell'industria mondiale è triplicato, a conferma del particolare interesse verso questo materiale, considerato moderno per le sue caratteristiche, in quanto considerato il metallo strutturale più leggero in assoluto.

Il magnesio di oggi e i sistemi/prodotti per trasformarlo e proteggerlo sono totalmente differenti rispetto a quelli utilizzati decine di anni fa. Le ultime tecnologie applicabili alle leghe di magnesio permettono ai progettisti di ottenere:

- leggerezza elevatissima;
- caratteristiche meccaniche strutturali;
- alta precisione dei componenti;
- ottima finitura superficiale;
- alta produttività.

*Il Magnesio è un metallo per tecnici raffinati.*

Il magnesio si trova facilmente in commercio con purezze che superano il 99.80%, tuttavia è raramente usato per applicazioni industriali senza essere legato con altri metalli, a causa delle sue proprietà meccaniche non eccelse. Gli alliganti tipici come alluminio, manganese, zinco, torio, zirconio, argento, terre rare permettono di ottenere leghe leggere per applicazioni strutturali.

La quantità massima di elementi alliganti è limitata dalla solubilità allo stato liquido dell'elemento nel metallo fuso così come dalle interferenze tra elementi competitivi aggiunti.

Anche per il magnesio, così come per l'alluminio o altri metalli, si utilizzano leghe diverse per i vari processi di fusione o per la produzione di billette per l'estrusione e lo stampaggio a caldo.

Ecco un elenco dei principali alleganti e le diverse caratteristiche:

- Alluminio: aumenta la resistenza meccanica;
- Zinco: aumenta l'allungamento;
- Manganese: aumenta la resistenza alla corrosione;
- Zirconio: usato per affinare il grano;
- Rame: aumenta la fluidità;
- Calcio: diminuisce la densità;
- Terre rare: aumentano la resistenza alle alte temperature;
- Argento: aggiunto alla lega Magnesio/Terre rare aumenta la resistenza a tutte le temperature;
- Berillio: aggiunto in piccole quantità alla lega utilizzata per la pressocolata, previene la possibilità di incendio.

In questa trattazione si è considerato come materiale per la coppa dell'olio e la sovratesta, la lega EN-MCMgAl9Zn1 (A) (detta anche AZ91), la più comune per fusione e utilizzata nella maggior parte delle applicazioni delle leghe magnesio, ideale per l'ottima finitura superficiale dei manufatti prodotti: parti di auto, equipaggiamenti sportivi, coperchi, scatole, accessori, ecc.

La composizione chimica nominale prevede:

% Al	% Mn	% Zn	% Si	% Fe	% Cu	% Ni	% altri	% Mg
8.3-9.7	0.15min	0.35-1.0	0.1max	0.005max	0.03	0.002max	0.002max	resto

Alluminio e zinco sono relativamente solubili nel magnesio, la solubilità dell'alluminio è 12.7% in peso a 437°C e 3.0% a 93°C, quella dello zinco è 6.2% a 340°C e 2.8% a 204°C.

La densità, a causa della presenza degli elementi in lega aumenta leggermente rispetto a quella del magnesio puro ( $\rho=1.739 \text{ g/cm}^3$ ), a  $20^\circ\text{C}$  si attesta su  $1.81 \text{ g/cm}^3$ .

La coppa dell'olio è stata realizzata in magnesio stampato a caldo, mentre la sovratesta attraverso il processo di colata in terra da fonderia.

Quest'ultima è stata sottoposta a trattamento termico T6 finale, il quale dopo il processo di colata prevede una tempra seguita da solubilizzazione ad alta temperatura e successivo invecchiamento artificiale.

Gli effetti microstrutturali che produce il trattamento termico T6 sono:

- durante la solubilizzazione si arrotondano e si agglomerano le particelle solide e si dissolve parte del composto eutettico, che con la tempra rapida si raffina;
- con l'invecchiamento artificiale si verifica la precipitazione continua e discontinua all'interno di tutta la struttura.

In seguito si effettuerà un trattamento criogenico (*deep cryogenic treatment, DCT*), che si contraddistingue dal trattamento freddo per la temperatura più bassa cui si realizza, ossia quella dell'azoto liquido ( $-196^\circ\text{C}$ ).

Il processo criogenico fino a primi anni '60 consisteva nell'immersione del componente direttamente in azoto liquido, ma per pezzi di geometria complessa il raffreddamento drastico poteva comportare la rottura degli stessi; l'azoto liquido è stato sostituito da una fitta nebbia di goccioline in grado di portare più gradualmente i pezzi alla temperatura di  $-196^\circ\text{C}$ .

Il controllo del raffreddamento garantisce l'affidabilità e la riproducibilità del processo, elemento fondamentale per avere uno standard qualitativo elevato del prodotto.

Dopo il trattamento criogenico va sempre eseguito il rinvenimento o in alcuni casi una semplice distensione.

Fino ad ora questo tipo di trattamento è stato effettuato soprattutto sull'acciaio per ottenere un aumento delle sue proprietà, tra le quali aumento della resistenza all'usura e maggior stabilità all'usura.

Tra le proprietà meno favorevoli del magnesio, come verrà chiarito nei capitoli successivi, si trova prima fra tutte la scarsa resistenza alla corrosione. Si provvederà quindi alla verniciatura a polvere: una tecnica di protezione superficiale molto efficace.

Di seguito sono elencate le proprietà meccaniche e fisiche della lega; i dati relativi alle proprietà fisiche si riferiscono tutti ad una temperatura di  $20^\circ\text{C}$ , a parte il coefficiente di espansione lineare calcolato nell'intervallo  $20\div 100^\circ\text{C}$ .

<b>Proprietà meccaniche</b>	<i>Valore</i>	<i>Unità di misura</i>
Carico di rottura	230 ÷ 250	MPa
Carico di snervamento	160 ÷ 165	MPa
Allungamento a rottura	1 ÷ 6	%
Modulo elastico	45	GPa
Durezza Brinell	67	HB
Limite di fatica	70 ÷ 97	MPa
<b>Proprietà fisiche</b>		
Densità	1.81	g/cm <sup>3</sup>
Temperatura di liquido	598	°C
Temperatura di fusione incipiente	420 ÷ 435	°C
Coefficiente di espansione lineare	26	µm/m·K
Calore specifico	1.02	kJ/kg·K
Calore di fusione specifico	370	kJ/kg
Conduttività termica	51	W/m·K
Conduttività elettrica	6.6	MS/m

Tab. 2.2 – *Proprietà meccaniche e fisiche della lega*

La designazione e la composizione chimica a cui si fa riferimento per la lega di magnesio considerata è definita dalle normative rappresentate in fig. 2.3 e 2.4:

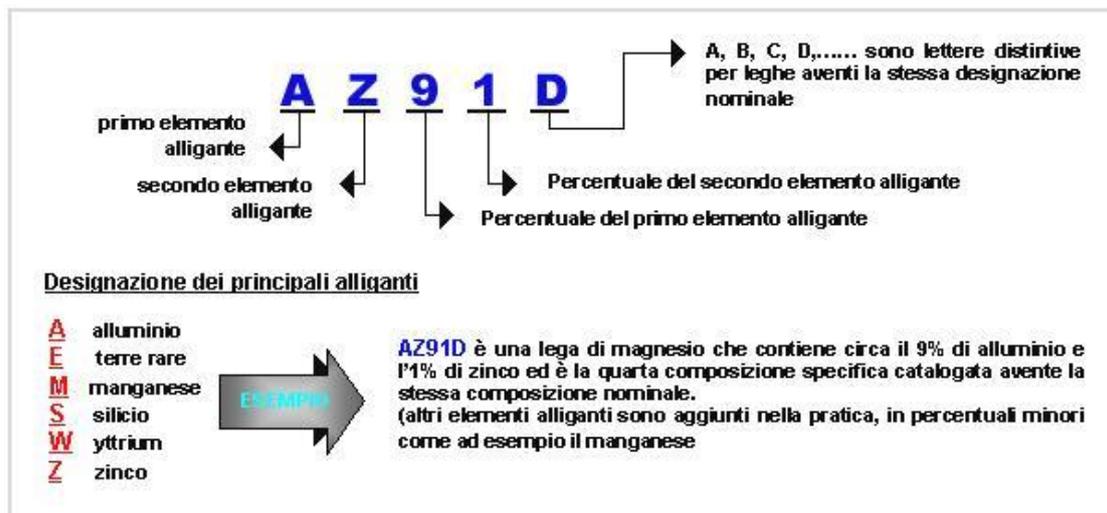


Fig. 2.3 – Normativa Standard ASTM (America Society Testing Material)

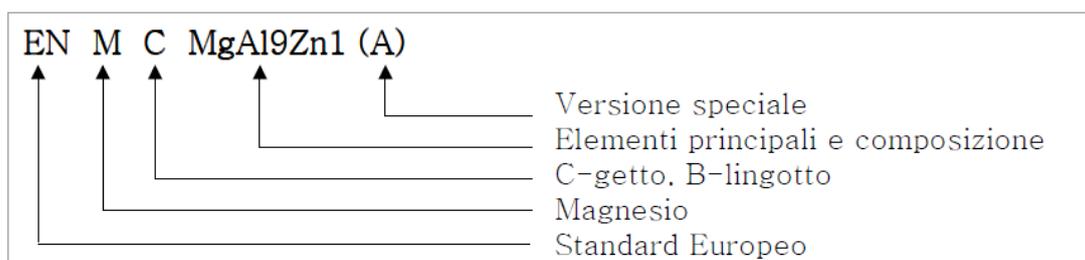


Fig. 2.4 – Normativa Standard Europeo UNI EN 1753

## 2.4 – LA SICUREZZA E I RISCHI

Il primo pensiero che comunemente si ha sul magnesio è che sia incendiabile, esplosivo, corrodibile, difficile da lavorare. Questo per alcune esperienze negative del passato, che lo hanno etichettato come metallo pericoloso o metallo che brucia.

In realtà il magnesio si può considerare il metallo del futuro per i vantaggi in termini di impatto ambientale e riduzione delle emissioni tossiche in atmosfera nei processi di riciclaggio.

L'aumento esponenziale della produzione di magnesio in questi ultimi 5 anni è una testimonianza concreta dell'importanza e della riscoperta di questo metallo strutturale, per altro molto usato nell'industria automobilistica tedesca prima e dopo la seconda

guerra mondiale con ottimi risultati in termini di prestazioni e oggi in settori strategici come quelli aeronautici, missilistici e militari.

Possiamo affermare quindi che il magnesio è pericoloso da processare per chi non lo conosce e per chi non conosce le nuove leghe moderne, create per avere un'alta resistenza termica.

I fattori che possono dare luogo a combustione sono:

- avanzamenti troppo bassi nelle lavorazioni con le macchine utensili;
- uso di utensili non appropriati;
- presenza di scintille o causa di urti tra truciolo e utensile al distacco del truciolo: i trucioli danno luogo a combustione se arrivano a temperature superiori ai 480°C.

Eliminazione del problema:

- utilizzo di utensili affilati con ampi angoli di spoglia inferiore;
- grandi avanzamenti per avere grandi spessori di truciolo (per lavori di sgrossatura è praticamente impossibile il verificarsi di combustione);
- utilizzo di oli minerali per refrigerare il processo;
- evitare l'accumulo di truciolo e polveri sottili nella zona di lavoro;
- non accumulare o concentrare grosse quantità di truciolo in bidoni o contenitori.

In caso di incendio non utilizzare acqua, estintori ad acqua o schiuma, ma polveri di ghisa o di metallo estinguente.

Il magnesio oggi viene comunemente utilizzato per la costruzione di:

- ingranaggi;
- telai di automobili;
- telai per biciclette;
- componenti missilistici;
- componenti per elicotteri;
- case per apparecchiature elettroniche (PC portatili, telefonini, macchine fotografiche);
- alloggiamenti per apparecchiature radio;
- volanti, strutture per sedili, cerchioni per le auto;
- oggetti sportivi (telai per occhiali, accessori per bici, racchette da tennis);
- accessori vari per l'industria meccanica.

Quindi parliamo di settori industriali, alcuni strategici, quali:

- aeronautico;

- automobilismo;
- motociclismo;
- militare;
- elettronico.

Alcune delle industrie che utilizzano oggi il magnesio per la produzione di loro componenti:

- Alenia;
- KTM;
- Ducati;
- Ferrari;
- Volkswagen;
- Porsche;
- Honda;
- Famà Helicopters;
- Valcucine;
- Marchesini Wheels.

## **2.5 – UN METALLO ECOLOGICO**



Il riciclaggio di materiali e prodotti industriali è una priorità, almeno quanto le fonti rinnovabili. Il nostro pianeta soffre. Le materie prime scarseggiano, il clima cambia per mancanza di attenzione e per una politica di trasformazione industriale sbagliata. Il

mondo deve pensare a produrre con maggiore qualità e con più rispetto verso l'ambiente, considerando anche costi economici e sociali che si riferiscono alla "fine vita del prodotto" ed alla possibilità di recuperare la maggior parte possibile del materiale in disuso.

E' noto l'entrata in vigore del regolamento Europeo 333/2011 sui rifiuti della produzione industriale, che ha lo scopo di favorire le attività di recupero e riciclo e detta i criteri in base ai quali i rottami metallici cessano di essere considerati rifiuti, diventando a loro volta materie prime per successive trasformazioni, con grandi vantaggi sia per l'ambiente che per il conto economico globale.

La caratteristica che rende il magnesio così interessante per l'industria moderna e per l'intera filiera è la perfetta riciclabilità: l'energia necessaria per il processo di riciclaggio e fusione del magnesio è nettamente inferiore rispetto a qualsiasi altro materiale metallico.

Per il suo riutilizzo viene impiegata solo il 5% dell'energia necessaria alla produzione del magnesio grezzo.

## Capitolo 3

### COLATA IN TERRA DA FONDERIA

#### 3.1 – GENERALITA' SULLA FONDERIA

La fonderia è probabilmente la tecnica più antica di formatura di metalli e consiste nell'immettere un metallo fuso in una cavità; dopo il raffreddamento del metallo si ottiene un pezzo che ricopia al positivo la forma della cavità.

La fonderia è una tecnica molto versatile; con essa è possibile costruire pezzi con peso da pochi grammi a molte tonnellate. La fonderia è molto interessante perché può diminuire il costo di alcune strutture ed aumentare la loro efficienza, diminuendone il peso; inoltre essa offre una maggiore integrazione strutturale, consentendo l'eliminazione di molti sottocomponenti; infine la fonderia offre al progettista una grande libertà nel disegno delle strutture, potendo aggiungere del materiale dove questo è necessario.

Un'affermazione di carattere generale è: una struttura deve essere disegnata in funzione della tecnologia con la quale la si vuole realizzare.

Questo aspetto è particolarmente stringente nel caso della fonderia, per cui è necessario uno stretto contatto fra progettista e reparto di fonderia fin dalle prime fasi del progetto.

I principali metalli utilizzati in fonderia sono acciaio, ghisa, ottone, bronzo, leghe di alluminio, leghe di magnesio e leghe di titanio. Un metallo da fonderia deve avere una temperatura di fusione relativamente bassa, non superiore a 1500÷1600°C, deve possedere una buona fluidità allo stato fuso in modo da riempire correttamente la forma e non presentare durante il raffreddamento fenomeni che ne diminuiscano la resistenza meccanica.

In generale, nei confronti della fonderia, si può affermare che le leghe sono più adatte dei metalli puri.

Attraverso il processo produttivo della fonderia è possibile ottenere una serie di prodotti finiti, con caratteristiche fisiche, metallurgiche e dimensionali ben definite, colando direttamente il metallo allo stato liquido in opportune forme.

Le leghe di magnesio non presentano particolari difficoltà di impiego in fonderia, se non per l'alta affinità di questo metallo per l'ossigeno atmosferico, con il quale si può innescare una violentissima reazione di combustione.

Queste leghe sono adatte alla produzione di getti in sabbia, in conchiglia, sotto pressione e con processi speciali.

Le leghe di magnesio usate industrialmente sono di una elevata molteplicità di tipi, che si possono riunire in cinque categorie:

- I) leghe magnesio–alluminio–manganese;
- II) leghe magnesio–alluminio–zinco;
- III) leghe magnesio–zirconio–metalli delle terre rare;
- IV) leghe magnesio–zinco–zirconio;
- V) leghe magnesio–torio–zirconio.

I tipi I e II sono di comune impiego, il tipo III è adatto per getti molto compatti che debbono essere stagni a fluidi sotto pressione e presentano minor colabilità e maggiore tendenza al ritiro. Gli ultimi due tipi, adatti a impieghi generali, presentano maggior tendenza a manifestare difetti nei getti, quali porosità, cavità di ritiro, lesioni a caldo.

Il pericolo dovuto alla reattività del magnesio richiede l'adozione di alcune precauzioni nella condotta della fusione.

### **3.2 – LA FUSIONE DELLA LEGA DI MAGNESIO**

La fusione del metallo va fatta in opportuni forni fusori, diversi a seconda del materiale da fondere.

La fusione delle leghe di magnesio si effettua di solito in crogioli, di capacità da 30 a circa 1000 kg, di acciaio dolce, con tenore di carbonio inferiore a 0.12% e tenori ridotti (0.10%) di nichel e rame.

La vita di questi crogioli è limitata dal progressivo deterioramento per ossidazione sulla superficie esterna.

Periodiche ispezioni devono prevenire la rottura dei crogioli in esercizio, che sarebbe causa di gravissimi incidenti per la fuoriuscita e l'infiammazione del metallo fuso a contatto improvviso con l'aria.

I refrattari che possono andare a contatto con il magnesio fuso devono essere di alta qualità e con alto tenore di allumina.

Si devono evitare i tipi che contengano ossidi di metalli, ad esempio di cromo, che possono innescare una violenta reazione di ossidazione del magnesio metallico. Per motivi analoghi si deve evitare che nel crogiolo contenente le leghe fuse possano cadere scaglie di ossido di ferro distaccate dalla superficie esterna o da altre parti del forno. E' opportuno anche predisporre una vasca di raccolta per l'eventuale fuoriuscita del metallo fuso dovuto alla formazione di lesioni del crogiolo.



Fig. 3.1 – Forno fusorio a crogiolo

La superficie libera del metallo fuso deve essere ricoperta da un flusso protettivo di sali o da gas inerti per evitare l'infiammazione a contatto con l'aria.

I flussi salini impiegati devono essere privi di componenti ossidanti, ad esempio nitrati o nitriti alcalini, che provocherebbero azioni esplosive col magnesio. Se, come spesso accade, questi flussi contengono cloruro di magnesio, di elevata igroscopicità, devono essere conservati con le precauzioni occorrenti per proteggerli dall'umidità atmosferica.

Il sistema tipico usato nella fonderia delle leghe di magnesio per evitare l'infiammazione del metallo consiste nell'aspergerne la superficie con zolfo in polvere. Questo brucia formando anidride solforosa che per la sua densità nettamente superiore a quella dell'aria rimane a contatto della superficie del metallo, impedendone la reazione con l'ossigeno.

La carica dei forni fusori deve essere fatta con pani di prima fusione, eventualmente con l'aggiunta di rottami di spessore elevato, ripuliti accuratamente mediante sabbiatura da ogni impurità aderente in superficie.

Si usa una quantità di flusso pari a 1÷2% della capacità del crogiolo, che si fonde prima dell'aggiunta della carica metallica.

Questa, fondendo progressivamente passa al di sotto del flusso liquefatto, che ne assicura la protezione dall'ossidazione.

Le leghe di magnesio di impiego corrente vengono portate nella fusione a temperature di 705÷715°C.

A fusione ultimata vengono lentamente rimescolate, aggiungendo una nuova quantità di flusso all'incirca uguale a quella precedente.

Il metallo fuso viene poi lasciato riposare per 10÷15 min per facilitare la separazione per differenza di densità delle impurità non metalliche e delle goccioline di flusso inglobate.

Questa azione è più lenta nelle leghe di magnesio perché la loro bassa massa volumica rende deboli le spinte idrostatiche su queste inclusioni.

Per le leghe di magnesio si può effettuare un lavaggio con cloro gassoso che si fa gorgogliare nella massa fusa, iniettandolo attraverso un tubo di grafite, in modo simile a quello per l'alluminio.

Il cloro elimina nel modo in precedenza accennato i gas disciolti e produce inoltre la formazione di goccioline di cloruro di magnesio fuso che decantando verso la superficie inglobano le impurità non metalliche incontrate.

Questo trattamento si esegue tra 720 e 760°C per 5÷15 minuti.

Le leghe di magnesio si sottopongono spesso ad un trattamento di affinazione del grano immediatamente prima della colata.

Questo trattamento si può eseguire con due processi differenti.

Nel primo, fondato su azioni puramente fisiche, il metallo fuso viene surriscaldato per circa 15 min a temperature tra 900 e 925°C. Viene poi raffreddato rapidamente alla temperatura di colata estraendo il crogiolo dal forno.

In questo rapido raffreddamento si producono nel metallo molti germi di solidificazione e così le dimensioni medie dei grani nei getti prodotti risultano sensibilmente ridotte.

La spiegazione di questo effetto si deve probabilmente ricercare nel fatto che per l'elevata conducibilità della parete del crogiolo e la forte irradiazione verso l'ambiente, si raggiunge nello strato periferico del metallo fuso un sensibile sottoraffreddamento con l'effetto ben noto di formazione di un elevato numero di germi di solidificazione.

Nella massa totale del metallo fuso si generano però, per i forti gradienti termici dovuti all'intensa irradiazione di calore, intensi moti convettivi che trasportano in ogni punto i

germi di solidificazione suddetti, senza dar loro tempo di accrescersi, nello strato in cui sono nati, fino al contatto mutuo.

In tal modo, l'intera massa fusa all'atto della colata risulta inseminata di moltissimi nuclei di cristallizzazione che nel raffreddamento del getto nella forma generano la desiderata struttura a grana fine.

L'altro processo è fondato sull'azione chimico-fisica della inoculazione con carbonio o carburo di calcio.

Il carbonio viene aggiunto in forma di composto organico che, immerso nel metallo fuso, si decompone per l'alta temperatura.

Si usa ad esempio esacloroetano o esaclorobenzene, la cui decomposizione oltre a particelle carboniose che esercitano l'accennata azione di inoculazione sviluppa anche cloro gassoso che esercita l'effetto già illustrato di asportazione di gas disciolti.

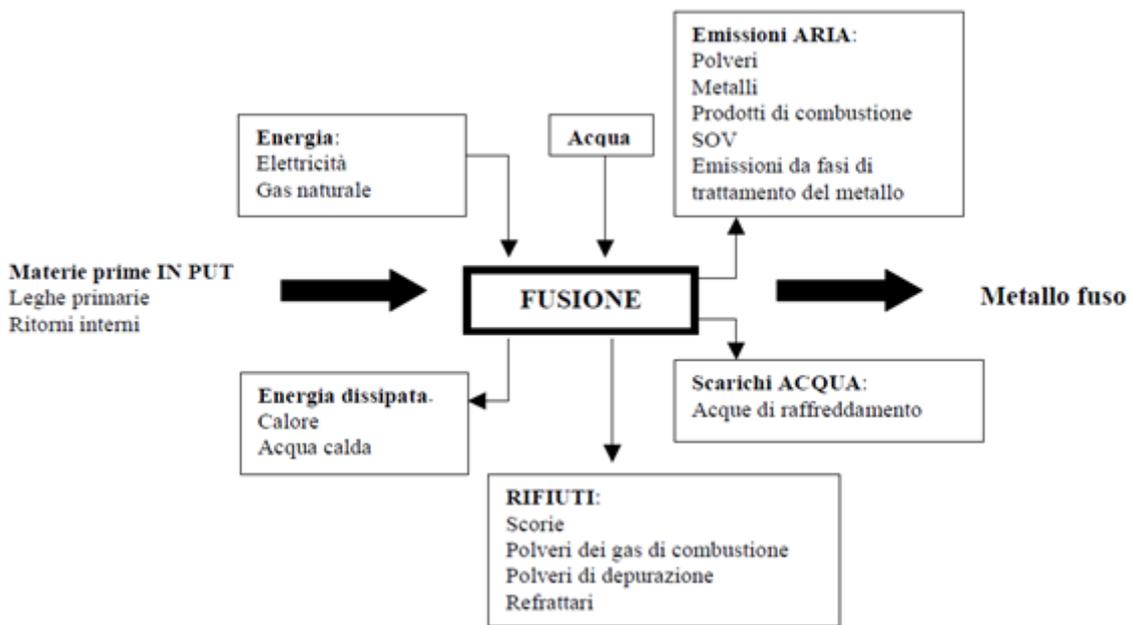


Fig. 3.2 – Schema illustrativo dei cicli del processo fusorio

### 3.3 – PRECISAZIONI PER LA COLATA NELLE FORME

La colata del metallo nelle forme si esegue previa rimozione dal crogiolo del flusso protettivo di sali fusi che ne ricoprono la superficie libera.

