



UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI PADOVA

UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PADOVA

**Dipartimento di Ingegneria Industriale DII**

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria dei Materiali

**PROGETTAZIONE E SVILUPPO DI DISSIPATORI DI CALORE MEDIANTE  
TECNOLOGIA DI "ADDITIVE MANUFACTURING"**

Relatore

Paolo Francesco Bariani

Laureando

Montecchio Filippo, 1150711

Anno Accademico 2017/2018



# Riassunto

Il progetto che verrà presentato in questa tesi è focalizzato sullo sviluppo di un metodo sperimentale per la produzione di dissipatori di calore utilizzando il processo di fabbricazione additiva di Selective Laser Melting (SLM). L'obiettivo è quello di definire una condizione di processo ottimizzata per applicazioni di thermal management che possa essere generalizzabile, ovvero che ne garantisca la riproducibilità al variare delle richieste del cliente. Il lavoro si è sviluppato lungo due linee principali, la cui convergenza ha permesso di realizzare prototipi funzionali: da una parte le regole di progettazione che devono essere seguite per la corretta realizzazione di un manufatto con la tecnologia additiva, dall'altra parte l'insieme dei processi, dei trattamenti e delle accortezze da utilizzare per il raggiungimento di performance termiche elevate.

I test sperimentali svolti e i risultati ottenuti hanno dimostrato la fattibilità dell'utilizzo del processo SLM per la produzione di dissipatori di calore customizzati e sono stati fabbricati i primi prototipi funzionali.



## Sommario

Riassunto .....	3
Introduzione .....	7
1. Caratterizzazione tecnologica.....	8
1.1 Processo EBM (electron beam melting) .....	8
1.2 Processo di deposizione diretta (DLD).....	10
1.3 Processo SLM (selective laser melting) .....	11
1.4 Fdm – Fused deposition metal .....	17
2. Parametri di processo.....	19
2.1. Parametri relativi all'utilizzo del laser .....	19
2.1.1 Potenza del laser ( $P$ ) .....	19
2.1.2 Dimensioni dello spot.....	20
2.2 Parametri di scansione .....	20
2.2.1 Velocità di scansione ( $v$ ).....	20
2.2.2 Distanza tra le tracce ( $t$ ) .....	21
2.2.3 Spessore di strato ( $h$ ) .....	22
2.2.4 Strategia di scansione.....	22
2.3 Parametri legati alla fisica del processo .....	24
2.3.1 Supporti .....	24
2.3.2 Preriscaldamento .....	26
3. Materiale .....	27
3.1 Caratteristiche Alluminio .....	27
3.2 Effetto elementi alliganti .....	29
3.2.1 Principali alliganti .....	29
3.3 Leghe di Alluminio.....	30
3.4 Lega AlSi10Mg .....	33
4. Obiettivi e motivazioni del progetto .....	36
4.1 Descrizione del contesto .....	36
4.1.1 Dissipatori di calore ad aria.....	38
4.1.2 Dissipatori di calore a liquido .....	40
5. Progettazione del prodotto .....	42
5.1 Design for additive manufacturing.....	42

5.2 Disegno CAD .....	45
5.3 Simulazione fluidodinamica.....	48
6. Caratterizzazione del prodotto.....	56
6.1 Anodizzazione lega AlSi10Mg.....	56
6.2 Test di corrosione .....	59
6.3 Analisi porosità.....	67
6.4 microstruttura e trattamenti termici per incrementare la conducibilità termica.....	71
6.5 Test termici.....	76
7. Industrializzazione dei prodotti SLM .....	79
7.1 Polveri per SLM.....	79
7.1.2 Riciclo delle polveri .....	82
7.2. Costi .....	84
7.2.1 Esempio: analisi dei costi di un dissipatore di calore.....	85
Conclusioni .....	89
Sviluppi futuri .....	91
Riferimenti bibliografici.....	92

# Introduzione

Alla fine degli anni '80 è nata una nuova classe di tecnologie, chiamate additive, che si basano sul principio per cui un componente, dalla geometria più o meno complessa, possa essere fabbricato per deposizione successiva di strati di materiale, ciascuno di una forma tale da comporre, alla fine, l'oggetto desiderato. Queste tecnologie, inizialmente diffuse solo per materiali polimerici, sono rimaste poco utilizzate per un paio di decenni e le uniche vere applicazioni erano legate alla realizzazione di prototipi dimostrativi di supporto alla progettazione. Lo sviluppo delle macchine, la nascita di nuove materie prime e lo spirito visionario di alcune aziende ed enti di ricerca ha reso possibile negli ultimi anni una forte e veloce espansione di questi processi. La notorietà e le prospettive di queste tecnologie sono diventate talmente di interesse che sono state inserite tra i punti chiave della ormai famosa quarta rivoluzione industriale. Essa prende il nome di "Industria 4.0" e si propone di cambiare radicalmente, tra le altre cose, i metodi di produzione e modelli di business attualmente utilizzati nei paesi industrializzati. Un aspetto chiave per rendere reali le aspettative di Industria 4.0 è quello di sfruttare i vantaggi delle tecnologie additive per la fabbricazione di piccoli lotti di prodotti personalizzati, complessi, leggeri; costruire meno prototipi, con un minor numero di stampi e meno post-elaborazione. In questo contesto, Priatherm, un'azienda del Ferrarese nota per la progettazione e produzione di dissipatori di calore personalizzati, ha promosso il lavoro svolto per questa tesi che si propone di verificare l'idoneità del processo di Selective laser melting nell'industria del thermal management. Si vuole quindi dimostrare che è possibile realizzare mediante SLM dissipatori di calore personalizzabili che rispettino le specifiche tecniche ottenute con i processi tradizionali, ma con la flessibilità tipica delle tecnologie additive.

A supporto di tutta l'attività sperimentale che è stata svolta, i primi 2 capitoli di questa tesi riguardano, rispettivamente, le generalità inerenti ai processi additivi (Capitolo primo) e i parametri di processo che caratterizzano la tecnologia (Capitolo secondo). Il terzo capitolo focalizza l'attenzione sul materiale utilizzato nel mondo dello scambio termico per poi collegarsi alle leghe attualmente caratterizzate per il processo SLM, chiarendo quale tra queste sia compatibile con lo scopo della tesi. A seguito di questa sezione teorica il Capitolo quarto descrive nei dettagli il contesto all'interno del quale si è sviluppato lo studio e ne descrive gli obiettivi.

Il quinto capitolo rappresenta una sorta di linea guida per poter progettare un dissipatore/scambiatore di calore con le tecnologie additive e fornendo, inoltre, gli strumenti software necessari.

La sezione sperimentale mostra le caratterizzazioni che sono state fatte sui prodotti in AlSi10Mg realizzati mediante SLM (Capitolo sesto) per il quale sono stati affrontati diversi temi, tra cui: (a) anodizzazione, (b) resistenza a corrosione, (c) porosità, (d) microstruttura e trattamenti termici per incrementare la conducibilità termica.

A conclusione del lavoro, il Capitolo settimo delinea alcuni degli aspetti importanti per l'industrializzazione di prodotti fabbricati per SLM.

# Capitolo primo

## 1. Caratterizzazione tecnologica

L'obiettivo è quello di indagare tutte le tecnologie di stampa 3D di metallo e capire quali si prestino meglio alla produzione industriale di dissipatori di calore. La tecnologia dell'additive manufacturing nasce dall'esigenza sempre più comune di realizzare parti in metallo di forme complesse. Sono tutte tecnologie near net shape, consentono cioè la realizzazione di un componente di geometria molto vicina a quella finale. Per la classificazione delle varie tecnologie prenderemo in considerazione solamente quelle che non utilizzano materiale plastico come ausilio in quanto, nel caso di dissipatore a liquido, un'eventuale contaminazione organica potrebbe comprometterne l'utilizzo finale. Le tecnologie più promettenti in tema additive manufacturing sono quelle a fusione su letto di polvere. Producono un componente solido usando una fonte termica che induca fusione di polveri metalliche disposte su una piattaforma strato dopo strato.

### 1.1. Processo EBM (electron beam melting)

EBM utilizza un raggio di elettroni ad alta energia anziché un laser per indurre la fusione delle particelle di polvere. Il fascio di elettroni viene indirizzato in una specifica sezione di polvere metallica producendo minori stress residui, minori distorsioni e quindi minor richiesta di strutture di supporto. EBM utilizza meno energia e può produrre strati ad un grado di avanzamento maggiore rispetto alle tecnologie di SLM, ma le dimensioni delle particelle di polvere, lo spessore dei vari strati e la finitura superficiale sono tipicamente inferiori. EBM richiede inoltre che le parti vengano prodotte sotto vuoto e il processo può essere condotto solo su materiale conduttivo.

È importante considerare che, prima di essere fuse, le polveri vengono scaldate per creare una sorta di pre-sinterizzazione in modo da evitare che vengano disperse una volta impattate dal fascio di elettroni. In questo modo, queste particelle pre-sinterizzate presentano una conducibilità elettrica e termica maggiore rispetto alle particelle disperse e ciò permette l'utilizzo di una energia incidente maggiore. Allo stesso tempo questa metodologia consente di avere distorsioni termiche inferiori rispetto alla tecnologia laser beam melting. Uno svantaggio del pre-sintering è la minor complessità di eventuali canali interni in quanto eventuali polveri non fuse non fuoriescono per gravità (come nel SLS essendo molto fine) ma devono essere rimosse meccanicamente poiché inglobate insieme ad altre polveri. La maggior peculiarità di questa tecnologia è la necessità di operare in vuoto, in modo tale da evitare che gli elettroni del fascio non collidano con le particelle dell'atmosfera di lavoro; se ciò accadesse, ci sarebbe una evidente perdita di energia da parte del fascio elettronico prima di interagire con la polvere. La presenza del vuoto è vantaggiosa in quanto il materiale prodotto in questo modo sarà sicuramente esente da elementi contaminati, come ad esempio l'ossigeno. Al contrario, la necessità del vuoto provoca una riduzione della capacità produttiva, in quanto si deve considerare nel tempo globale

di produzione sia la fase di generazione del vuoto sia una fase di re-immissione di aria nella camera, prima dell'estrazione del componente finito. Per questi motivi, i campi di applicazione di maggior interesse della tecnologia SEBM sono il biomedicale e l'aerospaziale.

	<b>Laser beam melting</b>	<b>Electron beam melting</b>
Fonte di energia	Laser Maggiore di 1 kW per laser	Fascio di elettroni Maggiore di 3.5 kW
Materiali	Acciai al carbonio, acciaio inox, leghe di alluminio, titanio e leghe, leghe a base di nickel, leghe cobalto-cromo	Titanio e leghe, leghe a base di nickel, leghe cobalto-cromo
Atmosfera controllata	Azoto, argon	vuoto
Suscettibilità a stress residui	alta	Bassa
Trattamenti termici richiesti	Si	No
Complessità delle parti	alta	Media
Dimensione delle particelle	10-45 micron	45-105 micron
Rugosità superficiale	30-140 micron	Peggior di SLM
Accuratezza dimensionale	0.1 mm	0.5 mm
Spessore strati	30-50 micron	50-100 micron
Velocità di processo	Inferiore a EBM	Molto alta
Applicazioni tipiche	Componenti per tutti i settori industriali	Limitata a componenti di una certa complessità e accuratezza; pochi materiali utilizzabili
Temperatura di processo	No pre riscaldamento dei lati o della camera di processo, pre riscaldamento della piattaforma di lavoro	Pre riscaldamento di ogni lato

Tabella 1.1: differenze tra processi EBM e SLM

Il fascio elettronico Electron Beam Melting può concentrare una potenza di fusione decisamente superiore a quella di un fascio laser, questo dovuto alla notevole differenza di massa atomica fra l'elettrone ed il fotone. Il sistema Electron Beam Melting permette di raggiungere facilmente temperature di fusione fra 700 e i 1400 °C (o anche oltre) consentendo quindi di sviluppare componenti per materiali di difficilissima gestione per una fusione tradizionale, quali ad esempio l'alluminuro di titanio ( $\gamma$ Ti-Al) o leghe di titanio con percentuali di Niobio o altri elementi.

Il processo EBM è un processo definito “a caldo”, dove le polveri sono mantenute a temperatura elevata e costante per tutta la durata della fusione, a differenza del processo laser chiamato invece “a freddo”, per il fatto che le micropolveri di metallo sono fuse invece a temperatura prossima a quella

ambientale o comunque mai superiore ai 200°C. Con EBM Si ottengono così parti sostanzialmente prive di tensioni residue o trascurabili e che pertanto non necessitano di trattamenti di distensione termica successivi alla fusione, già quindi pronte per la lavorazione meccanica o per il montaggio. La tecnologia EBM è attualmente utilizzata con successo nei settori aeronautico, aerospaziale e racing. Particolare impiego lo trova nel settore biomedicale (ortopedico e maxillo umano ed animale) grazie al valore di rugosità superficiale più elevato rispetto a quello ottenibile da fusione laser che è invece particolarmente apprezzato dalle cellule ossee umane. Questo connubio generato del processo Electron Beam Melting fra rugosità superficiale e cellule ossee permette una perfetta e definitiva osseo integrazione di qualsiasi protesi per impianto o sostitutivo osseo.

## 1.2. Processo di deposizione diretta (DLD)

Il DLD utilizza come materia prima filo o polvere metallica, che vengono depositati nella camera di lavoro e contemporaneamente irraggiati dal laser che ne provoca la liquefazione. Attualmente la maggior parte dei sistemi commerciali viene venduta per l'utilizzo di polvere, che fuoriesce da uno o più ugelli (fino a quattro nelle macchine più recenti) coassiali al fascio laser.

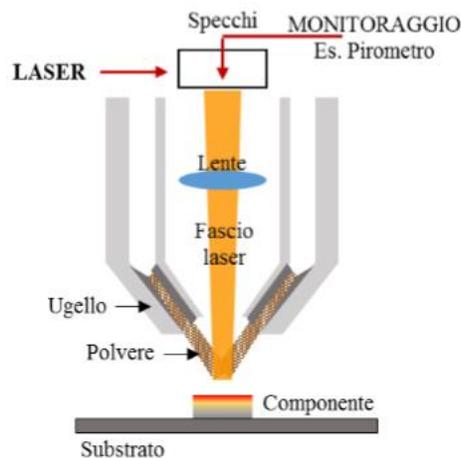


Figura 1.1: Schema di funzionamento di una testa laser per DLD

I sistemi DLD alimentati a filo permettono un utilizzo più efficiente della materia prima, ma sono più complessi da controllare real-time (maggiori ritardi nella risposta del sistema). In entrambi i casi il processo deve essere ottimizzato tenendo conto di tutti i parametri in gioco e delle interazioni termiche e fluidodinamiche. Come avviene per la maggior parte dei processi di additive manufacturing, anche in questo caso il componente deve essere rimosso dalla parte sulla quale è stato accresciuto. La maggior parte delle macchine per DLD utilizza quasi esclusivamente laser in continuo con lunghezza d'onda nel campo dell'infrarosso e potenze che, ad oggi, possono raggiungere i 20 kW. Una percentuale dell'energia del laser viene assorbita dalla nube di polvere che aleggia nell'aria e questo provoca una diminuzione dell'intensità del fascio e variazioni nella distribuzione; questa attenuazione può diventare anche molto significativa se i parametri di processo non vengono scelti correttamente (fino al 75%). La

presenza di questa nube di polvere indica anche che, per garantire la quantità di materia prima corretta, sia necessario lavorare con una percentuale di polvere in eccesso, il che assicura anche una certa flessibilità e una maggiore tolleranza sugli errori. L'intensità del fascio deve mantenersi al di sopra di una certa soglia in modo che si formi la pozza fusa sopra il substrato; quest'ultimo quindi si dovrà trovare alla giusta distanza dal piano di focalizzazione. All'interno del range definito dall'intensità di soglia, il volume che ne corrisponde è determinato dagli altri parametri di processo, quali potenza, velocità del laser e di alimentazione della polvere e morfologia della superficie.

Il primo strato che si forma sul substrato deve essere più alto rispetto al piano focale fino a circa 1 mm. In sintesi i primi strati possono essere più spessi o più sottili rispetto allo spessore di deposito impostato dall'operatore a seconda della posizione del piano focale rispetto al piano di lavoro e dei parametri di processo. Come risultato lo spessore del layer può convergere al valore corretto solo dopo un certo numero di depositi, oppure allontanarsi da questo stato compromettendo il processo.

### 1.3 Processo SLM (selective laser melting)

Prima di entrare nel dettaglio di questo processo è opportuno fare una precisazione poiché in letteratura si tende a fare un po' di confusione su questa metodologia. Questa tecnologia viene infatti chiamata in modi differenti a seconda del costruttore della stampante:

costruttore	Nome commerciale	note
EOS	DMLS (direct metal laser sintering)	Terminologia vecchia ma più usata; in realtà il termine "sintering" è fuorviante poiché le polveri vengono fuse e non sinterizzate.
Concept laser	Laser cusing	
3D System	DMP (direct metal printing)	
Renishaw	Powder bed fusion	
SLM Solutions	SLM (selective laser melting)	

Tabella 1.2: nomi commerciali dati dai vari costruttori

Questi processi producono una struttura metallica a partire da polveri metalliche che vengono fuse da un fascio laser strato dopo strato. Il processo inizia da un distributore che dispone un sottile strato di polvere sopra una piattaforma. La sezione della parte viene scannerizzata e le polveri, dopo essere state sinterizzate dal laser, solidificano. Successivamente la piattaforma viene abbassata e un nuovo strato di polvere è applicato. Il processo si ripete fino a quando il componente risulta ultimato.

Nella tecnologia SLM il fascio laser viene utilizzato come sorgente di calore ad alta densità di potenza per portare a fusione le polveri metalliche in modalità selettiva: la fusione della polvere viene

localizzata solamente in alcune zone strategiche, in cui si deve ottenere del materiale compatto per la costruzione del componente tridimensionale. Il vantaggio legato all'impiego del fascio laser è che può essere focalizzato su piccole dimensioni (circa 70-200  $\mu\text{m}$  nei sistemi SLM), quindi garantisce elevate densità di potenza, che portano ad una rapida fusione della polvere ed a un buon livello di precisione del particolare da realizzare. Questi aspetti hanno consentito di aprire definitivamente le porte delle industrie alla tecnologia SLM per una produzione vera e propria di componenti in differenti settori, da quello aerospaziale a quello medicale, passando dal racing fino alla gioielleria. In particolare, rispetto alle tecnologie tradizionali di produzione, è possibile raggiungere livelli di personalizzazione del componente molto elevati, data la grande flessibilità della tecnologia SLM. La sorgente laser, utilizzata nei sistemi SLM presenti attualmente in commercio, è una sorgente in fibra attiva ad Itterbio; il fascio laser generato è caratterizzato da una lunghezza d'onda pari a circa 1060-1070 nm, con potenze che variano tra 200 W a 400 W, mentre solo per configurazioni molto particolari il fascio laser può raggiungere 1 kW di potenza massima. Le sorgenti installate nei sistemi SLM generano un fascio laser con emissione continua nel tempo e di elevata qualità (distribuzione della potenza del fascio laser di tipo gaussiana): questa seconda caratteristica è fondamentale per garantire l'ottenimento di un fascio laser di piccole dimensioni (compreso tra 50 mm e 200 mm), che consente di realizzare dettagli con elevata precisione, come ad esempio pareti sottili. La scelta dei principali produttori di sistemi SLM è caduta sull'installazione di sorgenti laser in fibra attiva anche per garantire maggiori efficienze nella conversione potenza laser rispetto all'energia elettrica spesa (fino al 35-40%), maggiore affidabilità della sorgente laser e elevata stabilità nel tempo della potenza emessa. Una volta generato dalla sorgente, il fascio laser viene trasportato mediante elementi ottici fino alla zona immediatamente al di sopra della camera di lavoro, dove è posizionato un sistema galvanometrico. Tale sistema viene utilizzato sia per la focalizzazione del fascio laser che per controllare il suo movimento, in modo estremamente elevato mediante la rotazione di specchi, nella zona di lavoro; in questo modo, le velocità di scansione del fascio laser raggiungono valori compresi tra 1 m/s fino a circa 10 m/s.

Dopo la sua focalizzazione, il fascio laser passa attraverso una finestra di protezione, che ha il compito di sigillare la zona di trasporto ottico dalla camera di lavoro, in cui avviene il processo di fusione della polvere.

La camera di lavoro è la zona in cui avviene il processo di fusione della polvere sotto un'atmosfera controllata. All'interno della camera di lavoro sono presenti alcuni dispositivi di movimentazione, che consentono di controllare l'adduzione della polvere e quindi di garantire la realizzazione del componente; nella configurazione classica sono presenti due piani, che si muovono lungo l'asse verticale in senso opposto uno all'altro, come se fossero parte di un bilanciere.

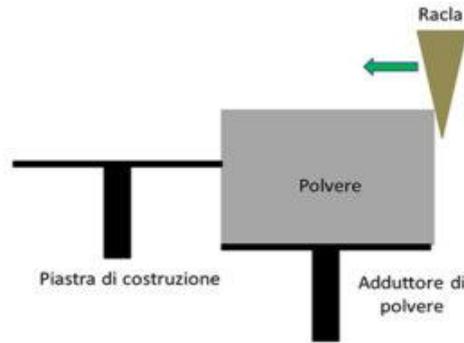


Figura 1.2: schema di funzionamento processo SLM

All'interno della camera di lavoro sono presenti due camere: la prima rappresenta il sistema di adduzione della polvere mentre la seconda è la piastra di costruzione, sulla quale il componente viene realizzato strato su strato. La piastra di adduzione di polvere sale nel corso della lavorazione, in quanto deve fornire ad intervalli di tempo prefissati la polvere durante il processo additivo. La polvere viene trasferita da una racla sulla piastra di costruzione. La quantità di polvere, che viene spostata sulla piastra di costruzione, dipende dallo spessore dello strato di polvere utilizzato durante la singola scansione del fascio laser. Tale spessore di polvere è un parametro di processo estremamente importante, in quanto condiziona fortemente le caratteristiche meccaniche del componente stesso. Infatti, dato un certo valore di potenza del fascio laser, ad uno spessore di polvere troppo piccolo corrisponde una pozza fusa grande e quindi una rifusione del materiale eccessiva, che comporta sia una minore efficienza della lavorazione dal punto di vista energetico sia un maggiore danneggiamento di tipo termico, come ad esempio maggiori distorsioni o stress residui nel componente. Al contrario, uno spessore dello strato eccessivo può portare ad una parziale penetrazione del fascio laser nella polvere e quindi una mancata saldatura tra uno strato e quello sottostante.

Una volta che la racla ha ricoperto la piastra di deposizione di uno spessore della polvere desiderato, torna nella sua posizione iniziale, ovvero lontano dalle due piastre. A questo punto, il fascio laser viene acceso e messo in movimento all'interno della piastra di costruzione, come illustrato in Figura 2c; il movimento del fascio laser sul singolo strato di polvere dipende dalla geometria del componente da realizzare e da come sia stato suddiviso in strati (ovvero slices) dal software CAD/ CAM, come avviene nel 3D printing.

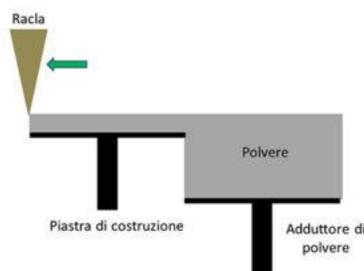


Figura 1.3: Processo SLM

Una volta conclusa la scansione del fascio laser su tutta la superficie dello strato di polvere dove era necessario ottenere delle zone di materiale solido e compatto, la piastra di costruzione viene mossa verso il basso per una distanza circa pari a quella dello strato di polvere, inizialmente depositato dalla racla. A seconda del tipo di materiale che viene lavorato, la differenza tra strato di polvere inizialmente depositato sulla piastra di costruzione e lo spessore dello strato portato a fusione tende a subire modifiche: è importante considerare che il volume associato alla polvere inizialmente depositata è tendenzialmente maggiore rispetto al volume del materiale solidificato. Tale aspetto diventa estremamente importante nella fase di progettazione del componente. A questo punto, la sequenza delle operazioni precedentemente indicate, si ripete con la deposizione di un successivo strato di polvere e con la sua fusione localizzata, esclusivamente dove è richiesto costruire una porzione di materiale denso. Il fascio laser porta, dunque, a fusione la polvere esclusivamente dove è richiesto avere il materiale compatto per garantire la realizzazione del componente, come indicato dal disegno CAD. Al contrario, dove invece il fascio laser non incide, la polvere rimane nello stato iniziale disgregato. Occorre precisare che tutto il processo di fusione laser selettiva avviene sotto l'atmosfera di un gas inerte (azoto, più impiegato in quanto economico, oppure argon nel caso di materiali particolarmente reattivi, come ad esempio il Titanio) per limitare il fenomeno di ossidazione. Inoltre, la presenza di un'atmosfera inerte ad una certa pressione, anche leggermente inferiore a quella atmosferica, consente di evitare problemi di modifica composizionale del materiale allo stato liquido, dovuta all'eventuale evaporazione di elementi di lega facilmente volatili. Tale atmosfera, a seconda dell'architettura del sistema, prevede un continuo flusso di gas inerte durante tutte le fasi del processo oppure vengono eseguiti dei lavaggi iniziali dell'atmosfera presente in camera, prima dell'inizio del processo laser, e successivamente si lavora con un'atmosfera inerte quasi statica. I consumi del gas inerte possono variare sensibilmente in funzione del metodo di funzionamento riguardante la gestione del flusso di gas stesso.

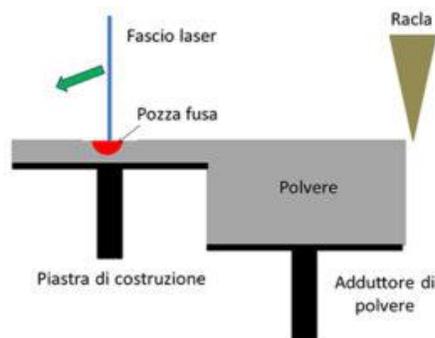


Figura 1.4: processo SLM

Il processo laser termina quando è stato realizzato un volume, di base pari alla superficie della piastra di costruzione e di altezza leggermente superiore rispetto alla quota massima del componente da realizzare; tale volume contiene una certa quantità di polvere solidificata (ovvero il componente grezzo) e la restante parte di volume è occupata da polvere non reagita con il fascio laser, come si può osservare dallo schema di Figura 1.5. Al termine del processo produttivo, la piastra di costruzione risale nella sua posizione iniziale; a questo punto, il pezzo ottenuto deve essere estratto dalla massa di polvere

non reagita, che generalmente lo racchiude (vedi Figura 1.5). Tale prima operazione di rimozione grossolana di polvere non fusa può essere effettuata mediante dei pennelli: la maggior parte della polvere non reagita viene fatta cadere per gravità nella parte inferiore della macchina SLBM, in cui in genere è presente un contenitore. Tale polvere viene raccolta e può essere riutilizzata nel corso delle lavorazioni successive: l'operazione di recupero della polvere può avvenire fino ad un numero di volte massimo circa di 10-12 volte, oltre le quali la polvere perde le sue caratteristiche richieste per eseguire tale processo in modo ripetibile e controllato, come ad esempio la forma, la dimensione e la sua composizione chimica. Infatti, un problema molto importante è quello dell'ossidazione della polvere, che comporta una contaminazione di tipo chimico e quindi ad un decadimento della qualità del materiale del componente.

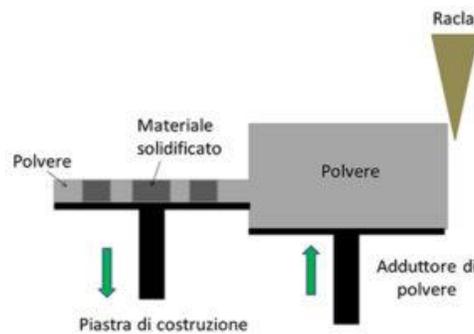


Figura 1.5: processo SLM

Dopo la prima operazione di rimozione della polvere, che può essere eseguita con macchina aperta oppure con macchina chiusa, nel caso in cui sono presenti sistemi come ad esempio camera a guanti, la piastra di costruzione può essere estratta dalla macchina. In questa fase, il componente realizzato è vincolato alla piastra di costruzione, come se fosse stato saldato ad essa. Questo dipende dal fatto che i primi strati di polvere, portata a fusione dal fascio laser, servono a costruire una zona di giunzione per vincolare il componente in fase di costruzione alla piastra stessa. Per questo motivo, la scelta del materiale della piastra di costruzione deve essere fatta in funzione del materiale della polvere; infatti, si deve garantire l'accostamento tra materiali molto simili tra loro oppure materiali, che possano dal punto di vista metallurgico saldarsi facilmente tra loro, senza portare alla formazione di difetti quali cricche o precipitazione di microstrutture fragili. Tale zona di giunzione deve essere rimossa per separare il componente dalla piastra stessa. Spesso, il taglio per elettroerosione a filo è il processo più utilizzato per la separazione dei componenti dalla piastra, in quanto è un processo di tipo termico comunemente impiegato per il taglio di precisione. Al contrario, processi di taglio per separazione di tipo meccanico non sono propriamente indicati, in quanto ci sarebbe il rischio di rottura della zona inferiore del componente per le vibrazioni e le forze instaurate durante la fase di taglio. Dopo l'operazione di taglio, la superficie della piastra di costruzione deve essere ripristinata in termini di planarità e di rugosità superficiale. Questa lavorazione è eseguita per fresatura e per rettifica in piano; nonostante tempi e costi legati a tali lavorazioni, la ripetibilità della produzione dipende anche dal mantenimento del medesimo stato superficiale della piastra di costruzione, sulla quale la polvere deve aderire per costituire una struttura che supporti il successivo componente in produzione. Il componente

deve essere poi sottoposto ad una serie di trattamenti di finitura superficiale, come la pallinatura, e a trattamenti termici. La pallinatura o la sabbiatura vengono utilizzate per migliorare principalmente la finitura superficiale, dato che potrebbe non essere ottimale a cause del processo di fusione del materiale. Inoltre, vengono eseguiti anche dei trattamenti termici per la distensione delle tensioni residue, che potrebbero portare alla rottura del componente e soprattutto delle pareti più sottili, anche prima della sua messa in esercizio.

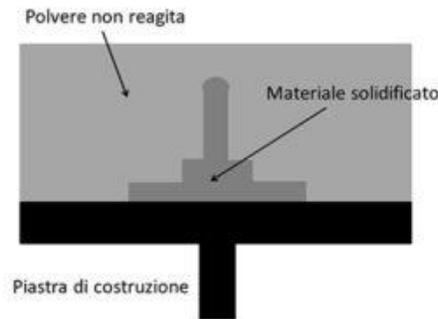


Figura 1.6: processo SLM

E' possibile riassumere nei seguenti punti i principali vantaggi relativi all'impiego della tecnologia SLM:

- Possibilità di realizzare in modo flessibile forme complesse, senza sprecare materiale in quanto la polvere non fusa può essere riutilizzata per un certo numero di volte.
- Una volta definite le condizioni operative di processo, è possibile effettuare delle modifiche al disegno CAD del componente e lanciare quasi immediatamente la produzione. Questo consente di personalizzare in modo facile e rapido i componenti da realizzare.
- Le caratteristiche meccaniche dei componenti prodotti con la tecnologia SLM sono almeno analoghe o superiori rispetto ai processi di fonderia concorrenti (ad esempio la fusione in cera persa). Questo dipende dal fatto che la pozza fusa è di piccole dimensioni, quindi essa raffredda molto velocemente e la microstruttura che si ottiene è molto fine.
- E' possibile realizzare strutture a porosità variabile, per favorire una riduzione del peso oppure per produrre componenti per il biomedicale.
- Viene considerata una tecnologia pulita in quanto è caratterizzata da un basso livello di emissione di CO<sub>2</sub>.

Al contrario, le principali limitazioni relative alla tecnologia SLM possono essere riassunte nei seguenti punti:

- Limitata accessibilità ad una vasta varietà di materiali metallici sotto forma di polvere. Infatti, sia la composizione chimica della polvere che la distribuzione dimensionale e la relativa forma

sono aspetti di fondamentale importanza per garantire un risultato ripetibile. A livello commerciale i materiali disponibili sotto forma di polvere con granulometria opportuna per i processi di AM sono pochi: due tipi di acciai, lega di titanio, di nickel, di alluminio e lega di cobalto-cromo.

- Limitate produttività, in quanto è un processo caratterizzato da velocità di costruzione abbastanza basse, approssimativamente comprese nell'intervallo tra 1 e 20 cm<sup>3</sup>/h. Questo comporta che questa tipologia di produzione non sia ancora legata a vasti volumi produttivi ma a lotti di piccole-medie dimensioni, caratterizzati però da elevato impatto tecnologico per la capacità di realizzare strutture complesse. Alcune soluzioni tecnologiche propongono fasci laser di potenze maggiore oppure la coesistenza di più di un fascio laser per aumentare la produttività del processo.
- La fase di progettazione del componente è complessa: il posizionamento del componente nel volume di costruzione e la scelta dei supporti, ovvero di elementi che sostengono superfici inclinate, portano a condizioni di successo oppure di insuccesso durante la fase di produzione del componente.
- Necessità di processi di finitura superficiale in quanto la solidificazione della pozza fusa, seppur di limitate dimensioni, non può garantire rugosità in genere richieste a componenti meccanici. Inoltre, è necessario prevedere anche dei trattamenti termici di distensione, oltre alla separazione del componente dalla piastra di costruzione.
- Il volume massimo realizzabile del componente è ancora di dimensioni limitate. Infatti, le dimensioni delle piastre di costruzione per la maggior parte dei sistemi SLM presenti sul mercato sono pari a circa 300 mm x 300 mm mentre l'altezza del componente arriva fino a circa 350 mm. Tali dimensioni possono limitare significativamente la diffusione dei componenti realizzazioni mediante SLM per le loro dimensioni al di sotto del mezzo metro di lato.

