

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Aerospaziale
A.A. 2019/2020

Tesi di Laurea Magistrale

**Design, costruzione e post-processing del
prototipo di uno scambiatore di calore acqua-olio
prodotto attraverso l'Additive Manufacturing**



Relatore: Prof. Paolo Maggiore

Candidato: Luca Malvicino

Aprile 2020

Ringraziamenti

Giunti al termine di questo lungo e impegnativo percorso, mi preme ringraziare tutte le persone con cui è stato condiviso e che hanno saputo supportarmi nei momenti più critici spingendomi a superarli. Prima tra tutti vorrei menzionare la mia famiglia, in particolare i miei genitori, Anna ed Ivo, e mio fratello Marco, che, oltre ad avermi sostenuto moralmente ed economicamente, mi hanno sopportato in questi anni. E voglio sicuramente aggiungere in questo insieme di persone Eleonora e tutti i miei amici: il loro contributo nel rendere più leggeri e felici questi anni è stato fondamentale.

Entrando nel merito della preparazione di questo elaborato, la mia riconoscenza va sia al mio relatore, Prof. Paolo Maggiore, per il prezioso supporto fornitomi durante il progetto, che alle aziende "I.C.P. Srl" (nella persona dell'Ing. Andrea Buscemi) ed "Ellena Spa" (nelle persone del Sig. Silvio Ellena, Ing. Ruggero Gandolfi e Ing. Andrea Mazzetto), che ne hanno reso possibile lo sviluppo e la realizzazione.

Sommario

In campo aerospaziale, per essere competitivi, è necessario investire su processi di produzione innovativi che puntino a consentire, in un futuro prossimo, un aumento della complessità raggiungibile in un prodotto, accompagnata da un aumento della sua qualità. Seguendo questa filosofia, nell'elaborato sono stati trattati lo sviluppo, la produzione e le attività di post-processing del prototipo di uno scambiatore di calore acqua-olio prodotto utilizzando l'innovativo processo di Additive Manufacturing. Il prototipo è stato commissionato dall'azienda I.C.P. Srl, la quale produce velivoli ultraleggeri e sta attualmente sviluppando un motore proprio. L'obiettivo che si è perseguito è stato quello di realizzare uno scambiatore più leggero e con minori perdite di carico rispetto a quello che viene utilizzato attualmente dall'azienda. Grazie all'Additive Manufacturing è stato possibile raggiungere questo obiettivo realizzando il prototipo di scambiatore in un blocco unico. Il progetto è stato svolto in collaborazione con l'azienda Ellena Spa, la quale si occupa di lavorazioni CNC e Additive Manufacturing in svariati settori tra cui quello aerospaziale. Come detto sopra, all'interno dell'elaborato è stato descritto il processo di design CAD dello scambiatore, in particolare del suo interno, il quale ha subito numerose variazioni a seguito di un processo iterativo necessario per raggiungere una geometria che potesse essere effettivamente realizzata con il metodo di produzione scelto. La soluzione finale a cui si è giunti risulta essere un ibrido tra il tradizionale scambiatore di calore composto da condotti immersi in una vasca (*shell and tube*) e uno scambiatore con strutture trabecolari. In questo modo è stato possibile ottenere una struttura interna autoportante che non necessita di supporti interni durante la stampa, i quali non sarebbero potuti essere rimossi dall'interno dello scambiatore. Raggiunta la geometria finale, lo scambiatore è stato prodotto da Ellena e, nell'elaborato, si è proceduto nel descriverne il processo produttivo e le attività di post-processing, come la completa rimozione delle polveri d'alluminio dal suo interno e la conseguente verifica.

Indice

Elenco delle figure	III
Elenco delle tabelle	VII
1 Il sistema propulsivo attuale	1
1.1 Motore M09	2
1.1.1 Prestazioni	4
1.2 Sistemi di raffreddamento e di lubrificazione	7
1.2.1 Circuito di raffreddamento	7
1.2.2 Circuito di lubrificazione	10
1.2.3 Carichi termici	12
1.3 Scambiatore di calore acqua-olio attuale	15
1.3.1 Integrazione dello scambiatore nei sistemi di raffreddamento e lubrificazione	18
1.3.2 Geometria dello scambiatore acqua-olio	20
1.3.3 Prestazioni dello scambiatore	24
1.3.4 Saldatura con brasatura: pregi e difetti	28
2 Additive Manufacturing	31
2.1 Ciclo della fabbricazione additiva	32
2.2 AM: vantaggi e svantaggi	35
2.3 Classificazione dei processi AM	37
2.4 <i>Selective Laser Melting</i> e <i>Selective Laser Sintering</i>	39
2.4.1 Laser: caratteristiche e tipologie	41
2.4.2 Evoluzione e caratteristiche del processo SLS	43
2.4.3 Vantaggi dei sistemi PBF-L	45
2.4.4 Svantaggi dei sistemi PBF-L	47
2.5 <i>Electron Beam Melting</i>	53

2.5.1	Fascio di elettroni: funzionamento e caratteristiche	53
2.5.2	Vantaggi dei sistemi EBM	55
2.5.3	Svantaggi dei sistemi EBM	57
2.6	Materiali per la fusione a letto di polvere	58
3	Sviluppo del disegno CAD su SolidWorks	63
3.1	Punto di partenza del progetto	63
3.2	Strutture reticolari nell'AM	66
3.2.1	Analisi delle geometrie	67
3.2.2	Scelta della cella	70
3.3	Prima modifica del disegno CAD	72
3.3.1	Criticità della geometria	75
3.4	Seconda modifica del disegno CAD	76
3.4.1	Scambiatori di calore <i>shell and tube</i>	76
3.4.2	Prima versione dello scambiatore <i>shell and tube</i>	77
3.4.3	Criticità della geometria	81
3.5	Geometria finale dello scambiatore	81
4	Produzione dello scambiatore e <i>post-processing</i>	87
4.1	Produzione dello scambiatore	87
4.2	Attività di <i>post-processing</i>	90
4.3	Lavaggio interno e verifica	92
4.3.1	Lavaggio ad ultrasuoni	92
4.3.2	Preparazione per le prove di tenuta e flussaggio	93
4.3.3	Prova di tenuta	94
4.3.4	Prova di flussaggio e conteggio particelle	95
4.3.5	Verifica del residuo secco	97
	Conclusioni	99
	Bibliografia	101

Elenco delle figure

1.1	Loghi delle aziende coinvolte nel progetto	2
1.2	Velivolo Savannah VG, prodotto dalla I.C.P.	2
1.3	Motore M09, prodotto da I.C.P.	3
1.4	Curva RPM-HP del motore M09, fornita da I.C.P.	6
1.5	Schema del circuito di raffreddamento di motore a combustione interna, fornito da I.C.P.	8
1.6	Dettaglio del radiatore, fornito da I.C.P.	9
1.7	Schema del circuito di lubrificazione, fornito da I.C.P.	11
1.8	Andamento temperature su pistone a testa piatta in alluminio . . .	12
1.9	Perturbatore dello scambiatore utilizzato attualmente nel motore M09, fornito da I.C.P.	16
1.10	Vista esplosa dello scambiatore equipaggiato attualmente sul mo- tore M09, fornito da I.C.P.	17
1.11	Dettaglio del circuito di lubrificazione del motore M09 con scam- biatore di calore in evidenza, fornito da I.C.P.	18
1.12	Spaccato di un radiatore tradizionale a superfici alettate	19
1.13	Sezione trasversale del perturbatore, fornita da I.C.P.	20
1.14	Vista in pianta del perturbatore, fornita da I.C.P.	21
1.15	Vista in pianta della piastra di passaggio, all'interno della quale si colloca il perturbatore	22
1.16	Vista in pianta del sparatore	22
1.17	Vista del canale di scorrimento del fluido con scambiatore assemblato	23
1.18	Scambiatore attuale, fornito da I.C.P.	25
1.19	Vista del punto in cui si va ad inserire lo scambiatore all'interno del motore, fornita da I.C.P.	25
1.20	Portate e pressioni del circuito di raffreddamento, fornite da I.C.P. .	26

ELENCO DELLE FIGURE

1.21	Portate, pressioni e temperature del circuito di lubrificazione, fornite da I.C.P.	26
1.22	Portate, pressioni e temperature del circuito di lubrificazione, fornite da I.C.P.	27
1.23	Portate, pressioni e temperature del circuito di lubrificazione, fornite da I.C.P.	27
1.24	Esempio di scambiatore di calore realizzato con brasatura [6]	29
2.1	Esempio di ala realizzata in additive manufacturing	32
2.2	Esempio di componente salvato su file con estensione STL	32
2.3	Esempio di errore di <i>faceting</i>	33
2.4	Esempio di supporti sullo scambiatore prodotto da Ellena	34
2.5	Esempio di <i>slicing</i> su cilindro	34
2.6	Grafico costi-complessità geometrica con confronto tra AM e tecnologie convenzionali	36
2.7	Classificazione dei processi secondo il materiale di base utilizzato	38
2.8	Schema di macchina AM a letto di polvere	40
2.9	Schema di un tipico laser a fibra ottica a modalità singola che utilizza diodi a emettitore singolo	41
2.10	Schema dell'interazione tra laser e metallo, con generazione del <i>keyhole</i>	43
2.11	Evoluzione del processo SLS: (a) Polveri rivestite con polimero (b) Miscela di metalli altofondenti e bassofondenti (c) Polveri di metallo pre-legate	44
2.12	Porosità e difetti all'interno di elementi stampati in AM	49
2.13	Rappresentazione di un emettitore di fascio di elettroni e relativi componenti	54
3.1	Viste della cella che va a costituire le superfici di scambio termico	64
3.2	Vista dello scambiatore sezionato e dettaglio di una piastra e dei supporti interni	65
3.3	Strutture reticolari <i>strut-based</i> : (A) BCC, (B) BCCZ, (C) FCC, (D) FCCZ, (E) cubica, (F) octo-truss e (G) a diamante	67
3.4	Strutture reticolari TPMS: (A) giroide di Schoen, (B) diamante di Schwarz e (C) Neovius	68
3.5	Strutture a <i>shell</i> in cui si combina il cubo semplice (SC), il BCC e l'FCC: (A) SC-BCC, (B) SC-BCC-FCC e (C) SC-FCC	70

ELENCO DELLE FIGURE

3.6	Esempio di modello di cella trabecolare BCC	71
3.7	Direzione del flusso rispetto agli elementi analizzati	72
3.8	Viste cella BCC: (a) Vista frontale e (b) vista dall'alto in basso . . .	72
3.9	Vista in pianta di una piastra di passaggio priva della struttura reticolare	73
3.10	Vista in pianta di una piastra di passaggio con struttura reticolare .	74
3.11	Vista esplosa dello scambiatore	74
3.12	Vista in sezione dello scambiatore	74
3.13	Zone critiche per la rimozione delle polveri	75
3.14	Schema di scambiatore di calore <i>shell and tube</i>	77
3.15	Vista in pianta del corpo dello scambiatore	78
3.16	Vista in sezione del fascio di tubi dello scambiatore	79
3.17	Vista del fascio di tubi completo	79
3.18	Vista dello scambiatore aperto con identificazione dei punti di en- trata e uscita fluidi	80
3.19	Vista in sezione del fascio di tubi finale	82
3.20	Vista del fascio di tubi finale	82
3.21	Vista frontale in sezione del fascio di tubi finale	83
3.22	Vista frontale in sezione del fascio di tubi finale all'interno delle vasca	84
3.23	Vista in pianta dello scambiatore finale aperto	85
3.24	Vista in pianta dello scambiatore finale chiuso	85
4.1	Posizione di crescita del componente con visualizzazione dei supporti	87
4.2	Camera di lavoro sigillata	89
4.3	Fasi del processo di pulizia del pezzo in macchina	89
4.4	Separazione del pezzo dal piano di lavoro	90
4.5	Finitura superficiale in macchina CNC	91
4.6	Prodotto finale pronto per il lavaggio interno	91
4.7	Flangia di connessione, lato scambiatore	93
4.8	Flangia di connessione, lato condotti	93
4.9	Flangia fissata allo scambiatore	94
4.10	Scambiatore connesso al compressore per la prova di tenuta	95
4.11	Scambiatore connesso ai tubi per la prova di flussaggio	96
4.12	Classi della normativa SAE AS4059	97
4.13	Peso del filtro utilizzato per il calcolo del residuo secco	98

ELENCO DELLE FIGURE

Elenco delle tabelle

1.1	Prestazioni e caratteristiche motore M09, fornite da I.C.P.	6
1.2	Specifiche della piastra di passaggio, valutate attraverso il modello CAD	23
1.3	Specifiche del perturbatore, valutate attraverso il modello CAD . . .	23
1.4	Specifiche del separatore, valutate attraverso il modello CAD	24
2.1	Proprietà fisiche, meccaniche e termiche della lega di Alluminio AlSi10Mg	61
3.1	Formule per la generazione delle celle TPMS	69
3.2	Dimensioni relative alla vasca dello scambiatore	78
3.3	Dimensioni relative al fascio di tubi	80
3.4	Dimensioni relative alle strutture reticolari del fascio di tubi	84
4.1	Caratteristiche geometriche della flangia di connessione	94

ELENCO DELLE TABELLE

Capitolo 1

Il sistema propulsivo attuale

In campo aerospaziale, per essere competitivi, è necessario investire su processi di produzione innovativi che puntino a consentire, in un futuro prossimo, un aumento della complessità raggiungibile in un prodotto, accompagnata da un aumento della sua qualità.

Seguendo questa filosofia, nel seguente elaborato verranno trattati lo sviluppo, la produzione e le attività di post-processing del prototipo di uno scambiatore di calore acqua-olio prodotto utilizzando l'innovativo processo di Additive Manufacturing. Tale metodo ha reso possibile creare il pezzo in un blocco unico, il che ha portato a vantaggi come l'assenza di saldature e guarnizioni al suo interno e ad una discreta riduzione del peso rispetto allo scambiatore che va a sostituire. Nel prossimo capitolo si andrà più nel dettaglio riguardo questo processo produttivo e i relativi vantaggi e svantaggi.

Prima, però, è importante descrivere come sia nato questo progetto, in che motore si voglia inserire il prototipo realizzato e quale scambiatore si intenda sostituire. Innanzitutto, è stato possibile realizzare questo progetto grazie alla collaborazione tra il Politecnico di Torino e due aziende Piemontesi: l'I.C.P. Srl di Castelnuovo Don Bosco (AT), specializzata nella costruzione di velivoli ultraleggeri, nonché azienda che ha commissionato lo scambiatore, e l'Ellena Spa di Brandizzo (TO), specializzata nella meccanica di precisione, che ha preso la decisione di investire nell'Additive, in Figura 1.1 (pagina seguente) vengono riportati i loghi delle due aziende.

In questo primo capitolo introduttivo si andrà ad analizzare il sistema propulsivo in generale, il sistema di lubrificazione e di raffreddamento in cui lo scambiatore sviluppato andrà inserito ed infine lo scambiatore di calore attualmente utilizzato

che si intende sostituire.



Figura 1.1: Loghi delle aziende coinvolte nel progetto

1.1 Motore M09

L'I.C.P., nata nel 1980, si specializza nella produzione di cablaggi elettrici per il settore automobilistico. Una decina di anni dopo inizia a progettare e produrre velivoli ultraleggeri in lega di alluminio. Alla fine degli anni '90 vengono effettuati ingenti investimenti al fine di industrializzare la produzione dei velivoli, i quali venivano ancora prodotti in ambito artigianale. Grazie a questi investimenti, l'azienda ha iniziato a produrre tutti i componenti degli aerei in serie utilizzando anche macchine CNC, riuscendo così a raggiungere un prodotto finale di maggiore qualità rispetto a quello artigianale. Ciò viene confermato dall'ottenimento del certificato ISO 9001 che va ad attestare l'alta qualità del prodotto. Il percorso seguito da questa azienda ha permesso di rendere il volo economicamente accessibile e ciò ha portato ad una conseguente crescita dell'azienda stessa.



Figura 1.2: Velivolo Savannah VG, prodotto dalla I.C.P.

Il velivolo di maggior successo, ad oggi, risulta essere il *Savannah*, mostrato in Figura 1.2. Esso può essere equipaggiato con l'M09, un sistema propulsivo innovativo sviluppato internamente da I.C.P. Si tratta di un motore alternativo

quattro tempi bicilindrico a V di novanta gradi, con una cilindrata complessiva di 1225 cm^3 . La disposizione dei cilindri a V, al contrario di quella in linea, permette di installare il motore in modo più compatto, il che è fondamentale in campo aeronautico in quanto vi è l'obiettivo di ridurre l'ingombro e di conseguenza la sezione trasversale del velivolo che va ad impattare sulla resistenza aerodinamica.

L'obiettivo perseguito dagli ingegneri durante lo sviluppo di questo sistema propulsivo è stato quello di massimizzare le prestazioni riducendo il consumo di carburante. Riuscendo, dunque, ad ottenere basse emissioni ed un impatto ambientale minimo. Ciò è stato reso possibile grazie alla mappatura della centralina, la quale, sfruttando le informazioni rilevate da due sonde Lambda, effettua un continuo controllo e permette di avere costantemente un'iniezione stechiometrica aria-combustibile nella camera di combustione.



Figura 1.3: Motore M09, prodotto da I.C.P.

Il peso totale dell'M09, compresi i vari fluidi di raffreddamento e lubrificazione al suo interno, ed il sistema di scarico è di soli 82kg , rendendolo il motore per LSA (*Light Sport Aircrafts*) con il miglior rapporto peso-potenza presente sul mercato. Come riportato sopra, ciò che questo motore ha di innovativo è la presenza di due sonde Lambda nel sistema di iniezione, le quali permettono di avere il rapporto stechiometrico ideale per ogni condizione di volo. Inoltre, a differenza di altri sistemi della stessa categoria, oltre ad avere un sistema ad iniezione diretta, è anche munito di un carburatore come sistema di emergenza. Tale sistema è autonomo ed è equipaggiato con sistema elettrico, candele, generatore e pompa del carburante dedicati in modo tale da poter funzionare anche nel caso in cui la batteria principale riportasse un guasto. In Figura 1.3¹ si riporta il sistema propulsivo installato

¹13.

sul velivolo. Essendo un motore alternativo, è dotato di un'elica a tre pale che genera la spinta. Essa è installata sul fronte del velivolo ed ha un rapporto di riduzione pari a 1:2.95.

Per quanto riguarda la cabina di pilotaggio, anch'essa è equipaggiata con strumentazione di bordo di ultima generazione che comprende tutto il necessario per il volo, come uno schermo da cinque pollici, tachimetro, temperatura e pressione dell'olio, temperatura dell'acqua, stato della batteria, pressione del carburante, conta ore e strumenti per l'auto diagnosi.

1.1.1 Prestazioni

L'M09 appartiene alla famiglia dei motori ad accensione comandata, dove, all'interno dei cilindri, viene iniettata una miscela di aria e benzina che viene poi detonata da una scintilla generata da una candela. Questa detonazione permette di generare un repentino aumento di pressione, che, idealmente, avviene a volume costante. Di conseguenza, la pressione permette la movimentazione del pistone, questo ciclo viene anche detto ciclo Otto. Inoltre, è possibile distinguere due categorie di cicli Otto, le quali si suddividono in base a quante escursioni compie il pistone per completare un ciclo e, quindi, come vengono ricambiati i gas in camera di combustione: si hanno cicli a quattro e a due tempi. Il numero di tempi indica il numero di escursioni compiute dal pistone per completare il ciclo che comprende: l'iniezione dei gas, la detonazione e la fuoriuscita dei gas combusti dalla camera di combustione. Nel quattro tempi, iniezione e fuoriuscita avvengono durante escursioni del pistone differenti, mentre, nel due tempi, le escursioni vengono dimezzate e iniezione e fuoriuscita avvengono contemporaneamente, durante la medesima escursione. Ogni ciclo presenta relativi vantaggi e svantaggi, per esempio un motore due tempi ha, solitamente, una risposta più pronta rispetto ad uno a quattro tempi con pari cilindrata, ma è meno efficiente e più inquinante, in quanto la combustione non è mai ottimale. Ciò è dovuto alla velocità con cui i gas combusti devono essere sostituiti dalla carica successiva, è assai difficile riuscire ad avere un ricambio completo ad ogni ciclo. Mentre, nei cicli a quattro tempi, con un'escursione dedicata all'iniezione ed una all'espulsione, si può avere un ricambio ottimale che giova al buon funzionamento del motore e, di conseguenza, alla riduzione dei consumi.

L'M09, motore a quattro tempi, presenta ottime prestazioni, se comparato a motori della medesima categoria. Di seguito vengono descritte alcune peculiari-

tà evidenziate dall'ingegner Perrone [17] che lo rendono un ottimo prodotto di ingegneria:

- Motore *twin-engine* V90 4-tempi: questo sistema propulsivo a combustione interna è costituito da due cilindri, e due relativi pistoni, i cui assi sono perpendicolari tra di loro, da qui la denominazione a V. La disposizione a novanta gradi è molto comune nei motocicli, ma è anche diffusa nel campo aeronautico in quanto è la più efficace per quanto riguarda la distribuzione dei pesi;
- Dotato di quattro valvole con doppio albero a camme munito di decompressore automatico per ogni cilindro;
- Sistema di raffreddamento a liquido: il fluido, in questo caso acqua, va a contatto con la superficie esterna del cilindro in modo da sottrarne calore per poi dirigersi allo scambiatore di calore, detto radiatore, per cedere il calore accumulato al flusso d'aria esterna. Vi è anche la presenza di passaggi e condotti all'interno del blocco principale del motore in modo da favorirne il raffreddamento;
- Pompa a secco con serbatoio dell'olio e circuito per la lubrificazione integrati nel motore;
- Doppio sistema di iniezione elettronica prodotta da Magneti Marelli (MM^{TM});
- Sistema carburante primario prodotto da Magneti Marelli dotato di due sonde Lambda: questa soluzione viene adottata al fine di migliorare l'efficienza del motore e ridurre l'inquinamento prodotto dai gas combusti. Una delle sonde è posizionata all'uscita dei gas di scarico, l'ossigeno presente che la investe dà luogo ad una ossido-riduzione. Tale reazione viene convertita in un segnale elettrico inviato alla centralina, la quale regola l'iniezione di gas nella camera di combustione in modo tale da ottenere il rapporto aria-benzina più vicino possibile a quello stechiometrico in ogni condizione di volo, così da abbassare i consumi e, dunque, l'inquinamento.
- Sistema carburante secondario: iniezione meccanica con carburatore collegato al corpo farfallato.

Per visualizzare in modo più evidente le prestazioni del motore è conveniente utilizzare le curve che ne caratterizzano il comportamento, in particolare quelle che esprimono la coppia motrice e la potenza effettiva rapportate al numero di giri

del motore. È importante notare che le condizioni operative non sono definite da un singolo parametro, ovvero ad un dato regime di funzionamento il motore può sviluppare una potenza variabile a seconda di come si agisce sull'organo regolatore. Nel caso in cui si stia prendendo in considerazione un motore a ciclo Otto, ciò avviene andando a regolare la massa di miscela aria-benzina che viene introdotta in camera di combustione ad ogni ciclo. Dunque, quando il motore sta operando in condizioni stazionarie, i parametri che definiscono il suo funzionamento sono almeno due e solitamente vengono utilizzati i giri al minuto compiuti dell'albero motore e il carico imposto dall'utilizzatore, in questo caso il pilota. In Figura 1.4 viene presentata una delle curve menzionate sopra, ovvero la potenza in HP relativa al numero di giri al minuto del motore, mentre in Tabella 1.1 vengono riportati i dati generali riguardanti le prestazioni e le caratteristiche geometriche del motore M09.

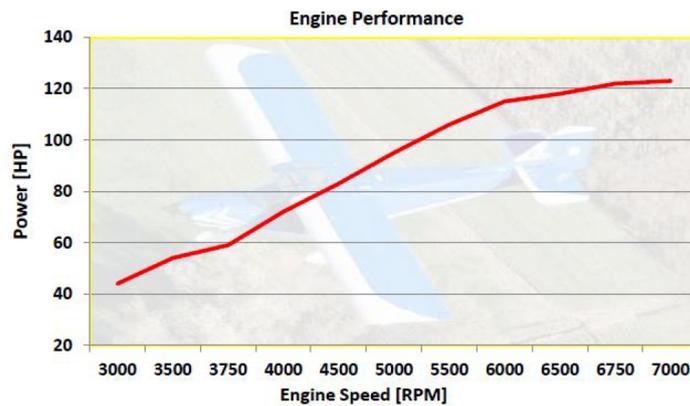


Figura 1.4: Curva RPM-HP del motore M09, fornita da I.C.P.

Prestazioni		
Potenza Massima (5 min)	128 HP	7000 RPM
Potenza Massima (continua)	115 HP	6600 RPM
Coppia Massima	97.4 ft-lb/132.1 Nm	6750 RPM
Camera di Combustione		
Alesaggio	4.21"/107 mm	
Escursione	2.68"/68 mm	
Rapporto di Compressione	10:01	
Cilindrata	1225 cm ³ /74.75 cu.in.	

Tabella 1.1: Prestazioni e caratteristiche motore M09, fornite da I.C.P.

1.2 Sistemi di raffreddamento e di lubrificazione

Una volta descritto in modo generale il propulsore nel quale verrà inserito lo scambiatore, risulta interessante descrivere i sistemi in cui esso verrà effettivamente integrato: il sistema di raffreddamento e di lubrificazione. I due sistemi sono costituiti da un circuito principale ciascuno e i due circuiti sono collegati tra loro dallo scambiatore stesso. Il primo circuito menzionato si occupa, appunto, del raffreddamento del motore. Per fare ciò si utilizza un fluido, in questo caso acqua miscelata con glicole etilenico, che viene fatto circolare in zone specifiche del motore. Il secondo circuito permette la lubrificazione delle parti meccaniche in movimento del motore, fornendo, inoltre, un contributo al raffreddamento delle pareti dei cilindri e dei pistoni.

1.2.1 Circuito di raffreddamento

Il calore generato dalla combustione dei gas si diffonde attraverso convezione e conduzione provocando l'innalzamento della temperatura del sistema propulsivo. Affinché la temperatura non diventi eccessiva e, dunque, tale da danneggiare il sistema propulsivo stesso, è necessario asportare e dissipare il calore generato. In un sistema in cui si sfrutta il raffreddamento a liquido, come quello studiato in questo caso, il calore viene sottratto per convezione dal liquido refrigerante che scorre a contatto con le pareti dei cilindri. Esso permette di trasportare il calore fino allo scambiatore, detto radiatore, attraverso cui verrà espulso verso l'ambiente esterno. Affinché ciò si verifichi, il radiatore deve essere investito da un flusso d'aria alla quale può essere ceduto il calore, nuovamente per convezione forzata. Come accennato sopra, per ottenere un raffreddamento efficace del motore vengono realizzati dei condotti in posizioni specifiche all'interno del basamento, ovvero quelle più sollecitate dal punto di vista termico.

Al liquido refrigerante vengono aggiunti degli additivi anticorrosivi e dei detersivi, i quali hanno la funzione di aumentare la temperatura di ebollizione del liquido e di diminuirne la temperatura di congelamento e, in generale, di evitare un'usura prematura del circuito. Un altro fattore che impedisce l'ebollizione del fluido è la pressurizzazione del circuito generata dalla dilatazione del fluido stesso a cui viene ceduto calore, questo consente al liquido refrigerante di raggiungere una temperatura maggiore senza però andare in ebollizione. Evitando il cambiamento di stato del fluido si riducono drasticamente le perdite di calore durante il suo

trasferimento dal motore al radiatore. Ciò consente di ottenere un salto termico maggiore tra il liquido all'interno del radiatore e il flusso d'aria esterna, andando così ad aumentare l'efficienza dello scambio termico e, conseguentemente, permettendo di diminuire la superficie di scambio del radiatore riducendone l'ingombro e il peso.

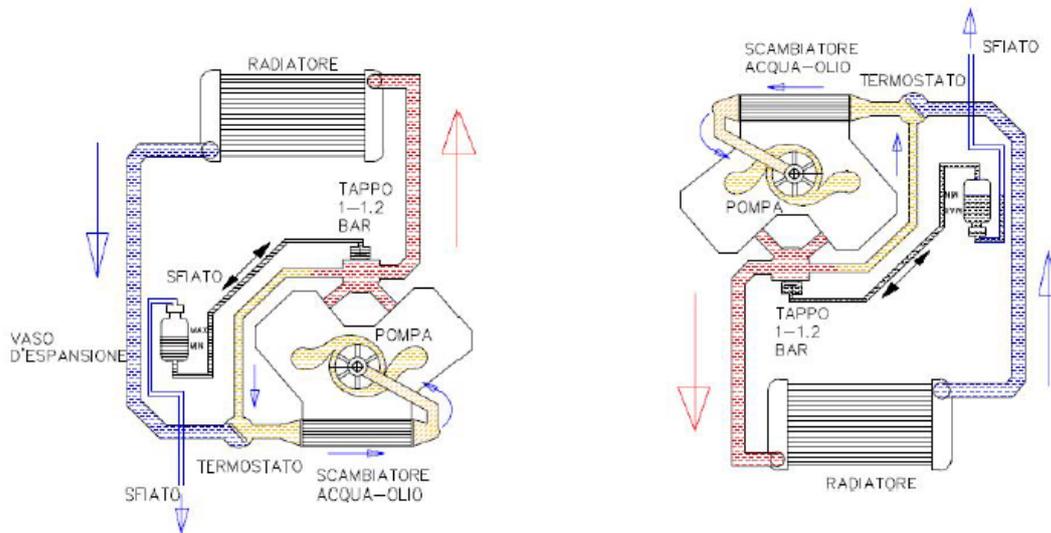


Figura 1.5: Schema del circuito di raffreddamento di motore a combustione interna, fornito da I.C.P.

In Figura 1.5 viene riportato lo schema di un classico circuito di raffreddamento per motore a combustione interna. Questo sistema deve garantire il mantenimento del motore in un intervallo di temperature ottimali per il suo funzionamento, in modo tale da evitarne l'usura prematura e l'espulsione di emissioni dannose dovute al suo malfunzionamento. Nello schema mostrato è possibile distinguere tre elementi principali: il radiatore, lo scambiatore di calore acqua-olio, ovvero l'oggetto di questa dissertazione, e la pompa centrifuga. Quest'ultima permette il ricircolo del liquido refrigerante all'interno del circuito.

Analizzando più nello specifico il radiatore (Figura 1.6, pagina seguente) è possibile affermare che, nonostante un continuo sviluppo di nuove tecnologie e nuovi materiali che permette di migliorarne le caratteristiche specifiche, è sempre possibile distinguere i componenti fondamentali, ovvero: la matrice, luogo in cui avviene lo scambio di calore, e due vaschette posizionate alle estremità della matrice, una delle quali distribuisce il liquido nella matrice stessa, mentre l'altra



Figura 1.6: Dettaglio del radiatore, fornito da I.C.P.

lo raccoglie prima che rientri in circolo. Per quanto riguarda la geometria della matrice, sono presenti varie soluzioni costruttive, ma quelle maggiormente adottate sono quella a tubi alettati e quella ad alette sinusoidali. Solitamente i radiatori per motori a combustione interna ricadono nella prima categoria, come in questo caso. Inoltre, è importante definire la direzione dei flussi, anche qui sono possibili più soluzioni. Quella solitamente adottata nei radiatori è quella a flussi ortogonali dove i tubi sono alettati in modo tale da convogliare il flusso d'aria perpendicolarmente rispetto a quello del liquido. Un'altra soluzione adottata è quella dei flussi paralleli contro corrente, come nel caso dello scambiatore acqua-olio progettato. Infine, i materiali che vengono utilizzati per la costruzione di questi componenti devono tassativamente possedere le seguenti caratteristiche:

- Buona conduttività termica;
- Elevata malleabilità, in quanto è necessario raggiungere spessori dell'ordine dei 0.1 mm;
- Compatibilità con il processo di brasatura;
- Buona resistenza alla corrosione.

Questi fattori hanno portato ad un ampio utilizzo dell'alluminio e delle sue leghe, ma non solo. In passato venivano anche utilizzati materiali come l'ottone e il rame.

Un altro elemento che contribuisce al funzionamento ottimale del sistema è la valvola termostatica che va ad indirizzare il fluido o verso lo scambiatore acqua-olio o verso il radiatore a seconda della sua temperatura. Infine, l'ultimo componente che è possibile osservare nello schema è la valvola di sfiato con annesso serbatoio, quest'ultimo è presente in quanto necessario per far fronte all'aumento del volume del liquido riscaldato e ad eventuali sbalzi di pressione. La valvola di sfiato è installata per lo spurgo di eventuali bolle d'aria formatesi nel circuito. Un componente non presente nello schema, ma che può essere ritrovato nei sistemi di raffreddamento è la ventola che va ad aumentare il flusso d'aria attraverso il radiatore. Nel caso in studio, tale ventola non è necessaria, in quanto viene sostituita dall'elica del velivolo.

