

Manuel Gallo



**Riprogettazione per l'Additive Manufacturing
di un dissipatore passivo di calore per il
raffreddamento di componenti elettronici**

**Tesi di Laurea in
Tecniche di Fabbricazione Additiva**

**Corso di Laurea Magistrale in
Ingegneria Meccanica**

**Politecnico di Torino
Ottobre 2019**

Politecnico di Torino

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA MECCANICA E AEROSPAZIALE
Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica

Laureando: Manuel Gallo

Relatore: Prof. Ing. Luca Iuliano (DIGEP)

Correlatori: Prof. ssa Ing. Manuela Galati (DIGEP)

Prof. ssa Ing. Flaviana Calignano (DIGEP)

Sessione di Laurea Ottobre 2019

Indice

Introduzione	1
1. L-PBF e stato dell'arte	2
1.1 Il laser	2
1.2 Le polveri.....	3
1.2.1 Gas-atomizzazione	4
1.2.2 Atomizzazione in acqua	5
1.2.3 Atomizzazione al plasma	6
1.3 Materiali utilizzati per le polveri	7
1.4 Interazione laser-polvere	8
1.5 Costruzione del componente e post-processing.....	10
1.6 Attuali applicazioni, vantaggi e svantaggi.....	11
1.7 Impatto ambientale della produzione con L-PBF.....	13
2. Presentazione del componente da riprogettare.....	14
2.1 Il dissipatore passivo di calore o heatsink	14
2.2 Produzione degli heatsink con tecniche tradizionali	15
2.2.1 Estrusione (Extrusion).....	16
2.2.2 Stampaggio (Stamping).....	17
2.2.3 Pressofusione (Die Casting).....	17
2.2.4 Incollaggio (Bonding)	18
2.2.5 Piegatura (Folding).....	19
2.2.6 Forgiatura (Forging).....	19
2.2.7 Tranciatura (Skiving)	20
2.2.8 Lavorazione alle macchine utensili CNC (Machining).....	21
2.3 Metodi di progettazione degli heatsink per produzione con L-PBF.....	22
2.3.1 Growth process.....	22
2.3.2 Artificial Intelligence Driven Generative Thermal Design di Diabatix.....	23
2.3.3 Thermal Topology Optimization.....	25
2.3.4 Riprogettazione con geometria libera seguendo le regole di Design For Additive Manufacturing	26
3. Presentazione del caso studio.....	27
3.1 Trattazione teorica del modello termico di un heatsink	27
3.1.1 Metodi di trasmissione del calore.....	27
3.1.2 Definizione del modello termico di un heatsink	36
3.2 Presentazione del modello fisico da riprogettare.....	38
3.3 Impostazione dell'analisi termica del componente originale	40
3.3.1 Definizione del modello da analizzare	40
3.3.2 Impostazione del calore generato dalla fonte termica (CPU)	42

3.3.3	Impostazione delle condizioni di dissipazione per convezione	43
3.3.4	Impostazione delle condizioni di dissipazione per irraggiamento	44
3.3.5	Calcolo Termico	44
4.	Riprogettazione per l'Additive Manufacturing del componente.....	46
4.1	Il Design For Additive Manufacturing e linee guida.....	46
4.1.1	DFAM – linee guida per la tecnica L-PBF	47
4.2	Riprogettazione del componente per la L-PBF	60
4.2.1	Componente originale riprogettato con features ottenibili attraverso L-PBF	61
4.2.2	Componente riprogettato con nuova geometria delle alette.....	63
4.2.3	Componente riprogettato con geometria estrusa.....	67
4.2.4	Componente riprogettato con geometria libera.....	70
4.2.5	Componente riprogettato con geometria libera e distribuzione di temperatura migliorata	73
4.2.6	Componente con geometria libera con caduta di temperatura migliorata.....	76
5.	Risultati	80
5.1	Analisi sulla quantità di materiale necessario alla produzione.....	80
5.2	Analisi sull'incremento di superficie di scambio termico	82
5.3	Analisi sull'incremento di performance termiche	84
5.4	Analisi di messa in macchina del componente	87
6.	Conclusioni.....	90
7.	Next steps	92
	Bibliografia/Sitografia.....	93
	Ringraziamenti	95

Introduzione

Il lavoro di tesi ha come scopo la riprogettazione per la produzione con tecniche di Additive Manufacturing di un dissipatore passivo di calore per il raffreddamento di componenti elettronici.

L'Additive Manufacturing è l'insieme delle tecniche e delle tecnologie che mirano all'ottenimento di un componente finito attraverso un processo di produzione layer-by-layer.

Nello specifico, la tecnica di fabbricazione additiva affrontata nel lavoro di tesi è la Laser-Powder Bed Fusion, ovvero il processo di produzione di componenti metallici attraverso la fusione selettiva attraverso il fascio di un laser di un letto di polvere metallica come, per il caso studio del lavoro di tesi, polvere di Alluminio AlSi10Mg.

Il componente da riprogettare è un heatsink in Alluminio 6061 utilizzato per il raffreddamento del microprocessore di un modulo Raspberry Pi.

La riprogettazione è effettuata attraverso la modellazione libera delle geometrie del nuovo componente rispettando le regole di Design For Additive Manufacturing ovvero le linee guida di progettazione utili per ottenere, attraverso le tecniche additive, componenti performanti ed ottimizzati per le condizioni di esercizio e per il processo di produzione.

Il Capitolo 1 è incentrato sulla trattazione del processo di L-PBF. Sono affrontati argomenti quali le caratteristiche principali e il funzionamento del laser, le più diffuse tecniche di produzione delle polveri metalliche, le principali leghe metalliche disponibili attualmente in commercio, il processo di interazione tra laser e polveri metalliche, il metodo di costruzione del componente finale e come questo viene processato a fine costruzione (trattamenti termici, rimozione dei supporti e finitura), applicazioni, vantaggi e svantaggi della tecnica L-PBF e il relativo impatto ambientale.

Nel Capitolo 2 viene presentato il componente da riprogettare. È spiegato il compito del dissipatore passivo di calore, i processi di produzione attraverso le tecnologie industriali tradizionali, alcuni metodi di riprogettazione per la fabbricazione additiva in particolare la riprogettazione con geometria libera con riferimento alle regole DFAM, metodologia utilizzata per la riprogettazione per il lavoro di tesi.

Nel Capitolo 3 viene presentato il caso studio, ovvero l'heatsink per il raffreddamento della CPU di un modulo Raspberry Pi disponibile in commercio. In primo luogo, è fornita una trattazione teorica per i metodi di trasmissione del calore e per la definizione del modello termico del dissipatore di calore. Successivamente è presentato il modello fisico da riprogettare. Infine, è svolta l'analisi termica del componente originale, una volta ipotizzate ed impostate le condizioni di funzionamento e di scambio termico. I risultati dell'analisi termica del componente originale sono stati considerati il punto di partenza in termini di performance termiche da ottimizzare in fase di riprogettazione.