Per proteggere la lega dall'ossidazione l'asportazione del flusso è eseguita immediatamente dall'aspersione sulla superficie del metallo di una miscela di zolfo ed acido borico.

Durante la colata bisogna usare tutte le misure precauzionali per evitare esplosioni per contatto del magnesio fuso con sostanze umide o con ossido di ferro.

Si usa anche mescolare le terre di fonderia con adatti inibitori che evitino l'innesco di reazioni locali del magnesio con i costituenti della forma. Sostanze adatte sono zolfo, acido borico, fluoborato potassico e fluosilicato ammonico.

In getti di notevole massa la quantità di inibitori, se volatili, deve essere sufficiente ad assicurare la protezione per tutto il tempo che la superficie del getto richiede per solidificarsi.

Quando si desidera un grado di finitura superficiale superiore a quello ottenibile con la normale formatura in terra si può ricorrere all'applicazione dei noti rivestimenti superficiali, ad esempio a base di composti di zirconio o altri materiali che non abbiano tendenza a reagire col magnesio fuso.



Fig. 3.3 – Siviera o caldaia di colata

### 3.4 – DESCRIZIONE DEL PROCESSO DI COLATA

Storicamente il primo modo è stato quello di creare la forma nella terra; tale tecnica, fusione in terra, è tuttora utilizzata. Per poter realizzare la forma nella terra bisogna disporre di un modello, cioè un pezzo simile al pezzo che si vuole costruire. In passato i modelli venivano costruiti in legno e verniciati per limitare l'assorbimento di umidità. Oggi si preferiscono materie plastiche, legno artificiale e metalli.

Il processo di colata in terra appartiene alla categoria dei processi in forma transitoria e si esegue mediante un'attrezzatura di produzione conforme all'esempio qui riportato:

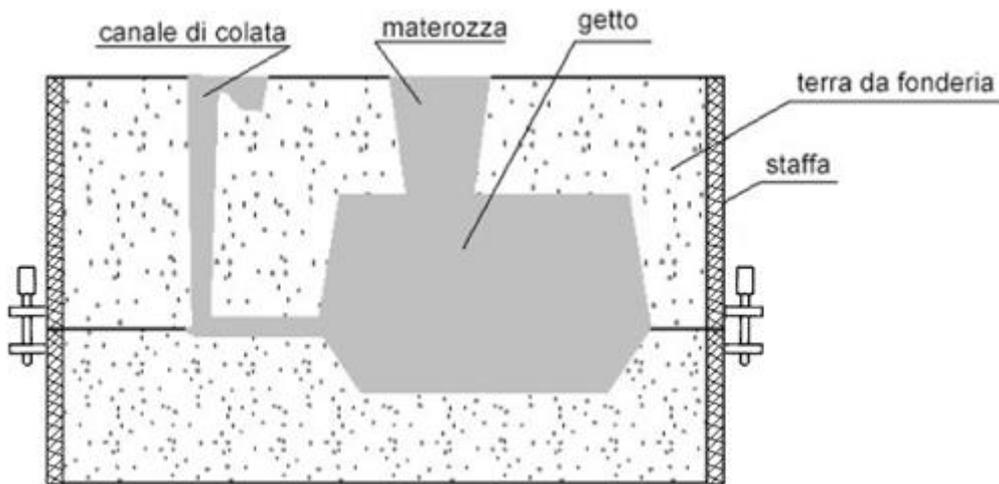


Fig. 3.4 – Accessori per l'allestimento della forma

Elementi fondamentali dell'attrezzatura sono:

- *Staffe*: inferiore e superiore, opportunamente riferite e bloccate tra di loro, racchiudono il sistema lasciando aperti sia la sommità che il fondo; il primo elemento per l'allestimento di una forma sono le staffe. Si tratta di contenitori in ferro senza fondo dotati, sull'esterno di due delle pareti laterali, di guide, atte a permettere la corretta sovrapposizione delle staffe. Trovandosi accoppiate l'una all'altra, permettono la simmetria della forma (realizzata in due metà) e favoriscono la fase di apertura dello stampo. Le staffe sono disponibili in diverse dimensioni, in funzione delle dimensioni del getto che deve essere realizzato. All'interno delle forme appena riempite di metallo liquido si creano delle pressioni idrostatiche e quindi delle spinte dirette in tutte le direzioni che durano sino a quando il metallo è completamente

solidificato. Se la spinta verso l'alto non è sufficientemente controbilanciata da opportune masse, la semiforma superiore viene sollevata (assieme alla sua staffa se quest'ultima non è bene agganciata alla staffa inferiore) e il metallo liquido fuoriesce in corrispondenza alla linea di giunzione delle due semiforme.



Fig. 3.5 – Staffe da fonderia

- *Materiale di formatura (terra da fonderia)*: riporta una cavità che rappresenta il negativo della geometria da realizzare; come citato in precedenza si usa anche mescolare le terre di fonderia con additivi inibitori che evitino l'innescare di reazioni locali del magnesio con i costituenti della forma.
- *Anima*: anch'essa realizzata in materiale refrattario, destinata a impedire al metallo fuso di occupare quelle zone della cavità che diventeranno fori o parti cave del pezzo solidificato.

Il magnesio ha un basso contenuto termico allo stato fuso e pertanto in getti a pareti sottili muniti di anime si può avere il pericolo che la quantità di calore ceduta a queste dal metallo che le circonda sia insufficiente per provocarne la disgregazione. Pertanto le anime impiegate in fonderia di magnesio e delle sue leghe sono di regola preparate con leganti diversi da quelli di comune impiego nella fonderia di altri metalli.

Di solito si impiegano leganti a base di urea e resine formaldeidi, nel tenore di 0.65÷0.75%, accompagnate da una certa quantità di zolfo e di acido borico per

produrre all'atto del riscaldamento l'atmosfera protettiva contro eventuali reazioni del magnesio fuso con la sabbia silicea.



Fig. 3.5 – Anime in materiale refrattario

- *Canale di colata:* per poter riempire correttamente la forma, questa deve essere dotata di un canale, che inizia con un piccolo bacino, la cui funzione è quella di rallentare la caduta del metallo fuso che altrimenti potrebbe danneggiare la forma, asportando sabbia, che successivamente rimarrebbe intrappolata nel getto. Dal bacino parte il canale verticale, di sezione decrescente in modo da evitare la formazione di moti turbolenti, che favorirebbero il trasporto di aria verso la forma, con possibile formazione di soffiature nel getto. Dal piede del canale parte un tratto orizzontale che si attacca al getto.

Il sistema di alimentazione dei getti di leghe di magnesio deve essere predisposto in modo da far giungere il metallo fuso nelle parti più basse della forma con la minima turbolenza.

Il canale di colata viene completato con un filtro in materiale ceramico, la cui funzione è quella di trattenere la scoria ed evitare quindi la sua inclusione nel getto.

Per fusioni complesse o molto grandi dal canale di colata parte una canalizzazione di distribuzione che alimenta il getto in diversi punti.

Il completo riempimento di queste forme si può assicurare con alte temperature e velocità di colata e disponendo numerosi alimentatori in tutte le zone in cui si abbia motivo di temere la formazione di cavità di ritiro.



Fig. 3.6 – Canale di colata

- *Materozze*: cavità collegate con la forma principale, destinate a fornire materiale che contrasti il ritiro di solidificazione (dell'ordine del 0.5÷2%). Un primo problema della fonderia riguarda le deformazioni di origine termica. Praticamente tutti i metalli subiscono una brusca variazione di volume durante la transizione liquido/solido e questa può essere causa di difetti nei getti. Raggiunto lo stato solido, il volume del getto continua a diminuire durante il raffreddamento fino alla temperatura ambiente, e questo può essere causa di ulteriori difetti.

La variazione di volume che avviene durante la solidificazione può essere compensata alimentando il getto con metallo fuso. Ciò viene realizzato predisponendo un opportuno volume di materiale, detto materozza, dimensionato in modo da raffreddare per ultimo e quindi poter alimentare il getto con metallo fuso.

La funzione della materozza è quindi quella di evitare le cavità da ritiro, che altrimenti si formerebbero.

In sintesi, la funzione della materozza è quella di spostare il baricentro termico della fusione dal getto alla materozza stessa.

Le materozze e gli alimentatori vengono eliminati dopo la fusione e si separano dai getti mediante lavorazione alle macchine utensili o seghe meccaniche. L'impiego delle mole presenta l'inconveniente della produzione di polveri infiammabili, che richiederebbe l'installazione di impianti di raccolta ad umido per evitare pericoli di esplosioni e incendi.

Il raffreddamento del getto non potrà mai avvenire in modo uniforme e i gradienti di temperatura che si formano durante il raffreddamento sono la causa di tensioni residue nei getti la cui entità può anche essere tale da produrre rotture nel getto (cricchature).

### 3.5 – FASI FINALI DEL PROCESSO FUSORIO

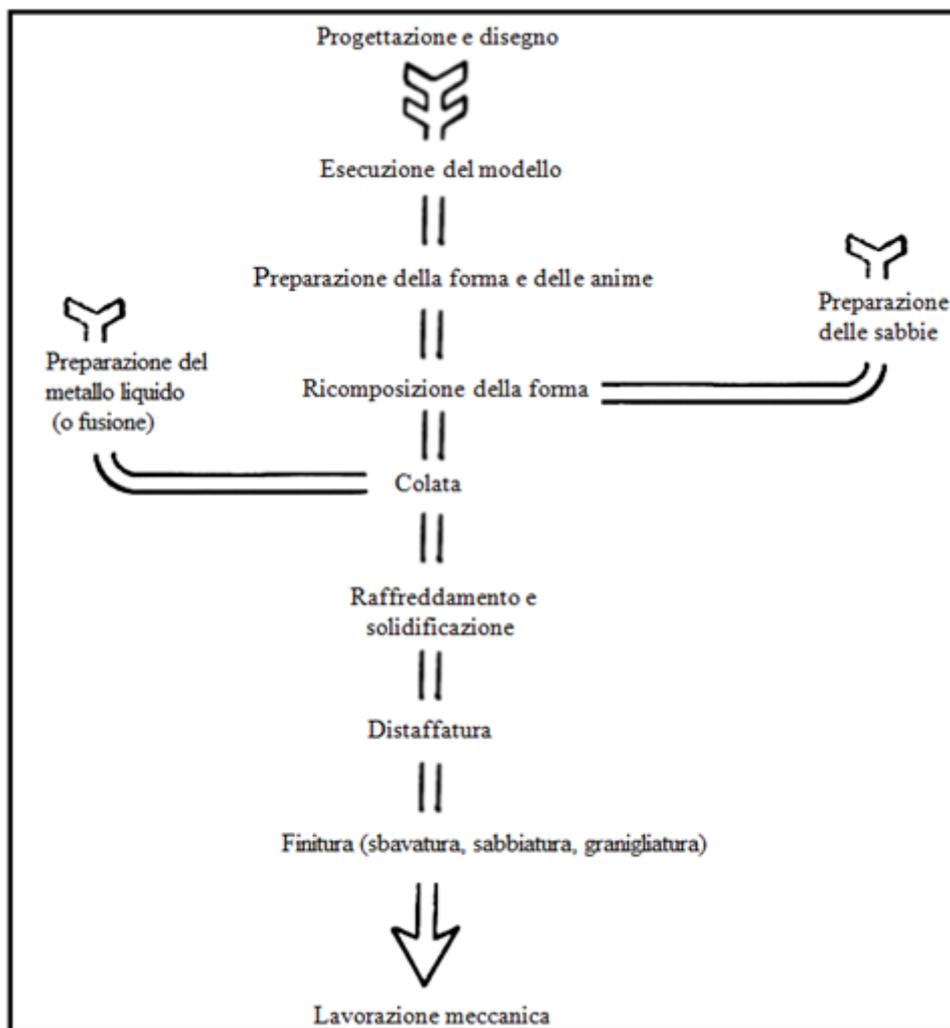


Fig. 3.7 – Diagramma di lavorazione di un getto

I raffreddatori che si impiegano per favorire la solidificazione orientata di un getto possono essere costruiti in acciaio o ghisa massicci oppure con un impasto di sabbia silicea e graniglia di acciaio usando silicato sodico come legante, che può essere indurito con insufflazione di anidride carbonica.

Il basso calore di fusione rende in genere rapida la solidificazione dei getti, inoltre nel disegno del modello si deve tenere conto della necessità di estrarre il modello dalla terra senza danneggiare la cavità formata. Ciò può essere ottenuto dotando il modello di angoli di spoglia, variabili da 0.5 a 5° in funzione della profondità dell'impronta. L'estrazione del modello è inoltre facilitata se il modello è costruito con ampi raggi di raccordo. Ampi raggi di raccordo migliorano inoltre il modo di raffreddamento del getto, diminuendo quindi le tensioni residue, ed evitando criccate.

Anche aree di transizione fra zone del getto a diverso spessore e uniformità degli spessori evitano la formazione di criccate e vuoti da ritiro.

Le leghe di magnesio hanno bassa resistenza a caldo alle sollecitazioni di trazione e quindi è opportuno effettuare la sformatura soltanto dopo raffreddamento al di sotto di 150°C.

L'estrazione del modello è possibile solo in assenza di sottosquadri; in questo modo vengono denominate quelle zone del modello che risultano essere in ombra rispetto alla direzione di estrazione del modello stesso.

I sottosquadri in alcuni casi possono essere eliminati cambiando il piano di separazione del modello, oppure modificando il disegno del getto, o ancora ricorrendo a modelli smontabili e ricomponibili tramite spine o piccole slitte. E' anche possibile eliminare un problema di sottosquadro inserendo dei tasselli.

Quando il metallo colato si è solidificato, si procede alla distaffatura, che può essere effettuata sia manualmente (mediante mazze) sia meccanicamente (con apparecchi a scosse, a vibrazioni, a pressione).

Difficilmente un pezzo fuso è anche un pezzo finito; quasi sempre sono necessarie delle lavorazioni meccaniche per ottenere precise quote e tolleranze. Nel caso della sovratesta, le lavorazioni meccaniche si limitano ad alcune "cubature" delle superfici di accoppiamento con la testata e altri componenti, e alcune lamature attorno ai fori di fissaggio. Sul modello dovrà quindi essere previsto un sovrametallo per consentire le successive lavorazioni.

L'operazione è completata dalla finitura dei getti, effettuata mediante sabbiatura e sbavatura, per togliere le bave dal getto e ripulirlo dai residui di terra o di sabbia rimasti aderenti.

## Capitolo 4

### COMPONENTI AUSILIARI AL MANOVELLISMO

#### 4.1 – GIUNTO

La funzione principale di un giunto è di collegare semplicemente fra loro due alberi, posti l'uno di seguito all'altro, quando non è possibile per vari motivi disporre di un albero unico.

Si avrà quindi un estremo mosso dal motore mentre l'altro estremo collegato all'utilizzatore.

Fra i motivi possiamo citare:

- motore ed utilizzatore costruiti separatamente, anche da produttori diversi;
- facilità di montaggio e smontaggio;
- facilità di lavorazione degli alberi che risultano di lunghezza più contenuta.

Il tipo di giunto che si è deciso di utilizzare è quello che viene chiamato Giubo. Esso fa parte della categoria dei giunti deformabili, cioè che lasciano ai due alberi, in piccola quantità, uno spostamento relativo. Questi tipi di giunti permettono così un certo disallineamento grazie alla loro cedevolezza elastica. Si impiegano di solito quando il disallineamento non è imposto costruttivamente, ma è conseguenza delle tolleranze di fabbricazione e di montaggio, dei cedimenti dei supporti e simili.

Nello specifico il giunto Giubo è cedevole torsionalmente, cioè consente piccole rotazioni relative tra i due alberi attorno ai loro assi. Questa caratteristica è particolarmente utile nel caso di collegamenti tra motore e macchina operatrice in cui sono presenti coppie trasmesse irregolari, poiché ne attenua gli effetti di irregolarità. Lo scopo infatti è di introdurre una cedevolezza torsionale concentrata, che modifica il comportamento elastodinamico del sistema, ed isola parzialmente le due parti.

Il giunto Giubo può anche compensare piccoli disallineamenti assiali e radiali. Questa particolarità lo rende ideale per il collegamento tra due alberi dove possono avvenire piccoli errori di montaggio oppure dove nascono disallineamenti a causa di deformazioni elastiche degli alberi collegati.

Esso è composto da dei tasselli di gomma disposti a forma di poligono (esagonale oppure ottagonale). Per consentire il collegamento agli alberi per mezzo di crociere, sono incorporate nella gomma, in ogni vertice del poligono, dei componenti metallici

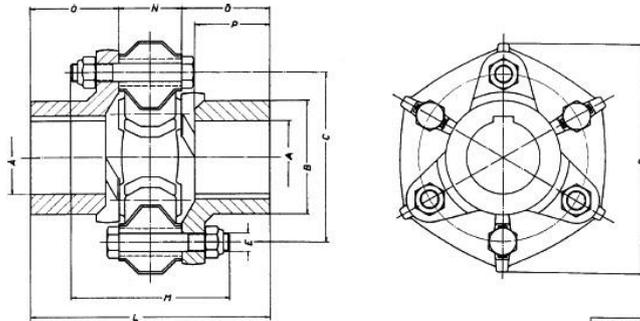
con foro passante, solitamente in acciaio o alluminio. Ogni parte metallica deve essere montata assieme alla gomma in precompressione per mantenere entro certi limiti gli spazi di trazione generati dalla coppia torcente, in modo da garantirne una certa sicurezza e durata.

La deformabilità torsionale è elevata grazie alla forma dei tasselli, questo permette al giunto di funzionare anche come parastrappi tra parte motrice ed condotta, assorbendo picchi di coppia che possono essere elevati.

Il collegamento del giunto avviene mediante l'utilizzo di due flange metalliche.

#### 4.1.1 – Scelta del giunto

La scelta del giunto è ricaduta su un modello prodotto dall'azienda Ortlinghaus. Le caratteristiche principali sono:



Serie			0007-033-Grandezza-000000							
Grandezza del giunto			15	23	31	39	47	55	63	69
Esecuzione			esagonale						ottagonale	
Parametro	Simbolo	Unità								
Coppia nominale	$T_{KN}$	Nm	40	80	160	270	550	800	1200	2400
Coppia massima	$T_{K\ max}$	Nm	100	200	400	675	1380	2000	3000	6000
Coppia pulsante perm.	$T_{KW}$	Nm	22	50	100	167	360	510	590	1540
Deformabilità assiale	$\pm \Delta K_a$	mm	3	3	4	4	4	4	7	8
Deformabilità radiale	$\pm \Delta K_r$	mm	0,5	0,6	0,6	0,8	0,8	1	1	1
Deformabilità angolare	$\pm \Delta K_w$	rad <sup>1)</sup>	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,03	0,03
Rigidità torsionale <sup>2)</sup>	$C_{T\ stat}$	Nm/rad	421	906	1688	2257	5618	9180	16855	41300
Rigidità assiale	$C_a$	N/mm	62	76	131	128	102	105	277	447
Rigidità radiale	$C_r$	N/mm	204	235	335	332	402	461	1200	1500
Rigidità angolare	$C_w$	Nm/rad	42	92	219	281	506	702	1854	5210
Smorzamento proporzionale	$\Psi$	-	0,8 ... 1							
Fattore di risonanza	$V_R$	-	~ 7							
Giri max. ammissibili	$n_{max}$	min <sup>-1</sup>	6000	6000	6000	4700	3600	3300	3000	2000
Temperatura max. ammis.	$t_{max}$	° C	Temperatura ambiente max. 70°C							
Fattore di avviamento	$S_z$	-	Valori per l'impiego appropriato corrispondente, ved. norme DIN 740 pag. 2, tabella 3							
Fattore di frequenza	$S_f$	-								
Fattore di temperatura	$S_t$	-								
Momento d'inerzia	J	kgm <sup>2</sup>	0,00038	0,001	0,003	0,009	0,03375	0,05125	0,1	0,3875
Massa	$F_G$	kg	1	1,8	3,5	6,5	14,5	18,5	28	61
Diametri	A max cava	H7 DIN 6885	30	40	48	60	70	80	95	130
			8x3,3	12x3,3	14x3,8	18x4,4	20x4,9	22x5,4	25x5,4	32x7,4
	B		45	58	72	90	115	125	145	200
	C		65	85	100	132	170	186	210	280
	D		93	118	142	181	234	254	281	380
Diametro interno utile dell'anello Giubo	E	M8	M10	M12	M14	M20	M20	M20	M20	M27
			25	35	40	60	80	85	105	145
Lunghezze	L		100	124	160	180	234	260	300	380
	M		72	84	104	120	158	172	182	220
	N		28	36	46	50	62	68	78	100
	O		36	44	57	65	86	96	111	140
	P		30	36	48	53	71	82	90	118
Coppia di serraggio delle viti	Nm	25	47	78	120	330	330	330	330	800
Anello Giubo (65 Shore A) Codice 1007-110-Grand.-003000	Grand.		15	23	31	39	47	55	63	69

Fig. 4.1 – Tabella giunto Giubo

Attraverso la consultazione della tabella e l'utilizzo delle specifiche del motore 1.3 multijet avionizzato, si è scelto il numero 31. Le specifiche utilizzate sono in particolare la velocità massima di rotazione, pari a 6000 giri/min, e con una potenza massima di 150 CV, equivalente a 110 kW, la coppia massima, che risulta:

$$M_{max} = \frac{110[kW] \cdot 10^3}{6000[giri/min] \cdot 2\pi/60} = 175.07[Nm]$$

Infatti il giunto Giubo 31 ha come coppia nominale 160 Nm e coppia massima 400 Nm.

#### 4.1.2 – Disegno al CAD

Il giunto è stato disegnato al CAD tramite il software SolidWorks, rispettando le dimensioni scritte in tabella:

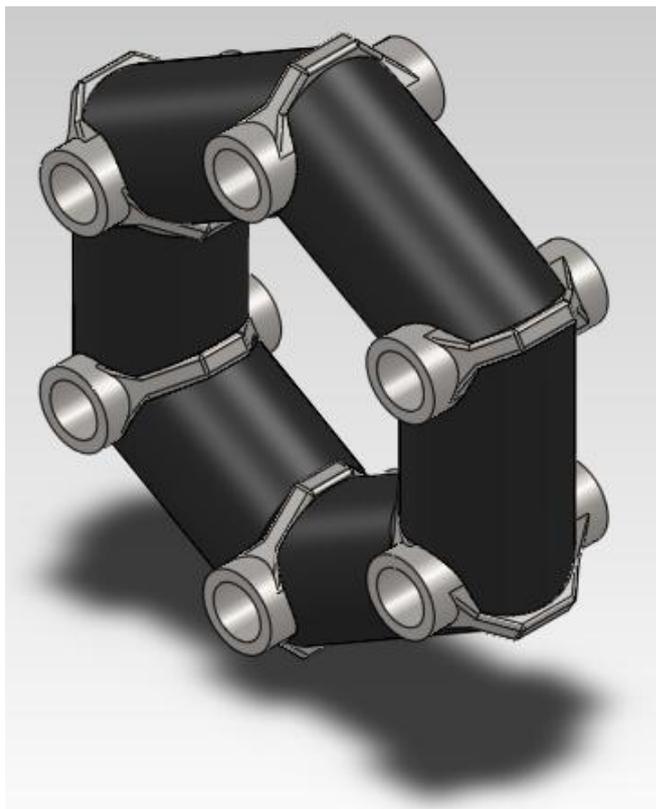


Fig. 4.2 – *Giunto Giubo*

Si è deciso, per aumentare la cedevolezza complessiva, di utilizzare due giunti disposti in serie tra loro. Essi sono collegati tra loro mediante tre viti M12 di 120 mm di lunghezza e di tre dadi anch'essi M12. Per distanziare i due giunti si sono utilizzati tre

spessori di 20 mm con diametro esterno di 18 mm a cui sono stati praticati dei fori di 12.50 mm di diametro.