Come descritto in precedenza, il componente principale del liquido refrigerante è l'acqua, l'utilizzo di questo fluido è molto comune in quanto presenta alcuni importanti vantaggi, nonostante comporti anche alcuni svantaggi. Di seguito verranno riportati sia i primi che questi ultimi. Iniziando dai vantaggi essa presenta:

- Un elevato calore specifico che comporta una elevata capacità termica;
- Una ridotta viscosità che comporta un discreto coefficiente di scambio termico e perdite di pressione minime;
- Caratteristiche chimico-fisiche costanti col passare del tempo e al variare della temperatura in un intervallo relativamente ampio;
- Un elevato calore latente di evaporazione, questa caratteristica favorisce una protezione contro possibili surriscaldamenti di parti del motore.

Per quanto riguarda gli svantaggi, se ne individuano due principali, ovvero:

- La temperatura di solidificazione è piuttosto elevata, da qui la ragione per cui è necessario aggiungere additivi che abbassino questa temperatura;
- Presenta un'aggressività chimica verso alcuni materiali, è dunque necessario valutare preventivamente quali materiali compongono il circuito e le sue parti fondamentali come gli scambiatori.

1.2.2 Circuito di lubrificazione

Si passa ora ad analizzare nel dettaglio il circuito di lubrificazione del motore, il cui schema viene riportato in Figura 1.7 (pagina seguente). Come si evince dal nome,

lo scopo principale di questo sistema è quello di lubrificare le parti meccaniche in movimento, infatti è possibile osservare dallo schema come il circuito porti il fluido lubrificante, trattasi di olio, verso gli alberi a camme e le pareti dei cilindri. Inoltre, i componenti del motore che sono bagnati dall'olio risultano essere quelli più sollecitati termicamente, nello specifico i pistoni e le pareti dei cilindri. Da ciò ne deriva la funzione secondaria del sistema, quella di rimuovere calore da questi elementi.

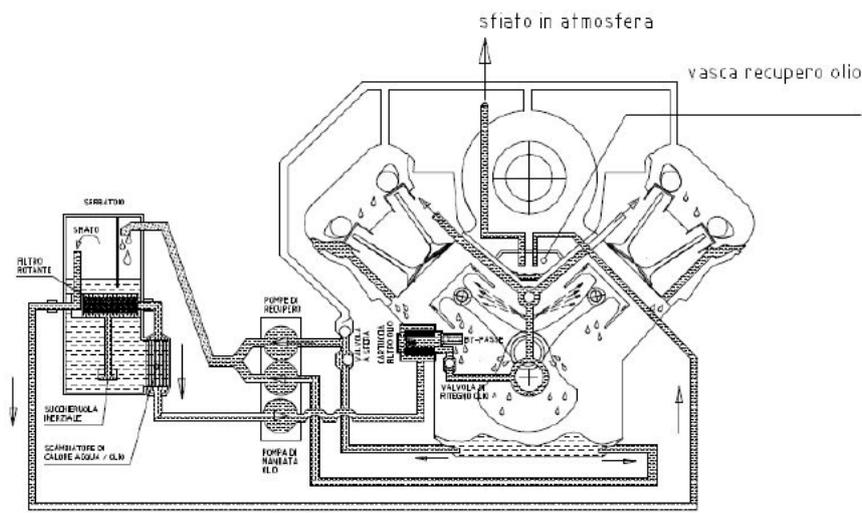


Figura 1.7: Schema del circuito di lubrificazione, fornito da I.C.P.

Rivolgendo l'attenzione verso lo schema riportato sopra è possibile distinguere i vari componenti, i principali vengono elencati di seguito:

- Il serbatoio, dove viene immagazzinato l'olio che non è in circolo;
- Le pompe di mandata e ritorno, necessarie per mantenere in circolo il fluido lubrificante;
- Lo scambiatore di calore acqua-olio, fondamentale per espellere il calore che l'olio ha prelevato dalle superfici calde;
- I filtri, estremamente importanti in quanto è necessario che l'olio sia privo di impurità che potrebbero rovinare il sistema propulsivo;
- Sfiato in atmosfera, come nel caso del circuito di raffreddamento, anche qui è necessario per spurgare eventuali bolle d'aria.

1.2.3 Carichi termici

È stato anticipato come il cilindro e il pistone siano i componenti del motore maggiormente sollecitati termicamente, essendo gli elementi che costituiscono la camera di combustione insieme alla testata e alle valvole di iniezione e aspirazione, anch'esse estremamente sollecitate. Risulta, dunque, interessante analizzare in che modo il calore si distribuisca e diffonda all'interno della camera di combustione di un tipico motore a ciclo Otto. Per fare questo si farà riferimento al testo *Motori a Combustione Interna* [9].

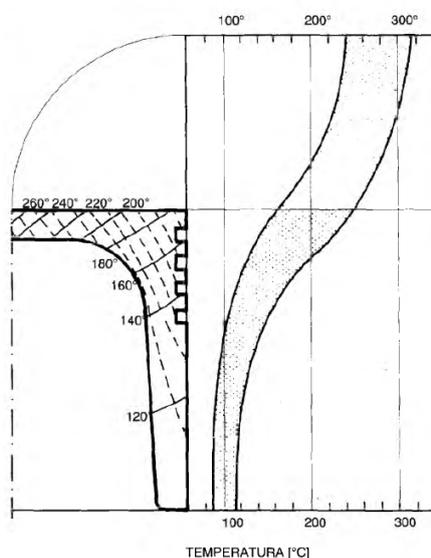


Figura 1.8: Andamento temperature su pistone a testa piatta in alluminio

Partendo dal pistone, si riscontra che esso è responsabile per il trasferimento verso le pareti del cilindro di una percentuale che va dal 30 al 40% del calore totale prodotto dalla combustione che raggiunge il fluido refrigerante. In Figura 1.8² viene riportata una classica distribuzione di temperature sulla sezione assiale di un pistone con testa piatta in alluminio. Sono identificabili i tipici andamenti delle isoterme (linee continue) e di quelle di flusso del calore (linee tratteggiate), vengono anche riportati gli intervalli di variazione delle temperature sulla superficie esterna. I valori effettivi hanno una forte dipendenza rispetto alle condizioni di funzionamento, ovvero ai giri del motore, e alle dimensioni del pezzo. Tuttavia, è possibile osservare che i valori di temperatura massimi vengono registrati al centro della testa e diminuiscono progressivamente man mano che ci si allontana da essa

²Giancarlo Ferrari. *Motori a Combustione Interna*. 2000.

fino ad arrivare alla parte bassa del mantello. Il motivo per cui in quest'ultima regione si registrano valori bassi di temperatura è che nella zona delle fasce elastiche, che la precede, viene trasmesso alla parete del cilindro dal 50 al 60% del calore scambiato tra quest'ultimo e il pistone. L'olio che viene iniettato verso la parete interna del pistone ne favorisce il raffreddamento, con un contributo che va dal 15 al 20%. Nel caso si tratti di pistone con camera di combustione ricavata in esso, la superficie che riceve calore è maggiore rispetto a quella del pistone tradizionale. Solitamente, i punti in cui si raggiungono le temperature maggiori sono i bordi della tazza, ciò è dovuto dal rapporto superficie esposta/volume che risulta essere elevato.

Di seguito vengono descritti gli elementi su cui è necessario concentrare l'attenzione per individuare i valori critici di temperatura:

- Punti a temperatura maggiore: ciò che detta la soglia massima è il materiale, ovvero la sua capacità di mantenere le proprietà meccaniche ad alte temperature. Solitamente vengono utilizzate leghe di alluminio (con Cu e Si) in quanto offrono numerosi vantaggi come la leggerezza, la conducibilità termica e la lavorabilità. Lo svantaggio è che raramente possono essere utilizzati a temperature maggiori dei 350°C, proprio a causa di un repentino decadimento delle proprietà meccaniche;
- Zona delle fasce elastiche: questa zona è molto delicata in quanto è necessario evitare che una temperatura troppo elevata vada a compromettere le proprietà del lubrificante e che i segmenti di tenuta vadano a bloccarsi nelle loro cave. L'area maggiormente a rischio è quella corrispondente alla cava della prima fascia, con temperature che possono arrivare ai 250°C è necessario utilizzare olii con proprietà anti-incollanti, oltre queste temperature si rischia il grippaggio anche con questo tipo di olii;
- Fondo della testa: in questo caso è importante mantenere le temperature al di sotto di una certa soglia per evitare che l'olio di raffreddamento si alteri e che si formino dei depositi carboniosi, i quali vanno ad aumentare l'isolamento termico. Nei pistoni ad alesaggio elevato, oppure in motori altamente sollecitati, è possibile che il solo olio iniettato all'interno della testa non basti a raffreddare il pistone, si rende quindi necessaria l'aggiunta di canalizzazioni all'interno della testa stessa dove possa scorrere acqua o olio per contribuire al raffreddamento;

- Mantello: esso indirizza il pistone all'interno della canna del cilindro, sono dunque presenti dei giochi limitati. Ciò significa che, se al variare delle condizioni di funzionamento del motore gli sbalzi di temperatura sono troppo elevati, c'è il rischio di provocare delle dilatazioni del materiale eccessive e facilitare la formazione di depositi andando ad aumentare la probabilità di grippaggio del pistone all'interno del cilindro. I valori tipici della temperatura nella parte bassa del mantello vanno dagli 80 ai 100°C, mentre per la parte alta si va dai 120 ai 150°C.

Passando ad esaminare la parete del cilindro, è possibile affermare che per prevenirne l'usura adesiva e corrosiva e per evitare il cambiamento dello stato chimico e fisico dell'olio (che andrebbe a peggiorare le sue proprietà lubrificanti) è necessario mantenere la temperatura della parete in un intervallo di valori ben definito, come per il caso del pistone. Dunque, superare tali valori risulterebbe dannoso per il sistema propulsivo. Come è intuibile, le temperature maggiori vengono registrate nella parte superiore del cilindro, quella più vicina all'innesco della combustione, e calano progressivamente con l'allontanarsi da tale zona.

Si analizzano ora i componenti successivi citati all'inizio del paragrafo, ovvero le valvole di scarico e di aspirazione. Queste ultime lavorano a temperature più basse rispetto alle prime, in quanto vengono raffreddate dalla carica nuova all'inizio di ogni ciclo. Nonostante ciò, esse possono raggiungere temperature dell'ordine dei 300/400°C in prossimità del fungo. Per quanto riguarda le valvole di scarico, esse devono sopportare temperature ancora maggiori che, in aggiunta, non sono distribuite in modo omogeneo. Risulta, infatti, molto difficile il loro raffreddamento, se non nella zona della sede e alla guida dello stelo. Oltre ad essere sollecitate termicamente, lo sono molto anche meccanicamente. Tali sollecitazioni sono dovute ai continui urti del fungo contro la sede e dei puntali di comando contro lo stelo. Tutto ciò comporta: delle deformazioni causate da dilatazioni termiche asimmetriche, delle erosioni di natura meccanica dovute ad una carenza di durezza causata dal flusso dei gas, delle corrosioni di natura chimica dovute all'aggressività dei fluidi che le colpiscono e delle rotture dovute agli indebolimenti precedenti. Nel caso di motori termicamente più sollecitati è possibile utilizzare una tecnica per uniformare i valori di temperatura e favorire il trasferimento del calore verso il gambo e successivamente alla guida. La tecnica consiste nell'utilizzare valvole con delle cavità riempite parzialmente con sodio metallico o sali di litio e potassio. Tali sostanze, che a temperatura ambiente si presentano allo stato solido, fondono facilmente con le temperature che si hanno a regime. La fusione, assorbendo

calore, favorisce il raffreddamento del fungo e l'allontanamento del calore da esso.

Si passa, infine, alla testata all'interno della quale si trovano zone il cui raffreddamento risulta difficoltoso, come la parte compresa tra due valvole di scarico di due cilindri adiacenti. Al fine di ottenere un funzionamento ottimale di un motore ad accensione comandata, risulta necessario mantenere la temperatura della superficie interna della testata al di sotto dei 220 °C. In questo modo risulta possibile ottenere un'efficace estrazione di calore dalle sedi delle valvole e dalla candela, riducendo così la probabilità che si formino punti caldi, i quali potrebbero dar luogo ad accensioni anomale.

Di seguito vengono descritti i risultati che si raggiungono andando a limitare i carichi termici effettuando un raffreddamento efficiente:

- Prima di tutto, è possibile evitare che vengano raggiunte temperature eccessive che possano causare danni all'organo in funzione, come il grippaggio del pistone nella canna, o che vadano a peggiorare le proprietà lubrificanti dell'olio;
- In secondo luogo, si vanno a limitare le sollecitazioni eccessive di origine termica, causate dalle deformazioni e dalle dilatazioni impedito. Nel caso in cui si creassero delle deformazioni plastiche durante il funzionamento, queste, una volta spento e raffreddato il motore, porterebbero a delle sollecitazioni che potrebbero superare il limite di rottura del materiale.

A fronte delle osservazioni fatte in questo paragrafo è possibile concludere quanto sia fondamentale avere un sistema di raffreddamento e lubrificazione efficiente ed efficace. Nel paragrafo seguente verrà descritto nel dettaglio lo scambiatore acqua-olio, l'elemento che collega i due circuiti descritti sopra, nonché uno degli elementi fondamentali per raggiungere gli obiettivi appena definiti.

1.3 Scambiatore di calore acqua-olio attuale

Gli ingegneri che si occupano dello sviluppo di motori aeronautici convenzionali si scontrano con continue sfide riguardanti il miglioramento del consumo specifico di carburante (SFC) e la riduzione delle dimensioni e del peso del sistema propulsivo per andare incontro a norme sempre più stringenti sulle emissioni di CO₂ e NO_x. Per riuscire a sottostare alle nuove normative, l'industria dei sistemi propulsivi aeronautici sta studiando nuovi ed avanzati cicli termodinamici dei motori che utilizzano la tecnologia appartenente agli scambiatori di calore per ottenere

recupero di energia e/o raffreddamento. Risulta, dunque, essenziale lo sviluppo di matrici per gli scambiatori di calore il più compatte possibile e con alte efficienze di scambio termico e basse perdite di pressione da poter adottare sia su intercooler che su recuperatori di calore. In vari articoli pubblicati, come quello preso in considerazione in questa sede, appartenente a J. H. Doo et al. [7], si propone l'utilizzo di scambiatori di calore che impiegano una superficie primaria ad ondulazione incrociata nel caso in cui essi siano applicati in sistemi di gestione termica compatti. Il motivo risiede nell'intrinseco fattore di bontà volumetrica relativamente alto che favorisce un design leggero. Sono stati effettuati molti studi su tale geometria, sia numerici che sperimentali, per quanto riguarda le prestazioni aerodinamiche e termiche di varie forme geometriche. L'interesse è dovuto alla buona efficienza termica e alle buone prestazioni aerodinamiche. Nel prossimo capitolo si andrà ad osservare se questo tipo di geometria possa essere compatibile con il processo di produzione scelto: l'Additive Manufacturing.

Lo scambiatore di calore attualmente installato nel motore M09 è uno scambiatore a piastre compatte tra le quali sono presenti delle superfici corrugate. Tali superfici vengono chiamate "perturbatori", una di esse è riportata in Figura 1.9.

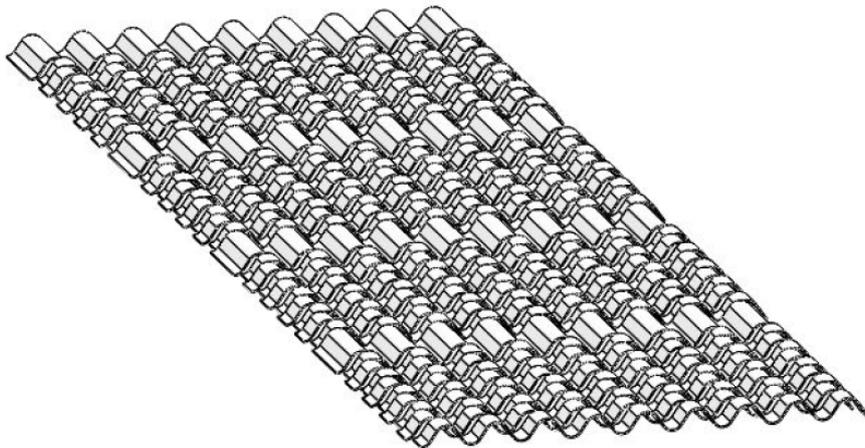


Figura 1.9: Perturbatore dello scambiatore utilizzato attualmente nel motore M09, fornito da I.C.P.

Il perturbatore deve assolvere ad una duplice funzione: la prima è quella di dover generare delle turbolenze nei fluidi che scorrono sulla sua superficie tra le due piastre dello scambiatore. Le turbolenze e i vortici sono generati proprio dalle discontinuità presenti sulla superficie e tali fenomeni vanno ad incrementare il numero di Reynolds, associato alle condizioni del moto del fluido, andando, così, ad aumentare il coefficiente dello scambio termico per convezione. La seconda

funzione è quella di aumentare lo scambio di calore verso le piastre dello scambiatore, il contatto fisico tra il perturbatore e le piastre incrementa, infatti, lo scambio termico per conduzione. In Figura 1.10 viene riportata una vista esplosa dello scambiatore, che equipaggia attualmente il propulsore M09, dove è possibile osservarne la configurazione interna. Le piastre che vanno a separare i due fluidi vengono appunto chiamate "separatori", mentre i perturbatori sono inseriti all'interno delle piastre di passaggio, ogni perturbatore risulta a contatto con un solo fluido. Si può anche notare il fatto che i fori di entrata e di uscita, sia per l'acqua che per l'olio, siano posizionati tutti sullo stesso lato, in seguito verrà mostrata la posizione in cui si va ad inserire lo scambiatore all'interno del motore. Infine, si può affermare che l'esplosivo simuli la modalità costruttiva del pezzo, con ciò si intende che i singoli strati vengono realizzati separatamente e successivamente saldati con brasatura l'uno sull'altro. Questo metodo risulta non ottimale per l'utilizzo in campo aerospaziale, in quanto è caratterizzato da alcuni svantaggi che verranno analizzati in seguito.

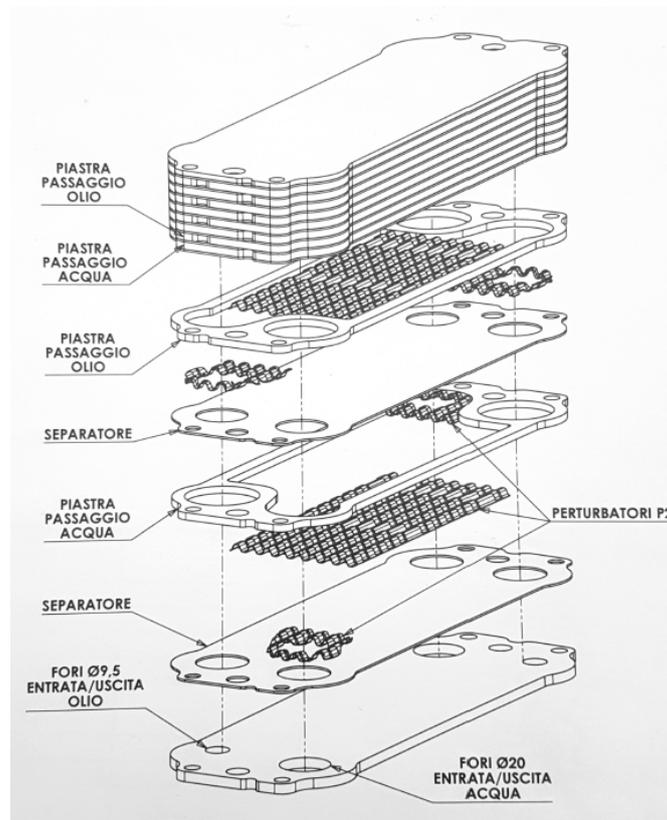


Figura 1.10: Vista esplosa dello scambiatore equipaggiato attualmente sul motore M09, fornito da I.C.P.

1.3.1 Integrazione dello scambiatore nei sistemi di raffreddamento e lubrificazione

Per capire dove sia fisicamente collocato lo scambiatore rispetto al circuito di lubrificazione, è possibile fare riferimento alla Figura 1.7. Di seguito si illustra il meccanismo di funzionamento dei circuiti, per aumentarne la chiarezza si riporta in Figura 1.11 un dettaglio del circuito di lubrificazione con lo scambiatore evidenziato. Come detto in paragrafi precedenti, attraverso lo scambiatore in questione avviene il trasferimento del calore dall'olio di lubrificazione all'acqua. Ci si può riferire a quest'ultima come fluido di lavoro secondario, mentre alla prima come fluido di lavoro primario, questo perché l'olio, all'entrata dello scambiatore, ha una temperatura maggiore rispetto a quella dell'acqua.

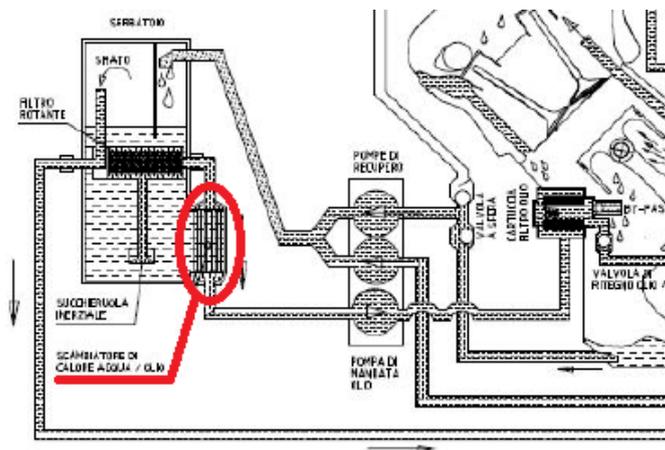


Figura 1.11: Dettaglio del circuito di lubrificazione del motore M09 con scambiatore di calore in evidenza, fornito da I.C.P.

Il sistema di lubrificazione entra in funzione non appena il motore viene acceso. In quell'esatto momento, la pompa dedicata mette in pressione il circuito, andando ad inviare l'olio presente nel serbatoio verso i cilindri. Per evitare che il fluido giunga a destinazione con al suo interno delle impurità, esso viene filtrato. Una volta depurato, è pronto per essere iniettato all'interno della testa dei pistoni, in modo da lubrificare il sistema e da raffreddare i pistoni stessi. Con lo scambio di calore per convezione, la temperatura dell'olio aumenta e necessita, quindi, di essere riabbassata. L'olio iniettato nei cilindri e all'interno delle facce dei pistoni viene raccolto nella parte bassa del basamento del motore, da lì viene recuperato e riportato al serbatoio principale grazie ad una pompa dedicata. Come detto, lo scambiatore è un elemento fondamentale del sistema, in quanto è grazie a questo

componente che l'olio può essere raffreddato e reintrodotta in circolo. Lo scambio di calore avviene al suo interno a causa della diversa temperatura dei due fluidi di lavoro: l'olio, avendo la temperatura maggiore, cede calore all'acqua. Quest'ultima, oltre ad essere utilizzata per il raffreddamento dell'olio, è anche utilizzata per il raffreddamento del basamento del motore. Questi scambi causano un aumento importante della sua temperatura, la quale va anch'essa abbassata per rendere l'acqua nuovamente utilizzabile all'interno del circuito. L'elemento attraverso il quale si svolge questa funzione, già introdotto in precedenza, è il radiatore, uno scambiatore di calore compatto tradizionalmente composto da superfici alettate esposte al flusso di aria esterno che investe il velivolo quando è in movimento.

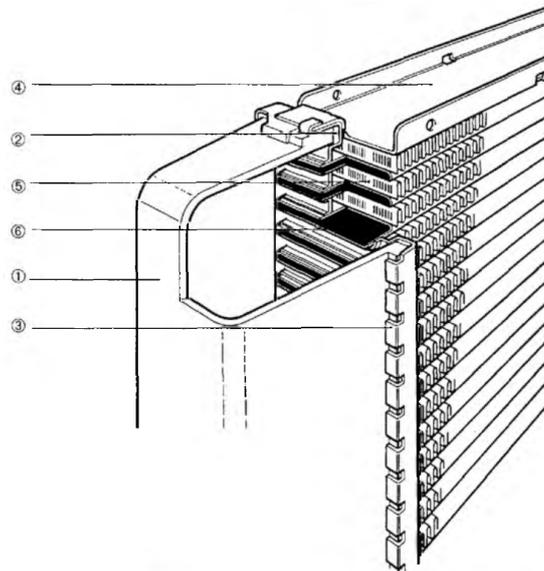


Figura 1.12: Spaccato di un radiatore tradizionale a superfici alettate

In Figura 1.12³ viene riportato uno spaccato di un radiatore tradizionale in modo che sia possibile osservare gli elementi che lo compongono. Prendendo in considerazione i numeri in Figura, si hanno:

1. Vaschetta di distribuzione o raccolta del fluido, può essere costruita in materiali metallici o termoplastici;
2. Guarnizioni di tenuta in elastomero;
3. Collettori in lamiera di alluminio;
4. Traversa di collegamento tra i collettori;

³Giancarlo Ferrari. *Motori a Combustione Interna*. 2000.

5. Alettatura ondulata in lamierino di alluminio;
6. Tubi piatti in alluminio all'interno dei quali scorre il liquido di raffreddamento.

I flussi del liquido di raffreddamento e dell'aria, in questo caso, risultano perpendicolari tra di loro, altre soluzioni costruttive sono possibili [9].

1.3.2 Geometria dello scambiatore acqua-olio

In questo paragrafo verranno riportate le specifiche riguardanti lo scambiatore attualmente installato nel motore M09. Le misure mostrate di seguito sono state rilevate direttamente dal disegno CAD fornito da I.C.P., perciò le aree delle superfici, i volumi e i pesi sono stime effettuate dal software. Il materiale assegnato al modello è la lega di alluminio 1060 con una densità media di 2700 kg/m^3 .

Il perturbatore all'interno dello scambiatore ha una geometria sinusoidale, come si può osservare da Figura 1.13 in cui ne viene riportata la sezione trasversale. La prima fila risulta leggermente sfalsata rispetto a quella che la segue, mentre il passo della sinusoide è di 7 mm. Sono presenti due corrugamenti, quello primario che si estende per 12.5 mm e quello secondario, meno esteso, di soli 4.5 mm. Nonostante ci si riferisca al secondo corrugamento come "secondario", esso costituisce la maggior parte del perturbatore, mentre il "primario" si ripete quattro volte e la sua lunghezza totale risulta minore rispetto a quella del secondario. È possibile osservare questo dettaglio in Figura 1.14 (pagina seguente) dove si riporta la vista in pianta del perturbatore.

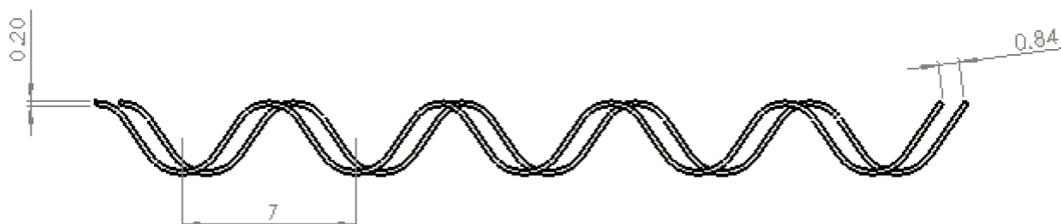


Figura 1.13: Sezione trasversale del perturbatore, fornita da I.C.P.

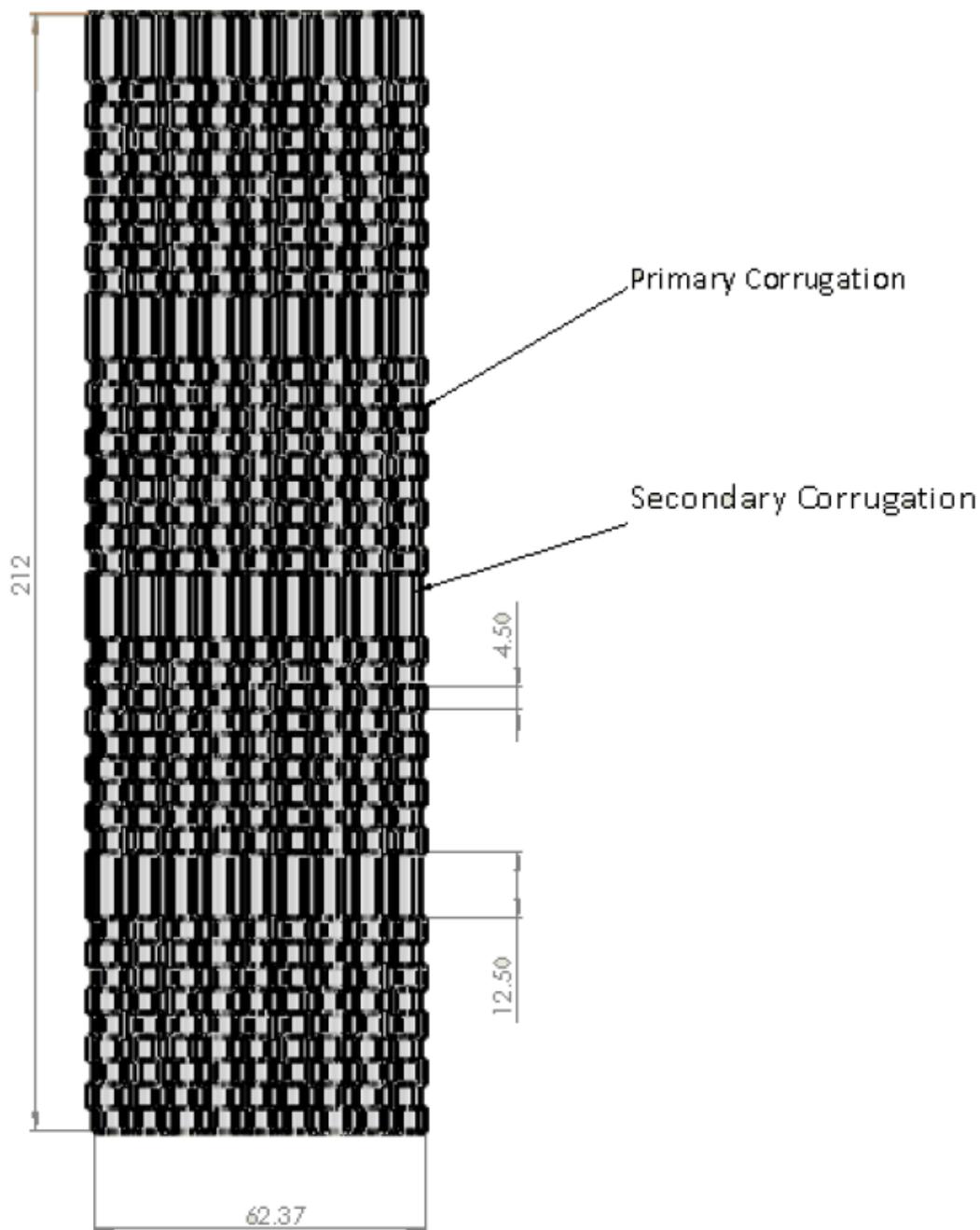


Figura 1.14: Vista in pianta del perturbatore, fornita da I.C.P.

Nelle Figure 1.15 e 1.16 (pagina seguente) vengono riportate rispettivamente le viste in pianta della piastra di passaggio e del separatore, mentre in Figura 1.17 (pagine seguenti) si mostra lo scambiatore assemblato senza, però, il perturbatore. Si può osservare con facilità il percorso che devono compiere i fluidi da un

estremo all'altro. Tutte le Figure seguenti sono state ricavate dal disegno CAD su SolidWorks [17].