Nel Capitolo 4 è affrontata la riprogettazione del componente per l'Additive Manufacturing. È fornita un'introduzione sul DFAM ed una panoramica delle principali norme riconosciute. Successivamente sono presentate le geometrie ottenute a valle del processo di riprogettazione. Per ogni componente riprogettato sono fornite le performance fisiche, geometriche e termiche, miglioramenti/peggioramenti rispetto al componente originale.

Nel Capitolo 5 sono raccolti i risultati del lavoro, ponendo particolare attenzione al confronto tra tutte le geometrie riprogettate in termini di performance termiche (decadimento e distribuzione di temperatura) e risparmio di materiale impiegato per la produzione rispetto al componente originale.

Il Capitolo 6 raccoglie le conclusioni del lavoro di tesi e il Capitolo 7 le proposte di possibili sviluppi futuri.

1. L-PBF e stato dell'arte

Con il termine Laser Powder Bed Fusion si indica un processo di produzione additiva che consiste nella fusione selettiva di uno strato di polvere metallica utilizzando un fascio laser ad alta densità di potenza con la possibilità di ottenere un componente finito prodotto direttamente in macchina attraverso una strategia di costruzione *layer - by - layer*.

Talvolta denominata Selective Laser Melting (SLM) o Direct Metal Laser Sintering (DMLS, denominazione di proprietà dell'azienda tedesca EOS, fornitore di macchinari e polveri metalliche) non deve essere erroneamente confusa con la tecnica di Selective Laser Sintering (SLS) che, attualmente, è una tecnica di produzione a letto di polvere per soli materiali polimerici.

Tuttavia, lo sviluppo del processo di fusione selettiva laser per l'ottenimento di pezzi in materiale metallico è passato per una prima fase di sinterizzazione. Infatti, negli anni Novanta, attraverso l'energia di un laser, si effettuava la sinterizzazione di particelle metalliche rivestite con un film polimerico, come per esempio l'Alumide composto da polvere di nylon e polvere di Alluminio, al fine di creare degli agglomerati di polimero fuso a matrice metallica da post-processare termicamente. Il materiale polimerico, una volta avvenuto il processo di trattamento termico, evaporava generando un componente metallico a matrice porosa. Era necessario dunque infiltrare il materiale con dei metalli basso-fondenti come ottone o bronzo allo scopo di ottenere il pezzo finito, naturalmente in materiale composito.

Successivamente, con l'introduzione di laser a più alta potenza, si passò alla fusione selettiva di polveri di metalli basso-fondenti (bronzo) miscelate a polveri di metalli alto-fondenti (Nichel): con la fusione si producevano pezzi in materiale composito (a matrice di bronzo rinforzato al Nichel) ma ottenuti direttamente in macchina.

Fu alla fine degli anni Novanta-inizi 2000 che si impiegarono laser con una potenza tale da portare a fusione le leghe metalliche direttamente, dando origine al processo di fabbricazione additiva di Laser - Powder Bed Fusion.

1.1 Il laser

Il processo di emissione laser prevede l'amplificazione della luce mediante emissione stimolata di radiazione (Laser è l'acronimo di Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation).

Per la generazione della radiazione laser, sono necessari tre sottosistemi:

1. Il mezzo attivo (solido, liquido o gassoso) il quale, una volta eccitato, emette il fascio;
2. Un sistema di pompaggio che fornisce l'energia al mezzo attivo;
3. Una cavità ottica che permette il passaggio della luce generata.

Uno schema del sistema di generazione del fascio laser è riportato nella Figura 1.

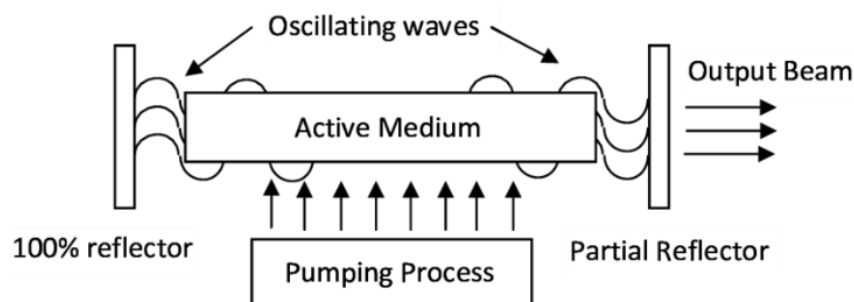


Figura 1 – Schema di funzionamento del laser

Il mezzo attivo è generalmente composto da:

- un materiale emettitore come anidride carbonica CO_2 , ioni di neodimio Nd^{3+} , ioni di Itterbio Yb^{3+} i quali, eccitati dal sistema di pompaggio, emettono fotoni;
- un semiconduttore che incorpora l'emettitore.

Il sistema di pompaggio mantiene gli atomi del mezzo attivo nello stato di eccitamento attraverso impulsi elettrici o ottici.

Le radiazioni generate si distribuiscono all'interno della cavità ottica che ha una parete riflettente e una semiriflettente, la parete di uscita del raggio. Nella camera ottica, la luce compie più passaggi venendo così amplificata.

Il raggio generato, infine, viene indirizzato nella posizione voluta con l'intensità necessaria sulla piattaforma di costruzione attraverso un sistema ottico formato da una serie di lenti e specchi.

Un raggio laser ha un'intensità elevata perché la radiazione che emette è:

- Coerente: le onde sono in fase, quindi, si sommano energie ed intensità;
- Collimata: il fascio di fotoni ha moto prettamente unidimensionale;
- Quasi monocromatica: in prima approssimazione può essere considerata come una luce caratterizzata da un'unica lunghezza d'onda λ ;
- Polarizzata: la luce è direzionata.

Un laser molto diffuso per le applicazioni di Additive Manufacturing metallo, in particolare per il processo di fusione L – PBF, è quello che genera il raggio eccitando ioni di Itterbio (Yb^{3+}) allo stato solido. Il laser è molto efficiente, emette un raggio a 1030 – 1070 nm a seguito di una frequenza di eccitazione di lunghezza d'onda 950 – 980 nm.

Questo laser ha un'elevata efficienza ed eccellente qualità del fascio, robustezza nei confronti dei disturbi ambientali e compattezza del dispositivo [1].

Laser a ioni di itterbio o neodimio vengono preferiti a quelli a CO_2 nelle applicazioni riguardanti il processo di L – PBF in quanto questi hanno lunghezze d'onda più corte quindi si riesce meglio a sfruttare la caratteristica di elevata propensione di assorbimento dei metalli alle elevate frequenze d'onda [1].

1.2 Le polveri

La tecnica L-PBF prevede l'impiego di polveri metalliche studiate ed ottimizzate per favorire i processi di scorrimento delle particelle durante la stesura del layer e corretta fusione della sezione durante la costruzione del pezzo.

Le polveri metalliche, al fine di risultare idonee per le applicazioni riguardanti le tecnologie additive, necessitano di attributi specifici quali:

- Forma sferica, poiché particelle sferiche facilitano lo scorrimento reciproco durante la stesura del layer;
- Granulometria, ovvero, in base all'applicazione, la dimensione delle polveri deve essere piuttosto omogenea per garantirne lo scorrimento e l'assenza di difetti o porosità. In genere le particelle di polvere metallica impiegate nel processo di L-PBF hanno granulometria tra 10 e 60 μm [2].

