

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale

in Ingegneria Meccanica

Tesi di Laurea Magistrale

**Progetto di uno scambiatore di calore per motociclo mediante Additive
Manufacturing**



Relatori:

Prof. Luca Iuliano

Ing. Flaviana Calignano

Ing. Manuela Galati

Candidato:

Mirco Di Marzo

Anno Accademico 2019/2020

Indice

Indice delle figure.....	iii
Indice delle tabelle.....	vi
Sommario.....	1
1 Scambiatori di calore.....	2
1.1 Scambiatori di calore compatti.....	3
1.2 CHEs a tubi alettati.....	5
1.3 Fabbricazione.....	8
1.3.1 Brasatura.....	10
1.3.2 Saldatura.....	12
2 Additive Manufacturing: dal Rapid Prototyping ad oggi.....	13
2.1 Tecniche dell'Additive Manufacturing.....	14
2.1.1 Solido.....	14
2.1.2 Liquido.....	15
2.1.3 Polvere.....	15
2.2 Differenze tra SLM e EBM: scelta della tecnologia.....	20
2.3 I benefici dell'Additive Manufacturing.....	22
3 Design for Additive Manufacturing.....	24
3.1 Orientamento, piattaforma di costruzione e supporti.....	25
3.2 Canali: forma, dimensione ed evacuazione della polvere.....	27
3.3 Lattice-structure.....	30
3.3.1 Problemi relativi alla realizzazioni di strutture reticolari.....	33
4 Materiale.....	35
4.1 Produzione.....	35

4.2	Leghe di alluminio	37
4.3	Lega AlSi10Mg	38
4.4	Descrizione	38
4.5	Trattamento termico.....	42
5	Progetto dello scambiatore di calore con struttura reticolare	44
5.1	Descrizione e funzionamento dell'impianto di raffreddamento	44
5.2	Descrizione del componente originale.....	45
5.3	Il progetto - pensare AM	46
5.3.1	Considerazioni preliminari su: dimensione di massima, evacuazione della polvere e possibile orientamento in funzione della direzione di costruzione	47
5.3.2	Nozioni base sul dimensionamento: LMTD	50
5.3.3	Definizione del nucleo di scambio termico.....	53
5.3.4	Struttura reticolare	58
5.3.5	Analisi CFD.....	61
6	Design finale dello scambiatore di calore.....	68
6.1	Sviluppi futuri	70
	Conclusioni.....	73
	Bibliografia	75

Indice delle figure

Figura 1.1-Disposizione dei flussi: (a) Flusso parallelo,(b) Flusso controcorrente	3
Figura 1.2- Disposizione dei flussi incrociati: (a) entrambi i fluidi non miscelati, (b) e (c) un fluido miscelato e l'altro miscelato, (c) entrambi i fluidi miscelati	3
Figura 1.3- Distribuzione delle temperature per flusso incrociato con fluidi non miscelati	5
Figura 1.4- (a) Tubo con alette normali e (b) Tubi con alette longitudinali (Vulcan Finned Tubes, Tomball, TX.), (c) Scambiatore di calore a tubi alettati continuo (ALEX Core)	6
Figura 1.6-Configurazione ad alette continue. (a) tubi piatti, (b) tubi circolari (Ranganayakulu & Seetharamu, 2018).....	7
Figura 1.5-Forme di alette individuali su tubi. (a) Elicoidale, (b) anulare, (c) elicoidale segmentato, (d) borchiato, (e) anelli di filo, e (f) scanalato elicoidale (Thulukkanam, 2013)	7
Figura 1.7-Esempi di alette per CHEs a tubi. (a) aletta piatta, (b) aletta piatta forata, (c) aletta ondulata, (d) aletta ondulata forata, (e) particolare tubo-aletta (Thulukkanam, 2013).....	8
Figura 2.1-Classificazione delle tecniche di Additive Manufacturing	14
Figura 2.2-Effetto del fascio di energia sul letto di polvere (Olaf Diegel, 2019).....	16
Figura 2.3-Tecnologia a letto di polvere (Olaf Diegel, 2019)	17
Figura 2.4-Electron Beam Melting (www.manufacturingguide.com)	18
Figura 2.5-Selective Laser Melting (www.manufacturingguide.com)	19
Figura 2.6-Lattice structures (www.3dprinting.com, s.d.).....	23
Figura 3.1- Schema dei principali parametri di processo.....	24
Figura 3.2-Orientamento in macchina di parti: (a) disposizione all'interno del volume di controllo, (b) estrusi verticali e (c) supporti per distanziare la parte dalla piattaforma di costruzione (www.crucibledesign.co.uk, s.d.)	26
Figura 3.3-Influenza dell'angolo d'inclinazione: (a) parte orientata secondo l'asse di costruzione, (b) parte inclinata e (c) effetto dell'adesione delle polveri (Yang, et al., 2017).	26
Figura 3.4- Orientamento in macchina di parti: (a) e (b) condizioni ottimali, (c) condizione da evitare (d) orientamento alternativo (www.crucibledesign.co.uk, s.d.)	27
Figura 3.5-Esempio di supporti interni (www.3dhubs.com, s.d.).....	28
Figura 3.6-Esempi di fori senza supporti (Olaf Diegel, 2019).	29
Figura 3.7-Sviluppo di un canale con svergolamento della sezione	30
Figura 3.8-Esempi di strutture reticolari 2.5D: (a) circolare, (b) triangolare e (c) esagonale.....	31

Figura 3.9-Celle 3D:(a) geometrie unitarie poliedriche elementari, (b) cella 3D a travatura a sezione quadrata e (c) cella 3D con superfici.....	31
Figura 3.10- Applicazioni di strutture reticolari: (a) struttura a lattice completa, (b) struttura a lattice interna, (c) struttura a lattice ibrida, (d) struttura a lattice dinamica	33
Figura 3.11-Effetto gradino per travature di strutture portanti (Harrysson, Cansizoglu, Marcellin-Little, Cormier, & West, 2008)	34
Figura 4.1-Schema produzione della polvere	36
Figura 4.2-Diagramma di fase Al-Si (Li, et al., 2016)	39
Figura 4.3-Polveri di alluminio prodotte mediante atomizzazione a gas (Trevisan, et al., 2017)	40
Figura 4.4-Curva sforzo-deformazione per due provini costruiti in direzioni diverse (Kempen, Thijs, Humbeeck, & Kruth, 2012)	41
Figura 4.5-Immagine SEM della lega AlSi10Mg (Kempen, Thijs, Humbeeck, & Kruth, 2012)	42
Figura 4.6-Andamenti sforzo deformazione per vari trattamenti termici sulla lega AlSi10Mg (Fino, 2018)	43
Figura 5.1-Scambiatore di calore originale (a), vista esplosa(b).....	46
Figura 5.2-Proiezione ombra del componente: orizzontale (a), verticale(b).....	48
Figura 5.3-esempio supporti interni nelle vasche collettrici	48
Figura 5.4-Suddivisione del modello.....	49
Figura 5.5-Schema trasferimento del calore	50
Figura 5.6-Grafico per il calcolo di F.....	53
Figura 5.7-Geometrie preliminari dei canali	54
Figura 5.8-Geometria canale quadrata	54
Figura 5.9-Geometria canale appiattita	55
Figura 5.10-Gap tra piastra di assemblaggio e canali.....	56
Figura 5.11-Layout canali: layout 1 (a), layout 2 (b)	57
Figura 5.12-Disposizione dell'alettatura interna per i diversi layout.....	58
Figura 5.13-Celle: cella 1 (a), cella 2 (b)	59
Figura 5.14-Strutture reticolari: Reticolo 1 (a), Reticolo 2(b)	60
Figura 5.15-Andamento della temperatura nelle strutture reticolari	61
Figura 5.16-Risultati delle analisi CFD sui reticoli: Reticolo 1 (a), Reticolo 2 (b)	61
Figura 5.17-Design per le analisi CFD: componente originale (a), Design 1 (b), Design 2 (c).....	62

Figura 5.18-Esempio calcolo mesh su modello analisi CFD	63
Figura 5.19-Risultati grafici analisi CFD: modello originale (a), Design 1 (b), Design 2 (c)	64
Figura 5.20-Andamento temperatura canale più esterno.....	65
Figura 5.21-Design 3.....	66
Figura 5.22--Andamento della temperatura del fluido refrigerante interno al canale del Design 3	67
Figura 5.23-Andamento della velocità del fluido refrigerante interno al canale del Design 3.....	67
Figura 6.1-Struttura reticolare finale	68
Figura 6.2-Esempio di travature sospese.....	68
Figura 6.3-Profilo canali lungo il nucleo.....	69
Figura 6.4-Design finale dello scambiatore di calore.....	69
Figura 6.5-Design diviso del nucleo	71
Figura 6.6-Disposizione sulla piattaforma di costruzione.....	72

Indice delle tabelle

Tabella 1.1-Parametri della lavorazione di brasatura	11
Tabella 2.1- Caratteristiche generali delle tecnologie SLM e EBM	22
Tabella 4.1-Caratteristiche alluminio (Fino, 2018)	37
Tabella 4.2-Elementi di lega ed effetto (Fino, 2018)	38
Tabella 4.3-Componenti in percentuale della lega AlSi10Mg.....	38
Tabella 4.4-Proprietà meccaniche AlSi10Mg (Kempen, Thijs, Humbeeck, & Kruth, 2012)	41
Tabella 5.2-Dimensione dei componenti	49
Tabella 5.3-Macchinari.....	49
Tabella 5.4-Superfici di scambio termico.....	57
Tabella 5.5-Dati generali dei reticoli	59
Tabella 5.6-Dati input analisi CFD	63
Tabella 5.7-Risultati analisi CFD	63
Tabella 5.8-Dati superfici di scambio	66

Sommario

Il lavoro di tesi è mirato alla riprogettazione di uno scambiatore di calore mediante tecniche additive. Si tratta di dispositivi utilizzati per il trasferimento di energia termica ed hanno una funzione fondamentale nella determinazione dell'efficienza energetica dei sistemi a cui sono associati. Lo scambiatore di calore in oggetto è appartenente ad un motociclo, e come le altre tipologie di veicolo si presenta come un CHEs (Compact Heat Exchangers), il suo scopo è quello di estrarre una determinata quantità di calore, da quella generata dalla combustione del motore, per ovviare a problemi relativi alla resistenza dei materiali e oli lubrificanti. Sfruttando l'aria come elemento di refrigerazione e particolari miscele di acqua ed additivi come vettore per il trasporto della potenza termica, si capisce fin da subito come il loro design ed i limiti delle tecnologie tradizionali non consentano di realizzare una progettazione realmente perfezionata e mirata allo scambio termico; inoltre, date le restrizioni nella progettazione di un veicolo molte volte si è costretti ad operare compromessi estetici. Le tecnologie Additive Manufacturing, con riferimento al Selective Laser Melting, offrono interessanti approcci per questi oggetti sia in termini di performance che estetici. Guidati nella progettazione di un nuovo scambiatore di calore dal "DfAM", che tiene conto dei molteplici parametri che insistono nella progettazione, nel caso oggetto di tesi, l'AM consentirebbe di raggiungere livelli performance superiori. Il presente lavoro studia la possibilità di utilizzare la tecnologia SLM per produrre e innovare i CHEs. La ricerca è stata inquadrata principalmente sulla realizzazione di un design in grado di competere con le performance del modello originale, con attenzione all'evacuazione della polvere dalle cavità interne generate da canali. La validità del design migliore dal punto di vista delle prestazioni è stata effettuata tramite specifiche analisi CFD su modelli semplificati.

1 Scambiatori di calore

Gli scambiatori di calore sono dei dispositivi realizzati per il trasferimento di energia interna termica tra due o più fluidi a temperature differenti. Nelle applicazioni principali i fluidi sono separati da un elemento che prende il nome di superficie di trasferimento termico, e quindi non si mescolano tra di loro. Questi trovandosi a diretto contatto con la superficie sopra indicata trasferiscono il calore per conduzione.

Si fa riferimento alla superficie di separazione come superficie di contatto principale o diretta. Al fine di aumentare l'area di scambio vengono inserite delle superfici secondarie che prendono il nome di alette (Thulukkanam, 2013). Lo scambiatore è generalmente costituito da elementi come un nucleo o matrice di scambio termico ed elementi di distribuzione del fluido come serbatoi, ugelli o tubi rispettivamente di entrata e di uscita.

Utilizzati ampiamente in molteplici settori industriali come petrolchimico, automotive, o refrigerazione sono classificati in funzione di:

1. Costruzione;
2. Processo utilizzato per il trasferimento dell'energia termica;
3. Grado di compattezza della superficie di scambio;
4. Direzione del flusso;
5. Fase dei fluidi;
6. Meccanismi di trasferimento del calore.

La classificazione secondo la costruzione suddivide gli scambiatori in quattro principali macroscopiche categorie: scambiatori di calore tubolari (double pipe, shell and tube, coiled tube), scambiatore di calore a piastre (PHEs), scambiatori di calore a superficie estesa e rigeneratori (Shah, 1981).

Per quanto riguarda il processo di trasferimento dell'energia termica questo può avvenire per contatto diretto quando i due fluidi non sono separati da una superficie ed oltre al trasferimento di calore abbiamo anche un trasferimento di massa, o per contatto indiretto in cui la presenza di una superficie di separazione tra i fluidi rende la miscelazione tra questi impossibile (Thulukkanam, 2013).

Il grado di compattezza della superficie di scambio entra in gioco quando in determinati progetti vi sono delle restrizioni su dimensioni e peso degli scambiatori. Vengono definiti in base alla densità di superficie β , rapporto tra l'area di scambio A e il volume V ed utilizzano matrici di scambio compatte su molti lati dello scambiatore con due fluidi o multi-fluido.

Importante caratterizzazione avviene secondo la disposizione del flusso richiesta, che dipende: dall'efficacia richiesta dello scambiatore, dai percorsi di flusso del fluido, dalle sollecitazioni termiche ammissibili e dai livelli di temperatura. Principalmente possiamo dividerli in: flusso parallelo in cui i fluidi entrano nello stesso punto, scorrono paralleli lungo la stessa direzione come mostrato in Figura 1.1 (a); controcorrente in cui i fluidi scorrono paralleli tra di loro ma in senso opposto Figura 1.1 (b); flusso incrociato i cui i flussi scorrono normalmente tra di loro. In quest'ultimo caso possiamo avere diverse combinazioni di disposizione del flusso come viene rappresentato in Figura 1.2.

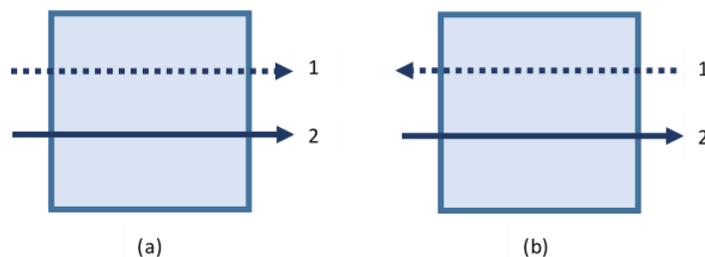


Figura 1.1-Disposizione dei flussi: (a) Flusso parallelo,(b) Flusso controcorrente

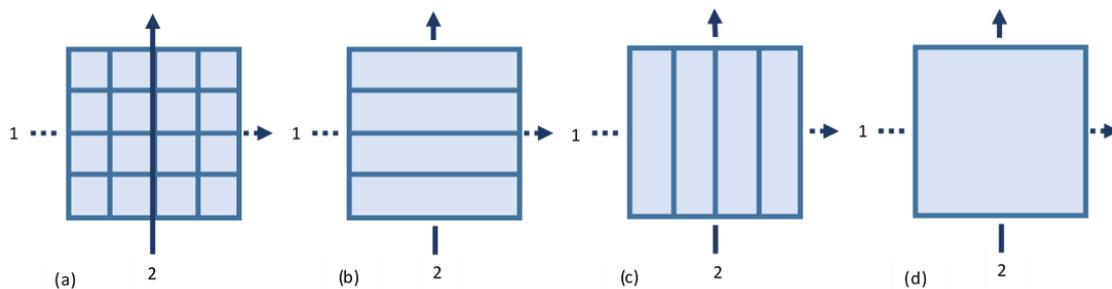


Figura 1.2- Disposizione dei flussi incrociati: (a) entrambi i fluidi non miscelati, (b) e (c) un fluido miscelato e l'altro miscelato, (c) entrambi i fluidi miscelati

Infine, possiamo classificare gli scambiatori in funzione delle fasi dei fluidi di lavoro come: gas-liquido principalmente utilizzati nei scambiatori compatti a tubo con alette con il liquido sul lato tubo, liquido-liquido come negli scambiatori shell and tube e scambiatori gas-gas come i recuperatori di preriscaldamento o intercooler.

1.1 Scambiatori di calore compatti

Lo studio del trasferimento di calori potenziati ha avuto uno slancio negli ultimi anni, soprattutto a causa della maggiore richiesta da parte dell'industria di equipaggiamenti per lo scambio termico con un costo di costruzione inferiore a quello dei normali dispositivi per il trasferimento di calore; anche risparmio di materiali e di energia forniscono una vigorosa motivazione per lo sviluppo di metodiche di miglioramento dei dispositivi. Ad esempio nel progetto sistemi di raffreddamento per autoveicoli

o aeromobili, è indispensabile che gli scambiatori termici siano particolarmente compatti e leggeri. Queste applicazioni, nonché numerose altre, hanno portato allo sviluppo di sistemi di trasferimento di calore potenziati.

Le tecniche di potenziamento possono essere classificate in due tipologie: passive e attive (Ranganayakulu & Seetharamu, 2018). I metodi attivi richiedono l'ausilio di una fonte energetica esterna per migliorare lo scambio, come la vibrazione superficiale, ma dal punto di vista commerciale per via dei costi, hanno suscitato uno scarso interesse (Webb, 1978). Mentre i metodi di potenziamento passivi prevedono l'impiego di superfici speciali o di additivi per i fluidi di lavoro. Tipicamente viene migliorata l'efficienza dello scambio termico con l'introduzione di geometrie di superfici particolari sul lato gas e le principali tecniche possono essere ricondotte alle seguenti:

- Aumentare la superficie di trasferimento del calore efficace per unità di volume (A), senza modificare apprezzabilmente il coefficiente di scambio termico globale (h);
- Aumentare h senza modificare A ottenuto da una conformazione speciale del canale, ondulato o corrugato, fornendo una miscelazione del fluido ed una separazione dello strato limite all'interno del canale;
- Aumento sia di h che di A introducendo alettate interrotte ed aumentando l'area effettiva di scambio.

Quindi gli scambiatori di calore compatti di seguito denominati CHEs (Compact Heat Exchangers) impiegati in molteplici settori e applicazioni presentano le seguenti le caratteristiche fondamentali discusse da Shah, 1981:

- Superfici di scambio estese con un elevato rapporto di densità di superficie β , generalmente superiore a $700 \text{ m}^2/\text{m}^3$ almeno su di uno dei due lati del fluido di lavoro, solitamente gas;
- Piccolo diametro idraulico;
- Comunemente uno dei due fluidi è un gas;
- Le cadute di pressione sono importanti tanto quanto la velocità di trasferimento del calore;
- Pressioni e temperature di esercizio sono limitate;
- L'uso di superfici compatte viene tradotto in dimensioni dello scambiatore con una grande area frontale e lunghezza di flusso ridotta;
- Diverse varietà di superfici con ordini di grandezza della densità di superficie;
- Flessibilità nella distribuzione della superficie sia sul lato freddo che sul lato caldo da parte del progettista.

Altre caratteristiche che possono identificare uno scambiatore compatto sono i materiali utilizzati per la realizzazione delle alette, che risultano essere limitati in funzione delle temperature di esercizio. Di fatti posso essere realizzate in alluminio, rame o ottone per applicazioni a bassa e moderata temperatura, mentre vengono realizzate in acciaio inossidabile per quelle ad alta temperatura con una diminuzione dell'efficienza di alettatura.

La fabbricazione avviene mediante saldatura, brasatura o con collegamento meccanico e verranno descritte in seguito con maggiore attenzione.

La disposizione del flusso comunemente usata ricade nella tipologia a flusso incrociato con passaggio singolo o a flusso incrociato multipass. È interessante notare in Figura 1.3, in linee generali, come le variazioni di temperatura bidimensionali dei due fluidi in entrata ed in uscita fanno ricadere l'efficacia termica di questo arrangiamento tra quello a flusso parallelo e quello contro corrente (Thulukkanam, 2013).

Gli scambiatori compatti in base alla loro costruzione possono essere suddivisi in: tubi alettati (tube-fin), piastre alettate (plate-fin) e rigeneratori. Oggetto del lavoro di tesi è uno scambiatore a tubi alettati per questo di seguito viene approfondito.

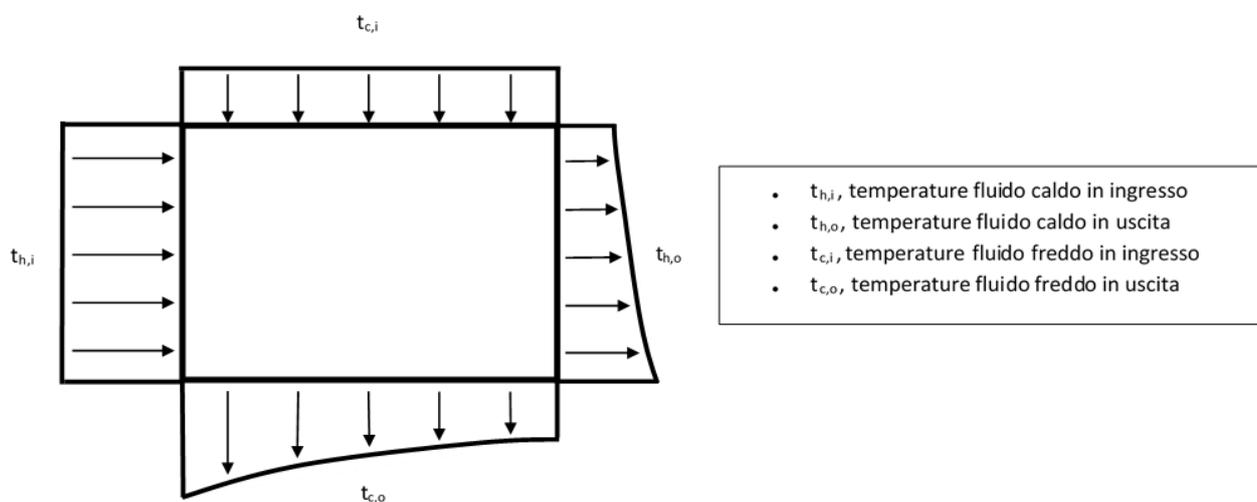


Figura 1.3- Distribuzione delle temperature per flusso incrociato con fluidi non miscelati

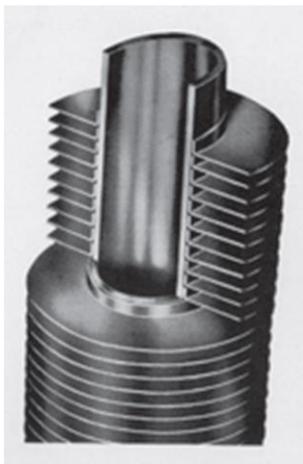
1.2 CHEs a tubi alettati

Gli CHEs a tubi alettati, come accennato in precedenza, vengono utilizzati per uno scambio di calore tra gas e liquido. In tale condizione generalmente il coefficiente di scambio termico sul lato liquido è di un ordine di grandezza superiore a quello gas. Dunque, al fine di avere delle conduttanze

termiche bilanciate vengono inserite delle superfici potenziate mediante l'ausilio di alette sul lato gas.

Anche qui bisogna distinguere due tipologie di costruzione. Una quella della costruzione di alette sulla superficie esterna del tubo per tutta la sua lunghezza e quelle in cui il layout a matrice di tubi viene inserito all'interno di alette continue. Come mostrato in Figura 1.4 possiamo quindi distinguere le diverse costruzioni di alettature:

- Normali alla superficie esterna del tubo (Figura 1.4 a);
- Alette longitudinali sui singoli tubi (Figura 1.4 b);
- Alette esterne piane o continue su matrici di tubi (Figura 1.4 c).



(a)



(b)



(c)

Figura 1.4- (a) Tubo con alette normali e (b) Tubi con alette longitudinali (Vulcan Finned Tubes, Tomball, TX.), (c) Scambiatore di calore a tubi alettati continuo (ALEX Core)

I tubi con alette individuali si presentano con una geometria più robusta ma minore compattezza rispetto a quelli con alette continue; i tubi hanno geometrie semplici, circolari e le alette possono essere di diverse tipologie come mostrato in Figura 1.5.

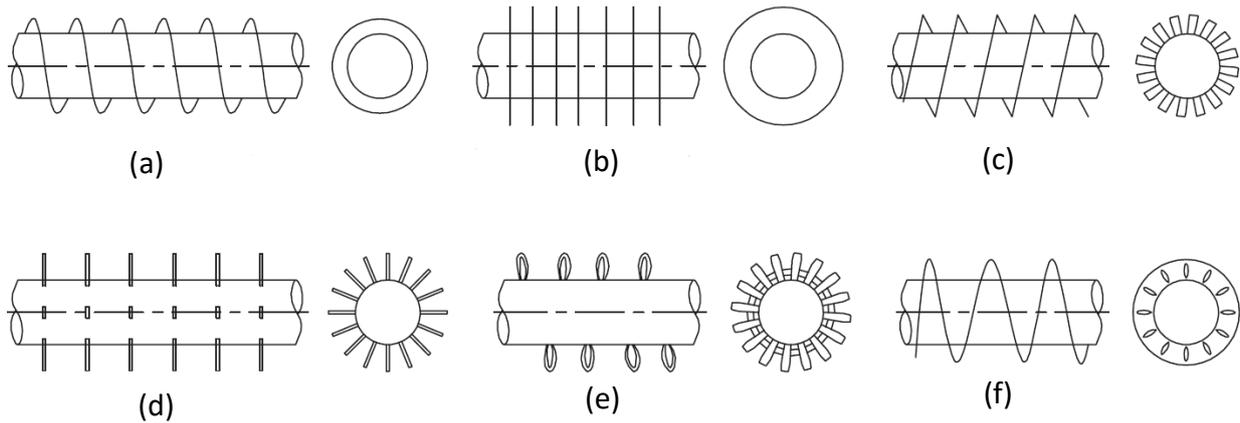


Figura 1.5-Forme di alette individuali su tubi. (a) Elicoidale, (b) anulare, (c) elicoidale segmentato, (d) borchiato, (e) anelli di filo, e (f) scanalato elicoidale (Thulukkanam, 2013)

Per quanto riguarda la configurazione ad alette continue, questa si presta maggiormente nelle applicazioni come air-conditioning, refrigerazione e radiatori per motori a combustione interna, in cui un fluido refrigerante ad alta pressione è contenuto sul lato tubo. Si identificano due superfici come mostrato in Figura 1.6: quella primaria, tubo e quella secondaria, aletta.

La superficie primaria presenta tubi secondo specifiche tecniche ASTM, i quali devono essere privi di saldature e lo spessore deve essere adeguato laddove si presentano applicazioni in cui il fenomeno dell'erosione è rilevante. La loro geometria tipicamente è circolare o piatta, ovvero tubi di forma rettangolare in cui gli angoli vengono smussati. I tubi circolari vengono utilizzati quando si lavora con alta pressione dal lato fluido, mentre quelli piatti a bassa pressione come avviene nei radiatori per veicoli.

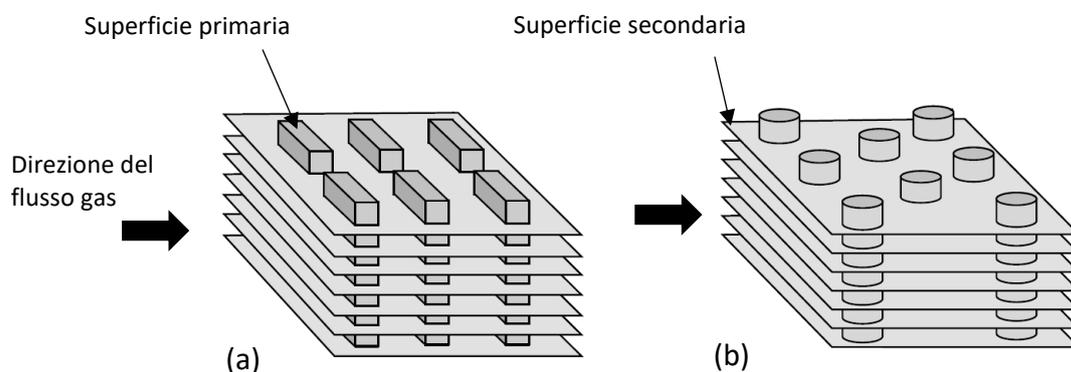


Figura 1.6-Configurazione ad alette continue. (a) tubi piatti, (b) tubi circolari (Ranganayakulu & Seetharamu, 2018).

Per quanto riguarda la superficie secondaria, le alette continue sono fissate permanentemente mediante tecniche di assemblaggio come l'espansione dei tubi. Ottimizzate per avere un'alta efficienza energetica possiamo suddividerle in (Thulukkanam, 2013):

- Aletta piatta, non presenta alcuna ondulazione e fornisce la minore caduta di pressione dell'aria (Figura 1.7 a);
- Aletta ondulata, fornisce la massima velocità di trasferimento del calore (Figura 1.7 c);
- Aletta forata, utilizzata maggiormente con tubi piatti e presentano un maggiore trasferimento di calore con dimensioni ridotte (Figura 1.7 b-d).