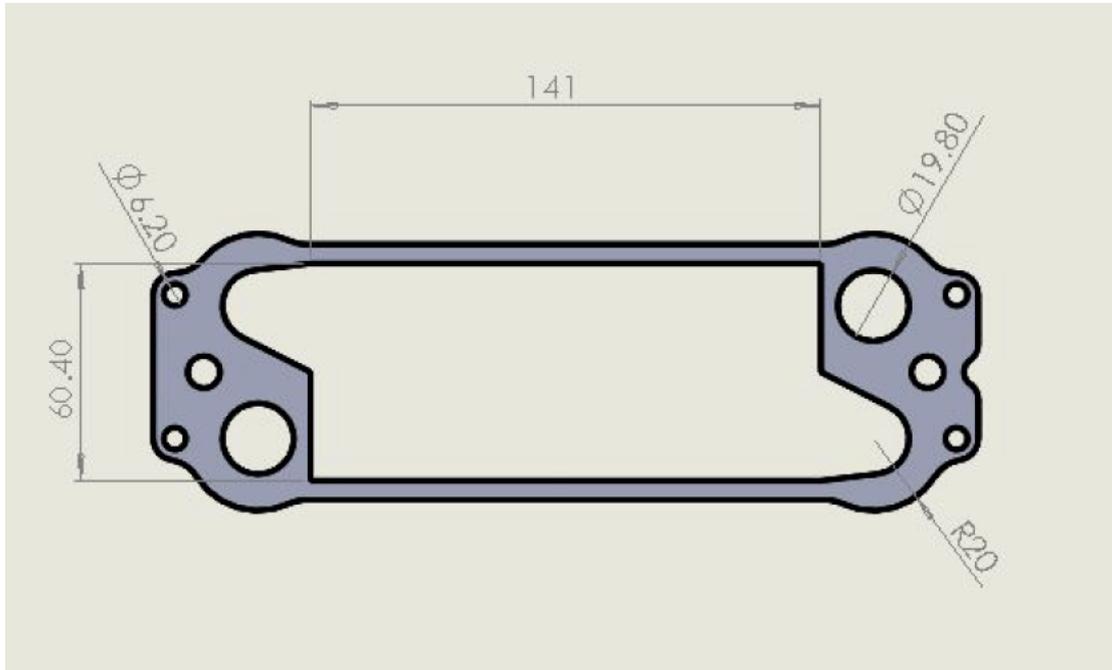


Figura 1.15: Vista in pianta della piastra di passaggio, all'interno della quale si colloca il perturbatore

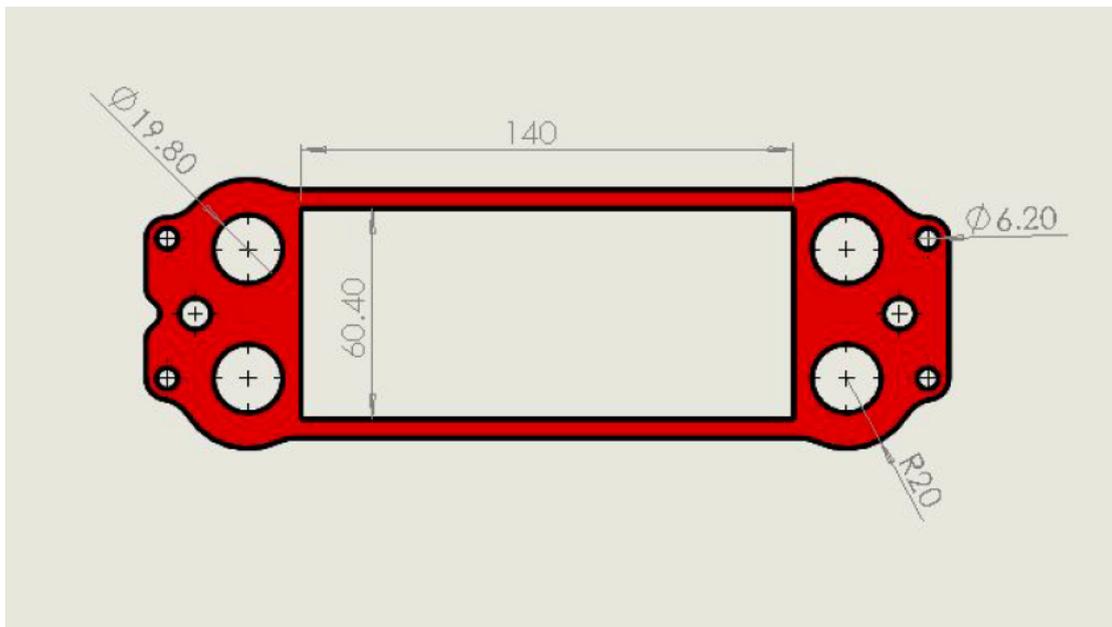


Figura 1.16: Vista in pianta del sparatore



Figura 1.17: Vista del canale di scorrimento del fluido con scambiatore assemblato

Nelle Tabelle 1.2, 1.3 e 1.4 [17] (pagina seguente) vengono riportate rispettivamente le specifiche geometriche e di peso della singola piastra di passaggio, del singolo perturbatore e del singolo separatore.

Specifica	Valore [Unità di misura]
Lunghezza	141 mm
Larghezza	60.4 mm
Altezza	3 mm
Peso	84.13 g

Tabella 1.2: Specifiche della piastra di passaggio, valutate attraverso il modello CAD

Specifica	Valori totali [Unità di misura]	Corrugamento primario [mm]	Corrugamento secondario [mm]
Lunghezza	140 mm	12.5	4.5
Larghezza	62.37 mm		
Altezza	3.5 mm		
Spessore	0.2 mm		
Superficie	37160 mm ²		
Volume	3580 mm ³		
Peso	9.67 g		

Tabella 1.3: Specifiche del perturbatore, valutate attraverso il modello CAD

Specifica	Valore [Unità di misura]
Lunghezza	141 mm
Larghezza	60.4 mm
Altezza	0.6 mm
Peso	8.52 g

Tabella 1.4: Specifiche del separatore, valutate attraverso il modello CAD

1.3.3 Prestazioni dello scambiatore

Uno degli obiettivi principali che vengono posti per la costruzione di un nuovo scambiatore, oltre a quello di ottenere uno scambio di calore soddisfacente, è quello di ridurre al minimo le perdite di pressione nei due fluidi che lo attraversano. La criticità più significativa dello scambiatore attuale risulta proprio essere l'alta perdita di pressione che avviene nel circuito dell'acqua. Un altro aspetto problematico è il peso, che risulta essere piuttosto elevato. Un componente più leggero andrebbe ad impattare positivamente sul resto del motore e sul velivolo in generale e, utilizzando il processo di additive manufacturing, è possibile ottenere questo alleggerimento.

In I.C.P. sono stati effettuati i test necessari per verificare le prestazioni del motore e dello scambiatore, i risultati ottenuti sono riportati in tabelle e grafici nelle pagine seguenti. Si potranno, dunque, notare le perdite di pressione che si proveranno a ridurre con il nuovo design illustrato nei capitoli successivi in modo tale da diminuire la potenza richiesta alle pompe.

Di seguito si elencano le caratteristiche significative dello scambiatore, che viene mostrato in Figura 1.18 (pagina seguente):

- 13 canali di flusso, di cui 8 per l'acqua e 5 per l'olio;
- Ogni piastra di passaggio ha al suo interno un perturbatore;
- Ogni canale ha un'altezza di 3 mm;
- L'altezza totale dello scambiatore è di 54.4 mm;
- Costruito in lega di alluminio;
- Il peso totale è di circa 1500 g;
- Pressione di esercizio nucleo acqua-olio di 1.5 bar.

Le dimensioni esterne del nuovo scambiatore verranno mantenute sostanzialmente identiche a quelle dello scambiatore attuale, in quanto dovrà essere inserito

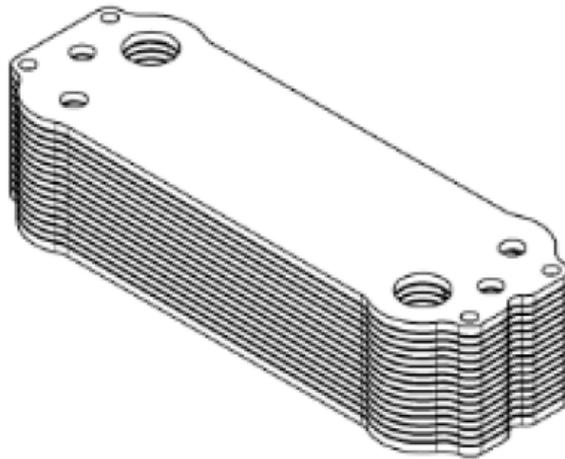


Figura 1.18: Scambiatore attuale, fornito da I.C.P.

nello stesso punto all'interno del motore e quest'ultimo non deve necessitare di alcuna modifica. Ancora più importante è l'interfaccia tra motore e scambiatore, che rimarrà invariata. In Figura 1.19 viene mostrato il luogo in cui lo scambiatore va inserito. Si possono notare i quattro fori attraverso i quali scorrono i fluidi, la tenuta è garantita da 4 o-ring (colorati di nero in figura), e due dei quattro fori M6 utilizzati per fissare lo scambiatore al basamento del motore.

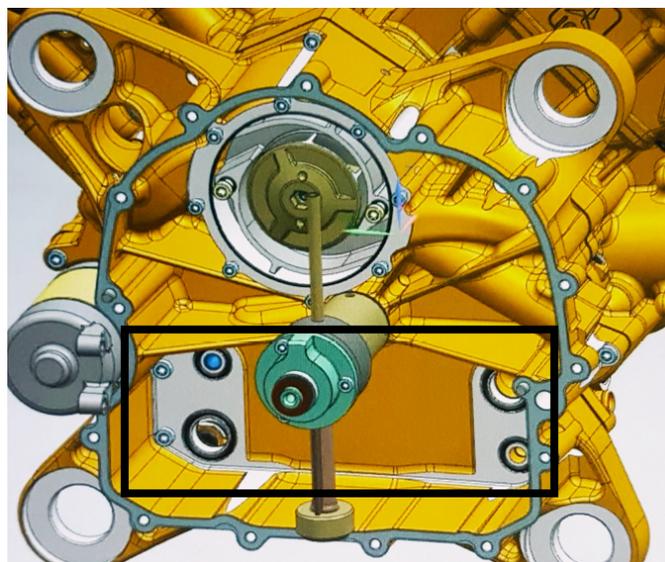


Figura 1.19: Vista del punto in cui si va ad inserire lo scambiatore all'interno del motore, fornita da I.C.P.

I test sono necessari per raccogliere dati importanti, utili per verificare se il sistema stia lavorando in modo corretto ed efficiente. Queste verifiche devono es-

sere svolte per diverse condizioni di lavoro e quando si inizia una sessione di test è presente una quantità importante di parametri che caratterizza il comportamento del sistema. Risulta quindi necessario compiere una selezione sui parametri che si vogliono monitorare. Si cerca di optare per quelli che vanno a caratterizzare meglio il comportamento del sistema che si vuole analizzare e si vanno ad effettuare i test nelle condizioni più critiche in cui si suppone che il sistema debba operare. In tal modo, nel caso di corretto funzionamento, è possibile affermare che il sistema sia in grado di operare correttamente in tutte le condizioni meno impegnative. In questo caso, una delle condizioni peggiori può essere quella in cui viene richiesta la massima potenza al motore. Nelle pagine seguenti vengono riportate le Tabelle, fornite da I.C.P., in cui sono stati raccolti i dati, come pressioni, portate e temperature, al variare dei giri al minuto del motore. In particolare, in Figura 1.20 si riporta la tabella con i rilievi appartenenti al circuito di raffreddamento, ovvero all'acqua, mentre in Figura 1.21 si riporta quella riguardante il circuito di lubrificazione, ovvero l'olio.

RPM	Pressione uscita testa	Portata cilindro 1	Portata cilindro 2	Portata totale	Press.Entrata girante (bar)	Press. Entrata canale Pompa	Perdita di carico	Temp. Acqua
2500	0.5	15	16	31	0.31	0.28	0.22	82
3000	0.5	18	20	38	0.24	0.21	0.29	83
3500	0.5	21.5	23.5	45	0.12	0.07	0.43	81
4000	0.5	24.5	25.5	50	-0.05	-0.1	0.60	79
4500	0.5	27.5	28.5	56	-0.17	-0.22	0.72	79
5000	0.6	28	31	59	-0.24	-0.31	0.91	80
5500	0.75	33.5	35	68.5	-0.33	-0.43	1.18	81
6000	0.9	37	36	73	-0.35	-0.4	1.30	82
6500	1.1	38.5	37.5	76	-0.35	-0.36	1.46	84
6650	1.05	38.5	37.5	76	-0.35	-0.36	1.41	83

Figura 1.20: Portate e pressioni del circuito di raffreddamento, fornite da I.C.P.

RPM	Portata olio(l/min.)	Press. uscita scambiatore(Bar)	Pressione entrata scambiatore(bar)	Temperatura olio
2000	8	-0.1	-0.001	108
2500	10	-0.15	-0.015	108
3000	11.5	-0.2	-0.032	109
3500	13.5	-0.23	-0.03	110
4000	15.8	-0.26	-0.025	111
4500	17.8	-0.3	-0.01	111
5000	19.7	-0.33	-0.01	113
5500	21.7	-0.36	-0.005	113
6000	23.5	-0.38	-0.008	114
6500	25	-0.39	-0.035	115
7000	26	-0.4	-0.02	115

Figura 1.21: Portate, pressioni e temperature del circuito di lubrificazione, fornite da I.C.P.

Dalla prima Tabella è possibile verificare quanto affermato in precedenza, ovvero la presenza di una criticità per quanto riguarda le perdite di carico. Si ha, infatti, una perdita di carico di 1.46 a 6500 RPM che poi si riduce a 1.41 a 6650, rimanendo, comunque, piuttosto elevata. Dal momento che la potenza della pompa dell'acqua è fissa, ci si pone come obiettivo di ridurre le perdite andando a creare una nuova geometria compatibile con il processo produttivo utilizzato.

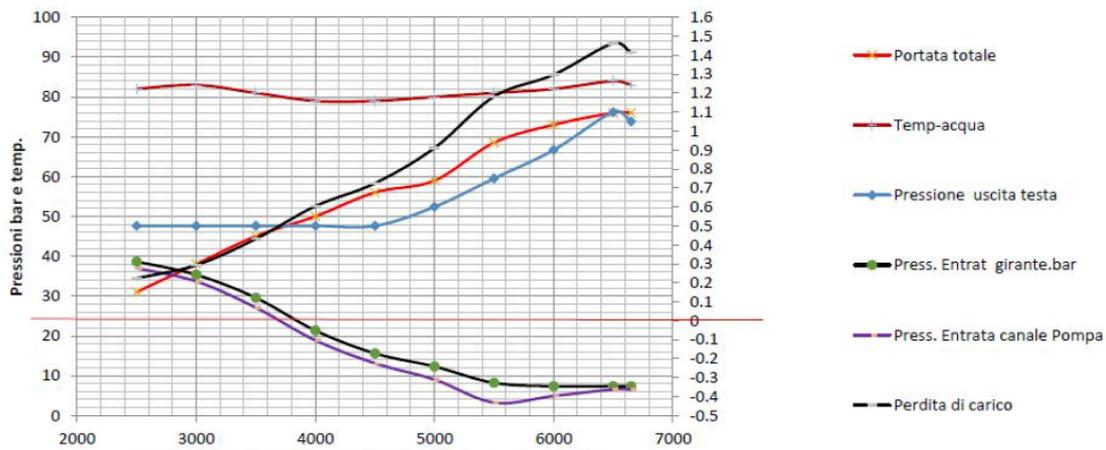


Figura 1.22: Portate, pressioni e temperature del circuito di lubrificazione, fornite da I.C.P.

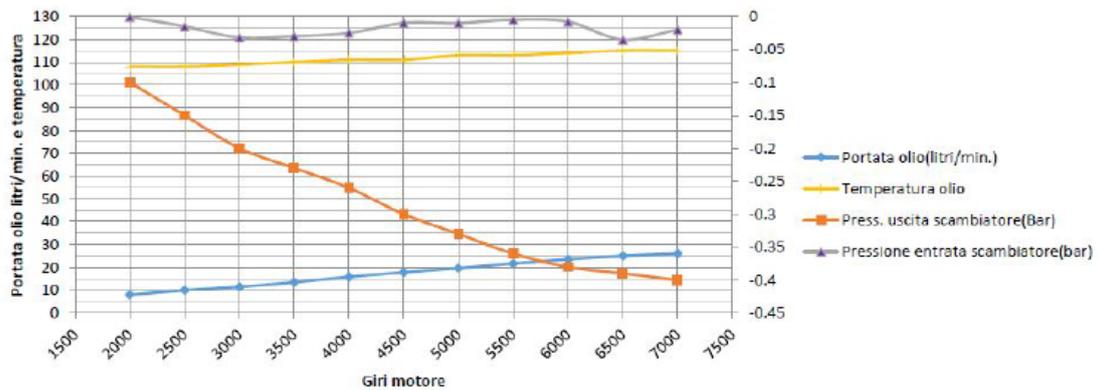


Figura 1.23: Portate, pressioni e temperature del circuito di lubrificazione, fornite da I.C.P.

Nei grafici di Figura 1.22 e Figura 1.23 vengono riportate rispettivamente le curve del circuito di raffreddamento e di quello di lubrificazione ricavate dai rilevamenti delle Tabelle riportate sopra. Nel primo grafico vengono assegnati all'asse delle ascisse i giri del motore al minuto, mentre a quello delle ordinate vengono assegnati: a sinistra, le temperature, le pressioni e la portata totale dei cilindri,

a destra le perdite di carico. Nel secondo grafico l'asse delle ascisse rimane invariato, mentre l'asse delle ordinate riporta: a sinistra la portata dell'olio nello scambiatore e le temperature, a destra le pressioni.

1.3.4 Saldatura con brasatura: pregi e difetti

Come anticipato, lo scambiatore utilizzato attualmente è composto da molteplici strati in alluminio, i quali vengono saldati assieme attraverso la brasatura. Quest'ultima è una tecnica di saldatura tra metalli nella quale si uniscono due o più componenti andando a fondere un metallo di riempimento nel punto in cui si vogliono unire detti componenti. Per fare ciò, è necessario che il metallo di riempimento abbia una temperatura di fusione inferiore rispetto a quella del metallo di cui sono composti i componenti da saldare. La brasatura, quindi, differisce da una saldatura tradizionale in quanto, in quest'ultima, entrano in gioco temperature diverse e si vanno a fondere direttamente i componenti che si vogliono unire. Inoltre, nel caso della brasatura è richiesta una maggiore precisione nel far combaciare i componenti che si vogliono unire. L'utilizzo di questo tipo di saldatura può risultare in alcuni problemi che andrebbero a compromettere il funzionamento ottimale dello scambiatore di calore.

È bene, dunque, analizzare i pregi e i difetti relativi a questo metodo, i primi sono descritti di seguito [3]:

- Non dovendo fondere il metallo di base, è possibile avere un ottimo controllo sulle tolleranze e un collegamento pulito, senza necessitare finiture secondarie;
- È possibile brasare metalli diversi tra loro, come alluminio, argento, rame, oro e nickel, o non metallici, come ceramiche metallizzate;
- È possibile brasare componenti complessi con più parti in modo economicamente vantaggioso;
- La parte brasata può essere rivestita o ricoperta per scopi protettivi;
- Il processo di brasatura è facilmente reso autonomo per produzioni di massa, in quanto i parametri del processo sono poco sensibili ai cambiamenti;
- In generale, la brasatura produce una distorsione termica al materiale minore rispetto alla saldatura tradizionale, ciò è dovuto al riscaldamento uniforme del pezzo brasato.

Di seguito si descrivono gli svantaggi principali:

- Il principale risulta essere la minor resistenza della giunzione rispetto a quella di una saldatura tradizionale, in quanto, solitamente, il metallo di riempimento risulta essere meno resistente di quello principale;
- Le giunzioni brasate possono subire dei danni se il componente viene utilizzato ad alte temperature;
- Le giunzioni brasate richiedono un'estrema pulizia delle superfici dei componenti che devono essere uniti. A volte può essere necessario l'utilizzo di flussanti per la preparazione delle superfici;
- Solitamente, il colore della giunzione differisce da quello del resto del componente, facendo risultare il tutto antiestetico.

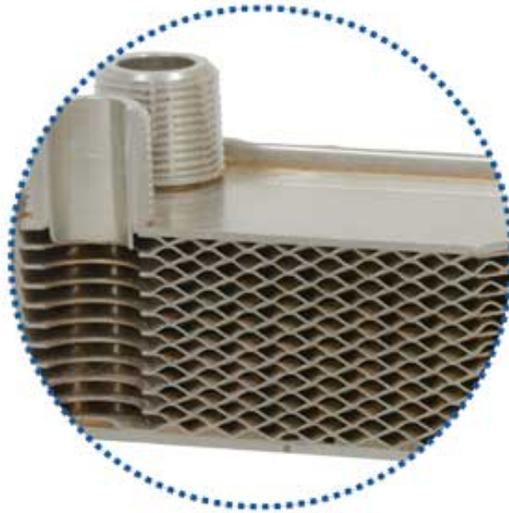


Figura 1.24: Esempio di scambiatore di calore realizzato con brasatura [6]

In Figura 1.24⁴ viene riportato un esempio di uno scambiatore di calore realizzato tramite saldatura con brasatura. Questo tipo di scambiatori è molto diffuso nelle applicazioni industriali, in quanto questa pratica permette di ottenere soluzioni compatte e flessibili che garantiscono ottime prestazioni ad applicazioni che lavorano ad alte temperature e/o ad alte pressioni. A questo si aggiunge l'economicità del processo. Nonostante i vantaggi descritti, le alte temperature e le forti vibrazioni a cui è sottoposto lo scambiatore attualmente utilizzato, combinate ad una possibile difettosità della brasatura, possono causare dei malfunzionamenti.

⁴8.

In caso di rottura della giunzione, il trasferimento di calore per conduzione si interromperebbe riducendo drasticamente le prestazioni. Dal momento che ispezionare l'interno dello scambiatore per verificarne lo stato durante la manutenzione risulta piuttosto complicato, è preferibile utilizzare un nuovo metodo costruttivo che possa ovviare a questi problemi. Utilizzando l'additive manufacturing come processo produttivo si vanno ad eliminare tutte le giunzioni tra le varie piastre, riducendo drasticamente il rischio di rottura. Un altro vantaggio che apporterebbe l'utilizzo di questa tecnica innovativa sarebbe la possibile riduzione del peso che potrebbe arrivare ad un terzo del totale.

Nel prossimo capitolo si andrà a fornire una descrizione generale di questa tecnologia, andandone a sottolineare i pregi e i difetti e le possibilità di costruzione che offre.

Capitolo 2

Additive Manufacturing

Questa tecnologia permette di creare oggetti caratterizzati da una geometria complessa partendo da un modello CAD 3D, riducendo gli sprechi di materiale rispetto a lavorazioni tradizionali. Come spiega il Professor Iuliano [14], commercialmente è possibile trovare molte tecnologie additive, che sono, tuttavia, pensate prettamente per l'utilizzo domestico e che quindi si allontanano dalla precisione e dalla sicurezza che possono avere le tecnologie industriali. Questi sistemi, infatti, riescono a lavorare con volumi che raggiungono il metro cubo e sono in grado di lavorare senza la continua presenza di un operatore, assicurando, allo stesso tempo, alti livelli di prestazioni per quanto riguarda tolleranze dimensionali, rugosità superficiali e caratteristiche meccaniche.

Per riassumere la storia recente di questa tecnologia si può partire dal 1984, quando le tecniche di SLA (*StereoLitographic Apparatus*), ovvero le prime tecniche di prototipazione rapida, sono state brevettate. Si passa al 1987, quando le prime macchine di prototipazione rapida iniziano a diffondersi commercialmente. Nel 1990 viene sviluppato il *rapid casting* per creare le anime in sabbia in AM per aumentare la velocità del processo. I primi inserti per stampi vengono prodotti nel 1995 e nel 2000 vengono realizzati componenti finali. Dal 2010 ad oggi vi è stato un aumento esponenziale dell'installazione di macchine per l'Additive Manufacturing, il che denota l'intenzione del mercato di investire in questa tecnologia. Tecnologia nata con l'obiettivo di velocizzare i tempi di costruzione dei prototipi, da qui il nome prototipazione rapida, che ancora oggi si sfrutta per questo compito nella maggior parte delle applicazioni. L'Additive Manufacturing si sta diffondendo in vari settori, da quello aerospaziale ed automotive a quello della gioielleria. In

Figura 2.1¹ viene riportato un esempio di ciò che è possibile realizzare con questa tecnologia nel campo aerospaziale, ovvero un'ala di un velivolo senza pilota. Le forme possono essere ancora più complesse, come verrà mostrato più avanti [14].

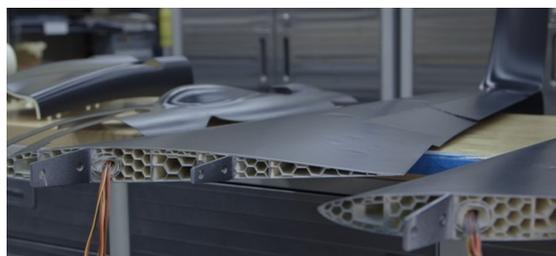


Figura 2.1: Esempio di ala realizzata in additive manufacturing

2.1 Ciclo della fabbricazione additiva

Il processo che viene seguito per la fabbricazione additiva è valido per tutti i campi in cui essa viene utilizzata. Di seguito verranno descritti in breve i vari passaggi che devono essere seguiti, seguendo ciò che descrive il Professor Iuliano [14]:

- È sempre necessario iniziare da un disegno CAD, il modello matematico va quindi convertito in un file ad estensione STL (*Standard Triangulation Language*). Questa estensione va ad approssimare la superficie del pezzo con elementi triangolari di dimensioni variabili a seconda della risoluzione desiderata e della geometria del componente. Nonostante questo formato non sia ancora privo di difetti, ad oggi risulta il più affidabile ed è sufficiente integrarlo con software correttivi per ottenere ottimi risultati. In Figura 2.2² viene mostrato un esempio di come si presenta un componente in formato STL, come si può notare l'intera superficie è avvolta dagli elementi.

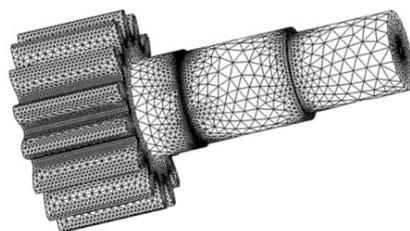


Figura 2.2: Esempio di componente salvato su file con estensione STL

¹23.

²24.

Nel caso in cui il componente disegnato abbia delle superfici curve, si verifica un errore durante la conversione del file che può essere al più ridotto al minimo, ma non eliminato. Esso è il cosiddetto "errore cordale ϵ " o errore di *faceting*, ovvero è l'errore di approssimazione che si genera quando si utilizzano elementi bidimensionali per approssimare delle superfici non piane, come è possibile osservare in Figura 2.3³ dove gli elementi che approssimano la superficie curva la vanno a tangere solo con i vertici. L'errore può essere, quindi, ridotto andando a ridurre la lunghezza dei lati dei triangoli, ma non può essere azzerato.

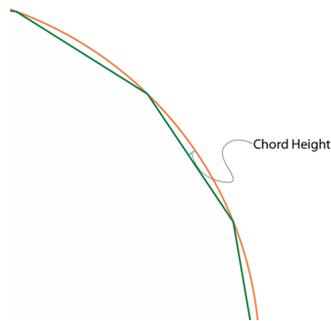


Figura 2.3: Esempio di errore di *faceting*

- Una volta ottenuto il file del componente, si vanno a generare dei supporti attraverso software appositi per la messa in macchina del componente là dove sia necessario per la stampa. I supporti solitamente sono dello stesso materiale del componente che si sta costruendo, ma possono essere di materiale diverso nel caso siano presenti più ugelli nella macchina. Tali supporti andranno poi rimossi meccanicamente o dissolti con soluzioni apposite (nel caso di materiale diverso tra componente e supporti). La loro funzione è quella di separare il pezzo dalla piattaforma della macchina e di supportare le superfici sporgenti, che altrimenti collasserebbero durante il processo.

Si possono osservare i supporti generati per entrambi i motivi di cui sopra in Figura 2.4 (pagina seguente), dove si riporta la foto dello scambiatore di calore prodotto da Ellena appena estratto dalla macchina. Nel riquadro superiore si può notare un supporto utile a sorreggere la struttura durante la stampa, mentre in quello inferiore sono presenti i supporti di separazione che si estendono per tutta la lunghezza dello scambiatore.

³22.

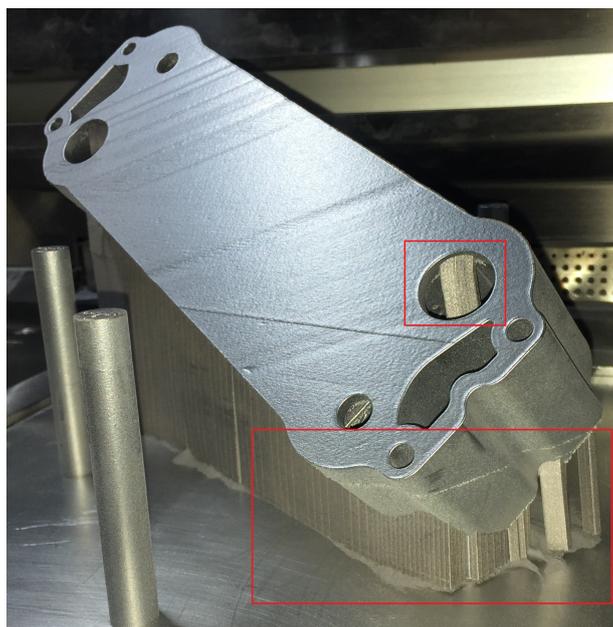


Figura 2.4: Esempio di supporti sullo scambiatore prodotto da Ellena

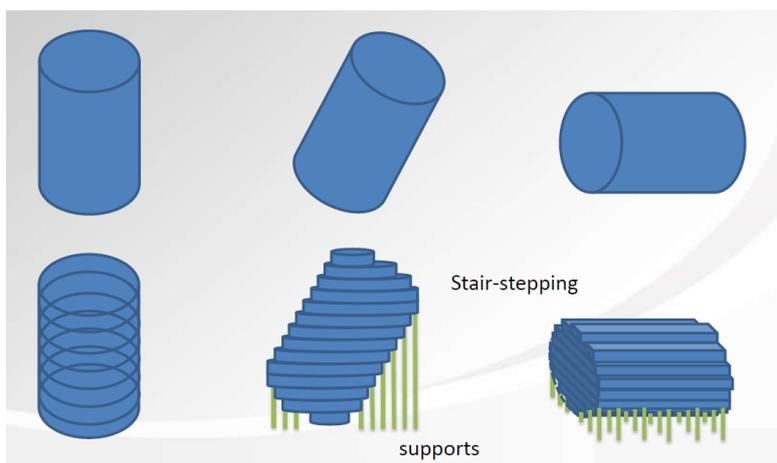


Figura 2.5: Esempio di *slicing* su cilindro

- Si passa, dunque, allo *slicing*. Questo processo, che avviene nuovamente tramite software dedicato, comporta la generazione di piani paralleli tra di loro che vanno a sezionare il componente perpendicolarmente rispetto ad un asse deciso dal progettista. La distanza tra questi piani varia a seconda del materiale che verrà utilizzato. Per i polimeri la distanza è maggiore rispetto a quella necessaria per i metalli. Come si può osservare in Figura 2.5⁴, questo passaggio fa sì che durante la stampa del pezzo si generi del materiale in eccesso che va a determinare una superficie irregolare. Maggiore la distanza

⁴Luca Iuliano. «Materiale didattico: Tecniche di fabbricazione additiva». 2017.

tra due piani, maggiore sarà il materiale superfluo depositato. Uno dei modi per ridurre il materiale in eccesso e i supporti necessari è studiare l'orientamento migliore del pezzo. Nel caso del cilindro in Figura è semplice, ma solitamente i pezzi sono più complessi come lo dimostra lo scambiatore.

- Compiuti questi passaggi, il pezzo è pronto per essere prodotto. Una volta terminata la stampa, esso dovrà essere rimosso dalla macchina e ripulito dalle polveri. Si conclude con le operazioni di *post-processing*, ovvero: rimozione dei supporti, trattamenti termici, finiture superficiali (fresatura, sabbiatura) e lavaggio per rimozione totale delle impurità.

2.2 AM: vantaggi e svantaggi

Una volta descritto il processo si può passare ad esporre i vari vantaggi e svantaggi generali attribuiti a questo processo produttivo. Sia i primi che i secondi si possono riferire al metodo in sè e al prodotto finale, dunque di seguito verranno esposti entrambi. Si inizia con i vantaggi relativi al processo:

- Una singola macchina è in grado di creare forme geometrie illimitate, dandole una estrema flessibilità;
- La necessità di attrezzature esterne è minima;
- Non sono necessari dispositivi di bloccaggio all'interno della camera durante lavoro, come accade per esempio per le macchine CNC;
- L'intervento di un eventuale operatore è minimo;
- I tempi e i costi sono relativamente slegati dalla complessità del pezzo e condizionati principalmente dalle dimensioni.

Si passa ora ai vantaggi legati al prodotto finale:

- Si ha una quasi totale libertà di progettazione;
- I componenti sono solitamente più leggeri rispetto a quelli costruiti con altre tecniche convenzionali;
- Si rende possibile una maggiore integrazione tra più parti;
- Si ha la possibilità di progettare un design più ergonomico;
- La personalizzazione possibile del prodotto finale è elevata.

Come fatto per i vantaggi, di seguito si elencano gli svantaggi legati al processo:

- I volumi di lavoro risultano essere piuttosto limitati, raramente superano il metro cubo, e legati strettamente alle dimensioni della macchina;
- La velocità di costruzione è limitata: maggiore è la precisione richiesta, ovvero maggiori gli strati di *slicing* e maggiore la densità di materiale nel singolo layer, più lungo sarà il tempo di esecuzione;
- Solitamente, una macchina è in grado di lavorare solo con uno dei materiali disponibili, questo per evitare la *cross-contamination*.

Per quanto riguarda il prodotto si ha:

- La necessità di generare i supporti, andando, quindi, ad utilizzare materiale non utile al componente finale;
- Una scarsa finitura superficiale rispetto alle tecniche convenzionali, da qui la necessità di *post-processing*;
- Una scarsa disponibilità di materiali adatti a questa tecnica;
- I pochi materiali disponibili risultano essere molto costosi.