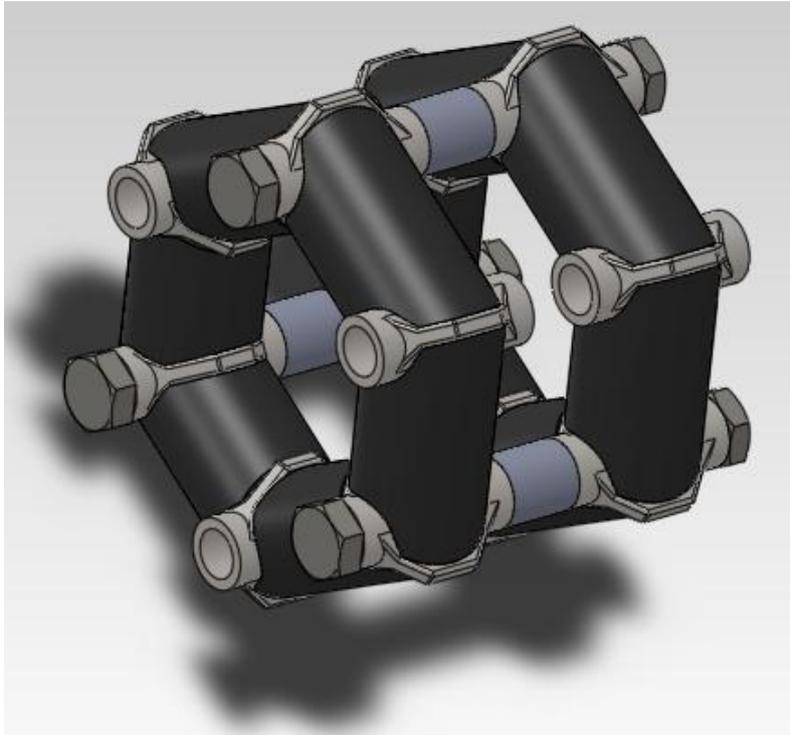


Fig. 4.3 – Due giunti Giubo in serie

Questo ha portato un notevole ingombro assiale del giunto completo che ha spinto la progettazione di due particolari flange. Lato motore:

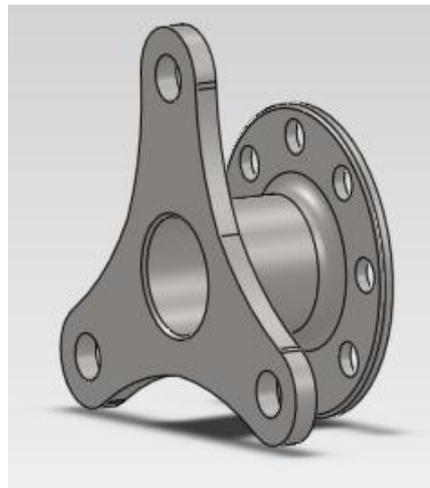


Fig. 4.4 – Flangia lato motore

Essa presenta tre fori filettati M12, utili a collegarla al giunto, e una seconda parte circolare con otto fori di 8.50 mm di diametro che servono per il collegamento al volano del motore.

Lato riduttore:

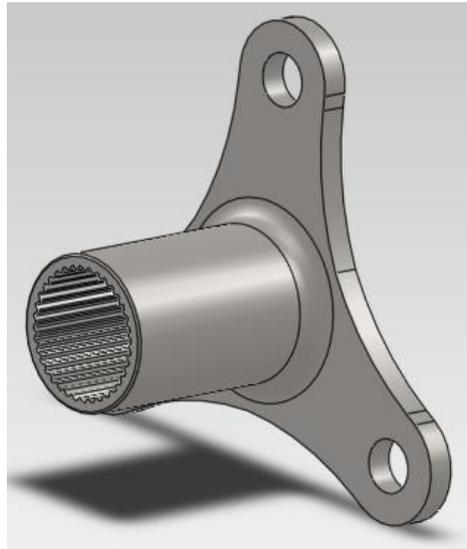


Fig. 4.5 – Flangia lato riduttore

Questa flangia è invece costituita da un foro con profilo scanalato dove si inserisce l'albero primario del riduttore (movente) e sempre tre fori filettati M12 per il collegamento al giunto.

Si è pensato di utilizzare anche in questo caso un acciaio 14NiCr18.

Per una più chiara visione del componente appena descritto si mostra il giunto nel suo insieme:

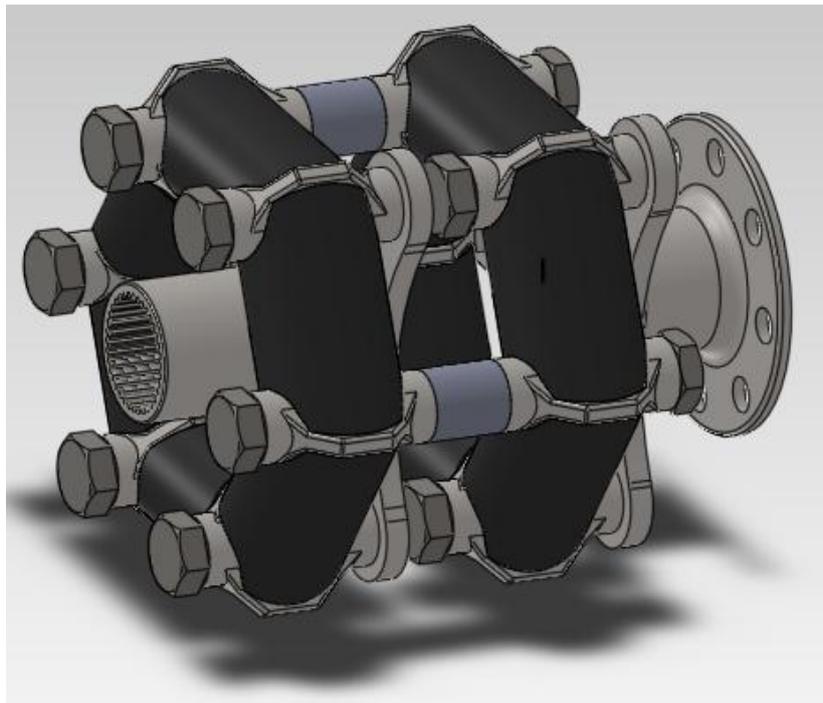


Fig. 4.6 – Doppio giunto Giubo completo

### 4.1.3 – Assemblaggio

Durante il disegno di ogni componente del giunto si è sempre tenuto in considerazione che essi siano montabili. Come si può vedere dall'esploso:

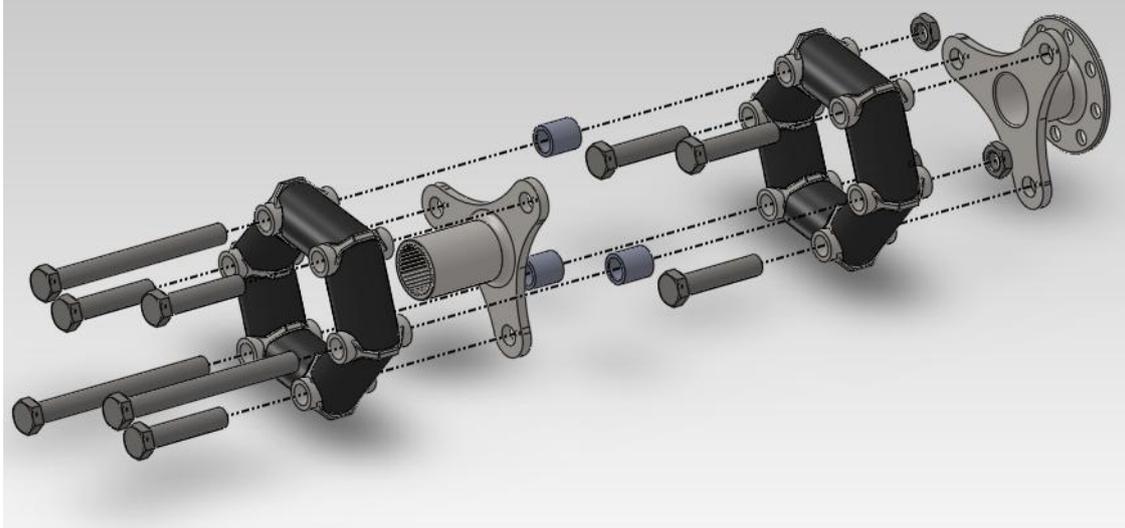


Fig. 4.7 – Esploso doppio giunto Giubo

Per un corretto assemblaggio si può procedere in questa maniera:

- si unisce attraverso tre viti M12 lunghe 55 mm la flangia lato motore al primo giunto a destra;
- contemporaneamente si fissa la flangia lato riduttore al secondo giunto a sinistra, sempre con tre viti M12 di 55 mm di lunghezza;
- infine si uniscono le due parti con i tre bulloni M12 avendo l'accortezza di interporre i tre spessori.

## 4.2 – RIDUTTORE

Il riduttore sviluppato è un normale rotismo ordinario ad uno stadio di riduzione.

Si definisce rotismo un meccanismo nel quale la trasmissione del moto avviene per mezzo di ruote dentate, esso può essere ordinario, se gli assi di rotazione delle ruote dentate sono fissi, o epicicloidale, se gli assi sono mobili. In particolare nel nostro caso abbiamo gli assi che, oltre ad essere fissi, sono anche paralleli.

Le specifiche di questo rotismo lo rendono idoneo come scelta, dove è importante tenere conto della velocità di rotazione, della grossa potenza trasmessa e dell'elevato rendimento.

Il termine riduttore identifica il rotismo come strumento di riduzione della velocità angolare dell'albero in uscita rispetto alla velocità angolare dell'albero in entrata.

### 4.2.1 – Progetto ruote dentate e disegno al CAD

Requisito fondamentale da cui si è partiti è il rapporto di trasmissione. Esso viene definito come il rapporto fra i giri al minuto del cedente e quelli del movente. Solitamente si identifica con la lettera greca  $\tau$ .

$$\tau = \frac{n_{cedente}}{n_{movenete}}$$

I giri al minuto dell'albero movente si possono ricavare dalla velocità di rotazione del motore Fiat sul quale andrà montato il riduttore, che è di 6000 giri/min. E' necessario il riduttore per portare l'elica a velocità nell'ordine dei 2400 giri/min, velocità di rotazione a cui mediamente un'elica deve girare. Di conseguenza il rapporto di trasmissione del riduttore è pari a 2.5.

Dato di progetto per verificare che i componenti non siano soggetti a rotture è la potenza trasmessa, la quale è sempre ricavabile dal motore utilizzato e cioè 150 CV che corrispondono a 110 kW.

Si sono scelte le ruote a denti elicoidali, in modo di diminuire lo sviluppo verticale del riduttore, il suo spessore, e di contenerne il più possibile il peso. Ma soprattutto perché questi tipi di ruote ingranano e si trasmettono le forze in maniera graduale, cosa che si traduce in una minore probabilità di rottura ed usura del dente.

Per la progettazione delle due ruote dentate si è utilizzato un Handbook per il software

SolidEdge denominato “Spur Gearing Component Wizard”, che ha permesso di effettuare il dimensionamento e la verifica a fatica secondo la ISO 6336: 1996, e di disegnare al CAD l’ingranaggio:

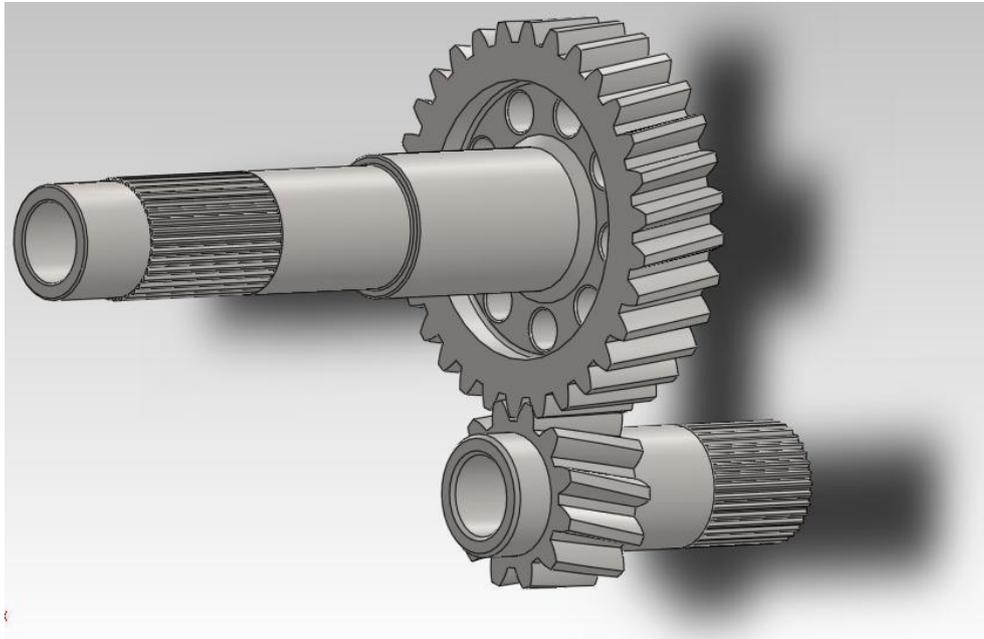


Fig. 4.8 – *Ingranaggio riduttore*

I risultati ottenuti sono:

Angolo di pressione:	$\alpha = 20^\circ$
Angolo d'elica:	$\beta = 10^\circ$
Interasse:	$i = 68.855 \text{ mm}$
Rendimento riduttore:	$\eta = 0.97$
Forza tangenziale:	$F_t = 9578.3736 \text{ N}$
Forza radiale:	$F_r = 4705.7904 \text{ N}$
Forza assiale:	$F_a = 1688.9257 \text{ N}$
Forza normale:	$F_n = 10821.816 \text{ N}$
Velocità tangenziale:	$v = 11.4842 \text{ m/s}$
Durata:	2000 ore

Per l’ingranaggio 1 (movente):

Numero denti:	$z_1 = 12$
Potenza trasmessa:	$P_1 = 110 \text{ kW}$
Momento torcente:	$M_{t1} = 175.0704 \text{ Nm}$

Per l’ingranaggio 2 (cedente):

Numero denti:	$z_2 = 30$
Potenza trasmessa:	$P_2 = 106.7 \text{ kW}$
Momento torcente:	$M_{t2} = 424.5458 \text{ Nm}$

Il materiale utilizzato è 14NiCr18 (nomenclatura DIN 1.5860). Esso possiede le seguenti proprietà:

Carico di rottura:	$R_p = 1130 \text{ MPa}$
Carico di snervamento:	$R_m = 785 \text{ MPa}$
Modulo elastico:	$E = 206000 \text{ MPa}$

I due alberi su cui sono poste le ruote dentate, come si può vedere dalla figura 4.8, sono dotati di profili scanalati per il montaggio rispettivamente dell'albero cedente con l'elica, e quello movente con il giunto.

#### **4.2.2 – Cuscinetti e tenute**

L'albero primario è sostenuto da due cuscinetti radiali a sfere prodotti dalla SKF, denominati 61906 – RS1, mentre per l'albero elica il montaggio sui carter viene eseguito attraverso due cuscinetti obliqui a sfere. Questa scelta è dettata dal fatto che, essendo presenti due ruote dentate a dentatura obliqua, si generano spinte assiali che un cuscinetto radiale non riuscirebbe a reggere. Tramite il catalogo SKF, si è deciso di utilizzare un cuscinetto denominato 7206 BE.

Sul carter lato motore, all'uscita dell'albero primario, è montato una tenuta denominata CR 30X47X6 HM S5 V. Mentre per la tenuta lato elica, all'uscita dell'albero secondario, si è scelto la CR 30X62X7 HMS5 V.

### 4.2.3 – Descrizione dei carter e disegno al CAD

I due carter, lato motore e lato elica, sono stati realizzati attraverso una lega di alluminio per renderli il più leggeri possibile. Più precisamente si è utilizzata AlSi9Mg, chiamata anche Silafont 30. Essa è una importante lega Al-Si per fonderia suscettibile di trattamento termico (T6), con ottime caratteristiche di colabilità, lavorabilità alla macchina utensile e saldabilità. Ha inoltre una eccezionale resistenza alla corrosione ed un'elevata resistenza meccanica dopo un invecchiamento artificiale. In particolare, dopo il trattamento termico T6, presenta:

–Snervamento	$315 N/mm^2$
–Resistenza a trazione	$360 N/mm^2$
–Resistenza a fatica per flessione	$110 N/mm^2$

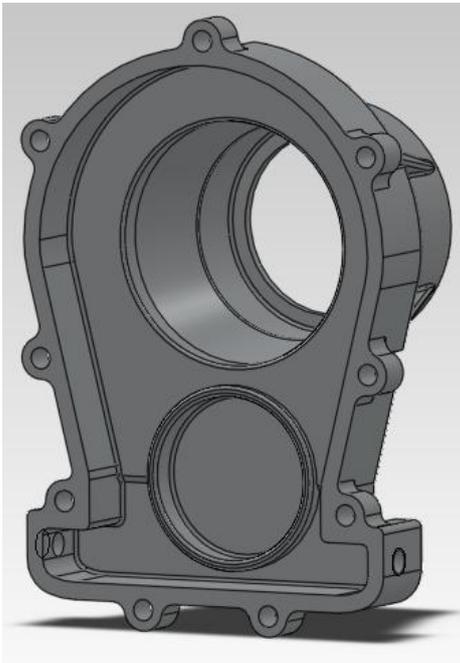


Fig 4.9 – Carter lato elica

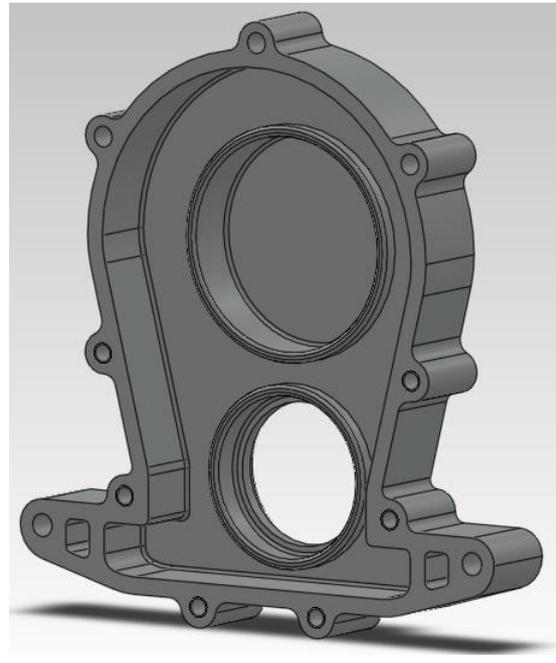


Fig. 4.10 – Carter lato motore

Nella figura 4.9 è possibile notare la realizzazione di una vaschetta per il contenimento dell'olio lubrificante. Sono inoltre presenti due fori, uno nella parte sinistra del carter per il rabbocco, svuotamento e controllo del livello dell'olio, e uno nella parte destra per l'alloggiamento del sensore di pressione dell'olio.

Mentre nella figura 4.10 si possono osservare due appendici presenti nella zona più bassa del carter lato motore. Quest'ultime servono per l'ancoraggio del riduttore al telaio, il quale è fissato sul basamento del motore Fiat 1.3 multijet.

#### 4.2.4 – Montaggio complessivo

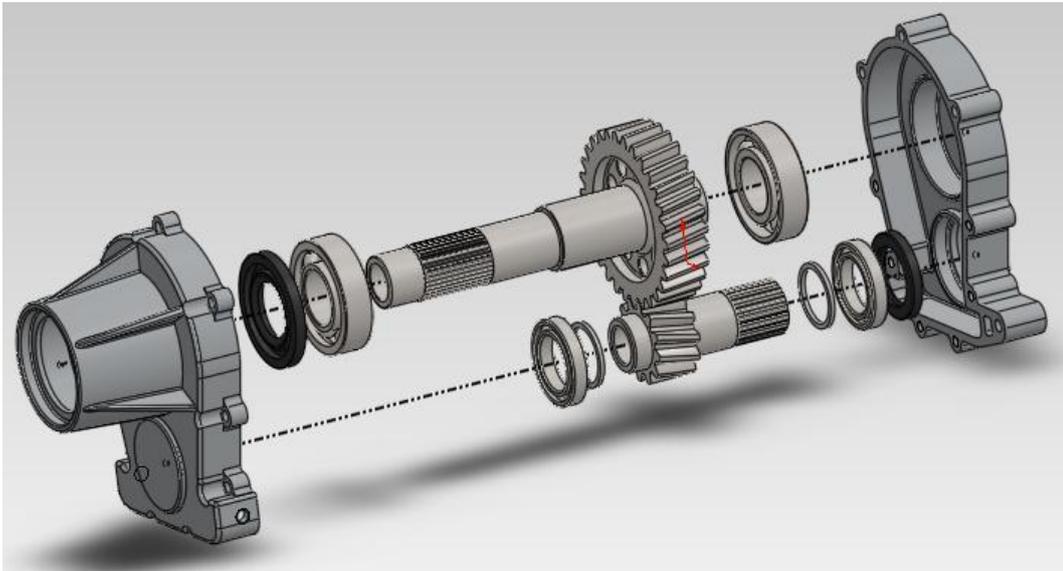


Fig. 4.11 – Esploso riduttore

Dalla figura 4.11 è possibile osservare le tenute, i cuscinetti, gli spessori e le ruote dentate che costituiscono il riduttore. Inoltre attraverso le linee tratteggiate ci si può fare un'idea di come andranno montati tutti i componenti all'interno di esso.

#### 4.3 - TELAIO TRA RIDUTTORE E BASAMENTO

Per fissare al motore il riduttore si è pensato di unire tramite un telaio tubolare i carter del riduttore al basamento del motore Fiat 1.3 multijet.

Il telaio in questione è stato realizzato con dei tubi di rispettivamente:

- diametro esterno 15 mm, interno 4 mm per la parte vicino al basamento;
- diametro esterno 12 mm, interno 5 mm per tutto il resto.



Fig. 4.12 – Telaio

Come materiale si è scelto una lega in titanio, la quale si presta molto bene a questo utilizzo per il suo alto rapporto resistenza/peso. Le leghe in titanio infatti, a seconda delle percentuali di elementi leganti, hanno una resistenza che raggiunge quella degli acciai da bonifica. Con l'aggiunta di Al, Mo, V e Sn si ottiene anche una resistenza alle alte temperature ed un limite di fatica notevoli. Il modulo di elasticità è circa metà dell'acciaio. La sua densità è molto bassa, il titanio è infatti il 40% più leggero dell'acciaio. A confronto con l'alluminio pesa il 60% in più ma ha una resistenza doppia.

In particolare si scelto la lega Ti-6Al-4V con queste proprietà:

–resistenza a trazione	$827.37 \text{ N/mm}^2$
–snervamento	$1050 \text{ N/mm}^2$
–densità di massa	$4428.78 \text{ kg/m}^3$

#### 4.3.1 – Rilievi sul motore

Per il disegno al software CAD si sono fatti dei rilievi direttamente su un basamento di un motore 1.3 multijet Fiat. In particolare sono stati verificati le misure dei fori del basamento, gli interassi tra di loro e con l'albero motore.