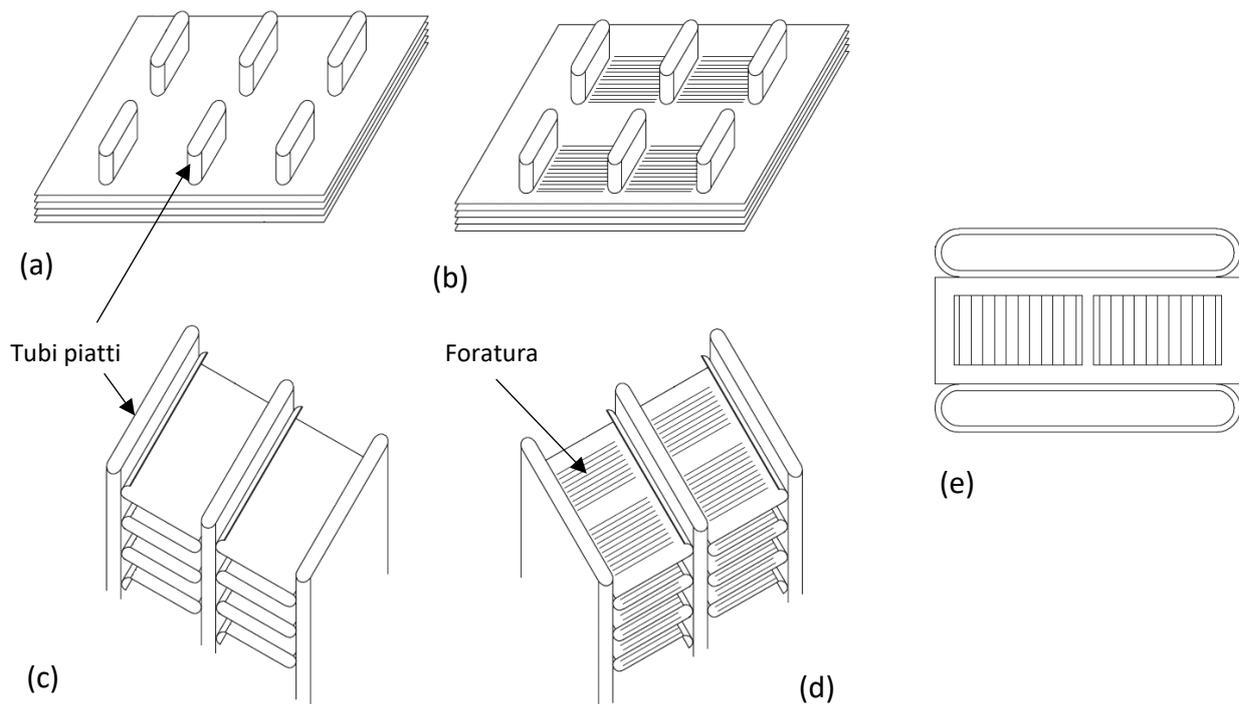


Figura 1.7-Esempi di alette per CHEs a tubi. (a) aletta piatta, (b) aletta piatta forata, (c) aletta ondulata, (d) aletta ondulata forata, (e) particolare tubo-aletta (Thulukkanam, 2013).

1.3 Fabbricazione

Con i progressi tecnologici nel campo dei materiali e dei collegamenti tra parti, i processi di fabbricazione per scambiatori richiedono oggi elevati standard di know-how sulle lavorazioni da eseguire. La scelta di materiali di qualità e di un design adeguato per l'arrangiamento di uno scambiatore, potrebbero essere compromesse se la lavorazione avvenisse in maniera errata. Inutile aggiungere che il guasto di un apparecchio di trasferimento termico può causare perdite di produzione, incidenti o danni ad altri elementi ad esso connessi. Pertanto diventa essenziale il

controllo della qualità del prodotto durante le fasi di fabbricazione ed il suo successivo funzionamento.

In qualsiasi tipo di produzione di scambiatori, i metodi generali di fabbricazione utilizzati sono: formatura, laminazione, piegatura, tranciatura, saldatura, brasatura, rettifica, ecc. Tutti questi metodi introducono stress residui che possono compromettere la durata o il funzionamento del componente. Quindi le buone pratiche ingegneristiche devono essere utilizzate per ridurre al minimo lo stress nei materiali utilizzati nella fabbricazione.

I disegni progettuali per la fabbricazione conterranno maggiori dettagli rispetto a qualsiasi altro disegno tecnico, poiché la presenza di numerosi elementi, forature e collegamenti deve essere descritta minuziosamente (Ranganayakulu & Seetharamu, 2018).

Risulta quindi evidente che il flowchart, le sequenze di assemblaggio ed i piani d'ispezione per la validazione e realizzazione di un qualsiasi tipo di scambiatore risultano essere molto onerosi.

Trattando nello specifico come oggetto della mia tesi uno CHE a tubi alettati continui in lega di alluminio, vediamo di seguito alcune delle linee guida sulle principali tecnologie di formatura ed assemblaggio utilizzate nella realizzazione del nucleo.

Gli elementi che compongono il nucleo sono principalmente due, tubi ed alette. Le tecnologie utilizzate per la loro realizzazione sono ampiamente consolidate nell'industria. Per i tubi, come accennato in precedenza per questa categoria di CHEs non devono presentare alcuna saldatura secondo le normative ASTM, devono essere realizzati per deformazione plastica tramite processi di estrusione o trafilatura, ed infine tagliati nella giusta misura per l'applicazione. Per quanto riguarda le alette il numero dei processi varia in funzione del grado di complessità della stessa. Si parte da bramme che vengono lavorate meccanicamente con passaggi ripetuti di laminazione fino ad ottenere delle lamine dello spessore desiderato, in seguito vengono tranciate nelle giuste dimensioni e laddove il progetto lo richiede vengono effettuate delle aperture per le alette forate. Infine se l'aletta deve essere ondulata si effettua un processo di piegatura.

L'assemblaggio tra i vari elementi che compongono il nucleo dello scambiatore è lo step maggiormente impegnativo e viene effettuato con diverse tecniche (Thulukkanam, 2013).

La prima è quella di un collegamento meccanico, ovvero nella pratica comune tubi ed alette sono assemblati nelle posizioni finali ed in seguito i tubi vengono espansi in modo da ottenere il contatto metallo-metallo ed in seguito le estremità dei tubi vengono espanse sulle piastre laterali.

Le altre tecniche sono invece saldatura e brasatura che vengono descritte di seguito.

1.3.1 Brasatura

La brasatura è uno dei principali metodi di collegamento dei CHEs e nello specifico è ampiamente utilizzata per la realizzazione di radiatori per il settore automotive. La brasatura unisce due, simili o diversi, metalli o non metalli mediante il riscaldamento degli stessi in presenza di un metallo d'apporto con una temperatura del liquido superiore a 450 °C ma inferiore alla temperatura dei materiali di base. La somministrazione di calore può essere data da una varietà di processi. Il metallo d'apporto mediante azione capillare si distribuisce tra le superfici collegandole. La brasatura si diversifica dalla saldatura in quanto i metalli d'apporto per quest'ultima hanno una temperatura del liquido inferiore a 450 °C (Thulukkanam, 2013).

Al fine della realizzazione di una corretta giunzione bisogna definire i parametri che influiscono la lavorazione come mostrato in Tabella 1.1. Si evince che le variabili che influiscono maggiormente sono temperatura di brasatura, il tempo necessario per arrivare alla temperatura suddetta, l'atmosfera, la velocità e la modalità di riscaldamento.

Sussistono alcuni svantaggi nel processo di brasatura di parti e assiemi, che il più delle volte è intesa come un' "arte", la quale richiede spese e costi di capitale e tempi di sviluppo prima di realizzare giunti ideali per assiemi complessi. Qualora si verificasse un cambiamento di una variabile nel processo come il flusso e tipologia di materiale d'apporto, temperatura, atmosfera o attrezzature in genere sarebbe necessario ridefinire l'intero processo per la realizzazione del collegamento ottimale (Ranganayakulu & Seetharamu, 2018).

La pulizia delle superfici con il successivo o nullo utilizzo di flusso, utilizzati per la preparazione delle zone da unire, nella fase di post devono essere rimossi. Qualora questo non accadesse si incorre a corrosioni delle parti unite, riducendo la loro durata durante il funzionamento dello scambiatore.

In linee generali nei processi di brasatura, la composizione del metallo d'apporto è la stessa di quella di base, ad eccezione di alcuni elementi addizionali, al fine di abbassare la temperatura del punto di fusione. Tuttavia, nella fase di raffreddamento, per via del diverso coefficiente di dilatazione termica, possono svilupparsi sollecitazioni nei giunti brasati di materiali diversi.

Nel caso dell'alluminio e delle sue leghe, principale materiale per la costruzione di radiatori commercializzati nel settore automotive, la brasatura viene solitamente eseguita in un intervallo compreso tra 25 e 70 °C dalla temperatura del metallo base. Pertanto, è essenziale un attento controllo della temperatura durante la brasatura, poiché si potrebbe incorrere ad una eccessiva diffusione di elementi di lega nella zona di giunzione, in cui le proprietà meccaniche e termiche differiscono da quelle del metallo di base. In alcuni sistemi, si nota anche la formazione di fragili

composti intermetallici sulle interfacce di brasatura-pezzo e la loro crescita può avere effetti molto dannosi sulle proprietà meccaniche (Ranganayakulu & Seetharamu, 2018).

Ad ogni modo non presenta alcun rivale tra le tecnologie convenzionali per l'assemblaggio di assiemi sottili.

Progettazione dei giunti	<ul style="list-style-type: none"> • Gioco del giunto che determina la forza capillare; • Evitare l'intrappolamento del flusso per rendere meno sensibile la giunzione alla corrosione in servizio; • Attenzione alle diverse espansioni termiche dei diversi materiali.
Selezione del materiale di apporto	<ul style="list-style-type: none"> • Composizione della lega; • Il bagno fuso deve bagnare i metalli di base; • Elevata tensione superficiale del liquido e bassa viscosità.
Preparazione preliminare della superficie	<ul style="list-style-type: none"> • Rimozione di ossidi e sporco dalle superfici per evitare inclusioni o vuoti; • Effettuare l'assemblaggio senza indugio per evitare nuovi fenomeni di ossidazione o sporco.
Determinazione del flussaggio	<ul style="list-style-type: none"> • I flussi sono necessari per spostare i strati di ossido e protegge i siti d'incollaggio; • Consentono la bagnatura.
Fissaggio	<ul style="list-style-type: none"> • I componenti devono essere auto-fissati; • Aumentano il tempo di riscaldamento per portare i componenti a temperatura di brasatura.
Metodo di riscaldamento	<ul style="list-style-type: none"> • Brasatura con torcia; • Brasatura ad immersione; • Brasatura in fornace • Brasatura sottovuoto ed ad atmosfera controllata; • Brasatura ad induzione; • Brasatura a resistenza; • Brasatura ad infrarossi; • Ognuno dei metodi elencati si differenziano dal modo in cui vengono riscaldate le parti e dall'applicazione di flusso e materiale d'apporto.
Trattamenti post brasatura	<ul style="list-style-type: none"> • I residui di brasatura, poiché chimicamente attivi devono essere rimossi per evitare post-corrosioni.

Tabella 1.1-Parametri della lavorazione di brasatura

1.3.2 Saldatura

La saldatura viene definita come un processo di unione di due metalli simili o diversi, se sussiste una compatibilità metallurgica, mediante un metallo d'apporto allo stato fuso. La temperatura delle parti deve rimanere al di sotto di 450 °C. Il metallo d'apporto si distribuisce tra le superfici strettamente aderenti e la somministrazione del calore può avvenire con svariati processi (Thulukkanam, 2013).

In un design di saldatura le alette sono perforate con un diametro leggermente più grande delle dimensioni del tubo e gli stessi vengono inseriti nei fori. Le superfici delle alette e quelle esterne del tubo sono saldate per ottenere il legame delle parti. In questa fase, convenzionalmente possono incorrere delle distorsioni; per questo motivo successivamente la parte saldata viene cotta in un forno. Durante la cottura il metallo d'apporto si scioglie ulteriormente fornendo un corretto contatto metallo-metallo.

Molti degli step del processo di saldatura sono condivisi con quello della brasatura, come la progettazione dei giunti, iniziale pulizia e post processo e a questi si possono aggiungere la gestione dell'alimentazione del filo, la velocità di deposizione dello stesso, il gas di protezione, la selezione del materiale d'apporto che dovrà avere temperatura di fusione prossima a quella del materiale di base per facilitare la saldatura.

I radiatori richiedono specifiche tecniche per funzionare in ambienti severi, con temperature fluttuanti, vibrazioni meccaniche, gas di scarico e a questo si aggiunge anche la qualità della soluzione di refrigerante. Possiamo quindi identificare un unico problema che comunemente affligge le due tipologie di costruzioni viste ovvero la corrosione dei giunti. Per quanto riguarda la brasatura la corrosione galvanica è quella principale, mentre prossimo anche incorrere in un attacco corrosivo dato dall'intrappolamento del flusso residuo.

Al fine di ovviare sia agli onerosi step e controlli che coinvolgono la produzione con tecnologie convenzionali dei CHEs, ma anche dei problemi che posso incorre per una non adeguata esecuzione dei processi di assemblaggio, verrà nel prossimo capitolo descritta una nuova ed emergente tecnologia di fabbricazione. Dotata di grande libertà nella progettazione di parti free-form tale da rielaborare design e semplificare, per quanto possibile, la realizzazione di uno scambiatore di calore compatto.

2 Additive Manufacturing: dal Rapid Prototyping ad oggi

Il termine Rapid Prototyping è usato in molteplici settori per descrivere un processo in grado di creare rapidamente una rappresentazione di prodotto prima del rilascio finale o commercializzazione. In altre parole, è uno step necessario, che consente ai clienti di testare idee e fornire feedback durante il processo di sviluppo (Gibson, Rosen, & Stucker, 2010).

Gli utenti della tecnologia di Rapid Prototyping hanno capito che questo termine è inadeguato e non descrive le applicazioni più recenti della tecnologia, poiché a quest'ultima sono stati apportati notevoli miglioramenti nella qualità dell'output, tali da non poterli più etichettare come "prototipi". Lo sviluppo di nuove macchine, la nascita di nuove materie prime e lo spirito visionario di alcune aziende ed enti di ricerca, ha fatto sì che il comitato tecnico *ASTM international* ha posto l'attenzione su tale problematica e concordato che tale nuova ed emergente tecnologia di produzione andrà sotto il nome di Additive Manufacturing (AM) definendo anche *Additive Manufacturing Technology Standards* (Gibson, Rosen, & Stucker, 2010).

AM è il termine per indicare una classe di tecnologie che, attraverso l'utilizzo di sistemi CAD (computer-aided design), sfruttano una produzione "strato per strato" per la costruzione di modelli che vengono utilizzati direttamente come prodotti finali.

Ogni strato o layer è una sezione trasversale della parte derivata dai dati CAD originali e questo deve avere uno spessore. Più sottile è ogni strato maggiore sarà la definizione e la somiglianza dell'oggetto fisico finale a quello digitale.

La principale distinzione tra le tecnologie additive si basa sul materiale utilizzato, su come vengono creati i diversi layers e come questi sono collegati tra di loro. Tali differenze determinano fattori come l'accuratezza della parte finale, le proprietà meccaniche e la velocità di realizzazione.

2.1 Tecniche dell'Additive Manufacturing

La classificazione delle tecniche di AM è basata sul materiale impiegato nel processo solido, liquido o polvere, come viene di seguito rappresentato in Figura 2.1.

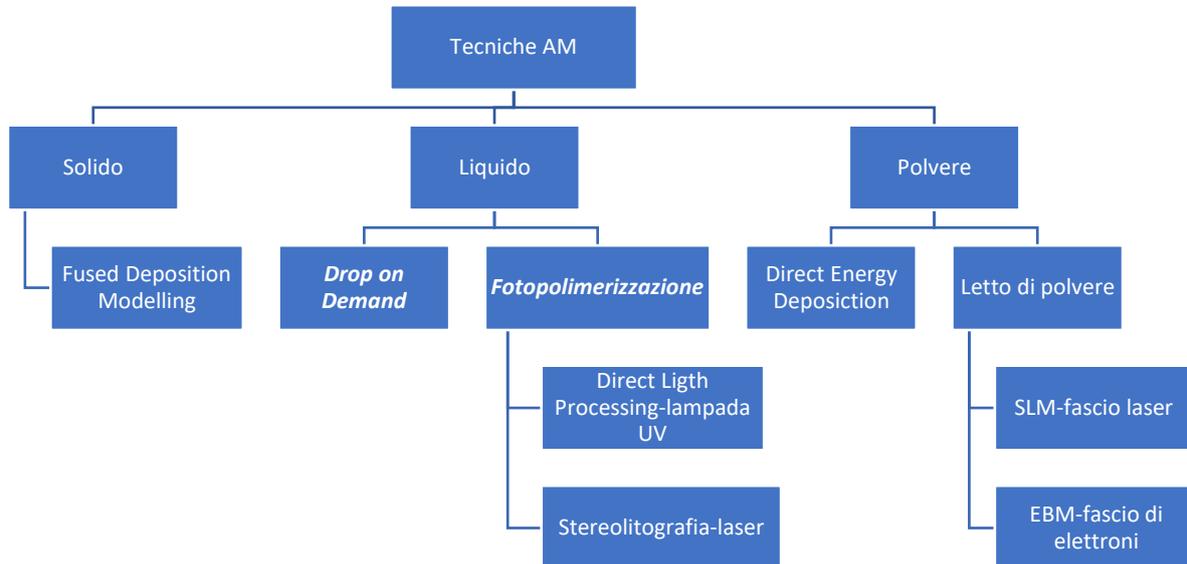


Figura 2.1-Classificazione delle tecniche di Additive Manufacturing

2.1.1 Solido

I materiali solidi utilizzati possono essere sia di natura polimerica che metallica, entrambi sono sotto forma di filo avente piccolo diametro, avvolti in bobine. I primi sono principalmente termoplastici come ABS e PC, per quelli metallici i più adatti per la deposizione, sono quelli saldabili e la tecnologia prende il nome di Electron Beam Additive Manufacturing (EBAM). Di seguito viene descritto il processo di modellazione del materiale polimerico.

2.1.1.1 Fused Deposition Modelling (FDM)

Tale tecnologia è basata sull'estrusione di un filamento di materiale polimerico termoplastico sulla piattaforma di costruzione. Questo sistema è caratterizzato da una camera di preriscaldamento che innalza la temperatura del materiale processato fino al punto di fusione, in modo che possa fluire attraverso un sistema di erogazione costituito da un ugello che muovendosi sul piano x-y deposita il filamento di materiale. Solitamente vi è la presenza di due ugelli che trattano materiali con proprietà differenti, uno quello termoplastico definitivo dell'oggetto da realizzare e l'altro un materiale termoplastico solubile in acqua per la realizzazione dei supporti (Iuliano, 2018).

2.1.2 Liquido

I materiali liquidi attualmente sono delle resine termoindurenti su base epossidica, acrilica, vinilica o termoplastici a basso punto di fusione simil cera. Le tecnologie si dividono come segue.

2.1.2.1 *Drop on Demand*

Questa tecnologia viene utilizzata per la realizzazione di stampi a cera persa; il processo è composto dalla deposizione mediante una testina di stampa di gocce, che viene fatta vibrare con un apparecchio piezoelettrico ed una successiva fresatura di spianamento in modo da controllare lo spessore del layers. I supporti vengono stampati in un materiale diverso da quello della parte tale per cui possono essere solubili in acqua e di facile rimozione (Iuliano, 2018).

2.1.2.2 *Fotopolimerizzazione*

Gli elementi chiave di questo processo sono la polimerizzazione di una resina monomeric ed un sistema di controllo per la gestione dell'area da scansionare. Esistono due principali configurazioni di macchinari: la prima è l'immersione della piattaforma di costruzione nella vasca contenente la resina mentre la costruzione procede, nella seconda, in maniera inversa, la piastra ha una traslazione verticale verso l'alto. In entrambe le configurazioni la fotopolimerizzazione può avvenire o con un raggio laser (stereolitografia) o con un sistema di proiezione di immagini della sezione da polimerizzare mediante lampade UV (Polyjet o Direct Light Processing). Il materiale che costituisce l'oggetto e i supporti è il medesimo e quindi la rimozione di questi avviene manualmente (Iuliano, 2018).

2.1.3 Polvere

Le principali tecnologie AM che utilizzano piccole particelle di materiale possono essere suddivise principalmente in due categorie: quelle a deposizione di polvere e quelle a letto di polvere. Quest'ultima è da ritenersi tra le più consolidate e promettenti nel mondo della AM. I materiali possono essere sia metallici che termoplastici definitivi.

2.1.3.1 *Tecnologia per deposizione di polvere: Direct Energy Deposition (DED)*

A questa tipologia si riferiscono quelle tecnologie in cui la deposizione dell'energia e della materia prima avvengono simultaneamente. La testa di deposizione è articolata; composta da canali di adduzione della polvere e per i gas di copertura, ma anche dalla sorgente di energia ovvero un laser. La tecnologia Direct-Write su cui si basa la DED realizza la parte dirigendo continuamente energia e materiale nello stesso sito.

2.1.3.2 Tecnologia per letto di polvere

Le seguenti descrizioni di processo sono da considerare come le possibili tecnologie per la realizzazione di scambiatori di calore, poiché vengono utilizzati, oltre a quelli polimerici, materiali metallici con ottimi coefficienti di scambio termico. Il grado di complessità geometrica della parte è molto elevato ed il prodotto a processo finito è pressappoco identico a quello digitale.

Sebbene esistano diverse capacità del volume di controllo, condizioni e caratteristiche di processo, il principio di funzionamento è condiviso per tutte le varianti della tecnologia per letto di polvere che possono essere suddivise macroscopicamente in EBM (Electron Beam Melting), SLM (Selective Laser Melting) ed SLS (Selective Laser Sintering). Un sistema di adduzione della polvere diffonde uniformemente, sulla piastra di costruzione, uno strato di polvere mediante una lama o rullo.

Lo strato depositato è compreso tra i 10-100 micron per i sistemi metallici. L'altezza del layer è un fattore importante nel processo ed è accuratamente selezionato in funzione di altri parametri di processo come: tipologia di sorgente di energia, potenza, geometria, dimensioni e distribuzione delle particelle di polvere. Una volta creato il layer, un fascio di energia, laser per SLM/SLS o elettronico per EBM, è focalizzato sul letto di polvere e tramite una strategia di scansione fonde le zone d'interesse secondo lo slicing del modello 3D (Yang, et al., 2017). Per slicing s'intende la divisione del modello STL secondo piani paralleli e normali all'asse di costruzione z distanziati l'uno dall'altro di una quantità dipendente dalla risoluzione della macchina. La strategia di scansione è un aspetto critico del processo perché da questa ne derivano la microstruttura della parte. Inoltre l'energia utilizzata non viene spesa totalmente per la fusione, ma in percentuali diverse è riflessa o diffusa come mostrato in Figura 2.2.

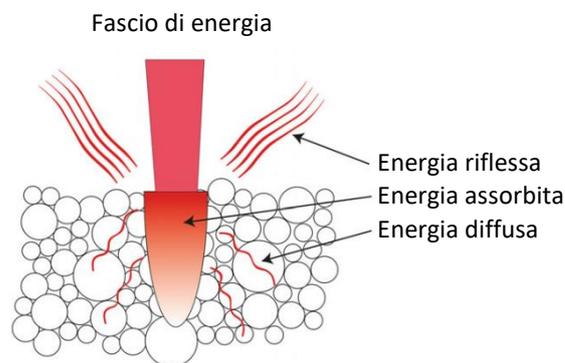


Figura 2.2-Effetto del fascio di energia sul letto di polvere (Olaf Diegel, 2019)

A compimento dello strato, la piastra di costruzione, dotata di un movimento verticale, si abbassa di una quantità prossima allo spessore del layer e si eseguono nuovamente le fasi descritte sopra fino al compimento della parte.

Si noti che, in generale, l'esposizione del letto di polvere da parte della sorgente viene regolata in modo tale da fondere anche una certa parte dello strato precedente, per consentire la corretta unione tra i due. Infatti, determinata potenza e tipologia di sorgente termica, uno spessore di polvere piccolo corrisponderebbe ad una dimensione della pozza fusa maggiore di quella necessaria e quindi minore efficienza del processo. Al contrario uno spessore elevato porterebbe ad una parziale penetrazione nello strato da parte della sorgente termica e quindi una mancata saldatura con quello sottostante (Yang, et al., 2017). Uno schema viene fornito in Figura 2.3 per una rappresentazione della tecnologia a letto di polvere, si evince come lo spessore del layer influisce sulla risoluzione della parte.

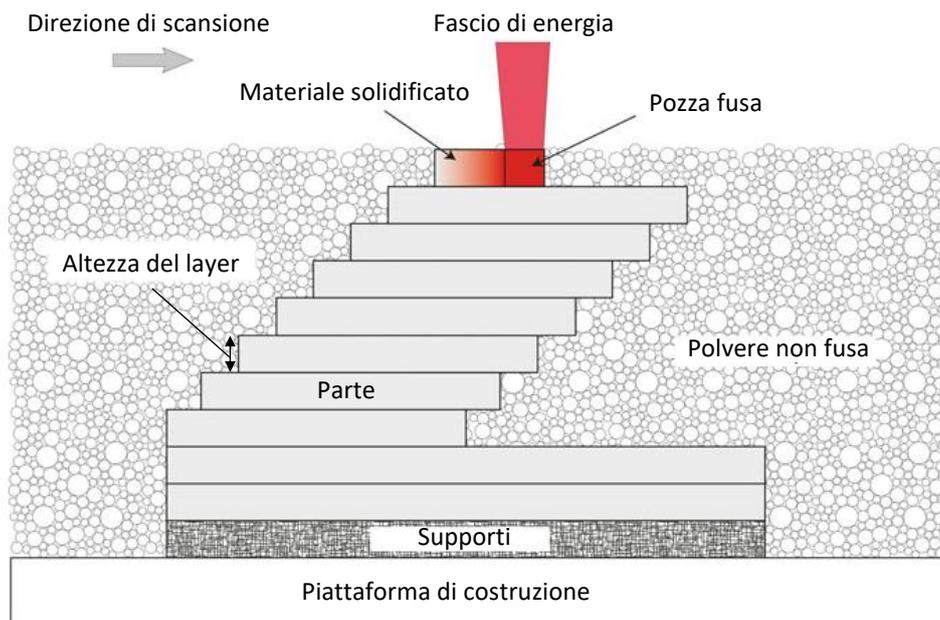


Figura 2.3-Tecnologia a letto di polvere (Olaf Diegel, 2019)

2.1.3.2.1 Electron Beam Melting (EBM)

La differenza sostanziale della tecnologia EBM rispetto a quella SLM o SLS, risiede nell'utilizzo di una sorgente termica di diversa natura, il fascio di elettroni. Questo è dotato di un'elevata energia cinetica, che una volta impattata la polvere, viene trasformata in calore portando a fusione la parte desiderata. Il fascio è realizzato mediante il riscaldamento di un filamento di tungsteno ed in seguito accelerato attraverso un potenziale anodico. Uno schema della tecnologia EBM è fornito in Figura 2.4. Il controllo è dato da due lenti una avente lo scopo di determinare il diametro del fascio e l'altra di deviare lo stesso sull'area desiderata (Iuliano, 2018).

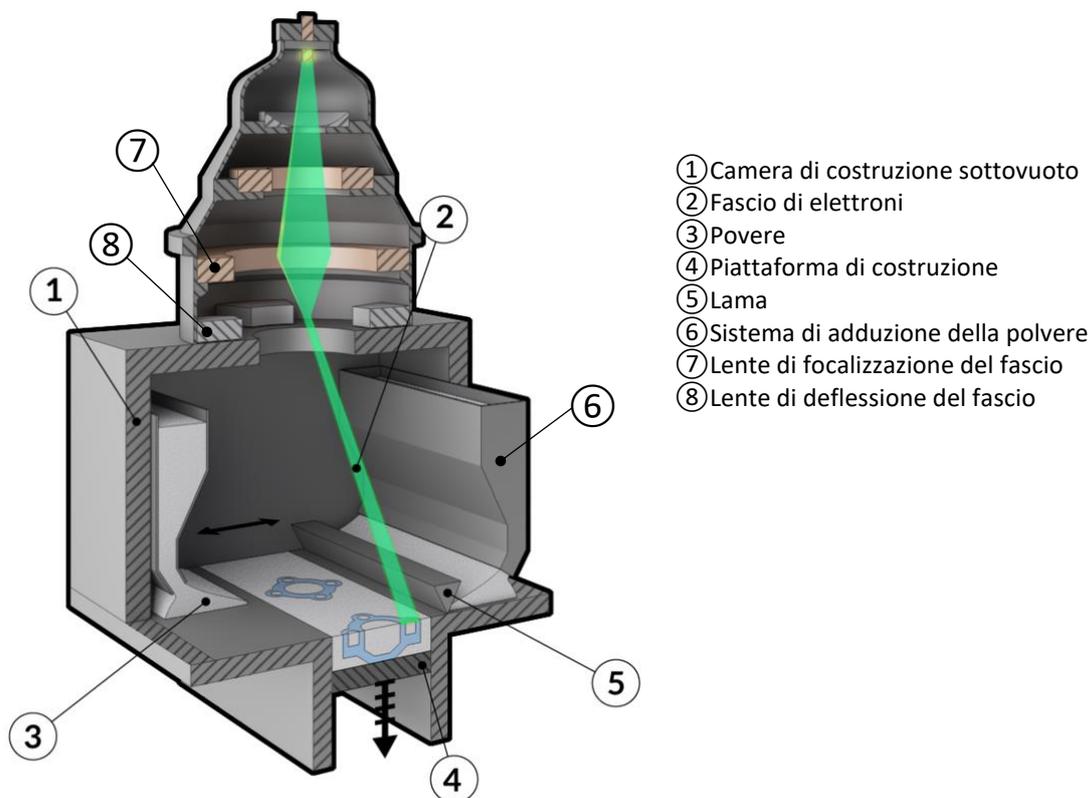


Figura 2.4-Electron Beam Melting (www.manufacturingguide.com)

La tecnologia in questione è definita a caldo, poiché il processo viene svolto con un preriscaldamento del letto di polvere, raggiungendo così una temperatura della camera di lavoro nettamente superiore alla tecnologia a laser definite per tanto come processo a freddo.