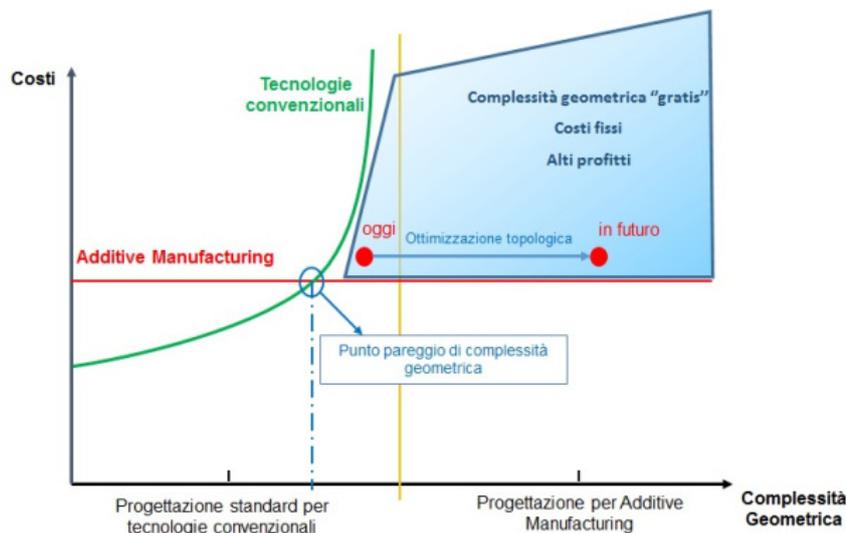


Figura 2.6: Grafico costi-complessità geometrica con confronto tra AM e tecnologie convenzionali

È interessante osservare il grafico in Figura 2.6⁵ legato ai vantaggi economici di questa tecnica rispetto a quelle tradizionali. Sull'asse delle ascisse viene riporta-

⁵20.

ta la complessità del componente che si vuole costruire, mentre su quello delle ordinate vengono riportati i costi. Questi ultimi, per quanto riguarda le tecnologie convenzionali, crescono esponenzialmente con l'aumento della complessità del pezzo, mentre, per l'AM, essi risultano essere slegati dalla complessità e, dunque, pressoché costanti. Le due curve si incrociano nel punto di pareggio, ovvero sotto una determinata complessità del componente conviene ancora realizzare il pezzo con tecniche tradizionali, superato tale punto risulta più conveniente utilizzare l'Additive Manufacturing.

2.3 Classificazione dei processi AM

Attualmente esistono vari processi che si possono raggruppare sotto il campo dell'Additive Manufacturing ed è possibile classificarli utilizzando diversi metodi. Uno dei più usati utilizza come riferimento la tecnologia di base impiegata dalla macchina, che può essere a laser, a fascio di elettroni, ad estrusione, ecc. Un altro metodo si basa sul materiale di partenza che viene utilizzato per la stampa del pezzo. Nello schema di Figura 2.7⁶ (pagina seguente) i processi vengono suddivisi secondo quest'ultimo metodo.

È possibile, dunque, partire da materiale in polvere, in stato solido o in stato liquido, questo caso è possibile solo per i polimeri. In seguito ci si concentrerà sul processo che utilizza un letto di polvere di un singolo materiale, in quanto è quello utilizzato per la costruzione dello scambiatore di calore, oggetto della tesi. Le tecnologie a letto di polvere sono tra le più consolidate e, come si può osservare dallo schema, le tre principali all'interno di questo gruppo sono: l'SLM (*Selective Laser Melting*), l'SLS (*Selective Laser Sintering*) e l'EBM (*Electron Beam Melting*), nei paragrafi seguenti si procederà nel descriverle a fondo.

Prima, però, si presenteranno in generale i sistemi di fabbricazione additiva odierni per metalli, i quali, come menzionato, partono da un modello CAD 3D e, sfruttando la movimentazione controllata da computer e la focalizzazione di una grande quantità di energia, fondono le polveri del materiale selezionato per ottenere un pezzo finito solido una volta che le polveri si sono raffreddate. Alcune di queste macchine utilizzano laser come fonte di energia, mentre altre sfruttano raggi di elettroni o archi elettrici. Inoltre, alcune partono da letti di polvere, mentre altre utilizzano un filo solido come materiale di partenza. I due metodi AM generali per la prototipazione nati una ventina di anni fa sono: il *Powder Bed*

⁶Luca Iuliano. «Materiale didattico: Tecniche di fabbricazione additiva». 2017.

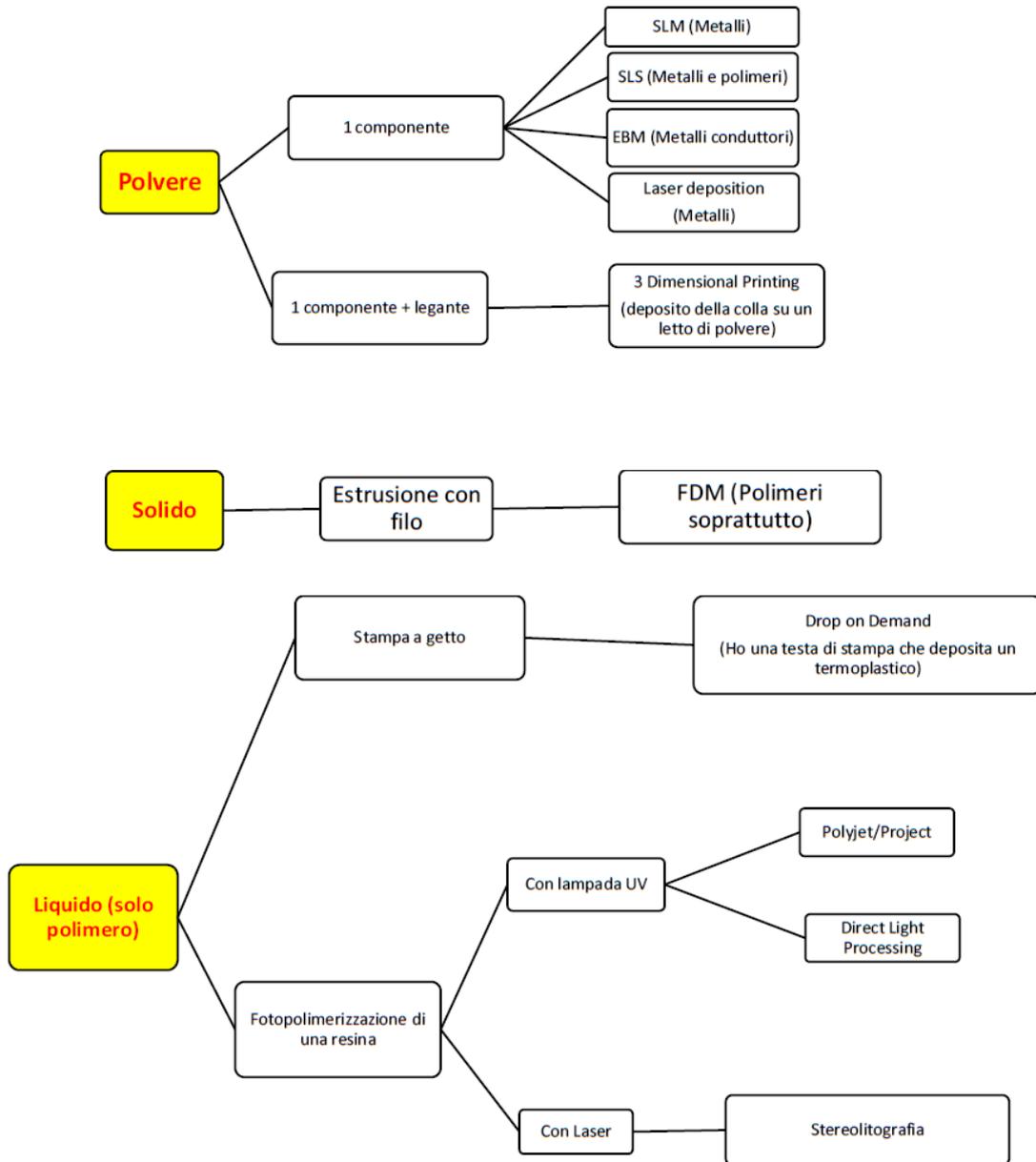


Figura 2.7: Classificazione dei processi secondo il materiale di base utilizzato

Fusion (PBF) e il *Directed Energy Deposition* (DED). Di seguito, per identificare se la tecnologia utilizza il laser o il fascio di elettroni per la fusione, si aggiungerà rispettivamente -L o -EB dopo l'acronimo. A titolo di esempio, nel caso si parli di un processo *Powder Bed Fusion* che sfrutta il laser si utilizzerà la sigla PBF-L.

I processi PBF utilizzano un laser ad alta potenza o un fascio di elettroni che, seguendo il percorso derivante dal layer che si sta stampando del modello STL,

fonde le polveri. Il letto di polveri viene abbassato alla fine del completamento di ogni strato, così che se ne possa stendere un'altro, il quale verrà a sua volta fuso secondo lo schema del modello. Queste fasi si ripetono fino a che il pezzo non è completato. Solitamente ci si riferisce ai processi PBF-L con i termini *Direct Metal Laser Sintering* (DMLS), *Selective Laser Melting* (SLM) o *Selective Laser Sintering* (SLS), mentre il processo PBF-EB viene anche detto *Electron Beam Melting*. Questi nomi variano in base ai venditori principali delle macchine AM, i quali identificano il processo che utilizzano con un nome specifico.

I processi DED prevedono l'erogazione di polveri o l'estrusione di un filo in un punto focale o nella pozza fusa generata da una fonte di energia che può essere fornita da un laser, un fascio di elettroni o un arco elettrico diretti verso la superficie del pezzo, se già presente. Andando così a fondere completamente il filler che viene rilasciato seguendo un pattern specifico derivante dal modello STL del componente che si sta creando. I processi DED-L, che quindi utilizzano il laser come fonte di energia, vengono spesso chiamati in letteratura con nomi come *Laser Engineered Net Shape* (LENS), *Direct Metal Deposition* (DMD) e *Laser Metal Deposition* (LMD), mentre i processi DED-EB vengono chiamati *Electron Beam Freeform Fabrication* (EBF3) o *Electron Beam Additive Manufacturing* (EBAM). Infine, per i sistemi basati sugli archi al plasma si utilizza l'acronimo PA-DED.

2.4 *Selective Laser Melting e Selective Laser Sintering*

Queste due tecnologie vengono raggruppate, in quanto del tutto simili. Come si deduce leggendone il nome, entrambe utilizzano un fascio laser direzionato tramite un sistema a specchi verso la piattaforma di lavoro. La differenza sta nel fatto che con l'SLS non si va a fondere completamente la polvere, ma si va a riscaldare finché essa si scioglie e si lega a livello molecolare. Con questo metodo è dunque possibile controllare la porosità del prodotto finale. L'SLM è in grado di compiere le stesse operazioni, riuscendo però ad effettuare un passo ulteriore, ovvero è in grado di fondere completamente la polvere rendendola un pezzo omogeneo, è possibile utilizzare questa tecnica solo se la polvere di partenza è formata da un solo materiale. Da qui in avanti si farà riferimento al processo di SLM, in Figura 2.8⁷ si

⁷Luca Iuliano. «Materiale didattico: Tecniche di fabbricazione additiva». 2017.

riporta il tipico schema di una macchina AM a letto di polvere dotata di cannone laser.

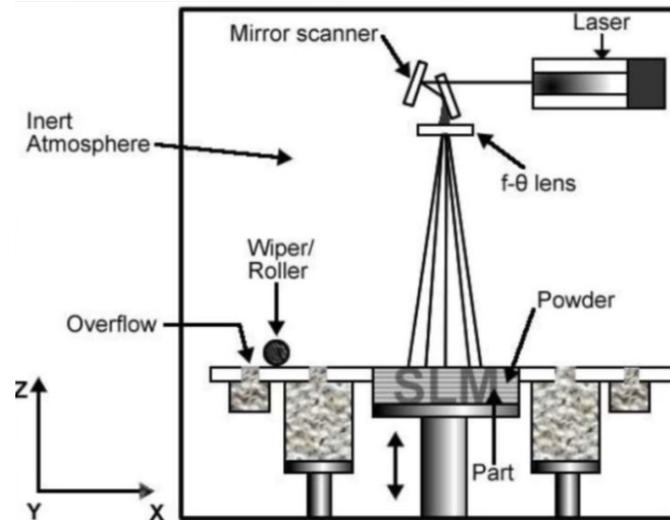


Figura 2.8: Schema di macchina AM a letto di polvere

Come detto, il fascio laser va a colpire il più perpendicolarmente possibile le polveri che giacciono sulla piattaforma di lavoro. Quest'ultima è sostenuta da un elevatore, il quale scorre lungo l'asse Z, come è indicato in Figura. Ai lati dell'elevatore sono presenti sia le vasche che contengono la polvere vergine da depositare, che le vasche più piccole di *overflow*, le quali vanno a raccogliere la polvere in eccesso. Infine, il rullo serve a distribuire e livellare le polveri sul piano.

Durante la lavorazione, la macchina segue quattro fasi, le quali si ripetono fino a che il pezzo non è completato, tali step sono:

- Deposizione e livellamento delle polveri effettuati dallo scorrimento del rullo;
- Fusione locale delle polveri attraverso il laser che segue il layer del file STL, fornito al software della macchina;
- Solidificazione delle zone colpite dal laser con conseguente formazione di grani molto fini;
- Abbassamento della piattaforma di lavoro del valore definito durante lo *slicing*.

Come si può osservare dalla Figura, durante il processo si ha il controllo di un solo asse (Z) e si ha una sola sollecitazione meccanica dovuta al peso delle polveri stesse sulla piattaforma di lavoro. Solitamente il processo avviene in atmosfera,

anche se eseguirlo sottovuoto è preferibile. A meno che non si stiano utilizzando polveri di metalli molto reattivi come il Titanio, in tal caso si va ad inserire in camera Elio o Argon per rendere l'atmosfera inerte.

2.4.1 Laser: caratteristiche e tipologie

I laser generano un raggio di fotoni ad alta densità di energia, che può essere guidato e focalizzato per concentrare una grande quantità di energia su una sezione molto ridotta in grado di fondere e vaporizzare il metallo. Questi laser sono in grado di generare fasci con potenze di centinaia di Watt e di focalizzarli in punti della grandezza di frazioni di millimetro. In questo modo si riesce a concentrare una grande quantità di energia in un'area molto ristretta in grado di sciogliere localmente il materiale che viene colpito.

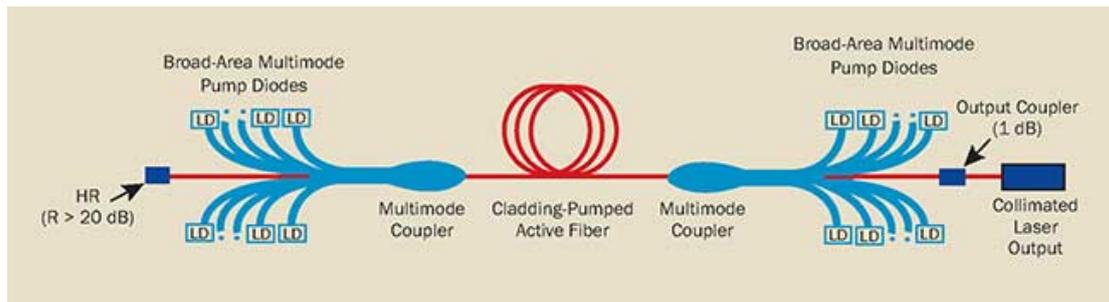


Figura 2.9: Schema di un tipico laser a fibra ottica a modalità singola che utilizza diodi a emettitore singolo

Esiste un vario spettro di tecnologie laser utilizzate nel campo della fabbricazione additiva, come: l'Nd:YAG, i laser a disco e i laser a diodo diretti, ma, attualmente, la maggior parte dei sistemi AM sono equipaggiati con i più recenti laser a fibra ottica, dunque ci si concentrerà su questa tecnologia. Essa viene preferita alle altre in quanto risulta essere più affidabile, più compatta e necessita di una minore manutenzione, riducendone i costi. Per descrivere il principio che sta alla base del funzionamento di questa tipologia di laser, si faccia riferimento allo schema di Figura 2.9⁸. I diodi ottici vengono accoppiati ad una fibra laser attiva la quale è dotata di un rivestimento riflettente e reticoli di Bragg⁹ che riflettono il laser avanti e indietro lungo la lunghezza della fibra. Tale fenomeno va a creare

⁸10.

⁹Componenti in fibra ottica composti da bande di materiali diversi che hanno indici di rifrazione differenti. Posizionandoli in un ordine alternato predefinito è possibile andare a filtrare una determinata lunghezza d'onda [6].

un raggio di luce coeso che viene poi fatto fuoriuscire dall'output del sistema. Solitamente, il raggio viene emesso attraverso l'utilizzo di fibre ottiche addizionali, le quali forniscono un percorso al fascio durevole, flessibile e completamente chiuso per la sua emissione e il contenimento dell'energia luminosa. Queste fibre sono dotate di un sistema di sicurezza che disattiva la macchina nel caso di rottura delle fibre stesse. L'emissione finale del raggio avviene attraverso una serie di elementi ottici e lenti, una volta che esso fuoriesce dalla fibra. La manipolazione del raggio avviene solitamente grazie a specchi mossi magneticamente o dal moto CNC.

Il raggio laser viene, dunque, diretto verso il piano di lavoro e focalizzato nel punto desiderato con una densità di energia sufficiente ad ottenere il grado desiderato di fusione delle polveri. L'energia trasmessa dal laser viene, quindi, riflessa o assorbita dal materiale che si scalda e si fonde, la percentuale tra energia assorbita e riflessa può variare molto rispetto al materiale di cui sono costituite le polveri. Per citare un esempio, l'alluminio ha un coefficiente di assorbimento molto basso. Altri fattori che vanno ad influire sul livello di assorbimento sono il tipo e la lunghezza d'onda del raggio. I laser a fibra Yb:YAG possono passare attraverso elementi ottici di quarzo, come può essere la finestra di una camera inerte, una lente di messa a fuoco o l'interno di una fibra di quarzo. Mentre la lunghezza d'onda di un laser a CO₂ si combina con quella del quarzo facendolo sciogliere. Ciò rende impossibile trasmettere questo tipo di laser attraverso la fibra e, dunque, ne aumenta la difficoltà di utilizzo all'interno di una camera di una macchina AM.

Si noti che, solitamente, a valle dei fattori descritti sopra, l'assorbimento dell'energia trasportata dal laser è molto maggiore quando il metallo è fuso rispetto a quando si trova ancora allo stato solido. Quando il raggio laser colpisce il metallo è possibile che si formino dei pennacchi di metallo vaporizzato o plasma appena sopra la parte fusa, i quali vanno ad assorbire l'energia impedendole di raggiungere la parte fusa stessa. Inoltre, l'aumento di pressione generato dalla rapida espansione del metallo vaporizzato e dal gas surriscaldato può creare una depressione all'interno del metallo fuso intrappolando l'energia, aumentandone l'assorbimento. Questa depressione viene spesso chiamata *keyhole* data la sua forma, è possibile osservarne uno schema in Figura 2.10¹⁰ (pagina seguente).

Nel caso in Figura il laser sta avanzando sul metallo nella direzione indicata, si può notare come il metallo sia fuso dove il laser è già passato, mentre nel punto di contatto si crea il cosiddetto *keyhole*, esso può estendersi profondamente

¹⁰4.

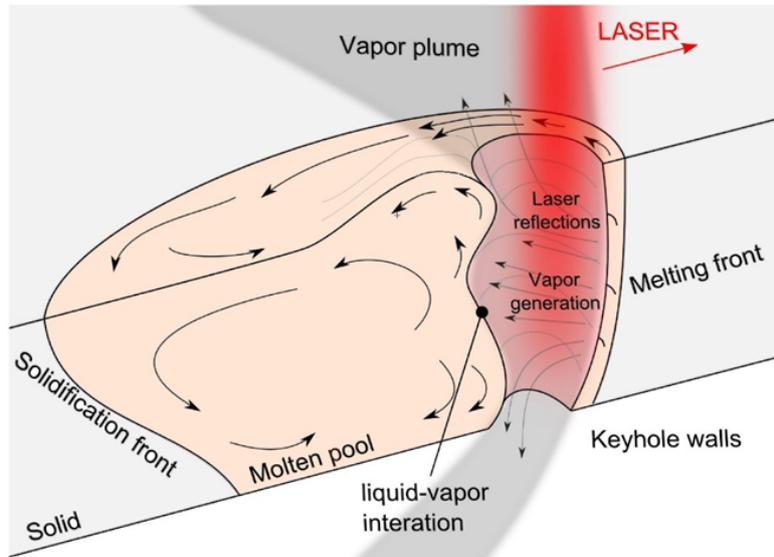


Figura 2.10: Schema dell'interazione tra laser e metallo, con generazione del *keyhole*

all'interno del metallo, nel caso in Figura si sta utilizzando una piastra sottile e il *keyhole* la attraversa. Questo fenomeno potrebbe creare dei difetti di porosità e di vuoti intrappolati nel pezzo finale. Infine, quando si lavora in additive, anche le dimensioni delle polveri e lo spessore dello strato di *slicing* hanno un effetto sulla qualità della fusione. Dato il grande numero di fattori che vanno ad influire sul processo è necessario valutare attentamente ogni opzione disponibile in modo da ottenere un processo stabile e ripetibile [16].

2.4.2 Evoluzione e caratteristiche del processo SLS

Il nome *Selective Laser Sintering* può essere fuorviante, in quanto, attualmente, non si ha più alcuna sinterizzazione durante tale processo. Il nome si mantiene poiché ha una valenza storica, agli albori di questa tecnologia, intorno al 1991, si utilizzavano delle particelle metalliche rivestite con un materiale polimerico. Questo polimero veniva fuso dal laser in modo da agevolare l'aggregazione delle particelle metalliche. Terminato il pezzo, esso veniva sottoposto ad un trattamento termico in forno in modo tale da far evaporare il materiale polimerico. Infine, per colmare gli spazi lasciati vuoti dal polimero, si infiltrava il pezzo con ottone o bronzo. In questo modo il prodotto finale risultava composto da una lega di metallo e bronzo o ottone.

Pochi anni dopo, 1995 ca, si iniziò ad utilizzare una miscela di metalli altofondenti e bassofondenti. In questo modo il laser faceva fondere il metallo bassofon-

dente facendolo aggregare. L'assenza di materiale polimerico portava il vantaggio del non dover sottoporre a trattamenti termici il pezzo. Infine, all'inizio degli anni 2000, si è incominciato ad utilizzare polveri pre-legate. Con questa evoluzione si è passati dall'aver dei componenti non omogenei a raggiungere quasi il 100% della densità. In Figura 2.11¹¹ vengono rappresentate le sembianze dei materiali nelle varie fasi descritte sopra, prima e dopo la lavorazione.

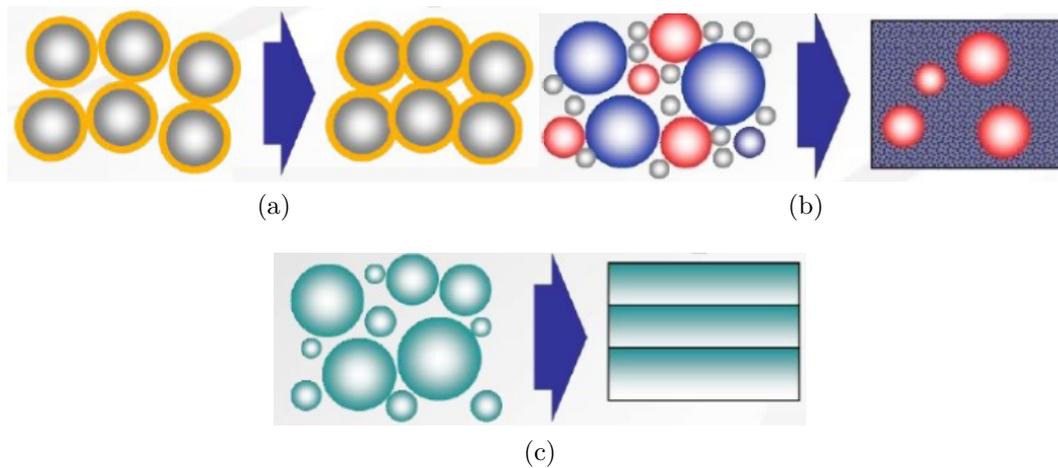


Figura 2.11: Evoluzione del processo SLS: (a) Polveri rivestite con polimero (b) Miscela di metalli altofondenti e bassofondenti (c) Polveri di metallo pre-legate

In questi processi non vengono utilizzati leganti organici di alcun tipo, dunque si ottiene una fusione completa e ri-solidificazione di polveri elementari o pre-legate. Oggigiorno non viene più effettuata una vera e propria sinterizzazione di miscele con più componenti e con i termini SLS e SLM si identifica sostanzialmente lo stesso processo.

Con l'evoluzione di questo processo, la velocità di costruzione, l'accuratezza dimensionale, la densità di deposizione e la finitura delle superfici sono tutte migliorate con costanza. I costruttori di queste macchine continuano a progettarne e venderne sempre di più e con qualità sempre superiori. Grazie alle collaborazioni che stanno nascendo tra i venditori, i progettisti software, i fornitori delle polveri e gli utilizzatori finali, si sta creando la possibilità di adottare questa tecnologia su una larga scala di applicazioni e settori industriali. Si iniziano ad avere componenti speciali personalizzati prodotti in piccola serie, grazie ai progressi effettuati in vari settori come quello aerospaziale. Si può, quindi, passare ad analizzare gli effettivi vantaggi e svantaggi di questa tecnologia [14].

¹¹Luca Iuliano. «Materiale didattico: Tecniche di fabbricazione additiva». 2017.

2.4.3 Vantaggi dei sistemi PBF-L

Secondo il testo *Additive Manufacturing of Metals* [16], un grande vantaggio relativo a questa tecnologia è il discreto numero di software CAD compatibili con la conversione dei file in formato STL, che li rende utilizzabili dalle macchine AM. Grazie all'abbondanza di programmi che permettono la revisione dei file STL, è possibile maneggiarli facilmente nel caso necessitino di correzioni o semplicemente per effettuare lo *slicing* e la preparazione per la stampa 3D. È possibile manipolare il file STL orientando e duplicando il componente da stampare per sfruttare al meglio gli spazi della tavola di lavoro della macchina. A seconda di come è fatto e posizionato il pezzo, può rendersi necessario aggiungere dei supporti nel disegno che vadano ad ancorare il pezzo alla tavola di lavoro per evitare che, durante la stampa, ceda o si deformi, come è stato necessario fare per lo scambiatore. Inoltre, i supporti possono servire come pozzi di calore durante la lavorazione. Lo *slicing* del modello va a creare degli strati, ognuno dei quali ha un percorso di scansione che la macchina segue per la fusione delle polveri in modo da creare correttamente la parte.

Solitamente, i parametri raccomandati che devono essere settati per la stampa sono resi disponibili dai venditori di queste ultime per un numero limitato di materiali ben conosciuti, nonostante siano venduti separatamente aumentando il costo totale. Gli utilizzatori possono, comunque, definire autonomamente detti parametri, anche se è necessaria una discreta esperienza per valutare quale sia la migliore velocità di scansione, il miglior spessore degli strati di *slicing* e l'offset del percorso ottimale che assicurano una deposizione uniforme delle polveri, la densità desiderata e le proprietà del materiale volute relativamente al pezzo che si intende creare.

L'ottica di scansione del laser viene direzionata grazie agli specchi mossi magneticamente con l'uso di galvanometri. Questo metodo è il più comunemente utilizzato, in quanto consente di avere un movimento rapido del puntamento del raggio. Inoltre, con questo metodo si evita di dover articolare la massa delle ottiche di focalizzazione del laser, come accade per i processi DED-L, per avere un posizionamento rapido e accurato sugli assi X e Y. Comparando i due processi, il dover muovere rapidamente l'ottica del laser, nel caso di DED-L, può portare a dei rallentamenti in caso di accelerazioni e decelerazioni sostenute, inoltre si aggiunge la necessità di un sistema meccanico ingombrante e molto rigido per fornire la precisione e la velocità richiesta. Dunque, il muovere solamente gli specchi per

direzionare il raggio risulta vantaggioso.

Un'altra caratteristica vantaggiosa che accomuna i processi a letto di polvere è il fatto che sia possibile stampare più istanze dello stesso componente in contemporanea, volume disponibile permettendo. È anche possibile stampare componenti diversi tra loro contemporaneamente, sono già disponibili software che permettono di ottimizzarne il posizionamento all'interno del volume disponibile.

Di recente si sono sviluppati alcuni miglioramenti del processo come il preriscaldamento delle polveri e l'immissione di gas inerti più puri all'interno della camera di lavoro, quando vengono utilizzati metalli molto reattivi. I gas inerti hanno anche il vantaggio di far accelerare il raffreddamento del componente una volta terminata la stampa. La maggior parte di questi processi avviene in modalità completamente automatica, ciò permette alla macchina di lavorare in continuazione, anche durante la notte. Questo è chiaramente un vantaggio in quanto una stampa può durare molte ore, per citare un esempio: lo scambiatore ne impiega circa 60 per essere completato. Molti venditori offrono, inoltre, la visualizzazione e il monitoraggio in remoto del processo.

Con questa tecnologia si possono costruire componenti dalle forme molto complesse che non potrebbero essere costruiti attraverso metodi tradizionali. Si è dimostrato che è possibile creare elementi con strutture trabecolari interne, involucri complessi, canali di raffreddamento interni e altre strutture complesse. Riuscendo ad avere blocchi unici, senza la necessità di assemblare il pezzo, è possibile diminuire la quantità di materiale utilizzato, accrescere la resistenza o aumentare le funzioni che il pezzo può svolgere. Inoltre, questo metodo di costruzione può ottimizzare il flusso di liquidi o gas, il raffreddamento o altre proprietà termiche o meccaniche. Come detto, è possibile avere dei canali interni, è però necessario valutare se sia possibile rimuovere le polveri intrappolate all'interno una volta terminata la stampa. Si vedrà nel prossimo capitolo come questo sia stato uno dei problemi riscontrati durante il disegno dello scambiatore. Lo stesso discorso vale per eventuali supporti necessari all'interno di un componente cavo.

Si è dimostrato, inoltre, che è possibile utilizzare materiali ad alte prestazioni, compositi ed anche ceramici, questo significa che in un futuro prossimo sarà possibile ottenere componenti ibridi e personalizzati in modo relativamente economico da materiali ad oggi non disponibili. Un prodotto realizzato in additive può essere composto da ciò che dovrebbe essere costruito singolarmente e poi assemblato se costruito con tecnologie classiche, necessitando, quindi, di giunti e fissaggi. Tutto ciò non è presente in un componente costruito in AM.

Un grande vantaggio del progettare componenti da produrre in AM è la libertà dai limiti imposti dalle forme commerciali e la dipendenza da materiali facilmente fabbricabili. Relativamente a quanto necessario per i processi standard, si possono ottenere una minore dipendenza ed una riduzione degli investimenti anticipati sull'attrezzatura necessaria. Per identificare meglio i benefici economici che si possono ottenere dai processi AM, sarebbe necessario analizzare il ciclo di vita complessivo, partendo dall'estrazione della materia prima, alla sostituzione, rimozione dal servizio e riciclaggio.

Per riassumere ciò che è stato descritto in questo paragrafo, di seguito si riportano i cinque vantaggi principali di questa tecnologia:

- Il tempo che trascorre tra prototipo e prodotto pronto alla vendita è molto breve;
- Semplicità di utilizzo dei file STL;
- Possibilità di creare strutture complesse;
- Buona precisione;
- Possibilità di stampare più pezzi contemporaneamente;
- Assenza di giunti e saldature nel pezzo;
- Riduzione dei costi per geometrie complesse.

In conclusione, per quanto riguarda le operazioni di post-processing, è possibile che sia necessario avere dei trattamenti termici per migliorare le proprietà e le prestazioni del materiale. Una volta rimosse le polveri e pulito il pezzo, solitamente si effettuano dei processi di rifinitura delle superfici come sabbiatura, lucidatura o rivestimento con altri materiali. Inoltre, i pezzi finiti possono essere sottoposti a trattamenti termici in fornace con l'obiettivo di ridurre stress termici dovuti alla stampa, rendere omogenee le microstrutture del materiale oppure modificare le proprietà meccaniche. Infine, per rimuovere i supporti, per completare il pezzo e per raggiungere precisioni elevate di parti critiche, solitamente vengono utilizzate macchine CNC [16].

2.4.4 Svantaggi dei sistemi PBF-L

Nonostante i numerosi vantaggi che contraddistinguono questa tecnologia, sono anche presenti alcuni limiti e svantaggi, anch'essi presentati nel testo *Additive*

Manufacturing of Metals [16]. Primo tra tutti è la complessità generale del processo. Si sta tutt'ora lavorando per migliorare la comprensione di quale sia il miglior modo di progettare elementi da costruire in AM e il controllo del processo necessario, dalla generazione del modello all'elemento finito, in modo da sfruttare appieno questa tecnologia. Per ottenere la fiducia necessaria ad utilizzare questi processi per applicazioni critiche e per standardizzarli e certificarli è necessario porre l'attenzione su problemi che riguardano le proprietà dei materiali, la consistenza dei prodotti, la ripetibilità dei processi, ovvero che il prodotto finito sia sempre uguale anche se fatto in occasioni separate o con diverse partite di polveri con la stessa macchina, e la trasportabilità del processo, ovvero che il prodotto finito sia uguale anche se fatto con macchine diverse che utilizzano, però, gli stessi parametri. Si riportano di seguito i principali limiti e svantaggi di questa tecnologia, essi verranno approfonditi successivamente:

- Complessità del processo;
- Porosità, vuoti e difetti interni al materiale;
- Lenta deposizione del materiale;
- Distorsioni e rotture del pezzo finito;
- Costi delle polveri;
- Limiti volumetrici delle camere di lavoro.