## 1.4 Fdm – Fused deposition metal

Aziende come Desktop Metal e Markforged, a partire dal 2017, hanno sviluppato un sistema di stampa 3D per metallo non dissimile dalla tecnologia FDM attualmente adottata per i materiali plastici.

Sono processi end to end che utilizzano la polvere metallica, amalgamata in un legante plastico o ceramico, che viene estrusa strato dopo strato fino a formare il prodotto finito. Il grezzo di questo processo (green) viene poi inviato in una stazione di lavaggio in cui un fluido specifico rimuove parzialmente il legante, svolge un'azione di pulizia e crea una struttura porosa preparando il campione per la sinterizzazione. Successivamente il prodotto viene inserito in un forno nel quale avviene la sinterizzazione delle polveri metalliche e la completa eliminazione del legante organico raggiungendo una densità pari a 96 – 98%.

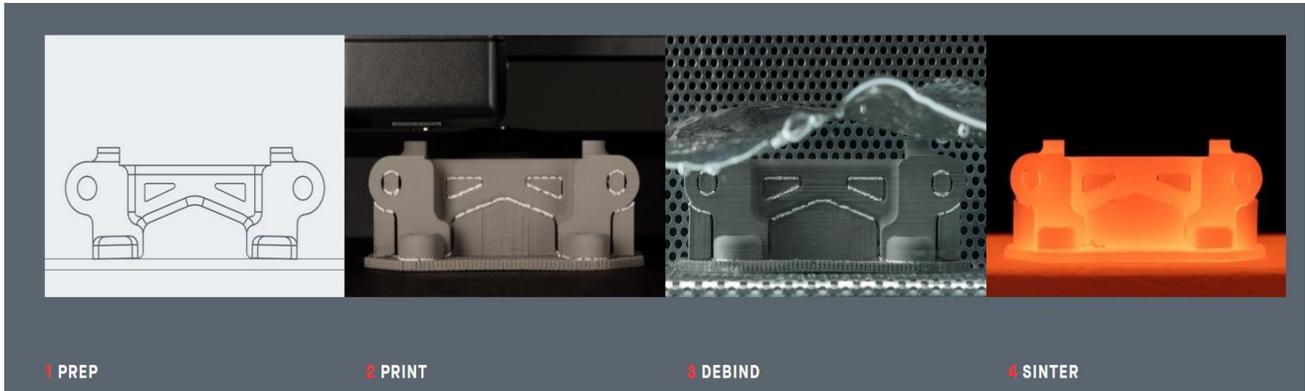


Figura 1.7: processo Fused Deposition Melting

Queste soluzioni sono molto promettenti, i costi per le stampanti sono inferiori rispetto alle tecnologie a letto di polvere, come anche i tempi di stampa, permangono tuttavia diverse perplessità sulla struttura metallografica del pezzo finale, sulle proprietà meccaniche e su una eventuale presenza di residui organici che potrebbero compromettere l'uso in alcune applicazioni. Allo stato dell'arte attuale non è ancora stata fatta una caratterizzazione chimica e metallografica su campioni prodotti mediante questo tipo di tecnologia, sarebbe opportuno monitorare l'avanzamento di questa metodologia di stampa 3D soprattutto visti i relativi bassi costi di una eventuale produzione in serie.

# Capitolo secondo

## 2. Parametri di processo

In questo capitolo si vuole dettagliare quelli che sono i parametri di processo che maggiormente influenzano il prodotto finale derivante dalla tecnologia produttiva di additive manufacturing.

È doveroso fare una prima suddivisione tra i fattori che incidono sul prodotto finale: quelli che dipendono intrinsecamente dal materiale impiegato, fattori che quindi non possono essere modificati in corso d'opera, e quelli che dipendono dal processo produttivo (Tab. 2.1).

<b>Parametri inalterabili</b>	<b>Parametri di processo</b>
Conducibilità termica	Potenza del laser
Peso specifico	Dimensione dello spot
Punto di fusione	Velocità di scansione
	Distanza tra le tracce
	Strategia di scansione
	supporti
	preriscaldamento

Tabella 2.1: suddivisione dei parametri di processo

Nei processi a letto di polvere i parametri di processo possono essere distinti in tre categorie:

- Parametri relativi all'utilizzo del laser (potenza e dimensione dello spot)
- Parametri di scansione (velocità, distanza tra le tracce e strategia di scansione)
- Parametri legati alla fisica del processo (tipo e numero di supporti, orientamento, atmosfera, preriscaldamento)

### 2.1. Parametri relativi all'utilizzo del laser

#### 2.1.1 Potenza del laser ( $P$ )

La potenza è il primo parametro energetico che influenza fortemente la densità finale del componente. A parità di altri parametri, all'aumentare della potenza le densità aumentano, per poi diminuire leggermente se si instaurano fenomeni di balling o in caso di velocità di flusso nella pozza troppo elevate che favoriscono l'intrappolamento di gas. In generale potenze troppo basse non permettono una corretta penetrazione del calore e quindi causano la mancata ri-fusione dei layer precedenti, con conseguente minore adesione tra gli strati. Inoltre, le temperature massime raggiunte sono minori e con esse cala anche la viscosità del metallo liquido. Il metallo fuso viscoso ha scarsa bagnabilità e non

riesce a penetrare all'interno dei vuoti, ma tende a formare degli agglomerati metallici circondati da zone a mancata fusione.

Solitamente il range di potenza utilizzato nei processi SLM è di 200 – 1000W. Per impostare il corretto valore di potenza è necessario prima conoscere la velocità di scansione. La potenza indica l'ammontare di energia trasferita per secondo, pertanto la velocità influenza direttamente il tempo speso in una stessa area.

Per quanto concerne la lega AlSi10Mg, i valori tipici di potenza utilizzati sono compresi tra 200-400W, alcune variazioni dipendono dalla stampante utilizzata, generalmente per questa lega non si usano potenze al di sotto dei 300W al fine di non ottenere valori di densità o qualità del prodotto troppo basse.

### ***2.1.2 Dimensioni dello spot***

Nelle precedenti spiegazioni il laser viene idealizzato come un cerchio perfetto che incide il letto di polvere causandone la fusione localizzata. Questo cerchio ha un raggio, quindi, un'area è influenzata dall'ammontare di polvere riscaldata dal fascio. Più grande è il raggio e più grande sarà la quantità di polvere influenzata. Fino a che quest'area può variare considerevolmente, a parità di stessa polvere utilizzata, si possono ottenere risultati differenti nel prodotto finale variando le dimensioni dello spot del laser incidente. Anche la polvere non è uniformemente distribuita all'interno di quest'area di spot, man mano che ci si allontana dal centro, l'energia va diminuendo. Per conoscere le dimensioni reali dell'area coinvolta è necessario fare una caratterizzazione della propagazione del laser. Questo tipo di analisi viene eseguita con parametri individuali dipendenti dal tipo di laser utilizzato pertanto è compito del produttore della stampante fornire tali informazioni.

## **2.2 Parametri di scansione**

### ***2.2.1 Velocità di scansione ( $v$ )***

La velocità di scansione è la velocità alla quale il fascio laser si muove e viene misurata in millimetri al secondo. La velocità di scansione ha un effetto opposto rispetto alla potenza, infatti, un suo incremento aumenta la presenza di difetti di consolidamento: il tempo di interazione tra il fascio laser e la superficie diminuisce e quindi le temperature in gioco e la profondità della pozza di fusione calano. Da un alto punto di vista, più bassa è questa velocità, più tempo il laser rimarrà nel medesimo punto e ciò comporta troppa energia che andrà ad evaporare la polvere causando porosità. Per queste ragioni il valore della velocità di scansione va scelto in maniera molto accurata tenendo in considerazione che potrebbe variare in funzione della potenza applicata e del materiale stampato assumendo valori da 300 a 2500 mm/s.

## 2.2.2 Distanza tra le tracce ( $t$ )

Per poter sciogliere la polvere, il fascio laser si muove lungo l'area desiderata facendo delle tracce rettilinee come si può vedere in figura x. La distanza che intercorre tra due tracce adiacenti è chiamata distanza di traccia. Questa distanza viene misurata in millimetri e può assumere valori compresi tra 0,05 - 0,25mm. Quando il fascio laser colpisce il letto di polvere, una specifica area assorbe energia e fonde. Tale area può essere idealizzata da un cerchio, la cui superficie dipende dal diametro del fascio. La figura 2.1 illustra un diagramma sul quale spessore di strato e distanza di traccia sono rappresentati.

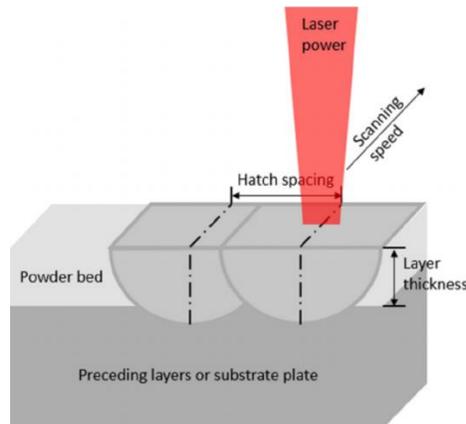


Figura 2.1: distanza tra le tracce

Si noti che la distanza di traccia è riferita alla distanza tra i centri di tracce adiacenti. Come accade per lo spessore di strato, più alta è la distanza di traccia, maggiore sarà il grado di avanzamento del processo e quindi la produttività. Ma come si può vedere in figura x, se le tracce sono troppo distanti l'una dall'altra, la polvere compresa tra esse non verrà sciolta in modo appropriato. Inoltre, poiché il laser scioglie aree circolari, usualmente le zone esterne hanno energia inferiore rispetto al centro; ciò significa che queste zone non vengono sciolte completamente, ragion per cui le tracce devono essere più vicine le une alle altre. L'effetto della distanza sulla densità finale trova un andamento asintotico molto velocemente e l'influenza diventa trascurabile per quasi tutti i materiali con una sovrapposizione del 50%, o inferiore nel caso di una penetrazione sufficientemente alta da garantire la ri-fusione di più strati.

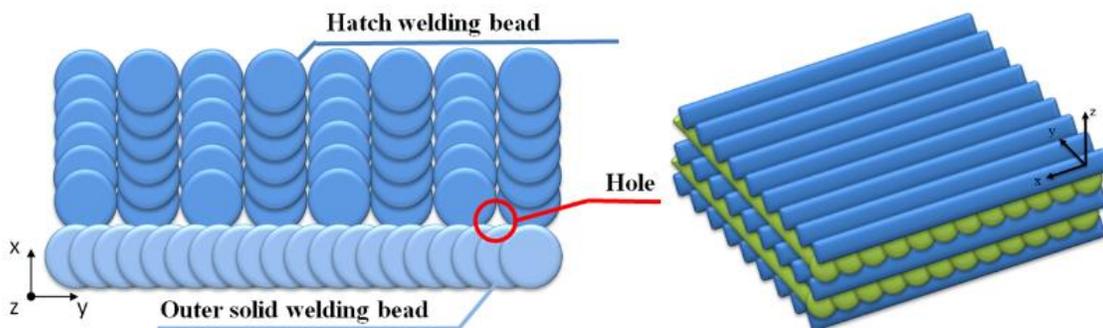


Figura 2.2: Effetto della distanza di traccia

### 2.2.3 Spessore di strato ( $h$ )

Le tecnologie di additive manufacturing producono parti in 3D aggiungendo fette 2D strato dopo strato, pertanto, ad un certo punto del processo, la distanza tra ciascun strato deve essere impostata. Questa distanza è chiamata spessore di strato e ha valori compresi tra 0,02 - 0,1 millimetri. Più alto è questo valore e più veloce sarà il processo produttivo poiché, a parità di altezza, saranno richiesti meno strati. Per comparare processi produttivi si fa riferimento ad un fattore. Questo fattore mostra il volume di materiale prodotto per ora, normalmente espresso in  $\text{cm}^3/\text{h}$ . Tale fattore viene calcolato con il prodotto tra lo spessore di strato, la distanza tra le tracce e la velocità di scansione.

$$B = h \cdot t \cdot v$$

Come si può vedere, il grado di costruzione ( $B$ ), è direttamente proporzionale allo spessore di strato. In fase di settaggio dei parametri di processo bisogna considerare che nonostante un aumento dello spessore di strato risulti in un incremento della produttività, allo stesso tempo comporta una riduzione della risoluzione della parte, condizione molto restrittiva in alcuni impieghi specifici (si pensi per esempio a protesi biomediche).

### 2.2.4 Strategia di scansione

La strategia di scansione indica in che modo il laser si muove all'interno dei confini di ciascuno strato per fondere tutta la superficie di interesse. I software di gestione dei processi additivi permettono di definire questi percorsi in maniera quasi completamente libera e il numero di parametri che devono essere impostati è elevato. Considerando innanzi tutto la strategia di scansione di un layer  $N$ , possiamo fare riferimento alla Figura 2.3 che mostra alcune tra le possibilità più comunemente usate.

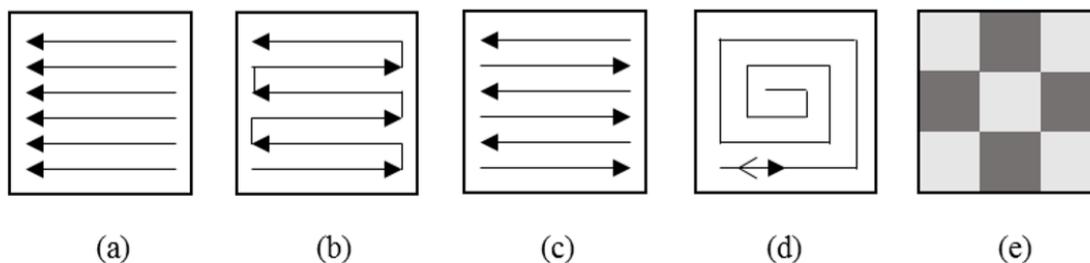


Figura 2.3: Alcune possibili strategie di scansione: (a) unidirezionale, (b) bidirezionale con percorso continuo, (c) bidirezionale, (d) a spirale e (e) a scacchiera.

Supponendo che l'area del layer  $N$  sia quadrata il laser può scansionarla interamente con tracce parallele e verso costante (Figura 2.3a) oppure con verso opposto tra le tracce adiacenti (Figura 2.3b,c).

In alternativa il percorso può essere a spirale (Figura 2.3d) con un movimento degli specchi che prevede lo spostamento dello spot dal centro del campione verso l'esterno (in-out) oppure da fuori a dentro (out-in). Infine è molto comune suddividere l'area di ciascuno strato in tanti settori quadrati di dimensione uguale, seguendo una logica di fusione a isole (Figura 2.3e). Ciascuna di queste sottosezioni può essere scansionata dal laser seguendo una delle strategie descritte precedentemente (Figura 2.3a-d). L'ordine con cui il laser fonde le singole isole può essere di tipo stocastico, oppure secondo una logica a scacchiera che divide il layer in settori bianchi e neri che vengono fusi in sequenza (prima tutti i bianchi e poi tutti i neri). Scelta la strategia di scansione relativa ad uno strato è possibile decidere con quale principio il laser dovrà fondere lo strato subito successivo; in particolare si può stabilire da quale punto il laser debba ripartire e se la direzione di scansione è la stessa dello strato precedente, oppure se l'angolo formato dalle due direzioni è diverso da zero.

In Figura 2.4 sono schematizzate tre possibili alternative: nel primo caso (Figura 2.4a) i vettori che rappresentano direzione e verso di scansione sono tutti uguali tra loro, dal primo all'ultimo strato. In Figura 2.4b la direzione di scansione varia tra layer adiacenti ruotando ogni volta di un angolo  $\alpha$  che, nel caso rappresentato, vale  $30^\circ$ .

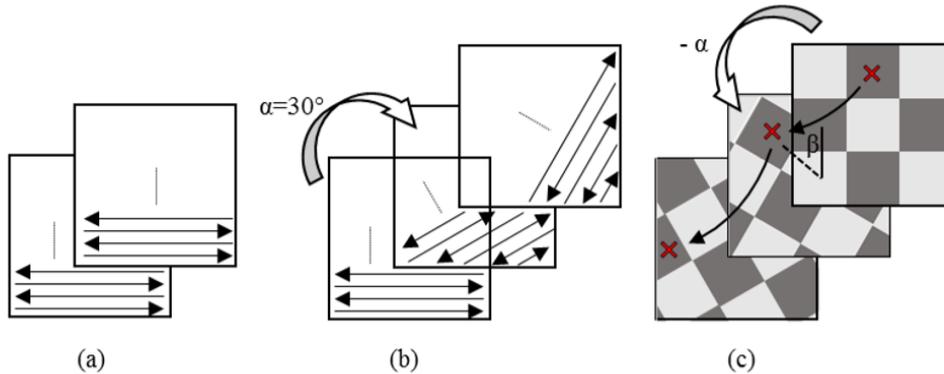


Figura 2.4: Relazione tra i percorsi laser di più layer successivi: (a) ripetitivo, (b) con rotazione della direzione e (c) con rotazione della direzione e spostamento del punto di partenza del laser.

Infine, la Figura 2.4c mostra una strategia di scansione a scacchiera in cui la direzione di movimentazione del laser varia per rotazioni successive e inoltre le coordinate da cui il laser inizia a fondere le isole cambiano ad ogni layer ruotando di un angolo  $\beta$ , che può essere diverso da  $\alpha$ . La scelta della strategia di scansione influenza fortemente le tensioni residue sul componente perché è responsabile dei gradienti termici che si formano all'interno del componente. Negli studi fatti finora la strategia più utilizzata è quella a scacchiera con rotazione successiva delle isole e del punto iniziale di accensione del laser (Figura 2.4c).

Nel valutare l'effetto delle prime due classi di parametri, si prende spesso in considerazione un fattore che ne coinvolge diversi: l'energia su unità di volume ( $E_v$ ), detta anche fluenza.

$$E_v = \frac{P}{v \cdot h \cdot t}$$

L'equazione ha al numeratore la potenza del laser [W] e al denominatore il prodotto tra velocità di scansione [mm/s], la distanza tra due tracce adiacenti [mm] e lo spessore di ciascuno strato [mm]. La fluenza, nonostante sia un parametro di fondamentale importanza, non permette di determinare la correlazione dei singoli parametri con il risultato finale ed è fortemente dipendente dal materiale scelto. Quindi il giusto approccio è di conoscere preliminarmente l'effetto di ciascun parametro, per poi trovare eventuali correlazioni con la fluenza.

## 2.3 Parametri legati alla fisica del processo

### 2.3.1 Supporti

La scelta dei supporti deve garantire che il componente rimanga ancorato alla base durante il processo. Fabbricare il componente a diretto contatto della base, infatti, ne impedirebbe il distacco diretto e anche in presenza di processi adatti a questa operazione, richiederebbe che il componente venisse progettato con del sovrametallo lungo tutta l'area di appoggio. I supporti, quindi, dovranno avere un'altezza sufficiente per separare il pezzo dalla base e per prevederne un distacco semplice e poco invasivo con il componente stesso, in modo da limitare il danneggiamento della superficie di contatto. Riassumendo quanto detto finora i supporti dovranno avere una superficie di contatto con la base sufficientemente grande da garantirne un buon ancoraggio ed una meno estesa sul componente per consentire un distacco manuale dei supporti senza danneggiamenti al componente. L'utilità dei supporti però non si limita a quella di interporsi tra il pezzo e la base, ma è necessario tenere conto dei motivi che talvolta ne impediscono il corretto ancoraggio: la formazione di tensioni residue e di deformazioni. La scelta dei supporti deve tenere conto di questo aspetto e favorire una corretta dissipazione del calore. In particolare le zone a maggior rischio di deformazione sono quelle a sbalzo perché la conduzione di calore verso il volume centrale del componente è limitata e la polvere ha un coefficiente di conduzione del calore, rispetto al corrispettivo materiale solido, di due ordini di grandezza inferiore. Per questo motivo i volumi di materiale sporgente sono soggetti a forti sovra-riscaldamenti che portano alla formazione delle tensioni residue. La presenza dei supporti per queste aree permette al calore di dissiparsi, ma non solo: la polvere sottostante infatti, oltre a non essere un buon conduttore termico, non è nemmeno sufficiente per sostenere il componente solido. Chivel e Smurov hanno eseguito una campagna sperimentale per determinare le temperature in gioco e i problemi legati al sottosquadro o alla sporgenza di alcune zone dei componenti. Gli autori sono giunti ad affermare che l'instabilità tra il materiale fuso della zona di sottosquadro e la polvere sottostante sia legata ai fenomeni di Rayleigh-Taylor per cui il materiale superiore più denso tende a scendere e a mescolarsi con quello meno denso. Per tutti i motivi descritti sopra, le geometrie e le dimensioni che ad oggi è possibile utilizzare per supportare i componenti fabbricati SLM, anche facendo affidamento a quelle già previste nei software di gestione del processo, sono davvero numerose. A scopo esemplificativo, in Figura 2.5 sono riportate quattro delle geometrie più diffuse: cilindrica, conica, ad albero e a muro. Per ciascuna di queste geometrie è possibile definire singolarmente tutte le quote: altezza, diametri, angolazioni dei rami dell'albero, distanza tra i trapezi, base maggiore e minore del trapezio, spessore del muro...ecc. In questo modo è possibile, almeno a livello teorico, simulare la miglior condizione di conduzione del calore e solidità del supporto per ciascun caso specifico.

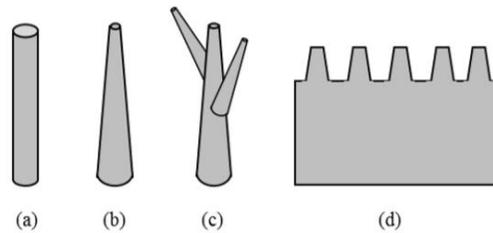


Figura 2.5: Geometrie utilizzate per supportare i componenti SLM: (a) cilindrica, (b) conica, (c) ad albero e (d) a muro.

La struttura ad albero (Figura 2.5c) è di tipo manuale: scelta la posizione del “tronco” il numero di rami e la direzione lungo la quale si sviluppano viene scelta indicando manualmente i punti che si vogliono supportare. Ciascun ramo, inoltre, può crescere lungo una singola direzione oppure lungo 2 o più direzioni diverse in cui l’angolo relativo è stabilito dall’utente. Molto spesso strutture ad albero o strutture affini vengono utilizzate a sostegno di zone in sottosquadro che non si affacciano sulla piattaforma (Figura 2.6c) per evitare quel che accadrebbe utilizzando dei supporti classici, ovvero che essi crescano a partire dalla superficie del componente su cui si affaccia l’area a sbalzo.

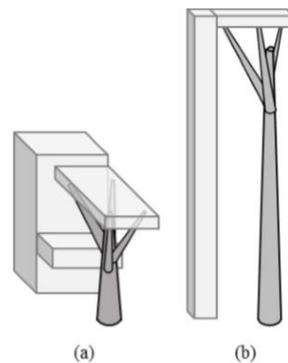


Figura 2.6: Principali utilizzi dei supporti ad albero.

Un altro utilizzo classico di strutture di questo tipo è per supportare zone a sbalzo molto lontane (lungo la direzione z) rispetto alla base (Figura 2.6b); in questo modo è lecito costruire un unico supporto conico, particolarmente massiccio, dal quale cresceranno rami più snelli. Questa strategia consente di diminuire il volume di polvere utilizzata per i supporti, che rappresenta sempre uno scarto nei processi additivi. Oltre alla geometria dei supporti è necessario decidere come distribuirli nell’area del componente che si affaccia alla base. Anche da questo punto di vista le possibilità sono davvero numerose e la strategia andrebbe definita a seconda del materiale, della geometria del componente e dal suo volume.

È opportuno specificare che molte delle dinamiche geometriche relative ai supporti, ma anche all’orientazione dell’oggetto sulla piastra di lavoro, vengono gestite da software CAE come ad esempio Magics (Materialise). Questi software consentono di ottimizzare la produzione, guidano l’utente nella creazione dei supporti e vengono forniti dalla casa costruttrice della stampante 3D.

### 2.3.2 Preriscaldamento

Le stampanti 3D possono essere dotate di un sistema di pre-riscaldamento della piattaforma di lavoro. Durante il processo, infatti, si generano gradienti termici ingenti all'interno del componente a causa delle velocità di riscaldamento e di raffreddamento elevate. Al crescere del gradiente termico aumentano le deformazioni sul componente secondo l'Equazione:

$$\varepsilon = \alpha \cdot \Delta T$$

In cui  $\alpha$  è il coefficiente di dilatazione termica. Se il componente fosse libero di deformarsi non si produrrebbero né tensioni normali né tangenziali. Nel caso di SLM il componente è vincolato alla piattaforma che rimane ad una temperatura inferiore e quindi si generano delle tensioni termiche, calcolabili valutando la variazione di dimensione che il corpo avrebbe senza vincoli e determinando le forze che sarebbero necessarie per impedire tali variazioni. Inoltre, le strategie di scansione adottate in questi processi, creano nel componente una storia termica tutt'altro che uniforme, anche sul singolo strato, e quindi si generano forti gradienti termici locali. Le tensioni che si formano sono molto elevate e possono superare la tensione di snervamento del materiale causando la formazione di micro/macro cricche nel componente. Le tensioni residue sono particolarmente accentuate se il materiale del basamento e del componente hanno coefficienti di dilatazione termica diversi.

Per limitare gli effetti negativi di questi fenomeni è stato adottato il preriscaldamento della piattaforma che serve per diminuire il gradiente termico tra piattaforma e componente e di conseguenza anche i gradienti termici locali durante la fusione di ogni singolo strato. Attualmente i sistemi che prevedono il preriscaldamento della base raggiungono temperature fino a 400°C e sono costantemente monitorati attraverso delle termocoppie che permettono il controllo in retroazione dell'elemento riscaldante. La necessità di adottare un preriscaldamento è particolarmente sentito nel caso di macchine con camere di lavoro di grandi dimensioni, dove i gradienti termici sono molto elevati.

# Capitolo terzo

## 3. Materiale

Le proprietà più importanti di un materiale utilizzato in ambito thermal management sono la conducibilità termica, cioè la quantità di calore trasferita nell'unità di tempo attraverso la superficie, e la diffusività termica, ovvero l'attitudine di trasmettere una variazione di temperatura.

Con l'ausilio dei diagrammi CES è possibile vedere quali sono i materiali a cui corrispondono i più alti valori di queste proprietà:

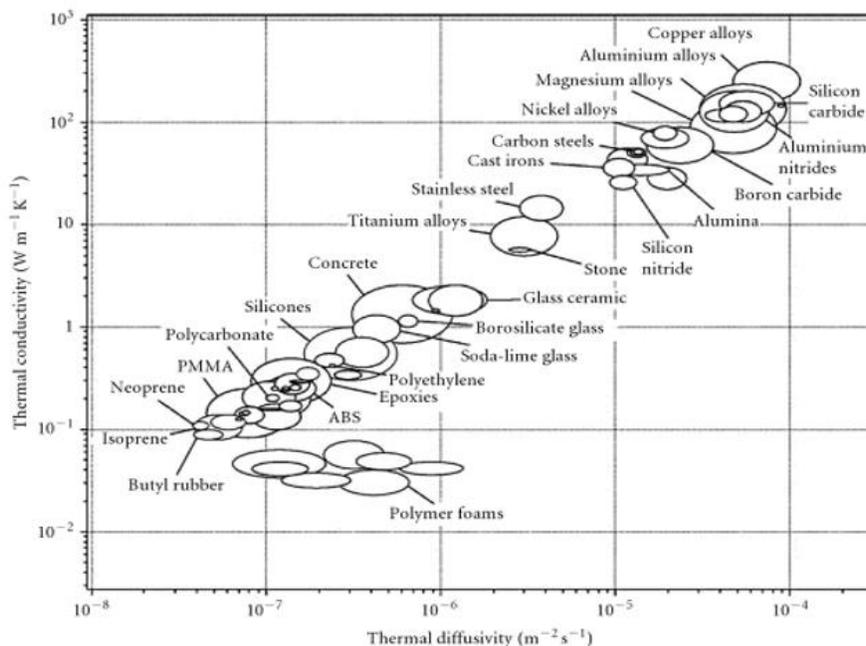


Figura 3.1: diagramma CES conducibilità termica vs diffusività termica

Dal grafico si nota come i materiali migliori siano le leghe di rame e le leghe di alluminio. Dato l'elevato costo del rame, è l'alluminio il materiale maggiormente impiegato in ambito thermal management come ad esempio per la realizzazione di dissipatori di calore e scambiatori di calore.

### 3.1 Caratteristiche Alluminio

La struttura cristallina caratteristica dell'elemento alluminio è la cubica a facce centrate, simile quindi a quella del ferro  $\alpha$ . Questo metallo ha una forte tendenza all'ossidazione che in questo modo si ricopre immediatamente di un leggero strato di ossido compatto, proteggendosi da un'ulteriore più profonda

ossidazione (passivazione dell'alluminio). Se da un lato l'ossidabilità dell'alluminio è un vantaggio da un altro lato crea dei problemi per la sua saldatura. L'ossido di alluminio è un sesquiossido ( $Al_2O_3$ ) chiamato allumina; caratterizzato dall'essere durissimo (tant'è che viene usato come abrasivo direttamente in polvere), ha un peso specifico superiore a quello dell'alluminio ( $3,6 \text{ kg/dm}^3$ ) e fonde solo ad altissima temperatura ( $2000^\circ\text{C}$ ). Dunque quest'ossido tende a rimanere incluso nel bagno danneggiando la saldatura. Durante l'operazione di fusione del materiale, col cannello, si fonde rapidamente tutta la zona circostante (per via della più bassa temperatura di fusione dei metalli base). Diversamente l'operazione di fusione dell'alluminio non presenta invece difficoltà rilevanti, purché si protegga il bagno dall'ossidazione usando apposite sostanze disossidanti. L'alluminio presenta un'elevata conduttività elettrica ed è quindi molto usato per le conduzioni qualora sia richiesta anche la riduzione del peso. Quanto alle proprietà meccaniche dell'alluminio puro esse non sono certo entusiasmanti (scarsa resistenza a trazione, bassa resilienza) perciò l'impiego di alluminio puro si riduce a pochi casi particolari: fogli per la conservazione di alimenti, rivestimenti di leghe leggere, conduttori elettrici, polvere per la saldatura alluminio termica, impiego per calmare gli acciai effervescenti. A seconda dell'ammontare delle impurità, l'alluminio è classificato in estremamente puro e commercialmente puro, che si attestano comunque sempre sopra valori del 99%. È riscontrabile come piccole quantità di altri elementi influiscano consistentemente sulle proprietà del metallo, soprattutto per quanto riguarda le proprietà meccaniche la variazione è molto consistente e fortunatamente con un'interessante incremento delle caratteristiche desiderabili.

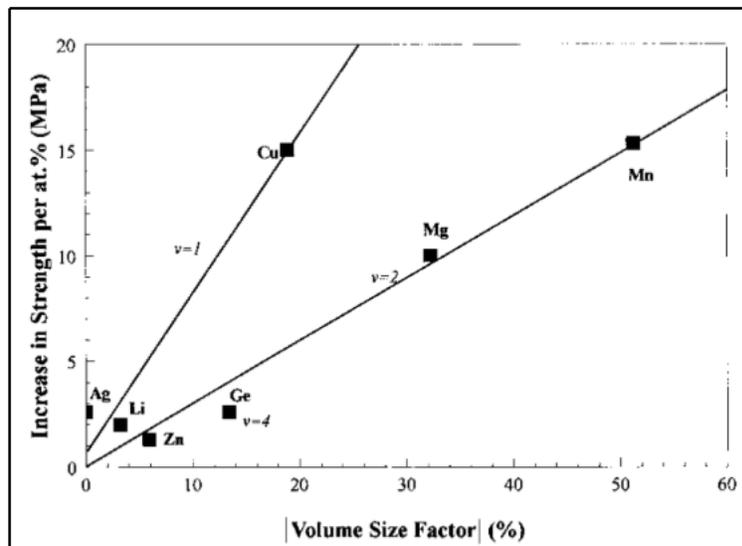


Figura 3.2: Incremento della resistenza meccanica con l'aggiunta di elementi alliganti.

Bastano piccole quantità di elementi leganti (ad esempio rame, silicio, magnesio) per formare con l'alluminio, delle leghe leggere con caratteristiche meccaniche eccellenti, pur conservando sempre il vantaggio della leggerezza. Per tale motivo l'alluminio, quale costituente fondamentale delle leghe leggere, è il più importante dei metalli non ferrosi.

## 3.2 Effetto elementi alliganti

Gli elementi inseribili in lega oltre ad essere svariati, possono influenzare in numerosissime modalità le proprietà della lega. Per l'appunto questo rimane il metodo principale per controllare e sviluppare i materiali. Emblematico è il caso delle dislocazioni che quando incontrano particelle dure o non duttili vengono deviate se non addirittura bloccate nel loro movimento. Queste particelle costituiscono dunque delle barriere al movimento, con il risultato di influenzare direttamente il fenomeno dell'incrudimento. Se posti a confronto due materiali, uno con particelle e l'altro senza, il primo andrebbe a manifestare una capacità di incrudimento notevolmente maggiore con una curva di rapporto stress-strain evidentemente più ripida.