Il preriscaldamento, realizzato mediante una serie di passaggi del fascio non focalizzato a bassa potenza e ad elevata velocità, viene effettuato per aumentare la condizione di coesione delle particelle dello strato di polvere da scansionare, in tal modo, una volta impattate dal fascio di elettroni, non si disperdono nella camera di lavoro. Altra caratteristica sostanziale del processo è quella di operare sottovuoto spinto in modo da evitare che il fascio, e quindi gli elettroni, possano

collidere con le particelle dell'atmosfera perdendo così di intensità. Da tale condizione ne deriva che durante la fusione, questa non possa essere contaminata da alcun elemento (Yang, et al., 2017).

2.1.3.2.2 Selective Laser Melting (SLM) e Selective Laser Sintering (SLS)

Sono entrambe tecnologie che sfruttano l'ausilio di un fascio laser che in maniera selettiva fonde l'area da scansionare. La differenza tra le due è legata al fatto che i primi laser non avendo la necessaria potenza per portare a completa fusione le particelle metalliche, lasciavano porosità nel componente (SLS); allo stato attuale l'apporto di energia termica, da parte del laser, consente risultati nettamente migliori con l'eliminazione delle porosità ed una densità prossima al 100% (SLM).

Concentrando l'attenzione sul processo SLM, di cui uno schema è fornito in Figura 2.5. Il laser, composto da fotoni coerenti, viene generato da una fibra attiva d'itterbio ad una certa lunghezza d'onda; questo viene portato mediante elementi ottici fino al galvanometro, al quale spetta il compito di controllo e focalizzazione del raggio. Gli specchi del galvanometro direzionano il laser nella zona di lavoro (Iuliano, 2018).

Il processo, a differenza di quello EBM, viene svolto in una atmosfera controllata mediante insufflaggio di un gas inerte e permeabile alla radiazione laser. Il fine è quello di evitare l'ossidazione, il possibile innesco d'incendi e ridurre la variazione della composizione della lega dovuta all'evaporazione degli elementi basso fondenti.

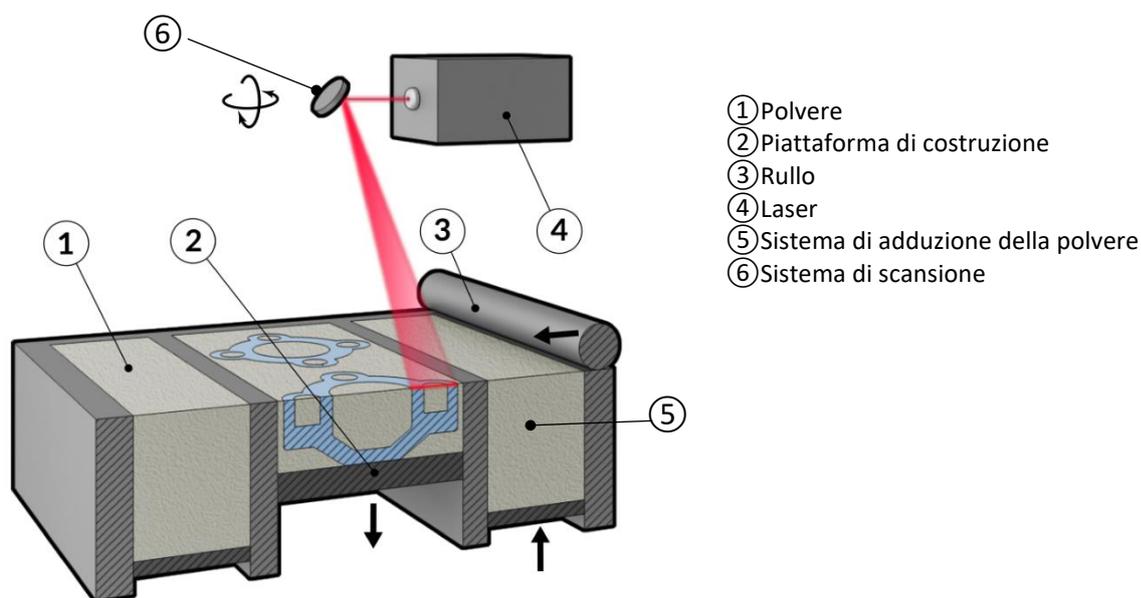


Figura 2.5-Selective Laser Melting (www.manufacturingguide.com)

2.2 Differenze tra SLM e EBM: scelta della tecnologia

Entrambe le tecnologie si presentano come papabili per lo sviluppo di uno scambiatore di calore, ma vi sono alcune differenze che porteranno ad una scelta ben precisa e motivata di uno solo dei due processi.

La prima, descritta in precedenza, è la fonte di energia termica. Per il processo SLM i laser utilizzati vanno da i 200W ai 500W, arrivando fino ad 1kW per configurazioni particolari, mentre il fascio di elettroni EBM è all'incirca pari a 3kW. La maggiore energia a disposizione di quest'ultima porta ad avere valori di spessori di strati, velocità di scansione nonché di dimensione delle particelle di polvere, superiori nel processo EBM, che a parità di oggetto realizzato, rendono la velocità di avanzamento della macchina superiore a quella SLM.

La natura stessa della fonte energetica del processo EBM porta le particelle ad assorbire elettroni, ottenendo sempre più una carica negativa. Questo porta a due potenziali effetti dannosi: il primo alla creazione di una nuvola di polvere, data dall'espulsione delle particelle dal letto di polvere, se la forza repulsiva delle particelle caricate negativamente è maggiore di quella delle forze gravitazionale e di attrito; la seconda è la creazione di un raggio più diffuso a causa dell'aumento delle cariche negative del letto di polvere che respingerà il flusso di elettroni in entrata (Gibson, Rosen, & Stucker, 2010).

Al fine di evitare queste problematiche bisogna avere un letto di polvere ad alta conduttività ed adottare strategie di scansione che impediscano l'accumulo, in determinate regioni, di particelle con carica negativa.

La conseguenza di quanto descritto sopra è quello di avere un'energia del fascio di elettroni più diffusa con una dimensione del pool di fusione aumentata. Quindi le dimensioni minime delle feature così come la rugosità superficiale risulteranno generalmente maggiori del processo SLM.

Questo aspetto, nella scelta del processo risulta importante poiché definisce lo spessore minimo realizzabile in una parte.

È possibile effettuare una valutazione dei processi a livello energetico. La generazione del fascio di elettroni è generalmente più efficace di quella del laser. Di fatti la maggior parte dell'energia elettrica spesa nel processo EBM viene convertita in fascio di elettroni, mentre soltanto il 70-80%, per alcuni laser, viene convertita in energia del fascio con quella rimanente persa sotto forma di calore. Pertanto i raggi di elettroni sono una fonte di energia elevata meno costosa rispetto a quella laser. Tuttavia i più recenti progressi raggiunti in termini di efficienza, affidabilità e semplicità di

costruzione dei sistemi fiber-laser non permettono il surclassamento di quest'ultimi dai processi EBM (Gibson, Rosen, & Stucker, 2010).

Mantenendo durante la lavorazione il letto di polvere ad una temperatura superiore rispetto a quella del processo SLM, l'EBM risulta essere definito come processo a caldo; un vantaggio di questo è la minor presenza di stress termici dovuti al continuo e rapido ciclo di liquefazione e solidificazione del layer. Ne risulta che la microstruttura di uno stesso materiale lavorato secondo i differenti processi sia significativamente diversa. Di fatti il rapido raffreddamento nel processo SLM crea grani di ridotte dimensioni e dopo la deposizione del layer successivo viene rifuso solo parzialmente quello precedente. Mentre nell'EBM l'apporto di calore è più ampio e la microstruttura che ne consegue è più vicina a quella rappresentativa della fusione (Gibson, Rosen, & Stucker, 2010).

Le dilatazioni dovute ai gradienti termici e sostentamento della parte durante la costruzione determinano la presenza dei supporti che è comune per entrambe le tecnologie.

Nel post process è condivisa l'iniziale rimozione manuale dei supporti e successivamente se necessario anche quella meccanica, ma nel SLM poiché le tensioni residue non possono essere trascurate, viene effettuato un trattamento termico, prima della rimozione dalla piattaforma, al fine di rilasciare gli stress generati nella fase di costruzione.

A questo punto si potrebbe dire che il bilancio delle caratteristiche dei processi sia a favore di quella EBM ma esiste un'ultima e sostanziale differenza tra le due tecnologie, i materiali processati.

Tipicamente uno scambiatore di calore è realizzato in lega di alluminio; leggera, facilmente deformabile, resistente e con un ottimo coefficiente di scambio termico.

È interessante osservare che la temperatura di ebollizione dell'alluminio è pari a 2450°C. Questa è raggiungibile sia dai processi EBM che da quelli laser, dove la temperatura della pozza fusa supera tranquillamente i 2000°C. Ricordando che la temperatura di ebollizione è quella in cui la tensione di vapore del materiale equivale alla pressione esterna, arriva da sé l'impossibilità di utilizzo di tali leghe con tecnologie EBM, poiché molto prima del raggiungimento di questa temperatura, evaporano dei quantitativi di materiale importanti. In maniera del tutto generale l'alluminio è da considerarsi come basso fondente, la condizione di lavoro di vuoto spinto dell'EBM e le alte temperature raggiunte, creano un flusso di materiale che esce verso l'esterno dando luogo al fenomeno dello sproporzionamento. È dunque preferibile il processo di SLM per l'applicazione oggetto di tesi, come riassunto nella Tabella 2.1 in cui si evincono le differenze delle due tecnologie.

	Selective Laser Melting	Electron Beam Melting
Fonte di energia	Laser-Fotoni coerenti	Fascio di elettroni
Materiali	Acciaio per stampi ed inox Leghe di alluminio Leghe di titanio Leghe cobalto cromo Leghe di nichel	Leghe di titanio Leghe di nickel Leghe cobalto-cromo
Atmosfera	Argon	Sottovuoto spinto
Stress termici	Elevati	Trascurabili
Trattamenti termici	Si	No
Dimensioni delle particelle	10-45 μm	45-105 μm
Ra	5-20 μm	25-130 μm
Spessore layer	30-50 μm	50-100 μm
Velocità di costruzione	Inferiore rispetto a EBM	Elevata
Temperatura di processo	Processo a freddo (200°C)- preriscaldamento della sola piattaforma di costruzione	Processo a caldo (800-900°C) - preriscaldamento di ogni strato di polvere

Tabella 2.1- Caratteristiche generali delle tecnologie SLM e EBM

2.3 I benefici dell'Additive Manufacturing

Il processo di produzione additiva è sostanzialmente diverso da quelli tradizionali come formatura, fusione o taglio. La differenza principale risiede nel fatto che le tecnologie convenzionali modellano le parti da produrre attraverso l'intero dominio del materiale e molto spesso avendo un approccio sottrattivo del materiale, mentre nelle più recenti tecnologie AM la formazione di parti avviene con l'aggiunta di materiale laddove è necessario e richiesto.

Altro aspetto da tenere in considerazione è la caratteristica di rapidità che l'AM detiene. Non solo per quanto riguarda la vera e propria costruzione di parti ma di tutto il processo di sviluppo, dipendente univocamente dall'ausilio di computer e software che seguono il progettista durante tutto il design, modellazione e performance di elementi.

La natura stessa del processo AM offre alti livelli di personalizzazione. Indipendentemente dalla complessità delle parti da costruire, l'operazione viene generalmente eseguita in una sola fase, a differenza delle numerose e svariate metodiche che richiedono le tecnologie convenzionali, talvolta

multiple ed iterative. Maggiori sono le funzionalità di un progetto più il numero delle fasi di costruzione aumenta ed anche un solo cambiamento nella progettazione condurrebbe ad un aumento del tempo e dei metodi con cui realizzare la parte. Oltretutto se la complessità geometrica è elevata la produzione “tradizionale” potrebbe presentarsi proibitiva in termini di costi. AM in quest’ottica risulta essere vincente risparmiando tempo e numeri di processo nella formazione di un prodotto e promotrice nell’innovazione di nuove geometrie non realizzabili prima d’ora, come viene rappresentato in Figura 2.6.

Anche lo spreco di materiale è significativamente ridotto, poiché i materiali utilizzati e nello specifico le polveri posso essere riutilizzate in percentuali mescolandole con altre polveri vergini tale da avere il minor impatto possibile.

Riassumendo, non delimitati dai vincoli progettuali delle tecnologie tradizionali, i processi di AM stanno determinando un cambiamento nell’industria manifatturiera tale da garantirsi un posto nell’industria 4.0

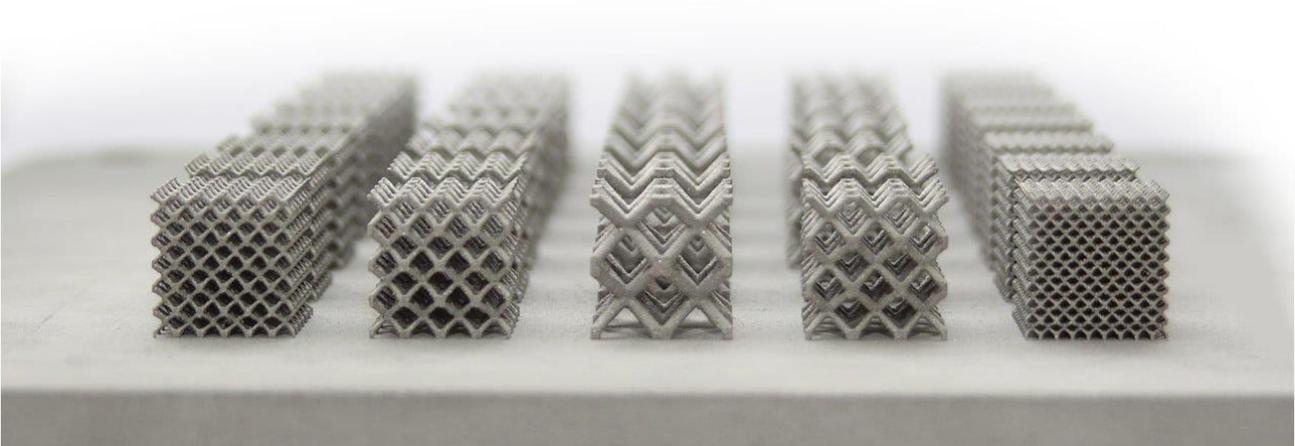


Figura 2.6-Lattice structures (www.3dprinting.com, s.d.)

3 Design for Additive Manufacturing

Con lo sviluppo delle tecnologie AM, le industrie manifatturiere hanno iniziato a considerare la stessa come fondamentale per essere competitivi ed innovativi nel mercato. Ma la corretta adozione dell'AM richiede una comprensione approfondita dei principi di processo e delle caratteristiche delle macchine utilizzate, ma anche di come queste devono essere utilizzate per realizzare progetti ed alta funzionalità.

Ad esempio, la realizzazione di parti con canali di raffreddamento interni conformi è facilitata con tecnologie AM a letto di polvere, ma in realtà nella formazione si può incorrere ad un intrappolamento delle polveri all'interno dei canali se non progettati con attenzione. Inoltre, superfici sporgenti durante la costruzione necessitano di strutture di supporto, che possono compromettere alle volte la producibilità delle parti, poiché la rimozione manuale di questi è intensiva o inaccessibile.

Pertanto, durante la progettazione di parti in chiave AM, bisogna considerare non solo l'ottimizzazione delle geometrie ma anche come queste influiscono la qualità della fabbricazione.

Al fine di identificare i molteplici parametri di processo che influenzano la lavorazione per le tecnologie a letto di polvere viene fornito in Figura 3.1 uno schema con le principali categorie.

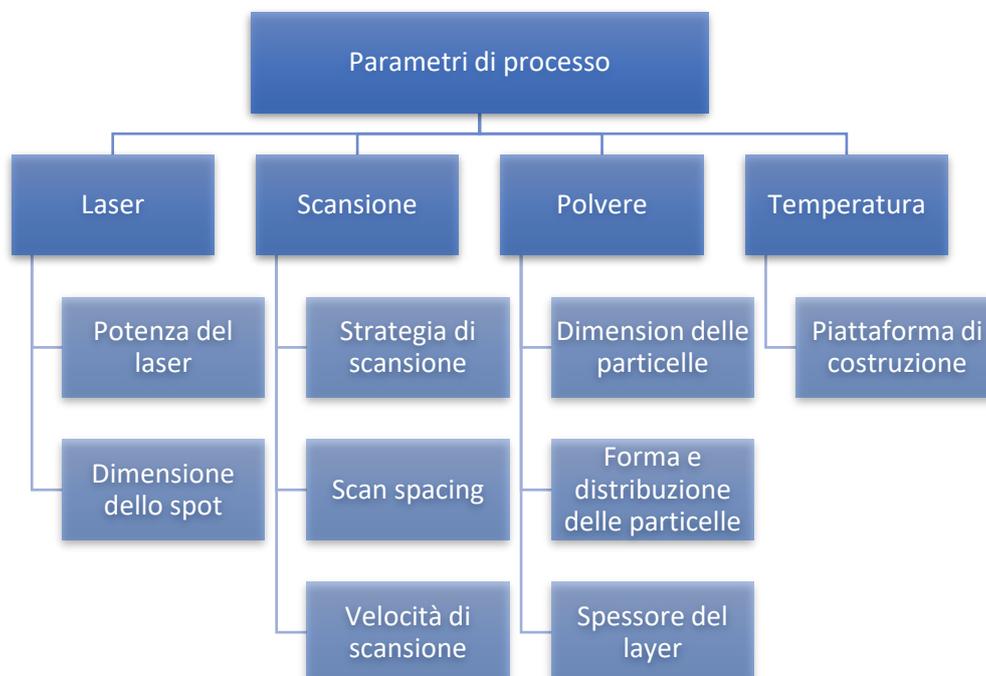


Figura 3.1- Schema dei principali parametri di processo

E' evidente come la gestione del processo layer-by-layer, di facile comprensione, risulta avere un meccanismo di realizzazione complesso, a questo bisogna aggiungere know-how sulle linee guida da seguire per la progettazione per rendere il componente ottimizzato per la produzione AM.

Il DfAM (Design for Additive Manufacturing) tende a massimizzare le prestazioni del prodotto con la sintesi di forme, dimensioni, strutture e composizioni del materiale per sfruttare al meglio le capacità del processo di produzione, raggiungendo o massimizzando le prestazioni del prodotto (Gibson, Rosen, & Stucker, 2010).

In linee generali possiamo finalizzare il DfAM per:

- Minimizzare il peso con l'ausilio di pattern a celle o strutture reticolati;
- Massimizzare le prestazioni meccaniche;
- Ottimizzare sia il comportamento dinamico che prestazioni termiche;
- Ridurre il numero di componenti e integrare le funzioni di più parti in un solo elemento.

Ad ogni modo le linee guida variano in funzione del materiale e processo utilizzato, ma al fine di guidare la riprogettazione dell'oggetto della tesi vengono di seguito fornite quelle che comunemente vengono prese in considerazione nella definizione di geometrie per tecnologie AM a letto di polvere, con particolare attenzione alla realizzazione di canali, evacuazione polvere e lattice-structure.

3.1 Orientamento, piattaforma di costruzione e supporti

Tra le principali attenzioni che bisogna porre nella progettazione è la disposizione in macchina, ovvero come ordinare ed orientare il componente o più componenti nel volume di lavoro Figura 3.2 (a). Da questa operazione ne derivano in particolar modo il numero e la disposizione dei supporti necessari per la costruzione. I supporti svolgono principalmente le seguenti funzioni:

- Sostengono la superficie appena fusa in particolar modo per quelle superfici rivolte verso il basso o che superano un determinato angolo d'inclinazione rispetto all'asse di costruzione;
- Impediscono la deformazione dovuti ai gradienti termici nella costruzione;
- Dissipano il calore dalla geometria appena fusa;
- Forniscono un supporto temporaneo per la geometria che sarà solida una volta finita la completata, ma che è debole durante il processo di costruzione.

Idealmente possiamo identificare una buona realizzazione della costruzione se questa non richiede alcun supporto, ma nella pratica comune questo non avviene e quindi minimizzare il loro numero risulta essenziale. Una presenza elevata di supporti è sinonimo di un dispendio di energia sia nella costruzione che nel post processo, ma anche di denaro e tempo poiché il materiale utilizzato per la

realizzazione dei supporti è considerato come di scarto e un tempo maggiore sarà richiesto per completare la lavorazione in macchina.

Generalmente le parti non vengono realizzate partendo dalla piattaforma di costruzione, ma vengono rialzati mediante supporti per facilitarne anche la successiva rimozione dalla stessa Figura 3.2 (c). L'orientamento preferito sarebbe quello di estrusi verticali, ma ciò non ha senso poiché andrebbe a ledere le potenzialità di generare forme complesse Figura 3.2 (b).

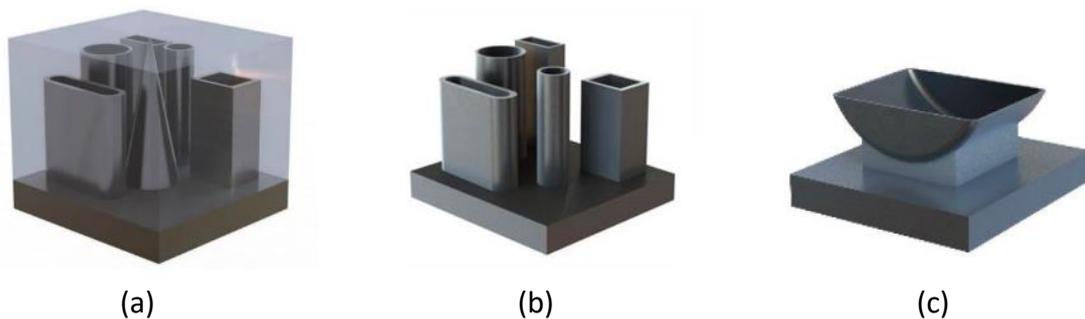
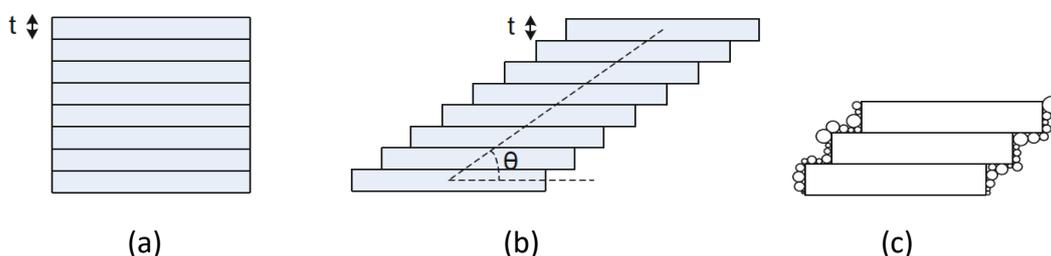


Figura 3.2-Orientamento in macchina di parti: (a) disposizione all'interno del volume di controllo, (b) estrusi verticali e (c) supporti per distanziare la parte dalla piattaforma di costruzione (www.crucibledesign.co.uk, s.d.)

Possiamo quindi definire un angolo discriminante, oltre il quale la presenza di supporti diventa necessaria per il sostentamento della costruzione.

Tale angolo varia da 30° a 60° in funzione del materiale utilizzato. Per una lega di alluminio è pari a 45°. Oltretutto più ci si avvicina a tale valore maggiore sarà la rugosità superficiale della parte poiché andremo incontro ad un "effetto gradino" determinato sia dall'inclinazione della superficie che dallo



$$R_a = \frac{t \cos \theta}{4}$$

t spessore del layer
 θ angolo d'inclinazione

Figura 3.3-Influenza dell'angolo d'inclinazione: (a) parte orientata secondo l'asse di costruzione, (b) parte inclinata e (c) effetto dell'adesione delle polveri (Yang, et al., 2017).

spessore del layer ma anche dall'adesione di polveri non fuse come mostrato in Figura 3.2 (b) e (c). La rugosità può essere calcolata mediante l'equazione fornita in Figura 3.2.

Altro effetto di un possibile orientamento errato della parte sulla piattaforma di costruzione è quello dovuto alle spinte che si istaurano durante la stesura di polvere. Il ricoprimento di un layer successivo è effettuato da una lama o rullo, a seconda del macchinario, questi durante la stesura entrano in contatto sia con zone dense, quelle fuse, sia con zone scorrevoli in cui prevale la polvere. Quindi al fine di evitare l'istaurarsi di elevate spinte sulla lama è buona norma disporre le parti in modo da fornire, al passaggio della lama, una sezione levigata come mostrato in Figura 3.4 (a) oppure fare incontrare gradualmente la sezione Figura 3.4 . Il caso peggiore di disposizione è quello di una sezione parallela alla lama che al passaggio tenderà a rimbalzare istaurando forti spinte sulla parte (Figura 3.4).

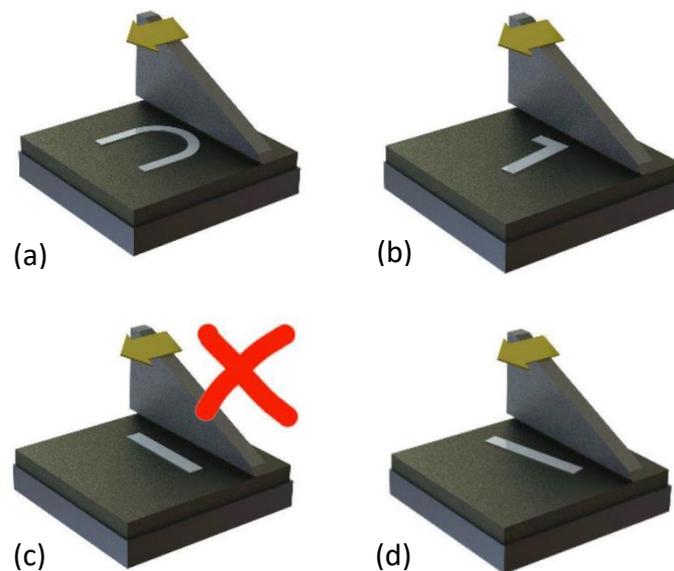


Figura 3.4- Orientamento in macchina di parti: (a) e (b) condizioni ottimali, (c) condizione da evitare (d) orientamento alternativo (www.crucibledesign.co.uk, s.d.)

Anche l'altezza totale della parte influisce sull'orientamento in macchina sia dal punto di vista dei vincoli intrinseci dei volumi di lavoro sia del tempo di stampa con conseguenze sui costi. Se non ci sono delle considerazioni critiche, il miglior orientamento sarebbe quello che minimizzi l'altezza totale della costruzione poiché maggiore è questa più il numero di layer di materiale aumenta.

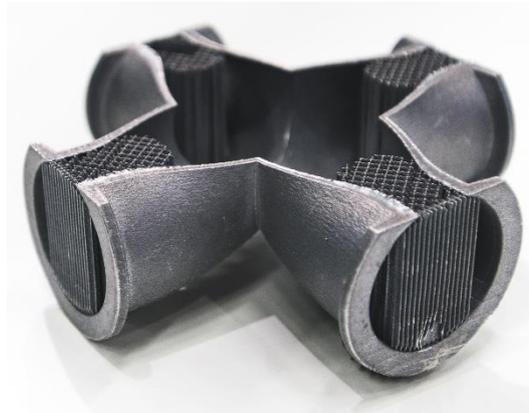
3.2 Canali: forma, dimensione ed evacuazione della polvere

In un design di scambiatore vi è la presenza di molteplici canali e di vasche laterali per la raccolta e distribuzione del liquido refrigerante. L'aspetto cavo di un modello richiede la particolare importanza della rimozione della polvere non utilizzata intrappolata all'interno della cavità. Quindi

è necessario prevedere delle aperture con un diametro minimo di 2mm. Questo problema non si presenta nel design oggetto di tesi poiché vi sono aperture di dimensioni maggiori quali tubi collettori d'ingresso ed uscita fluido.

L'attenzione maggiore invece è rivolta alla dimensione e forma dei canali o fori che si sviluppano in modo perpendicolare alla direzione di costruzione.