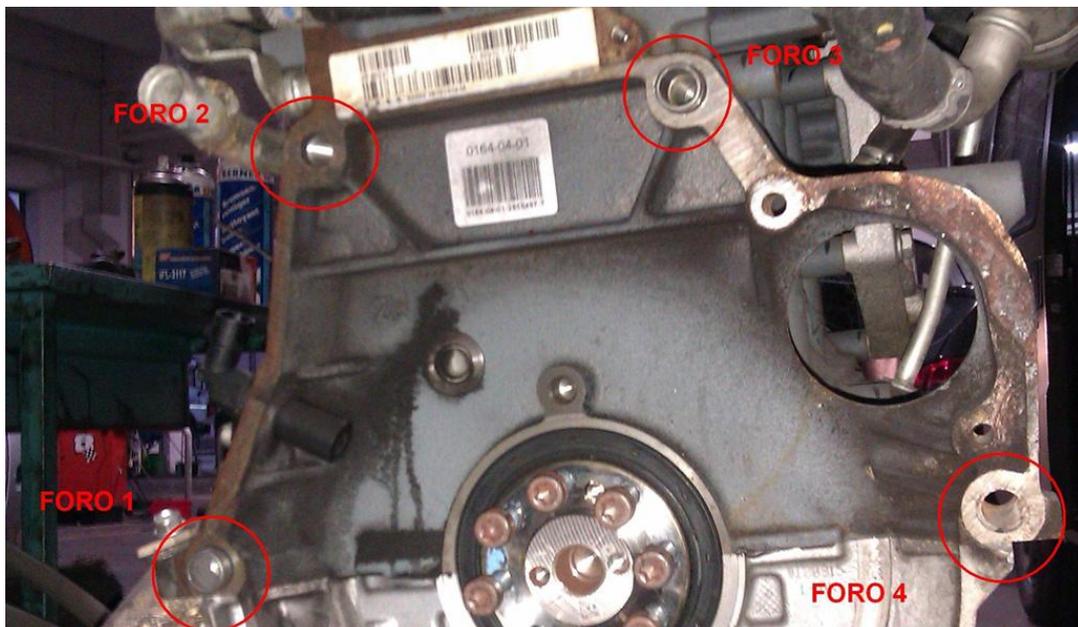


Fig. 4.13 – Motore 1.3 multijet lato cambio

In particolare:

–fori 1 e 3: entrambi hanno un preforo di 16 mm di diametro in cui è inserito un cilindro cavo di diametro interno 12.7 mm con la funzione di guida per inserire il cambio nel

basamento e sono filettati M12;

–foro 2: ha un preforo di 12.7 mm di diametro e una filettatura sempre M12;

–foro 4: è un foro passante di 12.4 mm di diametro.

Si sono inoltre prese le misure relative al motorino di avviamento, il quale viene montato nel grosso foro a destra della figura 4.13. In questo modo è stato possibile tenere conto del suo ingombro nella costruzione della parte tubolare del telaio vicino al basamento.

### 4.3.2 – Montaggio complessivo

Per il montaggio del riduttore sul telaio si sono utilizzate le tre viti superiori M6 che uniscono i due semicarter, più altre due viti aggiuntive, sempre M6, che fissano il carter lato motore con il telaio. I cinque fori sono filettati M6.

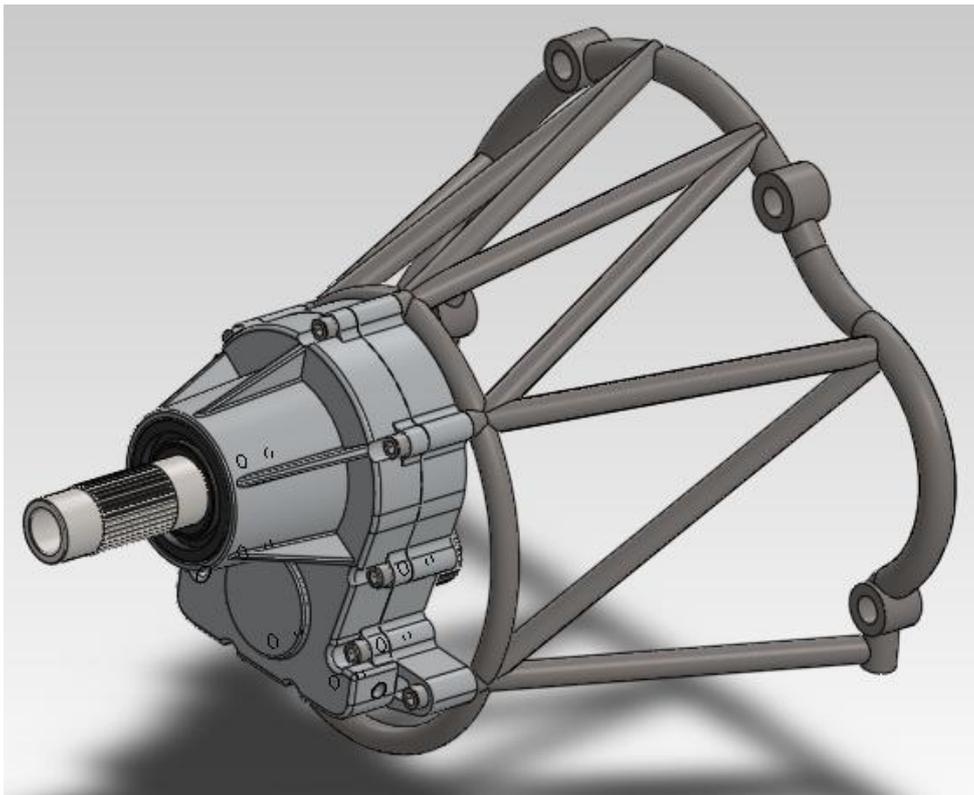


Fig. 4.14 – Assieme telaio e riduttore

Mentre per il montaggio del telaio al basamento si sono eseguiti quattro fori passanti della stessa dimensione di quelli presenti sul basamento, senza però la filettatura. Si è inoltre predisposto i fori, dove necessario, per il montaggio con i cilindri guida previsti sul motore in ambito automobilistico.

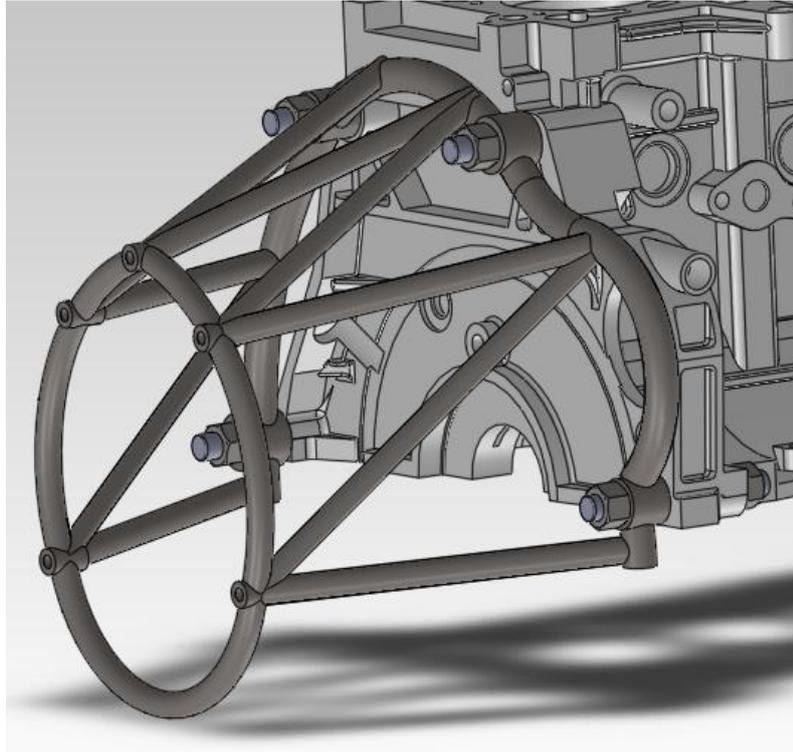


Fig. 4.15 – *Assieme telaio e basamento*

Per il montaggio si sono utilizzati dei prigionieri filettati M12.

#### **4.4 – VOLANO**

Un volano ha solitamente la forma di una ruota o disco, la sua funzione è di aumentare considerevolmente il momento d'inerzia sull'albero sul quale è montato.

Aumentando il momento d'inerzia il complesso albero-volano è più restio ad una variazione della velocità di rotazione, stabilizzando e regolandone la rotazione quando viene applicato un momento torcente periodico.

In un motore alternativo a pistoncini la rotazione dell'albero a gomiti non è uniforme poiché nei cilindri si susseguono fasi utili e fasi passive. Il volano motore è l'organo che rende uniforme la rotazione del motore, accumulando energia durante le fasi attive (espansioni) e restituendola durante le fasi passive.

Il volano è dimensionato per consentire al motore di girare al minimo senza arrestarsi e vincere il lavoro di attrito da questo sviluppato durante il funzionamento a vuoto.

Esso è fissato all'albero motore tramite una flangia con bulloni ed è realizzato in ghisa tramite fusione in terra. Verso il lato motore è fissata tramite quattro viti una ruota

fonica, la quale non è altro che una ruota dentata costruita in lamiera con sessanta denti di cui due mancanti, che ha la funzione di fornire al sensore induttivo il segnale del Pms e, quindi, dei giri al minuto del motore. Inoltre in periferia è inserita per interferenza una corona dentata in acciaio che ingrana con l'ingranaggio del motorino di avviamento.

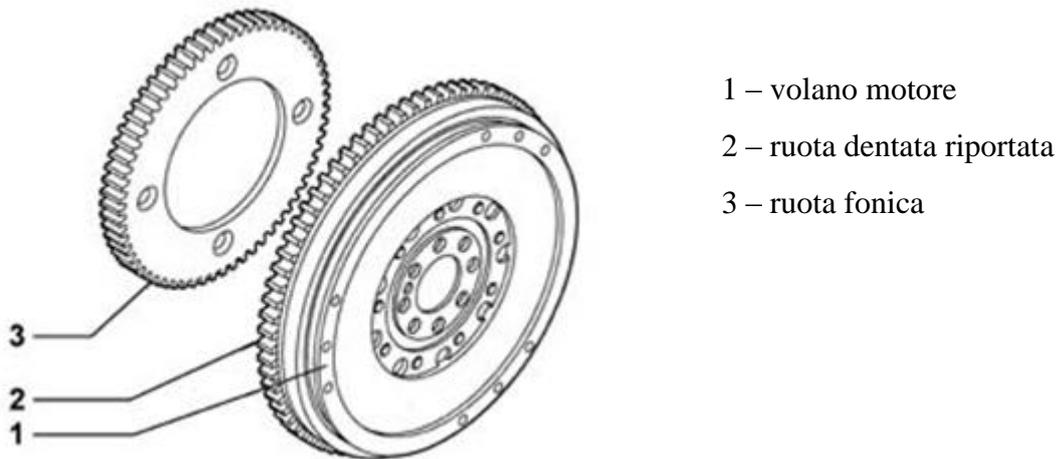


Fig. 4.16 – *Volano e componenti*

Sono stati eseguiti dei rilievi diretti sul volano in questione attraverso specifici calibri professionali adatti alla misurazione necessaria, come:

- calibri con un grosso fondoscala;
- calibri per esterni, con due becchi realizzati in modo di andare a battuta su due pareti poste esternamente;
- calibri per interni, con due becchi “a coltello” per due superfici interne;
- calibri per interassi, dotati di due coni al posto dei normali becchi;
- calibri per profondità, i quali utilizzano un'asta per andare a battuta sul fondo di una cavità mentre una superficie di riferimento poggia sul bordo di quest'ultima.

#### 4.4.1 – Disegno al CAD

Una volta effettuati tutti i rilievi necessari si è proceduto con il disegno tramite SolidWorks del volano originale, della ruota fonica e della corona dentata.

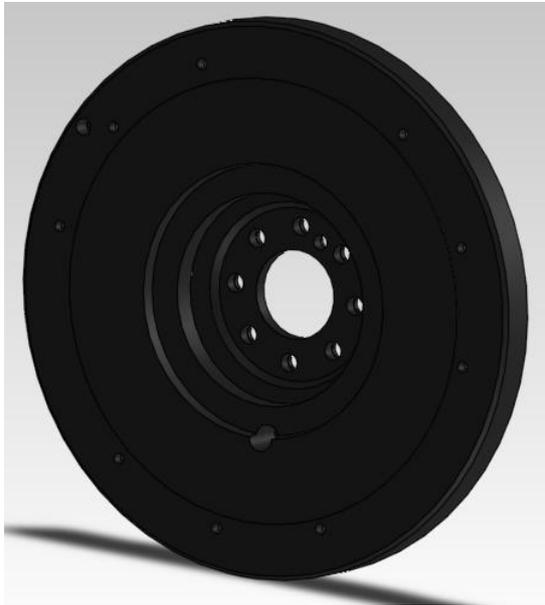


Fig. 4.17 – Volano originale lato riduttore



Fig. 4.18 – Volano originale lato motore



Fig. 4.20 – Volano originale con corona dentata e ruota fonica

Specificando in SolidWorks il materiale di cui è composto, è stato possibile determinarne il peso, che è di circa 8.9 kg senza corona dentata e ruota fonica, e del momento d'inerzia rispetto l'asse di rotazione, che è di circa  $78683.10 \text{ kg} \cdot \text{mm}^2$ .

#### 4.4.2 – Progetto volano alleggerito

Una volta realizzato al CAD il volano originale in ghisa, si è proceduto verso una progettazione di un volano più leggero, e quindi più adatto per l'utilizzo aeronautico.

Si è quindi pensato di eliminare il materiale in eccesso, in particolar modo è stata diminuita quella superficie lato riduttore, che in ambito automobilistico aveva la funzione di andare in contatto con il disco della frizione, e che quindi non è più necessaria. Questa operazione è stata fatta immaginando che venisse eseguita con una normale tornitura.

Inoltre si è pensato di togliere altro materiale in quei profili tra i quattro fori per fissare la ruota fonica, questa operazione può essere effettuata con una fresatrice.



Fig. 4.21 – Volano alleggerito lato riduttore



Fig. 4.22 – Volano alleggerito lato motore

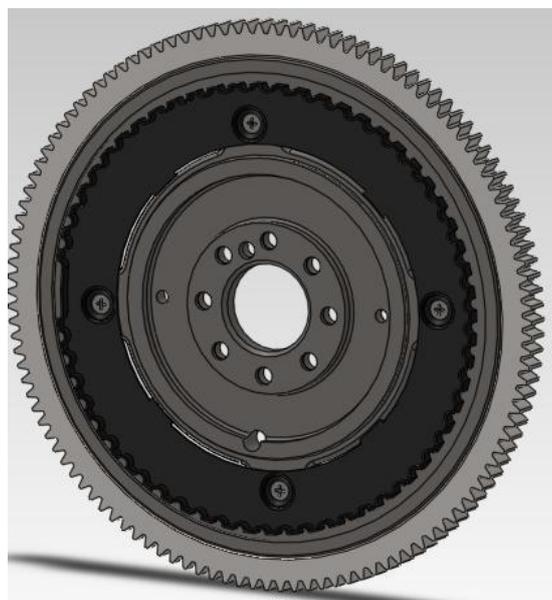


Fig. 4.23 – Volano alleggerito con corona dentata e ruota fonica

Come materiale si è scelto di non usare la ghisa, ma la lega Ti-6Al-4V, di cui si è parlato per il telaio tubolare tra riduttore e basamento.

Utilizzando la funzione di SolidWorks “Proprietà di massa” si è trovato infine che il peso del volano, senza corona dentata e ruota fonica, il quale risulta di 1.9 kg ed il momento d'inerzia rispetto all'asse di rotazione di  $15778.57 \text{ kg} \cdot \text{mm}^2$ .

Considerazione finale è che nonostante l'alleggerimento del volano il motore può contare comunque su della massa volanica grazie al doppio giunto Giubo. Comunque sarà opportuno, effettuare una regolazione del motore, in modo da accertarsi che esso non si spenga al minimo.

## Capitolo 5

### RAFFREDDAMENTO E LUBRIFICAZIONE

#### 5.1 – INTRODUZIONE

Manovellismo, iniezione e distribuzione costituiscono l'insieme necessario per il funzionamento del motore, che tuttavia non potrebbe funzionare se non fosse corredato di alcuni servizi: il circuito di lubrificazione e il circuito di raffreddamento.

Nel brevissimo tempo in cui avviene la combustione si sviluppano nella testata dei carichi termici enormi. Quantità molto elevate di calore vengono cedute (anche per irraggiamento alle elevatissime temperature a cui avviene la combustione) alle pareti della testata ed alla sommità del pistone. Il fenomeno prosegue, pur con progressiva attenuazione, durante la fase di espansione dei gas.

Una riduzione notevole dei tormenti termici si ha nelle altre tre fasi del ciclo (in caso di motore a quattro tempi quale è il 1300 jtd), soprattutto in quella di aspirazione, che porta aria fresca dentro al cilindro. Aria che è comunque molto calda, ma a una temperatura non paragonabile a quelle che si sviluppano in fase di combustione. In ogni caso, la cessione di calore dal fluido in combustione al motore è talmente elevata da non essere sufficiente l'aria fredda in aspirazione per attenuare il surriscaldamento. Per evitare il blocco del motore si appronta un impianto di raffreddamento che in modo sistematico e continuo sottrae calore dai componenti.

Usualmente si valuta che circa un terzo del calore introdotto nella macchina si trasformi in lavoro meccanico, un altro terzo vada perso in calore dei gas di scarico e l'ultimo terzo venga sottratto dal sistema di raffreddamento.

Ne consegue che la potenza termica da smaltire col raffreddamento è pari a quella meccanica erogata dal motore. Per quanto riguarda i sistemi di raffreddamento, essi sono detti *ad acqua* o *ad aria*, anche se in entrambi i casi, alla fine, il calore viene sempre scaricato all'aria ambiente; l'acqua funge solo da circuito intermedio.

Tra i due sistemi, il circuito ad acqua (che è quello in uso sul motore FIAT) è sicuramente più costoso perché richiede la complicazione di cilindri del motore e di testate dotati di intercapedini, dette *camicie*, che debbono essere attraversate da un moto continuo di acqua che sottrae calore e lo va a cedere all'aria esterna in un apposito scambiatore, il radiatore, fuori dal corpo motore.

In generale gli elementi di cui è composto un circuito di raffreddamento ad acqua sono:

- il radiatore: lo scambiatore attraverso cui l'acqua cede il calore all'aria;
- la pompa dell'acqua: una pompa meccanica o elettrica che assicura il moto continuo del fluido nelle canalizzazioni;
- le tubazioni: i tubi che servono a portare il liquido refrigerante (acqua) dal radiatore al motore e viceversa.

Questi elementi sono quelli minimi necessari al funzionamento dell'impianto di raffreddamento; altri dispositivi che vengono usati sono le ventole (di solito elettriche), necessarie a mandare aria forzata sul radiatore quando il veicolo è fermo. Sulla versione automobilistica del FIAT 1300 jtd è prevista la presenza di una ventola che non verrà usata nella versione aeronautica in quanto l'aereo in quota avrà sempre a disposizione il moto naturale dell'aria mentre quando è fermo a terra può essere raffreddato tramite ventole esterne che vengono rimosse prima del decollo. In questo modo si intende recuperare del peso.

In generale la differenza di temperatura con cui l'acqua entra ed esce dal motore non supera i 10°C, in modo che si possa assicurare una buona uniformità delle temperature nel motore, con omogeneità delle dilatazioni delle varie parti. Questo è un grosso vantaggio che il sistema di raffreddamento ad aria non può garantire. Un altro enorme vantaggio del sistema ad acqua è che non è necessario esporre il motore alla corsa dell'aria, ma basta che lo sia il radiatore che con opportune canalizzazioni riporta il liquido refrigerante al motore. Ciò consente una quasi totale libertà nella disposizione degli organi del motore all'interno del veicolo (sia esso aereo o terrestre) e, di conseguenza, nel disegno della carenatura.

Quindi rimane un interrogativo: quanto calore bisogna asportare dal motore nel suo funzionamento? La risposta non è semplice, ma in generale bisogna limitare l'asportazione di calore al minimo consentito (per non abbattere il rendimento del motore) dal sistema di lubrificazione. Bisogna cioè che la temperatura dell'olio, che assicura il buon funzionamento dei molti accoppiamenti rotoidali e prismatici presenti nel motore, non superi i valori al di là dei quali perde le sue caratteristiche lubrificanti.

In definitiva è l'impianto di lubrificazione che determina il dimensionamento dell'impianto di raffreddamento. Nel trasferire il motore da un'autovettura a un aeroplano non si sono avuti problemi con il circuito dell'olio che in pratica è stato riportato esattamente uguale, mentre non è stato trattato il caso della disposizione del radiatore e delle tubazioni del circuito dell'acqua, in quanto mentre nell'alloggiamento

automobilistico l'albero motore è perpendicolare alla marcia, nell'installazione aerea l'albero motore è parallelo alla marcia. Questo fatto comporterebbe la necessità di immettere tubazioni più lunghe in quanto il motore è predisposto per avere ingresso e uscita acqua sullo stesso lato.

## 5.2 – IL CIRCUITO DI LUBRIFICAZIONE

Di seguito è riportata l'immagine dell'impianto di lubrificazione del motore FIAT 1.3 jtd:

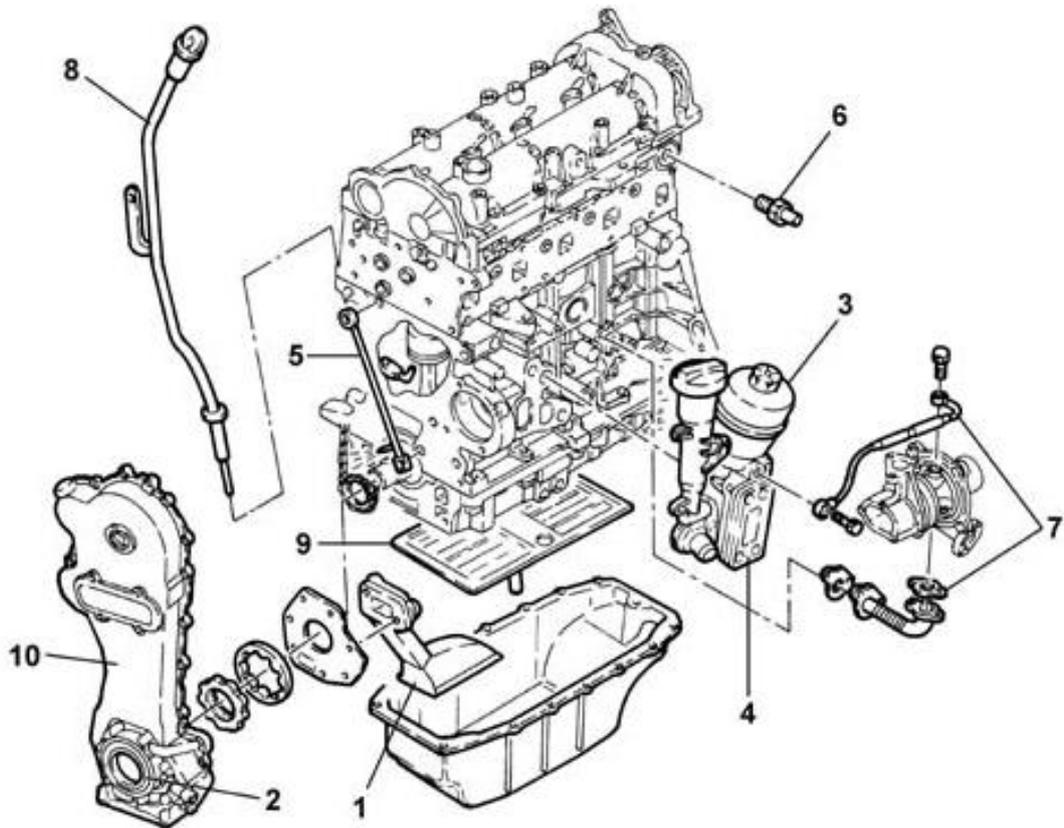


Fig. 5.1 – Componenti impianto di lubrificazione Fiat 1.3 jtd

In figura sono visibili:

1. Pescante con reticella filtrante: serve a pescare l'olio dalla coppa posta sotto il motore dentro cui fluisce colando dal motore per gravità;
2. Pompa olio;
3. Cartuccia filtro olio;
4. Scambiatore di calore acqua/olio per il raffreddamento dell'olio motore: per raffreddare l'olio lubrificante mediante l'acqua in ingresso nel motore;

5. Spruzzatore per la lubrificazione della catena di distribuzione: che spruzza l'olio sulla catena di distribuzione;
6. Interruttore per spia pressione olio motore;
7. Tubazioni lubrificazione turbocompressore;
8. Astina controllo livello olio motore;
9. Paratia;
10. Coperchio catena distribuzione.