La produzione delle polveri prevede un processo molto complesso, attualmente gestibile da pochi produttori. A ciò si aggiunge una scarsa flessibilità degli impianti i quali richiedono elevatissimi sforzi di pulizia e, spesso, possono processare un unico materiale per non incorrere nel rischio di contaminazione chimica (cross - contamination) del prodotto finito [3].

In genere, da un lingotto di lega si ottiene il 60% di polveri adatte alle applicazioni additive, il resto può essere in parte rilavorato per ottenere polveri più raffinate, in parte rimane non idoneo allo scopo poiché si verificano alterazioni non volute della composizione chimica o della forma delle particelle.

Le polveri utilizzate per la realizzazione di componenti in metallo secondo le tecnologie additive vengono ottenute attraverso tecniche di atomizzazione, affrontate nel dettaglio nei sotto paragrafi seguenti.

1.2.1 Gas-atomizzazione

È il metodo di produzione delle polveri metalliche più diffuso.

Il materiale, fuso in un crogiuolo, viene accelerato in un ugello e il flusso è rotto dall'insufflazione di gas inerte come azoto (N_2) o Argon (Ar) ad alta pressione.

Il raffreddamento delle gocce è lento e graduale: ciò permette di ottenere polveri prevalentemente sferiche (agglomerati satellitari asimmetrici possono comunque formarsi) [4].

Il processo permette di ottenere polveri con granulometria tra 0 e 500 μm (le polveri con granulometria da 20 a 150 μm rappresentano il 10 - 50% del totale) [4].

Utilizzando cicloni separatori si convogliano in raccoglitori diversi le polveri più fini (a lato) e quelle più grossolane (sul fondo). L'utilizzo dei cicloni rende più sostenibile l'impiego di gas all'interno del sistema, che deve essere a tenuta stagna, evitando l'impiego di quantità eccessive di gas fresco.

A fine ciclo e nel caso di cambio materiale è necessario effettuare il lavaggio della camera per evitare effetti di cross-contamination.

La tecnologia permette di ottenere polveri di Nichel, cobalto, acciai alto-legati a basso contenuto di carbonio, acciai inossidabili, leghe di Titanio, leghe di Alluminio.

Di interesse è la variante EIGA (Electrode Induction Melting Gas Atomization) per la realizzazione prevalentemente di polveri di Titanio, la quale non prevede l'impiego di un crogiuolo per la fusione del metallo. Si ottengono polveri ad elevata purezza tra 0 e 500 μm di granulometria [4]. Il feedstock è una barra di materiale che viene messo in rotazione e fatto passare all'interno di un sistema ad induzione che lo fonde.

La Figura 2 mostra lo schema di un sistema di gas-atomizzazione e la Figura 3 lo schema del sistema di fusione EIGA.

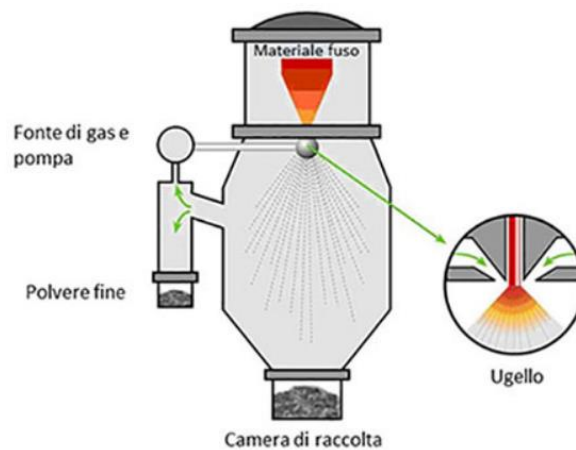


Figura 2 - Schema di funzionamento di un sistema di gas-atomizzazione

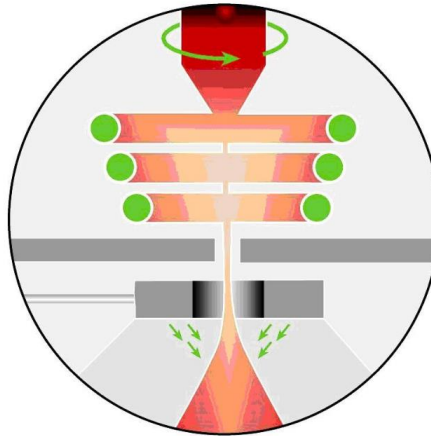


Figura 3 - Schema di funzionamento di un sistema di fusione feedstock attraverso tecnologia EIGA

1.2.2 Atomizzazione in acqua

È una tecnica simile alla gas-atomizzazione ma nella quale vengono impiegati getti d'acqua ad alta pressione per rompere il flusso di materiale fuso. Il materiale atomizzato cade in una vasca d'acqua in cui si raffredda depositandosi sul fondo. È un metodo molto efficiente per la produzione di polvere a livello industriale [5].

Con questa tecnica si ottengono polveri più irregolari ed è possibile processare solo materiali non reattivi con l'Ossigeno o con l'Idrogeno.

Questa tecnologia è utilizzata, infatti per ottenere polveri metalliche di acciai inossidabili o alto-legati a basso contenuto di carbonio, superleghe di Nichel, leghe di cobalto, bronzi.

La Figura 4 mostra lo schema di funzionamento dell'atomizzazione in acqua.

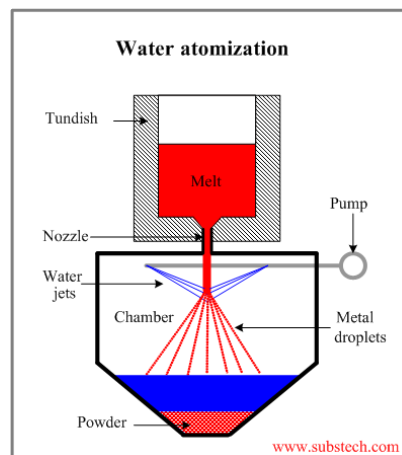


Figura 4 - Schema di funzionamento di un sistema di atomizzazione in acqua

1.2.3 Atomizzazione al plasma

Tecnica piuttosto recente che permette di ottenere polveri molto sferiche, ad alte prestazioni e di alta qualità.

In questo caso il feedstock è un filo metallico, il quale viene indirizzato verso delle torce al plasma che forniscono il calore necessario per fonderlo e l'energia per atomizzarlo. Viene insufflato un limitato quantitativo di Argon che aiuta a rompere il flusso di materiale fuso.

La velocità di raffreddamento è bassa: ciò aumenta il tempo di produzione della polvere ma si riesce a produrre più polvere della granulometria voluta.

Generalmente si riescono realizzare polveri con particelle che vanno da 0 a 200 μm [4].

Una criticità è rappresentata dalla produzione del feedstock e ciò genera un aumento del costo delle polveri.

Si ottengono polveri di ottima qualità di Nichel, zirconio, molibdeno, tungsteno.

Uno schema della tecnica è mostrato in Figura 5.