Canali o fori che superano un certo valore di diametro richiedono materiale di supporto all'interno del foro per sostenere la sua costruzione (Olaf Diegel, 2019). Sebbene questo alle volte non sia necessariamente un problema poiché la rimozione non è dispendiosa (Figura 3.5), va ricordato che è sempre più difficile rimuovere i supporti all'interno del modello che all'esterno, ma nel design di uno scambiatore di calore vi sono tubi lunghi e non perfettamente dritti ed inaccessibili e quindi la rimozione del materiale del supporto è impossibile.



*Figura 3.5-Esempio di supporti interni
(www.3dhubs.com, s.d.)*

Nella fase di progettazione quindi bisogna tenere a mente alcune linee guida per non incorrere a difetti durante la costruzione. La dimensione massima per fori circolari che non necessitano di supporti è quella di 6mm ma se sono necessari dei fori o canali di dimensioni maggiori, la tecnica principale è quella di cambiare la forma per non incorrere alla presenza dei supporti come mostrato in Figura 3.6. È buona norma ricordare gli spigoli vivi come avviene per il foro a forma di goccia o diamante, per evitare che gli stessi nella fabbricazione diventino delle zone di concentrazione di stress.

Inoltre per aumentare le prestazioni di un canale nello scambio termico si possono realizzare forme nervate aumentando la turbolenza e quindi in numero di Reynolds, oppure inserire delle alette interne al tubo.



Figura 3.6-Esempi di fori senza supporti (Olaf Diegel, 2019).

Bisogna porre sempre attenzione allo sviluppo del canale nel volume di lavoro poiché il suo orientamento potrebbe variare lungo il suo percorso. Ogni sezione normale alla direzione di sviluppo, deve garantire sempre le stesse caratteristiche di orientamento secondo l'asse di costruzione o quanto meno non superare l'angolo discriminante per la presenza di supporti, se così non fosse s'incorrerebbe all'immissione di supporti interni, impossibili da rimuovere. Ad esempio un canale che si sviluppa sul piano x-y secondo la traiettoria mostrata in Figura 3.7 presenta all'inizio del suo percorso una sezione (1) senza supporti; ma se il canale si sviluppa con una svergolatura lungo la sua traiettoria si possono identificare alcune sezioni (2) che necessiteranno di supporti. Questi verranno inseriti internamente al canale per sostenere, in fase di costruzione, quelle superfici che presentano un angolo d'inclinazione superiore. Questo aspetto non è da sotto valutare e fa ulteriormente capire come l'orientamento della parta nel volume di lavoro sia essenziale per la qualità della costruzione.

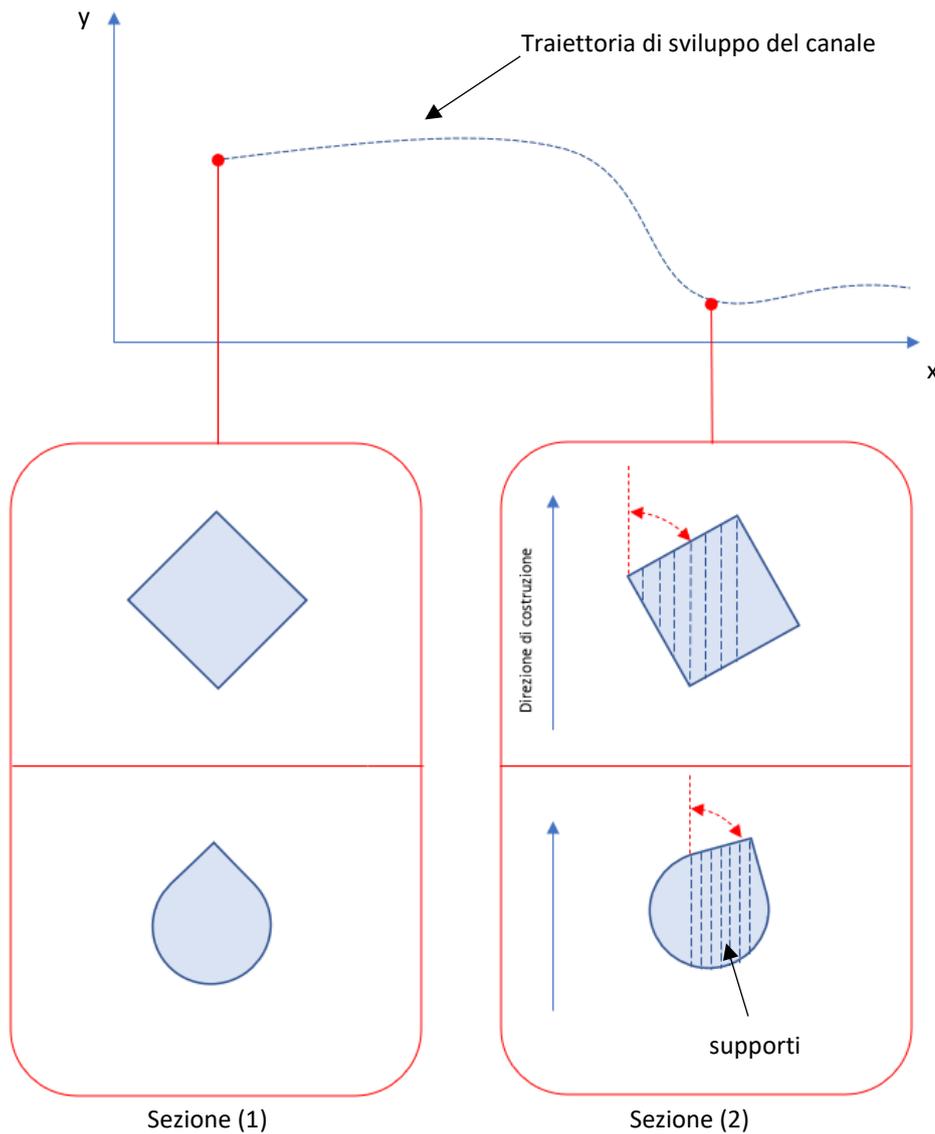


Figura 3.7-Sviluppo di un canale con svergolamento della sezione

3.3 Lattice-structure

Le strutture reticolari sono da intendere come costruzioni multifunzionali, generalmente definite come reti di travi solide o superfici interconnesse con vuoti inclusi (Yang, et al., 2017). Offrono il grande vantaggio nella riduzione del peso senza influire sulla resistenza della parte da realizzare spesso utilizzate nei processi di ottimizzazione topologica (trasformazione guidata da software di parti solide, soggette a carichi e vincoli, in travature). Se utilizzate riducono il costo ed il tempo della lavorazione poiché viene fusa meno polvere durante il processo.

Se le singole celle sono ripetute per formare volumi maggiori vengono definite come reticoli. Vi sono molteplici opzioni sia nella forma che nelle dimensioni delle singole celle, ma anche nel modo in cui queste sono ripetute nello spazio. Si possono generalmente classificarle in (Olaf Diegel, 2019):

- Strutture cellulari 2.5D;

- Strutture cellulari 3D;
- Strutture cellulari stocastiche.

Le strutture cellulari stocastiche sono sia 2D che 3D e sono dotate di porosità in forma e dimensione casuali. Mentre quelle 2.5D si presentano come estrusioni di geometrie semplici come esagoni o quadrati come mostrato in Figura 3.8.

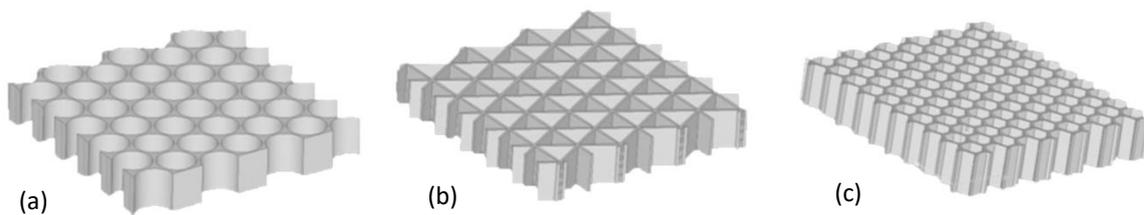


Figura 3.8-Esempi di strutture reticolari 2.5D: (a) circolare, (b) triangolare e (c) esagonale

Le strutture 3D invece possono essere composte o da superfici di un determinato spessore o da nodi e travi tipicamente con sezione quadrata o circolare (Figura 3.9 (b)-(c)). Diametro e lunghezza delle travature possono essere regolati per produrre reti tridimensionali omogenee, con un determinato rapporto superficie/massa, con prestazioni mirate in funzione dell'ambito d'interesse ottimizzate. Le celle unitarie derivano dalla geometria elementare identificate dai poliedri (Figura 3.9 (a)) e le travature o le superfici riempiono in parte lo spazio delimitato dalle superfici del poliedro (Gibson & Ashby, 1999).

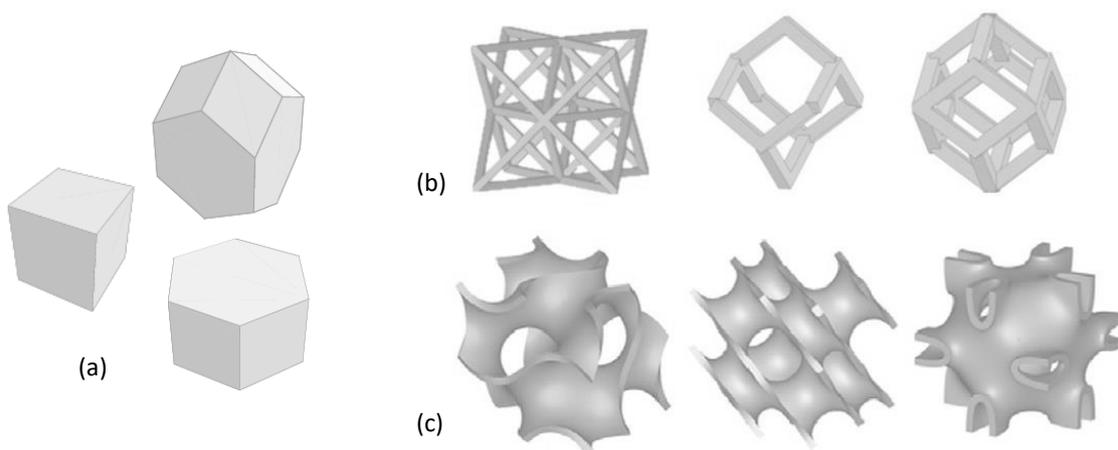


Figura 3.9-Celle 3D:(a) geometrie unitarie poliedriche elementari, (b) cella 3D a travatura a sezione quadrata e (c) cella 3D con superfici

Le celle sono caratterizzate da una densità relativa ρ_r che diventa indice anche della densità dal reticolo, definita come il rapporto tra il volume del solido che compone la cella V_s ed il volume della cella unitaria di costruzione V_b (Yang, et al., 2017):

$$\rho_r = \frac{V_s}{V_b}$$

Questo parametro non è un indicatore della rigidità della struttura in termini di meccanismo di deformazione, poiché pur avendo due strutture reticolari 3D topologicamente diverse ma con stessa densità relativa non si ottengono risultati uguali poiché le strutture reticolari non presentano proprietà meccaniche isotrope. A causa della disposizione delle travature, le strutture cellulari posseggono un numero finito di assi di simmetria e qualora soggette a carichi la cui direzione si scosta da questi assi le proprietà meccaniche cambiano. Ciò significa che è possibile creare strutture reticolari che possiedono caratteristiche diverse lungo direzioni di carico differenti, da qui in grande vantaggio delle lattice-structure.

Possiamo definire quattro tecniche principali per l'applicazione di strutture reticolari in AM (Olaf Diegel, 2019):

- Convertire l'intera parte in una struttura reticolare, comunemente utilizzata quando le superfici esterne non richiedono alcun controllo (Figura 3.10 (a));
- Riempire le parti interne con strutture reticolari lasciando un guscio esterno di un determinato spessore, in questo caso la parte avrà un rapporto peso volume inferiore e la struttura reticolare in fase di costruzione fungerà da supporto (Figura 3.10 (b));
- Suddivisione del modello in parti solide e a struttura reticolare, con decisione consapevole di quali siano le caratteristiche del progetto (Figura 3.10 (c));
- Struttura reticolare variabile basata su risultati di analisi ad elementi finiti, con dimensioni della struttura dinamiche in funzione delle localizzazioni delle sollecitazioni (Figura 3.10 (d)).

Il comportamento dal punto di vista meccanico di tali strutture è ampiamente analizzato, ma nel design per uno scambiatore di calore queste prestazioni possono essere trascurate poiché lo stesso è soggetto maggiormente a carichi termici ed anche vibrazionali.

L'aspetto di maggiore interesse per il trasferimento di calore che presentano le strutture reticolari è la porosità. Grazie alla fusione selettiva che offre la tecnologia a letto di polvere molti studi sulle prestazioni termiche di componenti con strutture cellulari sono state effettuate come gli studi di Karen N. Son, 2017 ed anche J.Y. Ho, 2020. I risultati di queste ricerche hanno portato alla luce i benefici dell'utilizzo di queste strutture ad elevata porosità. Prima di tutto il rapporto

superficie/volume, che si avvicina alle schiume metalliche, principali concorrenti per le superfici potenziate nello scambio termico, ma con perdite di carico inferiori ed una solidità elevata (Son, Weibel, Kumaresan, & Garimella, December 2017). Anche i valori di densità del flusso di calore ed il coefficiente di scambio termico lato aria risultano superiori a quelli relativi ad uno scambiatore di calore a tubi alettati esternamente. Tali caratteristiche sono principalmente d'attribuire alla presenza di pori interconnessi in tutto il reticolo, dai percorsi di conduzione del calore e dalle interazioni fluido-solido con miscelazione di flusso (Ho, Leong, & Wong, April 2020). Questi meccanismi sono a loro volta influenzati dai parametri che definiscono la cella come la topologia, il diametro/spessore e la porosità.

I risultati di queste tipologie di ricerche dimostrano il potenziale nell'utilizzo della tecnologia a letto di polvere metallica per un miglioramento delle prestazioni di trasferimento termico per scambiatori di calore.

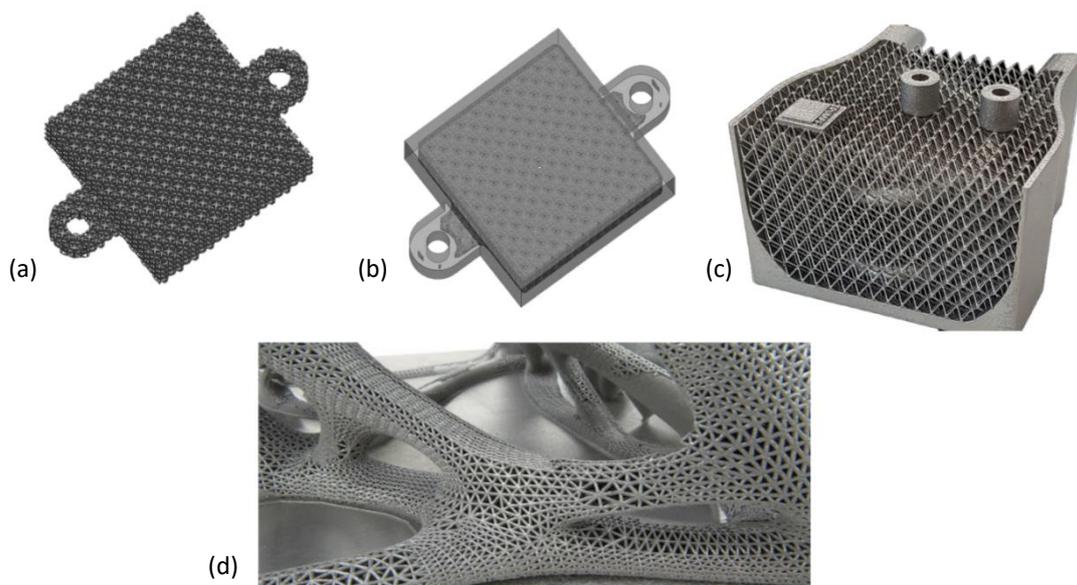


Figura 3.10- Applicazioni di strutture reticolari: (a) struttura a lattice completa, (b) struttura a lattice interna, (c) struttura a lattice ibrida, (d) struttura a lattice dinamica

3.3.1 Problemi relativi alla realizzazioni di strutture reticolari

La produzione di strutture reticolari risulta essere più impegnativa dal punto di vista della qualità a causa del fatto che le dimensioni delle caratteristiche delle travi spesso si avvicinano al limite dei sistemi utilizzati. Per i sistemi EBM tale limitazione è maggiormente significativa dal momento che la dimensione del fascio di elettroni è maggiore di quella di quello del laser.

Quindi i diametri delle travi devono essere determinati per poter essere fabbricati. Teoricamente si potrebbe realizzare strutture con un diametro di circa 0,15mm ma a causa della poca resistenza meccanica e alla fatica è meglio che le dimensioni siano comprese tra 0,5-1mm (Olaf Diegel, 2019). Oltretutto l'effetto gradino, per le piccole dimensioni che caratterizzano la struttura, potrebbe risultare significativo da influenzare l'integrità strutturale. Di fatti come mostrato in Figura 3.11 il fascio di energia fonde un piccolo punto di polvere con uno spessore determinato, se l'angolo d'inclinazione rispetto alla piattaforma di costruzione è troppo piccolo l'overlap tra layer successivi sarà minimo e il risultato è una struttura debole (Harrysson, Cansizoglu, Marcellin-Little, Cormier, & West, 2008).

Inoltre è necessario che le strutture reticolari siano autoportanti e che quindi in fase di costruzione non richiedano materiale di supporto (Olaf Diegel, 2019).

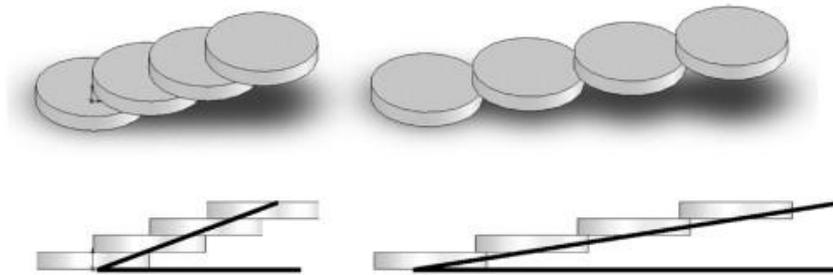


Figura 3.11-Effetto gradino per travature di strutture portanti (Harrysson, Cansizoglu, Marcellin-Little, Cormier, & West, 2008)

4 Materiale

Nei processi metallici di Additive Manufacturing il primo step a cui bisogna far riferimento per un'ottima costruzione del componente è la realizzazione della materia prima utilizzata, ovvero la polvere, nella giusta dimensione, forma e qualità.

Al contrario delle particelle di materiale polimerico, quelle metalliche devono necessariamente avere il più possibile una forma sferica, così da non opporre una significativa resistenza al passaggio del recoater; altresì la stesura di strati omogenei in spessore e densità garantisce una corretta e compatta struttura cristallina senza difetti in tutti i punti del componente (Trevisan, et al., 2017).

4.1 Produzione

Sebbene esistano diverse tipologie d'impianti per la produzione delle polveri metalliche, tutte le tecnologie condividono la stessa logica, potendo quindi suddividere macroscopicamente in step le fasi della lavorazione come mostrato in Figura 4.1 (Fino, 2018).

Step I. Prevede la completa fusione del materiale che inizialmente si presenta come semi lavorato. A seconda che il materiale sia sotto forma di lingotti, billette o fili e della fonte di energia utilizzata per fondere gli stessi, la tecnologia prende nomi e caratteristiche differenti. In generale è preferibile avere dei sistemi capaci, non solo di sciogliere i lingotti ma anche di alligare direttamente all'interno del crogiolo di fusione elementi diversi; questo per essere flessibili modificando le percentuali dei componenti di una lega in loco. In generale si cerca di non partire dal materiale puro poiché questo tende ad ossidarsi o a modificarsi più facilmente rispetto ad una lega, la quale ha un livello energetico più basso.

Step II. Una volta creato il bagno fuso questo viene spinto attraverso un ugello e successivamente si ha il vero e proprio processo di atomizzazione, che può essere condotto con differenti tecniche, ottenendo quantità e qualità diverse. I processi sono:

- Atomizzazione al Plasma, che risulta essere in una fase ancora sperimentale;
- Atomizzazione a gas, ormai tecnologia stabile che ricopre l'80% del mercato, tra le principali troviamo sistemi PIGA, VIGA ed ESR;
- Water-Atomization con l'ausilio di raffreddamento ad acqua;
- Atomizzazione centrifuga

Step III. Riguarda il post-processing e la validazione del prodotto. In questa fase vengono svolte operazioni di vagliatura e rimescolamento della polvere, nelle percentuali prestabilite, per una distribuzione granulometrica desiderata; tipicamente possiamo avere i seguenti valori $15\div 45\ \mu\text{m}$ per SLM/DMLS, $45\div 100\ \mu\text{m}$ per EBM, $25\div 45\ \mu\text{m}$ per LENS/DED. Successivamente si passa alla validazione di altre proprietà come composizione chimica, presenza di porosità e dimensione.

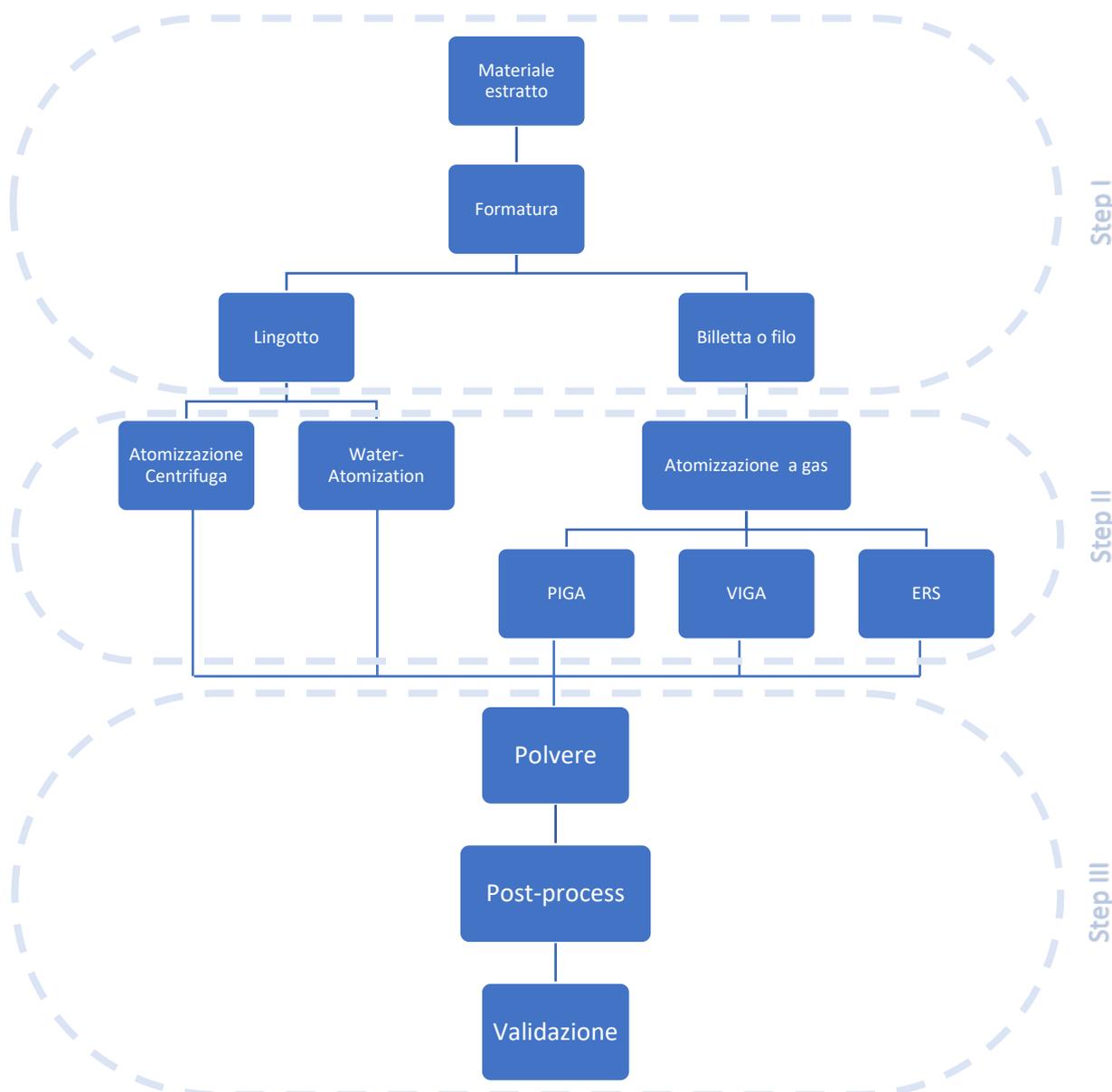


Figura 4.1-Schema produzione della polvere

Non tutti i sistemi di atomizzazione sono in grado di realizzare polveri con le caratteristiche richieste dalle lavorazioni di SLM; per questo motivo la produzione di polveri è in mano a pochi ed i prezzi

risultano molto elevati. Il costo della materia prima rappresenta dunque una piccola barriera all'ingresso che deve essere abbattuta dalla potenzialità della tecnologia AM.

4.2 Leghe di alluminio

Nella realizzazione degli scambiatori di calore ed in maniera generale nella gestione dei flussi termici, la scelta dei materiali riveste una particolare importanza. Le proprietà su cui si deve far riferimento sono, in particolar modo, la diffusività e conducibilità termica. La prima intesa come la capacità del materiale di reagire, più o meno rapidamente, ad una variazione di temperatura; la seconda invece è da intendere come l'attitudine del materiale di trasferire una quantità di energia termica come risultato di un gradiente termico.

Il materiale, prodotto per processi AM, che meglio risponde a valori elevati di questi requisiti è l'alluminio e le sue leghe. Di seguito vengono descritte in Tabella 4.1 le caratteristiche di principale interesse dell'alluminio puro.

Caratteristiche base dell'alluminio puro	
Peso atomico	26,9815 kg/kmol
Densità	2,6989 kg/dm ³
Punto di fusione	660,32 °C
Temperatura di ebollizione	2450 °C
Calore specifico	394.5 kJ/kg
Conducibilità termica	237 W/mK
Diffusività termica	98.8 mm ² /s
Coefficiente di espansione termica	24*10 ⁻⁶ K ⁻¹
Modulo elastico	70 GPa
Resistenza alla trazione	70 MPa
Resistenza allo snervamento	30 Mpa
Allungamento percentuale	2%

Tabella 4.1-Caratteristiche alluminio (Fino, 2018)

L'alluminio puro si presenta come un materiale particolarmente duttile e nella pratica comune sono poche le applicazioni in cui si ha la sola presenza di polvere pura di alluminio, poiché la sua gestione è abbastanza complicata. Al fine di migliorare le proprietà intrinseche dell'alluminio vengono aggiunti degli elementi di lega. Questi sono molteplici ed ognuno presenta differenti effetti sulla lega; di seguito in Tabella 4.2 vengono elencati i principali elementi e il loro effetto complessivo.

Silicio	<ul style="list-style-type: none"> • Migliora la colabilità della lega di alluminio grazie a una migliore fluidità e al minore ritiro della stessa; • Aumenta complessivamente la resistenza della lega; • Migliora la resistenza all'usura abrasiva; • In combinazione con Mg consente di rafforzare la lega mediante trattamento termico di tempra per precipitazione;
----------------	--

	<ul style="list-style-type: none"> • Riduce il fenomeno dello shrinkage in fase di solidificazione, pertanto riduce il fenomeno delle tensioni residue.
Magnesio	<ul style="list-style-type: none"> • Rafforza e indurisce la lega mediante un meccanismo di indurimento con soluzione solida senza una notevole riduzione della duttilità; • Con una combinazione di Si e Zn consente di rafforzare le leghe mediante trattamento termico di tempra per precipitazione;
Manganese	<ul style="list-style-type: none"> • Rafforza e indurisce la lega mediante meccanismi di tempra di soluzione solida e tempra di dispersione; • Migliora la resistenza alla fatica; • Aumenta la resistenza alla corrosione; • Migliora la duttilità delle leghe d'alluminio contenenti Fe e Si.
Zinco	<ul style="list-style-type: none"> • In combinazione con Mg o Mg-Cu consente di rafforzare la lega mediante trattamento termico di tempra per precipitazione.
Rame	<ul style="list-style-type: none"> • Aumenta la resistenza a trazione a fatica e la durezza della lega a causa dell'effetto di indurimento della soluzione solida; • Rafforza la lega mediante il fenomeno della precipitazione; • Diminuisce la duttilità; • Diminuisce la resistenza alla corrosione.

Tabella 4.2-Elementi di lega ed effetto (Fino, 2018)

4.3 Lega AlSi10Mg

Le leghe di alluminio-silicio sono caratterizzate da una ottima colabilità e saldabilità ed eccellente resistenza alla corrosione. Grazie alla loro eccezionale combinazione di proprietà meccaniche, elevata conducibilità termica e peso ridotto, le leghe Al-Si hanno trovato un gran numero di applicazioni in diversi settori. Consolidata nel mondo dell'additive manufacturing, molte case produttrici di sistemi *power bed fusion* che producono anche loro stessi il materiale da processare, garantiscono proprietà significative del componente finale ed anche una buona finitura superficiale sotto parametri di processo da loro consigliati. Per il lavoro di tesi svolto la lega a cui si farà riferimento è AlSi10Mg che presenta tipicamente gli elementi in lega con i relativi valori percentuali mostrati in Tabella 4.3.