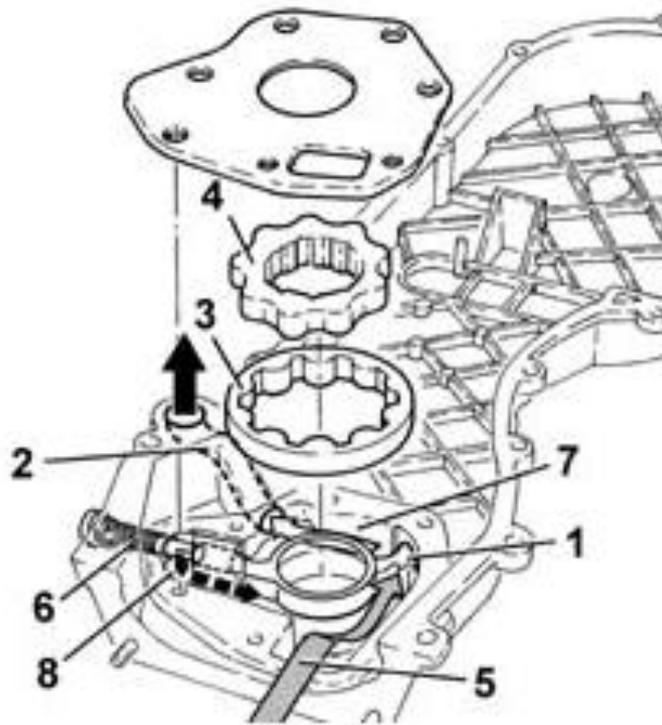


Fig. 5.2 – Pompa olio

In figura 5.2 è rappresentato l'esplosivo della pompa olio motore. Il funzionamento è semplice, l'olio viene aspirato dalla coppa mediante la depressione creata dalla rotazione degli ingranaggi calettati sull'albero motore. La depressione è presente a partire dalla paratia di separazione (1) degli ingranaggi sino alla pescante della coppa olio. La pressione si sviluppa invece a partire dalla paratia di separazione (1) in tutti i condotti di mandata olio motore (2). Quando la pressione supera il valore di 5 bar, la spinta che agisce sulla valvola limitatrice (6) vince la reazione della molla sottostante e sposta la valvola sino ad aprire il condotto (8) fra la camera di alta pressione (7) e la camera di bassa pressione (5). Sono inoltre visibili l'ingranaggio condotto (3) e

l'ingranaggio conduttore (4) calettato sull'albero motore, che effettivamente compongono la pompa dell'olio.

Il funzionamento del circuito dell'olio è di conseguenza il seguente:

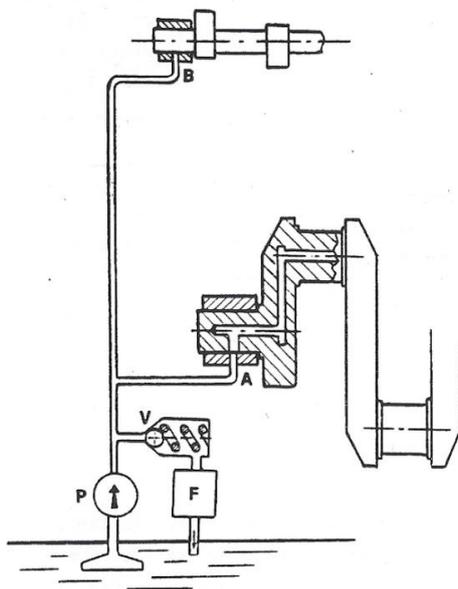


Fig. 5.3 – Schema circuito lubrificazione del motore

La figura 5.3 mostra lo schema semplificato di un circuito di lubrificazione. Nella parte più bassa del motore, al di sotto del basamento, si raccoglie l'olio che viene prelevato tramite una pompa volumetrica P ad ingranaggi mossa dall'albero motore, dalla cui mandata si diramano i diversi condotti che portano ai punti di utenza; per esempio in A viene alimentata la bronzina del banco dell'albero a gomiti, in B l'albero a camme in testa.

Dai vari accoppiamenti rotoidali, l'olio fuoriesce e viene proiettato, nel movimento degli organi, tutto intorno in modo da creare una nebbia che va a lubrificare ogni parte. Come ad esempio le camicie entro le quali scorrono i pistoni e, sulla testata, le camme, i bilancieri e in generale i vari elementi dotati del movimento che assicurano la distribuzione.

Per evitare una eccessiva pressione all'interno del circuito dell'olio, dovuto al fatto che la portata della pompa volumetrica varia al variare dei giri del motore, si pone in parallelo alla mandata della pompa una valvola di sfioro V, che si apre quando la pressione supera un certo valore prestabilito.

Una parte dell'olio in mandata però non va a lubrificare gli organi ma va allo scambiatore acqua-olio indicato con 3 in figura 5.5, dove viene filtrato da un apposito

filtro (2) e raffreddato. Il ritorno dell'olio al basamento avviene per gravità e viene raccolto nella coppa dell'olio dove è pronto per essere immesso di nuovo nel circuito. In figura 5.5 è riportato anche il tappo del rabbocco olio (1).

Per una maggiore chiarezza si illustra il percorso che l'olio lubrificante effettua all'interno del motore.

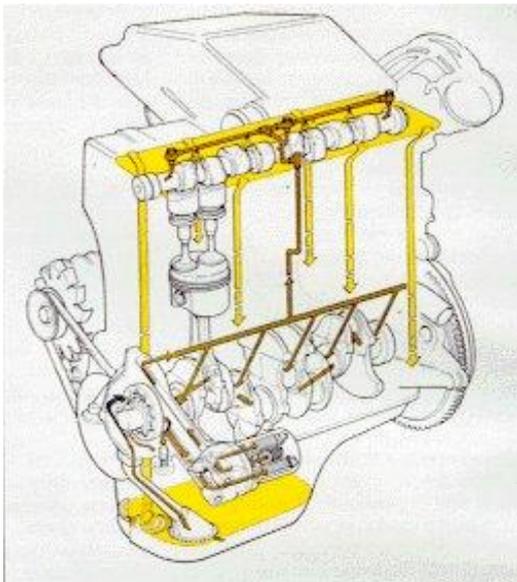


Fig. 5.4 – Percorso dell'olio

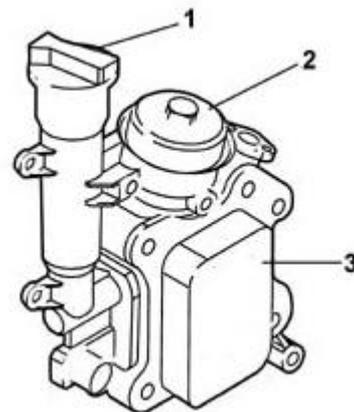


Fig. 5.5 – Scambiatore di calore e filtro

### 5.3 – LA COPPA DELL'OLIO

La coppa olio del basamento è una parte strutturale del motore con funzioni meccaniche, essa ha il compito di ospitare l'olio di lubrificazione del motore. Nella versione automobilistica è costituita in lamiera stampata, ha una massa di 1.350 kg e comprende il foro filettato con un tappo per lo scarico dell'olio motore.

La pompa è un componente di fondamentale importanza permette la circolazione dell'olio preleva l'olio dalla coppa dell'olio e quest'ultima è dotata di un filtro a maglia metallica posto a monte, filtro che preserva l'eventuale aspirazione di corpi estranei presenti nell'olio al suo interno che potrebbero causare il danneggiamento della pompa. Inoltre la coppa dell'olio, che funge da serbatoio, permette all'olio di raffreddarsi, infatti in alcune coppe dell'olio sono presenti delle alettature che permettono appunto la dissipazione del calore accumulato.

Per quanto riguarda i mezzi più costosi e sportivi il carter umido non viene utilizzato, perché (soprattutto nelle auto) l'olio tende a spostarsi da una parte all'altra a seconda delle curve che si affrontano, rischiando così il grippaggio.



Fig. 5.6 – Coppa dell'olio originaria del FIAT 1.3 jtd

Sono stati fatti i rilievi sui fori per le viti di fissaggio al motore, in particolare il diametro M6 con una coppia di serraggio di  $8\div 10$  Nm e gli interassi. Il tappo di scarico dell'olio motore presenta invece, nella configurazione originale automobilistica, una filettatura M14 ed una coppia di serraggio di  $18\div 22$  Nm. Per motivi di installazione sul velivolo leggero sono stati inseriti due fori M12; in seconda sede si sono valutate le dimensioni della coppa per poi pensare a una realizzazione adatta allo scopo prefissato.

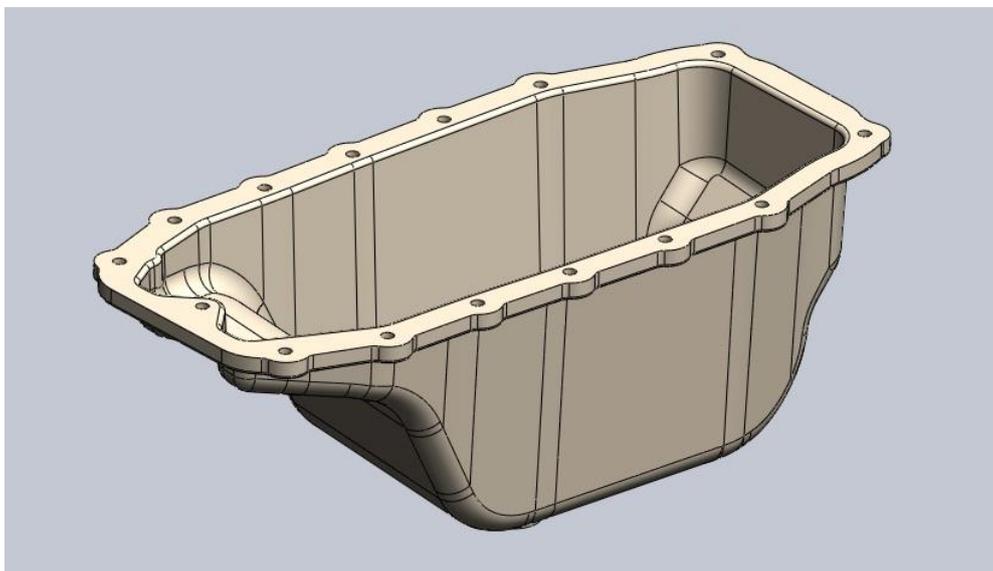


Fig. 5.7 – Coppa dell'olio disegnata al CAD

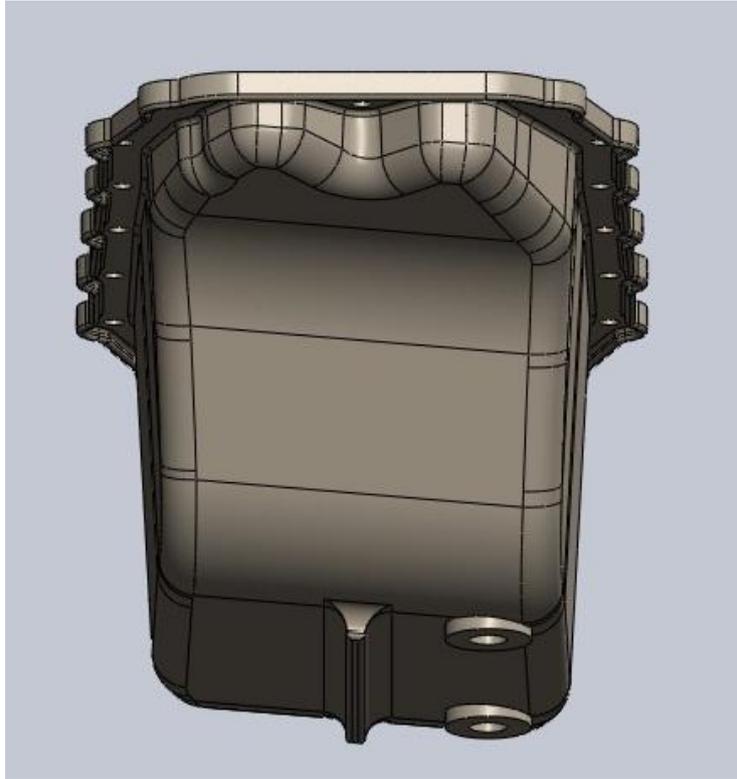


Fig. 5.8 – Vista lato tappi di scarico e nervatura

Nel caso di utilizzo per motori, gli oli lubrificanti svolgono le seguenti funzioni:

- lubrificare gli organi meccanici in attrito volvente (ad esempio bronzine e alberi a camme) e in attrito radente (ad esempio tra pistone e cilindro);
- contribuire al raffreddamento del motore;
- assicurare una buona tenuta;
- proteggere le superfici metalliche dalla corrosione;
- contribuire a mantenere puliti i componenti con i quali entra in contatto;
- creare meno residui possibili, nel caso questo non venga raccolto dagli anelli raschiaolio (motore a quattro tempi) o faccia parte della combustione (motore a due tempi).

Capacità olio	3 litri
Tipo olio	Selenia WR - SAE 5W-40
	ACEA B4 - API CF
Periodicità di manutenzione	Olio e filtro ogni 30.000 Km

Fig. 5.9 – Tabella caratteristiche olio motore FIAT 1.3 multijet

La tenuta con il basamento è ottenuta da un cordone di sigillante siliconico.

Tra basamento e coppa olio motore viene interposta una paratia che, oltre ad evitare gli scuotimenti dell'olio motore dovuti ai movimenti del veicolo, ha la funzione di ridurre la schiuma che si forma una volta che l'olio scende verso la coppa.



Fig. 5.10 – Paratia smontata



Fig. 5.11 – Paratia disegnata al CAD

### 5.3.1 – Introduzione all'analisi agli elementi finiti

L'analisi agli elementi finiti (FEA) è una tecnica di simulazione a computer, molto utilizzata nelle analisi ingegneristiche, che permette la visualizzazione dettagliata delle strutture sottoposte ad una certa sollecitazione e fornisce la distribuzione di tensioni e spostamenti. Questa tecnica di simulazione utilizza il metodo degli elementi finiti (FEM), il cui obiettivo è essenzialmente la risoluzione in forma discreta e approssimata di generali sistemi di equazioni alle derivate parziali (PDE).

Questo tipo di analisi presenta vantaggi e svantaggi.

I *vantaggi* di un'analisi agli elementi finiti consistono nella possibilità di trattare problemi di campo:

- definiti su geometrie complesse, e ciò rappresenta il cuore e la potenza dei metodi FEM;

- relativi ad una larga varietà di problemi ingegneristici (di meccanica dei solidi, dei fluidi, del calore, di elettrostatica, ecc.);
- con complesse condizioni di vincolo;
- con complesse condizioni di carico.

Gli *svantaggi* dell'analisi consistono:

- nell'impossibilità di generare una soluzione in forma chiusa e parametrizzabile del problema;
- nelle approssimazioni della soluzione inerenti all'approccio ad elementi finiti utilizzato (errori di discretizzazione del dominio di forma non regolare mediante l'assemblaggio di elementi finiti di forma molto regolare, ad esempio triangolare; errori di interpolazione della soluzione all'interno dei singoli elementi finiti mediante semplici funzioni polinomiali; uso di procedure numeriche approssimate per il calcolo di quantità integrali sul dominio degli elementi);
- negli errori connessi alle procedure di calcolo utilizzate (errori di calcolo inerenti al numero limitato di cifre significative con cui lavora un computer ed ai conseguenti troncamenti decimali delle quantità numeriche utilizzate; difficoltà numerica di operare per il computer con numeri estremamente grandi ed estremamente piccoli; errori di modellazione cui l'utente è soggetto).

Sono disponibili una grande varietà di software di analisi agli elementi finiti. Comune a tutti i pacchetti software è la suddivisione del processo di analisi in 3 tempi:

- il *pre-processing* dove è costruito il modello ad elementi finiti;
- il *processing* di analisi vero e proprio con la risoluzione del problema agli elementi finiti;
- il *post-processing* dove viene elaborata e rappresentata la soluzione.

In particolare il pre-processing si articola:

1. Nella scelta del tipo di analisi da effettuare (analisi statica/dinamica/termica, lineare o non lineare/dipendente o meno dal tempo, ecc.).
2. Nella scelta del tipo di elementi finiti (per problemi piani o tridimensionali, ad andamento polinomiale lineare/quadratico/ecc, di tipo asta/trave/lastra/piastra/guscio, ecc).
3. Nella definizione dei parametri che caratterizzano il comportamento costitutivo dei materiali.
4. Nella definizione del reticolo di nodi del problema discreto.

5. Nella costruzione della discretizzazione ad elementi finiti assegnando per ognuno i nodi a cui essi fanno riferimento.
6. Applicando le condizioni di vincolo e di carico.

Il post-processing elabora e rappresenta la soluzione sia nelle quantità fondamentali, rappresentate direttamente in forma discreta nel metodo FEM (per esempio gli spostamenti) sia nelle quantità da esse derivate, importanti nella fisica del problema analizzato (per esempio le tensioni).

Nei software comunemente utilizzati, entrambi il pre-processing ed il post-processing fanno sempre uso di una interfaccia grafica che ne rende agevole l'interazione con l'utente.

La verifica a cui è stata sottoposta la coppa dell'olio è una verifica statica agli elementi finiti, col metodo delle tensioni equivalenti di Von Mises.

Gli studi statici offrono gli strumenti per l'analisi della sollecitazione lineare di parti e assieme soggetti a carichi statici. Le tipiche domande cui questo tipo di analisi può dare risposta sono: *La parte si potrà rompere se sottoposta a carichi di esercizio normali? Il modello è stato sovra progettato? E' possibile modificare il progetto per aumentarne il fattore di sicurezza?*

Il programma utilizzato per fare ciò è SolidWorks Simulation 2013.

### **5.3.2 – Ipotesi di vincolo e di carico**

Allo scopo di rispettare il più fedelmente possibile le reali condizioni di vincolo della coppa dell'olio, si sono introdotti:

- vincolo fisso sulla superficie a contatto con il basamento inferiore;
- carico di pressione di 1 bar su tutta la superficie interna della coppa;
- accelerazione di gravità pari a  $6g \cong 58.86 \text{ m/s}^2$ ;
- temperatura di 100 °C distribuita su tutta la superficie interna della coppa.

### **5.3.3 – Definizione della reticolatura**

Con un reticolo di elementi molto fine in tutta la struttura, con dimensione dell'elemento pari a 6.3045 mm e una tolleranza di 0.3152 mm, si è giunti al modello seguente. Gli elementi totali analizzati sono 29943, i nodi totali sono 59066, mentre il tempo totale di soluzione è pari a 54 s.

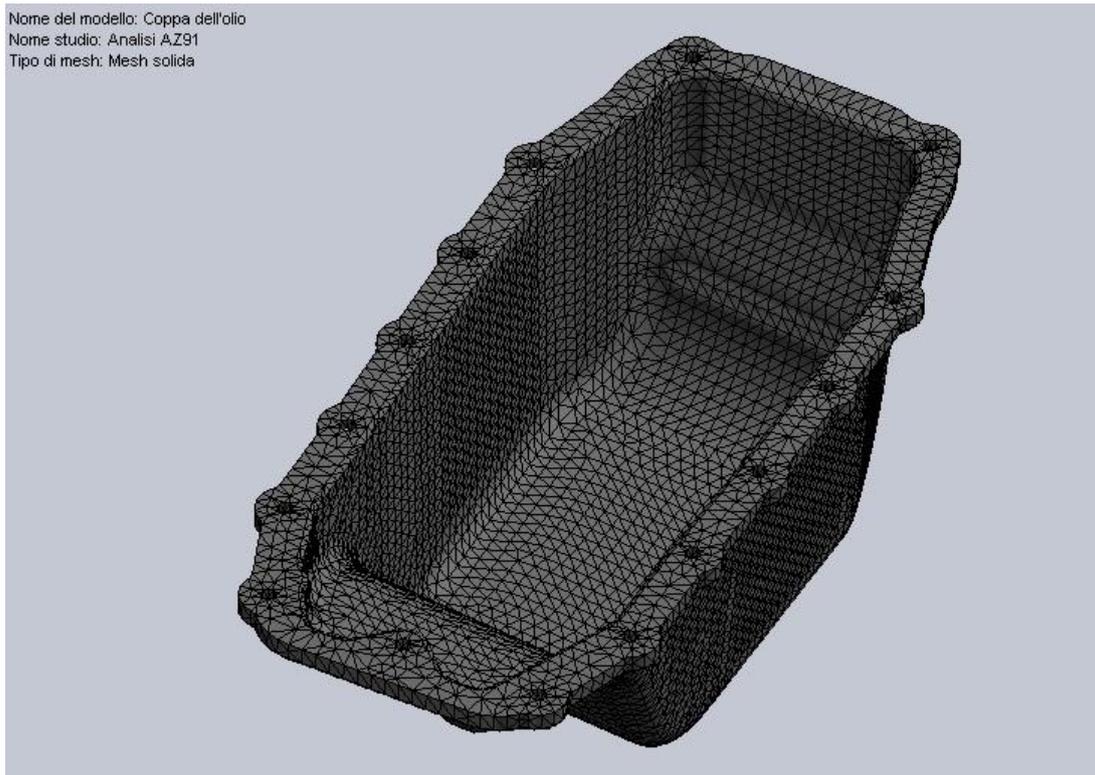


Fig. 5.11 – *Discretizzazione della coppa dell'olio*

### 5.3.4 – Verifica statica della coppa dell'olio

La massa della coppa che andrà montata sul velivolo leggero risulta sensibilmente diminuita e pari a 0.801 kg. Rispetto alla configurazione originale è stato aumentato lo spessore di qualche millimetro fino ad ottenerne uno pari a 2.5 mm; inoltre poiché nella versione aeronautica le sollecitazioni sono maggiori, è stata inserita una nervatura per rinforzare ulteriormente la struttura.

Simulando la presenza del carico applicato, si è ottenuto, per la verifica statica con sollecitazione equivalente di Von Mises, una tensione massima di 125.7 MPa (fig. 5.12) concentrata sul fianco della coppa. La lega AZ91 raggiunge lo snervamento a trazione ad una tensione di 165 MPa.

La tensione minima si ha invece, in corrispondenza del bordo superiore che andrà accoppiato con il basamento inferiore.

Di seguito è riportato l'andamento delle sollecitazioni con i rispettivi punti di massimo e minimo.

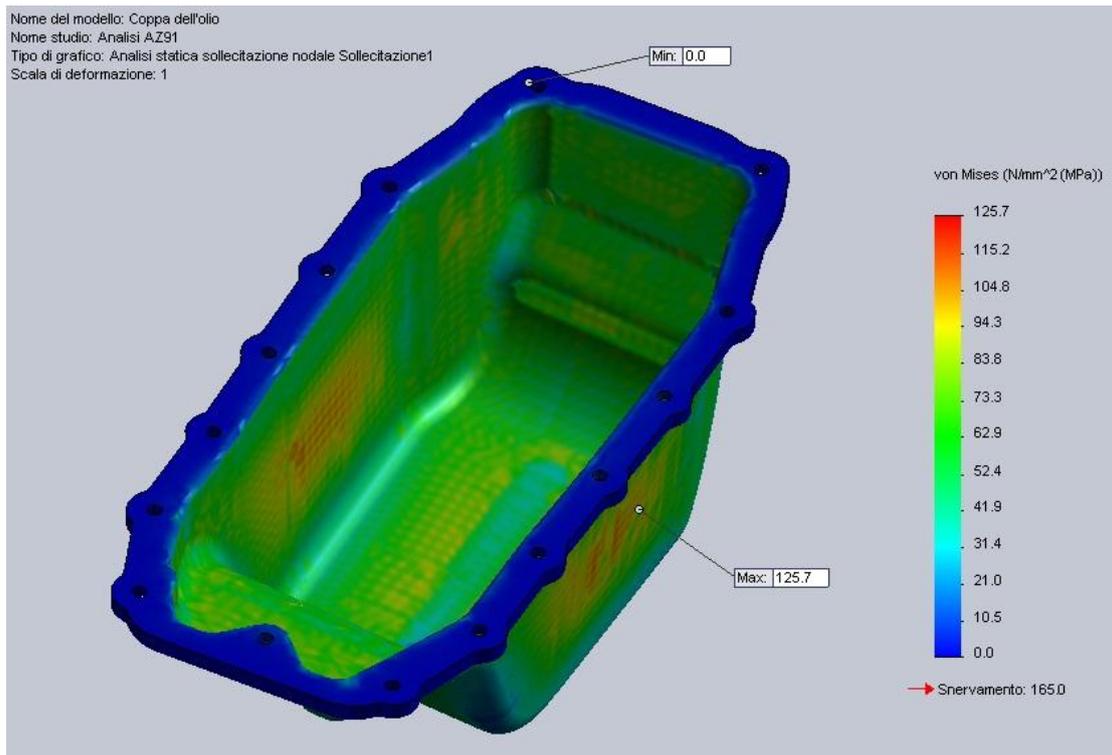


Fig. 5.12 – Sollecitazione

Come si può notare dall'immagine seguente, la deformazione equivalente massima risulta molto bassa pari a 0.001572 mm (fig.5.13).