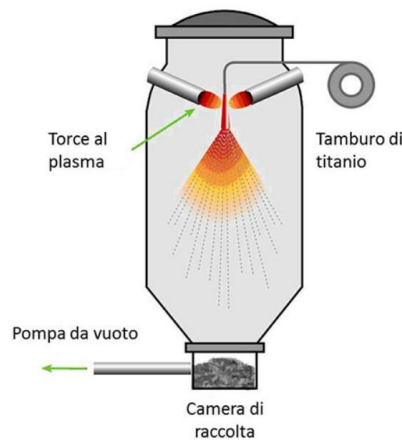


Figura 5 - Schema di funzionamento di un sistema di atomizzazione al plasma

1.3 Materiali utilizzati per le polveri

Attualmente, i materiali più utilizzati per la realizzazione delle polveri per la tecnica di L-PBF sono riportati in Tabella 1:

Leghe di Alluminio	▪ Lega di Alluminio AlSi10Mg, creata appositamente per l'additive, ha buone proprietà meccaniche, permette di ottenere componenti con buona finitura superficiale, è molto versatile e facile da gestire; la grandezza delle particelle va da 1 a 35 μm; ▪ Lega di Alluminio AlSi12, buona resistenza meccanica e resistenza a corrosione, altamente saldabile; ▪ Lega di Alluminio Al6061, per applicazioni aerospaziali; ha buone proprietà meccaniche e buona resistenza a corrosione ma è difficile gestire il processo di costruzione di componenti con questo materiale poiché la lega ha un'elevata tendenza alla generazione di cricche superficiali; ▪ Lega A357 è una lega commerciale trasferita ad applicazioni con tecnologie additive in campo aerospace ed automotive; ▪ Ergal 7075, lega di Alluminio impiegata in campo aeronautico per componenti strutturali, è molto leggera, resistente agli urti e alle sollecitazioni meccaniche; ▪ Scalmalloy, lega di Alluminio con scandio Sc tra gli elementi di lega, molto resistente ma difficile da lavorare con tecnologie tradizionali in quanto lo scandio, più pesante dell'Alluminio, tende a separarsene in sede di fusione: con tecnologie additive ciò non succede e la lega che ne deriva ha resistenza meccanica comparabile a molti acciai ma densità, e quindi peso, minori.
Acciai	▪ 18Ni maraging 300, ha una resistenza due volte superiore al C40; non perde la forma alle alte temperature viene usato per la realizzazione di stampi per la lavorazione di componenti in plastica pressofusa; ▪ Acciaio 17-4PH, è un acciaio inossidabile utilizzato per la realizzazione di componenti per il settore aeronautico o automotive; ad alta resistenza; ▪ 15-5PH1, inossidabile, ha alta resistenza a corrosione, alta resistenza meccanica, elevata durezza, altamente sterilizzabile; ▪ 316L, inossidabile, molto utilizzato per il settore automotive, gode di un'elevata durezza.
Superleghe di Nichel	▪ Haynes 230, lega ad alte prestazioni utilizzata in campo aeronautico in componenti che devono avere elevata resistenza alle alte temperature; ▪ Hastelloy-X, lega resistente alle alte temperature, resistente alla corrosione e facile da lavorare; ▪ Waspalloy, utilizzata in applicazioni ad alta temperatura, come le turbine a gas; ▪ Inconel 625 e 718: le superleghe di Nichel più utilizzate per l'additive, sono leghe per componenti meccanici poco sollecitati che lavorano a temperature medio-alte; sono altamente saldabili, le polveri sono sferiche, di dimensione costante ed estremamente fini riducendo il rischio di difettosità nel pezzo (con adeguato settaggio dei parametri di processo si può arrivare ad avere una difettosità di 0,1-0,2 %);
Leghe di Titanio	▪ Ti-6Al-4V, conosciuto anche come Ti64 o TC4, è una lega con elevato rapporto resistenza/peso ed alta resistenza alla corrosione; molto utilizzata nell'industria aerospaziale e biomedicale (poiché si possono creare impianti o protesi con strutture porose che favoriscono l'osteointegrazione).

Tabella 1 - Materiali metallici per l'Additive Manufacturing

Per il lavoro di tesi, Il componente riprogettati sono stati pensati per la produzione attraverso L-PBF in polvere di Alluminio AlSi10Mg.

1.4 Interazione laser-polvere

Prima di affrontare il processo costruttivo del componente, è opportuno comprendere l'interazione tra la polvere metallica e la sorgente energetica, il laser, durante il processo di fusione del layer e di costruzione del pezzo.

È necessario introdurre i concetti di:

- Absorbance (A): rappresenta un indice della quantità energia assorbita rapportato alla quantità di radiazione incidente. Dipende da lunghezza d'onda e potenza del laser, dal materiale con cui esso interagisce, dalla superficie su cui il fascio laser incide, dalla granulometria della polvere, dall'atmosfera in camera di lavoro, dalla temperatura;
- Reflectivity o Reflectance (R): è un indice della quantità di luce riflessa rispetto a quella incidente. Dipende da quanto è netta la differenza di indice di rifrazione tra atmosfera e polvere metallica, dalla polarizzazione della luce, da lunghezza d'onda e frequenza del laser, dalla temperatura.

Absorbance e Reflectivity sono legati dalla relazione espressa dall'Equazione 1:

$$A = 1 - R$$

Equazione 1 - Relazione tra Absorbance e Reflectivity

Di interesse è, inoltre, la legge di Lambert – Beer la quale lega la quantità di luce assorbita da un materiale alla sua natura chimica, alla concentrazione del materiale e al suo spessore.

La Figura 6 mostra uno schema del meccanismo di assorbimento della luce da parte di un mezzo opaco, la Figura 7 mostra il decadimento esponenziale legato al fenomeno.

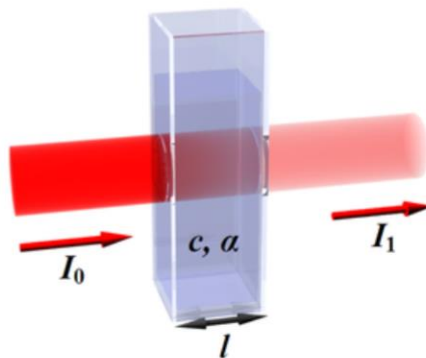


Figura 6 - Assorbimento luminoso per via di un mezzo opaco

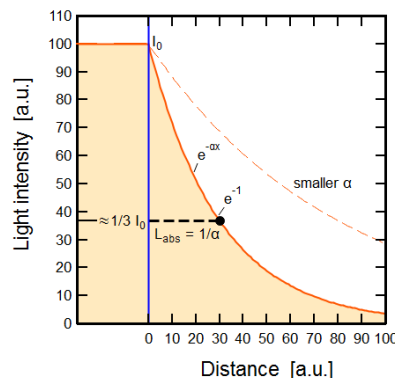


Figura 7 - Decadimento esponenziale dell'intensità luminosa della luce che attraversa un mezzo opaco

La legge è rappresentata dall'Equazione 2:

$$I(z) = I_0 e^{-\alpha z}$$

Equazione 2 - Legge di Lambert - Beer

Dove:

- z è una coordinata lineare che rappresenta lo spessore del mezzo;
- I_0 è l'intensità luminosa iniziale;
- α è il coefficiente di assorbimento del mezzo.