### 3.2.1 Principali alliganti

Questo metallo vanta di avere un'ottima capacità di poter solubilizzare gran parte degli elementi metallici esistenti, ad ogni modo sono solo alcuni i metalli costituenti le leghe commerciali, silicio, magnesio, rame, zinco, manganese e litio sono i maggiori rappresentanti. Sono anche aggiunte, per scopi particolari, piccole percentuali di nichel, titanio, zirconio, cromo, bismuto, piombo, cadmio ed anche stagno e ferro, quest'ultimo peraltro sappiamo che è sempre presente come impurezza. Ogni elemento apporta alla lega delle variazioni che possono essere generalizzate così:

- Il **rame** forma con l'alluminio una lega con parziale solubilità allo stato solido che può dar luogo alle precipitazioni di seconde fasi coerenti o incoerenti (invecchiamento naturale o artificiale). In ogni condizione di trattamento termico il rame aumenta la tenacità anche grazie all'invecchiamento. Altre proprietà quali densità, conducibilità termica ed elettrica, resistenza a corrosione risultano diminuite.
- Il **manganese** forma un eutettico alla temperatura di 658 °C con un contenuto del 2% di manganese; la fase intermetallica che si separa è MnAl<sub>6</sub>. Ha una solubilità molto ridotta nell'alluminio, e così MnAl<sub>6</sub> appare come micro costituente anche per percentuali molto basse. In generale il vantaggio conferito dal manganese è quello di aumentare la resistenza meccanica delle leghe lavorate e di ridurre la sensibilità alla corrosione intergranulare ed alla stress-corrosione, ma l'eventuale presenza di composti intermetallici causa una diminuzione di duttilità.
- L'importanza del **silicio** è dovuta all'aumento di fluidità e alla riduzione del coefficiente di dilatazione termica conferito dall'aggiunta di piccole quantità di alligante, proprietà molto utile nei getti e nelle saldature. La durezza delle particelle di silicio conferisce infine una buona resistenza all'usura.
- Il **magnesio** mostra una buona solubilità nell'alluminio per questo sono desiderabili concentrazioni maggiori del 7% per avere precipitazione. Rimane possibile comunque ottenere un discreto effetto indurente tramite la lavorazione a freddo, visto che il magnesio permette di conservare un'ottima duttilità. Il magnesio fornisce inoltre un'eccellente resistenza alla corrosione e una buona saldabilità: queste caratteristiche vengono sfruttate nella costruzione

delle carrozzerie in alluminio. La precipitazione può essere continua o discontinua, a seconda della temperatura di tempra adottata.

- Lo **zinco** è l'elemento che ha la solubilità più elevata nell'alluminio, e con esso forma un eutettico ad una concentrazione del 95% in peso di Zn alla temperatura di 382 °C: così, per quasi tutte le composizioni, si ha solidificazione di una soluzione solida primaria; al calare della temperatura il suo campo di stabilità crolla e si ha precipitazione di zinco. Generalmente le leghe binarie Al-Zn non vengono usate, ma vengono preferite leghe Al-Zn-Mg, impiegate nelle costruzioni aeronautiche.

### 3.3 Leghe di Alluminio

La classificazione internazionale prevede un sistema di quattro cifre di cui la prima indica il principale elemento alligante, secondo questo indice:

1XXX	Alluminio con purezza minima 99.00%
2XXX	Leghe Al-Cu
3XXX	Leghe Al-Mn
4XXX	Leghe Al-Si
5XXX	Leghe Al-Mg
6XXX	Leghe Al-Mg-Si
7XXX	Leghe Al-Zn
8XXX	Leghe Al con altri elementi
9XXX	Serie sperimentale

Tabella 3.1: leghe di alluminio

La lettera che segue la denominazione della lega indica il trattamento subito: F per fabbricata, O per ricotta, H per incrudita, T per trattata termicamente. Il numero che segue queste lettere specifica la condizione del trattamento. Per esempio: T4 significa trattamento di solubilizzazione, tempra ed invecchiamento naturale.

Serie 1000: (Alluminio industrialmente puro - almeno 99%); le leghe di questa serie sono caratterizzate da eccellente resistenza alla corrosione, conducibilità termica ed elettrica elevate, buona lavorabilità, caratteristiche meccaniche piuttosto basse. Le caratteristiche meccaniche possono essere aumentate, entro certi limiti, mediante incrudimento.

Le principali applicazioni comprendono impianti chimici, corpi riflettenti, scambiatori di calore, conduttori e condensatori elettrici, applicazioni architettoniche e decorative.

Serie 2000: (nome commerciale Avional); il principale elemento di lega è il Rame; in alcune leghe vi sono aggiunte di magnesio e manganese. Si tratta di leghe da trattamento termico (richiedono un

trattamento di solubilizzazione, tempra ed invecchiamento per sviluppare i valori meccanici di impiego); dopo trattamento termico sviluppano caratteristiche meccaniche confrontabili con quelle degli acciai al carbonio. La loro resistenza alla corrosione è meno elevata di quella di altre leghe di Alluminio; per questo motivo in applicazioni critiche richiedono opportuni sistemi di protezione; per la medesima ragione le lamiere sottili sono disponibili anche in versione placcata con altre leghe di Alluminio con migliore resistenza a corrosione.

Vengono utilizzate per parti e strutture che richiedono elevati rapporti resistenza/peso (ruote di velivoli e mezzi di trasporto terrestre, strutture aeronautiche, sospensioni automobilistiche) per temperature di impiego fino a circa 150 °C. Sono caratterizzate da eccellente lavorabilità alle macchine utensili e (tranne la lega 2219) da limitata saldabilità per fusione. Il sistema Alluminio - Rame possiede un eutettico Al-AlCu<sub>2</sub> alla temperatura di 548 °C e alla composizione 33% di Cu in peso. L'indurimento di queste leghe avviene per precipitazione. Le leghe binarie Al-Cu non sono molto usate commercialmente. Con l'aggiunta di elementi quali Mg, Mn, Si, Ni, Li, esse vengono usate spesso per applicazioni strutturali sugli aerei e in generale dove occorrono buone caratteristiche meccaniche e leggerezza.

Serie 3000: il principale elemento in lega è il Manganese; in generale il vantaggio conferito dal Manganese è quello di aumentare la resistenza meccanica delle leghe lavorate e di ridurre la sensibilità alla corrosione intergranulare ed alla stress corrosion, ma l'eventuale presenza di composti intermetallici causa una diminuzione di duttilità. Le leghe Al-Mn formano un eutettico alla temperatura di 658 °C e per una composizione del 2% in manganese; la fase intermetallica che si separa è MnAl<sub>6</sub>. Questo sistema si trova raramente in equilibrio e il Manganese, che ha una solubilità molto ridotta nell'Alluminio, non è portato in soluzione solida nella percentuale prevista dal diagramma di stato, e così MnAl<sub>6</sub> appare come microcostituente anche per percentuali molto basse di manganese; infatti è usato in percentuali di poco superiori all'1% in peso nelle leghe non trattabili termicamente e in quantità maggiori nelle leghe trattabili al calore.

Serie 4000: il principale elemento di lega è il Silicio; la sua importanza è dovuta all'aumento di fluidità e alla riduzione del coefficiente di dilatazione termica conferito dall'aggiunta di piccole quantità di questo alligante, proprietà molto utile nella tecnologia dei getti e nelle saldature. Il sistema Al-Si forma un eutettico alla temperatura di 577 °C ad una percentuale di silicio dell'11.7% in peso; poiché questo sistema non forma composti intermetallici, il Silicio precipita direttamente dalla matrice della soluzione solida primaria. La durezza delle particelle di Silicio conferisce infine una buona resistenza all'usura. Nell'uso commerciale a questo sistema vengono aggiunti altri elementi in lega quali per esempio il Rame e il Magnesio.

Serie 5000: (nome commerciale Peraluman); il principale elemento di lega è il Magnesio, che conferisce doti particolari di resistenza alla corrosione, oltre a buona resistenza a caldo ed ottime doti di duttilità e lavorabilità. In genere non richiede trattamento termico di invecchiamento e presentano buona saldabilità per fusione. Il Magnesio mostra una buona solubilità nell'alluminio (seconda solo allo zinco) e, per questo, leghe con concentrazioni minori del 7% non mostrano una apprezzabile

precipitazione (tuttavia se sono presenti altri elementi questa percentuale diminuisce), ma è possibile comunque ottenere un discreto effetto indurente tramite la lavorazione a freddo, visto che il Magnesio permette di conservare un'ottima duttilità; infatti si tratta di leghe da incrudimento le cui caratteristiche meccaniche possono essere aumentate mediante laminazione a freddo, mentre non si possono aumentare mediante trattamento termico; le caratteristiche meccaniche sono in generale inferiori a quelle delle leghe della serie 2XXX.

Il Magnesio fornisce inoltre un'eccellente resistenza alla corrosione e una buona saldabilità: queste caratteristiche vengono sfruttate nella costruzione delle carrozzerie in Alluminio. La resistenza alla corrosione è elevata, anche in ambiente marino.

L'eutettico Al-Mg<sub>2</sub>Al<sub>3</sub> si ha ad una concentrazione di 35% di Mg in peso ad una temperatura di 450 °C. Per causare la precipitazione di Mg<sub>2</sub>Al<sub>3</sub> (fase b), che ha un reticolo f.c.c., la lega deve essere trattata a temperature tra 200 e 300°C e per un tempo dipendente dalla temperatura scelta.. La precipitazione può essere continua o discontinua, a seconda della temperatura di tempra adottata; quella continua genera una struttura di tipo "Wiedmattatten", la cui dimensione principale decresce all'aumentare della temperatura di tempra e mostra un limitato effetto indurente. La modalità di formazione della fase b è importante anche per la resistenza alla corrosione: per ottimizzarla, essa deve presentarsi in particelle discrete priva di struttura tipo network a bordo grano, da evitare anche perché riduce drasticamente la duttilità.

Serie 6000: (nome commerciale Anticorodal); i principali elementi di lega sono Silicio e Magnesio. Si tratta di leghe da trattamento termico; dopo trattamento termico sviluppano caratteristiche meccaniche intermedie, in generali inferiori a quelle delle leghe della serie 2000.

Presentano buona formabilità, lavorabilità, truciolabilità e saldabilità. Vengono utilizzate per applicazioni architettoniche, telai motociclistici e ciclistici, strutture saldate in genere. Questo sistema costituisce la classe principale di leghe per i pezzi lavorati a caldo e per quelli ricavati da fusione. Esse riescono a combinare alcune caratteristiche favorevoli: buone resistenze meccaniche, sensibilità relativamente bassa alla tempra, buona resistenza alla corrosione. L'indurimento avviene soprattutto per precipitazione del composto Mg<sub>2</sub>Si. Per ottenere prodotti estrusi con questa lega normalmente si mantengono Mg e Si al di sotto dell'1.5% in peso. Il Silicio, infine, aumenta la fluidità del fuso e riduce il coefficiente di dilatazione, come già detto anche per le leghe Al-Si; inoltre aumenta la resistenza alla corrosione intergranulare tipica di questa lega.

Serie 7000: (nome commerciale Ergal); Il principale elemento di lega è lo Zinco, l'elemento che ha la solubilità più elevata nell'alluminio, e con esso forma un eutettico ad una concentrazione del 95% in peso di Zn alla temperatura di 382 °C: così, per quasi tutte le composizioni, si ha solidificazione di una soluzione solida primaria; al calare della temperatura il suo campo di stabilità crolla e si ha precipitazione di Zinco. Generalmente le leghe binari Al-Zn non vengono usate, ma vengono preferite leghe Al-Zn-Mg. Si tratta di leghe da trattamento termico; queste leghe sviluppano le caratteristiche meccaniche più elevate tra le leghe d'Alluminio; lo Zinco aumenta la resistenza e la durezza, oltre a favorire l'autotemperabilità della lega. Le leghe Al-Zn-Mg, trattate termicamente, hanno la più elevata resistenza a trazione di tutte le leghe di alluminio.

Le leghe con le caratteristiche meccaniche più elevate possono presentare sensibilità a tensocorrosione; per questo motivo sono stati sviluppati trattamenti "stabilizzanti" specifici. Presentano buona lavorabilità alle macchine utensili e, nella maggior parte dei casi, scarsa saldabilità per fusione. Vengono utilizzate per strutture aeronautiche e di mezzi di trasporto, ed in generale per parti molto sollecitate.

### 3.4 Lega AlSi10Mg

Le leghe Al-Si contengono dal 4% al 22% di Si e comprendono all'incirca il 90% della produzione in colata di alluminio. Il loro successo si può attribuire all'eccellente colabilità, alla resistenza alle cricche ed in generale all'ottima capacità tecnologica di essere lavorate con le attuali metodologie di colata. In definitiva il comportamento meccanico, a corrosione e tecnologico, le rende leghe dal facile utilizzo industriale. La natura di questi materiali è eterogenea, poiché il contenuto massimo di Si nella matrice di Al non supera l'1.5%, ne consegue che gran parte del silicio costituisce particelle primarie o eutettiche di vario tipo. Poiché la lega commerciale non è mai totalmente pura, le particelle di intermetallici con ferro, rame, magnesio o manganese sono sempre più o meno presenti. Il range in cui il Si può variare è divisibile in tre intervalli: dal 4 al 9% in condizione ipoeutettica; dal 10 al 13% eutettica; dal 14 al 22% iper-eutettica.

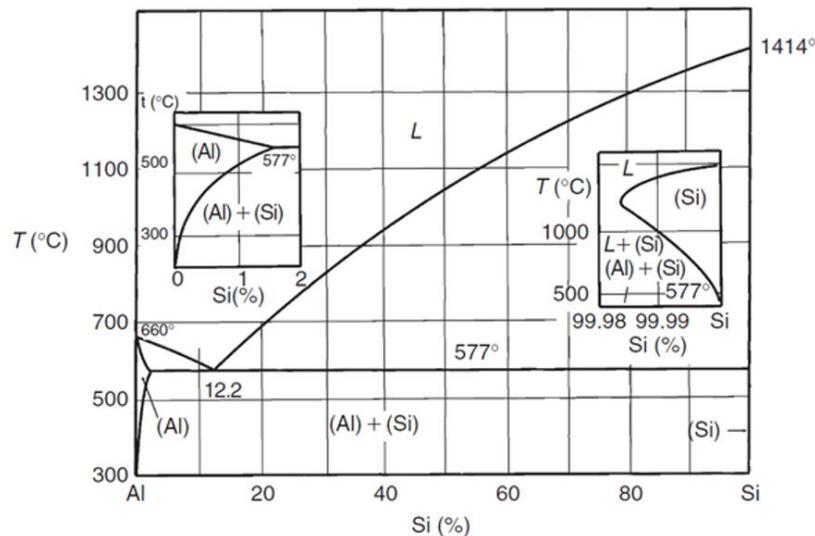


Figura 3.3: Diagramma di fase del sistema Al-Si

Alla composizione eutettica vengono aggiunte percentuali di magnesio nell'intervallo fra 0.2 e 0.6% e solo molto raramente raggiungono l'1%. Il limite minore è definito dalla necessità di raggiungere un discreto indurimento dovuto alla precipitazione di fase  $\beta'$  ( $Mg_2Si$ ). Il limite superiore assicura che questi intermetallici eutettici del magnesio non eccedano nella frazione volumetrica, perché inficino la plasticità della lega. Fra tutti gli alliganti il magnesio è quello che esercita la maggior influenza sulle qualità della lega invecchiata, questo motiva la restrizione a basse concentrazioni del Mg. L'effetto

prodotto fra l'altro dipenderà molto anche dalla concentrazione di altri leganti e dal tipo di percorso termico che affronterà il materiale.

Nei processi di saldatura e quindi anche nei processi a fusione laser, le polveri di alluminio presentano vari problemi:

- I processi additivi basati sulla fusione laser dipendono dalla capacità di distribuire un sottile strato di polvere sulla piattaforma di lavoro, questo risulta difficoltoso poiché le polveri di alluminio sono leggere e con una scarsa fluidità, specialmente in presenza di miscela.
- Nonostante la tecnologia SLM impieghi radiazioni con lunghezze d'onda inferiori rispetto ad altri processi laser, l'elevata riflettività dell'alluminio aumenta la potenza del laser richiesta per la fusione.
- Un'altra ragione per cui sono richieste elevate potenze del laser è dovuta all'elevata conducibilità termica delle leghe di alluminio (comparata con altri materiali metallici usati in additive manufacturing) che consente una rapida dissipazione del calore dalla traccia. Questo fenomeno è più significativo nei primi strati stampati. L'elevata conducibilità termica determina anche la profondità di traccia.
- L'ostacolo principale nei processi di fusione laser delle leghe di alluminio è rappresentato dall'ossidazione. La stabilità termodinamica del sesquiossido di alluminio rende difficile la rimozione del film di ossido presente sulla superficie della polvere metallica. L'ossidazione, insieme alla viscosità dell'alluminio fuso contribuiscono ad incrementare la porosità.

AlSi10Mg è attualmente la lega di alluminio più utilizzata nei processi di additive manufacturing a causa della sua processabilità. Le leghe Al-Si sono molto impiegate per colata a causa della fluidità del fuso e il relativo basso restringimento. Aggiungendo più di qualche percentuale di Silicio all'Alluminio queste proprietà aumentano significativamente, riducendo la tendenza a formare cricche durante la solidificazione. Il range di solidificazione è rilevante per la formazione di cricche a caldo. Più ampio è questo range e maggiore sarà la tendenza a sviluppare cricche a caldo. Leghe come la AlSi10Mg con composizione vicina a quella eutettica hanno un range di solidificazione relativamente basso (40K), mentre leghe come ad esempio Al6061 presentano un delta T maggiore (70K) che viene ulteriormente aumentato dall'alto grado di raffreddamento tipico dei processi di additive manufacturing.

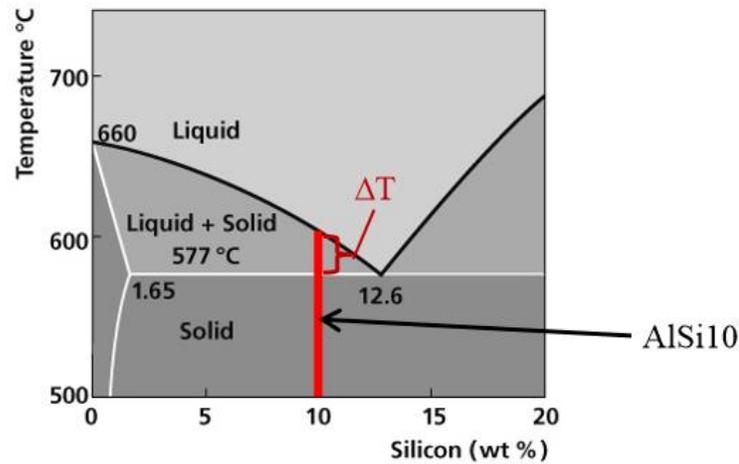


Figura 3.4: Comportamento termico della lega AlSi10Mg

Convenzionalmente i componenti prodotti per colata con questa lega di alluminio vengono spesso trattati termicamente per migliorare le proprietà meccaniche, per esempio mediante un ciclo di invecchiamento artificiale T6. I prodotti realizzati mediante fusione laser sono caratterizzati da una rapida fusione e ri-solidificazione, questo produce una metallurgia e delle caratteristiche meccaniche comparabili ai prodotti per colata trattati T6. Per questo motivo non è raccomandato un ulteriore trattamento di invecchiamento ma piuttosto uno di stress relief (2 ore a 300°C). A causa del metodo di costruzione strato dopo strato, le parti presentano una certa anisotropia che può essere ridotta o rimossa con il trattamento sopra citato.

Nonostante la lega AlSi10Mg consenta una più facile produzione mediante fusione laser rispetto ad altre leghe di Alluminio, bisogna porre molta attenzione ai parametri di processo che vanno adattati in base ai valori di densità e finitura superficiale che si vogliono ottenere nel pezzo finito.

# Capitolo quarto

## 4. Obiettivi e motivazioni del progetto

Questo breve capitolo ha come obiettivo quello di evidenziare l'idea sulla quale si è sviluppato il lavoro svolto per questa tesi.

Una possibile tecnica produttiva per la realizzazione di dissipatori e scambiatori di calore è la saldobrasatura dell'alluminio. Si parte da un profilo estruso sulla quale viene, nel caso di soluzioni a liquido, asportato materiale mediante lavorazioni meccaniche per realizzare il circuito idraulico interno. A questa base viene poi sovrapposto un cover che, mediante brasatura, viene sigillato assicurando la tenuta idraulica necessaria. Con lo sviluppo dell'elettronica di potenza e il continuo progredire della tecnologia, risulta crescente la necessità di realizzare dispositivi più performanti dalle dimensioni ridotte. I sistemi di raffreddamento devono andare in contro a questa necessità e soddisfare i requisiti imposti dal mercato.

Quando le dimensioni dei manufatti diventano molto limitate e le geometrie complesse, le usuali tecniche sottrattive (come ad esempio la tornitura) possono risultare sconvenienti. Lo stesso processo di saldobrasatura tende a risentire dei limitati spessori in gioco, per problematiche connesse alla fase di montaggio e movimentazione del componente nella fase di pre-riscaldamento. I possibili effetti collaterali possono essere la comparsa di porosità nel cordone di saldatura che potrebbero compromettere a tenuta idraulica di un dispositivo e porterebbero inevitabilmente al mancato funzionamento. Una tecnologia alternativa e di prospettiva monitorata da Priatherm per superare questi problemi è proprio la manifattura additiva. I prodotti realizzati con questa tecnologia, essendo monoblocchi e non costituiti da più parti saldobrasate, non presentano problemi di tenuta idraulica o perdite, inoltre è possibile liberarsi dai vincoli progettuali delle tecnologie sottrattive realizzando strutture porose o reticolari che siano in grado di aumentare il rapporto superficie-volume favorendo lo scambio termico.

### 4.1 Descrizione del contesto

Uno dei problemi spesso incontrati dai progettisti elettronici è la necessità di smaltire il calore generato dai componenti elettrici al fine di garantirne il miglior funzionamento. Molte delle moderne apparecchiature elettroniche producono infatti calore per molte decine di watt, in alcuni casi anche oltre 100; se questa energia non viene dispersa nell'ambiente l'aumento di temperatura porta facilmente a malfunzionamenti temporanei più o meno gravi o anche danni fisici permanenti. Il riscaldamento di un dispositivo elettronico è in parte causato dalla temperatura dell'ambiente ed in parte dall'energia elettrica che il dispositivo stesso utilizza o gestisce. La potenza (intesa in senso fisico) che riscalda una apparecchiatura è data dal prodotto della tensione ai capi del dispositivo stesso moltiplicata per la corrente che in esso scorre:

$$P = V I$$

Dove P, V e I rappresentano rispettivamente la potenza (espressa in watt), la tensione (espressa in volt) e la corrente (espressa in ampere). A rigore andrebbe sottratta la potenza meccanica o ottica emessa dal dispositivo ma in genere questi aspetti non riguardano i dispositivi a semiconduttore più comuni. Evidentemente tanto maggiore è la potenza da dissipare, tanto minore dovrà essere la resistenza che il sistema termico dovrà offrire allo smaltimento del calore, cioè la "resistenza termica" dovrà essere la più bassa possibile. Non potendo diminuire oltre certi limiti la potenza dissipata (infatti in molti casi maggiori potenze significano maggiori prestazioni), occorrerà favorire nel migliore dei modi l'allontanamento del calore dal semiconduttore verso l'ambiente esterno, operazione che dovrà essere favorita sia da chi costruisce il dispositivo sia da chi lo usa. La resistenza termica tiene conto del calore trasmesso per conduzione, per convezione e per irraggiamento ed è un'astrazione in quanto differenza di temperatura e calore trasmesso non sono direttamente proporzionali (soprattutto a causa dell'irraggiamento, legato alla differenza del quadrato della temperatura assoluta) e quindi la  $R_{th}$  non è,

$$R_{th} = \frac{T_1 - T_2}{P}$$

a rigore, una costante. E' comunque un'utile astrazione, più che adeguata per descrivere il fenomeno nelle normali condizioni di utilizzo dei dispositivi elettronici, con temperature superficiali che difficilmente escono dall'intervallo compreso tra i 50 e i 150°C.

dove  $T_1$  e  $T_2$  sono le temperature dei due corpi, P la potenza (cioè il calore prodotto nell'unità di tempo) e  $R_{th}$  la resistenza termica espressa in °C/W. Una volta ridotta al minimo la potenza dissipata, l'obiettivo è intervenire sulla  $R_{th}$ , cercando di renderla minima compatibilmente con costi e ingombri. Si ricorre spesso ai cosiddetti dissipatori (in inglese heat sinks), cioè ampie superfici in metallo che hanno il compito di favorire lo spostamento del calore dal componente elettrico all'ambiente circostante.

La riduzione della  $R_{th}$  nella formula permette quindi di diminuire la temperatura raggiunta dal dispositivo oppure, volendo sfruttare comunque la massima temperatura di lavoro, disporre di una potenza dissipabile più elevata.

Per meglio comprendere non solo il meccanismo di smaltimento del calore ma anche come ottimizzare i vantaggi derivabili dall'impiego di un dissipatore, analizziamo brevemente le tre modalità di propagazione del calore:

- Conduzione,  
è quella che avviene all'interno di un corpo o fra due corpi in contatto fra di loro a causa dell'agitazione termica degli atomi, ed è il meccanismo più efficiente di trasmissione del calore. Per tale motivo il dispositivo che produce calore va fissato saldamente a contatto con il dissipatore, che deve essere costituito da un materiale con una elevata conducibilità termica; il materiale più utilizzato grazie al costo contenuto e alla facilità di produrre profilati ottenuti per estrusione è l'alluminio.
- Convezione,  
la convezione è il moto all'interno di un fluido, per cui si sfrutta questo fenomeno ad esempio per asportare il calore del dissipatore (o del componente stesso) attraverso il movimento dell'aria, che può essere naturale (dovuto al fenomeno di espansione termica)

oppure forzato (tramite ventole). Per le elevate potenze, il fluido refrigerante può essere anche un liquido, che scorre in un condotto all'interno del dissipatore e viene poi raffreddato o per sostituzione (acqua corrente) o tramite un opportuno radiatore.

- Irraggiamento, il dissipatore e lo stesso componente irradiano calore nell'ambiente circostante per mezzo della radiazione infrarossa, ed anche questo fenomeno contribuisce allo smaltimento del calore, anche se alle basse temperature rappresenta una frazione trascurabile del totale.

Una esemplificazione visiva dei tre meccanismi di trasmissione del calore è mostrata in figura:

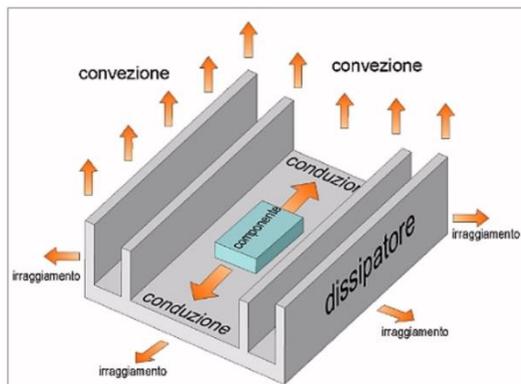


Figura 4.1: meccanismi di trasmissione del calore

Nell'effettuare il montaggio meccanico del dissipatore occorre seguire, se possibile, le indicazioni del costruttore; anche la pressione da esercitare tra dissipatore e semiconduttore è importante: se eccessiva causa infatti deformazioni e stress al dispositivo, se scarsa impedisce una buona conducibilità termica. Normalmente tra il componente ed il dissipatore è applicato un materiale biancastro simile al grasso detto impropriamente pasta siliconica (in inglese silicon grease oppure, più correttamente, thermal compound): si tratta di un conduttore di calore a base di ossidi metallici, zinco in particolare, destinato a favorire il massimo trasferimento termico compensando le microasperità tra le superfici e l'aria presente tra il dissipatore ed il circuito integrato. Questa pasta va usata con molta parsimonia perché da una parte tende a sporcarsi e dall'altra, se di spessore eccessivo, finisce col peggiorare il trasferimento di calore: lo spessore corretto è tale che, premendo con forza componente e dissipatore, non si ha praticamente fuoriuscita di materiale.

#### 4.1.1 Dissipatori di calore ad aria

Solitamente sono configurati a lamelle, per aumentare l'efficienza nella sottrazione di calore (aumento rapporto superficie/volume), e ulteriormente accoppiati con una ventola di raffreddamento azionata da un piccolo motore elettrico (collegato direttamente alla scheda madre) che fornisce un flusso di aria di ventilazione.

Questa categoria di dissipatori si divide in due sottocategorie:

- Dissipatori attivi → Dispongono di un corpo dissipante alettato in alluminio o rame, attraverso il quale viene fatto passare un flusso d'aria generato da una ventola, che ne asporta il calore trasferendolo lontano dal componente. È il sistema di raffreddamento di minore ingombro e più economico, e può essere più o meno rumoroso a seconda dell'efficienza del corpo dissipante, della velocità di rotazione della ventola e dalla qualità dei cuscinetti adottati. E' opportuno precisare che l'uso di una ventola o di qualunque altro dispositivo di questo tipo non "abbassa la temperatura" ma semplicemente diminuisce la resistenza termica del dissipatore: non è quindi possibile in nessun caso usare un dissipatore per ottenere una temperatura inferiore a quella ambiente.

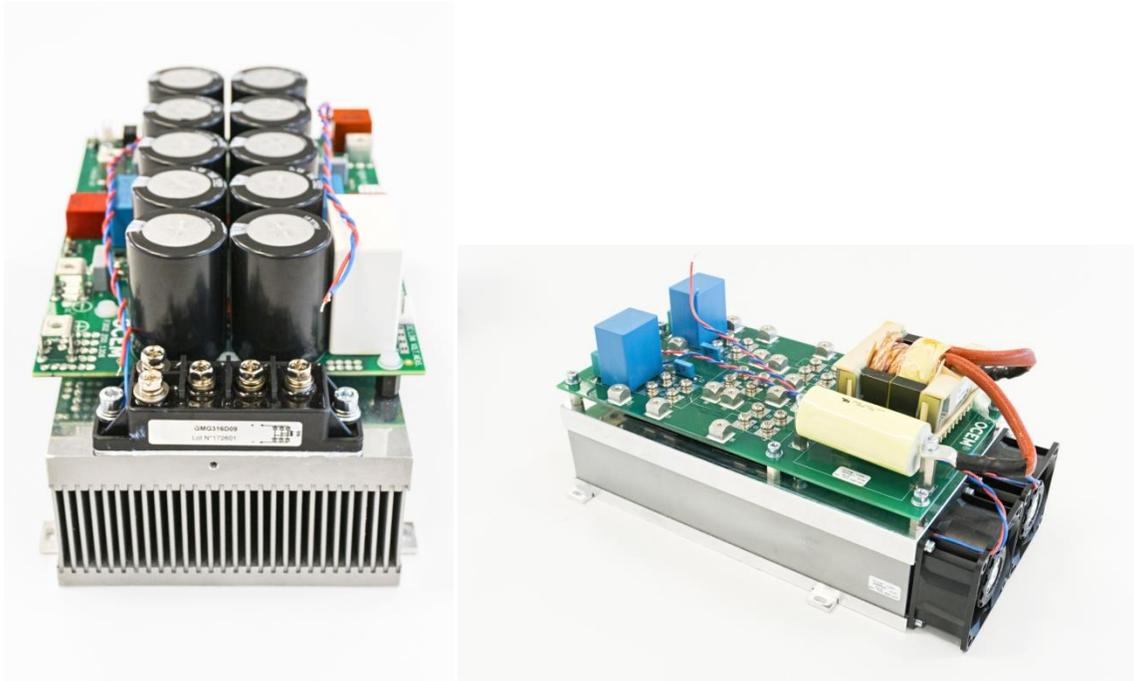


Figura 4.2: Priatherm PT Led

- Dissipatori passivi → Costituiti da lamelle in rame o alluminio molto ravvicinate, tenute insieme da una struttura portante, anch'essa in rame e/o alluminio. Le lamelle possono essere realizzate con procedimenti diversi: pressofusione dell'alluminio, ribattitura o saldatura delle stesse ad un blocco portante, o ricavate per fresatura dal pieno (il più costoso). Il calore viene dissipato grazie alla conduttività termica del metallo utilizzato ed alle correnti convettive che si generano, per effetto della differenza di temperatura, nell'aria intorno al dissipatore. Per questo è molto importante che il dissipatore venga posizionato nel verso giusto: ovvero bisogna fare in modo che l'aria abbia la possibilità di scorrere in verticale lungo le superfici del dissipatore, perciò le alette del dissipatore devono essere orientate in verticale e mai in orizzontale. Inoltre una parte di calore viene ceduta all'ambiente circostante attraverso il fenomeno dell'irradiazione. Qualsiasi corpo che si trovi a temperatura superiore a zero kelvin emette energia sotto forma di radiazione elettromagnetica, riducendo di conseguenza la sua temperatura. In condizioni di equilibrio ciascun corpo emette la stessa quantità di energia che riceve dagli oggetti circostanti (fra cui sono comprese, ad esempio, le pareti della stanza in cui questo si trova). Nel caso del dissipatore, per il fatto che questo si trova a temperatura superiore rispetto agli oggetti circostanti l'energia emessa è maggiore di quella ricevuta. Il contributo dell'irradiazione alla dissipazione è predominante alle basse temperature e si può dire che sia praticamente l'unico mezzo di dissipazione di calore per i componenti elettronici comuni. Per i

dissipatori in genere ha luogo un mix di scambio convettivo e irradiazione che viene raggruppato sotto la definizione di adduzione, a cui si riferiscono i coefficienti che solitamente si trovano in giro. Questo sistema di raffreddamento, a parità di prestazioni è più ingombrante di un analogo sistema a ventilazione forzata, però ha il pregio di essere completamente silenzioso.