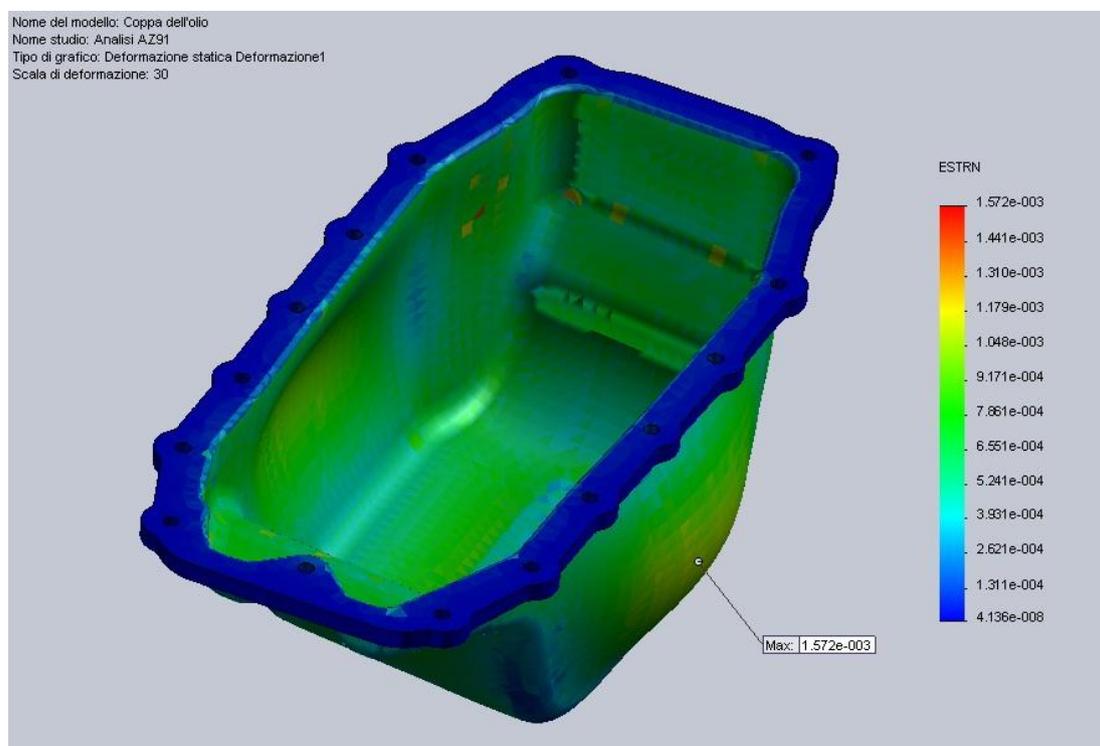


Fig. 5.13 – Deformazione equivalente

La coppa dell'olio così modellata verrà realizzata in magnesio stampato a caldo, un metodo che permette una permanenza della rigidità del materiale dopo il processo stesso, scongiurando l'insorgere di tensioni che potrebbero sorgere durante la formatura. Caratteristiche a favore dello stampaggio a caldo sono quindi elevata resistenza meccanica dovuta alla disposizione delle fibre e alla compattazione del materiale, eliminazione dei difetti interni dovuta alla grande compressione. Tutti gli elementi di sicurezza sugli autoveicoli e sugli aerei sono stampati a caldo per ridurre al minimo la possibilità di rotture durante il funzionamento della macchina.

Questa lavorazione può essere effettuata con due tipologie di macchine diverse:

- magli e presse meccaniche: che agiscono in maniera molto più violenta sul materiale attraverso un'azione dinamica di uno o più colpi;
- presse idrauliche: che agiscono in maniera più progressiva sul materiale facendo fluire il materiale ad una velocità più moderata e continua.

Il ciclo di produzione comprende tutte quelle operazioni che iniziano con la preparazione e il taglio dello spezzone di materiale e terminano con la finitura del pezzo stampato e il controllo finale.

#### **5.4 – SECONDA VERSIONE DELLA COPPA DELL'OLIO**

Un' ulteriore soluzione studiata è la realizzazione della coppa dell'olio utilizzando come materiale la lega 5005 – H34 (incrudita al 50%), appartenente alla serie 5000 delle leghe di alluminio, il cui nome commerciale è Peraluman. In particolare è una lega di alluminio in cui l'elemento principale di lega è il magnesio.

Le principali proprietà sono riassunte nella tabella sottostante:

<b>Proprietà</b>	<i>Valore</i>	<i>Unità di misura</i>
Carico di rottura	160	MPa
Carico di snervamento	135	MPa
Modulo elastico	68.2	GPa
Durezza Brinell	45	HB
Densità	2.69	g/cm <sup>3</sup>

In questo caso il processo di realizzazione consiste nell'imbutitura: una tecnica di lavorazione in cui si deforma plasticamente una lamiera in modo da farle assumere una forma cilindrica o a coppa, adatta ad inscatolare. Attraverso il processo di deformazione, anche a freddo, di lamiere in alluminio, acciaio e altri metalli, si possono realizzare oggetti aventi profonde cavità come lattine metalliche, pentole e alte tipologie di contenitori.

Per il proseguimento della sperimentazione si è dovuto allestire uno stampo adatto a lamiere di spessore 2 mm, con caratteristiche geometriche e di finitura tali da consentire una buona distribuzione delle deformazioni.

In linea generale, gli stampi per le leghe di alluminio devono presentare una finitura superficiale migliore di quella normalmente utilizzata per le lamiere di acciaio, per contrastare la tendenza della lega leggera a dar luogo a fenomeni di grippaggio, che può produrre anche rotture premature nella lamiera.

E' consigliabile inoltre avere un gioco tra punzone e matrice di  $1,08 \div 1,10$  s (con s = spessore lamiera); raggio d'imbocco matrice di  $5 \div 10$  s e raggi di nervatura di irrigidimento di  $2 \div 3$  s.

La lubrificazione nell'imbutitura è molto importante per mantenere basse le forze e ridurre attrito e difetti. Si utilizzano oli, saponi ed emulsioni, mentre per casi difficili, cere e rivestimenti solidi.

Si riduce al minimo la lubrificazione del punzone poiché l'attrito con la lamiera è importante. Come materiale per gli stampi si utilizzano acciai per utensili e ghise da colata, mentre per quanto riguarda i macchinari sono adatte le presse idrauliche e presse meccaniche a doppia azione per l'imbutitura, con velocità di movimento costanti.

Il pezzo da stampare deve essere ottimizzato nella forma per ridurre gli scarti da taglio; infine bisogna prestare attenzione a progettare il pezzo in modo da minimizzare le possibili corrugazioni e instabilità per compressione durante le operazioni di piegatura.

Le condizioni di vincolo e di carico descritte in precedenza sono le medesime, come non è cambiato il reticolo di elementi molto fine in tutta la struttura; cerchiamo però di capire come reagisce la lega 5005 – H34.

### 5.4.1 – Verifica statica della coppa dell’olio

La massa della coppa, come ci aspettavamo, risulta leggermente aumentata e pari a 1.190 kg.

Simulando la presenza del carico applicato, si è ottenuto, per la verifica statica con sollecitazione equivalente di Von Mises, una tensione massima di 55.9 MPa (fig. 5.14) concentrata sulla parte alta del fianco della coppa. La lega 5005 – H34 raggiunge lo snervamento a trazione ad una tensione di 135 MPa.

La tensione minima si ha invece, in corrispondenza del bordo superiore che andrà accoppiato con il basamento inferiore.

Di seguito è riportato l’andamento delle sollecitazioni con i rispettivi punti di massimo e minimo.

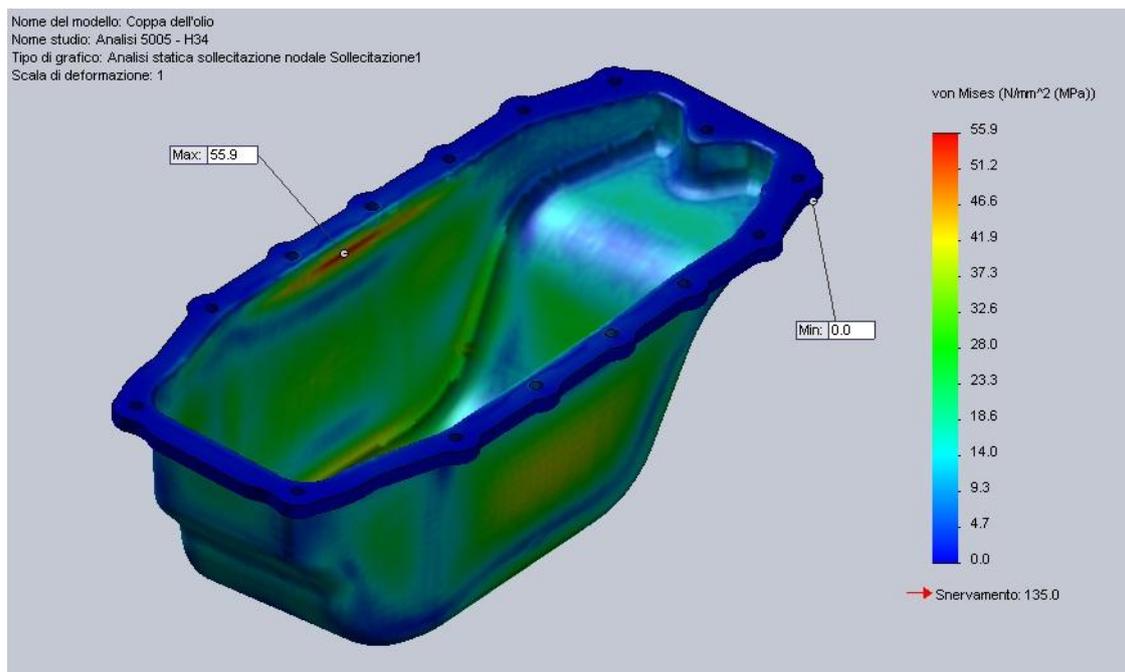


Fig. 5.14 – Sollecitazione

Come si può notare dall’immagine seguente, la deformazione equivalente massima risulta molto bassa pari a 0.004265 mm (fig.5.15).

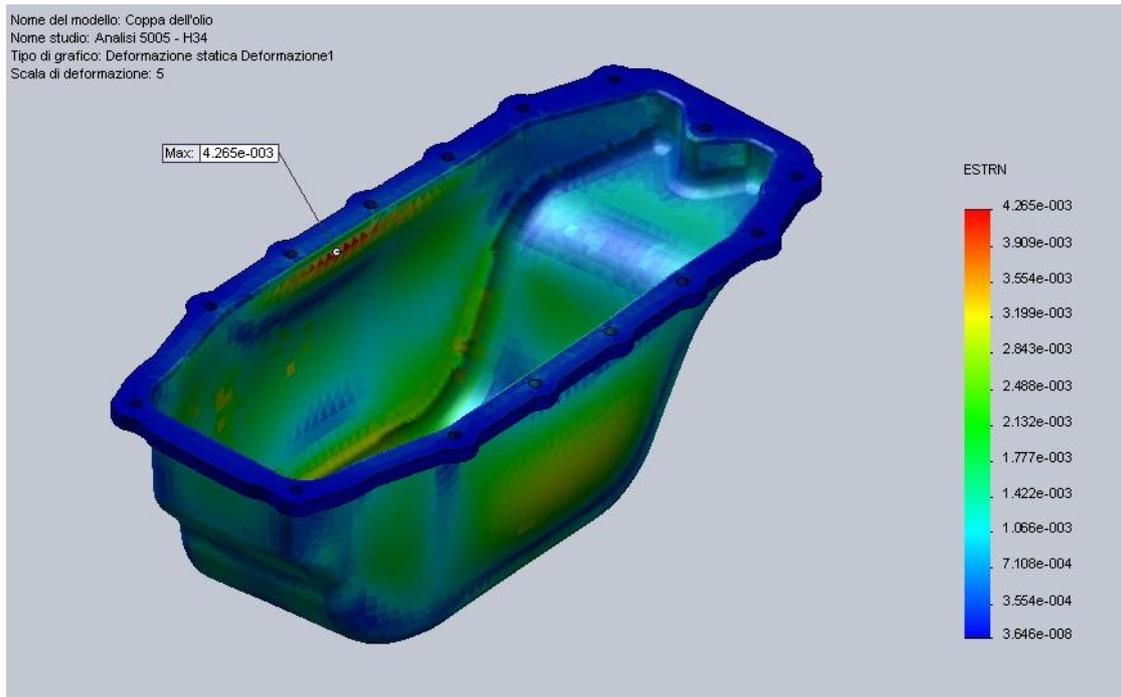


Fig. 5.15 – *Deformazione equivalente*

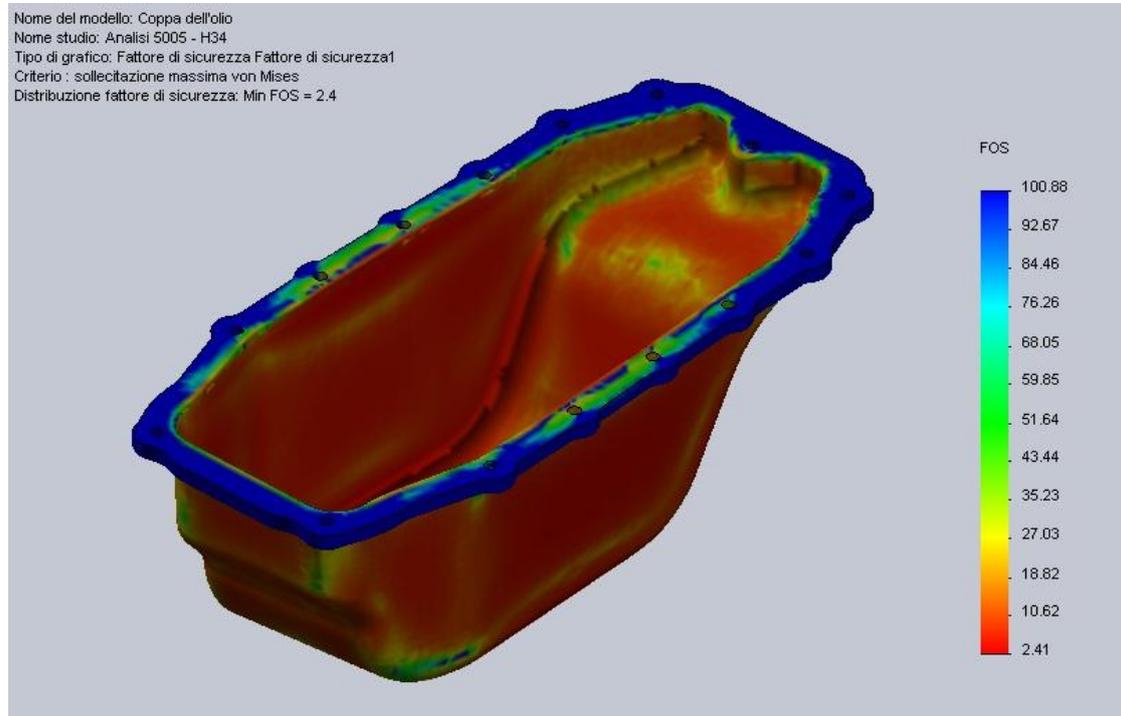


Fig. 5.16 – *Coefficiente di sicurezza*

## 5.5 – MONTAGGIO COMPLESSIVO

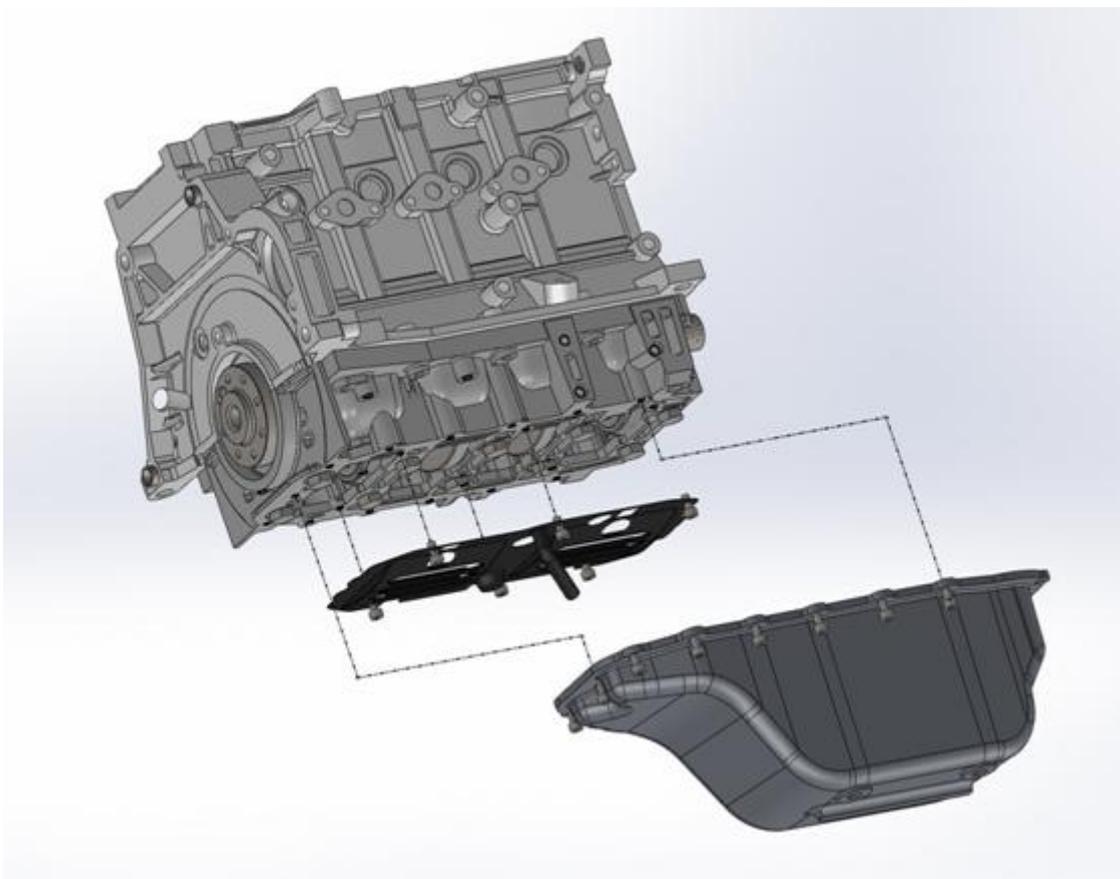


Fig. 5.17 – *Esploso coppa, paratia, basamento*

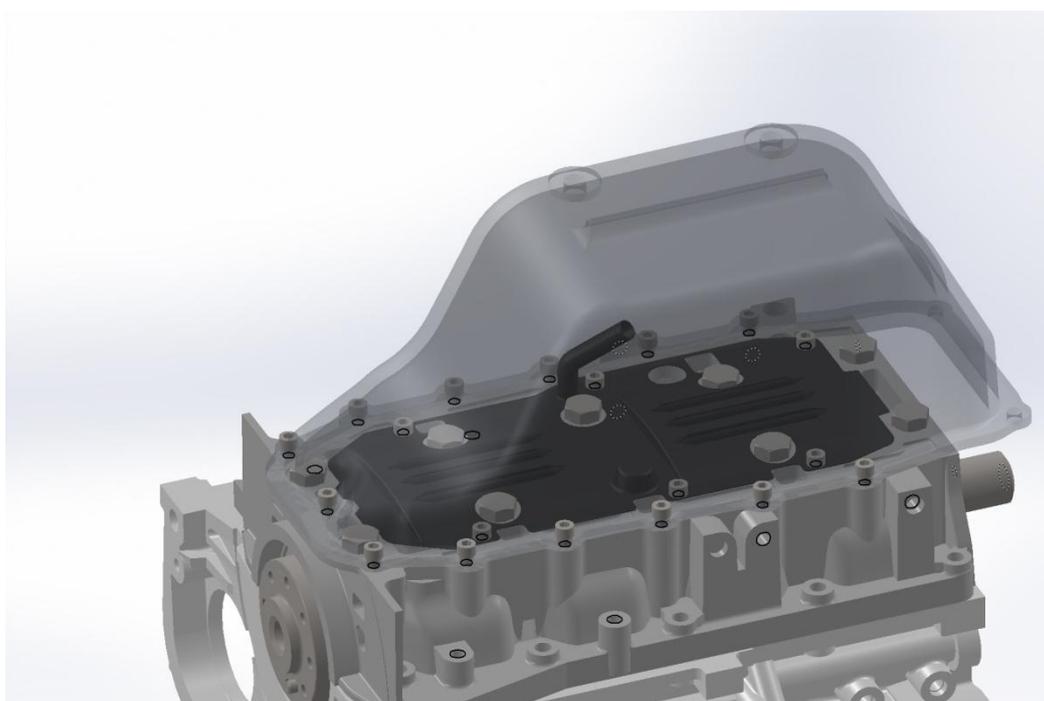


Fig. 5.18 – *Coppa dell'olio trasparente*

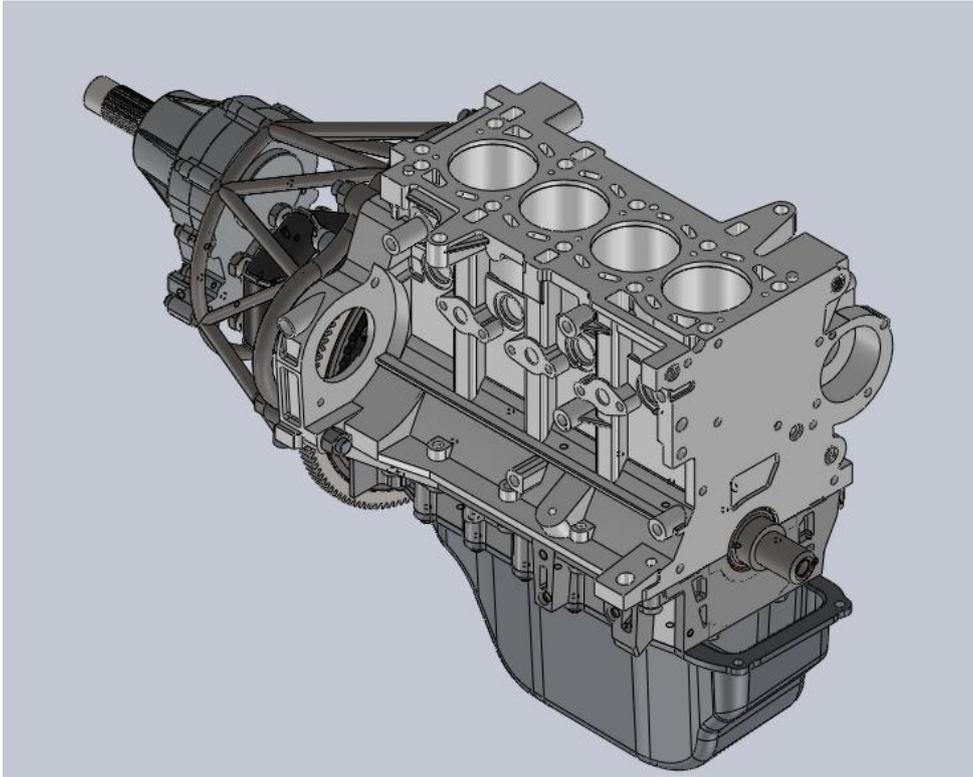


Fig. 5.19 – *Complessivo\_vista 1*

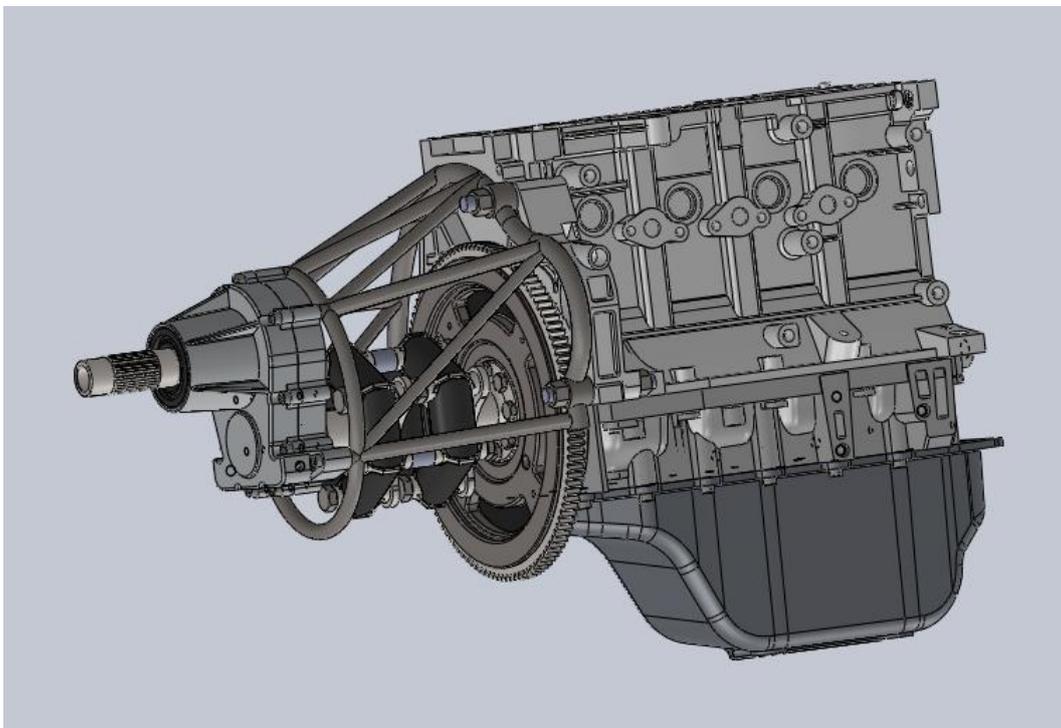


Fig. 5.20 – *Complessivo\_vista 2*

# Capitolo 6

## LA SOVRATESTA

### 6.1 – LA TESTATA

La testa cilindri è di tipo monolitico in lega di alluminio e silicio, sono presenti due alberi a camme in testa, in ghisa sferoidale, alloggiati in una sovratesta; il comando è a catena di ingranaggi.