Per i metalli, poiché il decadimento avviene in brevissimo tempo su superfici piccole, al posto di α viene impiegato il parametro Absorption Depth δ che rappresenta la distanza alla quale si ha un decadimento pari ad un fattore di $1/e$.

L'espressione di δ è rappresentata dall'Equazione 3:

$$\delta = 1/\alpha$$

Equazione 3 - Espressione dell'Absorption Depth

In genere δ è dell'ordine dei 10 nm e varia al variare del materiale e della lunghezza d'onda del laser che lo colpisce.

Dai metalli vengono assorbite tutte le frequenze della luce visibile in quanto vi è sempre la disponibilità di livelli elettronici vuoti, che permettono le transizioni di elettroni. Ciò significa che il laser riesce a fondere la maggior parte dei materiali metallici attraverso il processo di *termalizzazione*, cioè la trasformazione dell'energia luminosa in energia termica, in un tempo che va dai 10^{-10} ÷ 10^{-12} s. Si ha termalizzazione quando si verifica il completo assorbimento del fascio laser da parte del materiale.

La risposta del materiale all'aumentare dell'intensità del fascio laser dipende dalla temperatura alla quale arriva la polvere in base all'energia fornita dal fascio laser:

1. $10^4 - 10^5$ W/cm²: Riscaldamento della polvere, indurimento del materiale con ossidazione superficiale;
2. $10^5 - 10^7$ W/cm²: Fusione della polvere; è il campo di intensità laser utilizzate nei processi di saldatura, incisione e nelle tecniche laser per metallo di Additive Manufacturing;
3. $10^7 - 10^{10}$ W/cm²: per processi di ablazione laser (rimozione selettiva di materiale metallico, il quale vaporizza a causa dell'elevata energia fornita).

I parametri di processo che maggiormente influenzano la produzione di un componente metallico in L-PBF, dal punto di vista dell'interazione fascio laser – polveri sono:

- Dimensione spot del fascio;
- Intensità fascio;
- Spessore del layer;
- Velocità di scansione;
- Strategia di scansione (importante per il controllo dei ritiri termici in fase di costruzione);

1.5 Costruzione del componente e post-processing

La Figura 8 mostra lo schema di funzionamento della tecnica L-PBF.

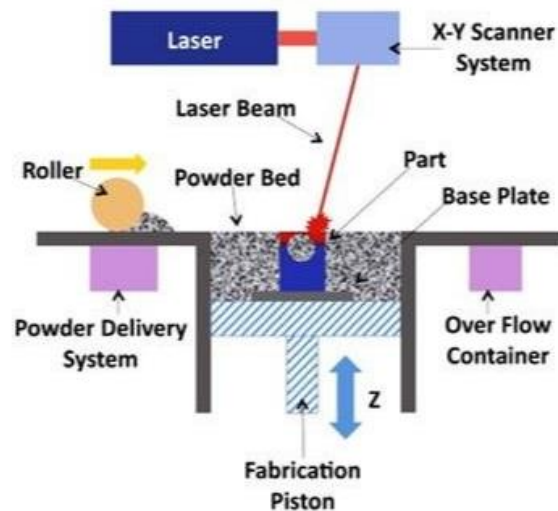


Figura 8 - Schema di funzionamento del processo di Laser Powder Bed Fusion

In particolare, le fasi principali del processo sono:

1. Il contenitore di alimentazione (Powder Delivery System) si muove verso l'alto lungo l'asse z, sollevando dal piano lo strato di polvere da depositare;
2. La polvere viene distribuita per mezzo del re-coater che può essere un rullo o una lama (a seconda dell'azienda costruttrice della macchina) e cosparsa sul piano di lavoro in modo uniforme;
3. L'eccesso di polvere cade nel serbatoio di recupero (Over Flow Container),
4. Il laser emette un fascio verso il sistema ottico di distribuzione il quale, muovendo il fascio sul piano xy, rende possibile la fusione selettiva del layer in costruzione;
5. Una volta ultimato il layer, il pistone del piano di lavoro si muove verso il basso in direzione z di una quantità pari all'altezza del layer (30 – 100 μm) e il ciclo ricomincia.

In camera di costruzione vi è un'atmosfera rarefatta in cui viene insufflato dell'Argon in modo tale da evitare l'insorgere di incendi durante la costruzione del pezzo.

Il sistema di lavorazione è considerato a 2,5 assi poiché l'asse con movimento meccanico (soggetto ad usura) è solo il movimento z, mentre il piano xy è gestito dal sistema ottico che guida il fascio laser sul piano di costruzione.

L'aderenza tra gli strati è garantita poiché la potenza del laser è tale da portare a fusione anche due o tre layer al di sotto di quello in costruzione.

Il processo di costruzione è caratterizzato dalla fusione della polvere, seguita da una rapida solidificazione che conferisce al componente metallico elevate proprietà meccaniche poiché la struttura cristallina che ne deriva è estremamente fine.

La rapida diminuzione di temperatura genera anche degli stress nel materiale dovuti alle sollecitazioni termiche che possono causare fenomeni di ritiro con conseguenti difetti geometrici e possibilità di danneggiare il re-coater a causa del sollevamento del layer.

Per contenere il ritiro termico, il componente ha talvolta bisogno di strutture di supporto le quali riescono a distribuire meglio il calore che si genera nel componente con diversa concentrazione durante la costruzione, oltre a rappresentare un supporto strutturale per le superfici a sbalzo del pezzo.

Esistono dei software, come Magics (di proprietà di Materialise), che permettono di visualizzare, modificare o generare i supporti necessari alla costruzione di un pezzo una volta simulata la messa in macchina con i relativi parametri di processo e proprietà del materiale da costruzione.

Il componente finito presenta delle tensioni residue a causa delle sollecitazioni termiche: per tale motivo, a fine della costruzione e prima dell'eliminazione dei supporti, il pezzo talvolta necessita di essere sottoposto ad un trattamento termico di distensione (stress-relieving) atto a de-tensionare e rilassare il materiale.

Inoltre, anche se la struttura cristallina del componente finito ha un'elevata resistenza meccanica a causa della conformazione metallografica estremamente fine generata dalla fusione e rapida solidificazione del materiale durante la costruzione, questa è, però, anche molto fragile. Talvolta sono richiesti, quindi, trattamenti termici di ricottura (annealing), solubilizzazione, omogenizzazione, ricristallizzazione o precipitazione a valle del processo di lavorazione atti a favorire l'ingrossamento dei grani, l'ammorbidimento del materiale e la creazione di una struttura cristallina più uniforme [7].

Infine, nonostante la rugosità superficiale dei pezzi ottenuti con la tecnica L-PBF sia molto buona con valori che vanno dagli 8 ai 12 μm [7], talvolta è comunque necessario prevedere, a valle dei processi di costruzione in macchina, trattamento termico e rimozione delle strutture di supporto, un ciclo di finitura superficiale, in particolare per le superfici funzionali come condotti o fori.

Per tale motivo talvolta, durante la progettazione del pezzo, è necessario prevedere uno strato di sovrametallo (0.05 – 1 mm) nelle zone di accoppiamento che dovranno subire la finitura a valle del processo di costruzione.