Al	Si %	Mg %	Fe %	Mn %	Ti %	Cu %	Zn %	Ni %
Bilanciato	9.0-11.0	0.2-0.45	0-0.55	0-0.45	0-0.15	0-0.05	0-0.10	0-0.05

Tabella 4.3-Componenti in percentuale della lega AlSi10Mg

4.4 Descrizione

AlSi10Mg contiene fino ad un massimo di 0,45% in peso di Mg. L'allocazione del magnesio all'interno della lega consente un indurimento della stessa attraverso il meccanismo di precipitazione, applicando un trattamento termico specifico; infatti la precipitazione di Mg_2Si rafforzerà la matrice

in misura significativa senza compromettere le altre proprietà meccaniche (Kempen, Thijs, Humbeeck, & Kruth, 2012).

Inoltre, è relativamente facile da processare mediante applicazioni laser per via della composizione quasi eutettica; come si può osservare nel diagramma di fase Al-Si in Figura 4.2, il 10% di Si si colloca abbondantemente oltre il limite di solubilità del silicio. Quest'ultimo infatti, rende particolarmente fluido il bagno fuso (Fino, 2018).

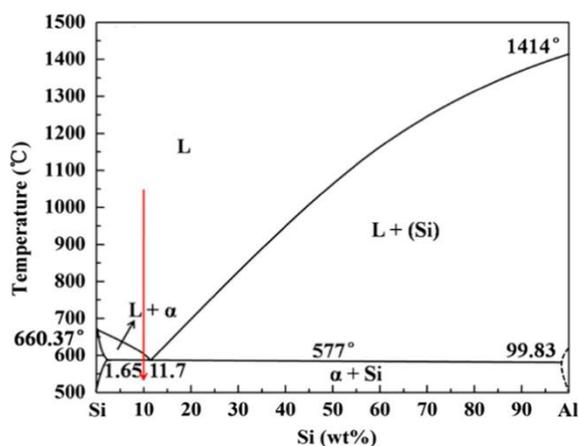


Figura 4.2-Diagramma di fase Al-Si (Li, et al., 2016)

L'obiettivo primario durante la qualificazione del materiale, per il processo SLM, è quello di ottenere una densità nei componenti prossima al 100% senza crepe e o difetti di fusione. Ciò richiede la valutazione dei parametri di processo adeguati, in particolare la velocità di scansione, la potenza del laser, l'hatch distance (distanza tra due tracce di scansione consecutive misurata dal centro del fascio) e la strategia di scansione. Una delle principali pecche delle polveri in lega di alluminio è l'elevata riflettività e il punto di fusione relativamente basso (Trevisan, et al., 2017).

Al fine di costruire componenti densi, è importante che la pozza di fusione non sia formata da diverse sottozone ma che sia coesiva. Se l'energia per unità di lunghezza, da un lato diminuisce con un aumento della velocità di scansione, dall'altro influenza positivamente la produttività del processo SLM. Tuttavia, l'aumento della potenza del laser, a un diametro del fascio costante, porta ad un aumento del fenomeno di spatter portando ad una instabilità del processo (Lutter-Günther, et al., 2018).

Quindi un settaggio preciso dei parametri di processo è essenziale per una densità ottimale del componente e superiore a quelle ottenute per tecnologie tradizionali come la pressofusione. Per avvalorare l'effetto combinato dei parametri, si prende in considerazione il fattore chiamato densità

di energia ψ , determinato dal rapporto tra la potenza del laser P ed il prodotto tra velocità di scansione v , hatching distance h e lo spessore del layer t :

$$\psi = P / (v \times h \times t)$$

Per quanto riguarda la produzione della lega, viene preferita l'atomizzazione a gas dove le particelle non mostrano molti difetti, ed hanno una forma sferica rispetto alla water-atomization che invece risulta come un processo più economico con forme delle particelle più irregolari ed una densità del letto di polvere minore (Trevisan, et al., 2017). Dipendente dal produttore, le polveri possono presentare satelliti, come mostrato in Figura 4.3, di dimensioni più piccole ma hanno una discreta tendenza a staccarsi.

La presenza del silicio permette di ottenere delle polveri di forma e geometria estremamente efficienti per il processo di fabbricazione additiva; inoltre avere un bagno fuso molto fluido aiuta sia la ri-solidificazione del materiale sia il processo di formatura delle polveri che risulteranno ben disperse (Fino, 2018).

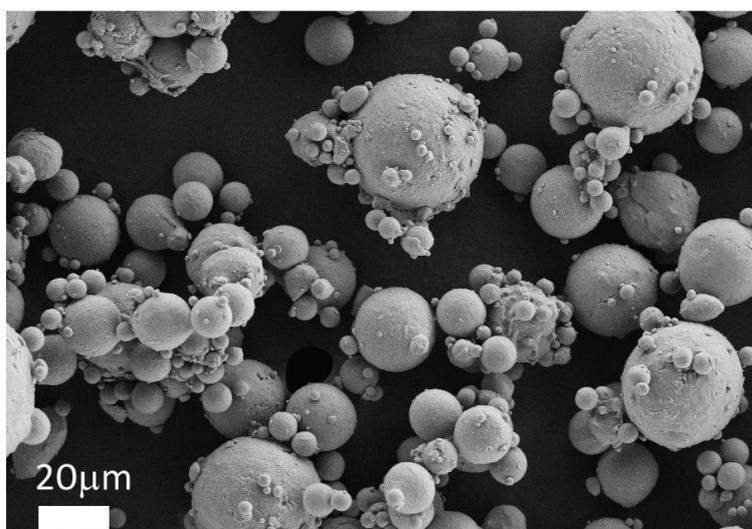


Figura 4.3-Polveri di alluminio prodotte mediante atomizzazione a gas (Trevisan, et al., 2017)

Studi effettuati da Kempen, Thijs, Humbeeck, & Kruth su provini normati, dimostrano che complessivamente le caratteristiche del materiale risultano migliori rispetto alle tecnologie convenzionali. Come si può notare in Tabella 4.4 i valori riportati possono essere paragonati tranquillamente a diverse tecnologie di produzioni come la pressofusione ad alta pressione (HPDC) con annesso trattamento termico T6.

		E [Gpa]	UTS [Mpa]	ϵ [%]	HV
SLM	Direzione XY	68 ± 3	391 ± 6	$5,55 \pm 0,4$	127
	Direzione Z		396 ± 8	$3,47 \pm 0,6$	
Fusione ed invecchiamento		71	300-3017	2,5-3,5	86
HPDC		71	300-350	3-5	95-105
HPDC+T6		71	330-365	3-5	130-133

Tabella 4.4-Proprietà meccaniche AlSi10Mg (Kempen, Thijs, Humbeeck, & Kruth, 2012)

Da questi risultati si nota che i campioni prodotti con SLM mostrano valori maggiori in quasi tutte le proprietà indipendentemente dalla direzione XY o Z. Un confronto tra le curve di trazione mostra un diverso comportamento di rafforzamento per le due direzioni; in Figura 4.4 si nota che il materiale processato con tecnologia additiva ha un comportamento anisotropo di conseguenza l'allungamento a rottura è inferiore per le parti prodotte in direzione X-Y rispetto a quelle in direzione Z.

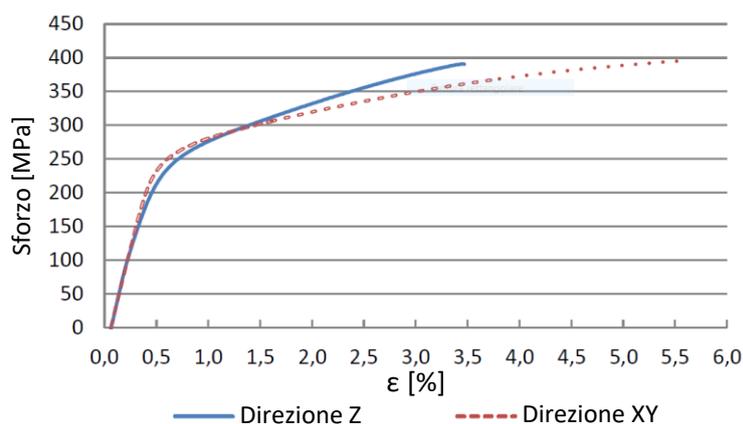


Figura 4.4-Curva sforzo-deformazione per due provini costruiti in direzioni diverse (Kempen, Thijs, Humbeeck, & Kruth, 2012)

Si capisce fin da subito che l'elevata resistenza e durezza nelle parti realizzate e non ancora trattate termicamente (as-built), deriva dalla straordinaria microstruttura e distribuzione molto fine della fase Si all'interno della matrice di alluminio (Figura 4.5), a causa del rapido raffreddamento e solidificazione tipici del processo AM.

In conclusione le parti AlSi10Mg realizzate con SLM hanno proprietà meccaniche come durezza, UTS, allungamento e energia di impatto superiore o almeno paragonabili al materiale fuso, a causa della diversa e migliore microstruttura presente. Inoltre l'anisotropia del materiale è derivata dalla strategia di scansione attuata.

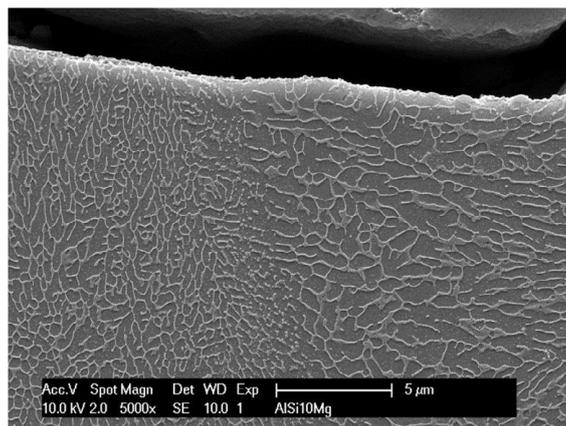


Figura 4.5-Immagine SEM della lega AlSi10Mg
(Kempen, Thijs, Humbeeck, & Kruth, 2012)

4.5 Trattamento termico

La maggior parte dei componenti fabbricati con SLM a causa dei forti gradienti di temperatura, introducono elevate sollecitazioni termiche all'interno del materiale che rimangono anche a costruzione completata. È quindi buona norma al fine ridurre lo stress interno, effettuare un trattamento termico di *stress relieving* prima di rimuovere il componente dalla piattaforma di costruzione per preservarne la geometria e accuratezza dimensionale.

Tale trattamento generalmente viene effettuato con l'ausilio di un forno dove la parte inserita è portata ad una temperatura di circa 300°C per 2 ore, con tale intervento l'allungamento percentuale del materiale diminuisce, mentre viene ridotto di qualche punto percentuale sia il carico a rottura che quello a snervamento; quindi di fatto il materiale diventa più duttile. Inoltre poiché le temperature di tale trattamento non sono particolarmente alte, praticamente non viene modificata la dimensione del grano.

Al fine di avere un migliore compromesso tra duttilità e resistenza del materiale, su di esso possono essere fatti successivi trattamenti termici, i principali sono (Fino, 2018):

- Annealing, trattamento termico di ricottura a 530°C per 5 ore e raffreddamento all'interno del forno;
- T4, trattamento termico di soluzione a 530°C per 5 ore, seguito da un raffreddamento in acqua e poi dall'invecchiamento a temperatura ambiente per almeno due settimane;
- T6, trattamento termico di soluzione a 530°C per 5 ore, seguito da una tempra in acqua e successivamente da un invecchiamento artificiale a 160°C per 12 ore .

Soffermandoci maggiormente sul trattamento T6, tramite studi effettuati (Li, et al., 2016) possiamo descrivere l'evoluzione della microstruttura del AlSi10Mg. Il materiale as-built mostra una microstruttura costituita da matrice di Al sovrassatura circondata da particelle eutettiche di Si. Dopo

il trattamento termico completo, il Si eutettico viene respinto dall'Al per formare piccole particelle di Si, che generalmente precipitano lungo i bordi di Al-Si. Quindi, le particelle grossolane di Si vengono distribuite uniformemente sulla superficie della matrice Al.

Per quanto riguarda le proprietà meccaniche curve di sforzo-deformazione possono essere ottenute da prove di trazione di campioni dopo diverse tipologie di trattamenti termici. Di seguito in figura vengono confrontate le diverse condizioni.

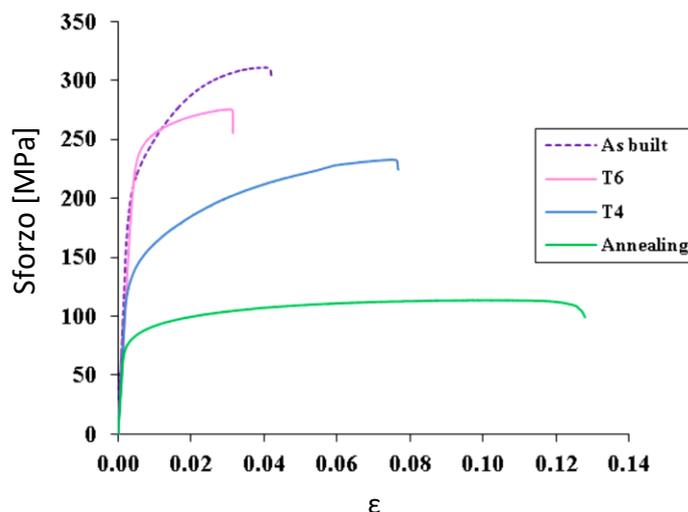


Figura 4.6-Andamenti sforzo deformazione per vari trattamenti termici sulla lega AlSi10Mg (Fino, 2018)

Possiamo concludere affermando che tutti i trattamenti termici riducono le proprietà di trazione del materiale. L'annealing ovvero la ricottura ha riduzione massima della resistenza a trazione ma il materiale risulterà molto duttile. I campioni che invece subiscono uno dei trattamenti T4 o T6 rispettivamente ottimizzano i propri valori di resistenza a trazione. Uno dei miglioramenti che si può osservare dopo il trattamento T6 è un leggero aumento della resistenza allo snervamento, rispetto alle condizioni as-built.

L'elevato valore di resistenza alla trazione del materiale as-built è da ricondursi alla fine struttura cristallina generatasi dal processo SLM.

5 Progetto dello scambiatore di calore con struttura reticolare

Gli scambiatori di calore compatti, utilizzati in molti sistemi industriali, sempre maggiormente richiedenti in termini di prestazioni ed efficienza, sono stati migliorati dai progettisti per lo più utilizzando superfici potenziate sempre limitati delle molteplici variabili fisiche nella costruzione accennate nel paragrafo 1.3. Garantendo un discreto risultato sul lato aria dello scambiatore con superfici alettate con alette ondulate, forate e con generatori di vortici, poche invece sono le applicazioni di superfici migliorate dal lato fluido, dato che i canali presenti nei CHEs automobilistici risultano essere di piccole dimensioni e non migliorabili con tecnologie tradizionali.

Si determina subito quindi che l'aumento delle performance è circoscritta solo alla realizzazione di alette e tubi, causa le limitazioni delle tecnologie costruttive; ma in funzione delle loro applicazioni, sono necessari scambiatori di calore con coefficienti di trasferimento del calore più elevati e bassi costi di produzione per migliorare l'efficienza energetica del sistema associato.

In questo scenario l'AM si presenta come una carta vincente per dare spazio ad una nuova ed innovativa metodica di progettazione.

Nei prossimi paragrafi vedremo come la libertà di design associata all'AM renderà complesso dal punto di vista strutturale e performante uno scambiatore di calore riprogettato in chiave additiva.

5.1 Descrizione e funzionamento dell'impianto di raffreddamento

La combustione che avviene all'interno del cilindro di un motore endotermico porta la miscela di combustibile ad elevate temperature; ne derivano intensi flussi di calore rispettivamente tra il gas e la superficie interna della camera di combustione e successivamente tra la superficie esterna di quest'ultima al fluido refrigerante.

Questi flussi di calore comportano consistenti sollecitazioni termiche in tutte le parti di un motore, quindi lo scopo principale della refrigerazione dei cilindri non è quello di sottrarre elevate quantità di calore ma quello di limitarne la temperatura, mantenendola sempre al di sotto di un determinato valore ottimale, impostato principalmente dai problemi di resistenza nei materiali utilizzati e dal deterioramento degli oli lubrificanti. La potenza termica trasportata dal refrigerante mediamente risulta essere pari al 20-30% della potenza inizialmente disponibile nella combustione (Ferrari).

Lo scambiatore in esame è a raffreddamento a liquido, in cui il calore viene sottratto dai cilindri mediante il passaggio del fluido refrigerante, avente opportune proprietà intrinseche, ed in seguito lo stesso viene raffreddato mediante aria ambiente in un apposito scambiatore di calore, chiamato

comunemente “radiatore”. Il liquido ha quindi solo la funzione di veicolo per il trasporto del calore dalla superficie esterna dei cilindri alla superficie esposta all'aria del radiatore.

Il raggiungimento delle zone maggiormente sollecitate termicamente nel motore è garantito dalla presenza di intercapedini e canalizzazioni interne mentre la corretta circolazione del refrigerante è assicurata da una pompa centrifuga.

La regolazione della temperatura del liquido è ottenuta mediante un termostato che nelle condizioni di basse temperature blocca il suo passaggio nel radiatore, pur continuando a circolare nel motore; se invece la temperatura aumenta oltre la soglia ottimale viene attivata una ventola per aumentare lo scambio termico.

Principalmente negli scambiatori comunemente utilizzati nel settore automotive presentano una matrice attiva nello scambio termico, che in maniera impropria viene chiamata pacco radiante, e due vasche collettrici che svolgono la funzione di distribuire e raccogliere il fluido refrigerante rispettivamente in entrata ed in uscita dalla matrice di scambio.

Esistono diverse soluzioni che tradizionalmente vengono utilizzate per la realizzazione del pacco radiante, nel caso in esame lo scambiatore presenta una matrice ad alette ondulate. Sono presenti dei tubi piatti in serie, tra i quali sono brasate delle alette a nastro ondolato. Com'è evidente vi è la presenza di un numero elevato di componenti, sia per la realizzazione del pacco radiante con tubi ed alette, che delle vasche collettrici, viene da sé il vantaggio nel utilizzo di un processo AM, come quello SLM, nella realizzazione mirata alla riduzione del numero dei componenti, i quali comprendano tutto il necessario per un corretto e performante trasferimento di calore.

5.2 Descrizione del componente originale

Il radiatore in oggetto di tesi, rappresentato in Figura 5.1 (a), è appartenente al circuito di raffreddamento di un motoveicolo. Questo si presenta come un assemblato di più componenti (Figura 5.1 (b)), che con le opportune tecnologie di collegamento discusse nel capitolo 1.3, formano il componente in oggetto. Si nota come un numero elevato di componenti siano presenti.

Possiamo suddividere il modello in tre parti distinte il nucleo centrale e le due vasche collettrici ai lati. Il primo è costituito da una serie alternata di alette ondulate e canali piatti a sezione rettangolare per un totale di 23 canali e 24 alette.

Le due vasche laterali sono a loro volta composte da altri elementi tra cui distinguiamo i rispettivi tubi collettori, dai quali lo scambiatore è collegato al circuito, il corpo centrale della vasca, un ulteriore ingresso per l'immissione di un nuovo fluido refrigerante ed infine delle piastre forate su cui verranno assemblati i canali .

Aggiuntivi componenti per l'ancoraggio al motoveicolo sono rappresentati in Figura 5.1 (b), in fine vengono forniti in tabella le corrispettive superfici di scambio lato aria e lato fluido.

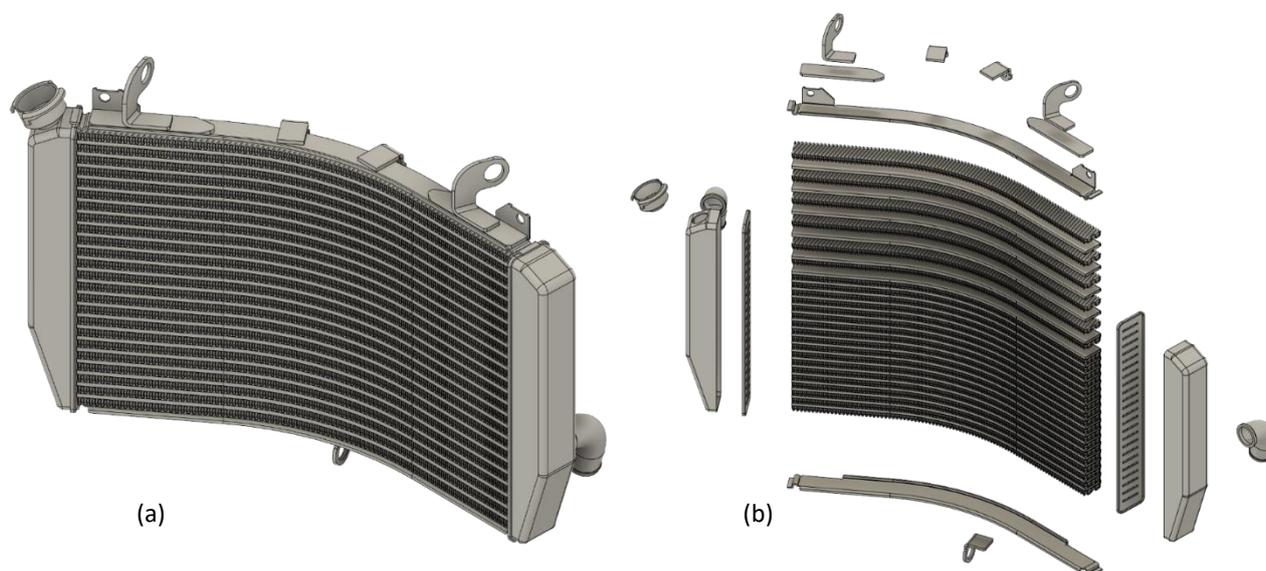


Figura 5.1-Scambiatore di calore originale (a), vista esplosa(b)

	Canali	Alette
Superficie esterna [cm2]	212,128	7162,879
Superficie interna [cm2]	194,020	
Numero di componenti	23	24
Totale superficie esterna [cm2]	4878,939	171909,102
Totale superficie interna [cm2]	4462,455	
Totale superficie di scambio lato aria [cm2]	176788,041	

5.3 Il progetto - pensare AM

La grande libertà nella definizione di forme e geometrie complesse della tecnologia AM, deve ad ogni modo rispettare delle regole di progettazione, come indicato nel capitolo Design for Additive Manufacturing, per una corretta realizzazione del componente. Il flusso della progettazione deve comprendere in se tutte le variabili e caratteristiche che insistono in una realizzazione di componenti in AM. Tra le principali possiamo includere certamente dimensioni di massima del componente che influiscono sul volume di lavoro della macchina da sceglie e dal numero di parti processabili, ma anche l'orientamento in macchina che determina quantità e posizionamento dei

supporti. Ne deriva l'evidente complicazione nella realizzazione di un componente al quanto elaborato come un scambiatore di calore.

Nonostante ciò, nella riprogettazione del componente in chiave AM, si dovranno sfruttare a pieno i vantaggi di tale tecnologia, al fine di svestire geometrie e forme della parte dalle limitazioni dei processi tradizionali.

Una particolare attenzione deve essere riposta all'evacuazione della polvere a processo ultimato; poiché lo scambiatore presenta canali interni è necessario prevedere delle aree di fuga, dalle quali può essere rimossa con facilità polvere non fusa.

Inoltre volendo avvalorare la complessità che si può raggiungere con la tecnologia SLM si renderà il componente performante tramite strutture in lattice che grazie al loro rapporto superficie volume molto elevato aumenteranno lo scambio termico ed infine i canali saranno muniti di alettatura interna e di percorsi specifici del fluido al fine di creare turbolenze nel fluido refrigerante.

5.3.1 Considerazioni preliminari su: dimensione di massima, evacuazione della polvere e possibile orientamento in funzione della direzione di costruzione

Prima di passare alla riprogettazione nei minimi dettagli dello scambiatore è necessario verificare che le dimensioni di massima delle parti o parte da costruire siano coerenti con i volumi di lavoro delle macchine SLM in commercio e che il loro possibile orientamento rispetto alla direzione z di costruzione sia coerente con una minima presenza di supporti. Inoltre trattandosi di un modello con parti cave, l'evacuazione della polvere nel post processo è rilevante per la definizione del design iniziale del nuovo componente. Vediamo quindi, con semplici considerazioni, in che modo le dimensioni di massima, orientamento ed evacuazione della polvere influiscano nella scelta della macchina e nel design dello scambiatore. Come argomentato in precedenza, l'angolo massimo generato da una qualsiasi superficie del modello rispetto alla direzione di costruzione è di 45° per non avere la presenza di supporti. Poiché il modello in oggetto presenta uno sviluppo maggiore in due delle tre direzioni spaziali si potrebbe pensare che la disposizione migliore sia quella orizzontale indicata in Figura 5.2 (a), poiché il numero di layer di polvere depositati saranno in numero minore rispetto ad un posizionamento dello stesso secondo una direzione verticale Figura 5.2 (b). Ma l'orientamento orizzontale è errato poiché verrebbero generati un grande numero di supporti che andrebbero ad attaccare il modello anche nella regione in cui verrà realizzato il reticolo. Come viene mostrato in Figura 5.2 la proiezione dell'ombra del componente in su di un piano orizzontale corrisponderebbe a ad una ipotetica zona in cui vi è la presenza di supporti. Quindi per l'oggetto di

studio l'orientamento favorito sarà quello verticale con l'asse z del modello circa "parallelo" a quello di costruzione che andrà a minimizzare i supporti a discapito del numero di slice da effettuare.

Un eventuale accorgimento deve essere posto alle vasche collettrici del fluido refrigerante, queste

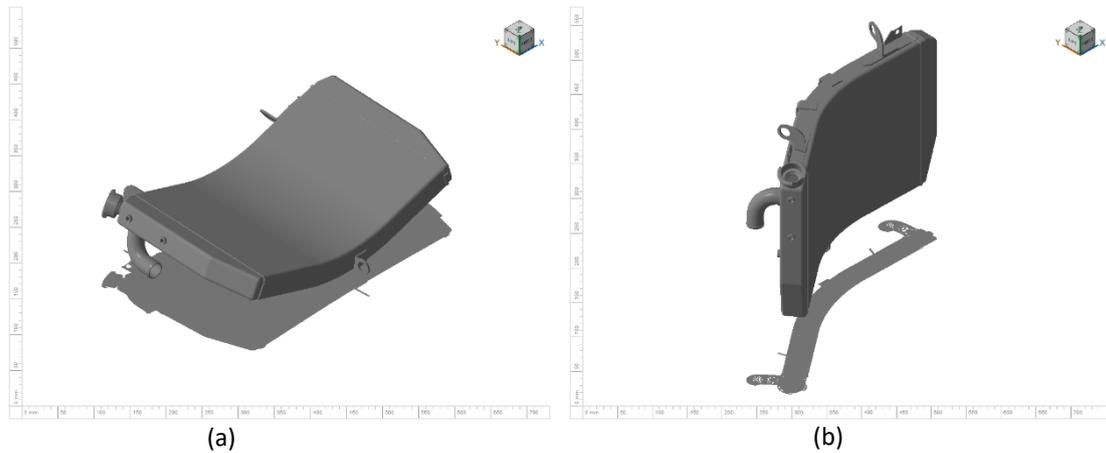


Figura 5.2-Proiezione ombra del componente: orizzontale (a), verticale(b)

qualora fossero realizzate insieme al nucleo dello scambiatore procedendo alla realizzazione dello stesso in unico componente come mostrato in Figura 5.2 (b), in funzione del loro orientamento generano supporti necessari interni al modello ed impossibili da rimuovere come mostrato in Figura 5.3, inoltre la loro presenza genera una impossibilità dell'evacuazione della polvere dai canali della matrice attiva dello scambio.

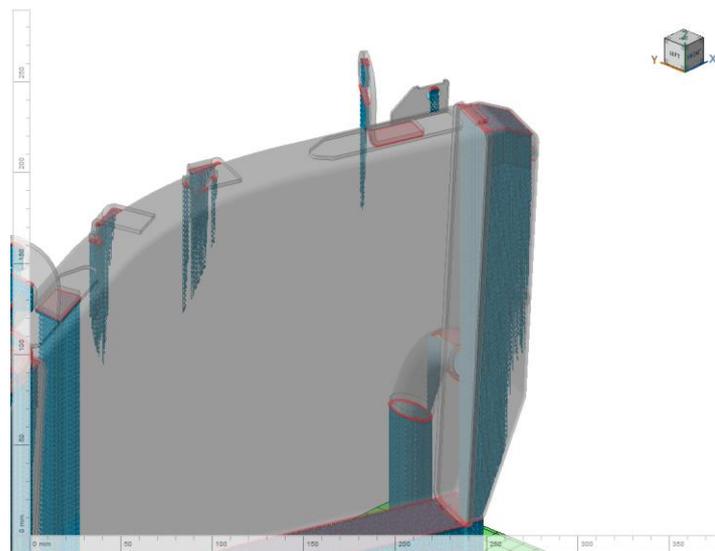


Figura 5.3-esempio supporti interni nelle vasche collettrici

Per questi motivi si procede ad una suddivisione del modello dello scambiatore in tre parti differenti, il nucleo centrale con canali e struttura reticolare ed le due vasche collettrici d'ingresso ed uscita fluido con annessi tubi collettori che saranno orientati distintamente in modo opportuno ed in seguito assemblati a lavorazione completata (Figura 5.4).