Figura4.3: Priatherm PT Sink

#### ***4.1.2 Dissipatori di calore a liquido***

Quando le potenze di esercizio sono elevate o sussiste la necessità di dissipare maggiori quantità di calore, si ricorre a liquidi di raffreddamento. Infatti l'acqua, in assoluto il liquido più usato:

- possiede una capacità termica molto più elevata dell'aria, circa 4 volte a parità di massa (senza dimenticare che un Kg di aria occupa molto più spazio di un Kg di acqua)
- possiede una resistenza termica per unità di superficie molto più bassa, circa 20 volte meno

In condizioni reali utilizzando un liquido stagnante la trasmissione del calore tra dissipatore ed ambiente migliora mediamente di un ordine di grandezza, cioè la resistenza termica diventa dieci volte più piccola; se il liquido è in movimento anche di 50 volte. Questo rende per esempio possibile asportare molto calore da una zona di piccole dimensioni oppure utilizzare dissipatori di piccole dimensioni.

I dissipatori di calore a liquido sono dei veri e propri piccoli impianti di raffreddamento, dove il liquido (un mix di acqua, antibatterico/antialghe, anticorrosivo, eventualmente antigelo e colorante) , viene fatto circolare da una pompa attraverso il waterblock, un blocco di metallo che ha lo scopo di assorbire il calore dal componente da raffreddare e trasferirlo al liquido in circolo, il quale fluendo attraverso un radiatore attraversato da un flusso d'aria generato da una o più ventole, il calore del liquido viene disperso nell'ambiente.

I problemi a cui occorre prestare particolare attenzione:

- E' necessario realizzare un adeguato sistema idraulico in cui è essenziale per ovvie ragioni l'assoluta assenza di perdite di liquido
- Occorre prevedere la presenza di una pompa idraulica che, come tutti gli apparecchi meccanici, può facilmente guastarsi

- E' necessario prevedere uno scambiatore di calore verso l'esterno; infatti l'acqua non fa altro che spostare il calore che deve poi essere rilasciato all'ambiente.

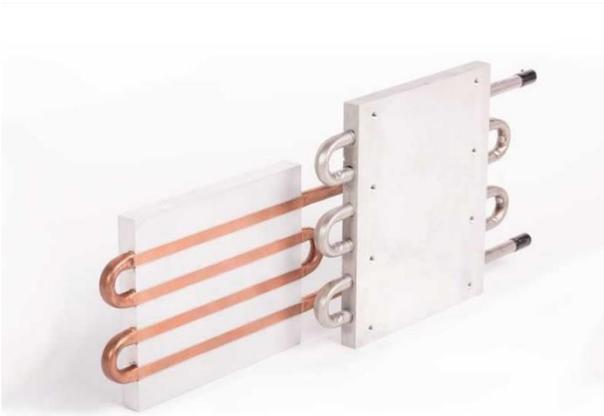


Figura4.4: Priatherm PT Pipe

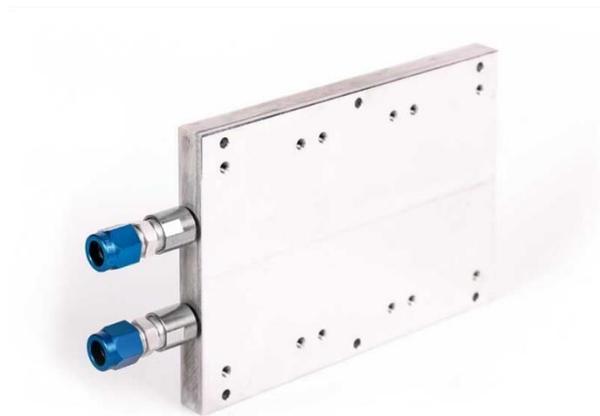
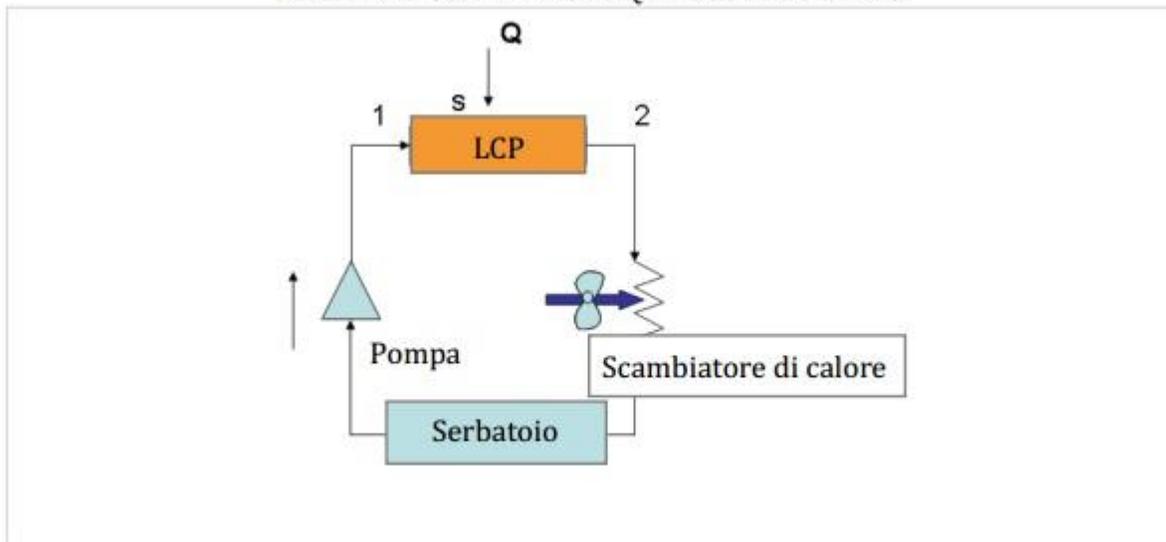


figura 4.5: Priatherm PT Flow

**FIGURA 4.9 SCHEMA DI UN LIQUID COOLING SYSTEMS**



Fonte: Priatherm

# Capitolo quinto

## 5. Progettazione del prodotto

In questo capitolo vengono illustrati tutti gli stadi di progettazione che si sono adottati per la realizzazione concettuale del prodotto a partire dalle richieste dimensionali del cliente. Una pianificazione mirata per l'additive manufacturing, non essendo vincolata dai limiti delle tecnologie sottrattive, permette di ottimizzare il prodotto sin dalle prime fasi della progettazione grazie all'utilizzo di software di nuova generazione e senza ricorrere ai numerosi test sui prototipi.



Figura 5.1: delta di risparmio dovuto all'adozione delle tecnologie sottrattive

### 5.1 Design for additive manufacturing

L'aspetto di maggiore importanza è quello riguardante la riprogettazione del componente in funzione della specifica tecnologia di produzione: date le peculiari caratteristiche legate alla deposizione di materiale strato su strato, il componente deve essere riprogettato in modo tale da sfruttare al massimo i vantaggi della tecnologia additiva. Non ha alcun senso pensare di realizzare in modo additivo dei componenti progettati per essere realizzati mediante processi tradizionali: al contrario, la geometria del nuovo componente dovrà essere ottimizzata per liberarsi dai vincoli tecnologici del processo convenzionale. Altri aspetti da considerare legati alla fase di progettazione di componenti riguardano le caratteristiche meccaniche del componente finale e la possibilità di soddisfare le tolleranze richieste da progetto. Le caratteristiche meccaniche del materiale, prodotto con tecnologia SLM, sono diverse se valutate nel piano di costruzione oppure lungo l'asse verticale di costruzione: questo rende il materiale prodotto anisotropo, aspetto dunque da considerare nella fase di progettazione. Inoltre, il materiale solidificato proviene da pozze fuse di piccole dimensioni e raffreddate molto velocemente, quindi la microstruttura che si genera è generalmente più fine rispetto a quella del corrispondente materiale

prodotto per mezzo di un processo di fonderia convenzionale. Questo comporta che il materiale sarà meno duttile, ovvero sarà caratterizzato da un livello di sollecitazioni ammissibili maggiori nella curva sforzo-deformazione e con deformazioni inferiori a rottura. L'altro aspetto da considerare riguarda le tolleranze, intese come finitura superficiale ed il livello di precisione dimensionale: sono infatti richiesti processi di finitura superficiale a seguito del processo SLM. Questi influenzano i sovrametalli da utilizzare in funzione delle specifiche di prodotto. Il sovrametallo dipende principalmente sia dalla contrazione volumetrica da stato liquido a quello solido sia dal livello di precisione del processo di fusione laser, che non è elevato ( $\pm 0.05$  mm). Infine, come accennato precedentemente, è necessario prevedere l'utilizzo di supporti, che hanno la funzione di sostenere la struttura del componente durante la fase di produzione.

Nel caso del prodotto in esame non erano richieste particolari tolleranze dal punto di vista delle caratteristiche meccaniche, il parametro più importante è la conducibilità termica del materiale ed una eventuale anisotropia non compromette questa proprietà. Alla luce di queste considerazioni è possibile riassumere le principali linee guida di progettazione seguite in sette punti:

1. Dimensione minima ammissibile 0.4 mm;



Figura 5.2: dimensione minima

2. Per non incorrere in eccessive deformazioni è opportuno osservare un rapporto massimo tra altezza e spessore di parete pari a 40:1;



Figura 5.3: rapporto altezza/spessore di parete

3. Il numero ideale di strutture di supporto è zero. Queste parti sacrificali possono essere difficili da rimuovere e possono inficiare la qualità del componente. È consigliato progettare e orientare l'oggetto in modo da minimizzare la quantità di supporti.

4. Necessità di supportare il materiale per angoli superiori a 45° rispetto all'asse verticale;

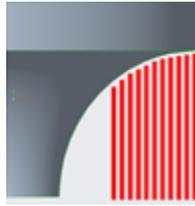


Figura 5.4: supporti

5. Lo strato successivo può essere più ampio del precedente fino ad un massimo di 0.5mm senza dover ricorrere ai supporti;

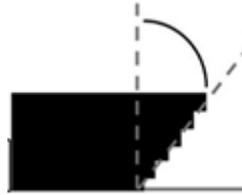


Figura 5.5: superfici a sbalzo

6. Il materiale che si estende da una zona caratteristica ad un'altra può estendersi fino ad un massimo di 2.00 mm senza la necessità di supporti;



Figura 5.6: massima estensione non supportata

7. Per le scritte sui componenti si consiglia il carattere Arial corpo 16.



Figura 5.7: carattere in rilievo

Nel caso di fori o canali interni è necessario prevedere un foro di fuga per la rimozione della polvere non fusa che potrebbe altrimenti causare malfunzionamenti durante l'utilizzo.

Queste linee guida sono da considerarsi valide per la lega AlSi10Mg, per altri materiali i valori possono cambiare anche di molto.

## 5.2 Disegno CAD

A partire dalle regole di design e rispettando gli ingombri geometrici richiesti dal cliente è stato realizzato, mediante il software Solidworks, il primo disegno.

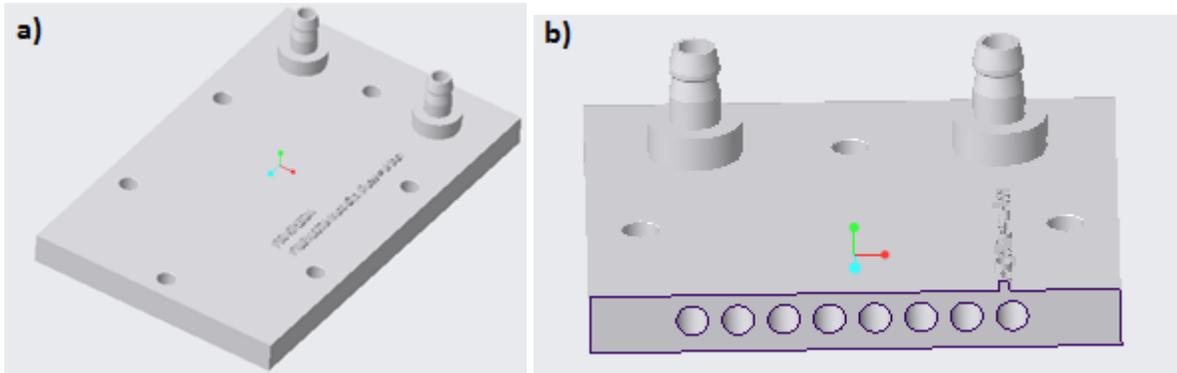


Figura 5.8: a) prima versione disegno CAD; b) vista in sezione

Questa matematica ha permesso una prima simulazione dei costi produttivi che si sono dimostrati elevati rispetto a quelli prefissati. Considerando il comportamento termico di questa geometria (che verrà approfondito nel paragrafo successivo), simulato mediante software, e quindi il meccanismo di dissipazione del calore a partire dalla superficie di scambio termico, ovvero la parete opposta a quella che contiene i connettori, sono state importate diverse modifiche tra cui l'inserimento delle strutture lattice. Le strutture lattice sono strutture reticolari ampiamente utilizzate nella manifattura additiva con lo scopo di ridurre il materiale d'apporto (quindi i costi) e mantenere le caratteristiche meccaniche della struttura piena.

Le strutture lattice consistono nella ripetizione lineare di una cella elementare costituita da più travi (beam) connessi tra loro. Queste strutture, oltre ad avere buone caratteristiche meccaniche, sono interessanti anche per lo scambio termico poiché caratterizzate da un elevato rapporto superficie/volume.

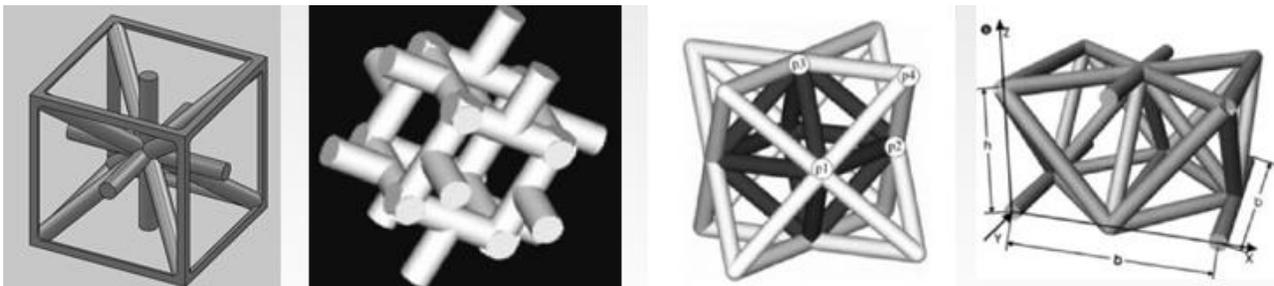


Figura 5.9: esempi di strutture lattice (cella)

Alcuni metodi di progettazione sono basati sull'ottimizzazione topologica e sfruttano software che consentono di sostituire un solido con strutture cellulari che garantiscano resistenza riducendo il peso e il volume dell'oggetto. In letteratura non ci sono molte informazioni o studi sul comportamento termico delle strutture reticolari e la limitata disponibilità di strumenti software di supporto alla progettazione

che prendano in considerazione le caratteristiche termiche di queste geometrie, ne limita la diffusione in ambito thermal management.

Un lavoro di ricerca che però ha influenzato positivamente l'attività di reingegnerizzazione del dissipatore in chiave A.M. sono le considerazioni fatte da M.F Ashby, E. G. Evans etc sul comportamento termico delle strutture reticolari. Questi ricercatori hanno infatti studiato il comportamento di diversi tipi di strutture lattice in convezione forzata e hanno espresso i risultati mediante un indice adimensionale:

$$I_1 = [V_F \rho_F u] \bar{h} / \Delta p k_s$$

Dove:

$V_F$  = viscosità cinematica

$\rho$  = densità del fluido

$u$  = velocità del fluido

$K_s$  = conducibilità termica del solido

$\Delta p$  = perdite di carico

$h$  = coefficiente di trasferimento termico

Per ogni cella, quando lo spessore è specificato, questo indice esibisce un massimo,  $I_1^{\max}$ , con un'associata densità relativa. Pertanto, per ogni cella, usando  $I_1^{\max}$ , c'è un'unica relazione tra la massa strutturale per unità di sezione e la massima capacità di dissipazione del calore. Questa dipendenza è rappresentata nel grafico:

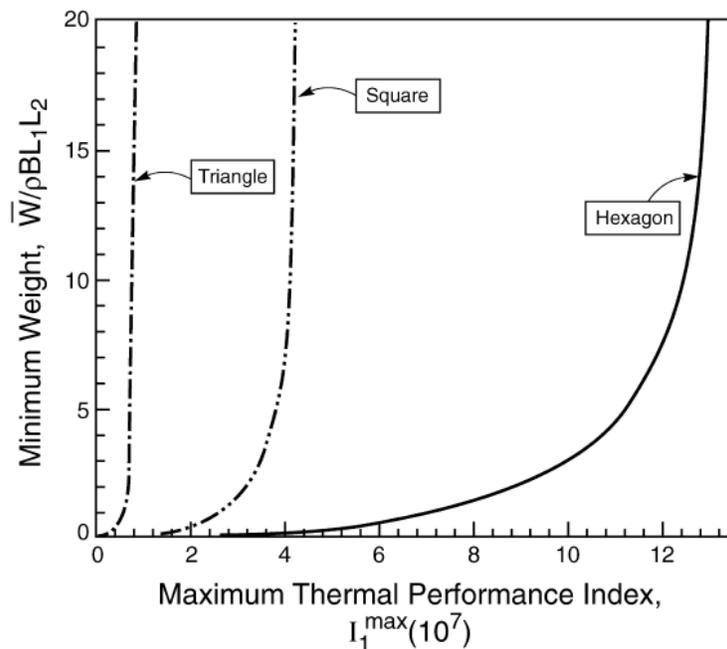


Figura 5.10: comportamento termico di varie strutture lattice

Come evidenziato dal grafico, le celle a sezione esagonale consentono una maggiore dissipazione del calore al minor peso rispetto alle sezioni rettangolari o triangolari. Inoltre, la cella esagonale è l'unica topologia capace di un'adeguata dissipazione per alti flussi di calore.

Nel caso in questione, la superficie di scambio termico è quella opposta ai connettori e, come previsto dalla simulazione termica è necessario predisporre uno spessore di metallo pieno in corrispondenza di tale superficie. Eventuali vuoti della struttura lattice in prossimità della superficie di scambio termico possono influenzare negativamente le performance. Tenendo conto di queste considerazioni sono state apportate al disegno le seguenti modifiche:

- Spessore di metallo pieno pari a 2.9 mm in corrispondenza della superficie di scambio termico
- Importazione di una struttura lattice con cella a sezione esagonale di dimensioni  $x=2.9\text{mm}$ ,  $y=2.9\text{mm}$ ,  $z=2.9\text{mm}$  e spessore beam= $0.6\text{mm}$ ;
- Sezione del canale di raffreddamento a losanga per una maggiore autosupportabilità e per diminuire l'ingombro per la struttura reticolare.

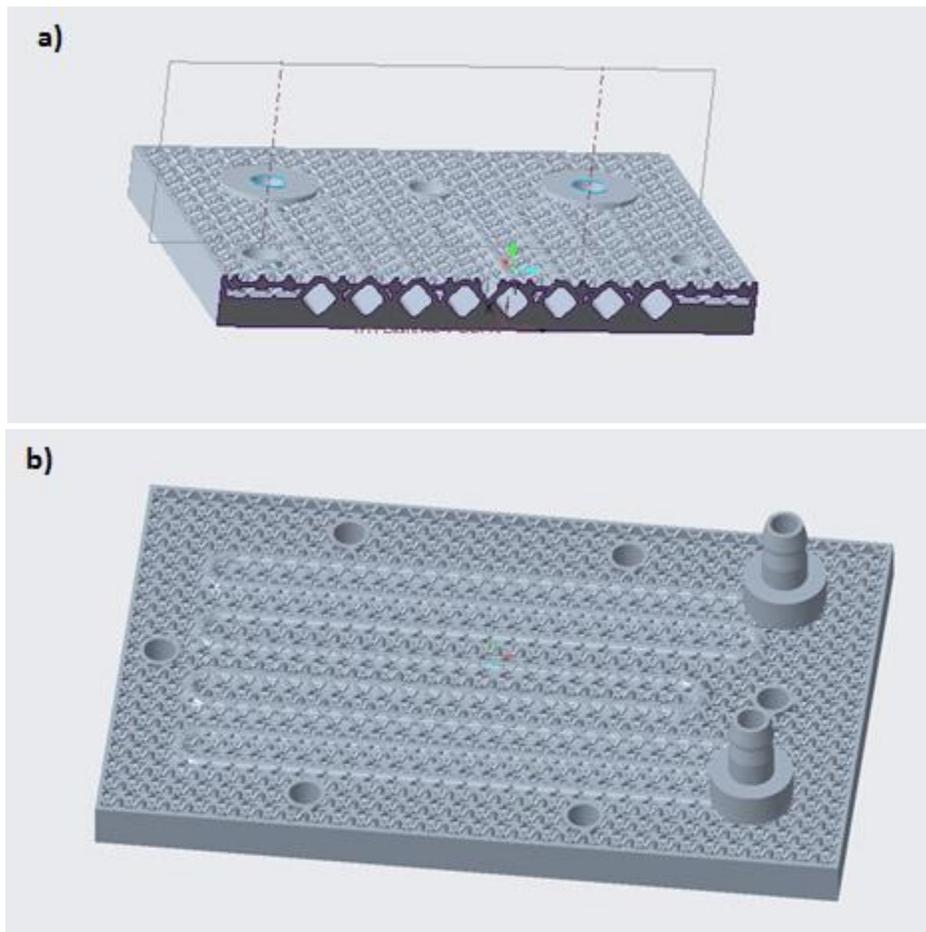


Figura 5.11: a) vista in sezione della versione finale del disegno CAD; b) disegno CAD nella versione finale

## 5.3 Simulazione fluidodinamica

La Fluidodinamica Computazionale (CFD) si occupa dello studio di metodi, tecniche e algoritmi che consentono di simulare il comportamento dinamico dei fluidi in complessi problemi fisici. Tale simulazione consiste nell'elaborazione numerica di sofisticati modelli matematici che descrivono l'evoluzione temporale del fluido attraverso i suoi parametri fluidodinamici fondamentali: velocità, pressione, temperatura, densità. Il ricorso alla simulazione numerica in fase di progetto si rende necessario laddove, la necessità di eseguire previsioni ad analisi su un elevato numero di casi di studio, consente di ovviare, almeno nelle fasi iniziali, alla realizzazione di numerosi prototipi. Nella pratica, questo strumento di simulazione virtuale, è in grado di fornire risposte coerenti con la realtà, in tempi e costi decisamente ridotti rispetto a quanto necessario per realizzare la sperimentazione fisica. È questo infatti uno dei principali motivi che rende la CFD un mezzo estremamente vantaggioso in sede di analisi progettuale: essa permette di eseguire, in maniera relativamente semplice e, in ogni caso, sempre più semplice rispetto all'indagine reale, parametrizzazioni per differenti configurazioni iniziali, sia per geometrie, che per condizioni al contorno, consentendo di valutare le risposte dei componenti in esame a condizioni operative vicine alla realtà fisica. Un altro grande vantaggio della CFD è l'indipendenza rispetto al fattore di scala: questo permette l'eliminazione dei problemi, a volte molto importanti o di difficile e costosa risoluzione, di visualizzazione dei parametri fluidodinamici nella simulazione su prototipi reali. Il modello geometrico da analizzare al computer viene realizzato definendo le superfici che racchiudono il dominio di fluido da esaminare. Ora, mentre nei programmi di analisi strutturale l'oggetto da schematizzare con una mesh è la parte solida, nelle analisi fluidodinamiche ciò che interessa è tutto meno il corpo stesso il quale, in questo caso, funziona da confine per il fluido. Per questo motivo la Fluidodinamica Numerica costituisce uno strumento indispensabile per progettisti e ricercatori nei settori aeronautico, automobilistico, motoristico, elettronico, spaziale, navale, dell'industria di processo, dell'energia e dell'ambiente, dell'industria degli elettrodomestici e della bioingegneria.

Un generico problema fluidodinamico è definito dalle equazioni di Navier-Stokes, le quali, fatta l'ipotesi del fluido come continuo deformabile, sono la formulazione matematica dei tre principi fisici sui quali si basa la meccanica dei fluidi:

- conservazione della massa (equazione di continuità);
- bilancio della quantità di moto;
- conservazione dell'energia.

Da queste ne deriva un sistema di equazioni di bilancio, in forma differenziale alle derivate parziali, le quali si presentano con una formulazione relativamente semplice ma che, a causa della loro non linearità, non ammettono quasi mai una soluzione analitica (una soluzione esatta), ma esclusivamente numerica (una soluzione approssimata con un metodo numerico) e richiedono tecniche di discretizzazione e di approssimazione utilizzando, all'occorrenza, ulteriori equazioni che simulano altri aspetti come quello della turbolenza del flusso e che chiudono il sistema delle equazioni risolutive.

I metodi di discretizzazione della fluidodinamica computazionale sono:

- Metodo ai volumi finiti: è l'approccio standard utilizzato nella maggior parte dei codici commerciali

per la CFD. Le equazioni vengono risolte in un volume di controllo discreto (cella).

- Metodo agli elementi finiti: questo metodo (il cui acronimo inglese è FEM) è generalmente utilizzato nell'analisi strutturale, ma viene applicato a volte anche allo studio dei fluidi laddove i numeri di Reynolds siano dell'ordine delle decine di migliaia.

- Metodo alle differenze finite: è stato il primo adottato nell'ambito della fluidodinamica. Oggi viene comunque usato solo in alcuni codici specializzati.

L'approccio tipico richiede di discretizzare il dominio fluido in celle elementari così da ottenere una griglia di calcolo (anche detta mesh), sulla quale applicare dei metodi di risoluzione iterativi al fine di risolvere le equazioni di Navier-Stokes o le equazioni di Eulero.

Da un punto di vista generale, un codice CFD si struttura in tre grandi blocchi:

- Il preprocessore, attraverso cui il problema fisico viene tradotto in problema matematico. Si definisce il dominio di calcolo in forma discretizzata mediante una mesh, all'interno della quale viene modellata la particolare geometria di interesse. A seconda della tipologia di analisi da effettuare, la mesh può essere bidimensionale (come nel caso dello studio dei profili aerodinamici) oppure tridimensionale (se si devono studiare oggetti 3D quali fusoliere, ali, automobili, imbarcazioni). Vengono poi definite le condizioni al contorno (Boundary Conditions) per il problema e le proprietà del fluido.
- Il solutore, che provvede all'integrazione numerica delle equazioni che regolano il moto del fluido, risolvendo iterativamente il sistema algebrico. Per fare questo, esso implementa il Metodo dei Volumi Finiti (FVM).
- Il postprocessore, attraverso il quale si procede all'analisi dei risultati forniti dal solutore.

Cuore dell'analisi fluidodinamica è quindi la risoluzione delle equazioni del moto del fluido. Esistono tre differenti regimi fluidodinamici: quello più semplice è il regime laminare, che si realizza a bassi numeri di Reynolds. In esso prevalgono gli effetti viscosi, i quali inibiscono i trasferimenti di energia tra le strutture più grandi del sistema e quelle più piccole, impedendo la formazione di effetti di turbolenza. A questo si contrappone il regime di moto turbolento, nel quale invece prevalgono gli effetti d'inerzia, per cui si hanno i succitati trasferimenti di energia tra strutture grandi e piccole. Vi è poi infine la situazione intermedia, alla quale ci si riferisce come "zona di transizione". La maggior parte dei problemi di fluidodinamica coinvolge fenomeni di natura turbolenta, i quali si caratterizzano per l'intrinseca non linearità, per la loro natura caotica e per la forte dipendenza dalle condizioni al contorno.

Nel nostro caso studio, abbiamo inizialmente effettuato una simulazione sulla geometria più semplice per capire l'andamento del flusso di calore a partire dalla superficie di scambio termico.

- Descrizione del modello:

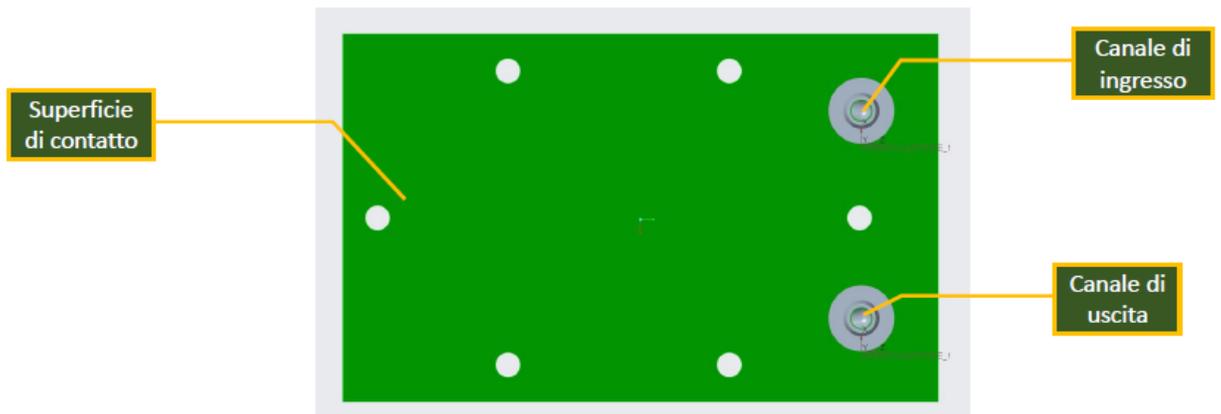


Figura 5.12: descrizione del modello per analisi CFD

- Impostazione simulazione:

Nel caso del prodotto saldobrasato, data la geometria semplice, la fase di meshing non ha suscitato problemi particolari ed è stato possibile procedere direttamente all'impostazione delle condizioni al contorno:

- Temperatura fluido: 25°C
- Potenza applicata alla sorgente termica: 50W
- Temperatura esterna: 23°C
- Portata del fluido: 1L/min
- Conducibilità termica AlSi10Mg: 173 W/m\*K

Caratteristiche fluido: Acqua

- Densità: 998.2 Kg/m<sup>3</sup>
- Viscosità: 0.001016 Pa\*s
- Calore specifico: 4186 J/ Kg\*K
- Conducibilità termica: 0.5991 W/m\*K

- Output simulazione

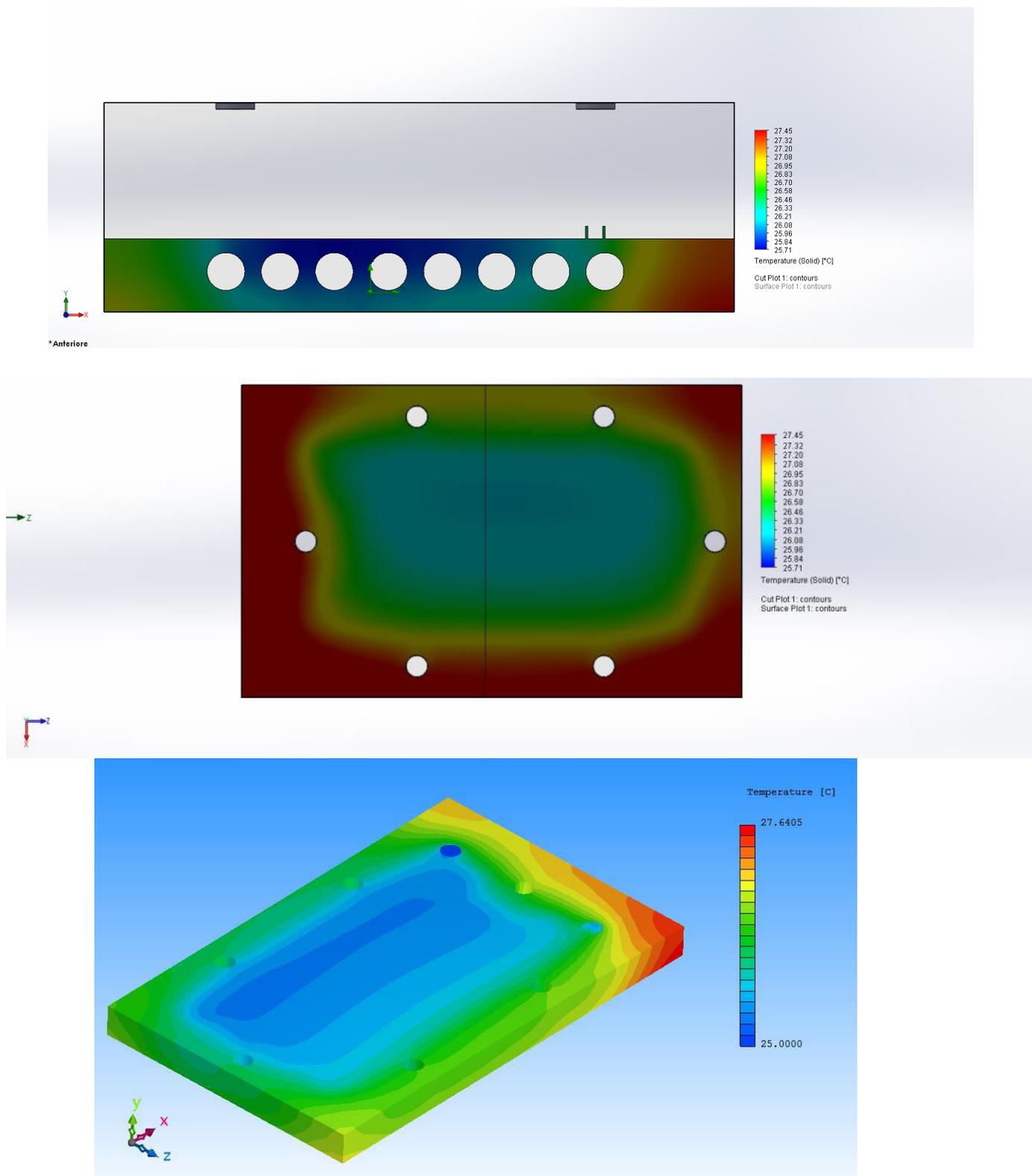


Figura 5.13: output simulazione CFD

Questi risultati sono stati comparati con quelli relativi ad una geometria comprensiva di struttura lattice. Tale geometria rappresentava una situazione ipoteticamente peggiorativa in quanto, gli eccessivi vuoti della struttura reticolare poco densificata, costituivano una grossa barriera termica. Inoltre, come testimonieranno i risultati, lo spessore di metallo pieno pari a 1.5 mm in corrispondenza della superficie di scambio termico, risultava insufficiente.