Le quattro valvole per cilindro, parallele e verticali, sono posizionate nelle relative guidavalvola e comandate da bilancieri azionati dagli eccentrici degli assi a camme. Tali bilancieri sono mantenuti a contatto delle valvole tramite punterie idrauliche.

I guidavalvola sono piantati nelle relative sedi della testa cilindri con interferenza; il perfezionamento del diametro interno viene realizzato, dopo il montaggio, con alesatore specifico.

Rispetto alle teste cilindri con precamera, l'intero processo di combustione ha luogo nella camera di scoppio ricavata sul pistone. In questo caso il sistema di alimentazione deve operare a pressioni molto più alte del sistema di iniezione indiretta (gli iniettori hanno tre o più fori, di diametro più piccolo) e sono stati eliminati alcuni di quei componenti che rendevano il motore Diesel particolarmente rumoroso.

La guarnizione tra testa cilindri e basamento è metallica e non sono previsti riserraggi della testa per tutta la vita del motore.

I due alberi a camme possono essere comandati da una catena che trasmette il moto dell'albero motore, da una cinghia dentata in gomma, oppure da una cascata d'ingranaggi, tecnica generalmente riservata alle competizioni. La prima soluzione, più antiquata e adottata nel caso in questione del 1.3 multijet, è quella che causa maggiore rumorosità ma è più resistente al tempo ed all'usura; la cinghia dentata in gomma è maggiormente silenziosa ma non garantisce la durata, in quanto, invecchiando, la gomma si indurisce, rischiando di causare rotture improvvise della cinghia stessa con gravi conseguenze per il motore.

Di seguito è riportata un'immagine della sovratesta e della testata del motore 1.3 multijet:

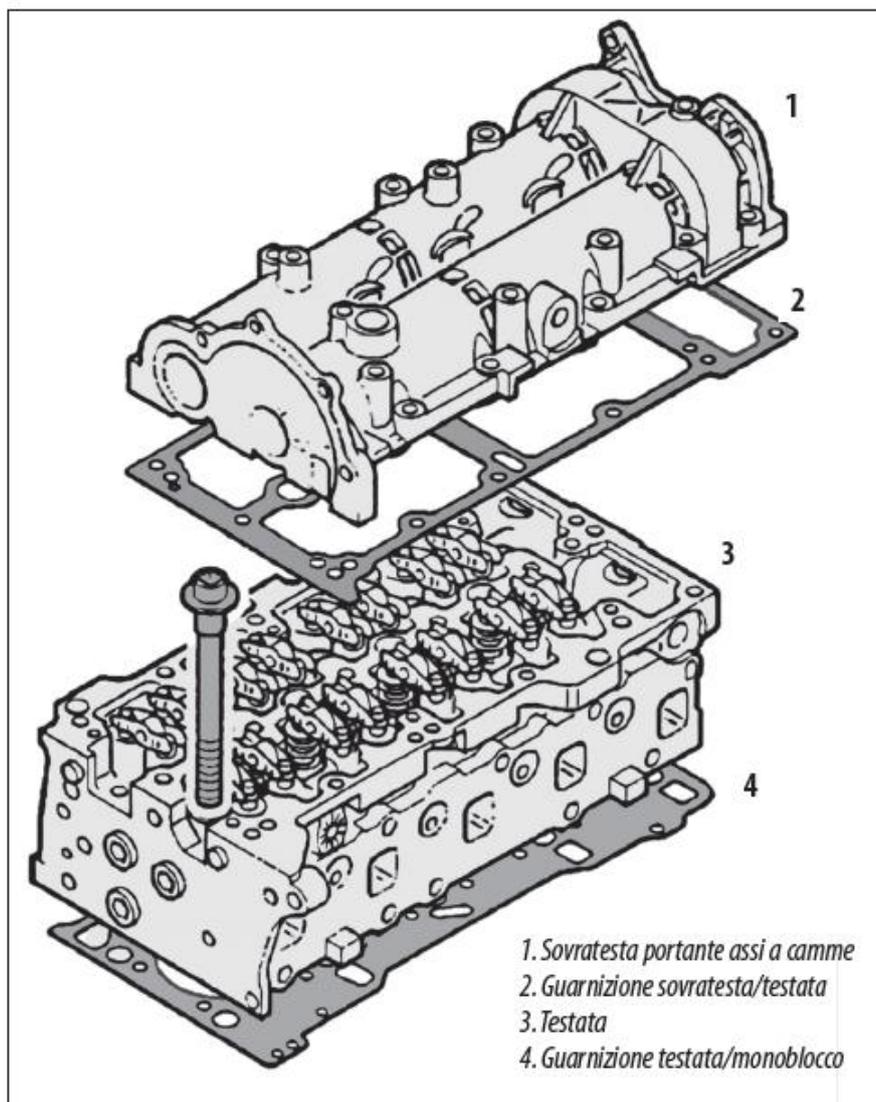


Fig. 6.1 – Sovratesta e testata

Per la guarnizione testata/monoblocco sono previsti tre spessori da scegliere sulla base della media della sporgenza massima dei pistoni.

Sporgenza pistoni	Spessore guarnizione testata	Contrassegno
0,028 - 0,127 mm	0,67 - 0,77 mm	senza foro
0,128 - 0,227 mm	0,77 - 0,87 mm	un foro
0,228 - 0,327 mm	0,87 - 0,97 mm	due fori

Le valvole sono comandate da una leva di trascinalimento a rulli con compensazione idraulica del gioco.

Diametro piattello valvola	21,47 mm
Diametro stelo	5,90 ÷ 5,94 mm
Le quote corrispondono sia per la valvola di aspirazione sia per la valvola di scarico	

I guidavalvola sono riportati sulla testa con interferenza.

Diametro esterno	11,010 ÷ 11,030 mm
Diametro interno	6,020 ÷ 6,038 mm
Maggiorazioni diametro esterno	0,05 / 0,10 / 0,25 mm

Molle valvole identiche per aspirazione e scarico:

Lunghezza sotto carico (36 ÷ 39 Kg)	23,5 mm
Lunghezza sotto carico (16 ÷ 18 Kg)	31,0 mm
Lunghezza libera	37,9 mm

## 6.2 – IL CINEMATISMO DI DISTRIBUZIONE

La caratteristica rilevante di questo motore è rappresentata dalla distribuzione valvole con azionamento a catena, leva oscillante e punteria idraulica.

La catena di distribuzione comanda l'albero a camme agente sulle valvole di scarico mediante l'ingranaggio di comando della distribuzione.

Un gruppo di ingranaggi all'estremità dell'albero a camme agente sulle valvole di scarico trasmette il movimento rotatorio all'albero a camme agente sulle valvole di aspirazione.

Per ogni valvola viene utilizzata una punteria idraulica azionata da un bilanciere a sua volta mosso dall'asse a camme.

Gli angoli di fasatura dell'albero a camme sono i seguenti:

Regolazione gioco valvole	non previsto (punterie idrauliche)	
Gioco di controllo messa in fase	aspirazione scarico	0,50 mm 0,50 mm
Angoli di fasatura aspirazione	Apertura prima del PMS Chiusura dopo il PMI	-12° 6°
Angoli di fasatura scarico	Apertura prima del PMI Chiusura dopo il PMS	40° -12°

Gli alberi a camme sono realizzati in ghisa, con tempra a induzione sulle camme. L'albero a camme di scarico è comandato direttamente dalla catena e trasmette il moto all'albero distribuzione lato aspirazione tramite una coppia di ingranaggi a denti dritti. L'albero distribuzione lato scarico comanda anche la pompa di alta pressione, mentre quella lato aspirazione comanda il depressore dei freni.

Alzata nominale camme aspirazione	6,4 mm
Alzata nominale camme scarico	7,5 mm

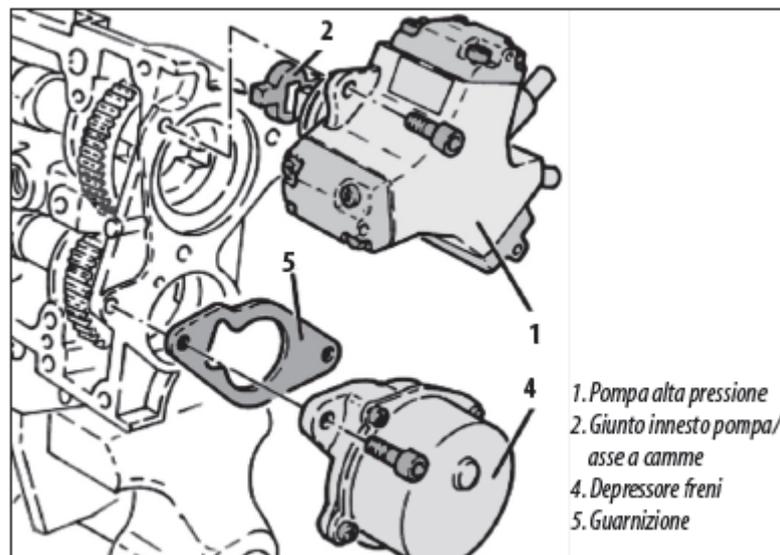


Fig. 6.2 – Pompa alta pressione e depressore freni

Di seguito sono riportati un esploso di sovratesta, alberi a camme, testata e uno schema raffigurante una valvola, punteria e bilanciere:

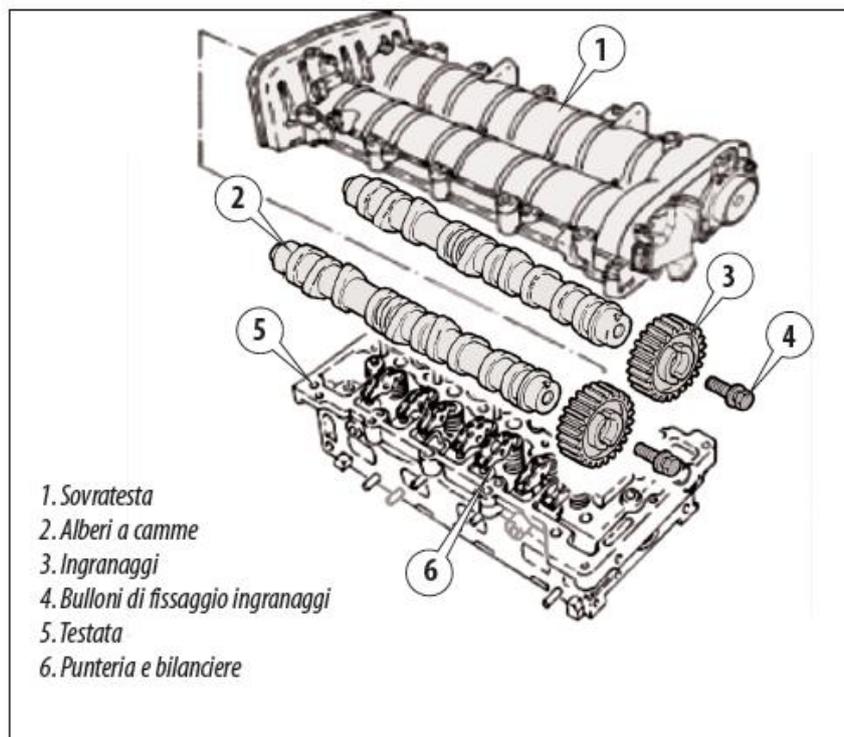


Fig. 6.3 – Esploso sovratesta, alberi a camme e testata

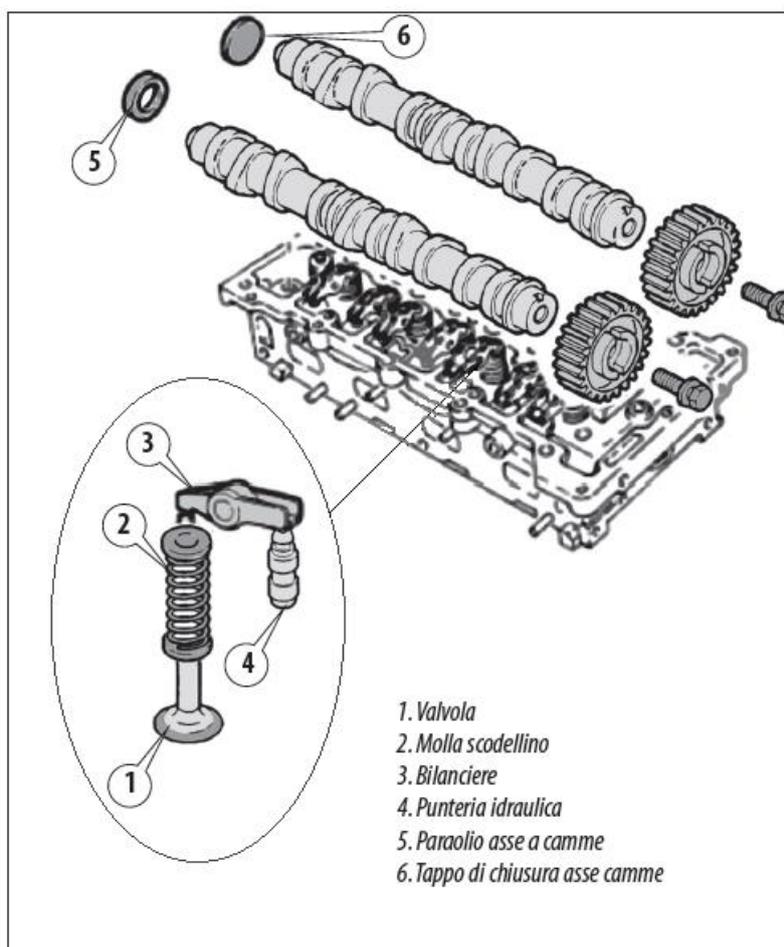


Fig. 6.4 – Dettaglio valvola

La messa in fase dell'albero a camme si esegue rimuovendo i tappi "a" e montando gli attrezzi di messa in fase degli alberi di distribuzione "b" sulla testa cilindri superiore. Si montano gli attrezzi posizionandoli con le fresature presenti sugli stessi in senso orizzontale e verificando il loro corretto inserimento nelle relative sedi sugli alberi di distribuzione. Al termine si procede a rimuovere l'attrezzo di messa in fase albero distribuzione lato aspirazione e serrare il relativo tappo.

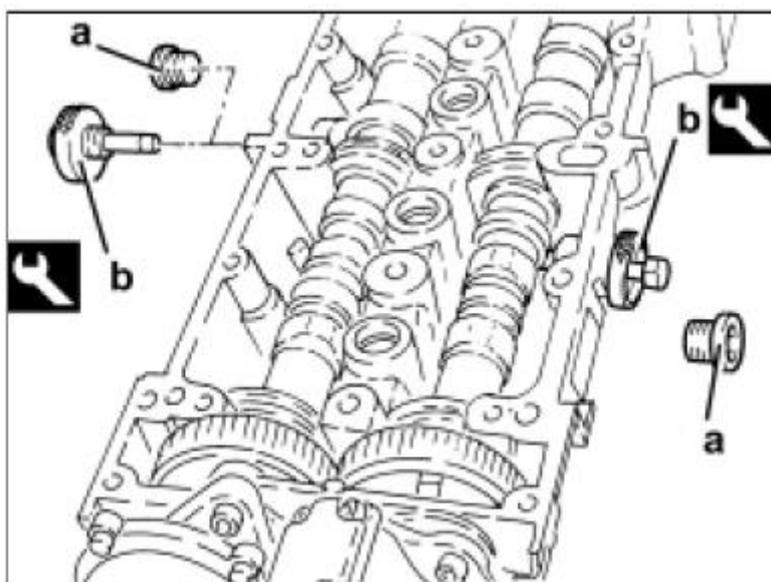


Fig. 6.5 – Messa in fase alberi a camme

Analogamente a quanto fatto per la coppa dell'olio, si è disegnata la sovratesta e svolta una simulazione delle sollecitazioni al CAD.

Tramite una macchina laser scanner che sfrutta un metodo ottico, si è provveduto ad effettuare una scansione 3D della sovratesta al fine di rilevare la geometria della fusione, fori, interassi e piani lavorati.

Il laser scanner 3D è uno strumento elettronico che ci fornisce le coordinate spaziali di una nuvola di punti appartenenti all'oggetto del rilievo. Nato per scopi industriali ed applicato in seguito in topografia, è l'ultima novità apparsa nel settore del rilievo architettonico.

Una volta effettuata la scansione, si è provveduto alla ricostruzione del componente partendo prima dalle misure di ingombro, per poi focalizzare il dettaglio dei vari fori presenti.

Di seguito sono riportate le immagini della sovratesta originaria in lega di Al – Si, della scansione e della sovratesta finale realizzata con l'utilizzo di SolidWorks 2013:

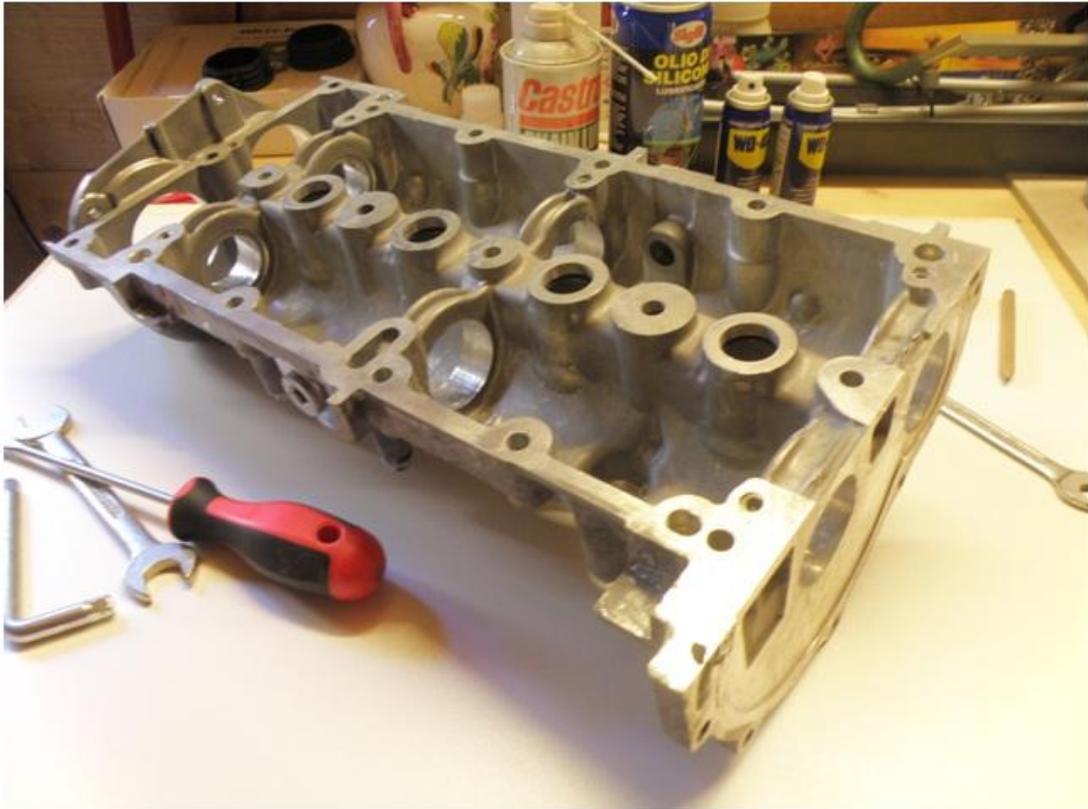


Fig. 6.6 – Sovratesta originaria in lega di alluminio e silicio

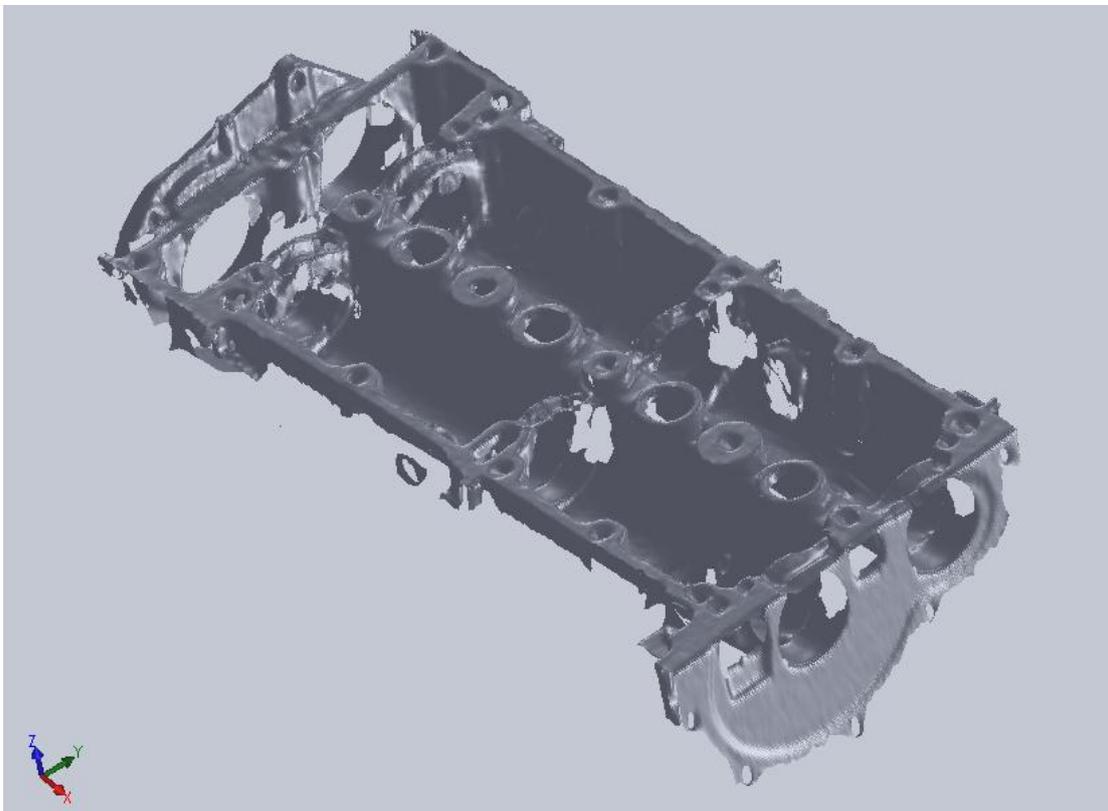


Fig. 6.7 – Scansione 3D della sovratesta

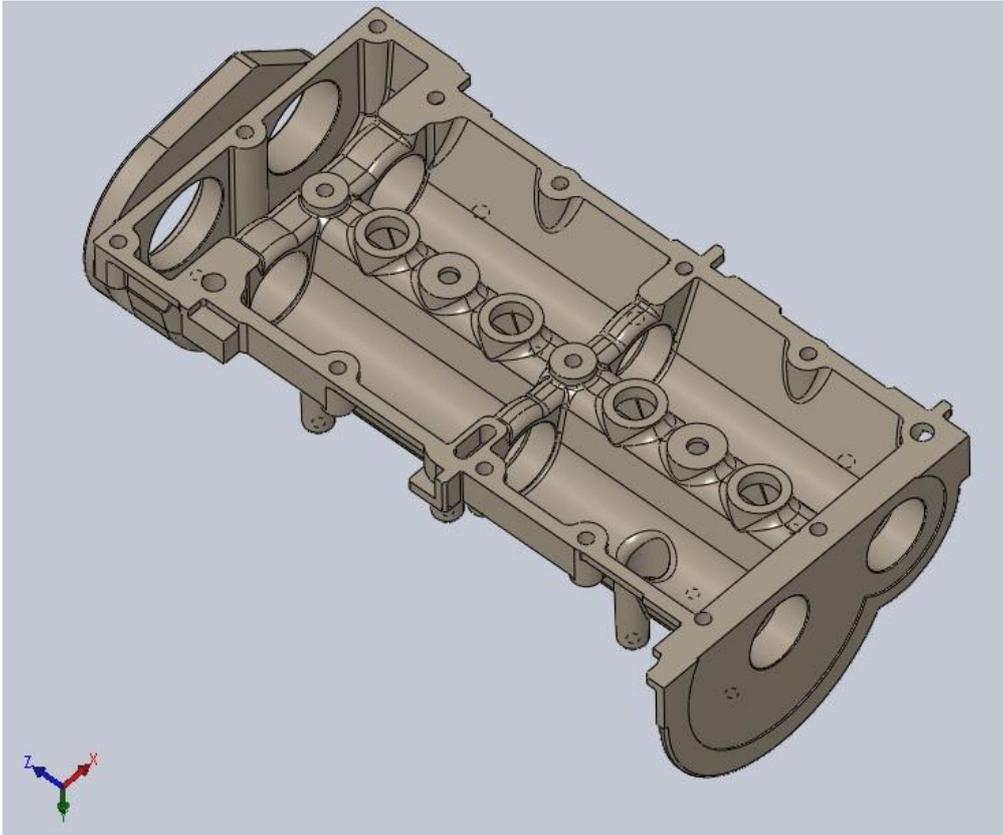


Fig. 6.8 – Disegno 3D della sovratesta

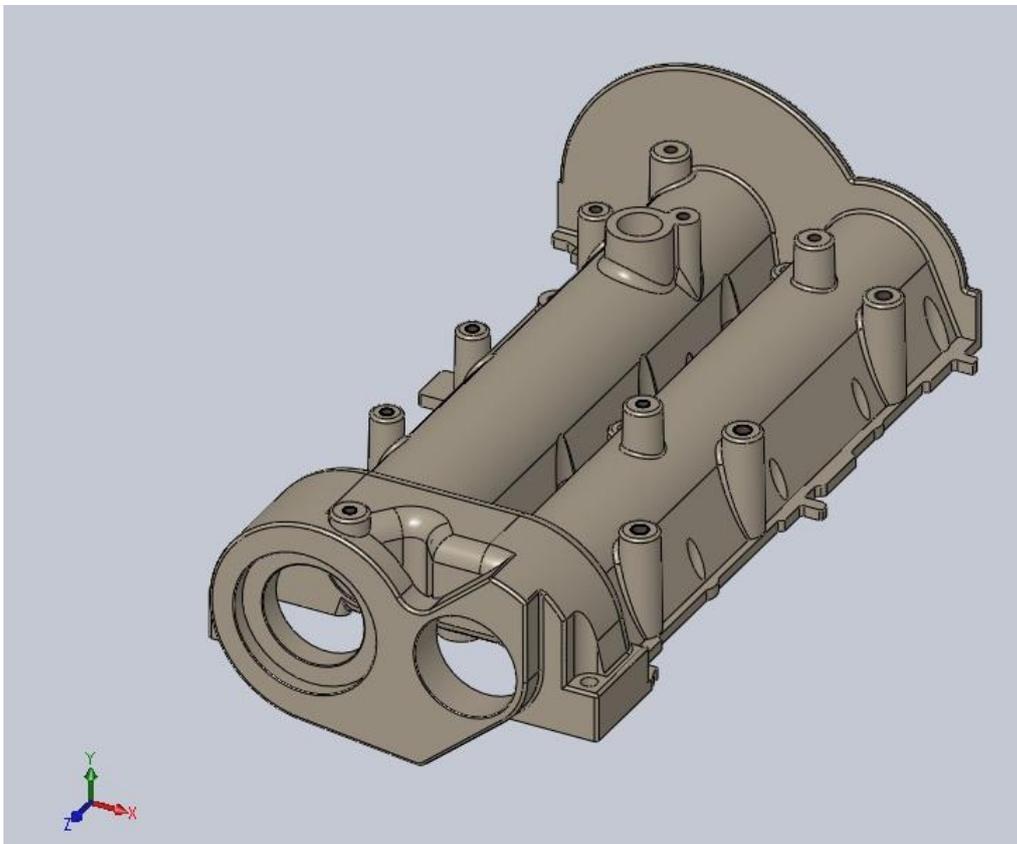


Fig. 6.9 – Disegno 3D della sovratesta

Analogamente al lavoro svolto per la coppa dell'olio, si è svolta una simulazione agli elementi finiti.

### 6.2.1 – Ipotesi di vincolo e di carico

Allo scopo di rispettare il più fedelmente possibile le reali condizioni di vincolo della sovratesta, si sono introdotti:

- vincolo fisso sulla superficie a contatto con la testata;
- carico di pressione di 1 bar su tutta la superficie interna;
- accelerazione di gravità pari a  $6g \cong 58.86 \text{ m/s}^2$ ;
- temperatura di  $45 \text{ }^\circ\text{C}$  distribuita su tutta la superficie interna.

### 6.2.2 – Definizione della reticolatura

Con un reticolo di elementi molto fine in tutta la struttura, con dimensione dell'elemento pari a  $6.2190 \text{ mm}$  e una tolleranza di  $0.3109 \text{ mm}$ , si è giunti al modello seguente. Gli elementi totali analizzati sono  $57905$ , i nodi totali sono  $103619$ , mentre il tempo totale di soluzione è pari a  $35 \text{ s}$ .

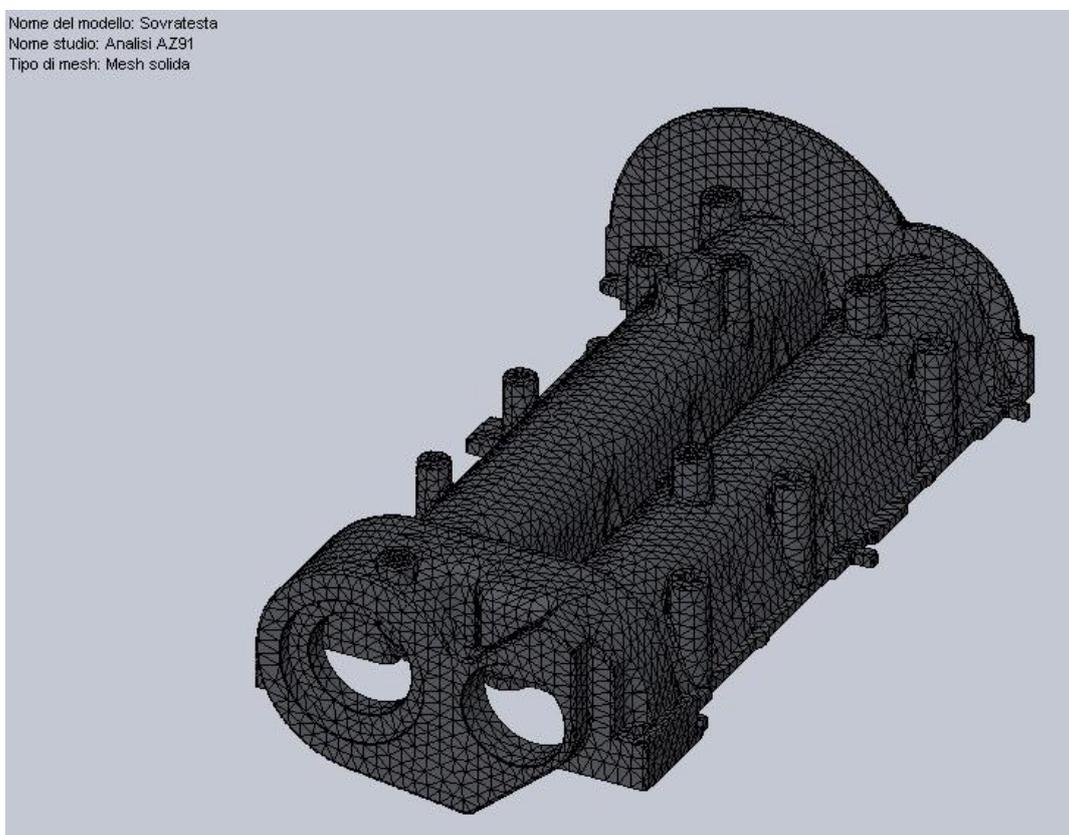


Fig. 6.10 – Discretizzazione della sovratesta

### 6.2.3 – Verifica statica della sovratesta

La massa della sovratesta originaria della versione automobilistica è 2.722 kg, mentre quella che andrà montata sul velivolo ultraleggero risulta diminuita e pari a 1.945 kg, Simulando la presenza del carico applicato, si è ottenuto, per la verifica statica con sollecitazione equivalente di Von Mises, una tensione massima di 55.1 MPa (fig. 6.11). La lega AZ91 raggiunge lo snervamento a trazione ad una tensione di 165 MPa.

La tensione massima si ha in corrispondenza della zona in cui è calettato l'albero a camme.

La tensione minima si ha invece, in corrispondenza dei fori per il fissaggio della sovratesta.

Di seguito è riportato l'andamento delle sollecitazioni con i rispettivi punti di massimo e minimo.

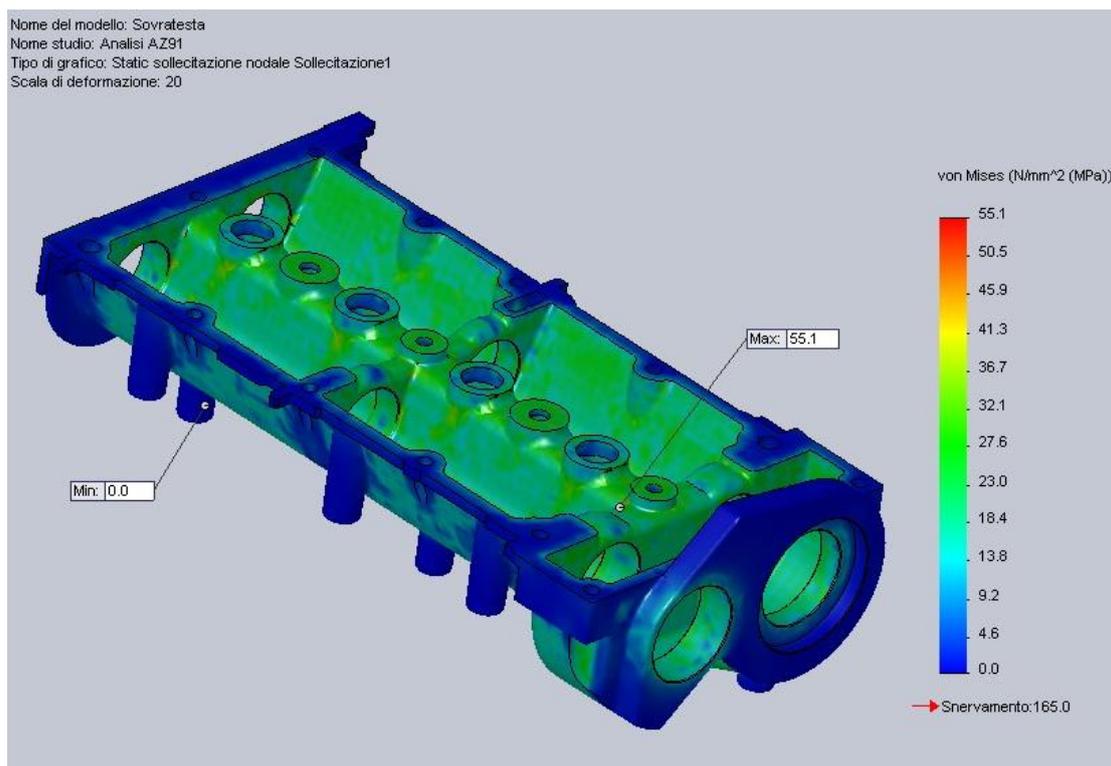


Fig. 6.11 – Sollecitazione

Come si può notare dall'immagine seguente, la deformazione equivalente massima risulta molto bassa pari a 0.0009385 mm (fig.6.12).

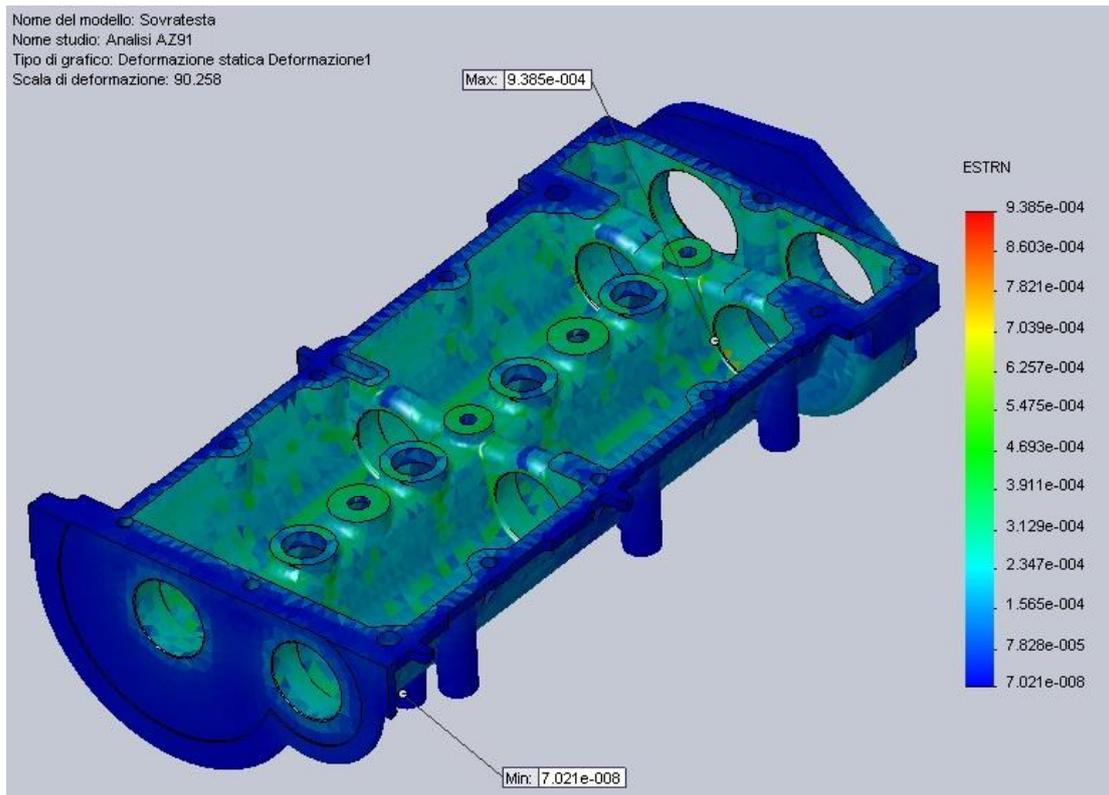


Fig. 6.12 – *Deformazione equivalente*

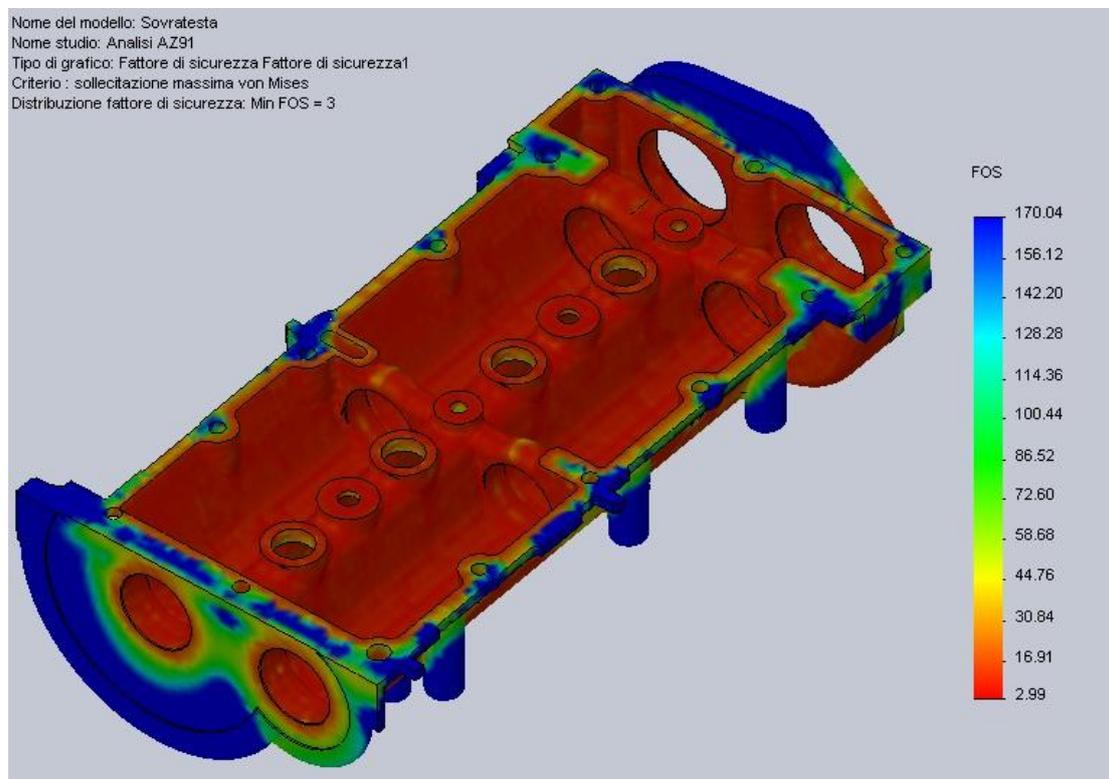


Fig. 6.13 – *Coefficiente di sicurezza\_lato interno*

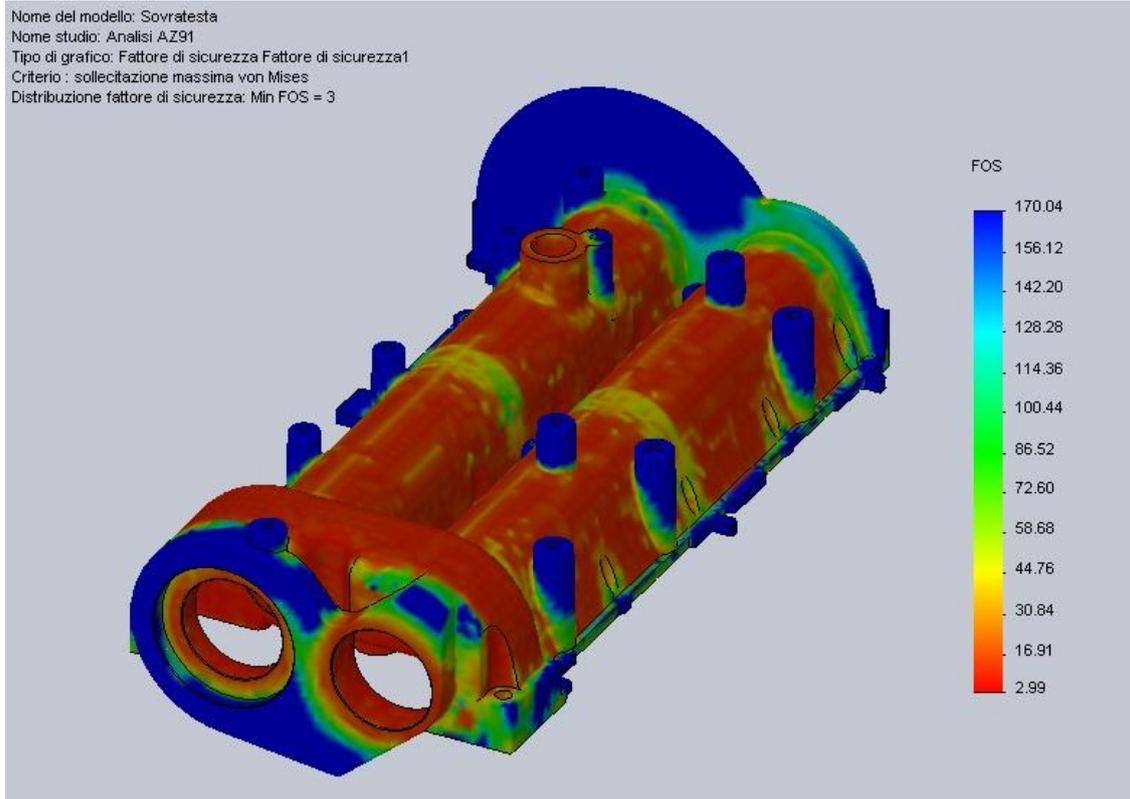


Fig. 6.14 – *Coefficiente di sicurezza\_lato esterno*

## Conclusioni

Lo scopo del lavoro presentato in questa tesi è stata l'ottimizzazione di parti alleggerite per un 4 cilindri per uso aeronautico, basandosi sul motore FPT 1300 JTD.

A partire dai dati forniti, quali, la potenza erogata dal motore, gli ingombri e i pesi degli accessori relativi al manovellismo, sono stati effettuati una serie di calcoli, passando in rassegna alcuni aspetti della progettazione meccanica.

Questo elaborato mostra che l'idea di montare un motore automobilistico, come il FIAT 1300 jtd, su un aeroplano, quale è il Cessna 172, è ampiamente realizzabile. In questo studio si è cercato di analizzare approfonditamente tutti i dispositivi necessari e si è proposta una strada per adattarli alle nuove esigenze. Ovviamente, la soluzione proposta non è l'unica disponibile, perciò non si può escludere che ne esista una ancora più vantaggiosa.

Detto ciò, è evidente che, considerando i costi, i consumi e l'affidabilità di un motore automobilistico prodotto in larghissima serie rispetto ai motori aeronautici medi, l'installazione risulta non solo realizzabile, ma può avere un buon ritorno economico. Ciò è dovuto anche all'utilizzo, nell'installazione, di componenti reperibili in commercio a prezzi ragionevoli.

Bisogna però specificare che non basta solamente adattare il sistema di riduzione principale e l'impianto di lubrificazione, ma ogni componente deve subire un processo definito di "avionizzazione". Per esempio è di fondamentale importanza valutare in ogni altro componente un eventuale alleggerimento.

In particolare, tenendo conto dei vincoli di spazio imposti dal basamento del motore del FPT 1300 JTD e da altre considerazioni sulla geometria delle fusioni dei due componenti analizzati, si è giunti ai disegni mostrati nei capitoli precedenti.

E' stata fatta poi un accurata scelta del materiale da utilizzare per la coppa dell'olio e la sovratesta, sulla base di considerazioni su resistenza, tenacità, duttilità e leggerezza.

Infine sono state eseguite le analisi agli elementi finiti della dilatazione termica e degli sforzi di pressione, le quali, anche grazie all'opportuna scelta del materiale, hanno dato esito positivo confermando la fattibilità dei componenti in esame.

## BIBLIOGRAFIA

1. MAZZOLENI F.  
*“Tecnologie dei metalli 1 – Fonderia”*  
Unione Tipografico – Editrice Torinese
2. MAZZOLENI F.  
*“Tecnologie dei metalli 3 – Lavorazione delle lamiere, saldatura, trattamenti termici”*  
Unione Tipografico – Editrice Torinese
3. FIAT POWERTRAIN TECHNOLOGIES  
*“Il motore 1.3 JTD, scheda tecnica”*  
[www.fptpowertrain.com](http://www.fptpowertrain.com)
4. FIAT POWERTRAIN TECHNOLOGIES  
*“Manuale di assistenza tecnica”*  
Fiat Auto S.p.A.
5. BALDASSINI L.  
*“Vademecum per disegnatori e tecnici”*  
Hoepli
6. CALIGARIS L., FAVA S., TOMASELLO C.  
*“Manuale di meccanica”*  
Hoepli