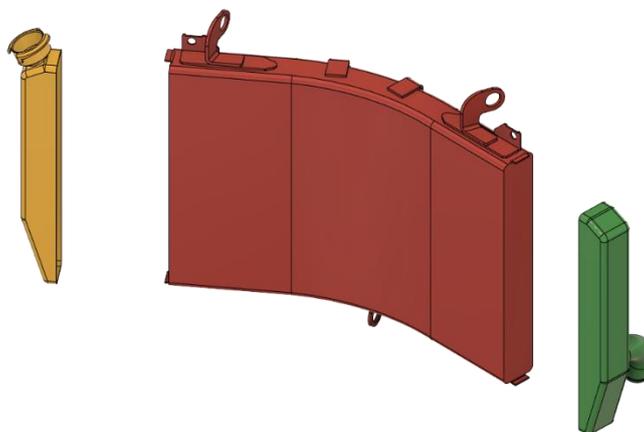


Figura 5.4-Suddivisione del modello

Semplificando il modello di base CAD dello scambiatore in oggetto, le dimensioni d'ingombro dei tre componenti sono mostrate in Tabella 5.1. Si verifica quindi che le dimensioni che andranno ad essere incisive nella scelta della macchina SLM sono quelle del nucleo centrale rispettivamente lungo le direzioni x e z, quest'ultima in oltre è molto vincolante per la scelta della macchina poiché come discusso in precedenza per quanto riguarda l'orientamento.

Componenti	Dimensione x	Dimensione y	Dimensione z
Nucleo centrale	366,90 mm	162,27 mm	325,92 mm
Vasca collettrice Dx	73,38 mm	82,54 mm	277,53 mm
Vasca collettrice Sx	44,28 mm	86,32 mm	253,00 mm

Tabella 5.1-Dimensione dei componenti

In commercio esistono una modesta gamma di macchinari e produttori tra i quali si è possibile selezionare quelle unità di lavoro che presentano un volume di costruzione nel quale realizzare i componenti e qualora sia giustificabile dal punto di vista del costo della costruzione, realizzare più scambiatori di calore in una sola lavorazione. I seguenti macchinari in Tabella 5.2 sono da intendersi come papabili per la realizzazione della costruzione ed i loro pro e contro verranno discussi in seguito appurato il miglior orientamento in macchina dei componenti.

Azienda	Modello	Dimensioni del volume di lavoro
Concept Laser	X Line 2000R	800 x 400 x 500 mm
EOS	M400	400 x 400 x 400 mm

Tabella 5.2-Macchinari

5.3.2 Nozioni base sul dimensionamento: LMTD

Il funzionamento di un qualsiasi scambiatore di calore viene determinato tramite lo studio dell'energia, delle trasformazioni energetiche e delle sue relazioni con la materia ovvero attraverso le leggi della termodinamica. Sia per comprendere le performance, in fase di verifica, sia per progettare un corretto scambio di energia il modello *Logarithmic Mean Temperature Difference* (LMTD) è essenziale. Questo infatti correla la quantità di calore trasferito a quantità misurabili come le temperature dei fluidi in entrata ed uscita, alla superficie di scambio ed il coefficiente di scambio termico globale. Due di queste relazioni possono essere determinate fin da subito applicando il bilancio di energia ai fluidi caldi e freddi come segue:

$$q_{tot} = \dot{m}_h(h_{h,i} - h_{h,o})$$

$$q_{tot} = \dot{m}_c(h_{c,i} - h_{c,o})$$

Con q_{tot} la quantità di calore trasferita e con i pedici h ed c rispettivamente caldo e freddo e con i e o ingresso ed uscita. Qualora non si presenti nessun cambiamento di fase ed si assuma il calore specifico costante otteniamo:

$$q_{tot} = \dot{m}_h c_{p,h}(T_{h,i} - T_{h,o})$$

$$q_{tot} = \dot{m}_c c_{p,c}(T_{c,i} - T_{c,o})$$

Dove le temperature sono riferite alle temperature medie dei fluidi nei punti designati. Si nota come le equazioni sopra riportate sono indipendenti dalla posizione e dalla tipologia di scambiatore. Considerando ora il trasferimento di calore in un punto particolare x , sulla superficie del trasferimento di calore come mostrato in Figura 5.5.

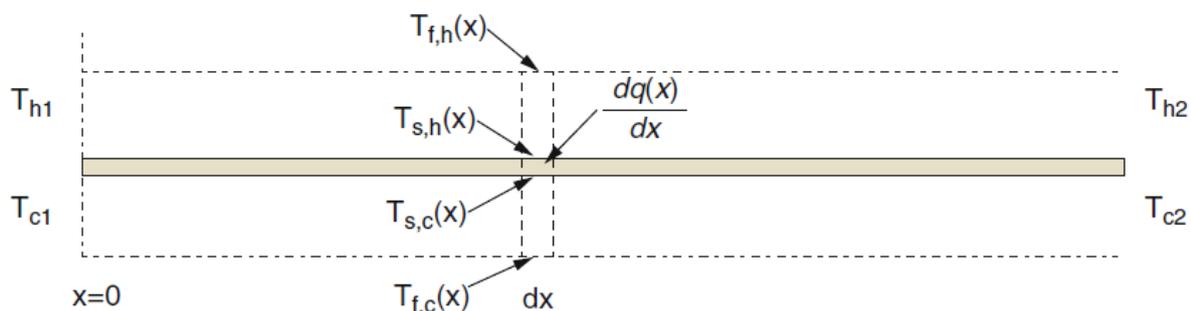


Figura 5.5-Schema trasferimento del calore

Ad x ci sarà una temperatura del fluido caldo data da $T_{f,h}(x)$, sulla superficie invece una temperatura $T_{s,h}(x)$ sul lato caldo e una $T_{s,c}(x)$ sul lato freddo. Mentre il fluido freddo sarà caratterizzato da una temperatura $T_{f,c}(x)$. La differenza di temperatura dal fluido caldo a quello freddo nel punto x sarà data da:

$$\begin{aligned}\Delta T &= T_{f,h}(x) - T_{f,c}(x) = T_{f,h}(x) - T_{s,h}(x) + T_{s,h}(x) - T_{s,c}(x) + T_{s,c}(x) - T_{f,c}(x) \\ &= \Delta T_{f,h} + \Delta T_s + \Delta T_{f,c}\end{aligned}$$

Il flusso di calore ceduto dal fluido caldo sarà:

$$\frac{dq(x)}{dx} = h_{f,h} dA_{f,h} (T_{f,h}(x) - T_{s,h}(x)) = h_{f,h} dA_{f,h} \Delta T_{f,h}(x) \rightarrow \Delta T_{f,h}(x) = \frac{\frac{dq(x)}{dx}}{h_{f,h} dA_{f,h}}$$

Mente quello che attraversa la superficie è dato da:

$$\frac{dq(x)}{dx} = \frac{k_s}{\delta_s} dA_s (T_{s,h}(x) - T_{s,c}(x)) = \frac{k_s}{\delta_s} dA_s \Delta T_s(x) \rightarrow \Delta T_s(x) = \frac{\frac{dq(x)}{dx}}{\frac{k_s}{\delta_s} dA_s}$$

Ed il flusso di calore ricevuto dal fluido freddo sarà:

$$\frac{dq(x)}{dx} = h_{f,c} dA_{f,c} (T_{s,c}(x) - T_{f,c}(x)) = h_{f,c} dA_{f,c} \Delta T_{f,c}(x) \rightarrow \Delta T_{f,c}(x) = \frac{\frac{dq(x)}{dx}}{h_{f,c} dA_{f,c}}$$

Riscrivendo l'equazione della differenza di temperatura otteniamo:

$$T_{f,h}(x) - T_{f,c}(x) = \frac{\frac{dq(x)}{dx}}{h_{f,h} dA_{f,h}} + \frac{\frac{dq(x)}{dx}}{\frac{k_s}{\delta_s} dA_s} + \frac{\frac{dq(x)}{dx}}{h_{f,c} dA_{f,c}} = \frac{dq(x)}{dx} \left[\frac{1}{h_{f,h} dA_{f,h}} + \frac{1}{\frac{k_s}{\delta_s} dA_s} + \frac{1}{h_{f,c} dA_{f,c}} \right]$$

Dove δ_s dipende dalla geometria della superficie. Si vuole porre quindi l'attenzione sulle aree differenziali che non necessariamente devono essere uguali, di fatti nella realtà ci saranno differenze tra queste poiché l'aggiunta di alette sia dal lato caldo che dal lato freddo cambiano in modo significativo l'area di scambio termico effettiva.

Inoltre le superfici sono da intendersi come superfici per unità di lunghezza per questo motivo vengono scritte come dA .

$$\begin{aligned}T_{f,h}(x) - T_{f,c}(x) &= \frac{dq(x)}{dx} \left(\frac{1}{U \frac{dA}{dx}} \right) \rightarrow \frac{dq(x)}{dx} = U \frac{dA}{dx} (T_{f,h} - T_{f,c}) \\ \frac{1}{U \frac{dA}{dx}} &= \frac{1}{h_{f,h} dA_{f,h}} + \frac{1}{\frac{k_s}{\delta_s} dA_s} + \frac{1}{h_{f,c} dA_{f,c}}\end{aligned}$$

Possiamo quindi definire il calore ceduto dal fluido caldo e quello ottenuto dal fluido freddo come:

$$\frac{dq(x)}{dx} = -\dot{m}_{f,h} c_{p,h} \frac{dT_{f,h}(x)}{dx}$$

$$\frac{dq(x)}{dx} = \dot{m}_{f,c} c_{p,c} \frac{dT_{f,c}(x)}{dx}$$

Combinando le due equazioni otteniamo:

$$\begin{aligned} \frac{dT_{f,h}(x)}{dx} - \frac{dT_{f,c}(x)}{dx} &= -\frac{dq(x)}{dx} \left(\frac{1}{\dot{m}_{f,h}c_{p,h}} + \frac{1}{\dot{m}_{f,c}c_{p,c}} \right) \\ &= -U \frac{dA}{dx} (T_{f,h} - T_{f,c}) \left(\frac{1}{\dot{m}_{f,h}c_{p,h}} + \frac{1}{\dot{m}_{f,c}c_{p,c}} \right) \\ \frac{d\Delta T(x)}{dx} &= -U \frac{dA}{dx} \Delta T \left(\frac{1}{\dot{m}_{f,h}c_{p,h}} + \frac{1}{\dot{m}_{f,c}c_{p,c}} \right); \\ \frac{d\Delta T(x)}{\Delta T} &= -U \left(\frac{1}{\dot{m}_{f,h}c_{p,h}} + \frac{1}{\dot{m}_{f,c}c_{p,c}} \right) dA \end{aligned}$$

Ed inseguito integrando otteniamo:

$$\ln \left(\frac{\Delta T_2}{\Delta T_1} \right) = -UA \left(\frac{1}{\dot{m}_{f,h}c_{p,h}} + \frac{1}{\dot{m}_{f,c}c_{p,c}} \right)$$

Ipotizzando di avere un flusso parallelo possiamo scrivere quanto segue:

$$\begin{aligned} \frac{1}{\dot{m}_{f,h}c_{p,h}} &= \frac{(T_{f,h,2} - T_{f,h,1})}{q_{tot}} \\ \frac{1}{\dot{m}_{f,c}c_{p,c}} &= \frac{(T_{f,c,2} - T_{f,c,1})}{q_{tot}} \\ \ln \left(\frac{\Delta T_2}{\Delta T_1} \right) &= -\frac{UA}{q_{tot}} (T_{f,h,2} - T_{f,h,1} + T_{f,c,2} - T_{f,c,1}); \\ \ln \left(\frac{\Delta T_2}{\Delta T_1} \right) &= \frac{UA}{q_{tot}} (\Delta T_2 - \Delta T_1) \end{aligned}$$

Quindi la quantità di calore trasferita in uno scambiatore è espressa con la seguente equazione:

$$\begin{aligned} q_{tot} &= UA \Delta T_{lm} \\ \Delta T_{lm} &= \frac{(\Delta T_2 - \Delta T_1)}{\ln \left(\frac{\Delta T_2}{\Delta T_1} \right)} \end{aligned}$$

Dove il termine ΔT_{lm} è il *Logarithmic Mean Temperature Difference* (LMTD). Per lo scambiatore in oggetto di tesi che si presenta come flusso incrociato con fluidi non miscelati e l'effettivo ΔT_{lm} deve essere moltiplicato per un fattore correttivo determinato da grafici come quelli riportati in Figura 5.6.

$$\Delta T_{lm} = F * \Delta T_{lm,CF}$$

Con $\Delta T_{lm,CF}$ il Logarithmic Mean Temperature Difference per scambiatore a flusso incrociato (counter flow).

Si capisce fin da subito il vantaggio nell'utilizzo di tale strumento nella fase di progettazione e o di verifica di uno scambiatore.

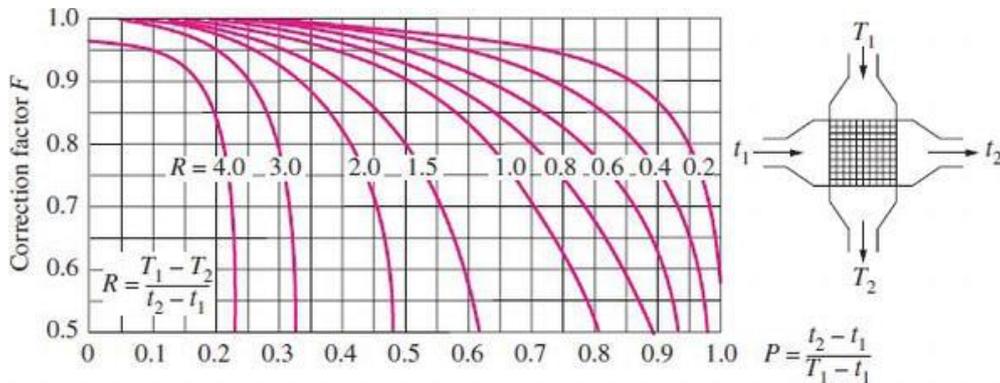


Figura 5.6-Grafico per il calcolo di F

5.3.3 Definizione del nucleo di scambio termico

Dal punto di vista delle performance richieste dal componente, la definizione di un nucleo di scambio è il cuore della progettazione. Questa è stata suddivisa in determinazione e caratterizzazione sia dei canali e relative alette interne che del reticolo da utilizzare. Di seguito verrà mostrato il flusso di progettazione seguito per la sua determinazione.

5.3.3.1 Definizione dei canali interni

I canali interni attraversati dal fluido refrigerante presentano dal punto di vista della realizzazione AM le peculiarità descritte nel paragrafo 3.2 vediamo di seguito come è stata definita la sezione ed il suo sviluppo nello spazio.

Dimensione e forma geometrica del canale sono da definirsi con cura per una corretta costruzione, evacuazione della polvere e la libertà da supporti interni. Inoltre la geometria e dimensione influiscono sia sulle superfici di scambio interne ed esterne del canale, sul gradiente di temperatura del fluido che scorre internamente, sia sull'ingombro degli stessi sul volume della matrice attiva dello scambiatore. Per quanto concerne la geometria della sezione sono state prese preliminarmente in considerazione le seguenti tipologie mostrate in Figura 5.7.

La geometria circolare è vincolata dalla dimensione del diametro di 6 mm da non superare per evitare supporti interni; mentre per la sezione quadrata o ellittica, la diagonale per la prima e l'asse maggiore per la seconda, devono mantenersi paralleli alla direzione di costruzione sempre per lo stesso principio. Inoltre le piccole dimensioni che si riscontrano nelle sezioni circolari e la stessa

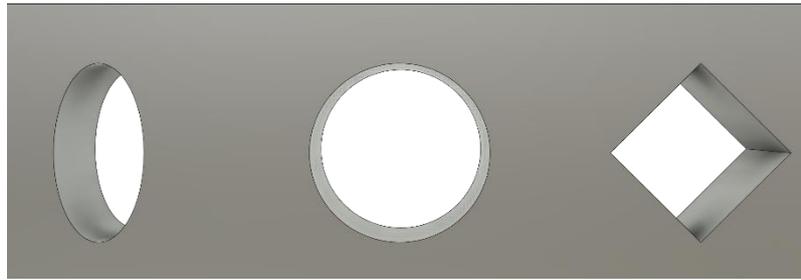


Figura 5.7-Geometrie preliminari dei canali

geometria ellittica vincolano il canale nell'inserimento di alette interne, che genererebbero spigoli di piccole dimensioni dai quali risulterebbe difficile la rimozione della polvere non sinterizzata e per questo vengono scartate. Per quanto riguarda la sezione quadrata, questa presenta i lati inclinati di un angolo di 45° secondo l'asse di costruzione, al limite per la presenza di supporti. Tale inclinazione realizzerà un effetto scalino accentuato aumentando la rugosità della superficie e quindi area effettiva di scambio. Risulta quindi ideale per il caso studio. Inoltre poiché non presenta particolari accorgimenti dal punto di vista delle dimensioni sarà possibile l'inserimento di alette interne come si vedrà nel paragrafo 5.3.3.2. La geometria si presenta di dimensioni $10 \times 10 \text{ mm}$ ed i suoi vertici sono raccordati con un di raggio di 2 mm come mostrato in Figura 5.8 ed uno spessore di 1 mm . Il raccordo è anche raccomandato al fine di evitare concentrazioni di tensioni.

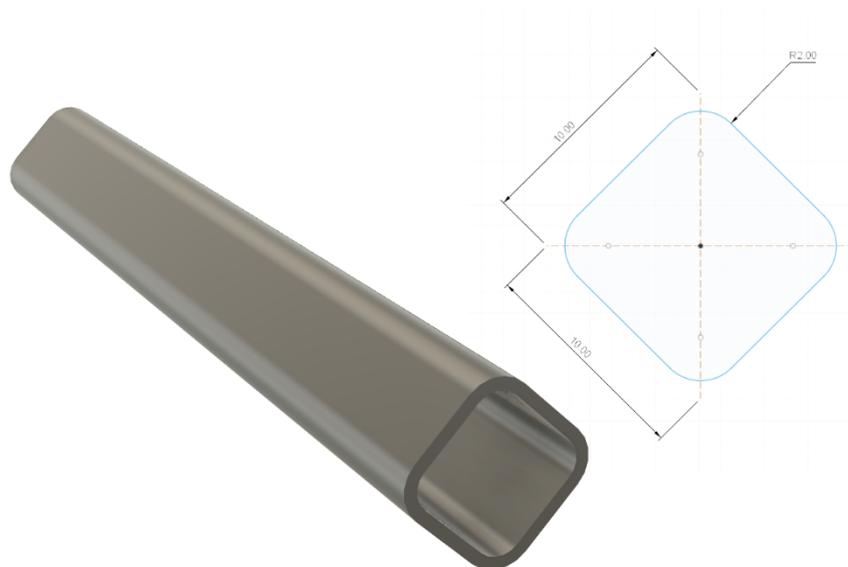


Figura 5.8-Geometria canale quadrata

Ulteriore geometria della sezione presa in considerazione è quella indicata in Figura 5.9. Unendo i vantaggi dal punto di vista dello scambio termico delle superfici inclinate a 45° e quello della sezione circolare si è sviluppata questa geometria piatta che si presenta di dimensioni indicate.

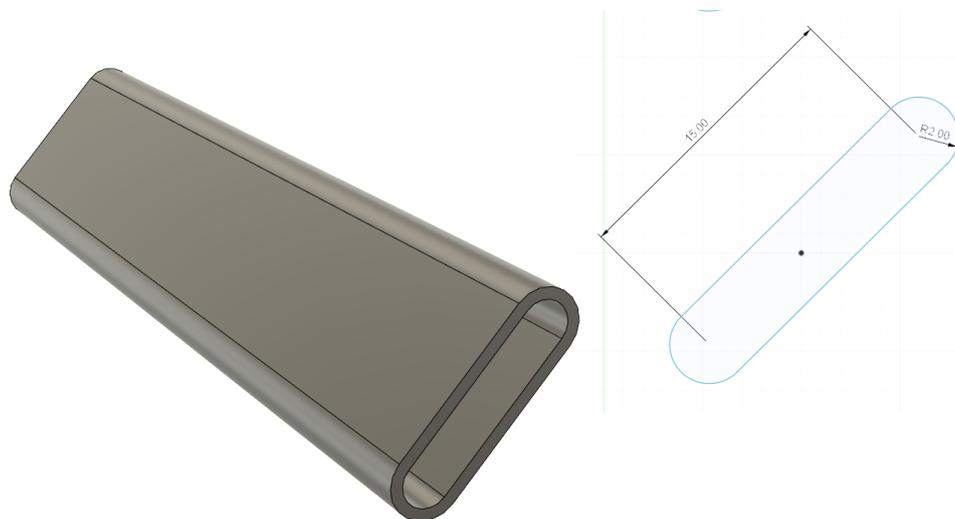


Figura 5.9-Geometria canale appiattita

5.3.3.2 Sviluppo del canale, disposizione nel volume di scambio ed alette interne

Lo sviluppo del canale nel caso studio è stato reso tale da non presentare alcuna sezione svergolata e quindi la stessa mantiene le medesime condizioni e caratteristiche rispetto alla direzione di costruzione. Il numero dei canali e la loro disposizione influiscono nell'efficacia dello scambio termico. La determinazione del layout e percorso dei canali migliori è basata su di una semplice valutazione delle superfici di scambio complessive sia dal lato del fluido caldo che da quello freddo.

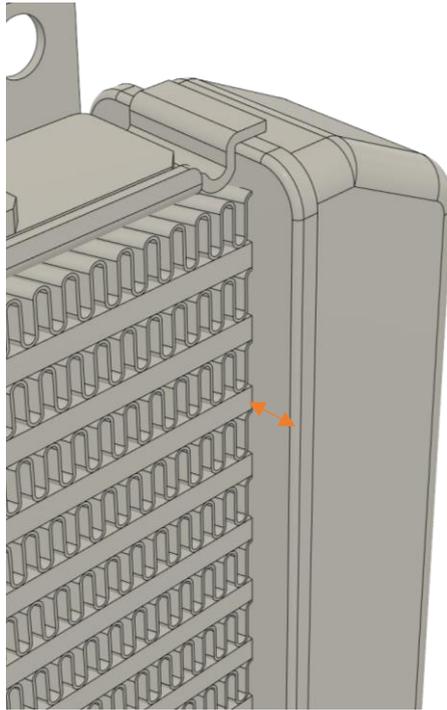


Figura 5.10-Gap tra piastra di assemblaggio e canali

Come indicato in precedenza nel paragrafo 0, la valutazione della quantità di calore trasferita è strettamente collegata alle superfici in gioco; dunque prendendo come riferimento i valori delle aree effettive di scambio dei soli canali del componente originale, è possibile incrementare le stesse con piccoli accorgimenti ma sempre guidati dal DfAM.

Come possiamo identificare in Figura 5.10 il canale e le alette del modello originale non sono sviluppate per tutta la profondità della piastra di assemblaggio, questo perché tali spazi sono essenziali durante la fase di unione dei diversi componenti, quindi un primo vantaggio che porterebbe l'AM è quello di realizzare il nucleo di scambio in cui le superfici si sviluppino fino ai limiti del volume impostato senza curare alle tipiche problematiche delle lavorazioni successive che un processo tradizionale detiene intrinsecamente. Sulla base di questo i diversi layout di canali realizzati si sviluppano su tutta la dimensione della ex piastra di assemblaggio rendendo inoltre la stessa come un corpo unico insieme a canali ed il reticolo.

I layout sono di seguito rappresentati in Figura 5.11 con annesso sviluppo nel volume del nucleo.

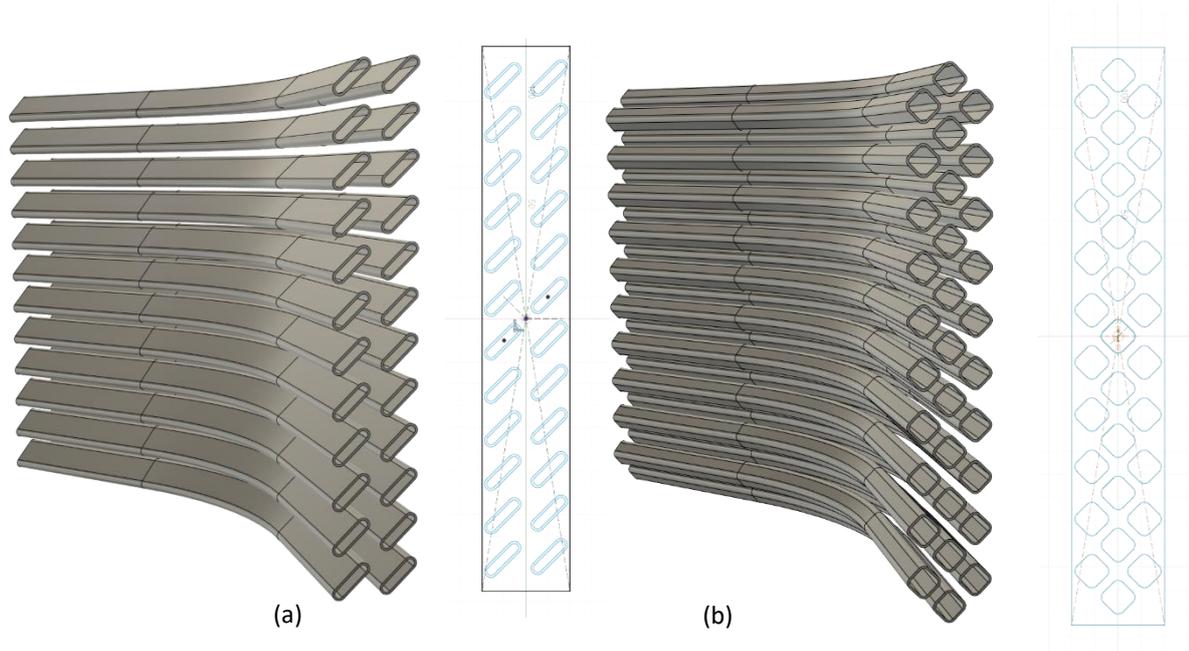


Figura 5.11-Layout canali: layout 1 (a), layout 2 (b)

Per quanto riguarda la superficie interna dei canali l'inserimento di alette interne, che oltre a migliorare la superficie di scambio lato fluido rompono il flusso laminare dello stesso, si presentano come una serie di ostacoli e la loro disposizione rispetta le indicazioni del DfAM. Per il layout 1, Figura 5.12 (a) le alette sono di forma rettangolare sfalsate e perpendicolari alla superficie interna del tubo e di conseguenza inclinate di 45° , mentre per il layout 2 Figura 5.12 (b) le alette sono disposte secondo una serie lineare di tre elementi uno verticale e gli altri due ruotati di 45° e -45° .

Per la determinazione sia delle superfici in gioco che per le successive analisi CFD sono stati creati tre modelli semplificati per caratterizzare le proprietà, sia del modello originale sia dei diversi design ipotizzati, in particolare viene preso un volume di controllo di $100 \times 40 \times 40 \text{ mm}$ sul quale vengono effettuate le misure di confronto. Le rilevazioni delle superfici esterne dei canali si riferiscono alla sola superficie esterna del canale privato o di alettatura o reticolo a seconda del modello indicato; in Tabella 5.3 vengono riportati tali valori.