Indipendentemente dai risultati, ci sono state delle difficoltà nella simulazione del comportamento termico della struttura lattice poiché, una geometria così complessa risulta difficile da gestire, soprattutto nella fase di meshing, dai software CFD più comuni.

Un'alternativa inizialmente considerata, era quella di simulare il comportamento termico di una singola cella, ricavando dei valori di conducibilità termica in base a parametri geometrici (il software CES consente di fare questo tipo di operazione su un numero ristretto di strutture reticolari), ed estenderlo a tutta la porzione di reticolo. Questo procedimento risulta però molto macchinoso e dispendioso in termini di tempo. Fortunatamente nel mercato dei software per analisi CFD ci sono dei programmi, meno comuni, ma in grado di affinare in maniera notevole la fase di meshing consentendo di simulare anche strutture geometricamente complesse come quelle lattice.

In questa simulazione abbiamo utilizzato il software MSC Cradle che ci ha permesso di proseguire come nello studio precedente.

- Impostazione simulazione:

sono state impostate le medesime condizioni al contorno

- Temperatura fluido: 25°C
- Potenza applicata alla sorgente termica: 50W
- Temperatura esterna: 23°C
- Portata del fluido: 1L/min
- Conducibilità termica AlSi10Mg: 173 W/m\*K

Caratteristiche fluido: Acqua

- Densità: 998.2 Kg/m<sup>3</sup>
- Viscosità: 0.001016 Pa\*s
- Calore specifico: 4186 J/ Kg\*K
- Conducibilità termica: 0.5991 W/m\*K

L'operazione più delicata in questa fase è quella di meshing, ma grazie a funzioni specifiche è possibile procedere con diversi gradi di affinamento come mostrato in figura:

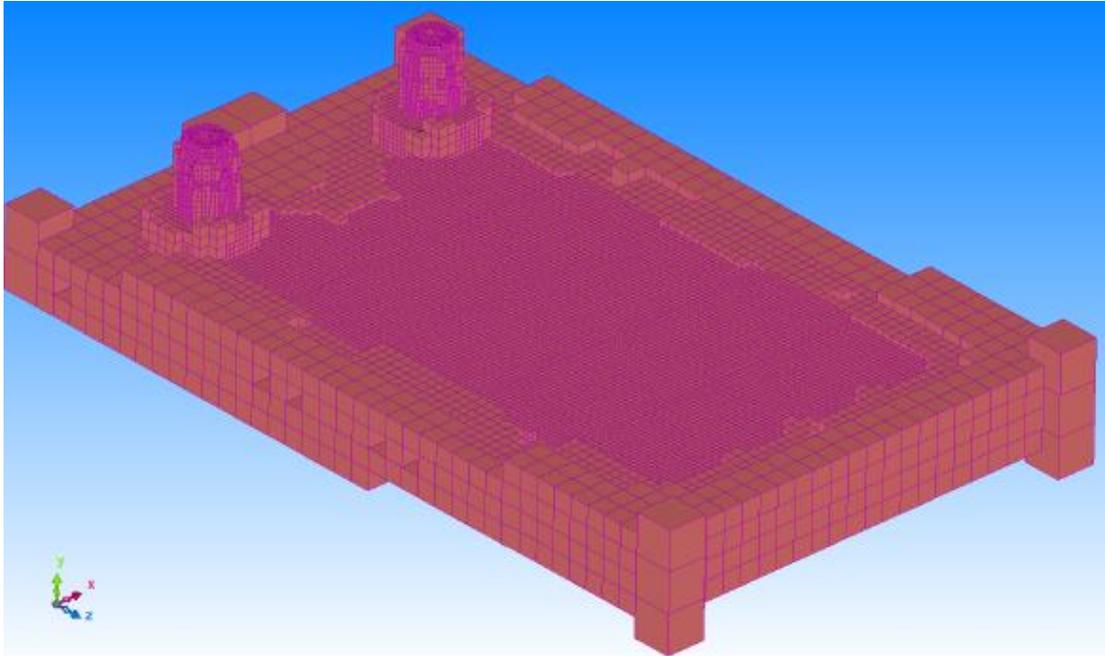


Figura 5.14: fase iniziale meshing

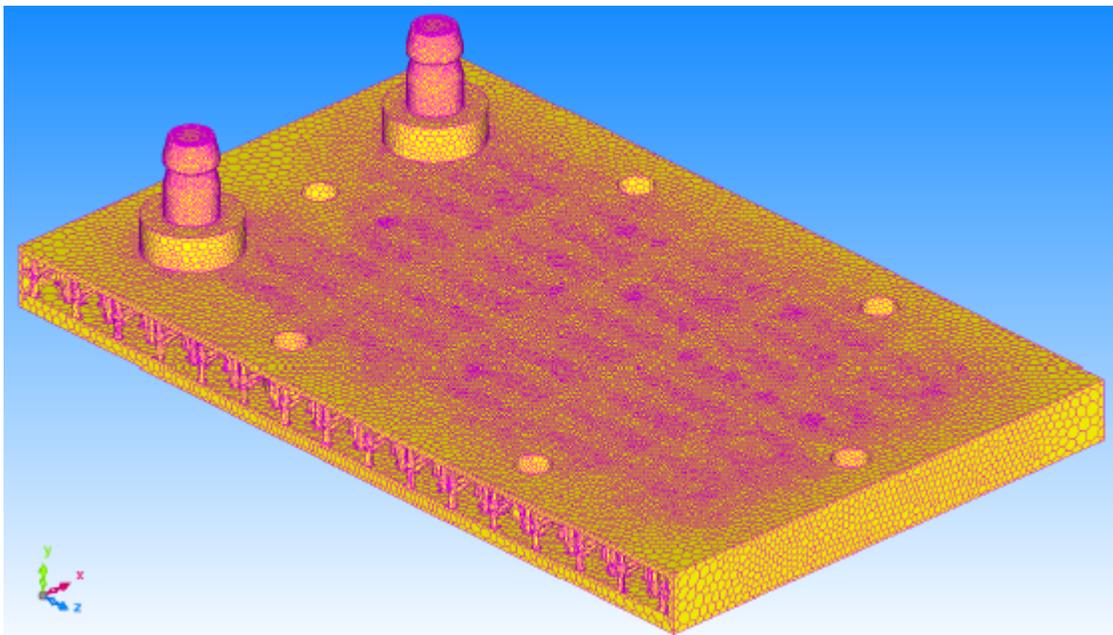


Figura 5.15: risultato della fase finale di meshing

A partire da questo modello, la simulazione procede poi come per il caso precedente e il software, dopo diverso tempo di calcolo, fornisce gli output di risultato.

- Output simulazione:

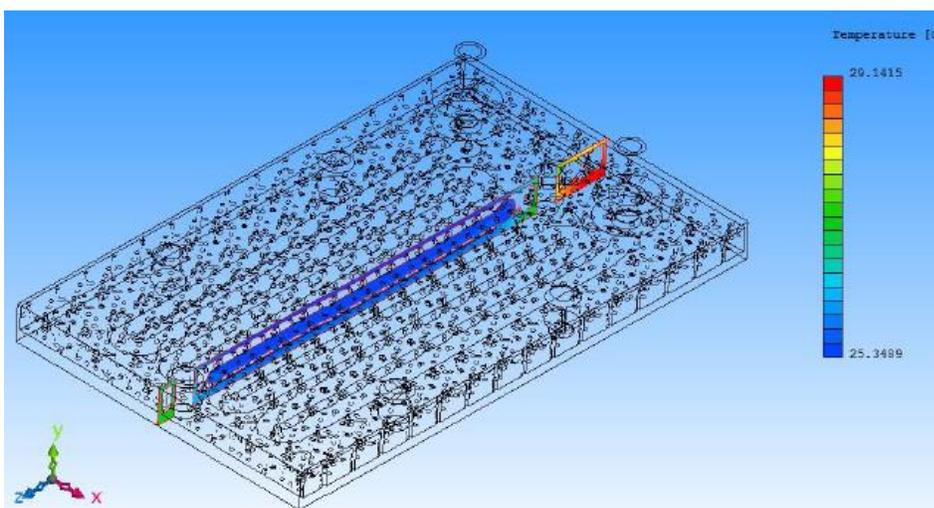
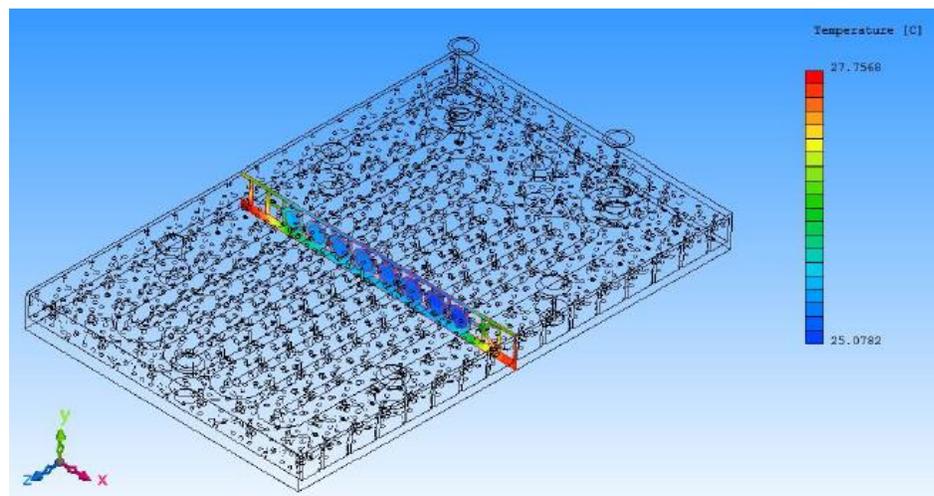
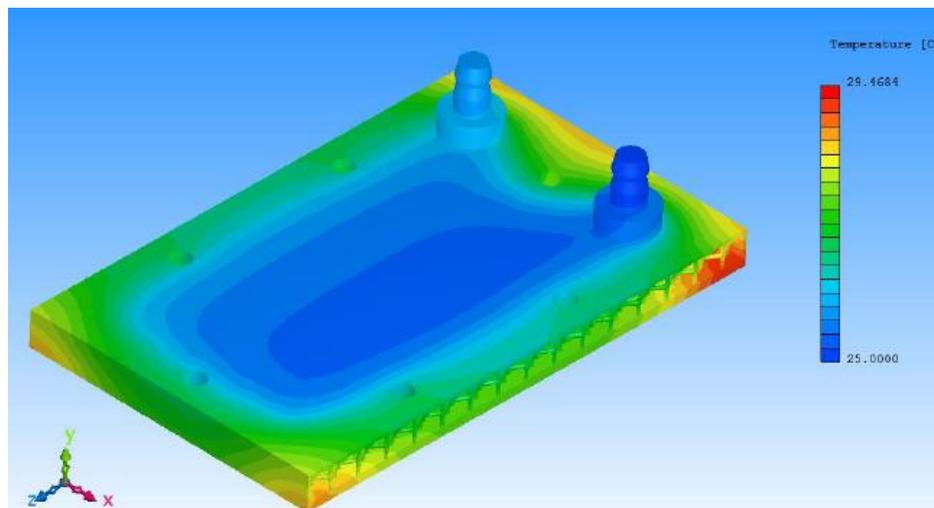


Figura 5.16: output della simulazione CFD condotta sulle strutture reticolari

Dal momento in cui non esistono particolari sollecitazioni meccaniche applicate al dissipatore di calore, non è necessario procedere ad una ottimizzazione topologica, procedura comunemente impiegata nei processi di additive manufacturing, ma grazie a questi software è stato possibile effettuare una ottimizzazione parametrica per capire quale tra i parametri geometrici avesse la maggior influenza sulle performance termiche.

Software di questo tipo consentono anche un'analisi focalizzata sul comportamento termico della singola cella permettendo di “spegnere” di volta in volta i vari beam che la compongono e modificare la struttura geometrica del reticolo in corso di simulazione.

Questa caratteristica viene mostrata in figura:

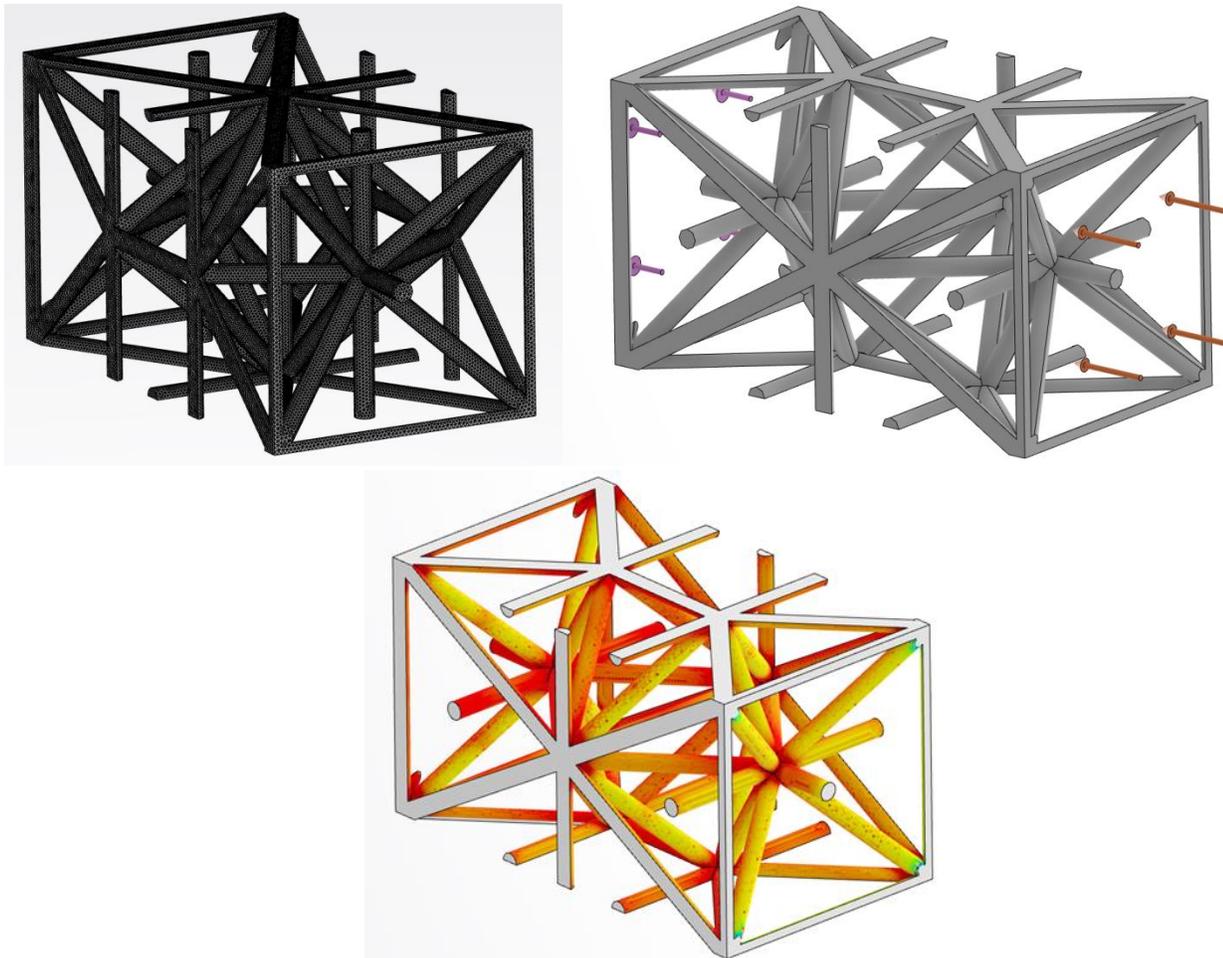


Figura 5.17: comportamento termico della singola cella

# Capitolo sesto

## 6. Caratterizzazione del prodotto

Dopo la fase di progettazione, il passo successivo è quello della prototipazione, durante la quale, mediante la realizzazione di prototipi, si cercano evidenze sperimentali che confermino i risultati delle simulazioni e dei comportamenti previsti nello stadio precedente. Al momento la tecnologia dell'additive manufacturing è compatibile con un ristretto range di materiali, e sebbene allo stato grezzo (polveri) si tratti di leghe già ben note al mondo del thermal management, molto c'è da fare ancora per quanto concerne la loro caratterizzazione termica, metallurgica e meccanica, nello stato as built. In questo capitolo sono raccolti tutti i test effettuati per capire se la lega AlSi10Mg, ampiamente utilizzata nella manifattura additiva, può essere una valida sostituta alle leghe brasabili attualmente impiegate nella realizzazione di dissipatori di calore.

### 6.1 Anodizzazione lega AlSi10Mg

L'anodizzazione (detta anche ossidazione anodica) è un processo elettrochimico non spontaneo mediante il quale uno strato protettivo di ossido si forma sulla superficie del metallo trattato e lo protegge dalla corrosione.

Nel materiale avviene una vera e propria trasformazione superficiale: il metallo nudo reagisce con l'ossigeno che si sviluppa durante il processo di elettrodeposizione e forma ossido di alluminio o allumina

Quando una corrente elettrica fornita da un circuito elettrico esterno (catodo) viene fatta circolare attraverso una cella elettrolitica nella quale l'alluminio immerso in una soluzione acquosa funge da anodo (polo positivo), gli ioni negativi (anioni) formati dalla dissociazione soprattutto dell'ossigeno, migrano, per attrazione tra le cariche opposte, verso l'anodo positivo, l'alluminio, al quale cedono le cariche elettriche che trasportano. Lo strato depositato sulla superficie risulta essere uno strato di ossido di alluminio formatosi tramite processo elettrolitico.

Quando una lega da fonderia Al-Si è anodizzata, l'ossido formatosi contiene particelle di Silicio, questo perché non viene dissolto o anodizzato alla stessa velocità dell'alluminio. Quando il fronte di ossidazione, muovendosi all'interfaccia ossido/metallo, regredendo verso l'interno, incontra particelle di Silicio, la direzione di accrescimento dell'ossido cambia e si muove attorno alla fase inglobandola nello strato di ossido che si sta formando. Queste particelle inglobate di Silicio sono allo stesso tempo parzialmente anodizzate, risultando nella formazione di un ossido che le ricopre. L'anodizzazione del Silicio è possibile grazie alle sue proprietà di semiconduttore che consentono il trasporto di elettroni necessario per questo trattamento. Da evidenze sperimentali risulta che lo spessore di questo strato barriera di ossido di silicio è circa 40 nm.

Bisogna considerare che nei prodotti realizzati mediante additive manufacturing la percentuale della fase silicio che può essere ossidata è maggiore rispetto ai prodotti da fonderia. Infatti, come dimostrato da Zhu et al, la frazione di Silicio che viene ossidata durante l'anodizzazione delle leghe Al-Si è determinata dalle dimensioni e dalle connessioni delle particelle di silicio. Per particelle più piccole,

una maggiore frazione di Si è anodizzata e questo risulta in un aumento della tensione richiesta per il processo elettrochimico.

La microstruttura della lega influenza la morfologia dello strato di ossido. Lo spessore e la struttura porosa dello strato di ossido di un campione realizzato in manifattura additiva è molto differente rispetto ad uno prodotto mediante fonderia o colata. Come discusso precedentemente, a causa della dimensione delle particelle di Si nei campioni di additive manufacturing, una grossa frazione di questo elemento può essere ossidata durante il processo di anodizzazione. Pertanto, una notevole percentuale della carica fornita al processo viene consumata per anodizzare questa fase, ciò risulta in una più bassa carica impiegata per formare l'allumina anodica, realizzando di conseguenza uno strato di ossido più sottile rispetto alle tecnologie tradizionali. Inoltre, il silicio anodizza ad un grado inferiore rispetto alla matrice di alluminio adiacente.

La combinazione di questi fattori è la ragione per cui l'accrescimento dell'ossido nei campioni prodotti con la manifattura additiva è inferiore rispetto a quelli tradizionali.

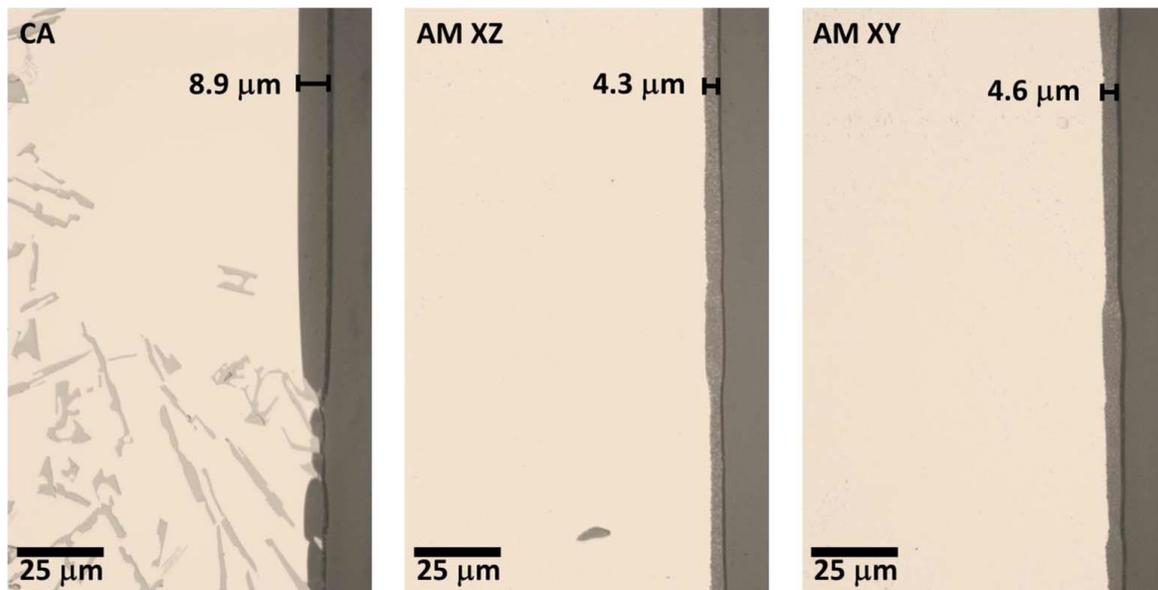


Figura 6.1: spessore dello strato di ossido relativo alla lega di alluminio da fonderia (CA) e della lega di additive (AM)

Come si vede dalla microscopia ottica in figura, lo spessore di ossido è maggiore nel campione in lega da fonderia mentre è più uniforme nei campioni realizzati in additive manufacturing a causa della microstruttura più fine. Nel caso di metodi produttivi tradizionali, invece, lo spessore non è uniforme per la presenza di cavità microscopiche. In letteratura si osserva che l'anodizzazione di leghe da fonderia con particelle di silicio comporta la formazione di cricche e cavità attorno a queste particelle. Questi difetti sono originati da un meccanismo di rilascio delle tensioni. L'espansione volumetrica attorno le particelle, dovuta all'ossidazione del silicio, produce uno stress intrinseco localizzato che è l'origine di cavità e cricche.

Alla luce di quanto espresso è possibile riassumere i seguenti punti:

- È possibile anodizzare prodotti in alluminio realizzati mediante additive manufacturing, ma la tensione utilizzata e la morfologia dello strato di ossido sono significativamente influenzati dalla microstruttura e, quindi, differenti rispetto alle tecnologie tradizionali;

- La convenzionale crescita stazionaria caratterizzata da un potenziale costante nella curva voltaggio-tempo è osservata nelle leghe da fonderia, mentre, nell'additive manufacturing si osserva una crescita continua del potenziale prima di raggiungere uno stato stazionario;

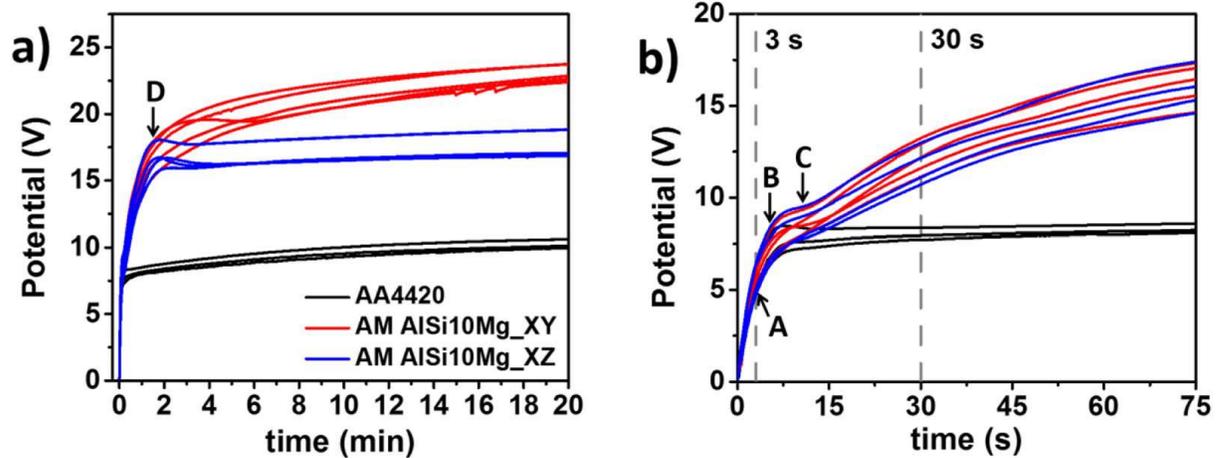


Figura 6.2: andamento del potenziale in funzione del tempo

- Nelle leghe da fonderia sono presenti larghe dendriti di silicio, mentre nelle leghe da additive manufacturing il Silicio è più finemente distribuito. Pertanto, in quest'ultime, il fronte di ossido durante l'anodizzazione è più ostruito dalla rete di silicio e forma uno strato più sottile.
- Il grado di accrescimento dell'ossido nei campioni realizzati in AM è più basso rispetto alle leghe da fonderia;
- Nei campioni realizzati in AM la maggior parte della carica anodica è consumata per l'ossidazione del Silicio;
- Il comportamento di anodizzazione che si osserva nei campioni realizzati in AM è anisotropico ed è dovuto al diverso grado di raffreddamento che si ha nella direzione XZ (direzione di stampa) rispetto alla direzione XY. Questa anisotropia è anche la causa del diverso diametro dei pori del film di ossido.

Una dimostrazione evidente di questo diverso comportamento dei campioni realizzati in lega di AM rispetto a quelli prodotti mediante leghe da fonderia è mostrato in figura:

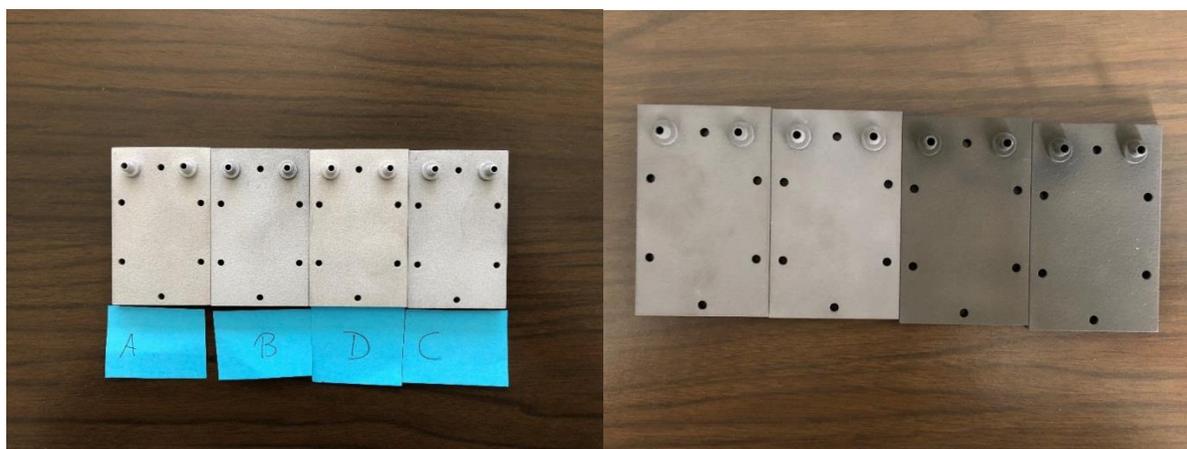


Figura 6.3: campioni di additive prima e dopo anodizzazione

L'anodizzazione sui campioni realizzati in AM è stata eseguita con le stesse specifiche utilizzate anche per i campioni saldobrasati. Il risultato di una anodizzazione incolore nei campioni in AlSi10Mg non è soddisfacente dal punto di vista estetico, i campioni infatti risultano grigio scuro, probabilmente dovuto al diverso ossido formato. Sarebbe utile trovare le giuste specifiche per questa nuova lega. I campioni TT (B e C) risultano più chiari, a dimostrazione del fatto che la microstruttura gioca un ruolo fondamentale

## 6.2 Test di corrosione

Il processo di selective laser melting produce una superficie rugosa che influenza le proprietà dei manufatti compresa la resistenza a corrosione. In letteratura (Olahanmi et al.) sono presenti diversi elaborati nei quali si afferma che lo strato di ossido (passivazione) formatosi nelle leghe di alluminio prodotte mediante SLM è meno protettivo di quello naturalmente formato in aria. Le porosità presenti nei prodotti stampati con tecnica SLM agiscono come siti preferenziali di iniziazione di cricca per meccanismi di corrosione localizzata. Lavori precedenti affermano che il trattamento meccanico di pallinatura possa apportare effetti benefici sulla resistenza a corrosione di manufatti realizzati mediante fusione laser. La pallinatura, infatti, rimuove lo strato di ossido passivo formatosi durante il processo SLM e leviga la superficie del campione trattato. In questo modo il film passivo viene rimosso e un nuovo strato di ossido più protettivo si viene a formare, riducendo, inoltre, la rugosità.

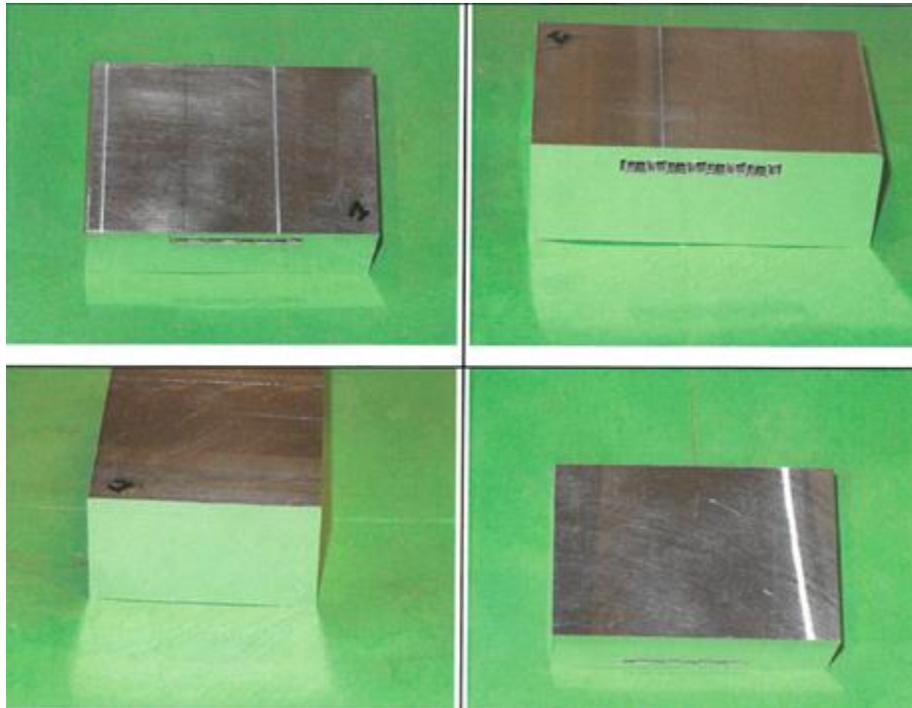
Il più grande svantaggio di questa tecnica è che non tutto lo strato passivo viene rimosso e quindi non tutta l'area della superficie viene ricoperta dal nuovo film più protettivo. Evidenze sperimentali mostrano inoltre che campioni trattati con pallinatura non sono così resistenti a corrosione come quelli sottoposti a trattamenti meccanici di finitura superficiale, resta comunque da considerare che c'è un beneficio rispetto al grezzo del processo additivo.