Nel caso di pezzi con superfici non funzionali basterebbe un ciclo di sabbiatura (shot peening) superficiale.

1.6 Attuali applicazioni, vantaggi e svantaggi

Attualmente i maggiori costruttori di macchinari industriali per la L-PBF sono:

- EOS (Germania), attuale leader per sistemi di produzione sia per metalli che per polimeri;
- SLM Solutions (Germania);
- 3D Systems (USA);
- Concept Laser (Germania);
- Renishaw (Regno Unito): è l'unico dei costruttori che adopera un laser pulsato per le proprie macchine, il cui utilizzo comporta lo scaturire di elevati stress termici durante la costruzione, in parte compensati dalla limitazione dell'altezza del layer (20 μm).
- ReaLizer (Germania);
- Sisma/Trumpf (Italia/Germania).

Lo stato dell'arte per la tecnica prevede:

- un volume massimo di costruzione, prismatico o talvolta cilindrico, che va da 100x100x100 a 500x500x500 mm^3 ;
- uno, due o quattro laser con potenza da 100 a 400 W, con rare applicazioni con potenza fino a 1kW;
- spot del laser da 30 a 500 μm ;
- altezza del layer da 50 a 100 μm .

Le principali applicazioni per la tecnologia riguardano i settori:

- Aerospazio: componenti alleggeriti e con alta resistenza meccanica;
- Biomedicale: protesi ottimizzate meccanicamente e personalizzate, strutture reticolari per favorire l'osteointegrazione;
- Attrezzature: stampi con canali conformali per ottimizzarne il raffreddamento;
- Automotive e Motorsport;
- Scambiatori di calore;
- Gioielleria.

I principali vantaggi e svantaggi della tecnica sono raccolti nella Tabella 2:

Vantaggi	Svantaggi
PROCESSO: ▪ È necessaria un'unica macchina per qualsiasi prodotto realizzabile; ▪ Non sono necessarie attrezzature; ▪ Non sono necessari staffaggi durante la costruzione del componente (bastano i supporti per ancorare il pezzo in costruzione alla piastra) ▪ Sono ammessi i sottosquadri; ▪ L'intervento dell'operatore è minimo poiché, una volta definito il job, la macchina riesce a gestirlo con la sola meccanica ed elettronica di processo; ▪ Tempi e costi di produzione sono legati solo al volume del pezzo prodotto, non alla sua complessità.	PROCESSO: ▪ Limitati volumi di costruzione (massimo 0,5 m³ per metalli); ▪ Le dimensioni dei pezzi sono limitate dalle dimensioni della macchina; ▪ La costruzione è lenta (occorre tempo per i processi di stesura della polvere e costruzione selettiva del layer, poche decine di μm per volta); ▪ Ogni macchina ha la possibilità di processare poche tipologie di materiali; ▪ Attualmente non esistono veri e propri impianti industriali: le macchine sono nate per la produzione prevalente di prototipi;
PRODOTTO: ▪ Libertà di progettazione (non vi è necessità di impegno di utensili e attrezzature); ▪ Possibilità di costruire pezzi di geometria complessa, rispettando le norme di Design for Additive Manufacturing e considerando la reale difficoltà di rimozione dei supporti; ▪ Possibilità di costruire componenti integrati, garantendo l'accoppiamento meccanico già in fase di costruzione in macchina; ▪ Possibilità di personalizzare i pezzi prodotti, poiché basta modificare il CAD in ingresso alla macchina senza cambiare utensili o attrezzature.	PRODOTTO: ▪ Spesso è necessario costruire insieme al componente le strutture di supporto, a volte difficili da eliminare meccanicamente; ▪ Potrebbero essere necessari trattamenti termici e cicli di finitura superficiale a valle del processo di costruzione; ▪ Attualmente sono presenti in commercio pochi materiali adatti per le tecnologie di additive; ▪ Talvolta, i pochi materiali disponibili sono molto costosi in quanto i processi necessari per ottenerli sono knowhow intensive.

Tabella 2 - Vantaggi e svantaggi della tecnica L-PBF

Una macchina è tanto più performante quanto ottimizzati sono i parametri di processo che ne stabiliscono il funzionamento. I più influenti sono [6]:

- Forma delle particelle di polvere;
- Dimensione e distribuzione delle particelle;
- Composizione chimica del materiale;
- Conducibilità termica del materiale;
- Punto di fusione del materiale;
- Absorptance e Reflectivity;
- Potenza del laser;
- Velocità di scansione;
- Hatching distance, ovvero la distanza tra due passate di laser;
- Atmosfera protettiva;
- Dimensione dello spot del laser;
- Tipologia di laser;
- Spessore del layer;
- Strategia di scansione del layer;
- Orientazione del pezzo durante la costruzione;
- Flusso di gas inerte;
- Temperatura del letto di polvere.

1.7 Impatto ambientale della produzione con L-PBF

Il processo di L-PBF ha bisogno di un elevato quantitativo di energia, specialmente se si prende in considerazione quella necessaria all'estrazione e alla realizzazione delle materie prime (polvere metallica).

Bisogna però considerare anche il risparmio energetico derivante dal processo vero e proprio (assorbimento della macchina che costruisce il pezzo).

Inoltre, un altro aspetto importante è la possibile riduzione, nel lungo termine, delle emissioni di CO₂ grazie ad alcune applicazioni di componenti fabbricati con L-PBF (componenti alleggeriti del campo aerospace o ottimizzati per le performance termiche).

Infine, a differenza delle lavorazioni per asportazione di truciolo, le tecniche di fabbricazione additiva ed in particolare la L-PBF generano una quantità minima di materiale di scarto (i soli supporti, quando presenti) e nella maggior parte dei casi è materiale quasi totalmente riciclabile, impattando minimamente sia sulla gestione e movimentazione degli scarti, sia sulla creazione e smaltimento di rifiuti di produzione.

2. Presentazione del componente da riprogettare

Nell'ambito del lavoro di tesi si intende riprogettare un dissipatore passivo di calore (heatsink) per il raffreddamento di componenti elettronici per la produzione tramite la tecnica di fabbricazione additiva Laser Powder Bed Fusion.

2.1 Il dissipatore passivo di calore o heatsink

L'heatsink è uno scambiatore passivo di calore che trasferisce il calore generato da un componente elettronico durante il funzionamento ad un mezzo di raffreddamento (aria o acqua) al fine di mantenere la temperatura del componente al di sotto di quella critica di danneggiamento.

Generalmente, è formato da un corpo centrale e da diverse alette (fins) che hanno la funzione di aumentare sensibilmente la superficie di scambio termico ed accelerare la dissipazione del calore.

Le alette possono essere lisce o ondulate (in modo da estendere ancor di più la superficie del dissipatore) e, in base alle applicazioni, possono avere base quadrata, rettangolare o circolare.

L'heatsink è un componente metallico costituito da materiali ad alta conducibilità termica (per non rappresentare un'elevata resistenza al trasferimento e alla dissipazione del calore) che può essere fissato ad un dispositivo elettronico il quale, durante il funzionamento, genera energia termica che va dissipata per preservarne l'utilizzo.