Come detto, la lavorazione per fusione di letto di polvere è in grado di avvicinarsi a densità di deposito del 100%, per ottenere questi risultati, tuttavia, è fondamentale mantenere sotto controllo i seguenti fattori: le dimensioni dell'area fusa, lo spessore dello strato di polvere applicato ad ogni ciclo, la potenza del laser utilizzato e la velocità di spostamento dell'area fusa. Questi parametri sono critici per fondere completamente le polveri in modo che si depositino correttamente, strato dopo strato. In Figura 2.12¹² (pagina seguente) vengono mostrati quattro casi in cui non è avvenuta una totale e omogenea fusione delle polveri, probabilmente a causa di un'anomalia del processo o di una scelta errata dei parametri menzionati sopra.

Per raggiungere densità di deposito così alte in relativamente pochi materiali sono stati necessari circa vent'anni di ricerca e sviluppo dei processi PBF-L e delle

¹²Karina Puebla et al. «Effect of Melt Scan Rate on Microstructure and Macrostructure for Electron Beam Melting of Ti-6Al-4V». in: (2012).

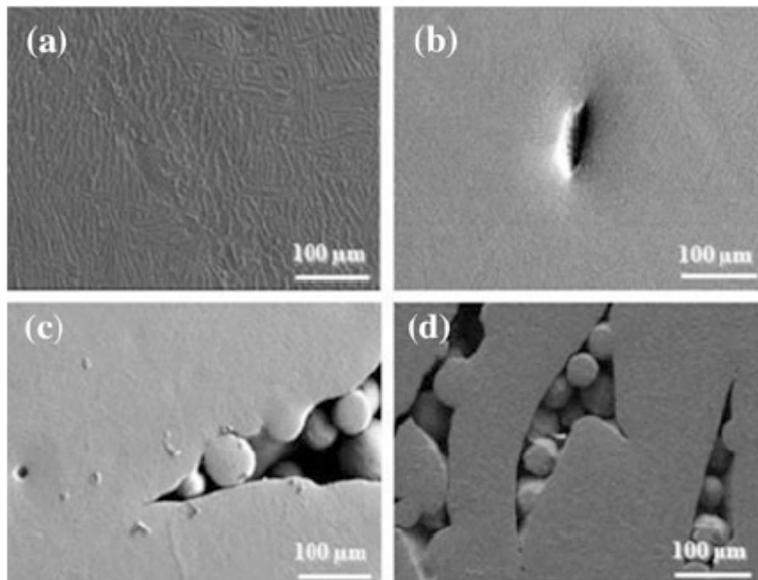


Figura 2.12: Porosità e difetti all'interno di elementi stampati in AM

polveri utilizzate. L'unico modo per raggiungere un livello di certezza e confidenza su un più vasto spettro di materiali utilizzabili per l'AM è quello di acquisire una maggiore esperienza e raggruppare i risultati derivanti da quest'ultima in database che possano essere sfruttati dai costruttori. È risaputo che i metalli sfusi e i prodotti finiti possono avere dei difetti al loro interno, ma per capire esattamente cosa aspettarsi e cosa sia possibile ottenere da questi processi si dovrà lavorare negli anni a venire.

Le micro porosità all'interno di un pezzo finito ne possono compromettere le proprietà e le prestazioni legate alla vita a fatica, alla resistenza agli impatti, alle fratture o crepe e alla duttilità. L'obiettivo di raggiungere il 100% di densità, al variare delle condizioni di deposizione del materiale, però, va contro l'obiettivo di aumentare le velocità di deposizione per velocizzare i processi. Rapidi tassi di solidificazione delle polveri fuse possono causare la formazione di microstrutture metastabili e consistenze dei materiali imperfette, che devono poi essere corrette con trattamenti termici.

Come per ogni macchina utensile, esistono dei limiti di capacità volumetriche. Questi limiti, però, risultano essere ancora molto stringenti. Attualmente in commercio sono disponibili macchine professionali con camere di lavoro in grado di costruire componenti con misure massime dell'ordine di 400-500mm. Andando ad aumentare i volumi si va ad aumentare sia il materiale effettivamente utilizzato per la stampa del pezzo, sia il materiale in eccesso che necessiterà di essere riu-

tilizzato. Il materiale vergine necessario per i sistemi a letto di polvere crescerà proporzionalmente con l'aumento dei volumi, mentre per i sistemi DED che utilizzano le polveri manterranno circa la stessa efficienza di fusione. I sistemi che, invece, hanno la miglior efficienza di fusione sono i DED riforniti con filo, i quali sfiorano il 100% [16]. Andando ad accrescere i volumi si incombe in un serie di ritardi dovuti all'aumento del tempo necessario a stendere accuratamente lo strato di polveri, al pre-riscaldamento e successivo raffreddamento delle polveri. Inoltre, stampare componenti relativamente piccoli rispetto alla camera di lavoro porta ad una drastica riduzione dell'efficienza della macchina in quanto essa andrà comunque a stendere accuratamente le polveri su tutta l'area disponibile, nonostante ne serva solo una minima parte. Nel caso in cui un cliente chieda un componente piccolo ad una azienda che possiede solo macchine con grandi camere di lavoro, egli potrebbe pagare di più sia in termini monetari, a causa delle maggiori risorse necessarie per la creazione del pezzo, sia in termini di tempo. Per ridurre i tempi di stesura delle polveri si stanno cercando altri modi come una stesura bi-direzionale o circolare.

Un limite alla crescita delle camere di lavoro è dato proprio dal peso e dal costo delle polveri che devono essere utilizzate per creare un componente di grandi dimensioni. Tutt'ora si sta già sfruttando su alcune macchine il recupero e riutilizzo delle polveri in tempo reale, in questo modo si riesce ad aumentare l'efficienza nel trattamento delle polveri e la sicurezza dell'intero processo. Si sta, inoltre, cercando di aumentare il livello di automazione del processo in modo da assistere gli utilizzatori nella stampa di componenti con dimensioni sempre maggiori. Esistono alcuni software in grado di aiutare il progettista nel suddividere un componente di grandi dimensioni in più componenti più piccoli che possono essere stampati in camere di lavoro con volumi ridotti e superare questo limite.

Come detto, le dimensioni del componente sono limitate dalla grandezza della camera di prova e dei sistemi di supporto. Per ogni pezzo è necessario avere abbastanza polvere da raggiungere la sua altezza totale, dunque si necessita di una grande quantità di polvere che non diventerà parte del pezzo finale, specialmente se le dimensioni della camera sono importanti. Nonostante sia possibile raggiungere una percentuale di utilizzo delle polveri piuttosto alta attraverso il setaccio e il riciclo, si devono accettare i costi e i rischi che la manipolazione di grandi quantità di polveri comporta. Per rendere più chiaro cosa comporti andare ad ingrandire le camere di lavoro si prenda ad esempio una sfera di titanio in una camera di lavoro 20x20cm, saranno necessari 8000 cm³ di polveri che peseranno

circa 36 kg. Utilizzando un camera da 40 cm per lato, senza andare a variare le dimensioni della sfera, si arriverebbe ad avere circa 288 kg di materiale [16]. Risulta immediatamente chiaro il problema che si incontra andando ad aumentare le dimensioni delle camere.

Per quanto riguarda il costo delle polveri specifiche per l'AM, esso risulta essere ancora molto elevato, dal momento che questa materia prima necessita di essere altamente pura, chimicamente pulita e con grani dalle dimensioni e forme il più possibile costanti per ottenere dei buoni risultati di stampa. Le polveri utilizzate per processi convenzionali si trovano facilmente e a buon prezzo, ma non sono ancora state ottimizzate per i processi PBF-L. Invece, considerando i processi DED, i requisiti a cui devono sottostare le polveri sono meno stringenti, quindi è possibile trovarle a prezzi più convenienti e con una più ampia scelta di leghe. Si stanno effettuando dei progressi per quanto riguarda la produzione di queste polveri, ci si sta concentrando sul costo, sulla morfologia e sulla sicurezza, ma è ancora necessario un grande lavoro affinché possano essere rese più economicamente accessibili, in modo che questa tecnologia possa essere diffusa su larga scala per la produzione di componenti pronti all'uso e non solo di prototipi.

Come è stato menzionato sopra, le polveri che non vengono fuse nel pezzo o nei supporti, possono essere recuperate e riutilizzate per processi successivi. Questo, però, può portare ad avere problemi di tracciabilità del materiale, in quanto, andando a mischiare polveri vergini con polveri già utilizzate e magari di lotti differenti, diventa molto complesso identificare quale lotto sia quello difettoso in caso di imperfezioni nel prodotto finito. Questo è specialmente importante per la produzione di componenti critici appartenenti a settori come quello aerospaziale, dove la tracciabilità di tutti i componenti e materiali è fondamentale. Un'altra considerazione necessaria, e si stanno effettuando degli studi a questo proposito, è capire quanti riutilizzi occorrono per modificare la morfologia, la chimica e la distribuzione della dimensione dei grani delle polveri. Chiaramente, è necessario capirlo per smettere di utilizzare le polveri prima che questi deterioramenti avvengano.

Passando all'accuratezza dimensionale, essa dipende da un serie di fattori, che sono: le dimensioni del punto di contatto del raggio laser con le polveri, la grandezza dei grani di polvere e l'orientamento del pezzo che si sta stampando. Una dimensione del punto di contatto maggiore permette di velocizzare il processo di stampa, ma va ad inficiare sulla precisione della fusione. Nel caso di camere di lavoro di grandi dimensioni, il raggio laser deve scansionare una grande superficie

ed è, quindi, necessario variare le condizioni focali che risultano in un aumento dell'angolo tra il raggio e la superficie di deposizione. Andando a variare la potenza del laser si vanno ad alterare le condizioni del punto focale, il che richiede di compiere vari cambiamenti nei parametri di processo per mantenere alta la qualità del materiale depositato. Quando il sistema di scansione ottica del laser varia la posizione del punto focale sugli assi X, Y e Z avviene una variazione della distribuzione di energia nel punto e questo può limitare l'estensione del volume che il laser è in grado di scannerizzare. Tutto ciò va ad influire sulla complessità relativa alla pianificazione dei processi in modalità di controllo in tempo reale a circuito aperto o chiuso. Attualmente, sono commercialmente disponibili delle macchine equipaggiate con sistemi di variazione delle dimensioni del punto focale.

La qualità delle superfici e la loro rugosità dipendono molto dalla morfologia delle polveri, dalle condizioni della stampa e dall'orientamento del pezzo all'interno della camera di lavoro. È possibile controllare in parte questi problemi attraverso delle procedure ben sviluppate e con un controllo attento delle polveri riutilizzate e del modo in cui viene orientato il pezzo durante la stampa, ma non ci sarà mai la certezza assoluta del risultato con la generazione di macchine PBF corrente.

Infine, è necessario tenere conto di tutti i pericoli derivanti dall'utilizzo di polveri metalliche e non e delle apparecchiature laser. Non è semplice maneggiare, immagazzinare e lavorare le polveri. Gli ambienti in cui vengono utilizzate queste macchine devono essere controllati, i rischi principali riguardano l'inalazione e l'ingestione di polveri volatili, sia durante la pulitura dei pezzi una volta terminata la stampa, sia durante l'immagazzinamento. Si deve prevedere l'utilizzo di protezioni come tute munite di maschere con filtro e ricircolo d'aria e di aspiratori e non può mancare un addestramento dedicato agli addetti ai lavori. Un altro pericolo derivante dall'utilizzo delle polveri è la loro infiammabilità, è, dunque, importante che l'atmosfera della camera di lavoro sia controllata durante la lavorazione e che si ponga molta attenzione durante le fasi di pulitura e rimozione del pezzo finito dalla macchina. Per limitare il rischio di incendio si hanno le camere di lavoro sigillate con atmosfere inerti all'interno, contenitori delle polveri sigillati, aspiratori dedicati e sistemi di filtraggio dell'aria. Per quanto riguarda i laser, anch'essi sono in grado di causare gravi danni a persone o cose, perciò è necessario, anche in questo caso, un addestramento specifico sull'utilizzo di questa tecnologia in totale sicurezza.

Da quello che è stato descritto, si intuisce che i limiti di questa tecnologia siano ancora molti, ma le sue potenzialità sono enormi. Le aziende e le università

dovranno continuare a studiare e ad investire in questa tecnologia in modo da superare questi limiti e da sfruttare appieno il suo potenziale.

2.5 *Electron Beam Melting*

Il processo di EBM è piuttosto recente, nato agli inizi degli anni 2000, ed è ancora poco utilizzato dalle aziende [14]. Si sta diffondendo nel settore aerospaziale, specialmente per quanto riguarda la costruzione delle alette per turbine e compressori.

Questo processo avviene in una camera di lavoro tenuta sottovuoto, all'interno della quale un fascio di elettroni fonde le polveri, infatti, come affermato durante la classificazione dei processi AM, anch'esso è un processo di fusione a letto di polvere. In questo caso, dette polveri vengono pre-riscaldate all'interno della camera di lavoro dal fascio di elettroni diffuso su una vasta superficie. Esse possono raggiungere temperature attorno agli 800 gradi Celsius durante questa fase, perciò risulta chiaro che questo processo non sia sempre adatto per metalli bassofondenti. Una volta terminato il pre-riscaldamento delle polveri, il fascio di elettroni viene focalizzato ed inizia a fondere le polveri seguendo il pattern indicatogli dal file STL. Da questo momento in poi l'EBM è del tutto simile all'SLS: terminata la fusione di uno strato di polvere, la tavola di lavoro si abbassa, in modo che possa essere applicato un altro livello da poter fondere. Questi passaggi si ripetono fino a quando il pezzo non è terminato.

Prima di analizzare nello specifico le caratteristiche, i vantaggi e gli svantaggi di questo processo è bene analizzare la tecnologia principale che viene utilizzata per la fusione delle polveri: il fascio di elettroni.

2.5.1 Fascio di elettroni: funzionamento e caratteristiche

Per la descrizione di questa tecnologia si farà nuovamente riferimento a ciò che viene spiegato da Milewsky [16]. Come i laser, anche i fasci di elettroni permettono di concentrare una grande quantità di energia utilizzando, appunto, elettroni, invece che fotoni come accade nel caso del laser. Anche gli EB (*Electron Beams*) possono essere focalizzati in un punto dalle dimensioni ristrette e di fondere, conseguentemente, una piccola regione delle polveri a grande velocità. Per facilitare la comprensione della disposizione degli elementi di un emettitore di EB all'inter-

no di una camera di lavoro si può far riferimento allo schema di Figura 2.13¹³, di seguito se ne illustra il funzionamento.

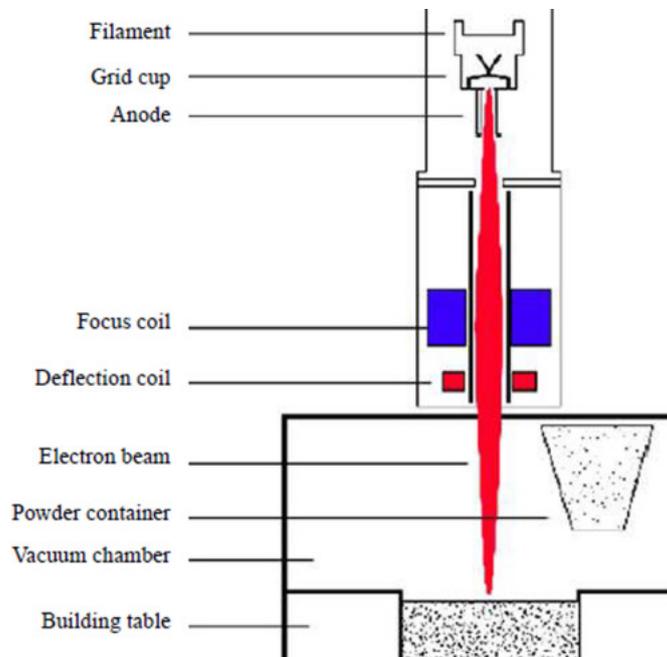


Figura 2.13: Rappresentazione di un emettitore di fascio di elettroni e relativi componenti

Si parte dall'applicazione di un'alimentazione ad alta tensione tra la griglia (*grid cup*) e l'anodo. Il filamento, ovvero il catodo, viene caricato negativamente e riscaldato in modo da far aumentare l'energia cinetica degli elettroni al suo interno. Si deve accumulare una quantità di energia tale che gli elettroni riescano a lasciare il catodo, questo fenomeno viene chiamato emissione termoionica. Gli elettroni che vengono emessi sono accelerati e focalizzati dalla griglia verso l'anodo e, passando attraverso un foro, vengono proiettati nella camera di lavoro della macchina. All'interno della camera il fascio di elettroni carichi viene focalizzato utilizzando delle bobine elettromagnetiche e viene puntato sulla superficie del piano di lavoro da bobine di deflessione magnetica. Generalmente, i voltaggi dei fasci generati da queste macchine vanno dai 60 ai 150 kV, mentre le potenze dai 3 ai 30kV (potenze maggiori sono possibili) e sono in grado di focalizzare detti raggi in aree con dimensioni dell'ordine della frazione di millimetro. Tutto ciò avviene in una camera di lavoro tenuta sottovuoto, con pressioni inferiori a 1×10^{-4} mbar, in modo da avere un ambiente altamente puro dove si possano fondere le polveri

¹³R. Singh, S. Singh e M.S.J. Hashmi. *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering*. 2016.

di metallo senza che esse vengano contaminate dall'idrogeno e ossigeno presenti nell'aria.

Questa tecnologia è ancora molto costosa, si può passare da centinaia a milioni di dollari, per questo motivo si sta diffondendo solo in settori che possono giustificare i costi e la complessità di queste macchine, come quello aerospaziale e nucleare. Il costo deriva dai sistemi di controllo computerizzati e dai sistemi di movimento CNC che devono essere necessariamente molto sofisticati per ottenere buoni risultati. Anche la manutenzione va ad influire pesantemente nei costi, un motivo è il fatto che il filamento (catodo) non è molto duraturo e va sostituito spesso.

Attualmente esistono due tipi di emettitori di elettroni ai quali ci si riferisce come cannoni a basso voltaggio, da circa 60 kV, e cannoni ad alto voltaggio, da circa 100-150 kV. Questi ultimi sono solitamente fissati sopra la camera di lavoro, mentre i primi possono essere sia fissi sopra una camera di lavoro con dimensioni ristrette, sia mossi da bracci meccanici CNC in una camera di dimensioni maggiori. Anche in questo caso le bobine magnetiche sono presenti per focalizzare e direzionare il fascio di elettroni all'interno della camera.

2.5.2 Vantaggi dei sistemi EBM

Come descritto sopra, per direzionare il fascio vengono utilizzate delle bobine magnetiche, questo metodo permette di avere delle velocità di puntamento del raggio maggiori rispetto a quelle che si hanno su sistemi dotati di laser, i quali utilizzano degli specchi mossi da motori elettrici. Ciò risulta in velocità di costruzione maggiori. Inoltre, i fasci di elettroni hanno la capacità di trasmettere la propria energia al metallo in maniera più efficiente rispetto ai laser, questo è dovuto alla riflessione di questi ultimi e della conseguente perdita di energia. Di seguito si elencano i vantaggi principali dei processi a fusione di letto di polvere con fascio di elettroni [16]:

- Alte velocità di scansione del fascio;
- Maggiore efficienza nella trasmissione di energia rispetto alle macchine PBF-L;
- Necessità di un minor numero di supporti rispetto a processi PBF-L;
- Possibilità di creare strutture complesse;

- Buona precisione dei pezzi finiti;
- Riduzione degli stress meccanici grazie alla camera di lavoro riscaldata;
- Possibilità di costruire più pezzi nella stessa camera di lavoro contemporaneamente.

Nell'introduzione si è menzionato il fatto che le polveri vengano pre-riscaldate con il fascio di elettroni diffuso sulla superficie di lavoro a temperature tra i 700 e gli 800 gradi. In realtà, queste temperature possono variare molto a seconda del materiale metallico che si sta utilizzando. Nel caso dell'alluminio le temperature devono scendere a circa 300 gradi, mentre nel caso dell'alluminio di titanio devono salire a circa 1100 gradi. Il mantenimento di queste temperature durante l'intera durata del processo porta ad un sollievo degli stress meccanici all'interno del pezzo che si sta stampando. In questo modo si minimizzano le sollecitazioni da restringimento e le distorsioni a seguito del raffreddamento, stress meccanici residui e la formazione di fasi non in equilibrio termico tra di loro. Tutto ciò potrebbe facilitare la rottura del pezzo. Andando a pre-riscaldare le polveri si ottiene una leggera sinterizzazione, riducendo, così, i gradienti termici tra le regioni che subiscono rapidi aumenti e abbassamenti di temperatura intorno alle aree fuse.

Grazie alla leggera sinterizzazione causata dal pre-riscaldamento, si può avere un minor bisogno di supporti e della loro conseguente rimozione, in quanto le polveri che circondano le aree fuse possono servire loro stesse da supporto. In questo modo si riducono gli interventi necessari nel post-processing ed è più semplice riutilizzare le polveri che non fanno parte del pezzo finale. Anche in questo caso, come per le macchine che utilizzano il laser, affinché le polveri possano essere riutilizzate occorre setacciarle utilizzando aspiratori antideflagranti seguendo procedure molto rigorose per mantenere una qualità alta della materia prima.

Il raffreddamento del pezzo finito all'interno della camera di lavoro può impiegare diverse ore. Questo permette una maggiore crescita del grano e un rilassamento della microstruttura, riducendo, così, gli stress meccanici e le distorsioni causate dal raffreddamento non omogeneo del pezzo. Tuttavia, alcuni materiali, specialmente quelli più reattivi, possono patire questo lungo ciclo di raffreddamento a causa della diffusione di contaminanti interstiziali e dell'assorbimento di ossigeno. Questo può essere accentuato quando il pezzo è mantenuto ad alte temperature per periodi dell'ordine di 8-10 ore, se non di più.

Le dimensioni minime raggiungibili del punto di contatto del fascio con la superficie di lavoro sono dell'ordine di $100 \mu m$, questo permette di ottenere una

buona precisione della fusione. Grazie alla velocità di scansione del fascio che può essere raggiunta, fino a 8000 m/s, è possibile avere più aree fuse contemporaneamente. Inoltre, è possibile stampare più componenti durante lo stesso ciclo di stampa, questo favorisce un'ottimizzazione dello spazio all'interno della camera di lavoro, aumentandone l'efficienza. Le dimensioni in pianta tipiche dei pezzi costruiti sono 350×380 mm. Durante il processo di stampa può venir inserito dell'elio all'interno della camera stagna per aumentarne la pressione e per ridurre la carica elettrostatica delle polveri. È anche utile per il raffreddamento del pezzo una volta terminato il processo di stampa. Una volta estratto e ripulito il componente è ancora possibile sottoporlo a dei trattamenti termici per aumentarne la resistenza a fatica.

2.5.3 Svantaggi dei sistemi EBM

Essendo una tecnologia ancora piuttosto recente i limiti e gli svantaggi che la contraddistinguono sono numerosi. Alcuni di questi sono gli stessi già descritti per i processi PBF-L, in quanto le tecnologie hanno molti punti in comune. Come per i vantaggi, di seguito si riportano gli svantaggi principali [16]:

- Le dimensioni dei componenti che possono essere stampati sono limitate;
- I tempi di raffreddamento sono molto lunghi;
- Vi è una carenza di materiali adatti a questo tipo di lavorazione;
- La precisione è leggermente minore rispetto a quella delle macchine che utilizzano il laser;
- Il costo delle polveri è elevato;
- Il costo delle macchine e della manutenzione è elevato;
- Vi è la necessità di mantenere la camera di lavoro sottovuoto.

Le dimensioni contenute che si possono ottenere sono un limite che accomuna le tecnologie basate sulla fusione a letto di polvere. Come descritto sopra, questo è dovuto principalmente all'aumento esponenziale del peso e alla gestione delle polveri. Questo limite, sommato ai tempi molto lunghi dei cicli di raffreddamento, dovuti al mantenimento di temperature molto alte durante l'intero processo, vanno ad abbassare di molto l'efficienza di queste macchine.

Sono disponibili meno materiali e la precisione dei pezzi è minore rispetto a quella ottenibile dai processi PBF-L. Questo è dovuto al fatto che le polveri devono avere un diametro leggermente maggiore. Le polveri specifiche con diametri maggiorati e la messa a terra del piano di lavoro sono necessari per limitare il caricamento elettrostatico e la repulsione delle polveri più piccole dal letto, che vanno a creare una sorta di fumo sopra lo strato che si deve fondere. Tale fenomeno può creare dei disagi durante l'esecuzione del processo.

Un fattore che va ad incidere sui costi di manutenzione e sull'efficienza della macchina è la vita limitata del catodo. Questo elemento va sostituito ad intervalli regolari e ciò può causare dei ritardi, specialmente se si stanno stampando dei componenti dalle grandi dimensioni che richiedono una grande potenza del fascio e dei ricambi durante il processo.

Un altro svantaggio è quello della necessità di mantenere la camera di lavoro sotto vuoto durante il processo. Il motivo risiede nel fatto che anche una minima concentrazione di molecole di gas può essere investita dal fascio di elettroni deviandolo e diffondendolo. Questo farebbe disperdere l'energia e ridurre la precisione del fascio. Inoltre, alcuni cannoni elettronici sfruttano un ulteriore pompaggio per ottenere il vuoto direttamente sul cannone, per evitare contaminazioni e il reflusso di vapori metallici.

Infine, oltre ai rischi già descritti dovuti alle polveri, si ha il rischio che il fascio di elettroni che colpisce il metallo possa creare dei raggi X, i quali devono essere controllati all'interno della camera di lavoro e, dunque, della sua schermatura.

2.6 Materiali per la fusione a letto di polvere

Per delineare i materiali che vengono utilizzati, o che potrebbero esserlo, dalle macchine che sfruttano la fusione a letto di polvere, si fa riferimento al testo *Additive Manufacturing Technologies* [11] in cui si inizia dai materiali polimerici e compositi. I materiali termoplastici sono ottimi per i processi a letto di polvere grazie alle loro temperature di fusione relativamente basse, alla loro bassa conducibilità termica e alla bassa tendenza nell'insorgere del *balling effect*, ovvero la formazione di piccole sfere del diametro circa pari al punto di contatto del laser, che peggiorano la finitura superficiale [14]. I polimeri possono essere suddivisi in termoplastici e termoindurenti, questi ultimi non sono adatti alle macchine PFB, in quanto non è possibile fonderli aumentandone la temperatura e farli aggregare un volta tornati allo stato solido. Per quanto riguarda i materiali termoplastici,

essi possono essere classificati in base al loro grado di cristallinità. I polimeri amorfi hanno una struttura molecolare casuale, con catene polimeriche incatenate senza un preciso ordine. Al contrario, i polimeri cristallini hanno una struttura molecolare regolare, ma non sono comuni. La maggior parte dei polimeri sono semi-cristallini, ovvero polimeri che hanno strutture regolari solo in alcuni punti, dette cristalliti. I polimeri amorfi tendono a fondere ad un intervallo di temperature piuttosto ampio, più la cristallizzazione aumenta, più questo intervallo si restringe fino a diventare una temperatura di fusione piuttosto definita.

Attualmente, il materiale polimerico termoplastico più utilizzato per il processo PBF è il poliammide, anche detto nylon. La maggior parte dei poliammidi ha un grado di cristallinità piuttosto elevato e vengono, dunque, catalogati come materiali semi-cristallini. Il loro punto di fusione è ben definito, questo gli permette di essere abbastanza affidabili per essere utilizzati in questo processo. Tipicamente, questi polimeri vengono fusi completamente, riuscendo, così, ad ottenere delle densità di deposito molto alte. Questo non può accadere con materiali completamente amorfi, i quali tendono a diventare molto porosi. Commercialmente sono disponibili il Poliammide 11 e il Poliammide 12, dove il numero indica quanti atomi di carbonio sono presenti in uno dei monomeri dalla cui reazione si produce il poliammide. I polimeri cristallini, però, presentano un difetto più spiccato rispetto a quelli amorfi, ovvero presentano un restringimento maggiore e tendono maggiormente ad arricciarsi e a storcarsi. Per cui è necessario che ci sia un controllo per mantenere la temperatura uniforme sul pezzo. Le proprietà meccaniche dei componenti stampati in AM sono simili a quelle dei componenti stampati ad iniezione, ma presentano allungamenti significativamente ridotti e microstrutture diverse.

I materiali a base di polistirene, che hanno un basso contenuto di ceneri residue, sono ottimi per essere utilizzati come modello sacrificale nei processi di fusione a cera persa. Nonostante il polistirene sia un polimero amorfo, va molto bene per questa applicazione, in quanto la sua porosità ne rende più semplice lo scioglimento una volta che il guscio ceramico viene creato. I componenti in polistirene pensati per applicazioni di fusione a cera persa di precisione dovrebbero essere stagni onde evitare che il materiale ceramico penetri al loro interno, peggiorando la finitura superficiale del pezzo.

Nel caso in cui si debbano costruire pezzi molto flessibili, si possono utilizzare i polimeri termoplastici elastomerici. Essi possiedono ottime proprietà per quanto riguarda la resistenza al degradamento ad alte temperature e la resistenza ad

agenti chimici come derivati dal petrolio e liquidi di raffreddamento per auto. Gli elastomeri, quindi, possono essere utilizzati per un vasto spettro di applicazioni: da guarnizioni industriali alle suole delle scarpe.

Commercialmente sono presenti altri polimeri come i poliammidi e i poliari-eterchetoni, i quali sono conosciuti come PAEK o PEEK, entrambi i materiali sono ritardanti di fiamma. Inoltre, si stanno effettuando degli studi per l'utilizzo di polimeri biocompatibili e biodegradabili utili per applicazioni biomediche, un esempio è il policaprolattone (PCL). Sono anche stati studiati materiali compositi, per esempio si sono aggiunte particelle di materiali ceramici, come l'idrossiapatite e il silicato di calcio, al PCL per creare delle impalcature per la sostituzione di tessuto osseo.

Si passa ora al vasto spettro di materiali metallici utilizzati nei processi PFB. In linea di massima, ogni metallo che può essere saldato può venir considerato come un potenziale candidato per questi processi. Commercialmente sono disponibili vari tipi di acciai, solitamente inossidabili e per utensili, titanio e sue leghe, leghe a base di nickel, alcune leghe di cromo-cobalto e di alluminio. Alcune aziende offrono anche processi PBF per metalli preziosi come oro e argento. È importante notare che se la lega presa in considerazione è suscettibile agli alti ratei di solidificazione, essa non è una buona candidata per questo tipo di processi. A causa di questi ratei molto alti, le strutture cristalline e le proprietà meccaniche sono diverse rispetto a quelle che si ottengono utilizzando gli altri metodi convenzionali. Le strutture che si generano possono essere metastabili e i trattamenti termici necessari per riportarle ad essere microstrutture standard possono differire da quelli utilizzati per gli altri processi. Man mano che il processo di *laser sintering* continuerà ad essere sviluppato, la varietà di leghe metalliche che verranno comunemente utilizzate crescerà, con nuove leghe specificamente sviluppate per questo scopo.

Per quanto riguarda il processo PBF-L nello specifico, la lega di Alluminio principalmente utilizzata è l'AlSi10Mg. Inoltre, questo è il materiale che è stato utilizzato in Ellena per costruire lo scambiatore di calore. In Tabella 2.1¹⁴ (pagina seguente) vengono riportate le caratteristiche fisiche, meccaniche e termiche di questa lega e dei componenti costruiti con essa. Tra le leghe di Titanio, la più diffusa è la Ti6Al4V, mentre le super leghe più utilizzate sono l'Inconel 625 e l'Inconel 718 [14].

Per i processi PBF-EB le possibilità diminuiscono, in quanto i materiali utilizzati devono essere conduttori, ma non devono interferire con il campo magnetico

¹⁴2.

Proprietà Fisiche

Densità	2.67 g/cm ³
Densità relativa	99.85%

Proprietà Meccaniche

	Metodo Test Utilizzato	<i>As Built</i>	Dopo Trattamento Termico
Resistenza alla Trazione	ISO 6892-1:2009(B) Annex D	460 ± 20 MPa	350 ± 10 MPa
Resistenza allo Snervamento	ISO 6892-1:2009(B) Annex D	260 ± 20 MPa	230 ± 15 MPa
Allungamento a Rottura	ISO 6892-1:2009(B) Annex D	6 ± 2%	6 ± 2%
Modulo di Young	—————	75 ± 10 GPa	75 ± 10 GPa
Durezza	DIN EN ISO 6506-1	120 ± 5 HBW	120 ± 5 HBW

Proprietà Termiche

Conducibilità Termica	ASTM E1461-13	110 ± 5 W/m°C	170 ± 5 W/m°C
Calore Specifico	ASTM E1461-13	910 ± 50 J/Kg°C	890 ± 50 J/Kg°C

Tabella 2.1: Proprietà fisiche, meccaniche e termiche della lega di Alluminio AlSi10Mg

del fascio elettronico. Oltre alle leghe cromo cobalto utilizzate per applicazioni biomediche, per motorsport e aerospaziali, si utilizza la lega di Titanio Ti6Al4V, il Titanio di grado due e si stanno effettuando degli studi per utilizzare superleghe Inconel.