Il miglior trattamento meccanico per incrementare la resistenza a corrosione e la finitura superficiale di manufatti realizzati mediante SLM è tutt'ora oggetto di studio.

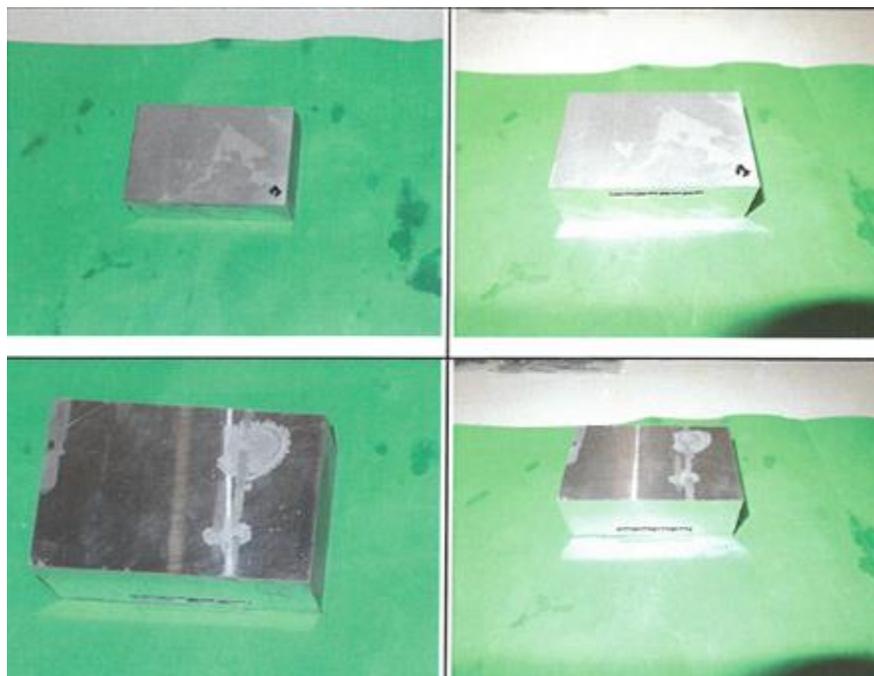
Nell'industria dei dissipatori di calore un trattamento superficiale spesso richiesto per incrementare la resistenza a corrosione è l'anodizzazione.

Di seguito sono presentati i risultati di un test in nebbia salina neutra secondo la normativa ISO 9227 al fine di testare la resistenza a corrosione dei seguenti campioni:

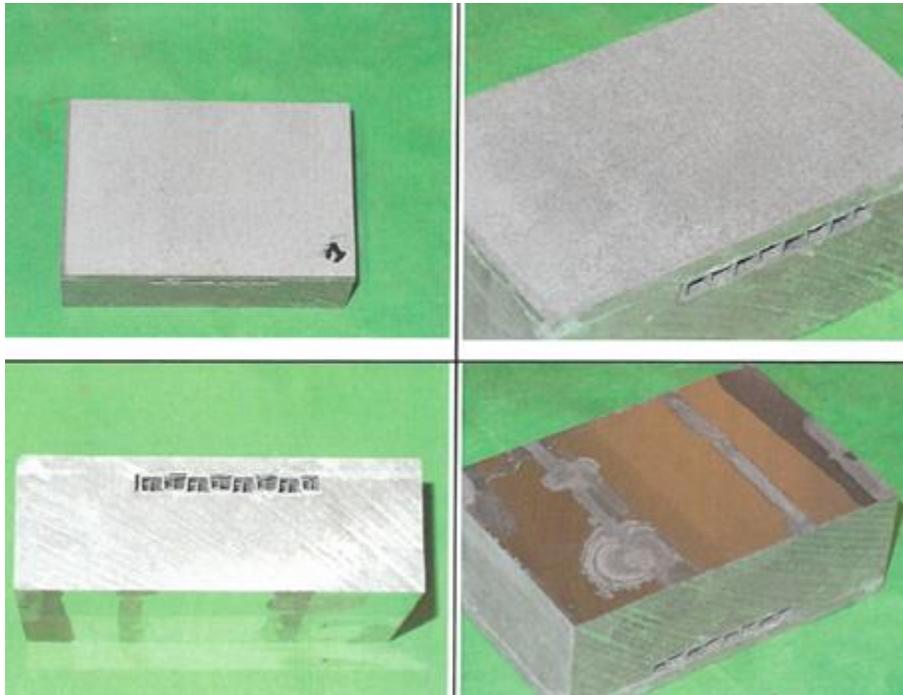
1. Campione in lega Al 6060 + Al 1050 saldobrasato  
Prima della prova



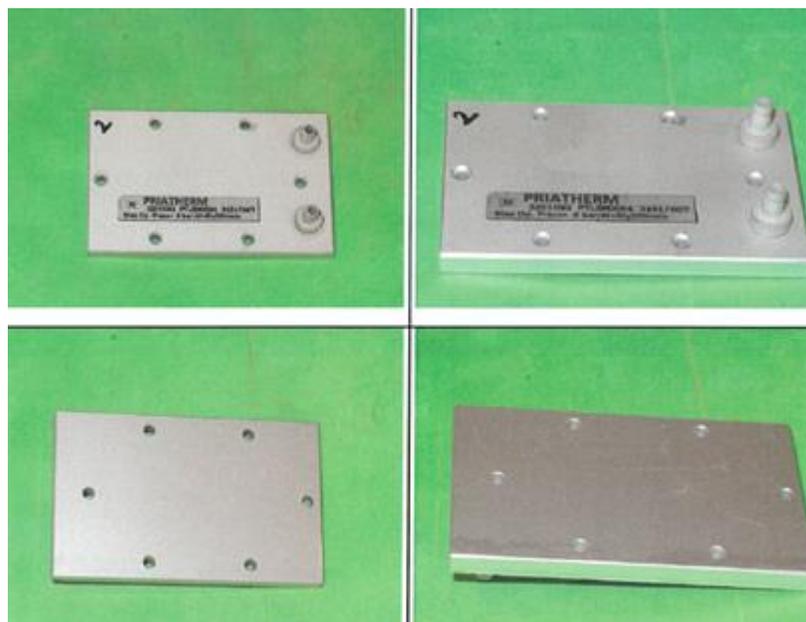
Dopo 250 ore si nota la comparsa di corrosione bianca



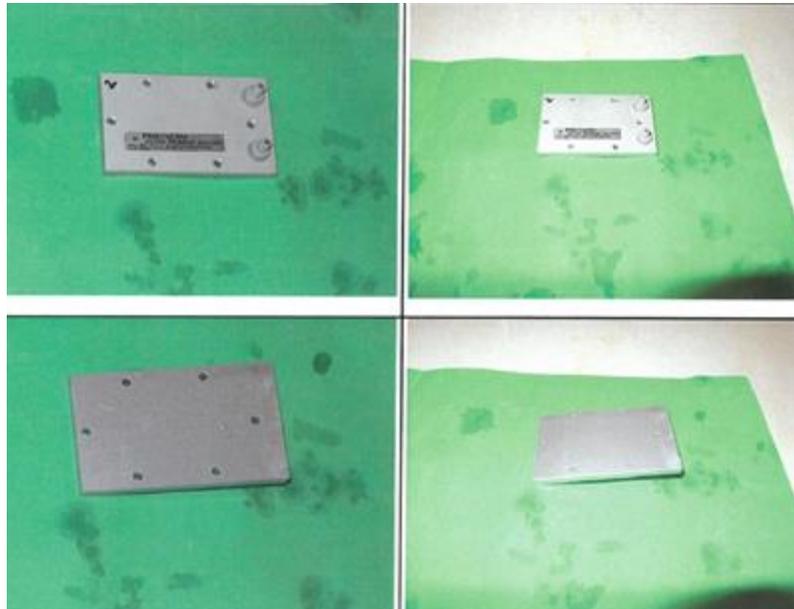
Dopo 500 ore si nota un aumento della corrosione bianca su quasi tutto il campione



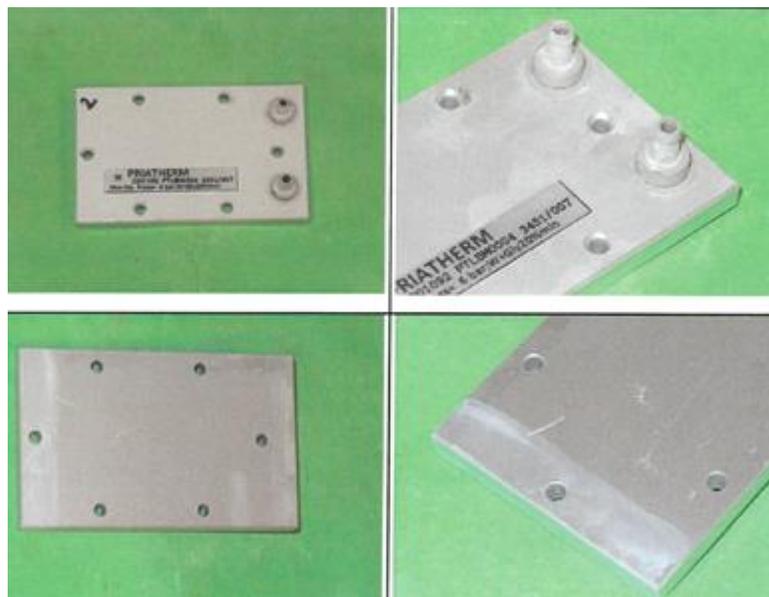
2. Campione in lega Al 6060 + Al 1050 saldobrasato e anodizzato  
Prima della prova:



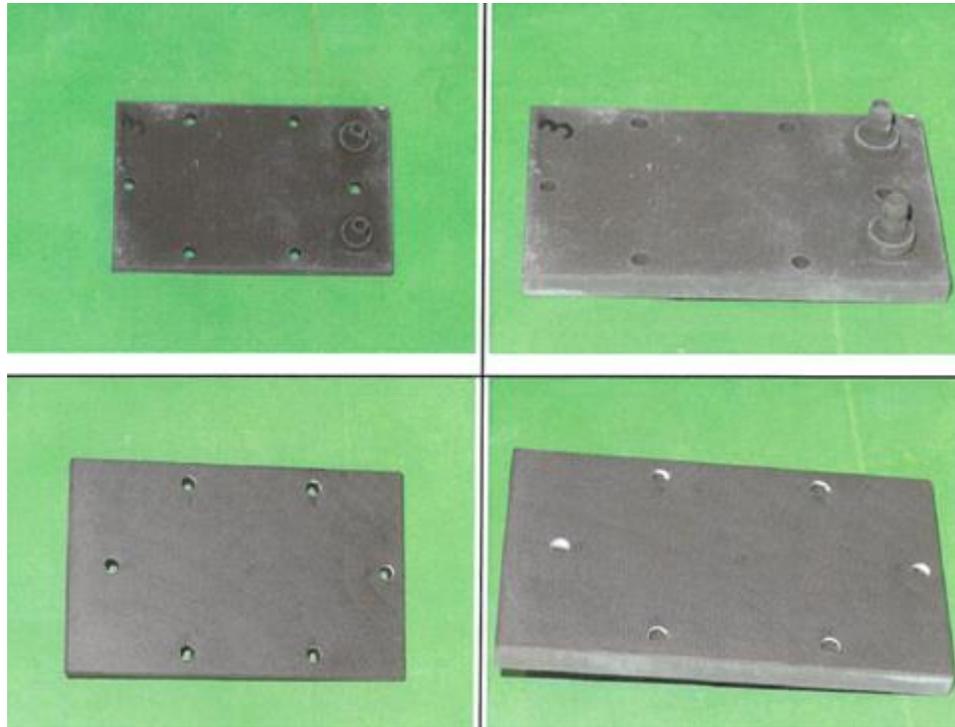
Dopo 250 ore non si notano segni visibili di corrosione



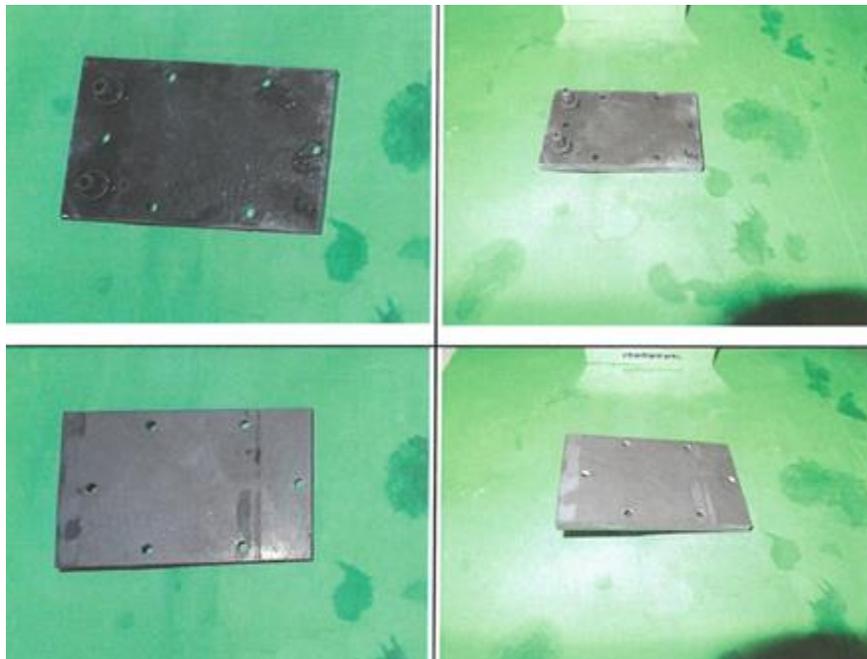
Dopo 500 ore comparsa di poca corrosione bianca sparsa sul campione



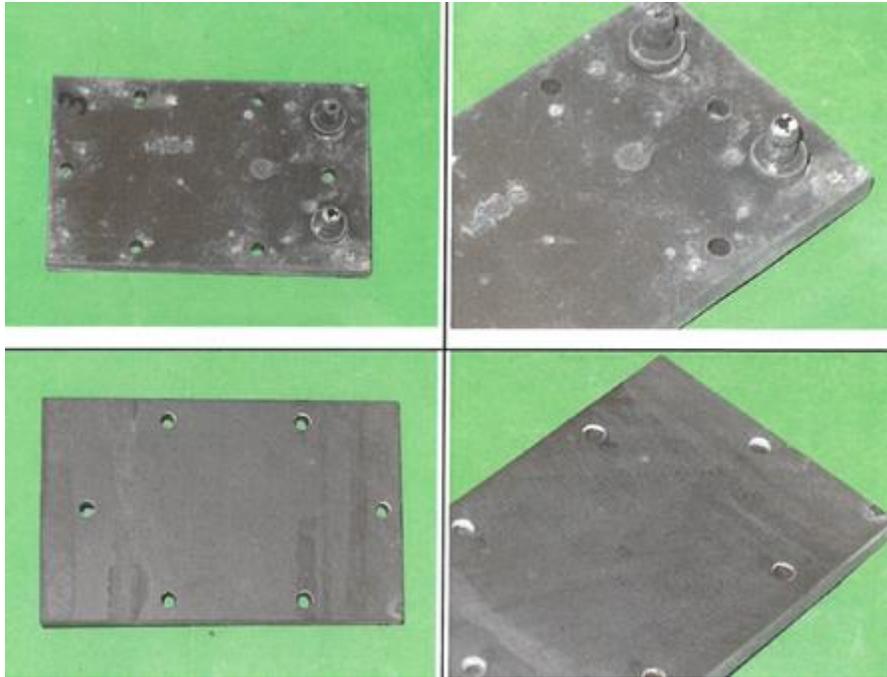
3. Campione in lega AlSi10Mg, anodizzato ottenuto per additive manufacturing  
Prima della prova



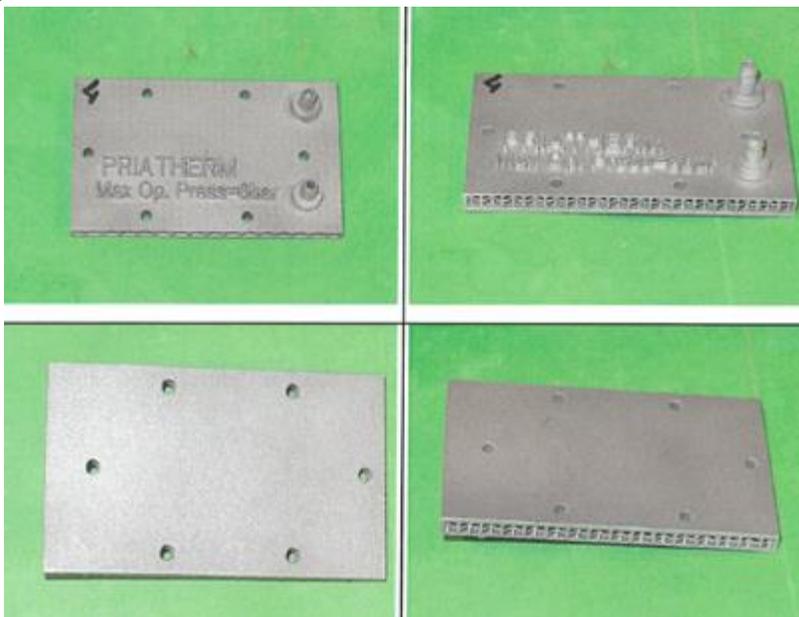
Dopo 250 ore comparsa di corrosione bianca sparsa sul campione



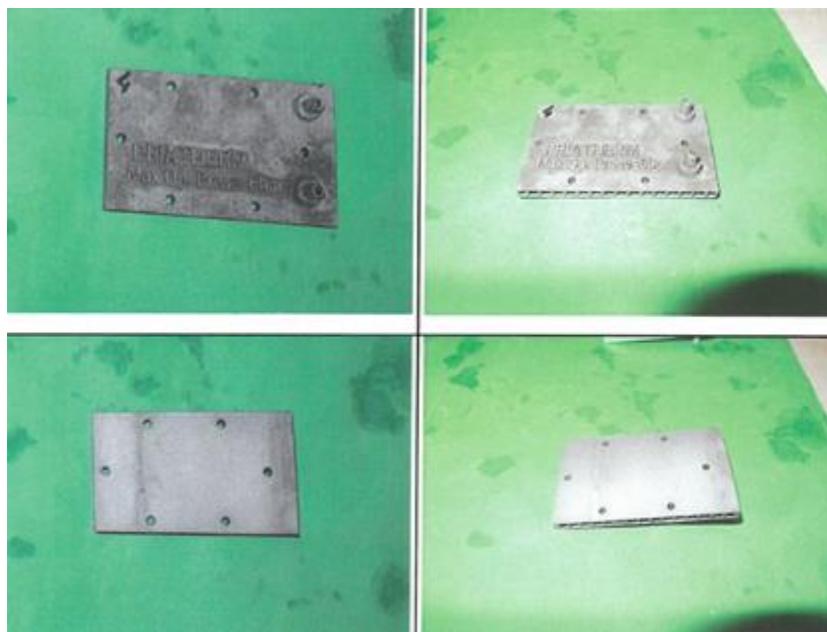
Dopo 500 ore aumento della corrosione bianca su quasi tutto il campione



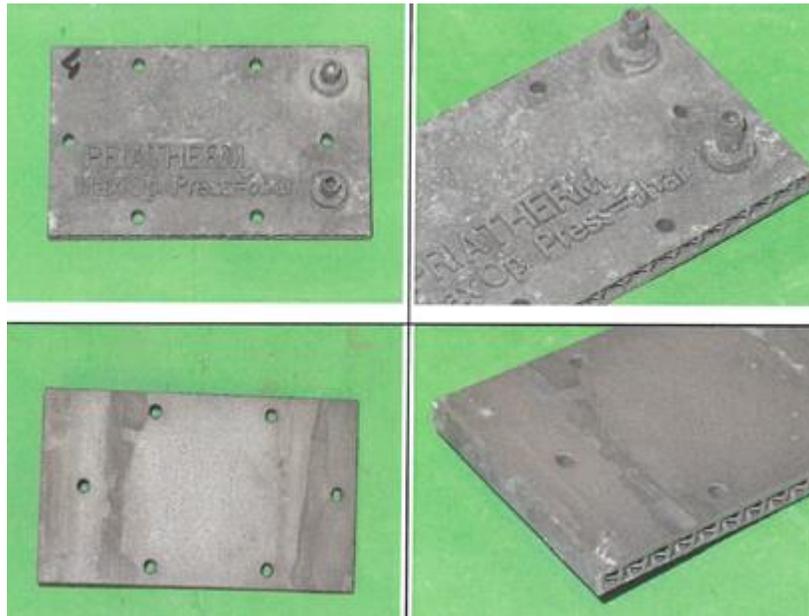
4. Campione in lega AlSi10Mg, non anodizzato, ottenuto per additive manufacturing  
Prima della prova



Dopo 250 ore comparsa di poca corrosione bianca sparsa sul campione



Dopo 500 ore aumento della corrosione bianca su quasi tutto il campione



Dai risultati della prova in nebbia salina emerge che: il campione che presenta minor corrosione è il numero 2 (saldobrasato + anodizzato), che alla fine della prova è affetto solamente da pochi punti di corrosione bianca. Il campione numero 1 (saldobrasato non anodizzato), risulta essere invece il peggiore, poiché colpito da corrosione bianca generalizzata. I campioni 3 e 4 (rispettivamente additive anodizzato e non anodizzato), costituiti dallo stesso materiale, si nota che il campione 3, nonostante l'anodizzazione subita, è solo di poco migliore del campione 4 che invece non è stato anodizzato. Queste evidenze ci portano a concludere che l'anodizzazione così come è stata eseguita ha un maggiore effetto nella lega 6060 e che, senza trattamento di anodizzazione, la lega AlSi10Mg si comporta meglio della lega brasabile non anodizzata. Un'ulteriore evidenza è rappresentata dal fatto che le superfici trattate meccanicamente (spianatura) sono meno affette da corrosione. I risultati confermano le ipotesi formulate a partire dagli studi presenti in letteratura e riportate nel paragrafo precedente.

### 6.3 Analisi porosità

Le performance termiche di un dissipatore di calore sono influenzate, tra i vari parametri, anche dalla compattezza del materiale e quindi dalla sua densità. La presenza di eventuali porosità interne per tanto, oltre che rappresentare un potenziale pericolo per la tenuta idraulica del dissipatore, può costituire un ostacolo alla dissipazione stessa del calore. Nonostante la tecnologia SLM garantisca una elevata densità del materiale, numerosi sforzi sono stati sostenuti per raggiungere una densità del 100%, obiettivo ambizioso se si considera che le uniche forze che entrano in gioco in tale processo sono quelle termiche e gravitazionali, contrariamente a quanto avviene nei processi di stampaggio, che vedono l'impiego di pressioni meccaniche durante la lavorazione. L'assenza di questa ultima categoria di forze, nel processo produttivo, rende più difficile l'identificazione di una semplice metodologia per l'incremento della densità. A questa difficoltà si aggiunge il rischio, intrinseco nel processo produttivo, che bolle di gas restino intrappolate all'interno di un layer durante la lavorazione. Tale fenomeno, che aumenta notevolmente la porosità del pezzo riducendone la densità, può essere dovuto a diverse ragioni, la più frequente delle quali è una non uniforme qualità nel processo di distribuzione delle polveri. La superficie di un layer appena lavorato, come visto nel paragrafo dedicato alle ricerche in ambito SLM, mostra una naturale rugosità, caratterizzata dalla presenza di picchi e valli. Tale proprietà, impedisce al coater di distribuire in modo omogeneo il nuovo letto di polveri; alcune zone, quindi, saranno più spesse di altre e, di conseguenza, potrebbero non essere portate a completa fusione. In presenza di layer particolarmente spessi, anche qualora l'intero strato fosse portato alla temperatura di fusione, le aree di maggior spessore presenterebbero una zona di fusione più profonda, all'interno della quale eventuali bolle di gas non farebbero in tempo a raggiungere la superficie del pezzo, prima che questa si raffreddi, restando così intrappolate nel layer appena lavorato. La figura 6.4 mostra proprio il profilo della zona di fusione in funzione dello spessore del layer in lavorazione; in presenza del layer più spesso si può osservare la formazione di un microporo, dovuto proprio al fenomeno sopra spiegato.

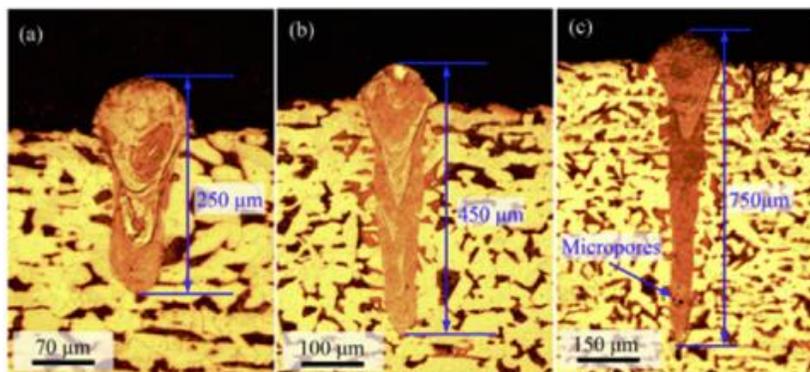


Figura 6.4: Molten pool a spessori di layer crescenti. Se il layer risulta eccessivamente spesso, bolle di gas potrebbero restare intrappolate sul fondo della zona trattata

Pur non potendo sfruttare pressioni meccaniche come nei processi di stampaggio, è possibile far leva su un buon controllo della distribuzione delle polveri per ridurre la porosità del pezzo in costruzione. Un altro fattore di cui si deve tener conto nel processo produttivo SLM è la velocità di passata, che ha una grande influenza sulla densità del prodotto finito, come mostra il seguente grafico (fig 6.5). Per velocità di passata ridotte, la densità del prodotto finito è praticamente indipendente dalla dimensione del layer. All'aumentare della velocità, invece, questa indipendenza viene meno e, come si può notare, layer più spessi presentano una maggior porosità, che si rispecchia in una diminuzione della densità, proprio per le problematiche sopra esposte.

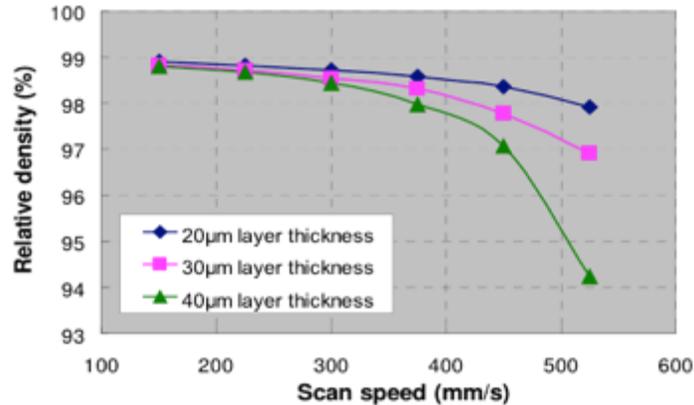


Figura 6.5: Densità in funzione della velocità di passata

Un altro fattore che gioca una grande importanza nella creazione di prodotti ad elevata densità è la strategia di passata. I layer possono infatti essere ottenuti con diversi orientamenti del tragitto del fascio laser, riducendo le deformazioni termiche e contribuendo alla riduzione dell'effetto di balling, ossia alla suddivisione del vettore lavorato in gocce separate.

Infine, notevoli incrementi nella densità del prodotto possono essere ottenuti mediante l'impiego di un processo di Laser Surface Re-melting, (LSR) ripassando cioè un layer appena lavorato o la sola superficie del prodotto finito. In questo processo, utilizzando un input ad alta energia, ottenibile dall'impiego di elevata potenza laser o mediante una ridotta velocità di passata, si osserva un aumento della porosità proporzionale al numero di re-melting per layer; al contrario, in presenza di un input a bassa energia, si avrà una modesta porosità che varierà poco all'aumentare del numero di re-melting. E' quindi consigliabile impiegare laser a bassa potenza o velocità di passata elevata, proprio per evitare una degradazione della densità del prodotto.

Un valido metodo per analisi microscopiche, finalizzate a identificare la posizione di eventuali irregolarità del prodotto finito e misurare in modo accurato la porosità del pezzo, è la tomografia.

Questa metodologia si sta rivelando particolarmente interessante, dal momento che è l'unica a permettere l'osservazione sia delle caratteristiche esterne di un prodotto, sia di quelle interne consentendo quindi una analisi non distruttiva del prodotto finito in studio. La Tomografia permette inoltre di ottenere, simultaneamente, un controllo della qualità dimensionale (ad es. check delle tolleranze di lavorazione) e di prodotto. Il funzionamento alla base della Tomografia impiegata per la metrologia è lo stesso che sottende l'impiego di tale tecnologia per gli altri ambiti di applicazione (quello medico in particolar modo). Una sorgente genera raggi X che si propagano all'interno del pezzo in studio e possono essere assorbiti o dispersi. L'entità dell'assorbimento dipende dalla lunghezza del percorso fatto dai raggi X all'interno del materiale, dalla sua densità e composizione; misurando l'entità dell'attenuazione è possibile definire i materiali attraversati e il loro rispettivo spessore. I raggi X non assorbiti né dispersi vanno a formare un'immagine 2D del prodotto o 1D in base alla metodologia di analisi impiegata; tali proiezioni vengono prelevate a diverse angolazioni e, successivamente, un apposito modello matematico produce il modello tridimensionale a partire da tali input.

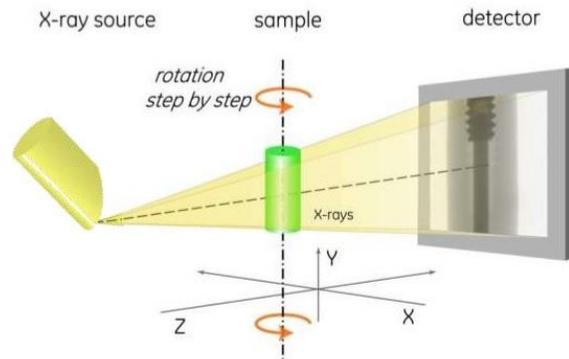
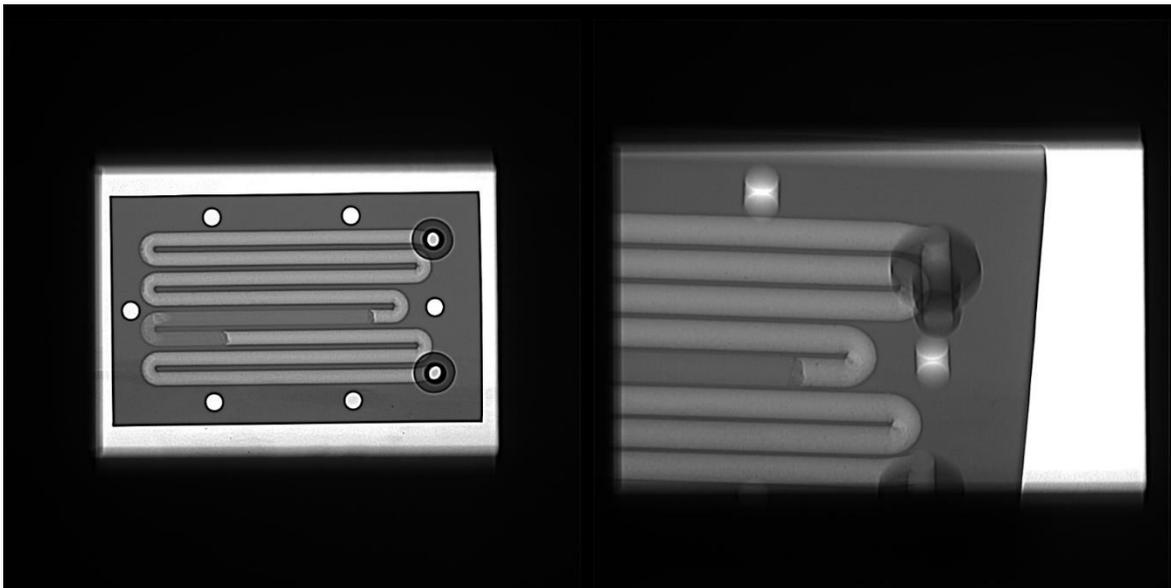


Figura 6.6: schema di funzionamento di una tomografia

Per poter escludere la presenza di porosità rilevanti ai fini dello scambio termico ed effettuare un controllo qualitativo sulla densità dei prodotti realizzati mediante additive manufacturing, è stata condotta una tomografia computerizzata su uno dei prototipi (il prototipo risultava ostruito a causa di una mancata fase di soffiaggio post stampa).