Il dissipatore disperde l'energia termica del dispositivo nel mezzo fluido che lo circonda, prevenendo il surriscaldamento (overheating) del componente elettronico e, quindi, un prematuro danneggiamento.

I materiali più comunemente utilizzati per la realizzazione di dissipatori di calore sono riassunti nella Tabella 3:

Argento	PRO: materiale con ottima conducibilità termica; CONTRO: costo elevato.
Rame	PRO: buona conducibilità termica; CONTRO: costoso; difficile da lavorare; peso elevato.
Alluminio (leghe)	PRO: materiali economici e leggeri; CONTRO: conducibilità termica peggiore rispetto al rame (differente anche per il 50%).

Tabella 3 - Principali materiali utilizzati per la produzione di heatsink: vantaggi e svantaggi

Di solito, gli heatsink vengono utilizzati per evitare l'overheating dei microprocessori CPU (Central Processing Unit o Unità di Elaborazione Centrale) i quali presentano dei vincoli termici per il corretto funzionamento e per la durata in esercizio non trascurabili.

In generale, un processore non dovrebbe mai superare i 70°C per non subire danneggiamenti, limite esteso fino ad un massimo di 100°C per i processori dei PC portatili più performanti [15].

La Figura 9 mostra uno schema del complessivo heatsink-CPU.



Figura 9 - Schema di un sistema per la dissipazione del calore di un device elettronico

Tra l'heatsink e il processore, in genere in materiale ceramico (Silicio), viene applicato uno strato di pasta termica o un adesivo termico ad alta conducibilità che costituiscono il Thermal Interface Material o TIM, finalizzato ad eliminare le bolle d'aria che si genererebbero tra le superfici non lisce di heatsink e CPU, peggiorando pesantemente le performance termiche (poiché l'aria è un isolante termico e rappresenterebbe un incremento di resistenza alla dissipazione non voluto).

Lo scambio termico tra CPU e heatsink avviene prevalentemente per conduzione, poiché le superfici dei due componenti restano aderenti in ogni punto grazie anche all'applicazione dell'interfaccia termica TIM.

Lo scambio termico tra heatsink ed aria avviene in genere per convezione naturale, che può diventare forzata con l'impiego di una ventola di raffreddamento la quale, muovendo l'aria più velocemente nell'intorno dell'heatsink, accelera sensibilmente la dissipazione del calore aumentando la quantità di potenza termica dissipata.

La restante parte del calore viene dissipato per irraggiamento.

Lo scopo degli heatsinks è quello di controllare e limitare la massima temperatura di funzionamento del processore (Maximum Junction Temperature).

È stato dimostrato che una diminuzione di 10°C di questa temperatura può raddoppiare la vita funzionale del processore [16].

Una stima della junction temperature T_J si può ottenere dall'Equazione 4:

$$T_J = T_A + (R_{\theta JA} + P_D)$$

Equazione 4 - Stima della Junction Temperature

Dove:

- T_A è la temperatura ambiente (°C);
- $R_{\theta JA}$ è la resistenza termica tra giunzione ed ambiente (°C/W);
- P_D è la potenza termica dissipata dal sistema (W).

2.2 Produzione degli heatsink con tecniche tradizionali

Le tecnologie disponibili per produrre un dissipatore passivo di calore sono molteplici, tra cui le più diffuse e consolidate sono [8]:

- Estrusione (Extrusion);
- Stampaggio (Stamping);
- Pressofusione (Die casting);
- Incollaggio (Bonding);
- Piegatura (Folding);
- Forgiatura (Forging);
- Tranciatura (Skiving);
- Lavorazione a macchina CNC (Machining).

Si riporta in modo schematico un insieme di caratteristiche, vantaggi e svantaggi di ogni lavorazione nei sotto paragrafi seguenti.

2.2.1 Estrusione (Extrusion)

Un feedstock di materiale metallico viene forzato all'interno di una maschera che ha in negativo la sezione del componente da produrre.

Si conferisce così la forma desiderata al feedstock attraverso un processo di deformazione plastica.

L'estrusione può essere un processo:

- A freddo: eseguita a temperatura ambiente, ha il vantaggio di non generare ossidazione sulla superficie del materiale lavorato. Inoltre, a causa dell'incrudimento il pezzo acquista resistenza meccanica, si ottengono pezzi con migliore finitura superficiale e tolleranze più strette.
- A caldo: il materiale durante il processo di estrusione è ad alta temperatura, in questo modo si evita l'incrudimento non voluto del materiale durante la deformazione plastica causata dall'estrusione. Valori tipici di temperatura per l'estrusione a caldo di materiali di interesse per gli heatsink sono riportati in Tabella 4:

Materiale	Temperatura [°C]
Alluminio	350 - 450
Rame	600 - 1100

Tabella 4 - Valori tipici di temperatura e materiali più comuni per la realizzazione di heatsink con estrusione a caldo

Il processo di estrusione può essere sia diretto (maschera all'uscita della camera in cui è presente il feedstock) o inversa (maschera sullo stantuffo dell'estrusore che può essere meccanico o idraulico).

Uno schema del processo di estrusione è mostrato in Figura 10.

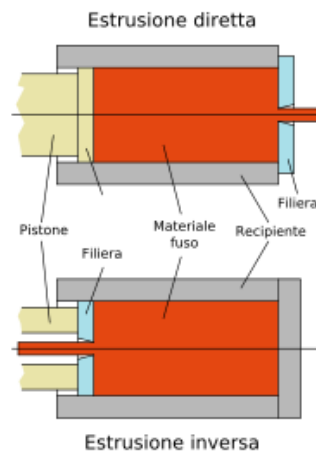


Figura 10 - schema del processo di estrusione diretta (sopra) e inversa (sotto)

Con questa tecnica si possono processare solo materiali ad alta plasticità (Alluminio e rame nel caso degli heatsink). È il metodo più diffuso per la produzione degli heatsink. Tipicamente la larghezza delle alette (fin thickness) raggiungibile va da 0,60 mm a 2 mm, con casi estremi di spessori pari a 0,04 mm.

È una tecnica di produzione industriale che comporta costi moderati ma ha come principale svantaggio la possibilità di produrre solo componenti a sezione costante.

Inoltre, gli heatsink devono avere un'elevata planarità, requisito fondamentale per il buon funzionamento. Nel caso in cui tale requisito non si riesca a raggiungere con la sola estrusione, è necessario prevedere processi aggiuntivi.

Esempi di heatsink estrusi sono mostrati nella Figura 11.



Figura 11 - Esempi di heatsink ottenuti attraverso estrusione

2.2.2 Stampaggio (Stamping)

Il componente è ottenuto attraverso l'utilizzo di una pressa e uno stampo, i quali convertono una lamina di materiale in uno o più pezzi finiti (anche fino a diverse migliaia alla volta). I volumi di produzione dipendono da dimensione, geometria e peso dei componenti e dalla durezza del materiale.

Poiché il feedstock è una lamina metallica, il principale limite della tecnologia è che corpo e alette dell'heatsink dovranno avere la stessa dimensione, approssimativamente 4 mm massimo. Altri difetti dei componenti possono essere spigoli spezzati, segni di rigature, scarsa rugosità superficiale.