Infine, si hanno i materiali ceramici e i loro compositi. Essi vengono generalmente descritti come composti costituiti da metalossidi, carburi, nitruri e loro combinazioni. Commercialmente sono disponibili vari materiali ceramici come l'ossido di Alluminio e l'ossido di Titanio. L'utilizzo di questi materiali e dei composti metallo-ceramici è stato dimostrato attraverso la ricerca. I precipitati ceramici si formano solitamente per mezzo di reazioni che hanno luogo durante il processo di sinterizzazione. Per citare un esempio si faccia riferimento alla lavorazione dell'alluminio in atmosfera di azoto. Essa forma una matrice di alluminio intervallata da piccole regioni di nitruro di alluminio. Questo processo prende il nome di sinterizzazione chimicamente indotta.

Anche per i materiali ceramici se ne stanno sviluppando di biocompatibili, come l'idrossiapatite di calcio, già menzionata durante la descrizione dei materiali polimerici, utilizzata per applicazioni biomediche.

Capitolo 3

Sviluppo del disegno CAD su SolidWorks

Nel seguente capitolo verranno descritti i vari passaggi che hanno comportato l'evoluzione del disegno CAD dello scambiatore di calore, partendo da quello attualmente utilizzato a quello prodotto in additive da Ellena. Per lo sviluppo del disegno CAD si è fatto uso del software di modellazione 3D SolidWorks, prodotto dalla Dassault Systèmes.

3.1 Punto di partenza del progetto

Prima di iniziare ad esporre il lavoro svolto dal sottoscritto, in collaborazione con gli ingegneri di Ellena, è necessario fare una premessa per chiarire quale sia stato il punto di partenza di questo progetto. Quest'ultimo parte a seguito di quello portato avanti dall'ingegner Perrone [17], il quale aveva come obiettivo quello di sostituire i perturbatori e le piastre dello scambiatore con delle piastre aventi una superficie innovativa in grado di aumentare l'efficienza di scambio termico e diminuire le perdite di carico e anche in questo caso lo scambiatore doveva essere realizzato in Additive Manufacturing. In Figura 3.1¹ (pagina seguente) si riportano tre viste della singola cella che, ripetuta, va a formare la superficie sviluppata dall'ingegnere. Lo sviluppo del CAD è stato seguito da studi CFD per verificare l'efficienza dello scambio termico. Visti i risultati molto promettenti ottenuti, lo scambiatore è stato fatto stampare con il processo SLM dall'azienda AIRO Srl ed

¹Davide Perrone. «Prototype development of an innovative heat exchanger for an aircraft engine cooling system made by Additive Manufacturing (SLM)». Politecnico di Torino, 2019.

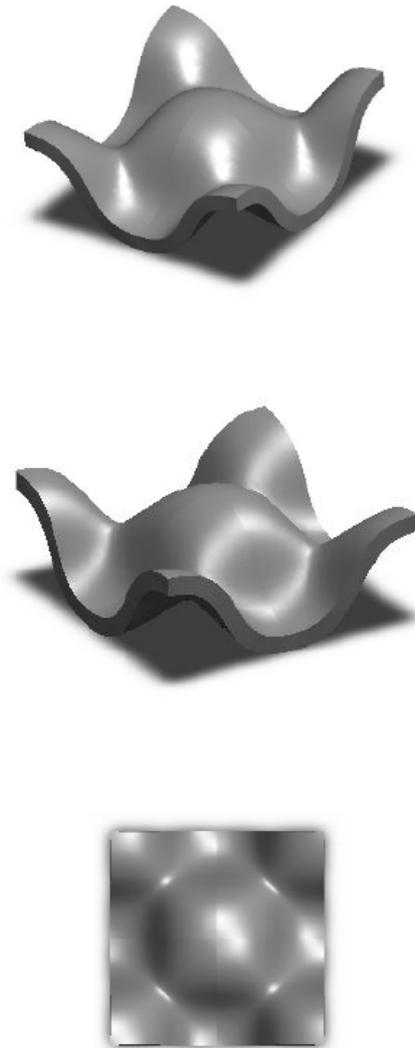


Figura 3.1: Viste della cella che va a costituire le superfici di scambio termico

è in questa fase che sono sorte delle criticità tecniche che ne hanno compromesso la completa realizzazione. Il problema principale riguardava l'estrazione delle polveri una volta terminato il processo di stampa. Come spiegato nel capitolo precedente, uno dei problemi principali che si possono incontrare quando si sta producendo un componente cavo è quello di non riuscire ad estrarre completamente le polveri dal suo interno, specialmente se gli spazi sono molto ristretti come in questo caso.

In Figura 3.2² (pagina seguente) si riporta ciò che è stato realizzato dall'ingegner Perrone, in particolare si ha una vista dello scambiatore sezionato longitudinalmente, una vista della singola piastra che va a separare i flussi di acqua e olio

²Davide Perrone. «Prototype development of an innovative heat exchanger for an aircraft engine cooling system made by Additive Manufacturing (SLM)». Politecnico di Torino, 2019.

e i supporti interni che vanno ad aumentare la resistenza delle piastre sottoposte alla pressione dei fluidi.

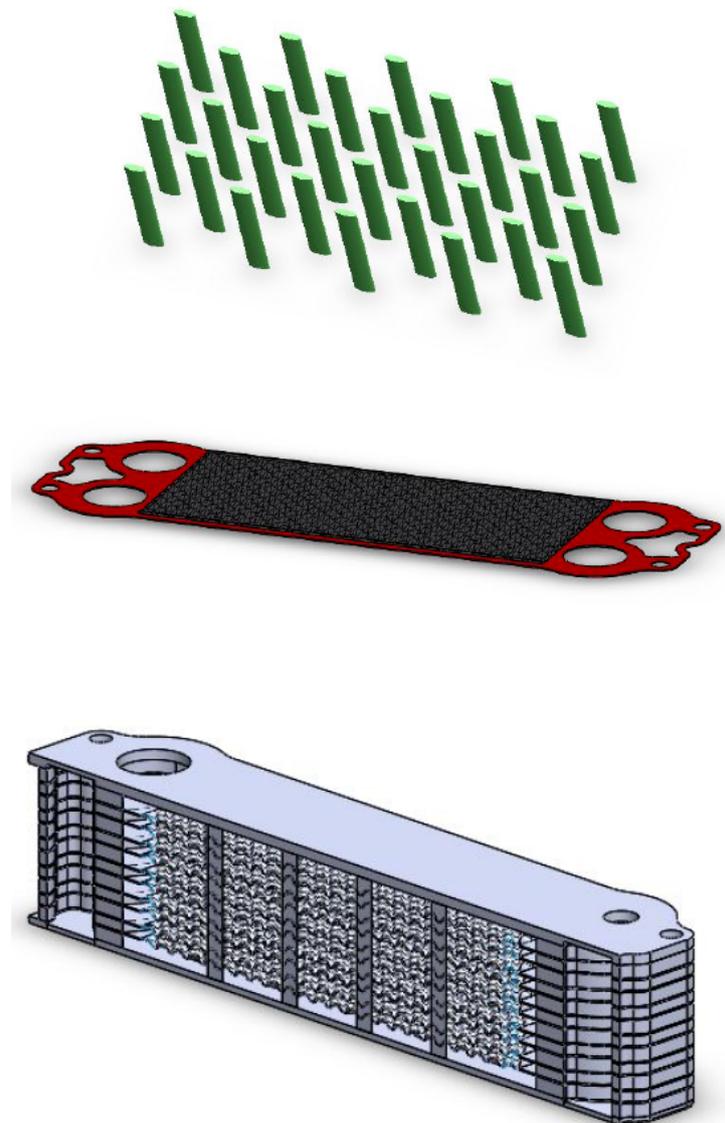


Figura 3.2: Vista dello scambiatore sezionato e dettaglio di una piastra e dei supporti interni

Come si può osservare dalla Figura, all'interno dello scambiatore sono presenti 10 piastre che permettono lo scambio termico tra i due fluidi evitando che essi si vadano a miscelare. La distanza tra due piastre è di circa 3 mm e la superficie sviluppata presenta degli avvallamenti molto accentuati, questi due fattori hanno reso impraticabile la rimozione delle polveri intrappolate all'interno di det-

te depressioni nelle parti più centrali dello scambiatore. Da ciò ne è derivata la necessità di modificare il design interno di quest'ultimo.

3.2 Strutture reticolari nell'AM

La prima modifica a cui si è pensato è stata quella di eliminare la superficie corrugata lasciando un separatore liscio, come accade nello scambiatore originale, e aggiungere delle strutture reticolari tra i vari separatori. Si pensava che in questo modo il problema delle polveri intrappolate nelle depressioni sarebbe stato superato, ma, come si esporrà in seguito, questo cambiamento del design ha portato ad altre criticità che hanno reso necessario uno stravolgimento della geometria interna dello scambiatore.

Prima di descrivere e mostrare come si sarebbe presentata la geometria interna con la presenza delle strutture trabecolari, è bene analizzare i recenti progressi che sono avvenuti per quanto riguarda la realizzazione di queste strutture attraverso l'Additive Manufacturing. Le geometrie che possono essere realizzate grazie a questa tecnologia sono quasi infinite, in particolare di seguito ne verranno mostrate e descritte alcune prodotte attraverso il metodo SLM, seguendo lo studio condotto da Maconachie Tobias et al. [15] nel quale vengono analizzate proprietà, prestazioni, applicazioni e criticità che le riguardano.

Le strutture reticolari sono delle strutture composte da una o più celle tridimensionali ordinate topologicamente, che vengono ripetute per un numero definito di volte nello spazio. Esse vengono definite dalle loro dimensioni e dal modo in cui le proprie trabecole sono collegate tra di loro. Andando a variare i parametri strutturali, come i collegamenti, o quelli geometrici, come le dimensioni della cella e delle singole trabecole, è possibile alterare drasticamente la risposta fisica di queste celle, riuscendo ad ottenere proprietà che risulterebbero irraggiungibili dai semplici materiali di partenza. È stato dimostrato che le strutture reticolari realizzate attraverso l'Additive Manufacturing superano le prestazioni di quelle costruite con metodi produttivi tradizionali a parità di porosità [26]. Ciò è dovuto al maggior controllo geometrico e alla maggiore predicibilità forniti dai processi AM. Queste strutture sono particolarmente apprezzate nei settori biomedico e aerospaziale, ciò che le rende così allettanti per quest'ultimo è l'alto rapporto resistenza-peso dei componenti e le ottime proprietà di conduzione termica. Inoltre, la loro uniformità strutturale permette di avere un controllo affidabile della

risposta al collasso della struttura, questo può comportare un vantaggio tecnico per quanto riguarda l'assorbimento di energia.

Si passa, dunque, all'analisi di alcune geometrie tipiche e delle loro caratteristiche principali.

3.2.1 Analisi delle geometrie

Si afferma che le strutture reticolari possano essere 2.5D³ o 3D. Esse possono essere costruite utilizzando vari metodi produttivi, ma, dall'avvento dell'Additive Manufacturing, sempre più studi confermano le ottime proprietà ottenibili utilizzando questo processo produttivo. Generalmente, le strutture reticolari vengono suddivise in due categorie principali basate sulla loro risposta meccanica, ovvero: quelle dominate dalla flessione e quelle dominate dall'allungamento. Queste ultime subiscono sforzi assiali all'interno della loro struttura, mentre le prime subiscono dei momenti flettenti e questo le rende meno rigide e resistenti. Ciò che va a determinare a quale gruppo appartenga una determinata struttura è la topologia della cella. Di seguito si effettuerà un passo successivo andando a classificare le strutture in altre due categorie: *Strut-based* e TPMS (*Triply Periodic Minimal Surfaces*).

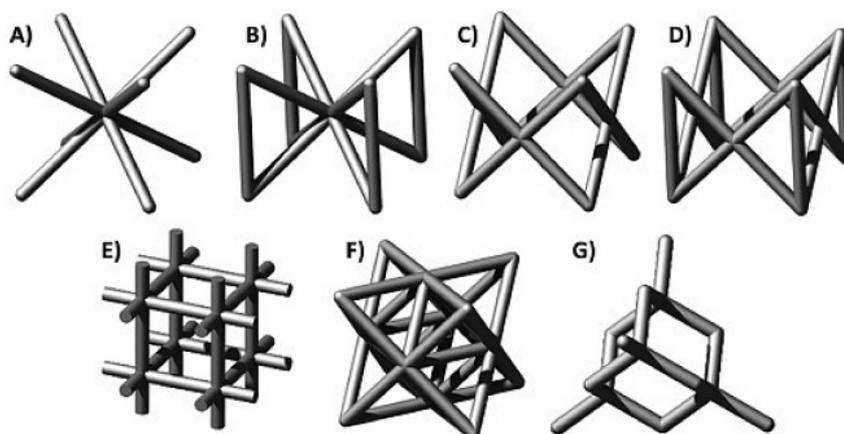


Figura 3.3: Strutture reticolari *strut-based*: (A) BCC, (B) BCCZ, (C) FCC, (D) FCCZ, (E) cubica, (F) octo-truss e (G) a diamante

Le strutture basate sulle trabeccole (*strut-based*) su cui sono stati condotti degli studi sono molteplici, le più comuni sono le *body-centered cubic* (BCC), le

³Una struttura 2.5D consiste in una forma bidimensionale semplicemente estrusa nella terza dimensione.

face-centered cubic (FCC) e le loro variazioni, come quelle in cui si aggiungono delle trabeccole parallele all'asse Z (BCCZ e FCCZ). Si citano, inoltre, le strutture cubiche, le octet-truss e a diamante. È possibile osservare tutte le geometrie appena elencate in Figura 3.3⁴ (pagina precedente). Queste celle vengono scelte spesso grazie alla loro semplicità di design, ma è doveroso notare che sono anche state condotte delle ottimizzazioni topologiche delle celle in modo da ottimizzare l'efficienza della distribuzione del materiale.

Un modo per classificare le strutture *strut-based* è quello che si basa sul numero di Maxwell M della cella, questo valore dipende dal numero di trabeccole s e da quello di nodi n presenti in una data cella, per ricavarlo si utilizza la seguente formula:

$$M = s - 3n + 6$$

Una cella con $M < 0$ ha un numero troppo basso di trabeccole, ciò comporta l'impossibilità di equilibrare le forze esterne senza equilibrare i momenti indotti ai nodi. Questo squilibrio causa la generazione di sforzi flettenti sulle trabeccole, che portano ad avere una cella con un comportamento dominato dalla flessione. Nel caso in cui $M \geq 0$, gli sforzi esterni risultano equilibrati dalla tensione e compressione delle trabeccole, in questo modo non sono presenti flessioni ai nodi. Le celle di questo tipo sono quelle facenti parte del gruppo dominato dall'allungamento. Grazie a questa caratteristica, le celle appartenenti a tale gruppo risultano essere molto resistenti e rigide, soprattutto se si prende in considerazione la loro massa estremamente ridotta, al contrario di quelle *bending-dominated*, che risultano molto più cedevoli a parità di massa.

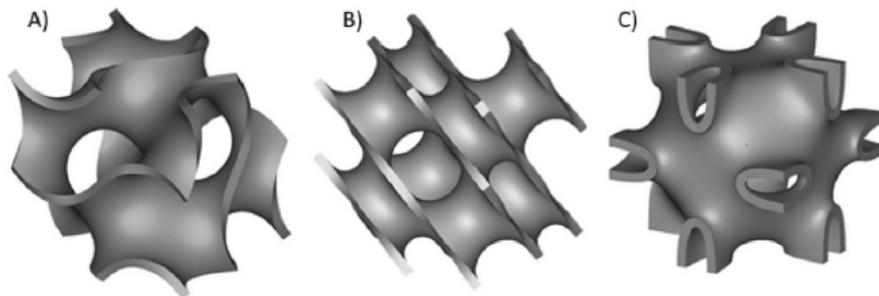


Figura 3.4: Strutture reticolari TPMS: (A) giroide di Schoen, (B) diamante di Schwarz e (C) Neovius

L'altro gruppo di celle identificato è quello appartenente alle superfici minime

⁴Tobias Maconachie et al. «SLM lattice structures: Properties, performance, applications and challenges». In: *materials and DESIGN* (2019).

periodiche triple (TPMS), quelle studiate sono la giroide di Schoen, il diamante di Schwarz e il Neovius, esse sono riportate in Figura 3.4⁵ (pagina precedente). Queste celle sono descritte da complesse funzioni matematiche, riportate in Tabella 3.1, e la modifica dei loro vari parametri, come la periodicità e la densità relativa, comportano dei cambiamenti nelle prestazioni meccaniche. È, dunque, possibile regolare questi parametri in base allo scopo a cui la cella deve asservire.

Topologia	Formula isosuperficie
Giroide di Schoen	$U_G = \cos(k_x x) \sin(k_y y) + \cos(k_y y) \sin(k_z z) + \cos(k_z z) \sin(k_x x) - t$
Diamante di Schwarz	$U_D = \sin(k_x x) \sin(k_y y) \sin(k_z z) + \sin(k_x x) \cos(k_y y) \cos(k_z z) + \cos(k_x x) \sin(k_y y) \cos(k_z z) + \cos(k_x x) \cos(k_y y) \sin(k_z z) - t$
Neovius	$U_N = 3[\cos(x) + \cos(y) + \cos(z)] + 4 \cos(x) \cos(y) \cos(z)$

Tabella 3.1: Formule per la generazione delle celle TPMS

I valori di k (k_x , k_y e k_z) vanno a definire la periodicità della struttura e si calcolano attraverso la seguente formula:

$$k_i = 2\pi \frac{n_i}{L_i}$$

dove $i = x, y, z$, n_i definisce il numero di ripetizioni della cella lungo i tre assi, L_i è la grandezza assoluta della struttura lungo un determinato asse e t influisce sulla densità relativa.

Si afferma che queste strutture abbiano dei potenziali vantaggi rispetto a quelle *strut-based* per quanto riguarda la loro costruzione, infatti, grazie al fatto che le superfici delle strutture TPMS cambino costantemente curvatura, si favorisce un auto sostentamento degli strati durante la stampa, al contrario di quanto accade per le *strut-based*. Inoltre, offrono dei vantaggi nel campo biomedico, data la similarità tra le strutture TPMS e la struttura ossea. Infine, uno studio ha rilevato che le giroidi hanno un fattore di assorbimento specifico dell'energia tre volte superiore a quello di una struttura BCC. Questi vantaggi non sono ancora dati per certi e necessitano di ulteriori studi.

In verità, esiste un ulteriore gruppo di strutture ibride che non è stato menzionato prima, ovvero quello delle strutture *shell*. La creazione di queste celle, che sono costituite da piastre invece che da trabecole, è stata resa possibile grazie

⁵Tobias Maconachie et al. «SLM lattice structures: Properties, performance, applications and challenges». In: *materials and DESIGN* (2019).

all'avvento dell'AM, in Figura 3.5⁶ se ne riportano alcuni esempi. Risulta che queste strutture, a parità di densità, abbiano proprietà elastiche superiori rispetto a quelle *strut-based*. È presente, però, una criticità che riguarda la loro costruzione utilizzando processi AM a letto di polvere, in quanto, essendo strutture chiuse, si deve ancora trovare un metodo efficace per la rimozione delle polveri intrappolate al loro interno, nonostante delle strutture *shell* a cella aperta siano già state progettate, costruite e testate. I risultati hanno mostrato un'ottima resistenza e rigidità con densità molto basse [15].

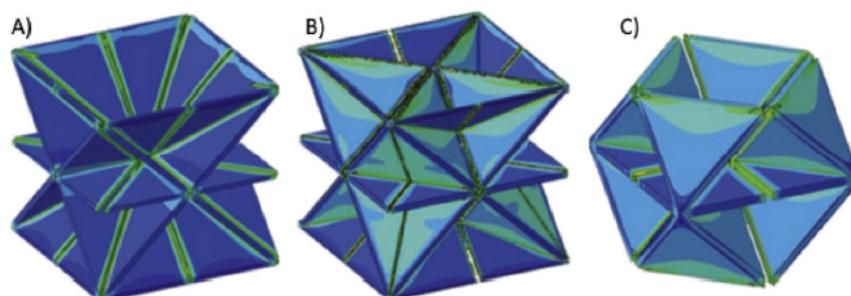


Figura 3.5: Strutture a *shell* in cui si combina il cubo semplice (SC), il BCC e l'FCC: (A) SC-BCC, (B) SC-BCC-FCC e (C) SC-FCC

3.2.2 Scelta della cella

Analizzando le geometrie presentate sopra è stato possibile decidere quali potessero essere prese in considerazione per lo scambiatore. Per la scelta della cella ottimale sono stati tenuti in considerazione alcuni fattori, ovvero:

- All'interno dello scambiatore devono scorrere due fluidi, uno dei quali piuttosto viscoso, è quindi necessario avere una cella con una sezione trasversale minima, in modo da non favorire eccessive perdite di carico;
- La cella deve essere in grado di scambiare una quantità sufficiente di calore sia per convezione forzata che per conduzione, dunque sarebbe opportuno avere un alto numero di trabecole o piani al suo interno;
- Il contributo strutturale della singola cella non è fondamentale, in quanto la differenza di pressione tra due canali è modesta e il numero di celle tra due separatori sarebbe elevato;

⁶Tobias Maconachie et al. «SLM lattice structures: Properties, performance, applications and challenges». In: *materials and DESIGN* (2019).

- La distanza tra due separatori è di 3 mm.

I primi punti descritti sopra sono in contrasto tra loro, il primo, però, permette di escludere le celle di tipo TMPS e *shell*, in quanto una struttura formata da tali celle non consentirebbe lo scorrimento dei fluidi o lo renderebbe molto dispendioso in termini di perdita di pressione, restano, dunque, le celle *strut-based*. Dopo un primo consulto con gli ingegneri di Ellena è stato deciso di puntare sulla semplicità costruttiva della cella, dal momento che lo spazio disponibile e, quindi, le dimensioni della cella stessa, sarebbero state molto ridotte, così è stata selezionata la cella *strut-based* BCC.

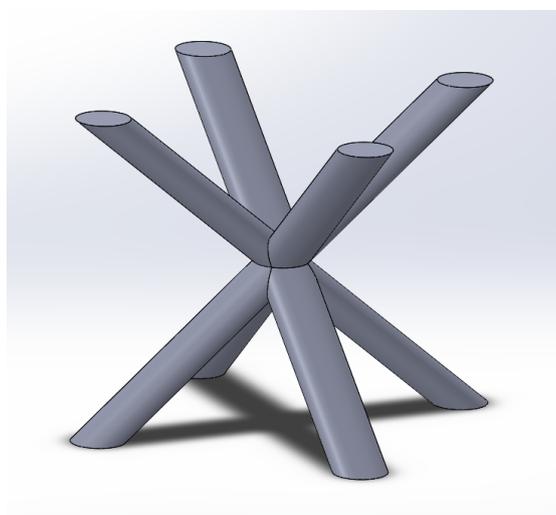


Figura 3.6: Esempio di modello di cella trabecolare BCC

In Figura 3.6 si riporta l'esempio di una cella trabecolare BCC disegnata su SolidWorks. Essa è inscritta in un cubo di 3 mm per lato, la sezione perpendicolare all'asse della singola trabecola è ellittica con l'asse maggiore che misura 0.5 mm.

La ragione per cui si voleva utilizzare una sezione ellittica deriva da uno studio condotto da M. Wong et al. [25] nel quale si vanno ad analizzare lo scambio termico convettivo e le perdite di pressione di cinque pozzi di calore realizzati attraverso l'SLM. Le geometrie analizzate comprendono: trabecole cilindriche, trabecole ellittiche, lamine rettangolari con spigoli, lamine rettangolari con spigoli raccordati e una struttura reticolare. Per l'esperimento, questi elementi sono stampati su delle piastre di alluminio 50×100 mm, la piastra viene scaldata e un flusso d'aria viene direzionato come mostrato in Figura 3.7⁷ (pagina seguente). I risultati dello

⁷M. Wong et al. «Convective heat transfer and pressure losses across novel heat sinks fabricated by Selective Laser Melting». In: *International journal of heat and mass transfer* (2008).

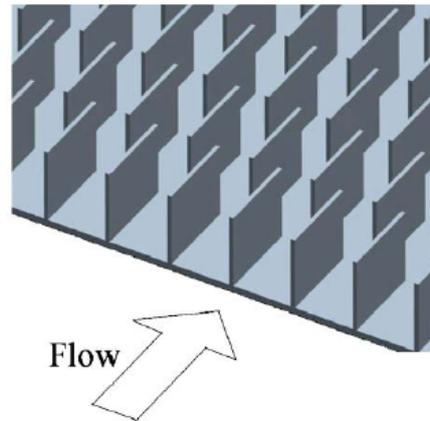


Figura 3.7: Direzione del flusso rispetto agli elementi analizzati

studio hanno mostrato che le trabecole ellittiche offrono le migliori prestazioni tra le geometrie testate, infatti hanno raggiunto il più alto rateo di trasferimento di calore per unità di caduta di pressione.

Infine, in Figura 3.8 si riportano la vista frontale e la vista dall'alto al basso della cella. Osservando la prima, la direzione del flusso è parallela ad un vettore perpendicolare al foglio.

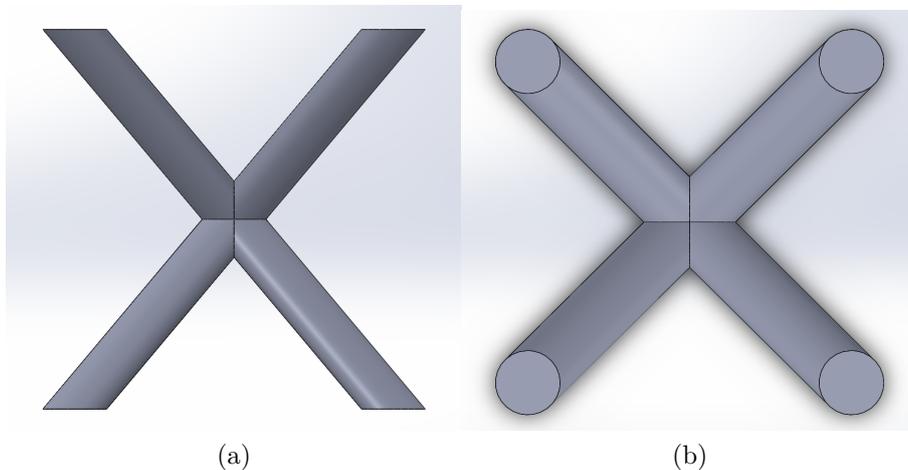


Figura 3.8: Viste cella BCC: (a) Vista frontale e (b) vista dall'alto in basso

3.3 Prima modifica del disegno CAD

Una volta disegnata la cella è stato possibile modificare l'interno dello scambiatore. In questo caso effettuare il cambiamento è risultato piuttosto semplice, in quanto si

è tornati alla geometria dello scambiatore attualmente utilizzato e si sono sostituiti i perturbatori con le strutture reticolari all'interno delle piastre di passaggio. Le uniche due modifiche che sono state apportate alle piastre sono: il restringimento di 0.4 mm del canale di passaggio interno e il rendere lo spessore uguale a 3 mm, in Figura 3.9 è possibile osservare la piastra con l'area di passaggio quotata. Per quanto riguarda i separatori, è stato selezionato uno spessore pari a 1 mm. Mentre le misure esterne e quelle dei fori sono rimaste invariate.

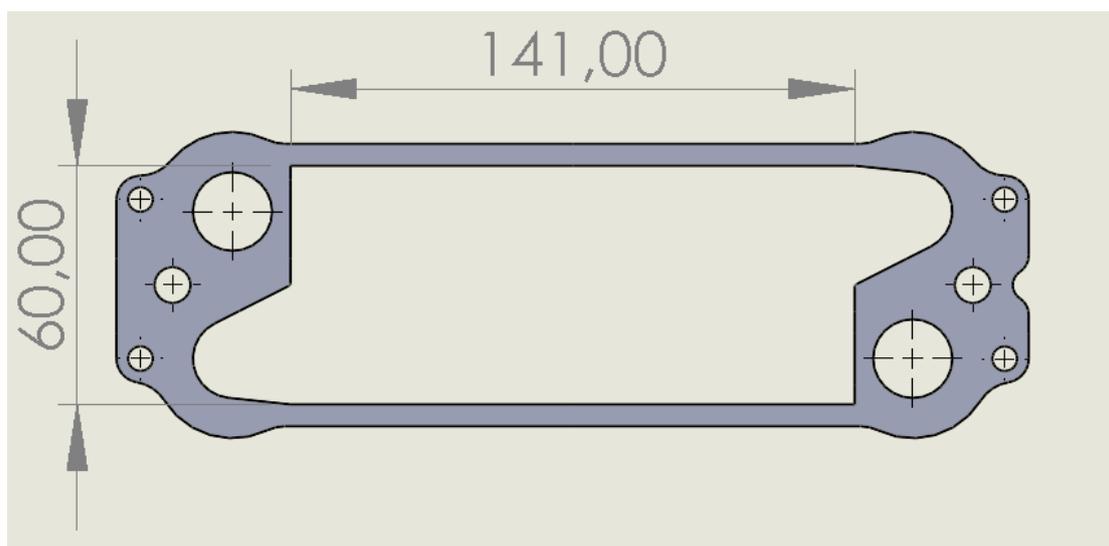


Figura 3.9: Vista in pianta di una piastra di passaggio priva della struttura reticolare

Il piccolo restringimento è stato necessario per poter inserire trasversalmente un numero intero di celle, non è stato necessario modificare la lunghezza della camera in quanto risulta essere un multiplo di 3, ovvero la dimensione del lato della cella in mm. Il risultato finale della piastra è riportato nella pagina seguente in Figura 3.10.

Si può notare come la struttura reticolare non vada a ricoprire l'intera area disponibile, ma lasci liberi i due punti corrispondenti ai condotti di distribuzione dei fluidi, in quanto non sarebbe utile per lo scambio termico e di difficile realizzazione.

Per osservare come si presenti la geometria finale dello scambiatore, si faccia riferimento alle Figure 3.11 e 3.12 (pagina seguente), nella prima se ne riporta una vista esplosa, mentre nella seconda se ne riporta una in sezione. È facile notare la somiglianza con lo scambiatore attuale, soprattutto per quanto riguarda la stratificazione. In questo caso, però, la stampa avrebbe prodotto un blocco unico su cui non sarebbe stato necessario applicare alcuna saldatura.

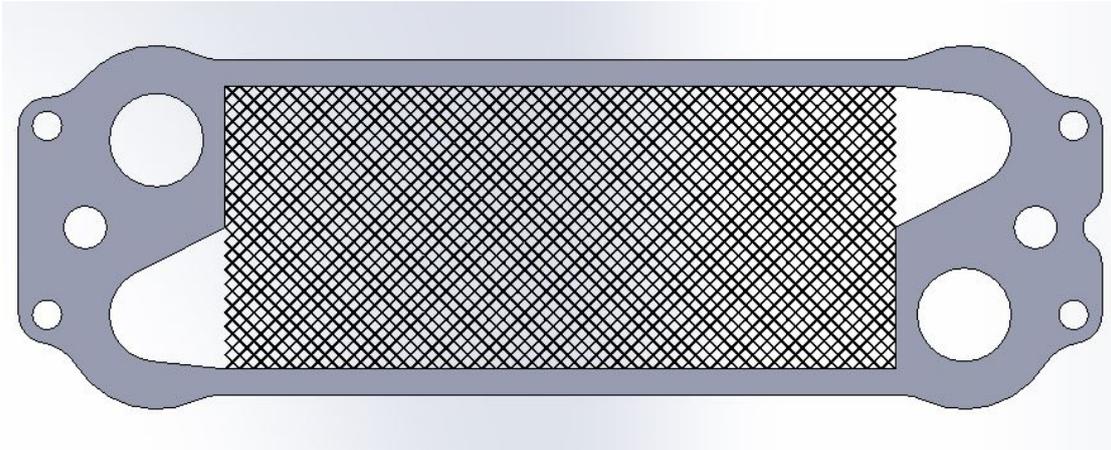


Figura 3.10: Vista in pianta di una piastra di passaggio con struttura reticolare



Figura 3.11: Vista esplosa dello scambiatore

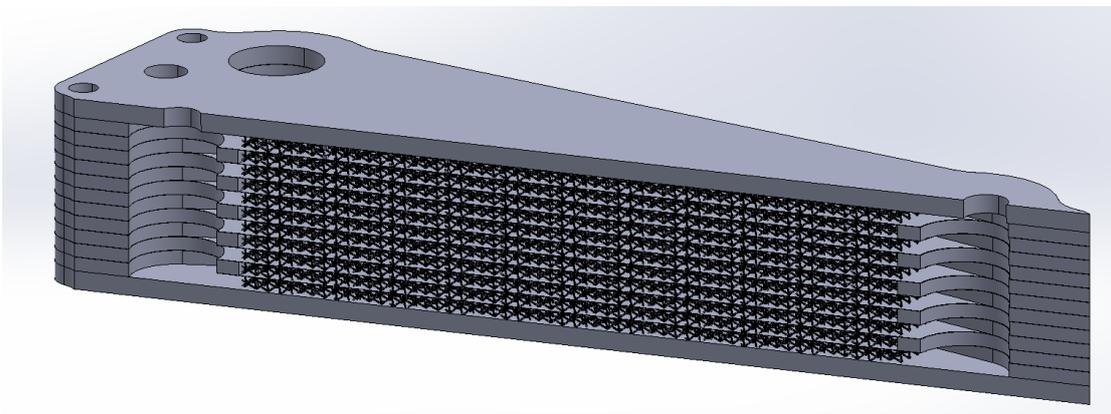


Figura 3.12: Vista in sezione dello scambiatore

Come preannunciato, però, questa geometria è stata scartata a causa di alcune criticità che verranno discusse di seguito.