Modello	Superficie esterna [cm ²]	Superficie interna [cm ²]
Originale	165,000	162,180
Layout 1	214,279	251,920
Layout 2	195,334	202,043

Tabella 5.3-Superfici di scambio termico

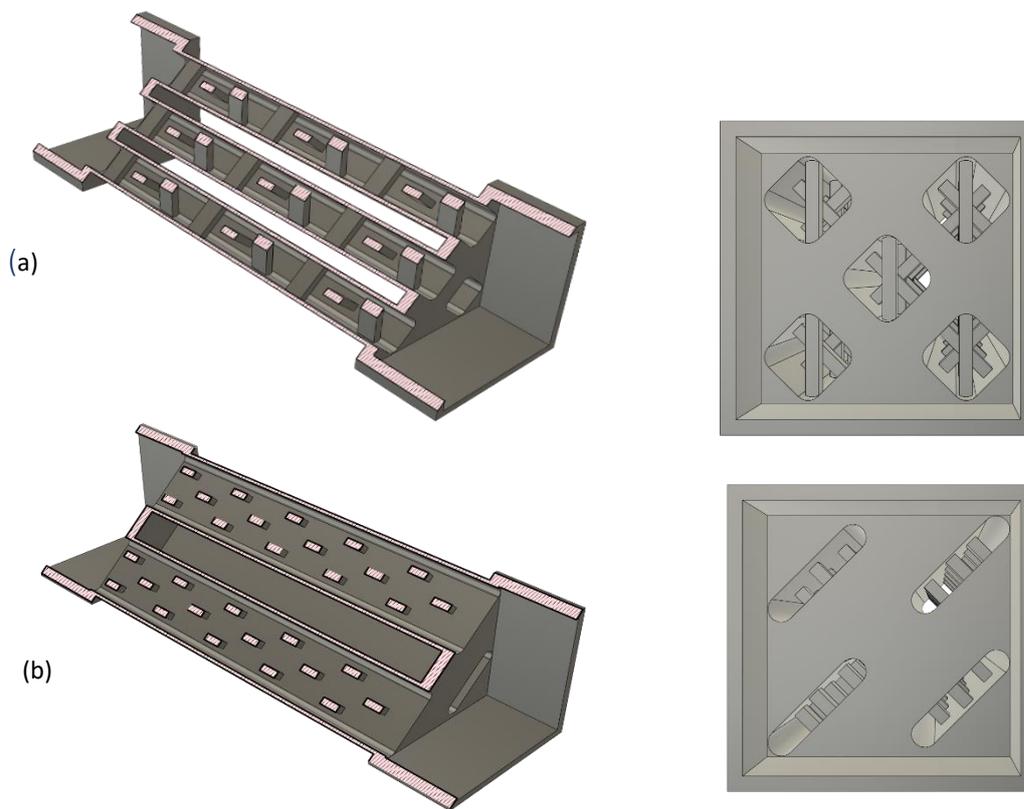


Figura 5.12-Disposizione dell'alettatura interna per i diversi layout

5.3.4 Struttura reticolare

Le strutture reticolari sono da intendersi come dirette concorrenti delle alette in termini di aumento delle superfici di scambio termico lato aria. Data la viscosità dell'aria, che risulta essere bassa rispetto a quelle di altre tipologie di scambiatori, problemi come perdite di carico dovute alla sezione trasversale della cella non vengono prese in considerazione. Inoltre la struttura dovrà essere in grado di scambiare calore sia per conduzione che per convezione forzata e quindi presentare una superficie elevata. Si potrebbe pensare che la soluzione migliore sia l'utilizzo di reticoli basati su celle 2.5D o su celle 3D a superficie (TPMS *triply periodic minimal surface*) descritti nel paragrafo 3.3, ma il loro utilizzo causerebbe alcuni problemi nella fase di costruzione. Infatti l'intersezione della struttura reticolare con il layout di canali descritto in precedenza, generano delle superfici chiuse intrappolando al loro interno polvere che non potrà essere rimossa. Dunque il design della cella e dell'intera struttura reticolare deve essere mirato sia alla massimizzazione delle performance di scambio termico ma soprattutto all'evacuazione della polvere dallo stesso, poiché la presenza di piccoli interstizi cavi renderebbe vana la progettazione e realizzazione del componente.

Il reticolo inoltre non è sottoposto a carichi e o forze esterne tali da utilizzare particolari celle che determinano risposte meccaniche elevate. Per il caso studio sono state prese in considerazione le sole strutture reticolari con celle unitarie di tipo 3D con travature e nodi. Tra le molteplici celle già note in bibliografia e le infinite nuove celle che si possono realizzare, per lo studio di tesi sono state prese in considerazione due celle unitarie descritte di seguito.

5.3.4.1 Definizione della cella e del reticolo

Le due celle unitarie sono state modellate mediante il software parametrico Autodesk Fusion360. Si presentano entrambe inscritte in un cubo di base di 10x10x10 mm ma la sezione delle travature e la loro disposizione sono differenti. Per la cella 1, Figura 5.13 (a) le travature sono a sezione circolare di un diametro di 1mm mentre la cella 2, Figura 5.13 (b) la sezione quadrata con lato 1mm. La regola

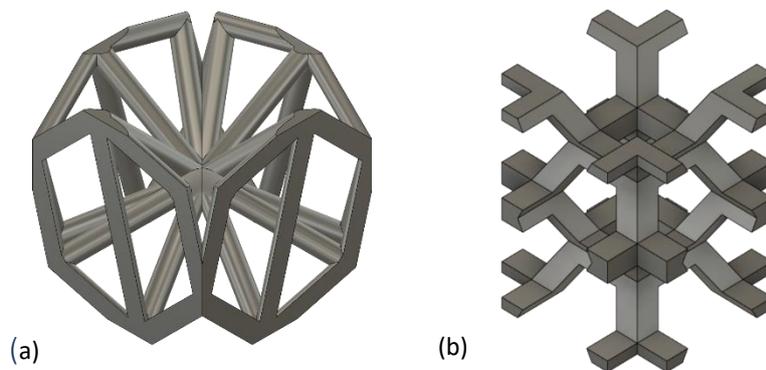


Figura 5.13-Celle: cella 1 (a), cella 2 (b)

di transizione tra una cella e quelle adiacenti è data da una continua specchiatura della cella 1 nelle direzioni x e z mentre per il reticolo 2 la ripetizione è lineare nello spazio.

Al fine di discriminare la cella maggiormente adatta allo studio sono stati realizzati dei reticoli mostrati in Figura 5.14 con le relative caratteristiche in Tabella 5.4 di superficie, volume e densità relativa ρ_r con parametro V_b pari a 1000mm³.

	Superficie [cm ²]	Volume [cm ³]	ρ_r
Reticolo 1	320,286	8,201	0,122
Reticolo 2	269,150	7,407	0,115

Tabella 5.4-Dati generali dei reticoli

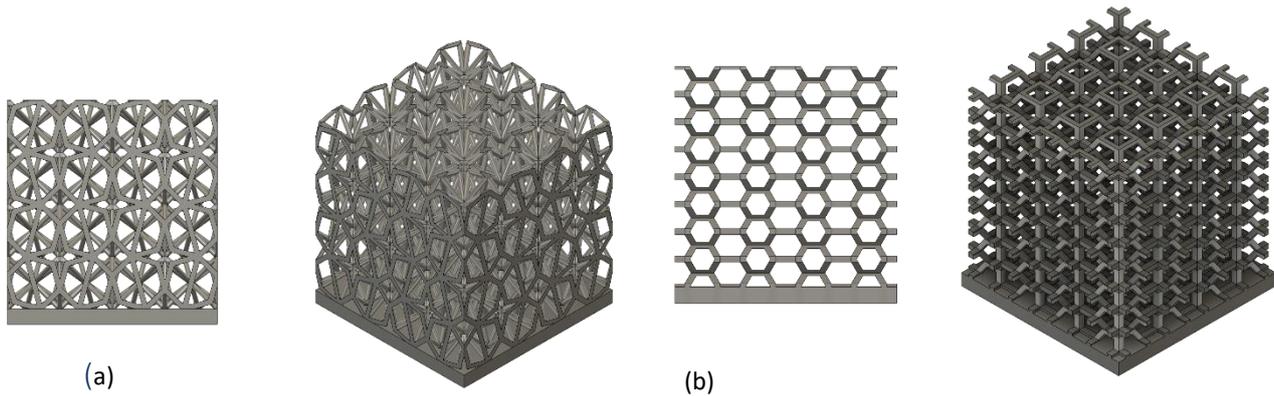


Figura 5.14-Strutture reticolari: Reticolo 1 (a), Reticolo 2(b)

Possiamo subito notare come il reticolo 1 presenta una superficie maggiore e sulla quale ci si aspettano dei trasferimenti di calore maggiori. Al fine di avvalorare tale ipotesi le due strutture sono state sottoposte ad una semplice analisi CFD. È stato impostato un carico termico di temperatura costante nella parte inferiore della piastra pari a 150°C ed una portata massica d'aria di 32 g/s ad una temperatura di 18°C . Dai risultati ottenuti in Figura 5.16 si nota come il reticolo 1 risponda meglio al trasferimento del calore. Come in Figura 5.15 i grafici di dell'andamento della temperatura in funzione di una quota parametrica interna alla travatura del reticolo mostrano come nel reticolo 1 soltanto il primo strato delle reticolo (altezza di 10mm) è attivo nello scambio del calore mentre per il reticolo 2 anche parte del secondo strato è attivo nello scambio. Per questo motivo di seguito il reticolo 2 verrà abbandonato e si procederà con un design del nucleo con la struttura reticola basata sulla cella 1. Inoltre il reticolo 2 si ritiene poco adatto alla realizzazione del nucleo attivo poiché presenta travature orizzontali, anche se di pochi millimetri che potrebbero generare supporti interni nella struttura reticolare ed impossibili da rimuovere a differenza del reticolo 2.

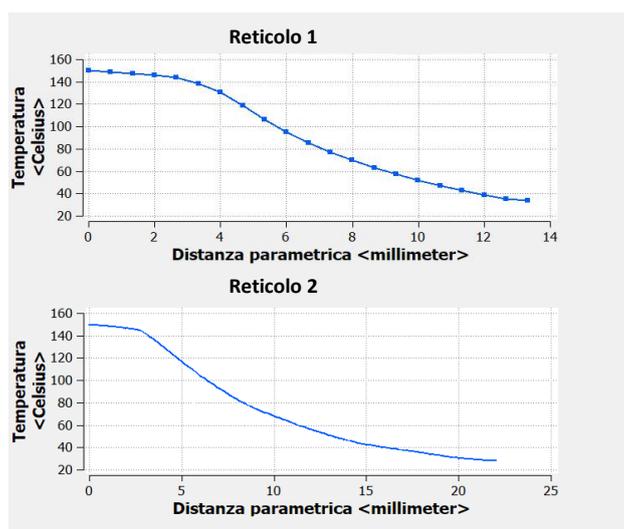


Figura 5.15-Andamento della temperatura nelle strutture reticolari

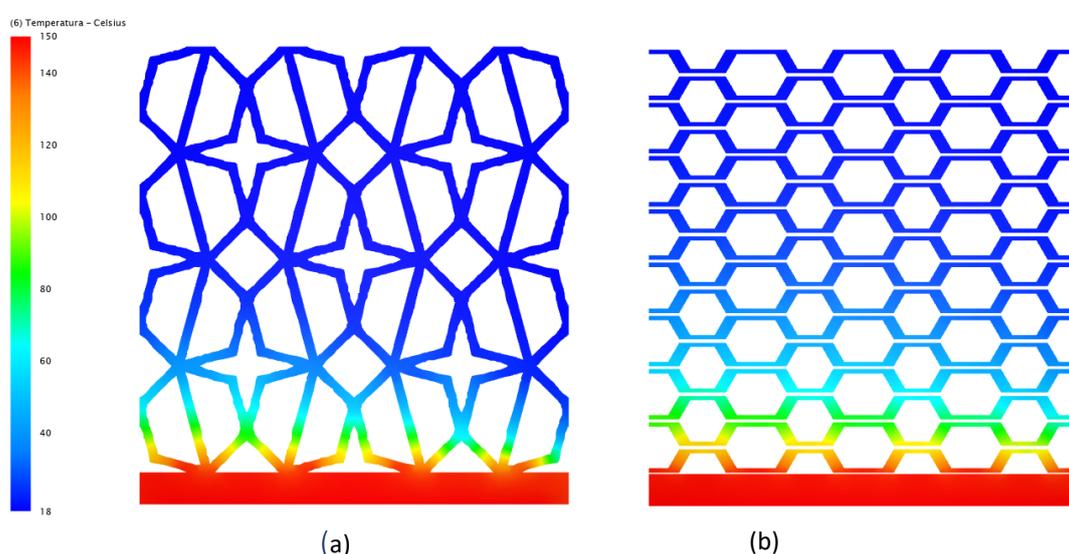


Figura 5.16-Risultati delle analisi CFD sui reticoli: Reticolo 1 (a), Reticolo 2 (b)

5.3.5 Analisi CFD

Avendo determinato quale struttura reticolare applicare e i diversi layout di tubi si è proseguito alla caratterizzazione dei diversi design con modelli semplificati mediante simulazione CFD al fine di valutare in termini di scambio termico sia maggiormente performate. Per tali analisi è stato usato il software di simulazione CFD Autodesk.

Lo studio è svolto su una porzione di pari volume come accennato nel paragrafo 5.3.3.2 sia per il componente originale sia per i design ipotizzati. I modelli semplificati si presentano come in Figura 5.17. Si identificano il componente originale ed i due diversi design dati dal layout e geometria dei percentuale in termini di superficie esterna dato dalle alette e dal reticolo.

Progetto dello scambiatore di calore con struttura reticolare

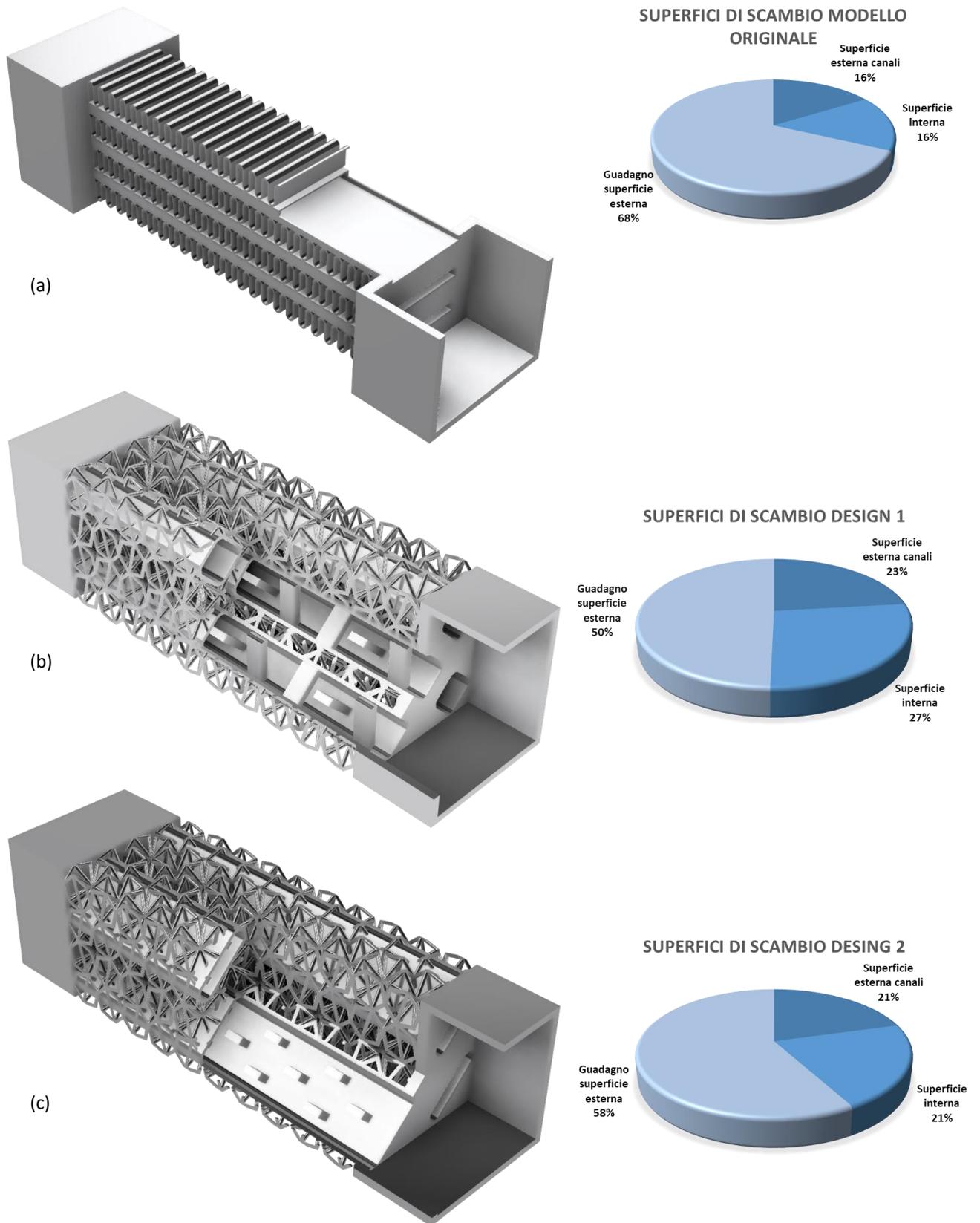


Figura 5.17-Design per le analisi CFD: componente originale (a), Design 1 (b), Design 2 (c)

Tutte le simulazioni si presentano con le medesime condizioni al contorno descritte in

Tabella 5.5.

Aria in	Aria out	Fluido refrigerante in	Fluido refrigerante out
Velocità: 60km/h	Pressione: 1bar	Portata:3.26l	Pressione: 90kPa
Temperatura: 18°C		Temperatura 70°C	

Tabella 5.5-Dati input analisi CFD

Al fine di avere rappresentazioni delle condizioni termiche dei modelli, le mesh di calcolo sono state differenziate nella simulazione. Si presenta maggiormente affinata nel dominio solido della struttura reticolare per definire meglio il suo comportamento ai carichi termici di input.

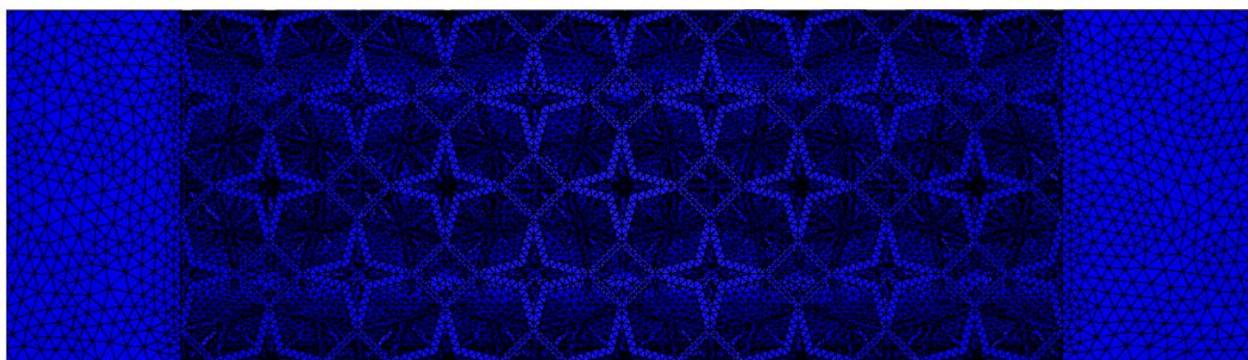


Figura 5.18-Esempio calcolo mesh su modello analisi CFD

I confronti tra le analisi quasi stazionarie eseguite sui modelli sono basati sulla valutazione della temperatura del fluido refrigerante all'uscita mostrata in Tabella 5.6.

	Design originale	Design 1	Design 2
Temperatura	62°C	60°C	61°C

Tabella 5.6-Risultati analisi CFD

Si nota dunque che la riprogettazione del componente originale in chiave additiva porta un miglioramento in termini di scambio termico, abbassando la temperatura del fluido all'uscita, ma tali risultati non giustificherebbero la realizzazione mediante AM con strutture complesse come il reticolo in oggetto di tesi, poiché miglioramenti prestazionali nello scambio termico del modello originale si sarebbero raggiunti con l'ausilio di alette forate. Per questo motivo si è posta una maggiore attenzione all'andamento delle temperature di uscita dei componenti dei due design. Di seguito vengono mostrate in Figura 5.19 delle sezioni dei modelli di studio raffiguranti lo sviluppo della temperatura nei diversi domini solido, fluido e gas.

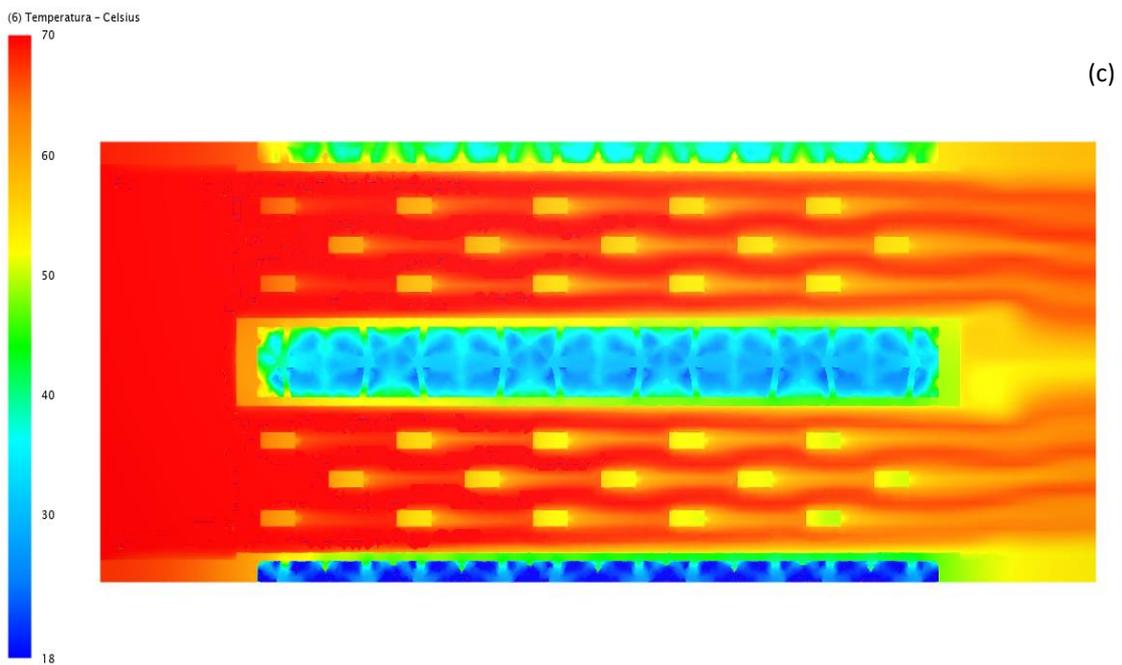
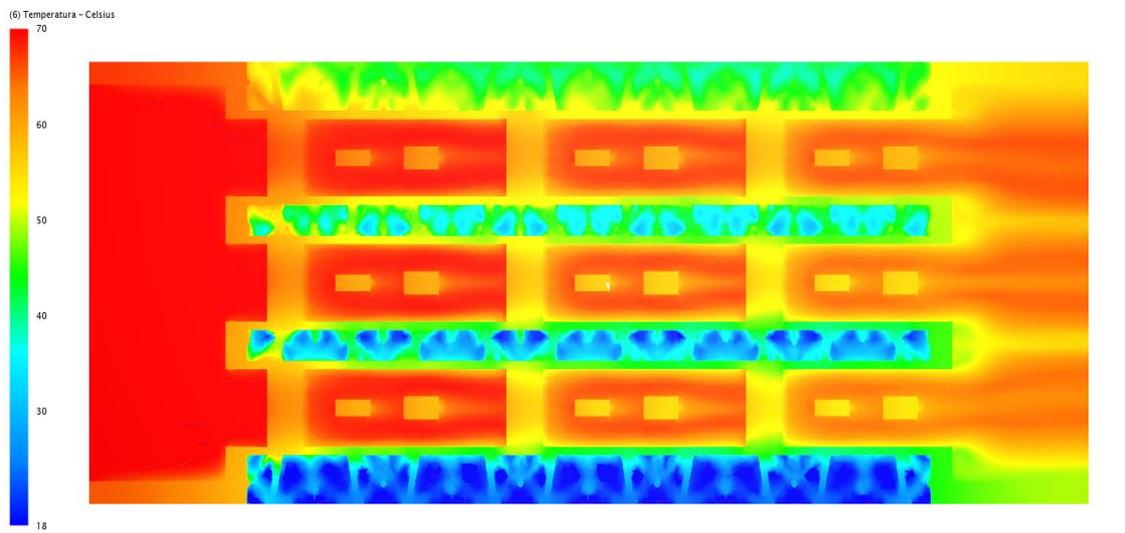
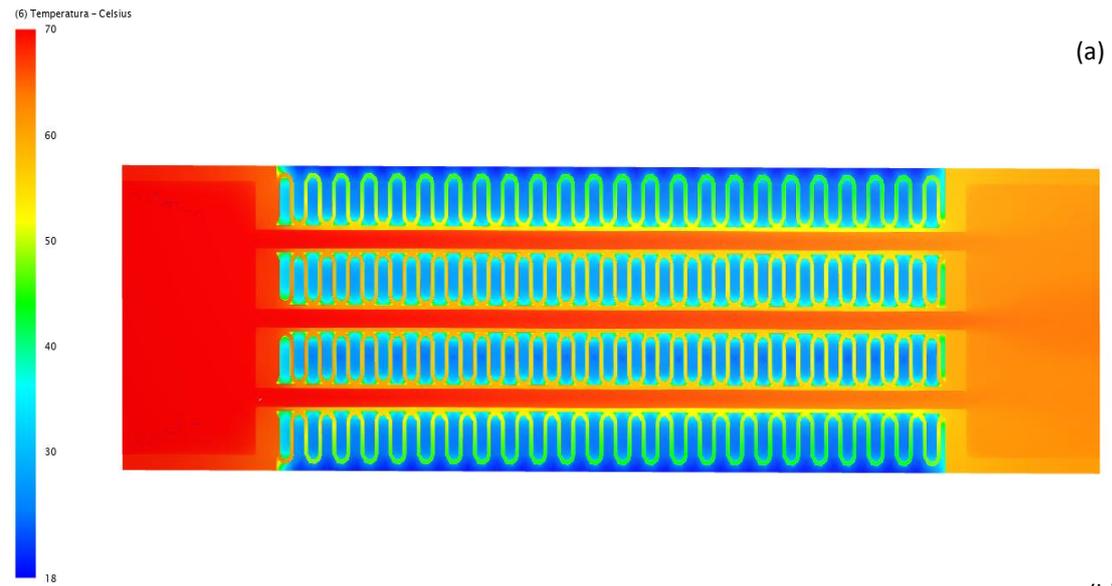


Figura 5.19-Risultati grafici analisi CFD: modello originale (a), Design 1 (b), Design 2 (c)

I due design ipotizzati presentano un andamento della temperatura interna del fluido refrigerante (Figura 5.20), riferita al canale più esterno, diversa. Tale diversità è causata dalla predisposizione al moto turbolento dato dalle alette interne e questo è maggiormente accentuato nel design 2.

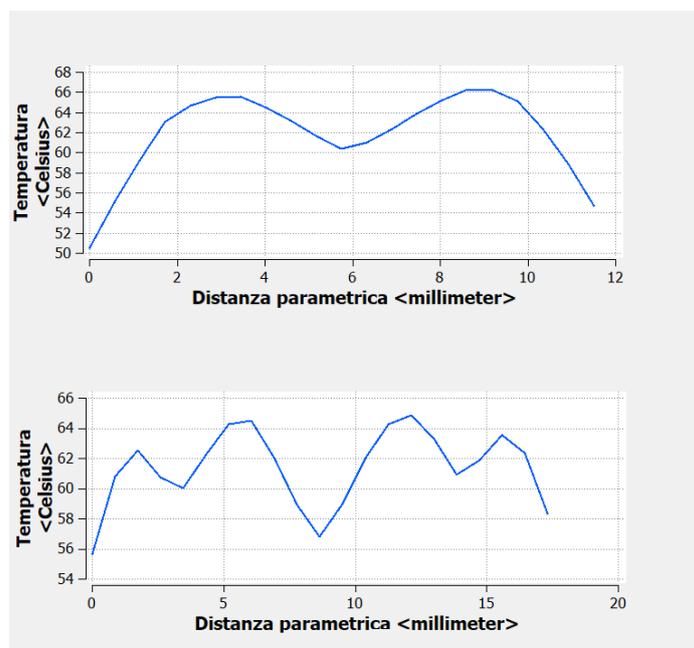


Figura 5.20-Andamento temperatura canale più esterno.

Inoltre possiamo stimare che la temperatura presenti un valore medio inferiore a quello del design 1. Sulla base di questo si è voluto implementare il design 2, che oltre ai vantaggi descritti in precedenza presenta anche una maggiore flessibilità a modifiche. Sulla base dell'ipotesi di aumentare il percorso del fluido e rendere lo stesso tortuoso, il design 2 è stato modificato come segue. La sezione del canale presenta profilo ondulato, delle alette curve sono state inserite per aumentare le deviazioni del flusso ed infine sono state aggiunte delle ulteriori superfici esterne indicate in Figura 5.21

Il modello è stato quindi analizzato con le medesime condizioni al contorno dei precedenti ed i risultati sono più soddisfacenti dei precedenti modelli. Infatti la temperatura del fluido all'uscita è pari a 52°C ovvero una riduzione del 16% della temperatura di riferimento del modello originale. In corrispondenza di ciò dal bilancio dell'energia del fluido otteniamo un aumento del calore scambiato da un valore di 2,95W a 5,46W pari ad una variazione positiva dell'85%.