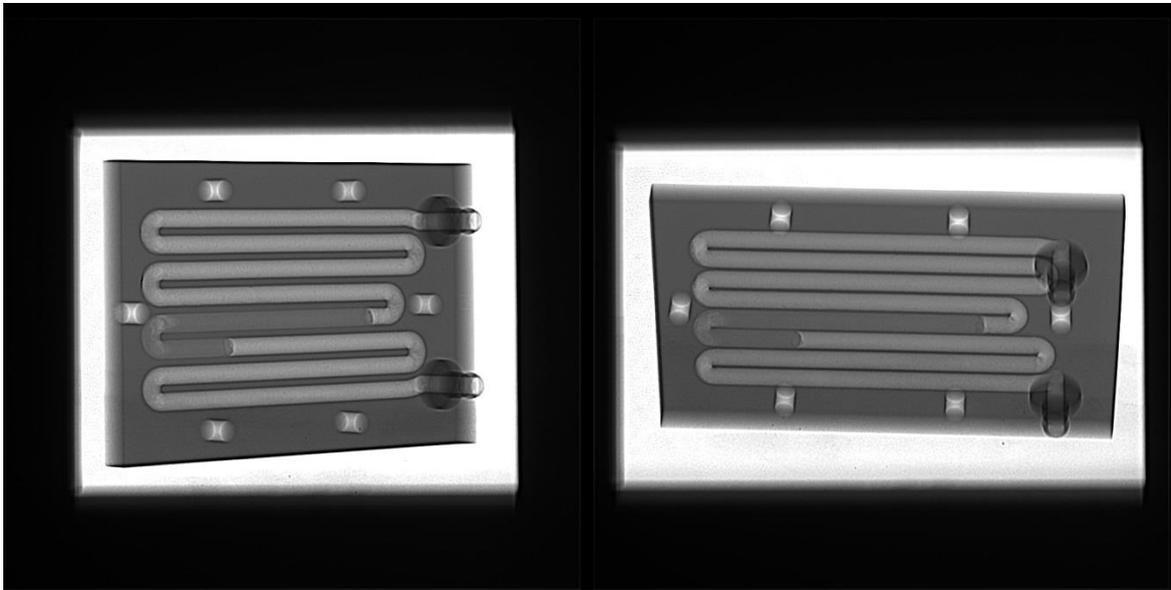


Figura 6.7: esiti della tomografia computerizzata su campione in additive manufacturing

Determination of density acc. DIN EN ISO 3369						F0200 / 1
Temp. [°C]	: 20	Density water	: 0,998	[g/cm <sup>3</sup> ]	Density	: 2,69 [g/cm <sup>3</sup> ]

Gli esiti della tomografia hanno confermato una densità maggiore del 99,8% come riportato dal fornitore delle polveri.

## 6.4 microstruttura e trattamenti termici per incrementare la conducibilità termica

In un tradizionale processo di fusione di AlSi10Mg, la soluzione solida di silicio nell'alluminio si rompe facilmente durante il lento raffreddamento, e il silicio precipita in forma di particelle grossolane come mostrato in figura; una struttura eutettica continua di Al e Si viene generalmente formata insieme alla fase  $\alpha$ -alluminio primaria dispersa.

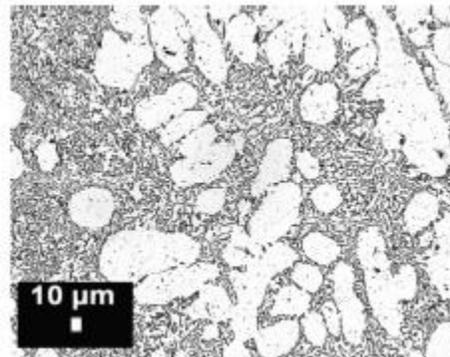


Figura 6.8: microstruttura di una lega Al-Si da fonderia

Il processo di fusione laser selettiva, invece, forma una microstruttura unica nei campioni in AlSi10Mg, dovuta all'estremamente rapida fusione e all'alto grado di raffreddamento del materiale. Come testimoniano studi precedenti condotti su questa lega, si possono osservare due tipi di microstrutture: dendriti di  $\alpha$ -Al e segregazioni di Si. Le dimensioni delle dendriti di Al prodotte mediante additive manufacturing sono molto inferiori rispetto a quelle realizzate con processi tradizionali.

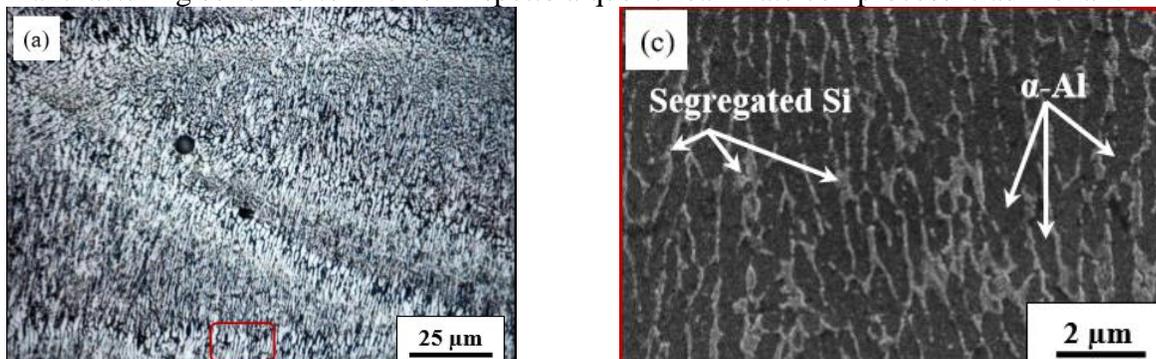


Figura 6.9: microstruttura della lega AlSi10Mg ottenuta tramite AM a due diversi ingrandimenti a) 25 micron; b) 2 micron

Altri due aspetti importanti influenzati dal processo di fusione sono il raffreddamento direzionale e la rapida solidificazione. Osservando la microstruttura ad elevati ingrandimenti si possono identificare quattro zone: l'area denominata come 2 e 3 corrisponde alla zona termicamente alterata dell'adiacente pozza fusa, ciò che vale la pena notare è la fine struttura cellulare-dendritica all'interno della pozza (area1), e la differente dimensione della medesima struttura dovuta al gradiente termico (area 4).

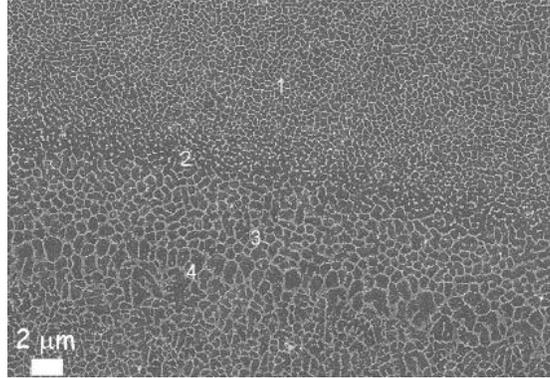


Figura 6.10: evoluzione microstrutturale dovuta al gradiente termico

La solidificazione nei processi SLM della lega AlSi10Mg dipende dal gradiente termico nella pozza fusa e dal grado di accrescimento. Quest'ultimo può essere modificato cambiando la velocità di scansione, l'angolo tra la direzione di scansione e la direzione di accrescimento del materiale solido. Abbassando il gradiente termico e mantenendo costante il grado di accrescimento contribuisce ad ottenere un fronte di consolidamento stabile, mentre aumentando il grado di accrescimento induce alla solidificazione della morfologia dendritica. Il grado di accrescimento e il gradiente termico sono entrambi massimizzati in mezzo alla pozza fusa e decrescono leggermente verso i bordi. L'affinamento del grano può quindi essere ottenuto modificando questi parametri.

La microstruttura dei manufatti in AlSi10Mg realizzati in SLM è diversa da quella di metodi tradizionali ed è caratteristica della tecnologia produttiva e dei parametri di processo utilizzati. Un ruolo importante nell'ulteriore modifica di questa microstruttura è svolto dai trattamenti termici post processo che, come vedremo, consentono di ottenere importanti incrementi sulle performance termiche. Nei processi tradizionali, la microstruttura lega AlSi10Mg viene rinforzata mediante indurimento per precipitazione, che consiste in un trattamento termico di solubilizzazione e invecchiamento artificiale. Applicando lo stesso trattamento alla lega in questione ma processata via selective laser melting, la microstruttura cambia notevolmente. Come puntualizzato da Brandl et al, nel loro studio si evince come la microstruttura di un componente SLM nelle condizioni "as built", cioè al grezzo del processo additivo, costituita da dendriti di  $\alpha$ -Al e segregazioni di silicio, evolva a seguito di un trattamento termico T6 (solubilizzazione accompagnata da invecchiamento) e che particelle globulari di Si eutettico risultino omogeneamente distribuite all'interno della matrice di  $\alpha$ -Al. Appare altresì evidente come tutte le differenze microstrutturali, la diversa dimensione del grano, la zona termicamente alterata e la pozza fusa, vengano drasticamente ridotte.

Durante questo trattamento termico T6 si attivano diversi processi caratteristici: omogeneizzazione della struttura, dissoluzione degli elementi costituenti l'eutettico e gli elementi solidi indurenti vengono portati in soluzione solida. La fase Al supersatura rifiuta particelle di Silicio che iniziano ad agglomerarsi diventando incoerenti con la matrice e cominciano a precipitare.

Evidenze sperimentali mostrano come questi precipitati inizino a formarsi a partire da circa 300°C e che aumentino di dimensioni riducendosi in numero quando la temperatura viene aumentata.

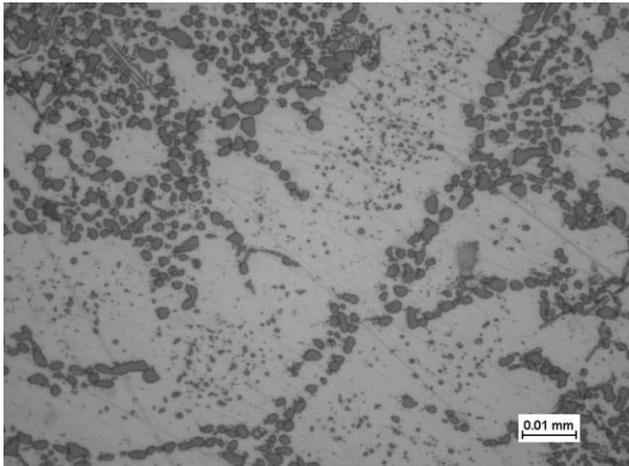


Figura 6.11: Microstruttura AlSi10Mg trattato a 400°C

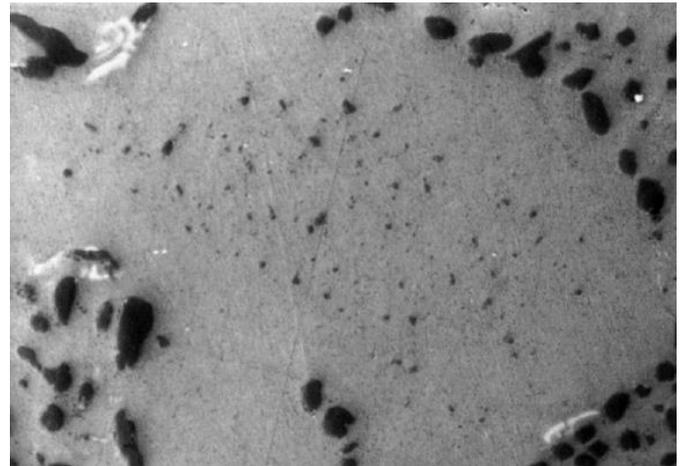


Figura 6.12: precipitati aumentano di dimensione diminuiscono di numero

La microstruttura fine che caratterizza la lega AlSi10Mg SLM richiede tempi più lunghi rispetto alla lega da fonderia per essere stabilizzata ed omogeneizzata, inoltre, il comportamento di precipitazione è molto differente in una microstruttura grossolana rispetto ad una più fine. Il risultato finale della caratterizzazione metallografica in esame con annesso il trattamento termico T6 è mostrato in figura:

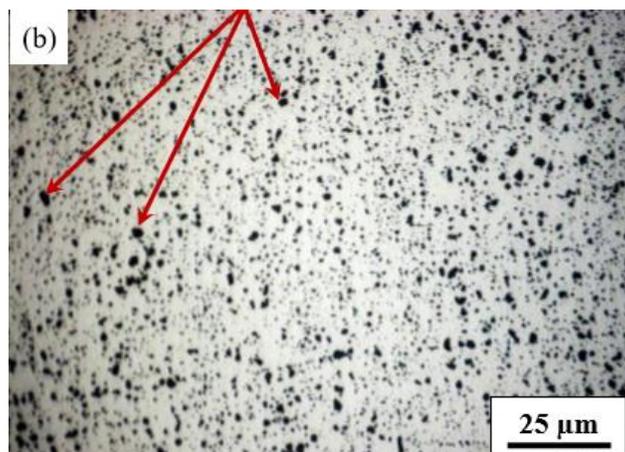


Figura 6.13: precipitati di silicio in forma sferica

È importante sottolineare che non esiste ancora il trattamento termico ideale per la lega di alluminio prodotta con tecnica SLM in quanto sono molti i fattori che entrano in gioco, sia nella fase di processo

che in quella di post-processo grazie ai trattamenti termici successivi. Per quanto concerne invece le performance termiche, oltre alle considerazioni fatte sopra riguardo la microstruttura, è opportuno osservare come viene incrementata la conducibilità termica delle principali leghe Al-Si con l'ausilio dei trattamenti termici.

L'effetto dei trattamenti termici sulla conducibilità termica delle principali leghe di alluminio da fonderia è stato investigato in diversi studi reperibili in letteratura. Le temperature di trattamento termico utilizzate sono prevalentemente 250°C, 350°C e 450/500°C. Il tempo di mantenimento utilizzato per tutte le temperature è tipicamente 3 ore (ad eccezione di 500°C, 5 ore). Una prima evidenza che emerge dai risultati di questi esperimenti è che un aumento del tempo di mantenimento durante il trattamento termico non influenza i risultati. La figura mostra che la conducibilità termica delle leghe di alluminio convenzionalmente utilizzate in fonderia aumenta considerevolmente all'aumentare della temperatura di trattamento. L'aumento è simile in tutte le leghe analizzate: per temperature di trattamento di circa 450°C l'incremento della conducibilità termica è del 32-44%. In tutte le leghe testate, a partire da temperature di trattamento intorno ai 250°C, si osserva la precipitazione di composti dentro ai grani di alluminio. Aumentando la temperatura di trattamento questi precipitati aumentano di dimensione e diminuiscono di numero. Dopo una temperatura di trattamento di circa 500°C la struttura è formata da grani di Silicio uniformemente distribuiti in una matrice di Alluminio. Secondo analisi EDS lo spettro dei precipitati è comparabile a quello della matrice di Alluminio.

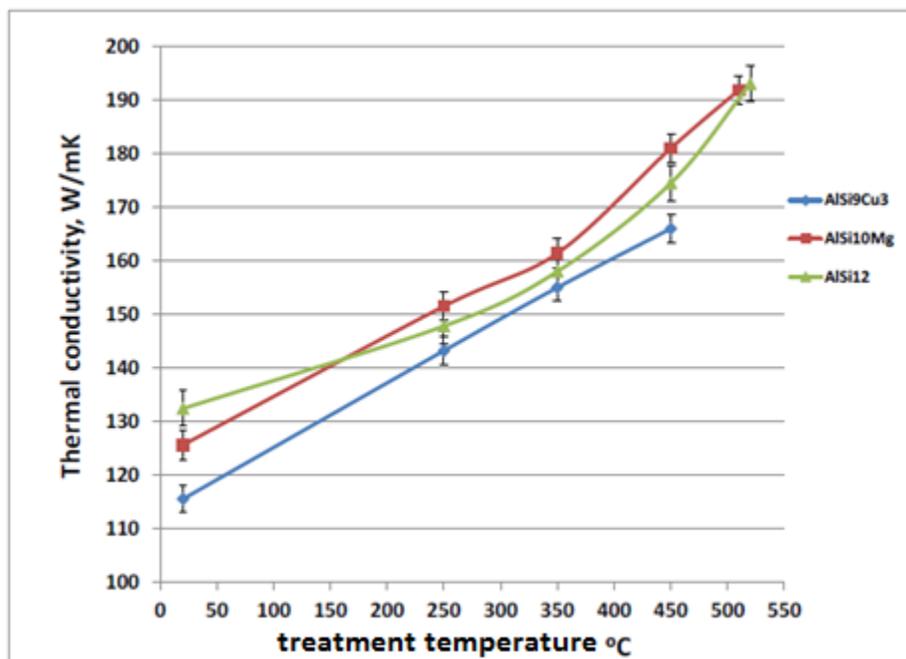


Figura 6.14: Effetto della temperatura di trattamento termico sulla conducibilità della lega

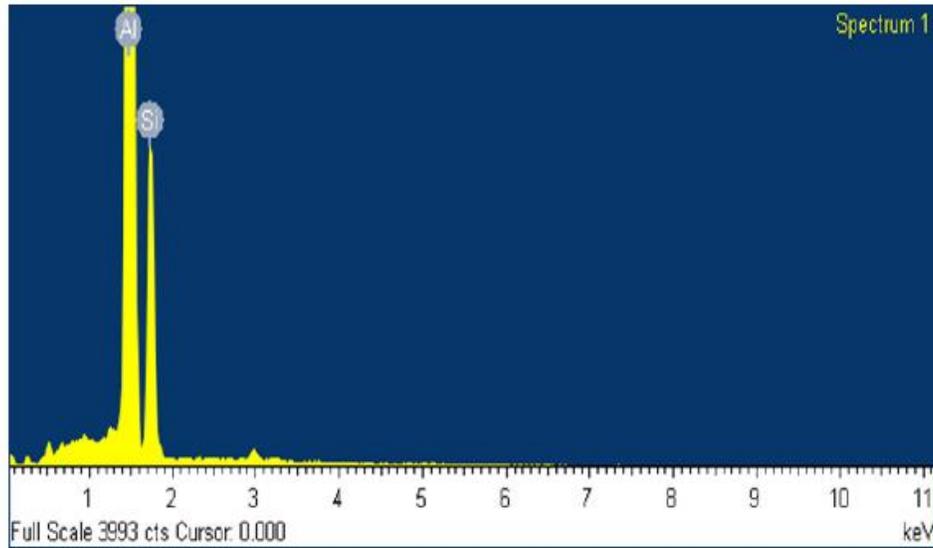


Figura 6.15: spettro di emissione lega AlSi10Mg

Lo spettro di emissione della prova EDS relative alla lega AlSi10Mg mostra che dopo il trattamento termico si osserva la precipitazione del silicio. La precipitazione di questi elementi in lega riduce il loro ammontare in soluzione solida causando un incremento della conducibilità termica. Riferendoci al diagramma di equilibrio del composto Al-Si, la solubilità massima del silicio nell'alluminio è di circa l'1.65% e decresce con il diminuire della temperatura. Quindi, se una lega Al-Si è raffreddata lentamente a temperatura ambiente, il silicio verrà rigettato in soluzione e precipiterà nella matrice. In altre parole, i precipitati osservati in questi elaborati sono il risultato di un trattamento di solubilizzazione seguito da un lento raffreddamento e sono in accordo con le considerazioni teoriche.

Un'ulteriore evidenza di queste considerazioni è rappresentata dai test termici effettuati sui dissipatori realizzati in additive manufacturing oggetto di questo lavoro e che verranno approfonditi nel prossimo paragrafo.

## 6.5 Test termici

Per poter confermare le relazioni teoriche e testimoniare, mediante evidenze sperimentali, gli effetti prodotti dall'impiego di una nuova lega e una nuova tecnologia sulle performance termiche dei dissipatori di calore, sono stati eseguiti dei test termici in laboratorio.

Tutti i test sono stati effettuati con la dotazione mostrata in figura:

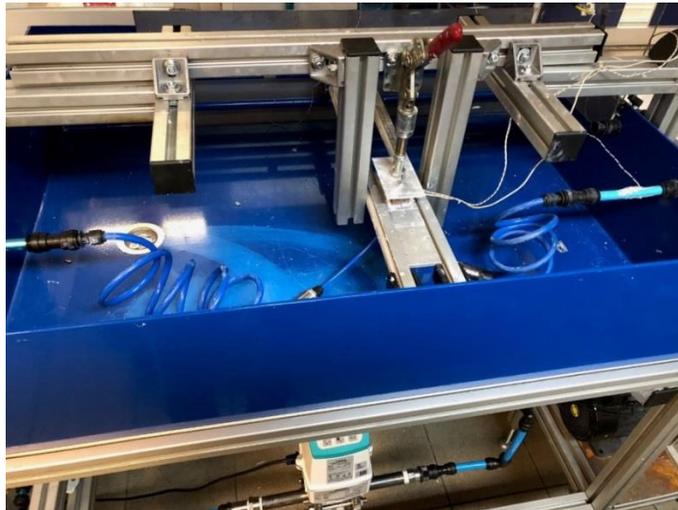


Figura 6.16: dotazione di laboratorio per test termici

Il campione da testare è a contatto con due resistenze in tensione che forniscono la potenza necessaria. La differenza di temperatura viene misurata da due termocoppie, una a contatto con la superficie di scambio termico e una che misura la temperatura del liquido in ingresso al dissipatore. Il misuratore di portata consente di mantenere costante il flusso di fluido durante le varie prove.

Le condizioni mantenute costanti nelle prove sono:

- Temperatura ambientale di 30°C
- Portata di fluido di 2 L/min

La potenza è stata variata nei vari test ai valori di: 50W, 100W, 200W.

I primi test sono stati eseguiti su:

- Campione in lega di alluminio 6060 + Al 1050 saldobrasato
- Campione in lega di alluminio AlSi10Mg, realizzato mediante additive manufacturing e mantenendo la stessa geometria dell'originale, denominato PTLTA0001
- Campione in lega di alluminio AlSi10Mg, realizzato in additive manufacturing, PTLTA0001 + trattamento termico di rilascio delle tensioni (300°C per 2 ore).



Figura 6.17: a sinistra il prodotto saldobrasato, sulla destra i vari PTLTA0001, B e C sono quelli trattati termicamente

POTENZA (w)	saldobrasati		non trattati			trattati	
	n°1 deltaT(°C)	n°2 deltaT(°C)	PTLTA0001(1) deltaT(°C)	PTLTA0001(2) deltaT(°C)	PTLTA0001(3) deltaT(°C)	PTLTA0001(4) deltaT(°C)	PTLTA0001(5) deltaT(°C)
50	7.4	7,2	7.2	6.8	6,7	7.2	6.4
100	15	16	14	14	13	15	12.7
200	28	27	25	23.7	25.2	26	28

I test sono stati ripetuti più volte, sia sui prodotti saldobrasati, sia su quelli realizzati in additive manufacturing in modo da verificare anche la ripetibilità dei dati.

Dai risultati si evince che non ci sono variazioni importanti tra il comportamento dei manufatti saldobrasati e quelli realizzati in AM, inoltre, il trattamento termico di stress relief (300°C per 2 ore) non ha nessun beneficio rilevante dal punto di vista delle performance termiche.

Nonostante la lega impiegata nell'additive manufacturing sia diversa e con una conducibilità termica inferiore rispetto a quella utilizzata nei prodotti saldobrasati, a parità di geometria interna le performance termiche sono confrontabili a parità di geometria.

Possibili motivazioni alla base di questo positivo comportamento garantito dal processo additive è da imputarsi:

- al più elevato livello di pulizia del circuito interno, privo di eventuali residui tipici dei processi di giunzione a caldo;
- ad una rugosità superficiale maggiore dei canali, rispetto ad una superficie ottenuta con tecniche sottrattive, capace di innescare fenomeni di turbolenza utili allo scambio termico;
- ad un elevato livello di compattezza del materiale.
- Il trattamento termico fatto con queste specifiche è funzionale solo all'incremento delle proprietà meccaniche invece il trattamento idoneo potrebbe essere quello descritto nei paragrafi precedenti.

Test successivi sono stati fatti, nelle medesime condizioni, con lo scopo di valutare l'eventuale incremento delle performance termiche nel dissipatore di calore realizzato implementando le modifiche ipotizzate a partire dalle simulazioni fluidodinamiche e i trattamenti termici visti nel paragrafo precedente.

Il test comparativo è stato quindi effettuato nei seguenti campioni:

- Campione in lega di alluminio 6060 + Al 1050 saldobrasato;
- Campione in lega di alluminio AlSi10Mg, realizzato mediante additive manufacturing e mantenendo la stessa geometria dell'originale, denominato PTLTA0001
- Campione in lega di alluminio AlSi10Mg, realizzato mediante additive manufacturing, implementando le modifiche geometriche e il trattamento termico di solubilizzazione a 510°C + invecchiamento.

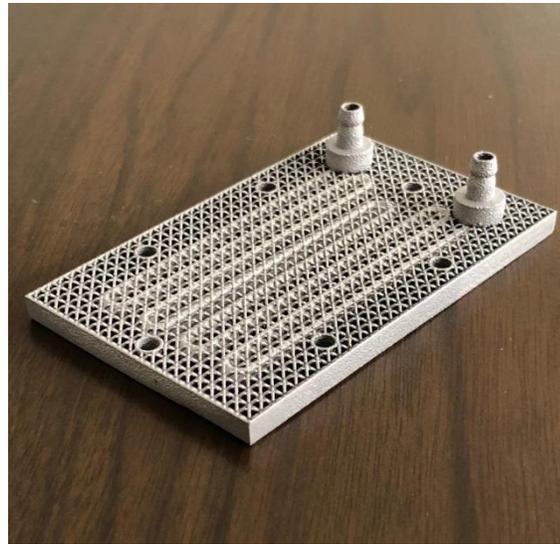
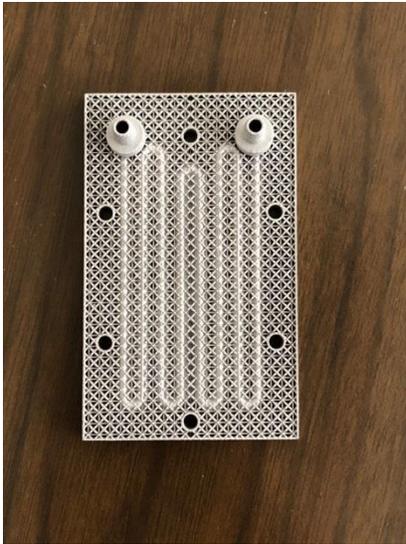


Figura 6.18: dissipatore di calore in AlSi10Mg ottimizzato

	saldobrasato	additive	lattice	lattice+HT
<b>POTENZA</b>	<b>n°2</b>	<b>PTLTA0001(1)</b>	<b>PTLTA0004</b>	<b>PTLTA0004</b>
<b>(w)</b>	<b>deltaT(°C)</b>	<b>deltaT(°C)</b>	<b>deltaT(°C)</b>	<b>deltaT(°C)</b>
50	7	7.2	6,5	5.3
100	16	15	15	11.3
200	27,5	26	27	22.3

I risultati sperimentali confermano quanto previsto dalle simulazioni fluidodinamiche e dagli studi in letteratura. In particolare, l'impiego di una struttura lattice e un trattamento termico di solubilizzazione seguito da invecchiamento, consentono di migliorare le performance termiche di un dissipatore di calore realizzato in additive manufacturing.

# Capitolo settimo

## 7. Industrializzazione dei prodotti SLM

Questo capitolo si pone come obiettivo quello di affrontare alcune tematiche legate all'industrializzazione del processo. Alcuni aspetti, secondari in fase di ricerca, diventano di massima rilevanza nel momento in cui ci si adopera per immettere nel mercato il prodotto. In particolare, si deve tenere conto degli aspetti economici e degli strumenti di supporto necessari per accedere alla tecnologia. A partire da questi presupposti il settimo capitolo affronterà in primo luogo le problematiche relative alle materie prime utilizzate, quindi i processi per ottenere le polveri e considerazioni relative al loro utilizzo nella stampa di manufatti in metallo. Infine l'ultimo paragrafo sarà dedicato alla spiegazione di un modello utile per stimare i costi di prodotti SLM, che verrà applicato alla produzione di dissipatori di calore oggetto della tesi.

### 7.1 Polveri per SLM

Un aspetto molto importante, di cui non si può tralasciare l'effetto, è l'utilizzo e la conoscenza della materia prima utilizzata per SLM: le polveri metalliche. Ci sono molti aspetti che influenzano la qualità delle polveri e quindi il risultato finale del prodotto, anche a partire dai metodi produttivi di queste materie prime.

I processi esistenti per ottenere polveri metalliche sono numerosi e si basano sull'utilizzo di tecnologie molto diverse: elettrolisi, processi chimici, asportazione meccanica e processi di atomizzazione. Con lo sviluppo di tecnologie additive potenzialmente mature per la produzione di componenti finiti, i processi che sono stati identificati per ottenere i migliori risultati sono quelli che si basano sull'atomizzazione. Questi ultimi, infatti, permettono di ottenere polveri con geometria e dimensione più controllata rispetto agli altri processi. I processi di atomizzazione consistono nel separare il metallo liquido in tante piccole gocce che, raffreddandosi, ri-solidificano a velocità molto elevate (102-107 K/s); questo significa che qualunque materiale che può esistere allo stato fuso e qualunque lega i cui elementi sono miscibili tra loro e non volatili, possono essere atomizzati.

Le polveri così prodotte vengono classificate in base alla loro dimensione, alla forma e alla densità, che a loro volta influenzano la capacità di impacchettamento e scorrimento della polvere. Conoscere la distribuzione della dimensione della polvere è necessario per stabilire per quale processo additivo sono idonee: ad esempio, si considerano ottimali le dimensioni tra 45-100  $\mu\text{m}$  per EBM e tra 15-45  $\mu\text{m}$  nel caso di SLM. Tale distribuzione ha infatti un'influenza diretta sulla scelta dello spessore di polvere da depositare per ciascuno strato. Allo stesso modo è di notevole importanza conoscere la morfologia della polvere: polveri sferiche e regolari hanno un miglior fattore di impacchettamento e scorrono in maniera più fluida. In generale le polveri ottenute tramite atomizzazione hanno una morfologia più regolare e sono più compatte rispetto a quelle ottenute con altri metodi.

I più comuni processi industriali con le relative caratteristiche e difetti sono riportati in figura:

Processo	Morfologia finale	Dimensioni tipiche [ $\mu\text{m}$ ]	Difetti
Atomizzazione ad acqua	Irregolare	30-150	Alto contenuto di ossigeno
Atomizzazione a gas	Mediamente sferica (presenza di satelliti)	10-300	Microporosità da gas
EIGA	Mediamente sferica	10-300	Minimi
Atomizzazione centrifuga	Sferica	40-600	Minimi
Atomizzazione al plasma	Altamente sferica	5-200	Minimi
PREP	Altamente sferica	5-100	Nessuno

Figura 7.1: processi industriali di atomizzazione

Un'altra caratteristica che la polvere deve avere per ottenere un prodotto di finale di buona qualità è la scorrevolezza. In generale la densità dei componenti finali aumenta, a parità di condizione di processo, se gli strati di polvere depositati sono uniformi e quindi se la fluidità della polvere è migliore. È difficile correlare la scorrevolezza delle polveri con le altre caratteristiche ma si possono identificare le seguenti regole generali:

- Polveri più sferiche migliorano la fluidità.
- Polveri di diametro maggiore scorrono in modo più uniforme rispetto a particelle più piccole.
- L'umidità riduce la scorrevolezza della polvere.
- Polveri con miglior impacchettamento sono meno libere di scorrere.
- Forze di legame deboli, come le forze di Van Der Waals e forze elettrostatiche, possono causare l'agglomerazione dei singoli grani, riducendo lo scorrimento della polvere

È quindi chiaro che le caratteristiche delle polveri hanno un impatto notevole sulla densità, sulla finitura superficiale e sulle caratteristiche meccaniche del prodotto finito. Nel caso dei dissipatori di calore, non essendo richiesti particolari vincoli di resistenza meccanica, concentreremo questo studio correlando le proprietà delle materie prime con densità e finitura superficiale del manufatto realizzato in SLM.

Ad oggi è noto che per ottenere componenti finali ad alta densità, sia necessario partire da strati di polvere a massima compattazione, che però hanno una minore fluidità. A sua volta la densità della polvere dipende dalla morfologia e dalla frequenza di distribuzione delle dimensioni. Se la quantità di

polvere di dimensioni molto piccole è troppo alta, ad esempio, la tendenza di queste particelle ad unirsi a quelle di dimensioni maggiori diventa dominante rispetto all'aspetto positivo di riempimento dei vuoti. Un primo aspetto da considerare è il legame con lo spessore del layer e quindi il valore effettivo (teff) che assume questo parametro: supponendo che la densità della polvere sia il 60% e che lo spessore teorico dello strato sia 30  $\mu\text{m}$ , la fusione della polvere del primo layer porterà ad un ritiro in direzione verticale di 12  $\mu\text{m}$ . Lo strato successivo avrà quindi uno spessore pari a 42  $\mu\text{m}$  e, per lo stesso motivo, il terzo layer avrà uno spessore effettivo di 46,8  $\mu\text{m}$  e così via fino al raggiungimento del valore asintotico di 50  $\mu\text{m}$  dopo 10 strati.