3.3.1 Criticità della geometria

La criticità principale riscontrata è stata, nuovamente, la quasi certa impossibilità della rimozione totale delle polveri una volta terminato il pezzo. L'idea iniziale era quella di mantenere il più simile possibile la struttura interna dello scambiatore alla struttura di quello utilizzato attualmente, per questo motivo si è scelto di avere 3 mm di spessore delle piastre, alternate da separatori spessi 1 mm. Lo spessore ridotto e l'alta densità di celle presenti all'interno di ogni strato avrebbero portato ad un'alta probabilità di fallimento per quanto riguarda l'estrazione delle polveri, specialmente nelle zone d'ombra evidenziate in Figura 3.13.

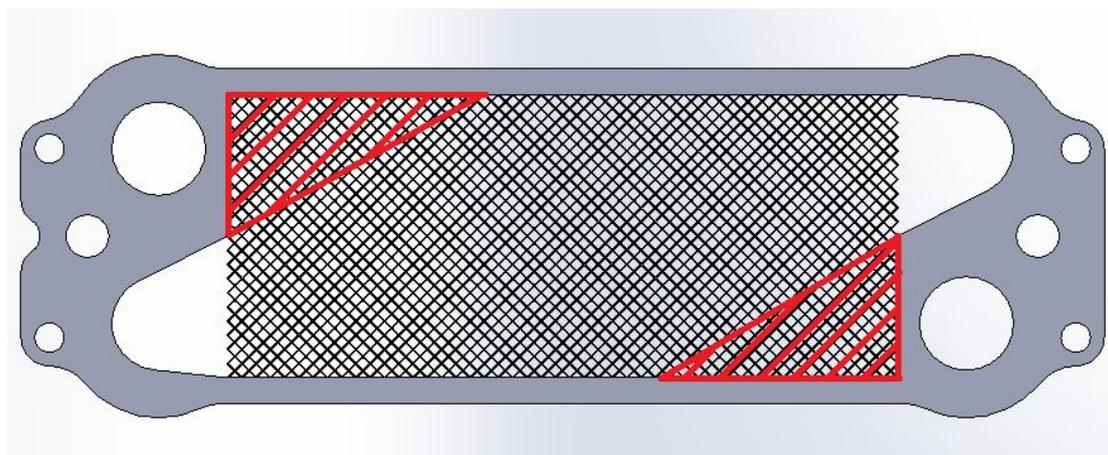


Figura 3.13: Zone critiche per la rimozione delle polveri

Si è pensato ad un paio di soluzioni possibili per far fronte a questo problema: la prima sarebbe consistita nel raccordare gli angoli della zona d'ombra, mentre la seconda avrebbe previsto la creazione di fori ai lati dello scambiatore, ad ogni strato, che avrebbero favorito la fuoriuscita delle polveri. Confrontandosi con Ellena, però, si è ritenuto che gli svantaggi portati da queste soluzioni avrebbero superato i vantaggi. Nel caso della prima soluzione lo svantaggio principale sarebbe stato il perdere una gran parte di volume sfruttabile per lo scambio di calore, inoltre non si avrebbe avuto un'idea precisa su quanto sarebbe stato necessario raccordare le pareti in modo da evitare l'intrappolamento delle polveri. La seconda soluzione avrebbe reso più semplice la fuoriuscita delle polveri, ma avrebbe aumentato di molto le operazioni di *post-processing*. La criticità principale di questa soluzio-

ne non sarebbe stata la creazione dei fori in sè, ma la loro successiva chiusura. Sarebbe stato necessario trovare il materiale adatto con cui costruire i tappi e il modo in cui sigillarli per garantire la tenuta. Sarebbe quindi nato il rischio di avere delle perdite durante il servizio e di aumentare i costi di manutenzione come conseguenza.

Un altro problema che affligge questa geometria riguarda le celle trabecolari. Vista la loro densità è probabile che avrebbero causato un'importante caduta di pressione, anche se per avere una conferma di questa ipotesi sarebbe stato necessario effettuare degli studi CFD. Per ridurre il più possibile questa complicazione si è cercato di ridurre al minimo i raggi delle trabecole, ma scendendo sotto l'ordine del mezzo millimetro, per quanto riguarda il diametro della trabecola, si rischia di incorrere in problemi di rotture difficilmente individuabili durante la manutenzione, oltre all'effettiva difficoltà nello stampare componenti dalle dimensioni così ridotte.

I motivi descritti sopra hanno portato allo scarto di questa geometria e ad un totale cambio di direzione che verrà descritto nel prossimo paragrafo.

3.4 Seconda modifica del disegno CAD

Nel nuovo disegno si è deciso di abbandonare la geometria dello scambiatore a piastre e di passare a quella denominata *shell and tube* per ampliare gli spazi di lavoro e ridurre al minimo il rischio di intrappolamento delle polveri.

3.4.1 Scambiatori di calore *shell and tube*

In questo modello di scambiatore è presente una vasca, formata dalle attuali pareti esterne, nella quale è immerso un numero determinato di tubi, in Figura 3.14⁸ (pagina seguente) è possibile osservarne uno schema.

All'interno dei tubi dello scambiatore in esame viene fatta scorrere l'acqua, mentre l'olio è il fluido che va a riempire la vasca, sommergendo i tubi. Gli scambiatori *shell and tube* sono tra i più diffusi per le applicazioni industriali, solitamente contengono un grande numero di tubi, che può arrivare alle centinaia, paralleli all'asse maggiore della vasca. I due fluidi scorrono solitamente contro corrente e lo scambio di calore avviene per convezione forzata e conduzione. È possibile inserire delle paratie all'interno della vasca in modo da convogliare il

⁸Yunus A. Cengel e Afshin J. Ghajar. *Heat and Mass Transfer*. 2015.

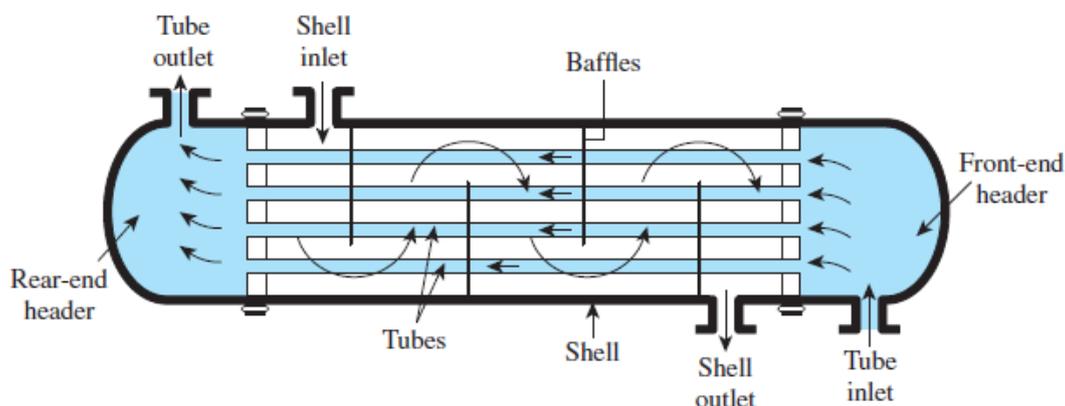


Figura 3.14: Schema di scambiatore di calore *shell and tube*

flusso del fluido e favorire lo scambio termico, inoltre possono avere una funzione strutturale, mantenendo equidistanti i tubi tra loro. Alle estremità dei tubi sono presenti delle aree di accumulo denominate *headers*, dove, appunto, il fluido si accumula prima di entrare all'interno dei tubi e subito dopo esserne uscito.

Inoltre, è possibile ulteriormente classificare questo tipo di scambiatori in base al numero di vasche presenti e al numero di passaggi che i tubi effettuano in esse. Per citare degli esempi, gli scambiatori in cui tutti i tubi effettuano una curva di 180° all'interno della vasca vengono chiamati *one-shell-pass and two-tube-passes*, mentre quelli in cui i tubi escono e rientrano nella vasca sono chiamati *two-shell-passes and four-tube-passes* [5]. Come verrà mostrato in seguito, il design sviluppato per lo scambiatore in oggetto è simile a quello dello schema di Figura 3.14 con alcune modifiche ed aggiunte utili per aumentare lo scambio termico e la fattibilità costruttiva.

3.4.2 Prima versione dello scambiatore *shell and tube*

Prima di giungere al modello che si è effettivamente prodotto, è stato necessario un processo iterativo di continue modifiche e miglioramenti nel quale si possono identificare due versioni principali della geometria interna, in questo paragrafo si procederà a descrivere la prima.

Come è stato anticipato, le dimensioni esterne sono state mantenute, a parte una leggera riduzione dell'altezza, in modo da non avere difficoltà nel posizionamento all'interno del motore. Dunque, il primo passaggio che è stato effettuato è stato quello di rimuovere tutte le piastre e le strutture reticolari, in modo da

ottenere un volume vuoto che va a costituire la vasca. In Tabella 3.2 si riportano le misure principali di tale volume ricavate dal disegno CAD, mentre in Figura 3.15 viene mostrata la vista in pianta del corpo dello scambiatore.

Dimensione	Valore
Lunghezza massima [mm]	189.8
Lunghezza minima [mm]	178.82
Larghezza [mm]	60
Altezza [mm]	44
Volume [mm ³]	480974.78

Tabella 3.2: Dimensioni relative alla vasca dello scambiatore



Figura 3.15: Vista in pianta del corpo dello scambiatore

All'interno di tale volume si vanno a posizionare i tubi in cui scorrerà l'acqua, questi ultimi sono stati disegnati con un diametro interno di 5 mm. Si è deciso di non scendere sotto questo valore in quanto il rischio di non riuscire ad estrarre completamente le polveri sarebbe divenuto troppo alto. Il diametro esterno, invece, è di 7 mm, così che lo spessore del rivestimento risulta essere di 1 mm. Con questo valore si dovrebbe avere una rigidità strutturale sufficiente e si dovrebbero evitare possibili problemi di porosità dovuti alla stampa del pezzo, inoltre lo spessore è ancora abbastanza sottile da permettere una buona conduzione di calore dall'olio all'acqua.

Come si può osservare in Figura 3.16 (pagina seguente), in cui si riporta la sezione trasversale del sistema di tubi, è stato possibile inserire 20 condotti equidistanti tra loro all'interno della vasca. Inoltre, si può osservare come i condotti siano collegati tra loro tramite delle lamine, anch'esse con uno spessore di 1 mm.

Tali lamine hanno una duplice funzione: la prima è quella di incanalare il flusso di olio separandolo e aumentandone lo scambio termico con la lega di alluminio, mentre la seconda è strutturale, in quanto lo scambiatore è soggetto a continue vibrazioni che andrebbero a danneggiare repentinamente i condotti privi di supporti.

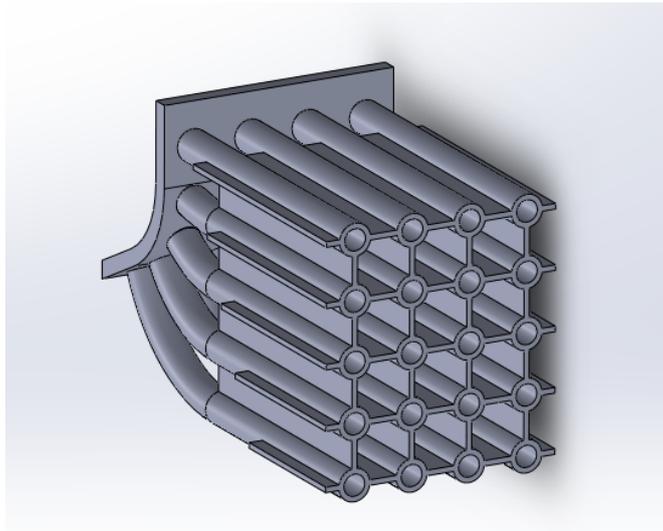


Figura 3.16: Vista in sezione del fascio di tubi dello scambiatore

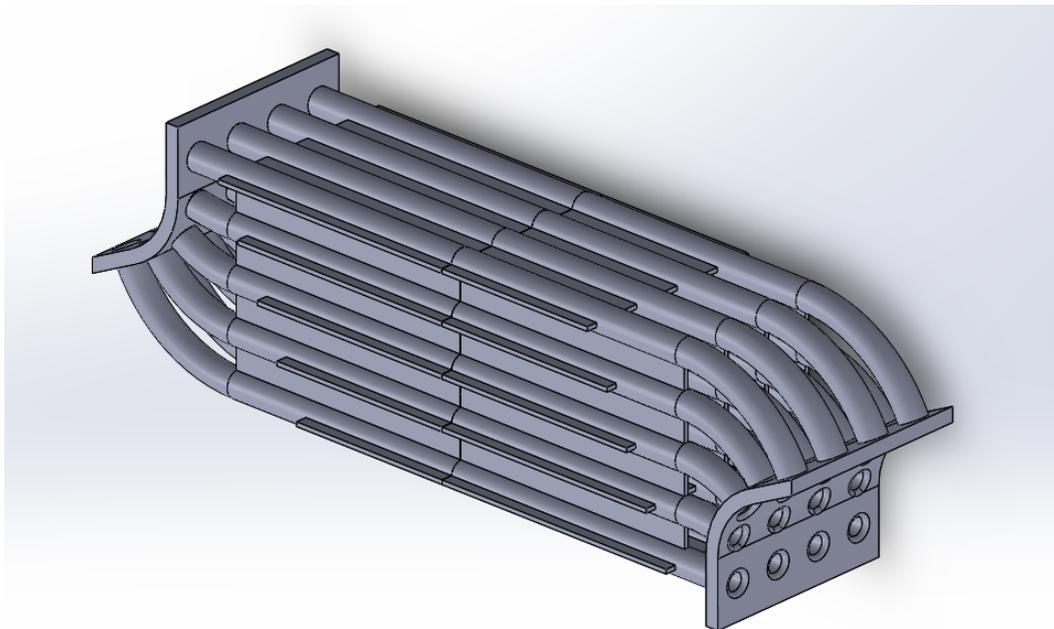


Figura 3.17: Vista del fascio di tubi completo

In Figura 3.17 (pagina precedente) viene mostrata una vista del fascio di tubi completo, lì risulta più semplice notare come le lamine siano scalate per favorire la distribuzione dell'olio all'interno dei vari condotti. Per osservare come il fascio di tubi sia posizionato all'interno della vasca si può fare riferimento a Figura 3.18, nella quale sono anche riportati i punti di entrata e uscita due fluidi ed è quindi possibile intuire il verso dei rispettivi flussi.

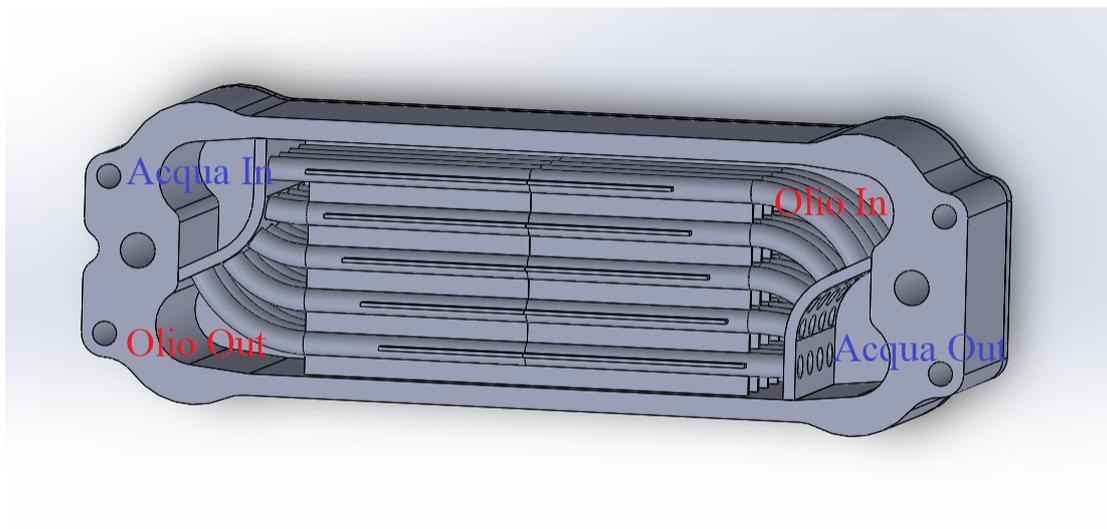


Figura 3.18: Vista dello scambiatore aperto con identificazione dei punti di entrata e uscita fluidi

Infine, in Tabella 3.3 si riassumono i dati principali riguardanti le geometria del fascio di tubi, come: lunghezza massima e minima e curvatura massima dei condotti.

Dimensione [Unità di misura]	Valore
Lunghezza massima [mm]	158.53
Lunghezza minima [mm]	144.18
Diametro esterno [mm]	7
Diametro interno [mm]	5
Distanza tra condotti [mm]	4
Distanza tra condotto e flangia superiore/inferiore [mm]	5.5
Distanza tra condotto e parete vasca [mm]	4.5
Area sezione interna [mm ²]	19.63
Volume totale interno [mm ³]	59423.93
Raggio di curvatura massimo [mm]	33.32

Tabella 3.3: Dimensioni relative al fascio di tubi

3.4.3 Criticità della geometria

Una volta terminato il disegno CAD, è stato necessario analizzarlo con il supporto degli ingegneri di Ellena per verificarne la fattibilità costruttiva. A seguito di questa analisi si è nuovamente riscontrata una criticità che ne avrebbe compromesso la costruzione. Si tratta del fatto che alcune parti del fascio di tubi, in particolare quelle curve e prive delle lamine di supporto, non siano autoportanti, ovvero avrebbero bisogno di supporti durante la stampa che andrebbero poi rimossi una volta terminata. Come descritto nel Capitolo 2, l'utilizzo di supporti temporanei è assolutamente comune nei processi additive, per l'appunto si è visto e si vedrà più avanti nel capitolo che se ne è fatto ampio uso per la creazione dello scambiatore stesso. In questo caso, però, le strutture di supporto sarebbero dovute essere realizzate all'interno dello scambiatore e, considerando che gli accessi alla camera in cui si trova il fascio di tubi hanno dimensioni estremamente ridotte, una successiva rimozione sarebbe risultata impossibile. Perciò la soluzione a cui si è giunti è stata quella di rendere l'intero fascio autoportante, rendendo superfluo l'utilizzo di supporti all'interno della vasca. Questa decisione ha portato alla geometria finale dello scambiatore descritta di seguito.

3.5 Geometria finale dello scambiatore

La soluzione che è stata adottata per rendere la struttura autoportante è stata quella di far continuare le lamine lungo tutta la lunghezza dei condotti fino ai due *headers*. In questo modo, però, l'olio non si sarebbe potuto diffondere all'interno dello scambiatore, in quanto sarebbe stato bloccato nei canali superiori dalle lamine stesse. È stato, dunque, necessario creare una struttura ibrida reticolare, in modo che l'olio potesse diffondersi nel modo più omogeneo possibile. In Figura 3.19 e 3.20 (pagina seguente) si può osservare come siano state modificate le geometrie delle lamine collegate ai condotti.

Come introdotto sopra, in questa configurazione l'intera lunghezza dei condotti è sorretta da una struttura reticolare. In questo modo non sono necessari supporti per il fascio di tubi che non si sarebbero potuti rimuovere. Si è mostrato in Figura 2.4 che è stato comunque necessario utilizzare dei supporti all'interno delle vasche di raccolta dell'acqua, ma, essendo essi molto vicini ai fori di entrata/uscita acqua, la loro rimozione risulta più semplice.

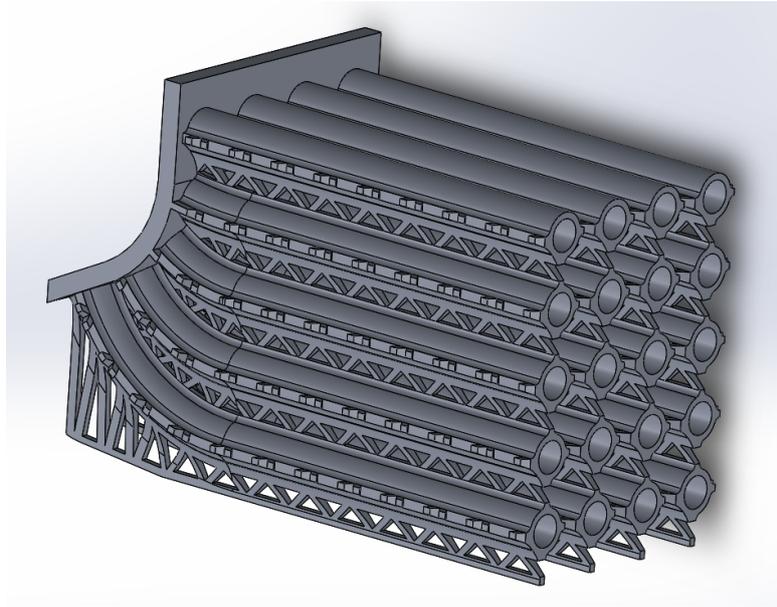


Figura 3.19: Vista in sezione del fascio di tubi finale



Figura 3.20: Vista del fascio di tubi finale

Nelle Figure 3.20, 3.21 e 3.22 (pagine seguenti) si riportano le viste in sezione del fascio di tubi rispettivamente a tre quarti, frontale e frontale all'interno della vasca. In queste Figure è possibile osservare come la disposizione dei condotti sia rimasta invariata e l'unica modifica apportata sia stata alle lamine.

Nelle viste frontali risulta semplice notare come le strutture reticolari siano

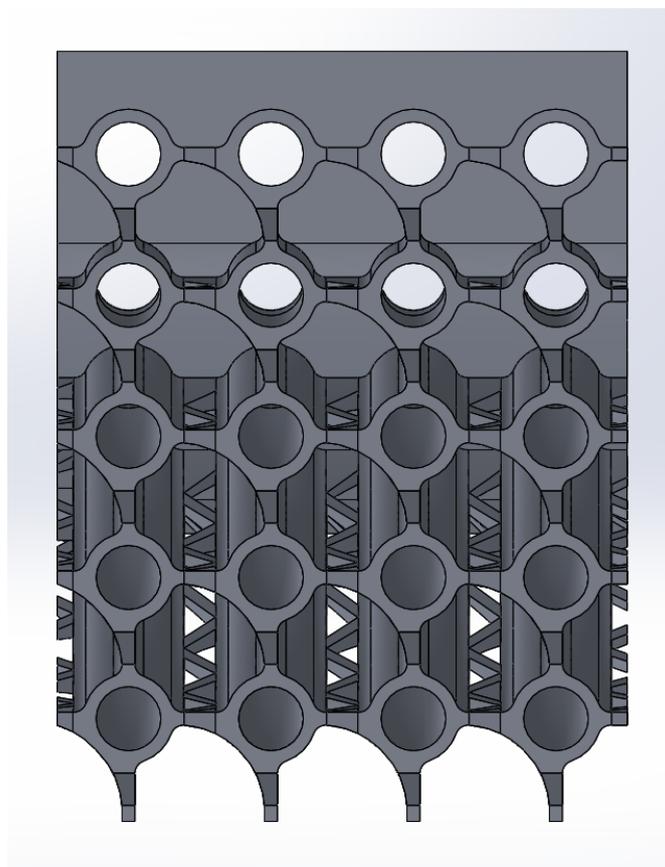


Figura 3.21: Vista frontale in sezione del fascio di tubi finale

state raccordate tra di loro e con i condotti. Anche questa soluzione è stata adottata per rendere queste strutture autoportanti e per dare una maggiore rigidità strutturale al fascio. In Tabella 3.4 (pagina seguente) si riportano i dati geometrici principali relativi alle strutture reticolari. Si può notare come le trabecole non partano mai direttamente dal condotto, ma sia sempre presente un cordone dall'altezza di 1 mm tra la trabecola e il condotto. Anche questo accorgimento, che apparentemente va ad appesantire la struttura e a limitare la diffusione dell'olio attraverso il fascio, è stato necessario per dare la resistenza necessaria al pezzo e per rendere la struttura autoportante. Inoltre, la lunghezza delle trabecole orizzontali rimane invariata lungo l'intero condotto, mentre, per quanto riguarda quelle verticali, la lunghezza rimane costante solamente nei tratti in cui i condotti sono rettilinei. Nelle zone in cui essi curvano si ha un accorciamento delle trabecole presenti tra due condotti, mentre si ha un allungamento di quelle presenti tra i condotti e la parete della vasca. La sezione di queste trabecole diventa rettangolare, in quanto si è preferito aumentarne leggermente le dimensioni per assicurare

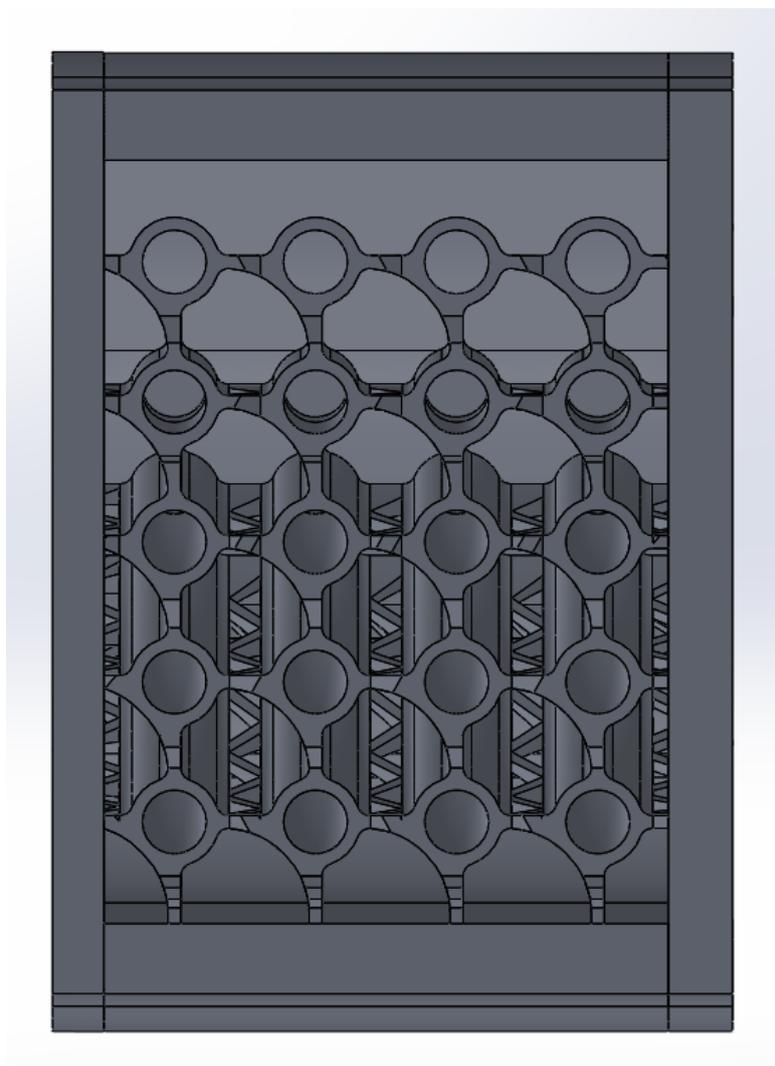


Figura 3.22: Vista frontale in sezione del fascio di tubi finale all'interno delle vasca

una maggiore resistenza, data la maggiore lunghezza che va a raggiungere quasi i 2 cm.

Dimensione	Valore [mm]
Raggio raccordo maggiore	6.5
Raggio raccordo minore	1
Lato sezione quadrata trabecola	1
Lunghezza trabecole orizzontali centrali	3.48
Lunghezza trabecole orizzontali laterali	1.46
Lunghezza minima trabecole verticali	1.28
Lunghezza massima trabecole verticali	17.66

Tabella 3.4: Dimensioni relative alle strutture reticolari del fascio di tubi

In Figura 3.23 si riporta la vista in pianta dello scambiatore in cui è possibile osservare come sia posizionato il fascio di tubi all'interno della vasca. La geometria interna della vasca è stata leggermente modificata rispetto a quella mostrata in Figura 3.15, ora i due *headers* risultano più capienti e con un design più lineare.

Infine, è possibile osservare gli alleggerimenti che sono stati realizzati nella struttura sia in Figura 3.23 che in Figura 3.24, in cui si riporta la vista in pianta dello scambiatore chiuso. Essi sono stati modificati e ampliati, si è cercato di rimuovere più materiale possibile senza andare a compromettere la rigidità strutturale del pezzo e mantenendo lo spazio necessario in prossimità dei fori di entrata e uscita dei fluidi in modo che fosse garantita la tenuta degli o-ring.



Figura 3.23: Vista in pianta dello scambiatore finale aperto

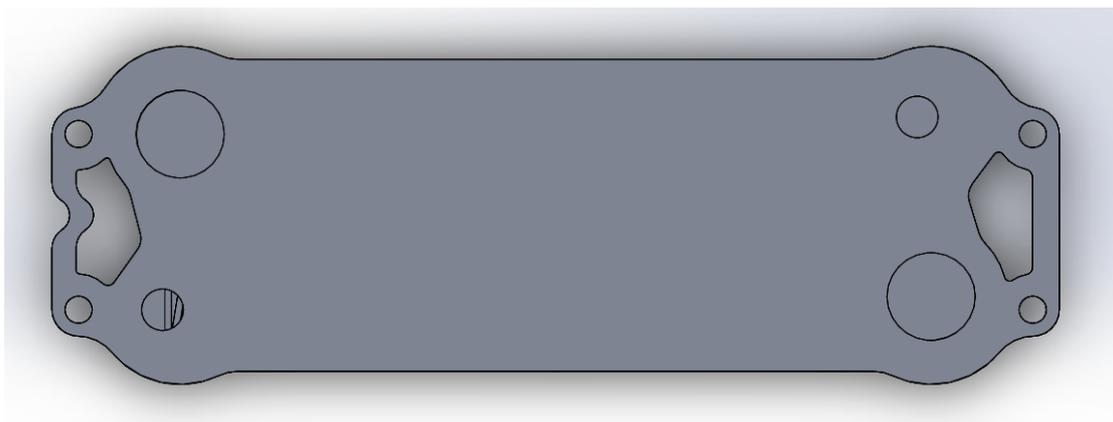


Figura 3.24: Vista in pianta dello scambiatore finale chiuso

Capitolo 4

Produzione dello scambiatore e *post-processing*

In quest'ultimo capitolo verranno descritti i passaggi che sono stati seguiti per la produzione dello scambiatore e le attività di *post-processing* che sono state eseguite una volta terminata la stampa in modo da renderlo pronto per i test sul banco di prova.