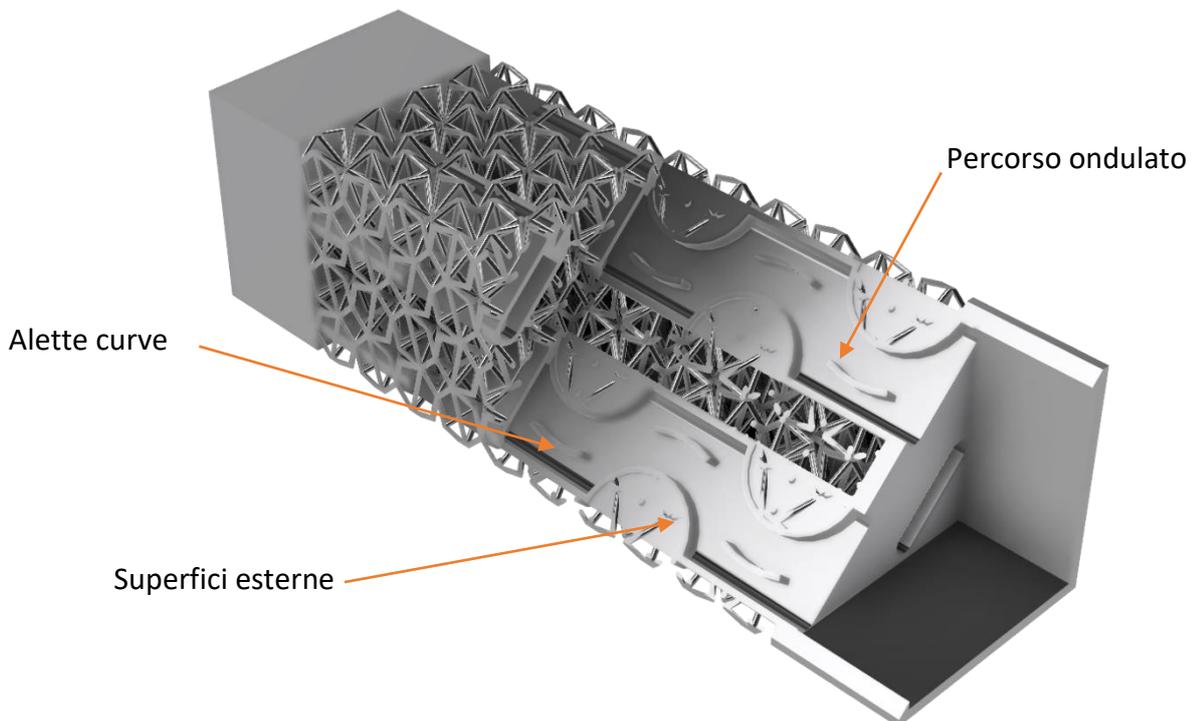


Figura 5.21-Design 3

Pur presentando un superficie di scambio inferiore rispetto al modello originale come si nota in Tabella 5.7, il design in oggetto si presenta più performate.

Modello	Sup. esterna [cm ²]	Sup. interna [cm ²]	Guadagno est. [cm ²]	sup. Tot	sup. di scambio [cm ²]
Originale	165,000	162,180	694,088	1021,268	
Design 3	212,282	154,451	591,948	958,681	

Tabella 5.7-Dati superfici di scambio

Tali risultati sono da imputarsi al profilo stesso del canale che causa improvvisi cambi di direzione del flusso in modo da aumentare localmente i gradienti di velocità e anche di temperatura come mostrato in Figura 5.23 ed in Figura 5.22. Questo si traduce in un miglioramento locale del coefficiente di trasferimento termico promuovendo una turbolenza fluida ed una rottura dello strato limite della resistenza termica in corrispondenza dei punti di flessione del fluido.

Tali risultati si propagano in positivo su tutto il sistema di raffreddamento garantendo un adeguamento della temperatura dei materiali di cui è composto il motore al di sotto delle prescrizioni stabilite.

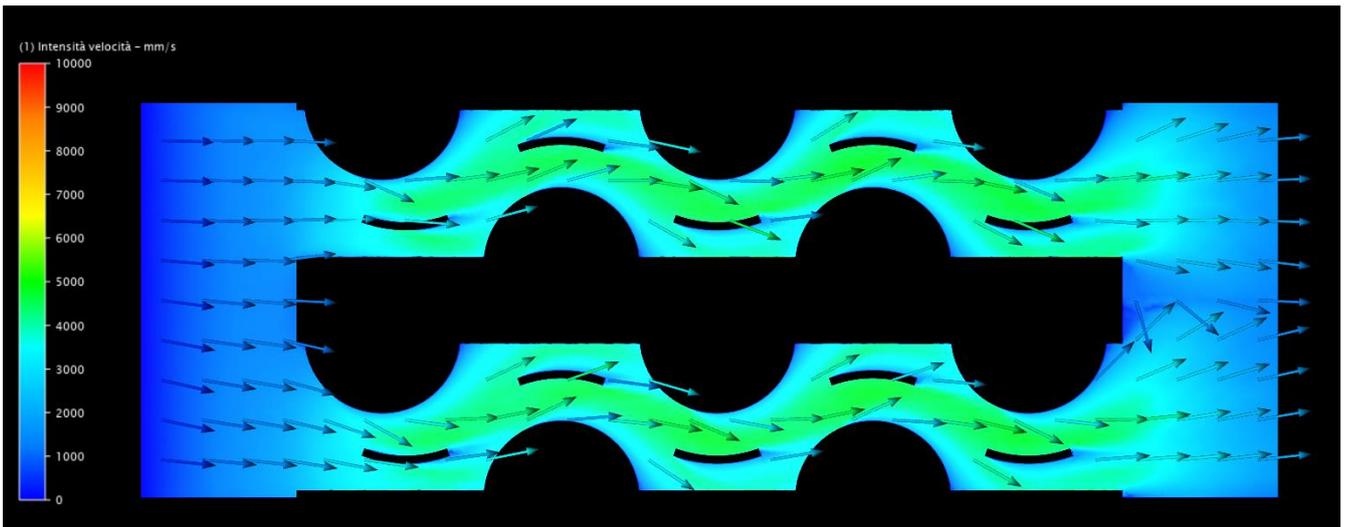


Figura 5.23--Andamento della velocità del fluido refrigerante interno al canale del Design 3

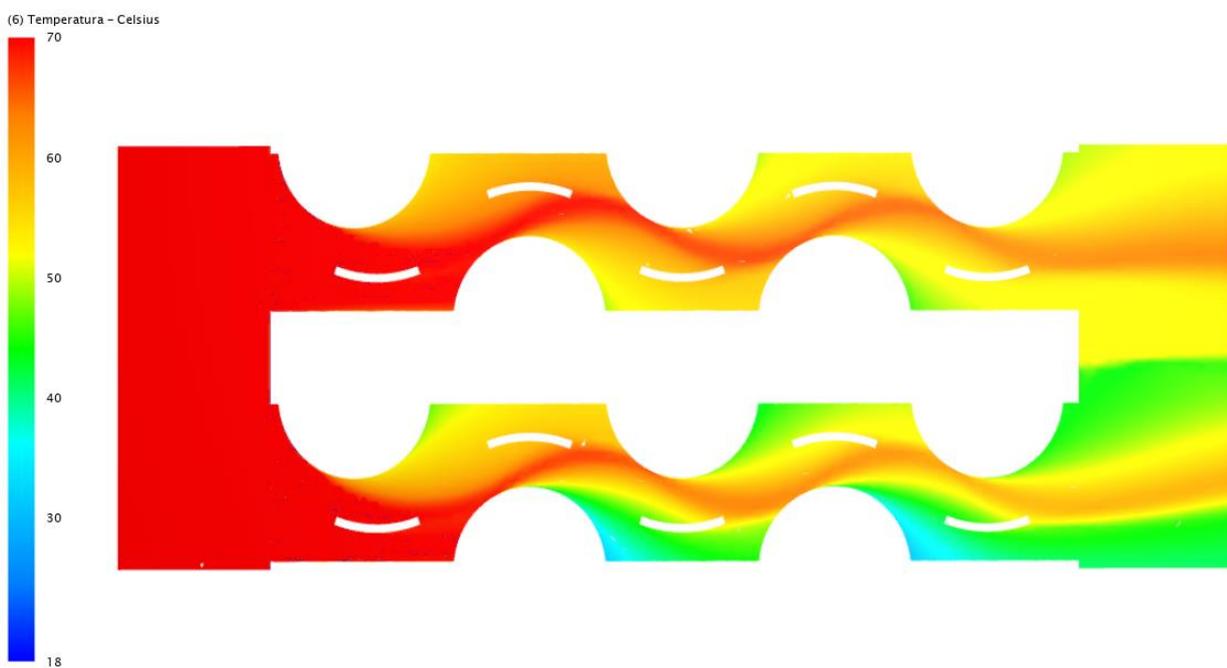


Figura 5.22--Andamento della temperatura del fluido refrigerante interno al canale del Design 3

Si evidenzia quindi come un attenta analisi del nucleo dello scambiatore riprogettato in chiave AM risulta fruttuosa in termini di scambio termico ed anche di rigidità del nucleo grazie alla struttura reticola che lo circonda.

6 Design finale dello scambiatore di calore

Con i dati dei precedenti paragrafi è stato realizzato il componente completo per la sua realizzazione mediante SLM. Il reticolo così com'è stato definito nel paragrafo 5.3.4 è costituito da una ripetizione lineare della cella con opportune regole di transizione tra una cella e quella adiacente, il profilo curvo del componente originale rompe la linearità del reticolo dividendo determinate celle. Tale divisione crea delle travature sospese, come mostrato in Figura 6.2, che non possono essere realizzate senza la presenza di supporti, quindi si potrebbe optare per una rimozione manuale delle stesse, ma riducendo, anche se per poco, l'area di scambio ed avendo degli inestetismi. Per questo motivo si è optato per il problema con l'inserimento di pareti di separazione indicate in figura che unite al reticolo hanno un beneficio in termini di superficie di scambio effettiva.

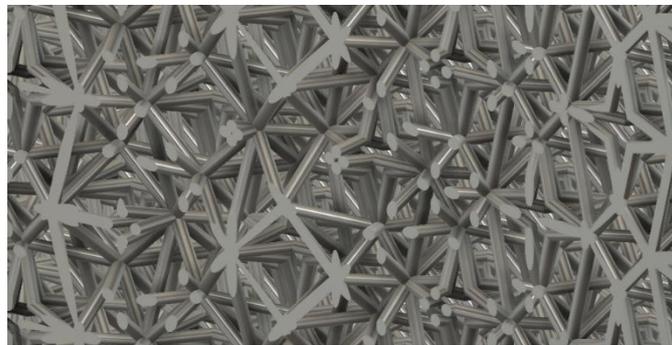


Figura 6.2-Esempio di travature sospese

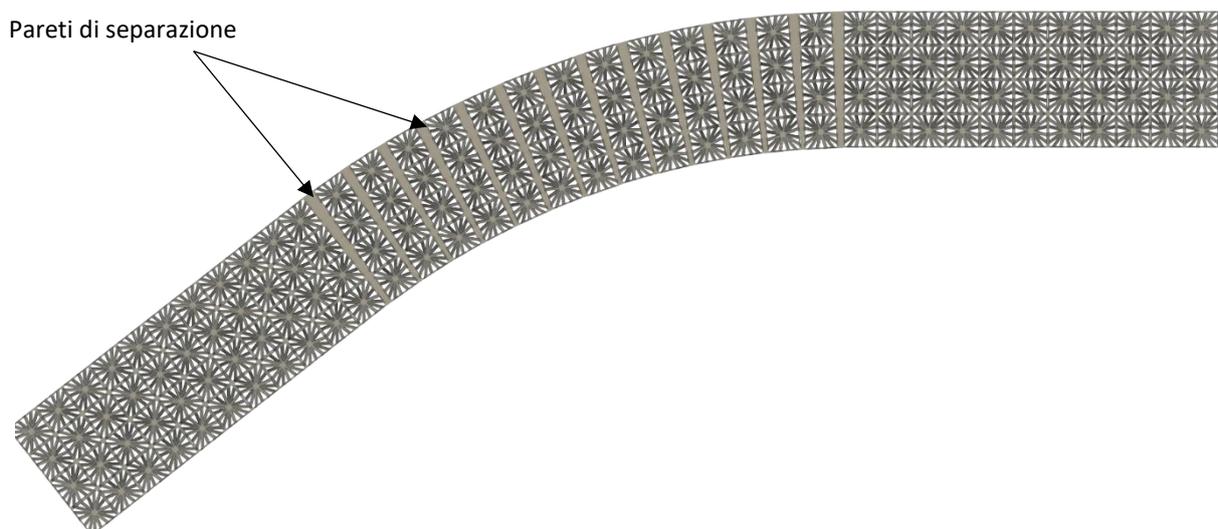


Figura 6.1-Struttura reticolare finale

I canali con il loro specifico profilo (Figura 6.3) sono stati quindi immersi nel reticolo definendo il nucleo centrale di scambio di calore; inoltre nello stesso sono stati inseriti i relativi ancoraggi

modellati con superfici *free-form*. Infine anche le due vasche collettrici del fluido refrigerante sono state rimodellate e svincolate dalle classiche forme geometriche delle tecnologie tradizionali che insieme al nucleo rendo in termini estetici il design più che soddisfacente.

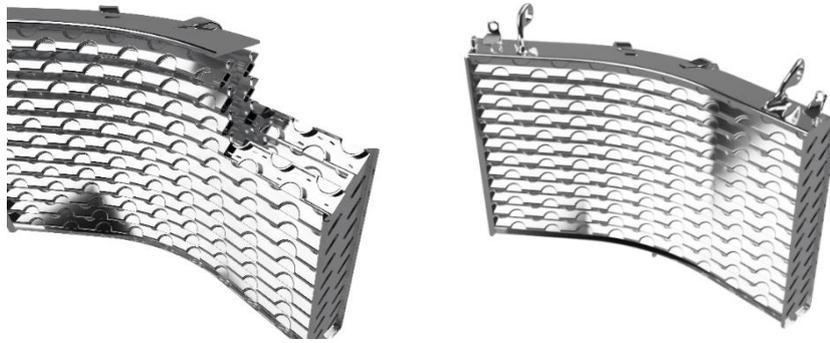


Figura 6.3-Profilo canali lungo il nucleo



Figura 6.4-Design finale dello scambiatore di calore

6.1 Sviluppi futuri

Con riferimento al precedente paragrafo 2.2, la possibilità di realizzare componenti con geometrie complesse e in materiale definitivo, anche se con una produttività inferiore rispetto al processo EBM ma con uno superiore avanzamento tecnologico, rendono il processo di fusione laser maggiormente consolidato all'intero delle tecniche di AM a letto di polvere metallico.

Sul mercato sono presenti diversi fornitori di macchinari SLM, ognuno con il proprio sistema di gestione e configurazione della macchina. Tra i principali troviamo 3D System, Concept Laser, EOS, Realizer, Renishaw ed SLM Solution.

I grandi vantaggi di questo processo sono stati per tempo limitati in termini di dimensioni dei componenti realizzabili dalla presenza di macchine con volumi di lavoro relativamente piccoli. Ciò comportava di non sfruttare a pieno il modo di "*progettare e pensare AM*" per la realizzazione di componenti di ampie dimensioni.

La presenza di piccoli volumi era associata alla difficoltà del corretto posizionamento della piastra di costruzione, con precisione micrometrica, per via del peso specifico crescente con la costruzione, ma soprattutto per le tensioni sviluppate durante la lavorazione. Quest'ultimo problema è stato superato grazie alla contemporanea azione di due o più laser che lavorano sulle zone da scansione simultaneamente, ed insieme al progresso tecnologico i volumi ad oggi sono largamente aumentati. Rimangono comunque ad ogni modo delle restrizioni riguardo alle dimensioni dei file che i macchinari riescono a gestire, poiché modelli complessi e cospicuamente composti da molteplici superfici presentano un elevato peso in termini di megabyte di file.

Per capire meglio una volta determinato il modello CAD di un qualsiasi componente progettato e pensato per l'AM, lo stesso deve essere convertito in un formato file leggibile dai software di pre-elaborazione del processo additivo, tale file è denominato STL. il quale rappresenta una approssimazione delle superfici del modello solido CAD originale mediante una tassellazione o mesh triangolare chiusa. Nessun'altra informazione, come i livelli di costruzione e storia del progetto vengono memorizzati nella conversione. Il formato STL si presenta quindi come una lista di sfaccettature triangolari ognuna identificata da 12 numeri, 3 per ogni vertice del triangolo ed altri 3 per il vettore normale unitario che definisce l'interno o esterno della superficie del solido.

I vari parametri che influiscono nella conversione determinano la conformità della rappresentazione triangolare a quella CAD. Una mesh molto fine, ovvero con un numero elevato di triangoli, e con un'ottima approssimazione delle superfici della parte effettiva, genera un file molto fedele in termini di geometria ma la sua dimensione in termini di file è maggiorata. Oltretutto l'utilizzo di

triangoli prossimi alle dimensioni dei layer utilizzati dalla macchina SLM realizzerà la parte con maggiore fedeltà, ma l'utilizzo di dimensioni inferiori non aumenta la risoluzione del componente realizzato (Calignano, et al., 2017).

Pertanto si capisce come la complessità geometrica di un solido CAD sia una restrizione non solo per le dimensioni del file STL che possono risultare eccessivamente smisurate, ma anche per il successivo slicing effettuato da un algoritmo del software di pre-elaborazione discusso nel paragrafo 2.1.3.2. Poiché ogni sezione del modello STL è definita da un piano di taglio XY, in cui i triangoli vengono intersecati dallo stesso, il risultato è un profilo 2D che lo stesso software interpreterà per il corretto percorso sostenuto dal raggio laser secondo le impostazioni della macchina. Tale software è molto influenzato dalla finitura della mesh del modello CAD e quindi dalla densità di triangoli del file STL, a tal punto da generare errori del sistema per il percorso del laser.

Risulta quindi evidente come determinati file CAD che presentano una elevata complessità geometrica, come ad esempio le strutture reticolari, possono generare un processo ingestibile con problemi nella fase di pre-elaborazione del file.

Poiché l'obiettivo della riprogettazione dello scambiatore di calore oggetto di tesi, oltre al miglioramento delle performance, è quello della sua realizzazione in un numero di componenti inferiore rispetto al modello originale, il modello del nucleo realizzato per come è stato descritto nel paragrafo precedente presenta un elevato numero di superfici, il quale convertito in STL, genera un elevato numero di triangoli ed anche di megabyte di file. Tale condizione operativa, come detto in precedenza, risulta molto onerosa e richiederà molto tempo per l'elaborazione da parte del software. Per ovviare a questo, dunque, sarebbe ideale procedere alla divisione del nucleo in parti distinte, senza intaccare la continuità del reticolo o dei canali, a titolo di esempio si riporta in Figura 6.5 una possibile rappresentazione.

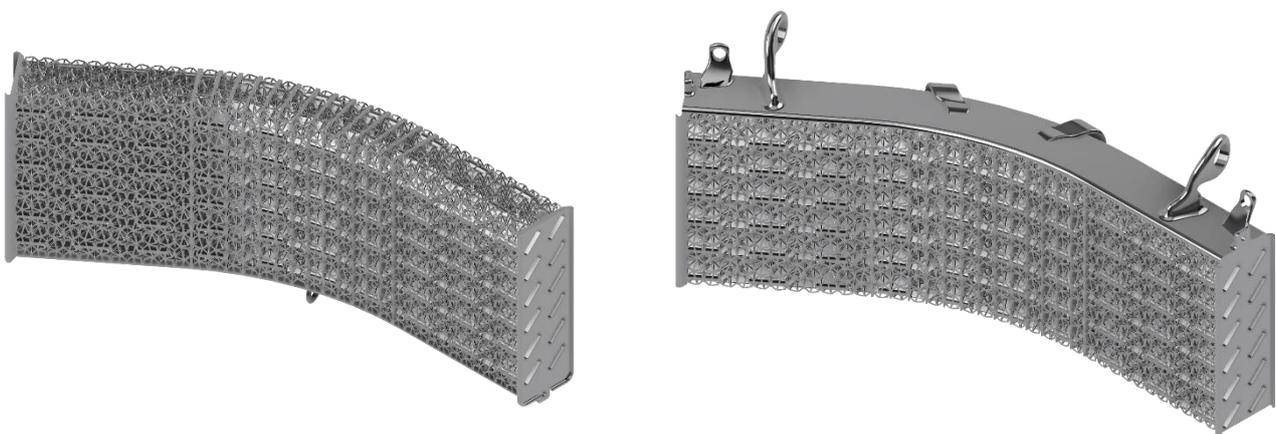


Figura 6.5-Design diviso del nucleo

Con tale configurazione e le altre che possono essere effettuate, è possibile una migliore gestione dei file in macchina ed infine, poiché l'altezza del job è inferiore a quella che si avrebbe con il nucleo non diviso, il numero dei layer necessari per la realizzazione sarà inferiore con un impatto positivo sia in termini di ore di lavoro che di costi di produzione.

Con la suddivisione del nucleo esposta in precedenza i macchinari per la realizzazione sono quelli presi in considerazione nel paragrafo 5.3.1, i quali si presentano come tra i più ampi in termini di volume di lavoro ed entrambi come possibili soluzioni per la realizzazione. La scelta si deve basare su quale dei due abbia un impatto migliore sulla produzione in termini di costo della materia prima, costo della lavorazione e tempo impiegato per la realizzazione.

Prendendo ad esempio il macchinario M400-4 è opportuno dividere la lavorazione dello scambiatore in due parti, distinte per i problemi accennati in precedenza nella gestione dei file, realizzando una delle parti del nucleo insieme alle vasche collettrici in una lavorazione e la restante parte in un'altra lavorazione.

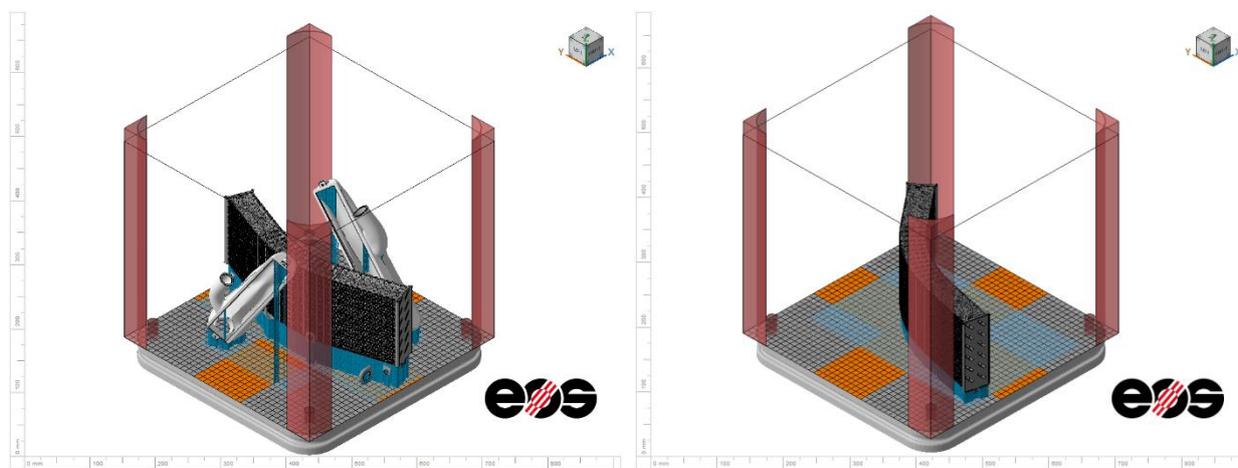


Figura 6.6-Disposizione sulla piattaforma di costruzione

Conclusioni

I dispositivi di trasferimento del calore efficaci richiedono elevati valori di superfici di scambio effettive per massimizzare l'interazione tra i fluidi di lavoro. Nonostante le attuali capacità dei CHEs, la realizzazione di ulteriori miglioramenti per la gestione termica di nuova generazione richiede percorsi fluidi molto complessi.

Dalle analisi effettuate nel lavoro di tesi si evince come il flusso di progettazione e pensiero rivolto alla rielaborazione di componenti per un processo additivo, sia vantaggioso in termini di performance acquisite e design. L'analisi preliminare del componente e la conoscenza delle dirette conseguenze e metodiche di progettazione additiva come il DfAM e l'interazione delle molteplici variabili che entrano in gioco nel processo, sono la base per una corretta progettazione.

Si vuole evincere come la produzione additiva consente prontamente di svincolare la progettazione dalle limitazioni dei processi di produzione sottrattivi, generando nuove tipologie di tubi, percorsi fluidi e superfici secondarie e o terziarie con un grado di complessità superiore.

La produzione additiva, permette un passaggio quasi "istantaneo" tra un modello digitale e la sua controparte fisica. AM fa parte del concetto sempre e maggiormente istaurato nell'industria di "produzione digitalizzata", che a sua volta è inquadrato nella così detta "Industria 4.0". La digitalizzazione di processi concede una notevole flessibilità, consentendo la fabbricazione di geometrie complesse, customizzate ma anche ottimizzate per specifiche funzioni con tempi di immissione sul mercato sostanzialmente ridotti a confronto con le tecnologie sottrattive.

Inoltre AM risponde molto bene al concetto di "produzione su richiesta", in cui le merci vengono prodotte come, quando e dove richiesto. A differenza di una produzione convenzionale, in cui si usufruisce di una produzione distribuita dove vigono complesse catene di approvvigionamento e di intermediari, la produzione additiva ha impatti significativi su tale catena. Riducendo la necessità della gestione della catena di approvvigionamento, questa tecnologia ha il potenziale per avvicinare i produttori ai consumatori, riducendo costi e collegamenti.

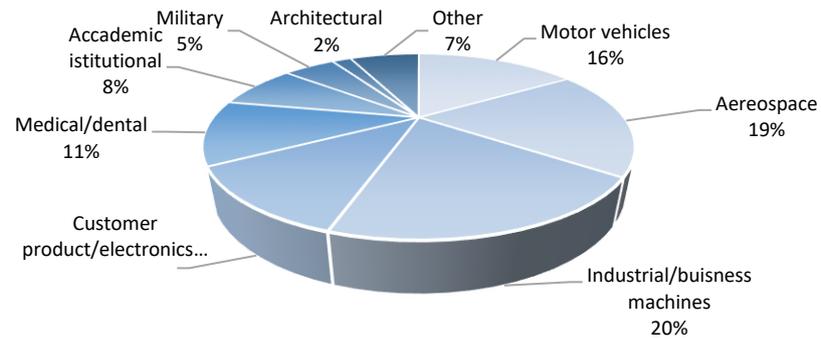


Figura 7 - Industria AM (Olaf Diegel, 2019)

AM è un settore fortemente in crescita ed in fase di espansione ed allo stato attuale si presenta in molteplici settori come indicato in Figura 7. Il miglioramento dei macchinari e dei software di gestione genereranno in futuro un aumento d'investimenti da parte delle aziende manifatturiere per essere maggiormente competitive nel mercato.

Bibliografia

(s.d.). Tratto da www.crucible.design.co.uk.

(s.d.). Tratto da www.3dhubs.com.

(s.d.). Tratto da www.3dprinting.com.

(s.d.). Tratto da www.ge.com.

Calignano, F., Lorusso, M., Pakkanen, J., Trevisan, F., Ambrosio, E. P., Manfredi, D., & Fino, P. (2017). Investigation of accuracy and dimensional limits of part produced in aluminum alloy by selective laser melting. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 451-458.

Ferrari, G. (s.d.). *Motori a combustione interna*. Torino: Il Capitello.

Fino, P. (2018). Dispense universitarie Materiali per la Fabbricazione Additiva.

Gibson, I., Rosen, D. W., & Stucker, B. (2010). *Additive Manufacturing Technologies: Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing*. New York: Springer US.

Gibson, L. J., & Ashby, M. F. (1999). *Cellular Solids: Structure and Properties*. Cambridge: Cambridge University Press.

Harrysson, O. L., Cansizoglu, O., Marcellin-Little, D. J., Cormier, D. R., & West, H. A. (2008). Direct metal fabrication of titanium implants with tailored materials and mechanical properties using electron beam melting technology. *Materials Science and Engineering: C*, 366-373.

Ho, J., Leong, K., & Wong, T. (April 2020). Additively-manufactured metallic porous lattice heat exchangers for air-side heat transfer enhancement. *International Journal of Heat and Mass Transfer*.

Iuliano, L. (2018). Dispense universitarie Tecniche per la Fabbricazione Additiva.

Kempen, K., Thijs, L., Humbeeck, J. V., & Kruth, J.-P. (2012). Mechanical Properties of AlSi10Mg Produced by Selective Laser Melting. *Physics Procedia, Volume 39*, 439-446.

Li, W., Li, S., Liu, J., Zhang, A., Zhou, Y., Wei, Q., . . . Shi, Y. (2016). Effect of heat treatment on AlSi10Mg alloy fabricated by selective laser melting: Microstructure evolution, mechanical properties and fracture mechanism. *Materials Science and Engineering: A, Volume 663*, 116-125.

Lutter-Günther, M., Bröker, M., Mayer, T., Lizak, S., Seidel, C., & Reinhart, G. (2018). Spatter formation during laser beam melting of AlSi10Mg and effects on powder quality. *Procedia CIRP, Volume 74*, 33-38.

- Olaf Diegel, A. N. (2019). *A Practical Guide to Design for Additive Manufacturing*. Singapore: Springer.
- Ranganayakulu, C., & Seetharamu, K. N. (2018). *Compact Heat Exchangers: Analysis, Design and Optimization using FEM and CFD Approach*. New York: Wiley-ASME Press Series.
- Shah, R. K. (1981). Classification of heat exchangers, in *Heat Exchangers: Thermal-Hydraulic Fundamentals*. Washington: Hemisphere.
- Son, K. N., Weibel, J. A., Kumaresan, V., & Garimella, S. V. (December 2017, December). Design of multifunctional lattice-frame materials for compact heat exchangers. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 619-629.
- Thulukkanam, K. (2013). *Heat Exchanger Design Handbook, Second Edition*. New York: CRC Press.
- Trevisan, F., Calignano, F., Lorusso, M., Pakkanen, J., Aversa, A., Ambrosio, E. P., . . . Manfredi, D. (2017). On the selective laser melting (SLM) of the AlSi10Mg alloy: Process, microstructure, and mechanical properties. *Materials*.
- Webb, R. (1978). Enhancement of Single-phase Heat Transfer. In S. Kakac, R. Shah, & A. Bergles. New York: Wiley.
- Yang, L., Hsu, K., Baughman, B., Godfrey, D., Medina, F., Menon, M., & Wiener, S. (2017). *Additive Manufacturing of Metals: The Technology, Materials, Design and Production*. Birmingham, UK: Springer.