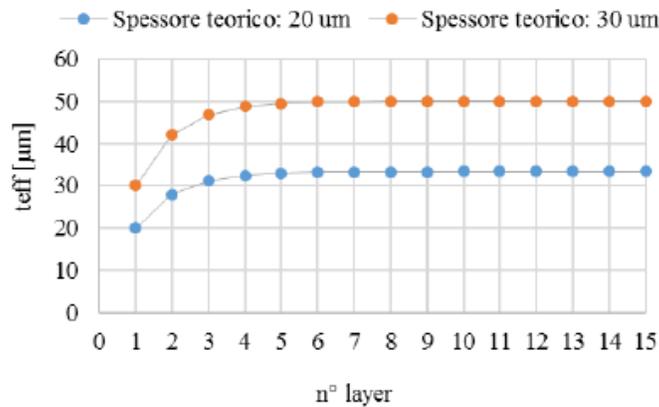


Figura 7.2: andamento dello spessore effettivo in funzione del numero di layer

Alcuni studi presenti in letteratura mettono in evidenza tre punti principali:

- $teff/D90 \approx 1.5$ . Lo spessore effettivo del layer deve essere almeno il 50% più grande del diametro del 90% delle particelle di polvere.
- $D90/D10 \approx 5$ . Deve esserci un numero sufficiente di particelle fini in modo da riempire i vuoti lasciati dalla fusione delle particelle più grosse.
- $D10 > 5-6 \mu\text{m}$  per evitare che vi sia agglomerazione della polvere con conseguente diminuzione della scorrevolezza.

L'influenza delle caratteristiche della polvere sui componenti finali presumibilmente si estende anche alla qualità superficiale. Gli stessi studi hanno presentato alcuni risultati preliminari in merito a questa correlazione. In figura viene rappresentato il legame di tre tipi di polveri, differenti in dimensione, con la rugosità.

	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3
$D_{10}$ [ $\mu\text{m}$ ]	7.12	19.84	15.26
$D_{50}$ [ $\mu\text{m}$ ]	15.12	28.26	37.70
$D_{90}$ [ $\mu\text{m}$ ]	24.17	41.13	55.54

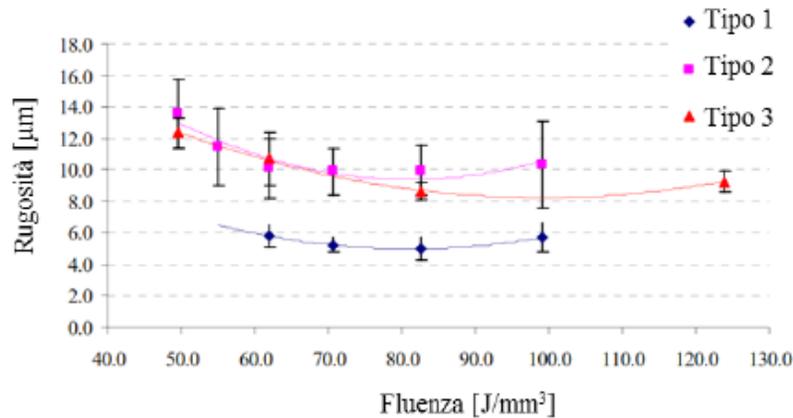


Figura 7.3: andamento della rugosità del campione in funzione della fluenza delle polveri

Il grafico mette in evidenza che la rugosità dei componenti aumenta se si utilizzano polveri più grossolane (tipo 2 e 3). Questa differenza evidente diminuisce se aumenta lo spessore del layer.

### 7.1.2 Riciclo delle polveri

La qualità della materia prima e le caratteristiche dimensionali e geometriche della polvere hanno, come descritto nei paragrafi precedenti, un impatto sulle proprietà dei componenti finali. Il riciclo delle polveri ed il loro riutilizzo diventa quindi un tema molto importante da affrontare, soprattutto nel caso si voglia realmente dare un costo ai componenti ottenuti tramite SLM. Un lavoro interessante, i cui risultati verranno discussi qui di seguito è stato presentato da L. C. Ardila et al. Gli autori analizzano gli effetti del riuso di polveri in Inconel 718 fino a 14 ricicli. Lo studio viene svolto analizzando, da una parte, le durezza, la microstruttura e le proprietà meccaniche dei componenti finali, mentre dall'altra la composizione chimica e la dimensione delle polveri. Per quanto riguarda le polveri, si vede in Figura che dopo 14 riutilizzi le polveri si sono parzialmente aggregate per sinterizzazione.

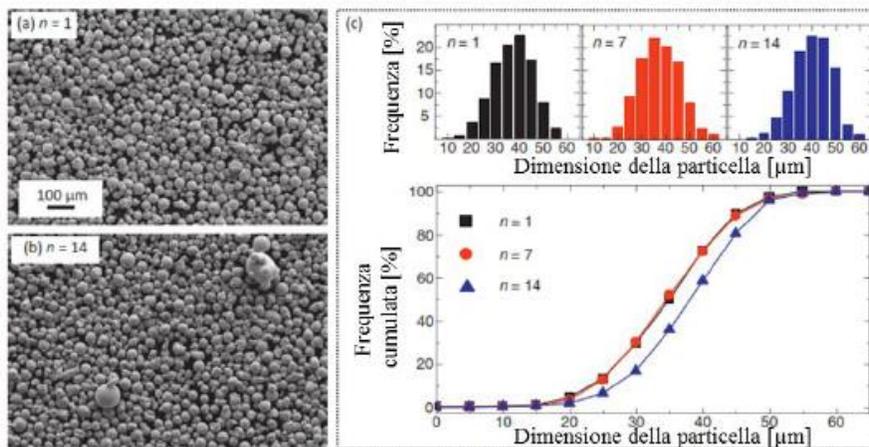


Figura 7.4: Immagini al SEM delle polveri (a) prima e (b) dopo i 14 ricicli. Confronto della distribuzione di dimensioni delle polveri nuove, dopo 7 riusi e a fine campagna (c).

Questo comportamento è confermato dalla distribuzione della dimensione (Figura 7.5c) che mostra un aumento, seppur lieve, delle dimensione media della polvere.

Dalle prove di composizione chimica, effettuate tramite analisi EDS, gli autori hanno evidenziato una leggera diminuzione della percentuale di Ni (da 52.1% a 51.5%) e un aumento di Nb (da 5.1% a 5.7%). In entrambi i casi la variazione viene supposta ininfluente sulle proprietà finali del componente. Per confermare questi dati e verificare le proprietà meccaniche finali dei componenti gli autori hanno scelto di eseguire delle prove di resilienza tramite la prova Charpy. Come osservabile in Figura 7.5 i risultati non mostrano alcuna correlazione con il riutilizzo della polvere.

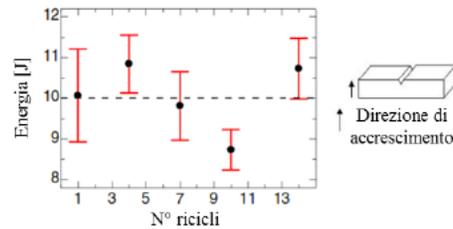


Figura 7.5: Risultati delle prove Charpy

In conclusione, i risultati del lavoro presentato da L. C. Ardila et al. evidenziano che utilizzare polveri riciclate (fino a 14 volte) non ha nessun effetto negativo sulle caratteristiche finali di componenti in Inconel 718. Questo lavoro è un ottimo passo verso la conferma che le proprietà dei componenti SLM non degradano con il riutilizzo della polvere.

Lo studio andrebbe ripetuto per altre leghe fortemente utilizzate nei processi SLM e compatibili con il mondo del thermal management come ad esempio la lega AlSi10Mg o future caratterizzazioni.

## 7.2. Costi

Lo sviluppo delle tecnologie additive, e tra queste il processo di SLM, ha contribuito negli ultimi anni alla nascita di numerose aziende, tuttavia lo sviluppo di nuovi modelli di business è ancora lontano da una completa definizione.

Volendo inserire l'additive manufacturing nella curva di Rogers, il modello che classifica coloro che adottano le innovazioni in varie categorie in base all'idea che alcuni individui siano inevitabilmente più aperti all'innovazione di altri, si nota che questa tecnologia è ancora nelle prime fasi della sua storia.

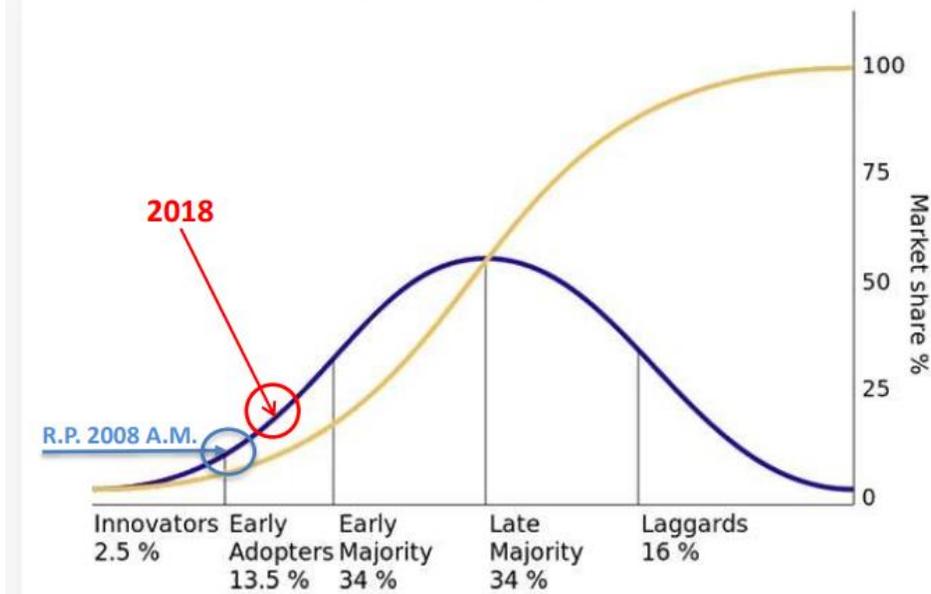


Figura 7.6: curva di Rogers per additive manufacturing

Il successo delle innovazioni passa prima attraverso un periodo di lenta adozione, vivendo poi un periodo improvviso di rapida adozione e poi un graduale livellamento (tipica forma a S della curva).

Le previsioni che nascono da innovazioni tecnologiche, infatti, sono considerate la classe di previsioni più difficile, a causa del numero elevato di incognite e dei tanti possibili risultati. Ad oggi, le ipotesi che vengono fatte sulle tecnologie additive prospettano che questi processi avranno un profondo impatto economico sul settore manifatturiero e sulla società in generale; nonostante i presupposti, però non vi è ancora una letteratura abbastanza ricca.

Nonostante i pochi studi, vi è un generale consenso sul fatto che i cambiamenti tecnologici, in particolare quelli che conducono a progressi misurabili in termini di produttività dei lavoratori, sono centrali in termini di ricchezza e benessere sociale e quindi hanno un impatto sociale rilevante. In questo contesto è opportuno notare che lo stato attuale di queste tecnologie presenta delle inerzie da non sottovalutare, legate in particolare alla diffidenza nell'adozione della novità tecnologica: è stato ipotizzato che per indirizzare un investitore verso le tecnologie additive sarebbe necessario fornire delle proiezioni sull'aumento entrate pari al 30-40%. Ad oggi, la maggior parte degli studi che riguardano gli aspetti economici delle tecnologie additive, presuppone che tali tecnologie non presentino un'economia di scala tipica, invece, dei sistemi di produzione di massa tradizionali. Questa ipotesi inserisce la stampa 3D tra i sistemi economici che possono operare senza subire le pressioni dovute alla logica per cui la riduzione dei costi è strettamente legata ad un aumento di produzione. Baumers et al. nella loro ricerca hanno stimato i costi relativi all'utilizzo di due tecnologie di fabbricazione additiva a letto di polvere (EBM e DMLS) e tra gli altri risultati sono giunti alla conclusione che la produzione di massa in realtà non può essere esclusa a priori nemmeno per queste tecnologie.

Fatte queste precisazioni, in questa sezione si mostrerà un modello di costo semplificato ed applicato al componente oggetto della tesi: il dissipatore di calore.

### 7.2.1 Esempio: analisi dei costi di un dissipatore di calore

Il modello di costo che verrà utilizzato in questo paragrafo tiene conto di due costi legati al processo, ovvero la materia prima ed il consumo energetico, che verranno combinati al totale dei costi indiretti che si devono sostenere per la produzione. In questo studio si farà riferimento ai costi relativi all'utilizzo della macchina EOS M 290, che è stata effettivamente utilizzata per la produzione di questi componenti.

I manufatti sono orientati nella camera di lavoro per ottenere le migliori caratteristiche tecnologiche: minimizzare i surriscaldamenti, minimizzare i supporti ed evitare aree con sottosquadri complessi. Inoltre, la disposizione è stata progettata in modo tale da eliminare la presenza di supporti a contatto con il reticolo per non comprometterne la qualità finale. La scelta dell'orientamento, inoltre, incide sulla superficie di piattaforma occupata.

Di seguito sono riassunte le voci di costo prese in considerazione.

Job details (Simulation)			
		Database	Override
Material		EOS Aluminium AlSi10Mg	
Material price	€/kg	80	
Material density	g/cm <sup>3</sup>	2,67	
Parameter		Speed1.0	
Build rate	cm <sup>3</sup> /h	21,28	
Support Factor		0%	
Additional Material losses		15%	
Build cost	€/cm <sup>3</sup>	1,78 €	
Part Volume	cm <sup>3</sup>	13	
No. Of parts		55	
Total Part Volume		715	
Material cost per part	€	3,19	

Figura 7.7: costo relativo al materiale

Il totale mostrato fa riferimento al costo relativo al materiale utilizzato per produrre un singolo pezzo della geometria in questione, ipotizzando di saturare la camera di stampa con circa 50 pezzi, e con una velocità di stampa di 21 cm<sup>3</sup>/h.

Per una stima dei costi relativi al consumo energetico si è pensato di includere l’ammortamento, in 5 anni, dell’investimento iniziale dovuto all’acquisto della stampante di 650000€, un impiego medio annuale di consumabili di 25000€ e un utilizzo annuale di circa 5000 ore. In questa simulazione si è ipotizzato di ammortizzare l’acquisto iniziale con il solo prodotto in questione (ipotesi non verosimile e peggiorativa).

System cost		
	Database	Override
System type	EOS M 290	
Initial invest (System & Periphery) €	650.000,00 €	
Service & Consumables €/year	25.000,00 €	
Depreciation period years	5	
Interrest rate %	2%	
Utilization h/year	5000	
CAPEX per year €/year	162.902,96 €	
System cost per hour €/h	32,58 €	
Set up time h	2,00	2,00
Build time h	90,00	90,00
Unpacking time per job h	2,00	2,00
System cost per part €	55,68 €	

Figura 7.8: costi di sistema per il processo SLM

Dalla simulazione risulta che, con i parametri di processo ipotizzati, il tempo necessario per la stampa di circa 50 pezzi è di 90 ore alle quali vanno aggiunte 2 ore di set up iniziale e altre 2 ore per l’estrazione e trattamento della piattaforma di stampa.

Il costo orario è stato stimato in base allo stipendio medio degli operatori tecnici sommato al costo energetico all’ora.

Pertanto l’ammontare dei costi di sistema sommato ai costi necessari dovuti al materiale risulta essere pari a 58.88€ a cui andranno infine sommati i costi per il post-processing.

Post Processing Cost		
Remove support	220,00 €	220,00 €
Cost stress Relief per job	0,00 €	0,00 €
Sawing per job	80,00 €	80,00 €
Cost Heat treatment per job	0,00 €	0,00 €
Post-Processing per job	300,00 €	0,00 €
Post Processing per part (Today)	5,45 €	

Figura 7.9: costi di processo

Le principali voci che incidono sul costo di post processo riguardano la rimozione dei supporti e le operazioni di taglio dei componenti dalla piattaforma di stampa.

Con tutte queste indicazioni, il costo unitario per la produzione del dissipatore di calore oggetto di questa tesi ammonta ad un totale di 64.33€.

La figura 7.10 mostra l’impatto delle 3 principali voci di costo sull’ammontare finale.

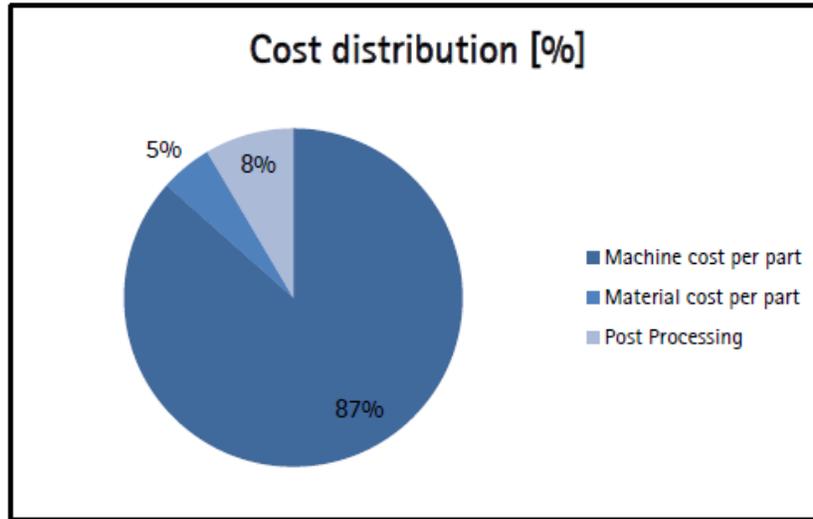


Figura 7.10: principali voci di costo nel processo SLM

Considerando l’andamento dei costi principali nella realizzazione di un manufatto in additive manufacturing negli ultimi anni e i continui miglioramenti apportati a questa tecnologia, è possibile stimare un costo futuro per lo stesso prodotto nelle medesime caratteristiche.

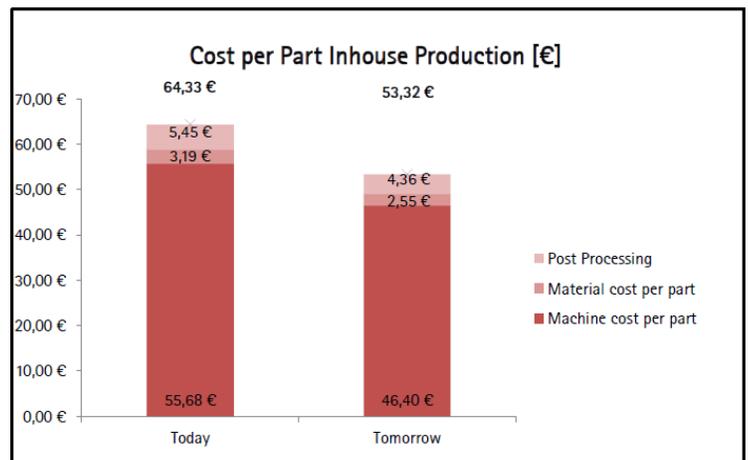
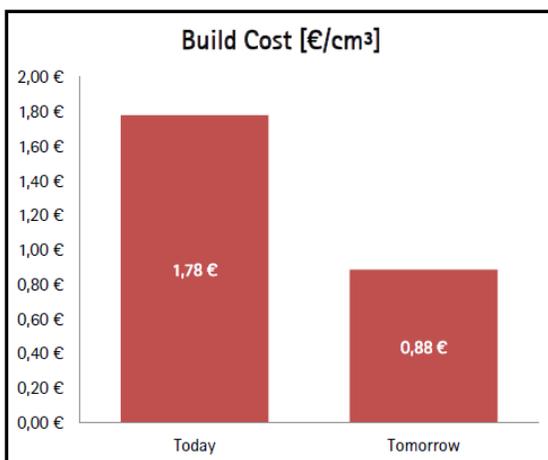


Figura 7.11: ipotesi di costo futuro per la medesima applicazione

È importante sottolineare che il costo totale di 64.33€ è relativamente alto poiché si è ipotizzato di ammortare l’intero costo di acquisto della macchina con questo unico prodotto; inoltre i parametri di processo sono quelli standard e possono essere notevolmente migliorati a seconda delle necessità del prodotto finito con una conseguente diminuzione dei costi.

Ipotizzando di ammortare lo stesso investimento ma con 4 diversi prodotti, il costo unitario per questo dissipatore di calore sarebbe di circa 40€.

# Conclusioni

Con questo progetto di tesi ci si è posti l'obiettivo di sfruttare i vantaggi della tecnologia di fusione laser selettiva per la realizzazione di componenti in ambito thermal management. Nello specifico si è focalizzata l'attenzione sulla possibilità di fabbricare dissipatori di calore. Le competenze già acquisite da Priatherm, azienda specializzata nella customizzazione di soluzioni per lo scambio termico, e la possibilità di studiare l'applicabilità di una tecnologia additiva su questo tema, ha portato all'evoluzione del progetto. Le conoscenze tecnologiche sul processo SLM, ed in particolare sulle proprietà termiche dei componenti che vengono fabbricati utilizzando questa tecnologia, sono tuttavia ancora immature. Per questo motivo, il raggiungimento dell'obiettivo descritto ha richiesto uno studio sperimentale ad ampio spettro per valutarne la fattibilità e ottimizzare la tecnologia sulla base di questa applicazione. La maggior parte dei dissipatori di calore presenti sul mercato è realizzata in lega di alluminio grazie alle sue proprietà di ottima conducibilità termica e relativo basso costo rispetto a soluzioni più pregiate come il rame. Un'altra caratteristica, molto importante per i processi produttivi di questi oggetti, è la brasabilità della lega che permette di mettere insieme più parti assicurando un'ottima tenuta. Il vantaggio offerto dalle tecnologie additive nella realizzazione di geometrie complesse monoblocco, ha permesso di bypassare la brasabilità della lega per concentrarsi su materie prime affini a quelle attualmente utilizzate e per cui esiste già una caratterizzazione per essere processate mediante SLM: la lega AlSi10Mg.

Una volta aver identificato il materiale più adatto, si è proceduto alla progettazione del nuovo prodotto utilizzando regole di design tipiche della tecnologia additiva e differenti rispetto ai metodi industriali tradizionali. Una progettazione mirata per l'additive manufacturing, con un focus rivolto alle performance termiche e l'ausilio di strumenti software dedicati, hanno permesso di realizzare il dissipatore voluto e confrontarlo con la soluzione precedente. In questo lavoro è stato presentato un approccio differente rispetto a quelli abitualmente impiegati in un problema che vede coinvolto l'additive manufacturing. Infatti, non essendo possibile e sensato avvalersi di strumenti di ottimizzazione topologica, sono stati presentati i mezzi per effettuare una ottimizzazione parametrica identificando i parametri che sono più significativi nello scambio termico. Il software Cradle ha permesso di simulare fluidodinamicamente le strutture reticolari, capirne i benefici o i peggioramenti apportati una volta inserite in un modello di dissipatore di calore e individuare il reticolo con un ottimo compromesso tra minor materiale d'apporto e performance termiche.

Lo studio dei componenti ottenuti per SLM ha affrontato molti aspetti, ritenuti necessari per la valutazione di fattibilità e ha portato alla correlazione delle proprietà termiche dei componenti con la microstruttura della lega ed eventuali trattamenti termici. Sono stati studiati aspetti che non potevano essere tralasciati in ottica di una futura industrializzazione: la resistenza a corrosione, la porosità e i trattamenti successivi alla fase di stampa. Gli studi condotti hanno evidenziato le differenze tra i prodotti realizzati tradizionalmente e quelli stampati, inoltre, sono state proposte delle procedure di intervento per oltrepassare i problemi derivanti dall'utilizzo di una nuova lega e al fine di migliorare le performance termiche.

Questi risultati hanno permesso di definire un metodo ottimizzato di fabbricazione di un dissipatore di calore mediante la tecnologia di additive manufacturing. Utilizzando questo metodo è stato realizzato un dissipatore di calore esente dai problemi di tenuta relativi alla saldobrasatura, con performance termiche superiori e dai costi confrontabili.

Con questa attività si è concluso il progetto di tesi e si è raggiunto l'obiettivo prefissato: è stato dimostrato che questo processo produttivo potrà essere, in futuro, uno strumento reale a beneficio dell'industria del thermal management e che può tuttora sostituirsi alla saldobrasatura nella realizzazione di dissipatori di calore customizzati dove le geometrie sono ridotte e complesse.

L'idea di uno scambiatore di calore personalizzato è quindi realizzabile ma è necessaria una collaborazione di co-design per sfruttare pienamente i benefici della tecnologia additiva.

# Sviluppi futuri

Le attività attualmente in corso riguardano ottimizzazioni e variazioni del processo SLM con la finalità di abbassarne i costi. Realtà aziendali ben strutturate come Markforged, Desktop Metal ecc. stanno elaborando una variazione del processo SLM che non prevede l'utilizzo del laser ma di un processo di estrusione di polveri metalliche che vengono successivamente sinterizzate per ottenere la forma finale. Questo processo presenta costi inferiori a quelli della fusione laser selettiva a discapito di una minor finitura superficiale e una minor complessità geometrica.

Le più note industrie produttrici di stampanti sono invece impegnate nel migliorare ulteriormente il processo SLM con stampanti dotate di piattaforme di stampa più grandi, più laser che lavorano simultaneamente e software sempre migliorativi per un notevole incremento di produttività. I costi, come si è visto, sono prevalentemente dovuti ai tempi di fusione necessari per realizzare l'oggetto, un processo più veloce consentirà inevitabilmente di diminuire i costi.

Molte attività previste riguardano anche il miglioramento di tutti quei trattamenti necessari nel post processing come ad esempio un'ottimizzazione della linea produttiva aggiungendo un metodo adatto alla rimozione dalle superfici, e dei supporti, o ottimizzazioni dei parametri di processo per evitare di dover ricorrere a trattamenti meccanici.

Per quanto concerne sviluppi futuri utili al mondo del thermal management è doveroso citare la caratterizzazione di nuove leghe; la caratterizzazione di una lega brasabile consentirebbe un uso combinato sullo stesso prodotto della tecnologia SLM e della brasatura con un conseguente abbattimento dei costi.

Un ultimo capitolo da approfondire riguarda i trattamenti termici post processo. Sarebbe opportuno studiare trattamenti termici e elettrochimici specifici per le leghe attualmente disponibili nel mondo dell'additive manufacturing.

# Riferimenti bibliografici

- [1]. Gibson, I., Rosen, D. and Stucker, B. Additive Manufacturing Technologies. s.l. : Springer, 2015, Second Edition.
- [2]. An overview of Direct Laser Deposition for additive manufacturing; Part I: Transport phenomena, modeling and diagnostics. Thomson, S. M., et al. 8: 36-62, s.l. : Additive Manufacturing, 2015.
- [3]. An overview of Direct Laser Deposition for additive manufacturing; Part II: Mechanical behavior, process parameter optimization and control. Shamsaei, N., et al. 8: 12-35, s.l. : Additive Manufacturing, 2015.
- [4]. Photopyroelectric measurement of thermal conductivity of metallic powders. Rombouts, M., et al. 97(2), s.l. : Journal of Applied Physics, 2005.
- [5]. Temperature Monitoring and Overhang Layers Problem. Chivel, Y. and Smurov, I. s.l. : Physics Procedia 12: 691-696, LiM, 2011.
- [6] Thijs L, Kempen K, Kruth J-P, Van Humbeeck J. Fine-structured aluminium products with controllable texture by selective laser melting of pre-alloyed AlSi10Mg powder. Acta Materialia. 2013;61:1809-19.
- [7] Kempen K, Thijs L, Van Humbeeck J, Kruth JP. Mechanical Properties of AlSi10Mg Produced by Selective Laser Melting. Physics Procedia. 2012;39:439-46.
- [8] Bartkowiak K, Ullrich S, Frick T, Schmidt M. New Developments of Laser Processing Aluminium Alloys via Additive Manufacturing Technique. Physics Procedia. 2011;12, Part A:393-401.
- [9] Matilainen V, Piili H, Salminen A, Syvänen T, Nyrhilä O. Characterization of Process Efficiency Improvement in Laser Additive Manufacturing. Physics Procedia. 2014;56:317-26.
- [10] Hofmann DC, Roberts S, Otis R, Kolodziejska J, Dillon RP, Suh JO, Shapiro A A, Liu Z K, Borgonia J P. Developing gradient metal alloys through radial deposition additive manufacturing. Scientific reports. 2014;4:5357.
- [11] McCue T. Additive manufacturing will change in the next 5-10 years. Forbes; 2012.
- [12] Brandl E, Heckenberger U, Holzinger V, Buchbinder D. Additive manufactured AlSi10Mg samples using Selective Laser Melting (SLM): 243 Microstructure, high cycle fatigue, and fracture behavior. Materials & Design. 2012;34:159-69.
- [13] Zhang B, Liao H, Coddet C. Effects of processing parameters on properties of selective laser melting Mg-9%Al powder mixture. Materials & Design. 2012;34:753-8.
- [14] Maskery I, Aremu AO, Simonelli M, Tuck C, Wildman RD, Ashcroft IA, Hague R J M. Mechanical Properties of Ti-6Al-4V Selectively Laser Melted Parts with Body-Centred-Cubic Lattices of Varying cell size. Exp Mech. 2015:1-12.
- [15] Buchbinder D, Schleifenbaum H, Heidrich S, Meiners W, Bültmann J. High Power Selective Laser Melting (HP SLM) of Aluminum Parts. Physics Procedia. 2011;12, Part A:271-8.
- [16] Ardila LC, Garcíandia F, González-Díaz JB, Álvarez P, Echeverría A, Petite MM, Deffley R, Ochoa J. Effect of IN718 Recycled Powder Reuse on 244 Properties of Parts Manufactured by Means of Selective Laser Melting. Physics Procedia. 2014;56:99-107.

- [17] Brackett D, Ashcroft I, Hague R. Topology optimization for additive manufacturing. Solid Freedom Fabrication Symposium. Texas, USA2011.
- [18] Gardan N. Knowledge Management for Topological Optimization Integration in Additive Manufacturing. International Journal of Manufacturing Engineering. 2014;2014:9.
- [19] Brackett DJ, Ashcroft IA, Wildman RD, Hague RJM. An error diffusion based method to generate functionally graded cellular structures. Computers & Structures. 2014;138:102-11.
- [20] Yan C, Hao L, Hussein A, Raymont D. Evaluations of cellular lattice structures manufactured using selective laser melting. International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2012;62:32-8.
- [21] Yan C, Hao L, Hussein A, Bubb SL, Young P, Raymont D. Evaluation of light-weight AlSi10Mg periodic cellular lattice structures fabricated via direct metal laser sintering. Journal of Materials Processing Technology. 2014;214:856-64.
- [22] Yan C, Hao L, Hussein A, Young P, Huang J, Zhu W. Microstructure and mechanical properties of aluminium alloy cellular lattice structures manufactured by direct metal laser sintering. Materials Science and Engineering: A. 2015;628:238-46.
- [23] Smith M, Guan Z, Cantwell WJ. Finite element modelling of the compressive response of lattice structures manufactured using the selective laser melting technique. International Journal of Mechanical Sciences. 2013;67:28-41.
- [24] Qiu C, Yue S, Adkins NJE, Ward M, Hassanin H, Lee PD, Withers P J, Attallah M M. Influence of processing conditions on strut structure and compressive properties of cellular lattice structures fabricated by selective laser melting. Materials Science and Engineering: A. 2015;628:188-97.
- [25] A.G. Evans, J.W. Hutchinson, N.A. Fleck, M.F. Ashby, H.N.G. Wadley: Prog. Mater Sci. Vol. 46 (2001).
- [26] H.N.G. Wadley, N.A. Fleck, A.G. Evans: Comp. Sci. Technol. Vol. 63 (2003) p. 2331.
- [27] Manfredi, D., Cagliano, F., Ambrosio, E.P., Krishnan, M., Canali, R., Biamino, S., Pavese, M., Atzeni, E., Iuliano, L., Fino, P., Badini, C., Direct metal laser sintering: an additive manufacturing technology ready to produce light weight structural parts for robotic applications, Metall. Ital. 105 (10), 15–24 (2013).
- [28] Manfredi, D., Calignano, F., Manickavasagam, K., Canali, R., Ambrosio, E.P., Atzeni, E., From powders to dense metal parts: characterization of a commercial AlSiMg alloy processed through direct metal laser sintering, Materials 6, 856–869 (2013).
- [29] Thijs, L., Kempen, K., Kruth, J.-P., Van Humbeeck, J., Fine-structured aluminium products with controllable texture by selective laser melting of pre-alloyed AlSi10Mg powder, Acta Mater. 61, 1809–1819 (2013).
- [30] Olakanmi, E.O., Selective laser sintering/melting (SLS/SLM) of pure Al, Al–Mg, and Al–Si powders: effect of processing conditions and powder properties, J. Mater. Process. Technol. 213, 1387–1405 (2013).
- [31] L.E. Fratila-Apachitei, F.D. Tichelaar, G.E. Thompson, H. Terry, P. Skeldon, J. Duszczyk, et al., A transmission electron microscopy study of hard anodic oxide layers on AlSi(Cu) alloys, Electrochim. Acta 49 (2004) 3169–3177.
- [32] Baiwei Zhu, Salem Seifeddine, Per O.Å. Persson, Anders E.W. Jarfors, Peter

Leisner, Caterina Zanella, A study of formation and growth of the anodised surface layer on cast Al-Si alloys based on different analytical techniques, Elsevier, Materials and Design 101 (2016) 254–262.

[33] Reynier I. Revilla, Donovan Verkens,<sup>a</sup> Gaëlle Couturiaux,<sup>b</sup> Loic Malet, Lore Thijs, Stéphane Godet,<sup>b</sup> and Iris De Graeve, Galvanostatic Anodizing of Additive Manufactured Al-Si10-Mg Alloy.

[34] Reynier I. Revilla, Herman Terryn, and Iris De Graeve, Role of Si in the Anodizing Behavior of Al-Si Alloys: Additive Manufactured and Cast Al-Si10-Mg.

[35] E. Brandl, U.Heckenberger, V.Holzinger, D.Buchbinder, Additive manufactured AlSi10Mg samples using selective laser melting, microstructure and fracture behavior.