4.1 Produzione dello scambiatore

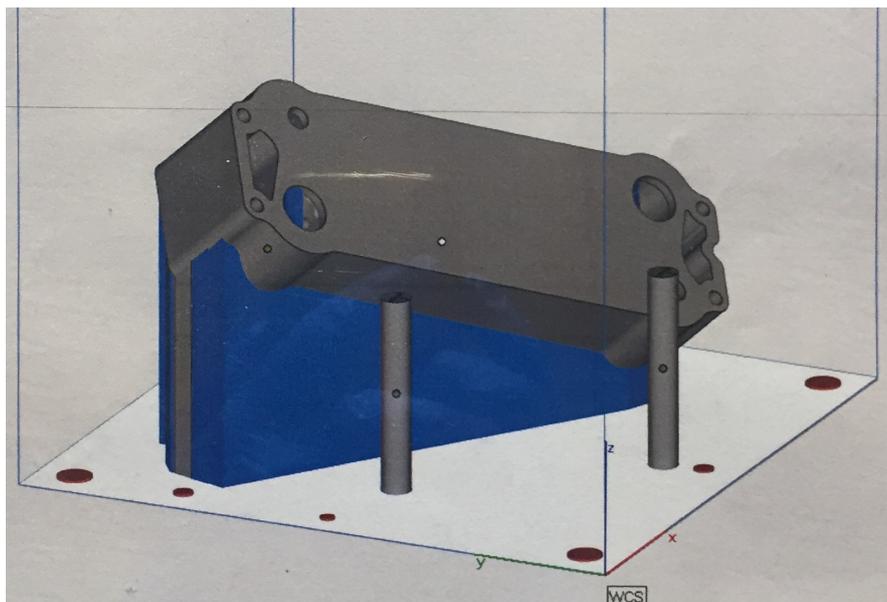


Figura 4.1: Posizione di crescita del componente con visualizzazione dei supporti

Come ampiamente descritto nel Capitolo 2, la stampa del componente segue il file fornito alla macchina. Nel file sono specificati in che modo il componente è posizionato all'interno della camera di lavoro, ovvero in che modo "crescerà" durante la stampa, e quanti sono i *layer* della stampa, ovvero in quanti strati è suddiviso il componente. In Figura 4.1 (pagina precedente) si riporta come è stato posizionato lo scambiatore per la stampa. Da questa Figura è possibile osservare alcuni particolari interessanti. Il primo è che lo scambiatore è stato fatto crescere con una doppia inclinazione, invece che con le facce parallele al piano di lavoro. Questa posizione è stata scelta per far sì che la struttura interna dello scambiatore risultasse autoportante e, come spiegato in precedenza, non necessitasse di supporti interni. Il chiaro svantaggio che porta questa soluzione è l'importante aumento del tempo necessario alla stampa, dovuto all'aumento degli strati di *slicing* necessari rispetto a quelli che si sarebbero avuti con lo scambiatore posizionato in piano. Il secondo particolare che è possibile notare è la disposizione dei supporti identificabili nelle parti colorate in blu in Figura. Si può osservare che, oltre ad essere posizionati al di sotto della scambiatore, sono presenti all'interno dei due *headers*. Inoltre, si noti come, sempre al di sotto dello scambiatore, sia presente una parte aggiuntiva che non è colorata in blu, ma che ha lo stesso colore dello scambiatore. Il motivo risiede nel fatto che si tratta di una parte che, terminata la stampa, avrà la stessa densità dello scambiatore ed è stata aggiunta per evitare che quest'ultimo si deformasse durante il raffreddamento. Anche questa soluzione porta ad un aumento del tempo di lavoro che arriva a superare le sessanta ore. Infine, si possono osservare due dei tre cilindri che vengono stampati in prossimità dello scambiatore, i quali vengono utilizzati per verificare che non ci siano stati problemi durante la crescita del lavoro.

Una volta terminata la stampa, il pezzo risulta sommerso dalle polveri in quanto il piano di lavoro si è completamente abbassato. Per essere estratto, il piano viene fatto risalire lentamente a piccoli step, in modo che l'operatore possa rimuovere con cura la maggior quantità di polveri possibile. Questo processo avviene a camera sigillata e con aspiratore interno attivo, in modo da ridurre il più possibile il rischio che le polveri mosse si accumulino in atmosfera. L'operatore che effettua l'estrazione deve essere munito di tuta e maschera per evitare l'inalazione delle polveri durante l'apertura e la rimozione del pezzo. In Figura 4.2 (pagina seguente) viene mostrata la foto dell'esterno della camera di lavoro sigillata. Si possono notare i due guanti neri, anch'essi sigillati ermeticamente alla porta della camera, che vengono utilizzati dall'operatore per effettuare la rimozione di cui sopra.

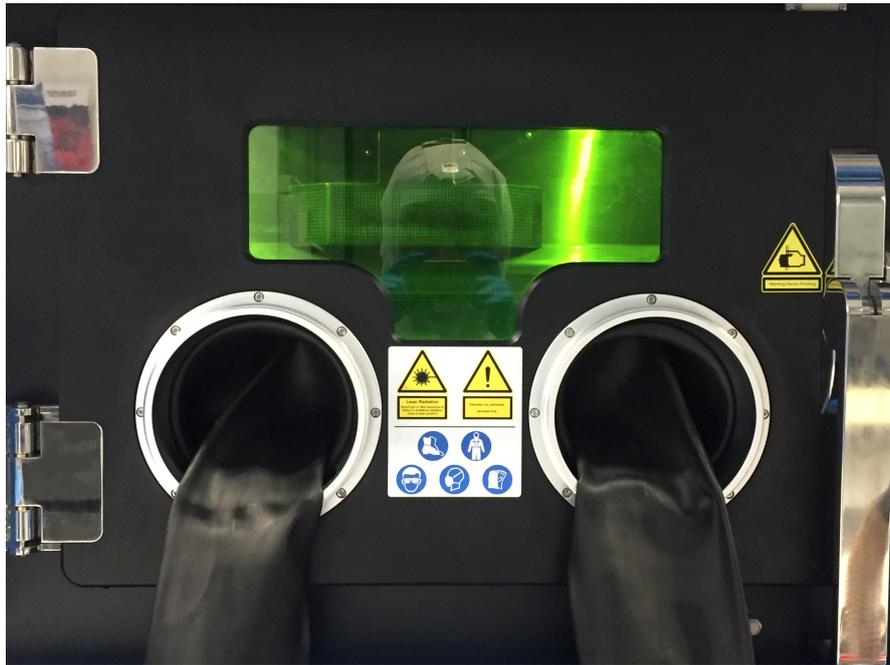


Figura 4.2: Camera di lavoro sigillata

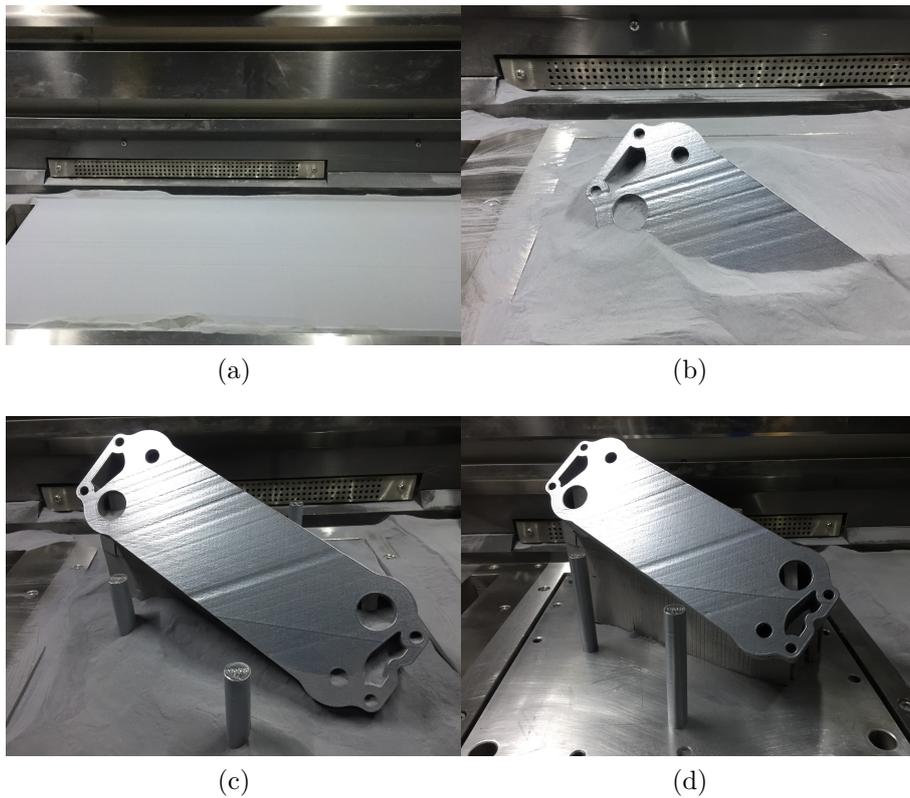


Figura 4.3: Fasi del processo di pulizia del pezzo in macchina

Nella pagina precedente, in Figura 4.3, vengono mostrate le fasi principali del processo di rimozione delle polveri, partendo dalla prima in cui il pezzo è ancora completamente sommerso arrivando all'ultima in cui è possibile vedere il piano di lavoro. Una volta giunti a questa fase è possibile rimuovere il piano di lavoro, a cui è ancora attaccato lo scambiatore, dalla camera. Prima della separazione ci sarà un'ulteriore pulizia del pezzo in cui si andranno ad aspirare in modo più accurato la maggior parte delle polveri rimaste, utilizzando anche aria compressa per rimuoverle dal suo interno. A questo punto si può passare alla descrizione delle attività di *post-processing*.

4.2 Attività di *post-processing*



Figura 4.4: Separazione del pezzo dal piano di lavoro

Si è giunti, dunque, alla separazione del pezzo dal piano di lavoro come viene mostrato in Figura 4.4, come si può osservare viene utilizzata una sega per tagliare i supporti e la parte aggiuntiva di materiale che è stata descritta nel paragrafo precedente. Il liquido che viene riversato sul pezzo durante la lavorazione è necessario per raffreddare l'utensile ed evitare che le polveri prodotte si diffondano

eccessivamente nell'atmosfera. Una volta separato, il pezzo va lavorato in macchina CNC per la rimozione dei supporti e la rifinitura superficiale, in Figura 4.5 (pagina seguente) si mostra il pezzo fissato in macchina dopo che la rimozione dei supporti è avvenuta.

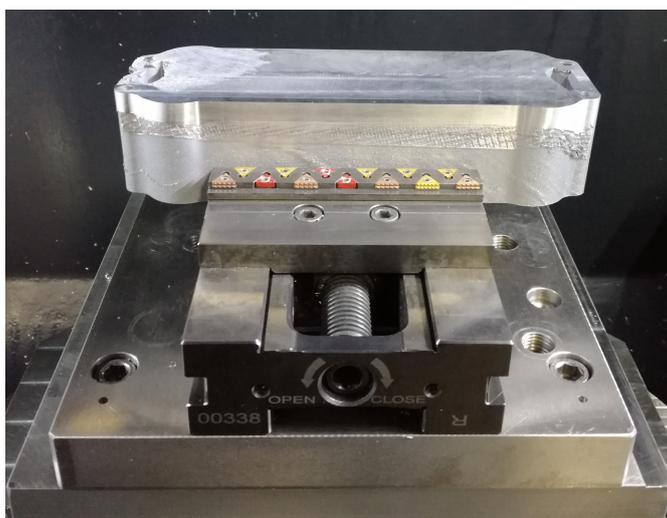


Figura 4.5: Finitura superficiale in macchina CNC

Infine, si effettua un processo di sabbiatura per rimuovere le ultime imperfezioni superficiali e si giunge, quindi al prodotto mostrato in Figura 4.6. Il passo finale necessario è quello del lavaggio interno, che va a garantire l'assenza di polveri residue all'interno dello scambiatore. Il processo verrà descritto in un paragrafo a se stante, nonostante faccia parte delle attività di *post-processing*, in quanto è stato richiesto un maggiore contributo al sottoscritto rispetto ai processi che l'hanno preceduto.



Figura 4.6: Prodotto finale pronto per il lavaggio interno

Completate queste operazioni, il pezzo è stato pesato ed il valore ottenuto è stato quello di 1073 grammi. Si è, dunque, ottenuta una importante riduzione del peso di circa il 30%. Inoltre, dopo un consulto con I.C.P., si è giunti alla conclusione che un successivo modello potrebbe essere alleggerito ulteriormente andando a ridurre lo spessore delle pareti esterne e di quelle degli *headers* che ora misurano circa 5 mm. Sarebbe anche possibile rimuovere del materiale nelle zone circostanti ai fori di entrata/uscita dei fluidi dove la pareti risultano eccessivamente spesse.

4.3 Lavaggio interno e verifica

Le ultime attività che devono essere effettuate sullo scambiatore sono, dunque, il lavaggio interno, che prevede più passaggi illustrati di seguito e la verifica dei residui di polvere. Queste attività sono necessarie in quanto lo scambiatore, una volta consegnato ad I.C.P., dovrà essere testato sul loro banco prova, trattasi proprio del motore M09. Perciò, onde evitare che dei residui di polvere potenzialmente dannosi entrino in circolo all'interno dei sistemi di raffreddamento e lubrificazione, viene effettuato un lavaggio per garantire che il residuo di lavorazione sia al di sotto di una percentuale di sicurezza.

4.3.1 Lavaggio ad ultrasuoni

Il primo lavaggio che viene effettuato è quello ad ultrasuoni, il quale risulta utile per rimuovere la maggior parte dei residui presenti all'interno dello scambiatore. Per questo processo viene utilizzato, appunto, una lavatrice ad ultrasuoni, la quale è munita di una vasca in cui si posiziona il pezzo che deve essere lavato e di trasduttori in grado di generare onde ultrasoniche con frequenze che vanno solitamente dai 20 ai 40 kHz. Una volta che lo scambiatore viene posizionato nella vasca e sommerso in acqua, i trasduttori iniziano ad emettere gli ultrasuoni, i quali inducono bolle di cavitazione che, collassando, vanno ad agitare il liquido. Nonostante le pressioni e temperature raggiunte, le dimensioni delle bolle sono tali da non causare danni al componente, ma ne rimuovono semplicemente i residui di lavorazione. Questo processo dura solitamente pochi minuti, ma può superare i 20 a seconda del pezzo che si sta lavando [19].

4.3.2 Preparazione per le prove di tenuta e flussaggio

Terminato il primo lavaggio, si è voluto testare la tenuta della vasca e dei condotti dello scambiatore prima di effettuare la prova di flussaggio per il conteggio delle particelle di residuo. Per questi test è stato necessario collegare lo scambiatore alle macchine che mettono in pressione il fluido, aria per la prima e olio per la seconda, che devono scorrere al suo interno. Per fare ciò è stata prodotta un'interfaccia, che può essere collegata ai tubi che portano i fluidi, da un lato, e allo scambiatore, dall'altro. Nelle Figure 4.7 e 4.8 si riportano i due lati del modello CAD.

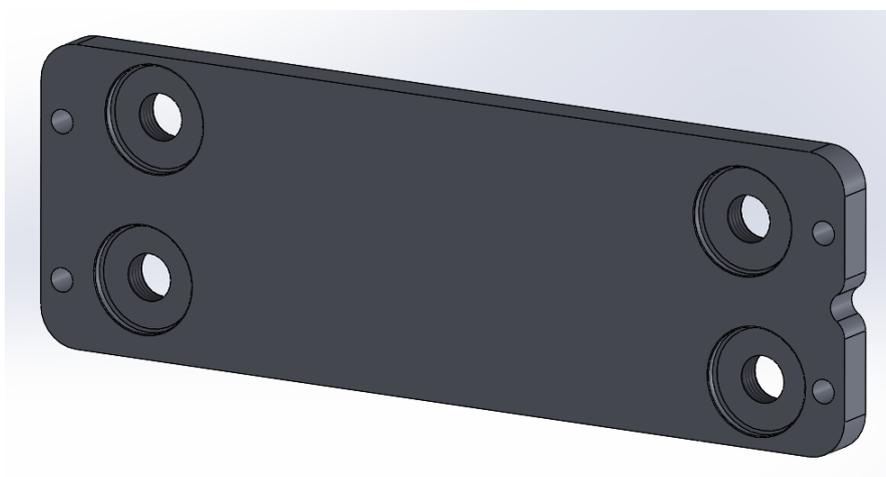


Figura 4.7: Flangia di connessione, lato scambiatore

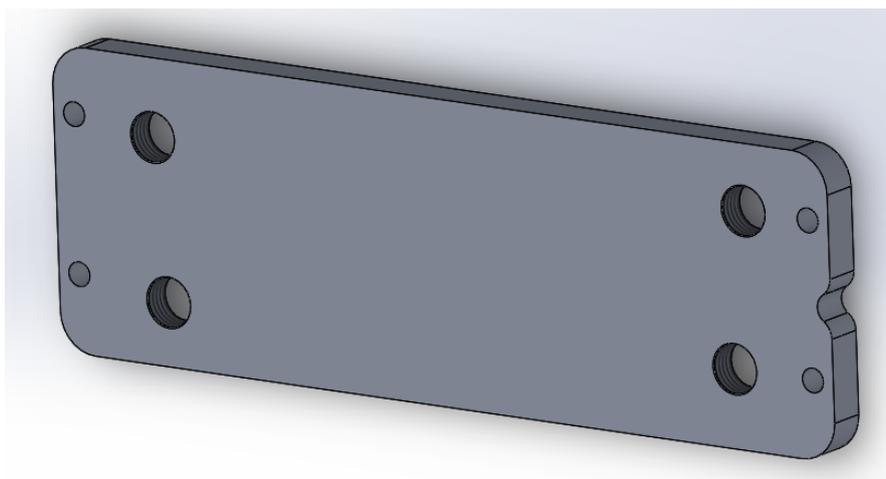


Figura 4.8: Flangia di connessione, lato condotti

Come si può osservare dalle Figure, nella flangia sono presenti i quattro fori attraverso i quali scorreranno i fluidi, attorno ai quali sono presenti le sedi per

gli o-ring che vanno a garantire la tenuta. I quattro fori di raggio inferiore sono, invece, quelli utilizzati per fissare lo scambiatore alla flangia, in Tabella 4.1 se ne riportano alcune dimensioni caratteristiche.

Dimensione [Unità di misura]	Valore
Diametro sedi o-ring [mm]	27.5
Profondità sedi o-ring [mm]	3
Tipo connessione flangia-condotti	1/4 NPT
Spessore flangia [mm]	10

Tabella 4.1: Caratteristiche geometriche della flangia di connessione

In Figura 4.9 si riporta una foto della flangia fissata allo scambiatore. Si possono anche osservare i condotti collegati alla flangia che andranno successivamente connessi al compressore.

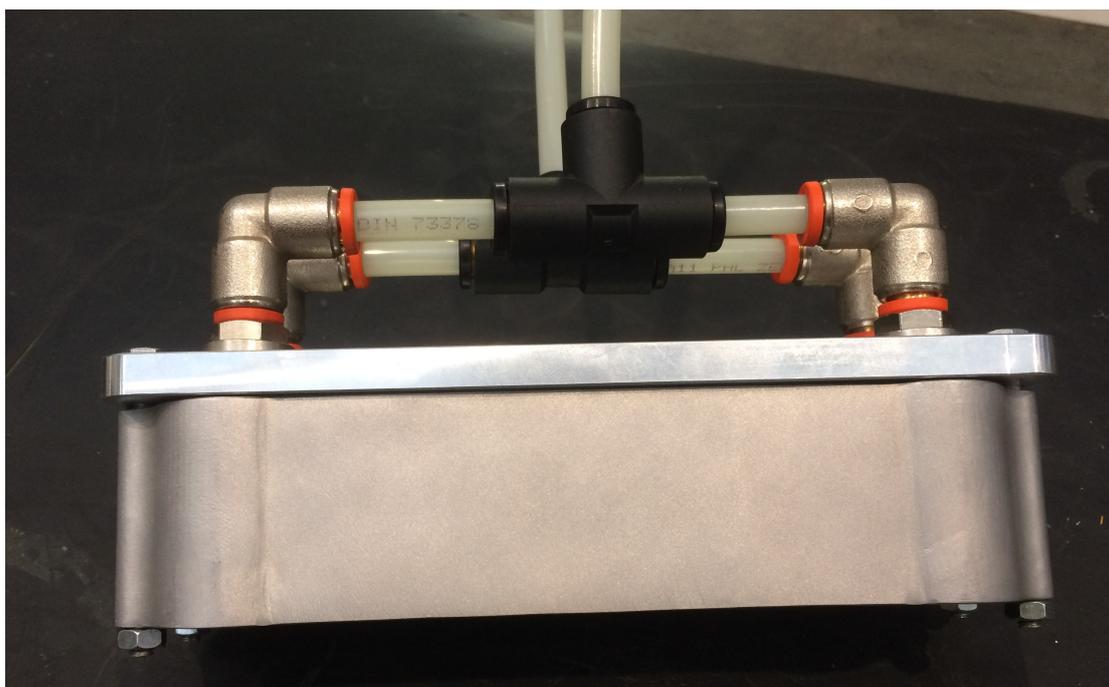


Figura 4.9: Flangia fissata allo scambiatore

4.3.3 Prova di tenuta

La prova di tenuta viene eseguita per verificare che siano assenti imperfezioni all'interno dei condotti tali da non garantire la tenuta e, di conseguenza, la separazione dei due fluidi che andranno ad attraversare lo scambiatore. Il processo

seguito è molto semplice: lo scambiatore viene fissato alla flangia mostrata nel paragrafo precedente, successivamente viene sigillato un foro di uscita mentre il corrispondente foro di entrata viene collegato al condotto del compressore. Si va, dunque, ad immergere in acqua lo scambiatore e si mette in pressione il condotto con aria, in questo caso si porta a 4 bar, e si controlla che non emergano bolle d'aria, le quali implicherebbero la presenza di rotture all'interno dei condotti del pezzo, in Figura 4.10 si mostra lo scambiatore sul banco prova collegato al compressore, pronto per essere testato. La prova ha avuto esito positivo, confermando la buona fattura dello scambiatore.

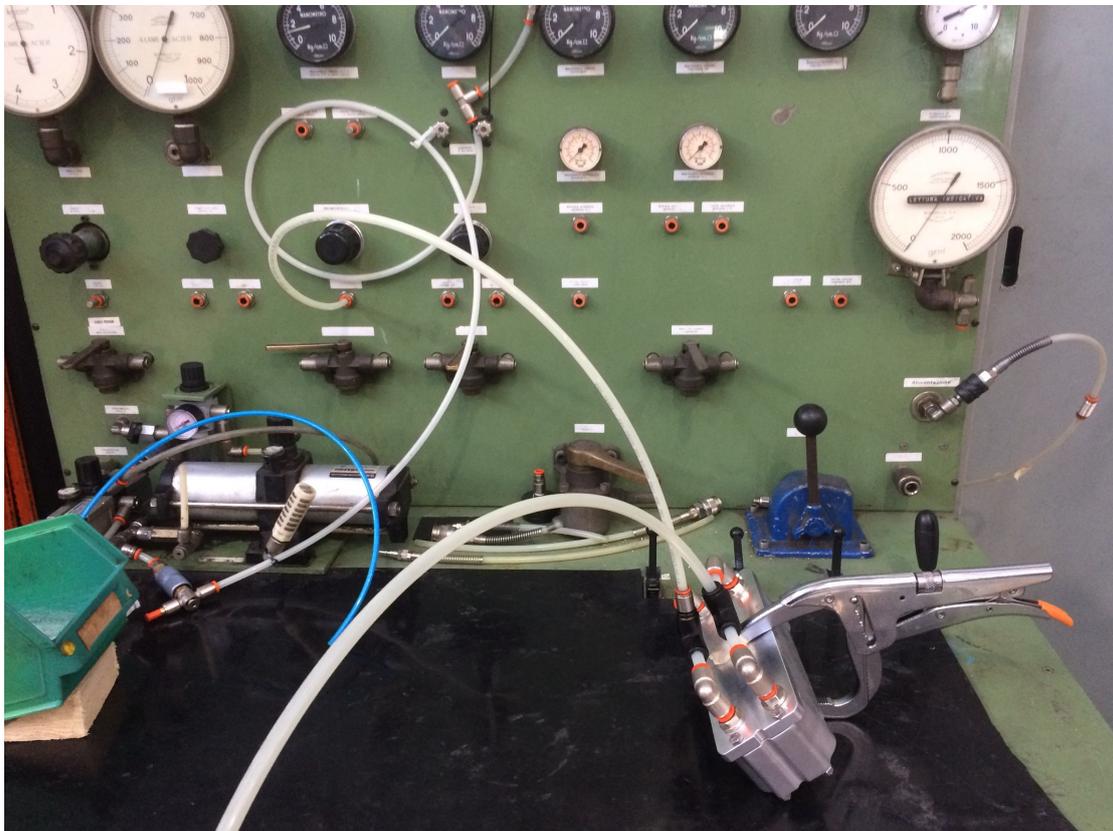


Figura 4.10: Scambiatore connesso al compressore per la prova di tenuta

4.3.4 Prova di flussaggio e conteggio particelle

In questo processo lo scambiatore viene collegato ad un macchina che mette in circolo dell'olio in pressione al suo interno, che in questo caso si è portata a 3 bar, e si fa scorrere per diversi minuti. In Figura 4.11 (pagina seguente) si riporta la foto dello scambiatore collegato ai tubi che consentono il ricircolo dell'olio. Nel

caso in esame sono stati effettuati due cicli da trenta minuti ciascuno, durante ogni ciclo l'olio messo in circolo viene filtrato dopo essere passato nello scambiatore. La macchina, all'interno della quale è posizionato il filtro, effettua un conteggio cumulativo delle particelle di residuo fornendo il risultato sul display che si può osservare in Figura in alto.



Figura 4.11: Scambiatore connesso ai tubi per la prova di flussaggio

Per valutare i risultati ottenuti si fa riferimento alla normativa SAE AS 4059F: tale *Aerospace Standard* definisce le classi di pulizia per la contaminazione da particolato nei fluidi idraulici e include i metodi per la presentazione di tali dati [1]. Per i risultati derivanti da calcolo cumulativo sono presenti quindici classi che vengono riportate in Figura 4.12¹ (pagina seguente). Come si può osservare, ogni classe ha al suo interno sei sezioni che vanno ad identificare dimensioni crescenti delle particelle, tali dimensioni possono essere ricavate con due diversi metodi: l'MTD e l'ACFTD. Nel primo si va a misurare il diametro equivalente dell'area proiettata della particella, mentre, nel secondo, si va a misurare la dimensione

¹12.

maggiore della particella. Con l'aumento del grado della classe, aumenta il massimo numero di particelle di una determinata dimensione che è possibile rilevare dopo aver filtrato il fluido idraulico. Nel caso in esame, i risultati del conteggio posizionano lo scambiatore tra la classe 6 e la 7 di tale normativa.

MTD	Maximum contamination limits (particles per ml)					
	>4µm(c)	>6µm(c)	>14µm(c)	>21µm(c)	>38µm(c)	>70µm(c)
ACFTD	>2µm	>5µm	>15µm	>25µm	>50µm	>100µm
Size code	A	B	C	D	E	F
000	195	76	14	3	1	0
00	390	152	27	5	1	0
0	780	304	54	10	2	0
1	1,560	609	109	20	4	1
2	3,120	1,220	217	39	7	1
3	6,250	2,430	432	76	13	2
4	12,500	4,860	864	152	26	4
5	25,000	9,730	1,730	306	53	8
6	50,000	19,500	3,460	612	106	18
7	100,000	38,900	6,920	1,220	212	32
8	200,000	77,900	13,900	2,450	424	64
9	400,000	156,000	27,700	4,900	848	128
10	800,000	311,000	55,400	9,800	1,700	256
11	160,000	623,000	111,000	19,600	3,390	512
12	320,000	1,250,000	222,000	39,200	6,780	1,024

MTD ISO11171 (Calibration or optical microscope count – particle size based on projected area equivalent diameter)

ACFTD ISO4402 (Calibration or optical microscope count – particle size based on longest dimension)

Figura 4.12: Classi della normativa SAE AS4059

4.3.5 Verifica del residuo secco

L'ultima prova che viene effettuata è quella relativa al residuo secco. Il procedimento di questa prova consiste nell'utilizzare la variazione del peso di un filtro per verificare quanto residuo fisso sia presente all'interno dello scambiatore.

Andando più nel dettaglio, si parte con il pesare un filtro nuovo con una bilancia della precisione di 0.0001 g, in Figura 4.13 (pagina seguente) si riporta questo passaggio dove è possibile osservare che tale filtro abbia un peso di 0.0675g. Si procede, poi, a bagnare l'interno dello scambiatore con dell'etere di petrolio, che si va successivamente a raccogliere in un contenitore pulito. Questo solvente, che



Figura 4.13: Peso del filtro utilizzato per il calcolo del residuo secco

trattiene le impurità presenti nel componente, viene fatto scorrere su filtro di cui sopra, il quale trattiene il residuo e fa passare il solvente. Si attendono alcuni minuti per far sì che l'etere evapori completamente dal filtro e lo si va a pesare nuovamente. La differenza di peso riscontrata è stata di 0.005 g, questo dato risulta in linea con quelli ricavati da altri pezzi da fusione utilizzati in campo aerospaziale.

Conclusioni

Con lo sviluppo di questo progetto si sono nuovamente dimostrati l'utilità e gli innumerevoli vantaggi offerti dal processo produttivo dell'Additive Manufacturing. Sicuramente il progetto non risulta essere giunto al termine, il pezzo è stato prodotto e dai vari lavaggi e verifiche che sono stati effettuati, si può confermare che sia pronto per essere testato e sarà proprio quello il passo successivo che dovrà essere compiuto. Una volta consegnato all'I.C.P., lo scambiatore verrà testato sul loro banco prova, i test serviranno per verificare l'effettivo scambio di calore che si riesce ad ottenere con la nuova geometria sviluppata e se quest'ultima abbia effettivamente ridotto le perdite di carico. Per quanto riguarda questo aspetto, si prevede un risultato positivo specialmente per il circuito dell'acqua, la quale, scorrendo nei condotti, non incontra alcun ostacolo e può, quindi, scorrere in modo più fluido. Nel caso in cui i risultati dei test siano soddisfacenti sarà possibile effettuare un'ottimizzazione della struttura esterna al fine di ridurre ulteriormente il peso come si è descritto nel Capitolo 3.

Infine, sarebbe utile effettuare uno studio CFD per analizzare lo scambio termico in modo da comprendere meglio quanto sia efficiente la struttura interna e, specialmente nel caso in cui i risultati ottenuti dai test non siano soddisfacenti, come poterla migliorare, confrontandosi sempre con i pochi, ma presenti, limiti del processo produttivo scelto.

Bibliografia

- [1] *Aerospace Fluid Power - Cleanliness Classification for Hydraulic Fluids AS4059*. 2020.
- [2] *Aluminium (AlSi10Mg)*. 2014. URL: <https://www.zare.it/en/materials/aluminium-alsi10mg>.
- [3] *Brazing*. URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/Brazing>.
- [4] Lexi Carver. «Una saldatura laser leggera, robusta e senza difetti per l'industria automobilistica». In: *Analisi e Calcolo* (2018).
- [5] Yunus A. Cengel e Afshin J. Ghajar. *Heat and Mass Transfer*. 2015.
- [6] *Distributed Bragg reflector*. 2019. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Distributed_Bragg_reflector.
- [7] J.H. Doo et al. «An investigation of cross-corrugated heat exchanger primary surfaces for advanced intercooled-cycle aero engines». In: *International Journal of Heat and Mass Transfer* (2012).
- [8] *Emmegi Heat Exchanger*. 2019. URL: <http://www.emmegi.co.uk/wb-series-brazed-plate-oil-coolers/wb-series-cutaway-emmegi/>.
- [9] Giancarlo Ferrari. *Motori a Combustione Interna*. 2000.
- [10] *Fiber Lasers: New Types and Features Expand Applications*. URL: <https://www.photonics.com/EDU/Handbook.aspx?AID=25158>.
- [11] Ian Gibson, David Rosen e Brent Stucker. *Additive Manufacturing Technologies*. 2015.
- [12] *Guide to Contamination Standards*. URL: <https://www.parker.com/Literature/EMHFF/ConMon/Guide%20to%20Contamination%20Standards.pdf>.
- [13] *ICP M09*. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/ICP_M09.

BIBLIOGRAFIA

- [14] Luca Iuliano. «Materiale didattico: Tecniche di fabbricazione additiva». 2017.
- [15] Tobias Maconachie et al. «SLM lattice structures: Properties, performance, applications and challenges». In: *materials and DESIGN* (2019).
- [16] John O. Milewski. *Additive Manufacturing of Metals*. 2017.
- [17] Davide Perrone. «Prototype development of an innovative heat exchanger for an aircraft engine cooling system made by Additive Manufacturing (SLM)». Politecnico di Torino, 2019.
- [18] Karina Puebla et al. «Effect of Melt Scan Rate on Microstructure and Macrostructure for Electron Beam Melting of Ti-6Al-4V». In: (2012).
- [19] *Pulizia ad ultrasuoni*. 2020. URL: https://it.wikipedia.org/wiki/Pulizia_a_ultrasuoni.
- [20] *Sei Idee Sbagliate (e forvianti) sulla Stampa 3D*. 2017. URL: <https://astratiblog.wordpress.com/tag/tecnologia-additiva/>.
- [21] R. Singh, S. Singh e M.S.J. Hashmi. *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering*. 2016.
- [22] *STL File Tolerance: A Short Explanation of Faceting and Chord Height*. 2012. URL: <https://www.padtinc.com/blog/stl-file-tolerance-a-short-explanation-of-faceting-and-chord-height/>.
- [23] *Stratasys + Aurora Flight Sciences: World's First Jet-Powered, 3D Printed UAV (Drone) was Delivered in Record Time: "Largest, Fastest, and Most Complex 3D Printed Aircraft Ever Produced"*. 2015. URL: <https://www.photoxels.com/stratasys-plus-aurora-flight-sciences-world-s-first-jet-powered-3d-printed-uav-drone-was-delivered-in-record-time-largest-fastest-and-most-complex-3d-printed-aircraft-ever-produced/>.
- [24] *What is an STL file?* 2019. URL: <https://www.sculpteo.com/blog/2019/06/12/what-is-an-stl-file/>.
- [25] M. Wong et al. «Convective heat transfer and pressure losses across novel heat sinks fabricated by Selective Laser Melting». In: *International journal of heat and mass transfer* (2008).
- [26] Chunze Yana et al. «Microstructure and mechanical properties of aluminium alloy cellular lattice structures manufactured by direct metal laser sintering». In: *Materials Science and Engineering* (2015).