Esempi di heatsink stampati sono riportati nella Figura 12.



Figura 12 - Esempi di heatsink ottenuti tramite stampaggio

2.2.3 Pressofusione (Die Casting)

Per la tecnica di pressofusione il feedstock è il metallo fuso che viene forzato ad alta pressione attraverso vari ugelli che sboccano in uno stampo. Successivamente il pezzo viene fatto raffreddare ed estratto dallo stampo.

Si ottengono componenti molto dettagliati e con buona accuratezza dimensionale e il processo è estremamente veloce e controllabile per quelle applicazioni per cui l'economicità del processo ha importanza notevole.

Anche se l'investimento della macchina è ingente, questo viene presto ripagato dal basso costo per componente (per alti volumi di produzione).

Tra gli svantaggi vi è il possibile peggioramento della conducibilità termica del componente a causa di possibili porosità all'interno dello stesso e, per controllare e limitare il difetto, si dovrebbero investire capitali ingenti per le apparecchiature necessarie.

Un esempio di heatsink pressofuso è riportato nella Figura 13.



Figura 13 - Esempio di heatsink ottenuto attraverso pressofusione

Talvolta è possibile imbattersi in heatsink ottenuti con una tecnica ibrida tra stampaggio e pressofusione: si produce una struttura di alette molto fitte su cui viene aggiunta la base dell'heatsink per pressofusione. Questa tecnica viene usata per la realizzazione di heatsink in Alluminio.

2.2.4 Incollaggio (Bonding)

In genere gli heatsink ottenuti con questa tecnica di produzione industriale sono dei componenti assemblati, i cui sottogruppi sono in genere un insieme di alette ottenute per estrusione ed una base realizzata per estrusione o lavorazione a macchina CNC. I due sottogruppi sono tenuti insieme da un'interfaccia termo-conduttiva (resina epossidica o saldatura).

I principali svantaggi della tecnica sono rappresentati dall'interfaccia tra i sottogruppi che da un lato rappresenta una resistenza termica sfavorevole, dall'altro è un agente che deve sempre soddisfare un vincolo meccanico, ragione per cui deve avere determinate caratteristiche di resistenza ed elasticità per le dilatazioni termiche che deformano i sottogruppi durante il funzionamento. Inoltre, i componenti ottenuti hanno un costo non trascurabile di produzione poiché richiedono processi di lavorazione speciali.

Con questa tecnica si possono realizzare heatsink ibridi usando diversi materiali per i sottogruppi.

Un esempio di heatsink ottenuto per incollaggio è riportato nella Figura 14.



Figura 14 - Esempio di heatsink ottenuto per incollaggio

2.2.5 Piegatura (Folding)

Si imprimono delle piegature su di un feedstock di lamina metallica fino ad ottenere il corpo alettato dell'heatsink. Le alette vengono assemblate alla base dell'heatsink tramite saldatura o brasatura (interfaccia che rappresenta un'ulteriore resistenza termica). L'aggiuntiva resistenza termica è comunque minima perché il corpo alettato viene spianato prima della saldatura o brasatura, aumentando la superficie di appoggio con la base dell'heatsink.

Poiché non è possibile raggiungere elevate altezze di aletta, è necessario rendere il corpo alettato più fitto possibile. È comunque possibile realizzare heatsink ibridi formati da diversi materiali.

Un esempio di heatsink ottenuto per piegatura è riportato nella Figura 15.

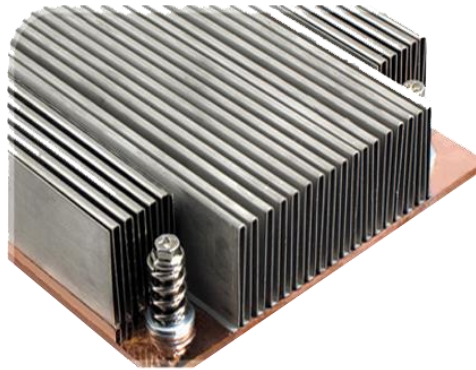


Figura 15 - Esempio di heatsink ottenuto per piegatura

2.2.6 Forgiatura (Forging)

Gli heatsink forgiati si ottengono introducendo in uno stampo il materiale grezzo che viene modellato per deformazione plastica con l'utilizzo di una pressa meccanica di circa 500 tonnellate.

Lo svantaggio principale per la tecnica risulta il riempimento dello stampo durante il processo di pressatura, che può portare ad ottenere alette di diversa altezza o basi con contorni irregolari. Potrebbe essere necessario, a valle del processo, prevedere delle lavorazioni aggiuntive di taglio delle alette, fresatura della base o lucidatura.

Anche se la forgiatura a caldo è un processo più semplice e controllabile, la forgiatura a freddo permette di ottenere prodotti più densi con alette più resistenti.

Tra i vantaggi della tecnica ci sono la possibilità di ottenere pezzi con alta resistenza, elevata finitura superficiale, rigidità strutturale, accuratezza dimensionale, alta uniformità del materiale, poca produzione di scarti. È un'ottima tecnica per materiali altamente compatibili per essere deformati plasticamente come l'Alluminio.

Un esempio di heatsink ottenuto per forgiatura è riportato nella Figura 16.



Figura 16 - esempio di heatsink ottenuto per forgiatura

2.2.7 Tranciatura (Skiving)

Il processo industriale di tranciatura prevede la separazione tramite taglio obliquo non passante ricavando delle lamine dal feedstock, in questo caso una barra piena di metallo a sezione quadrata o rettangolare.

Una lama esegue dei tagli netti sul feedstock fino ad una profondità pari da conferire un determinato spessore alla base dell'heatsink. Le lamine tagliate vanno a costituire il corpo alettato dell'heatsink. Oltre al processo di taglio avviene il processo di piegatura della lamina per conferire un orientamento verticale alle alette.

Con questo processo si può ottenere un heatsink con un corpo alettato molto fitto, buono per le applicazioni di dissipazione di calore in convezione forzata.

Il materiale più utilizzato per la tecnica è l'Alluminio, talvolta il rame. Si possono ottenere alette con spessore che va da 0.25 a 0.8 mm, distanziate tra loro di 0.5 mm e alte fino a 60 mm (con rapporto altezza/spessore fino a 150).

A causa della modalità del processo e dello spessore delle alette, considerando che il fondo subisce una variazione di direzione su uno spessore molto ridotto, è possibile che alcune alette si danneggino o si stacchino.

La tolleranza di processo per il numero di alette di un heatsink ottenuto per tranciatura è ± 2 alette.

Un esempio di heatsink ottenuto per tranciatura è riportato nella Figura 17.



Figura 17 - esempio di heatsink ottenuto per tranciatura

La Figura 18 mostra in dettaglio l'attaccatura delle alette alla base dell'heatsink, con il classico raccordo tipico del processo di lavorazione.



Figura 18 - Dettaglio: raccordo di lavorazione per tranciatura

2.2.8 Lavorazione alle macchine utensili CNC (Machining)

È possibile ottenere heatsink da un blocco di metallo attraverso lavorazioni in macchina per asportazione di truciolo, allo scopo di creare dei canali le cui pareti rappresentano le alette dell'heatsink.

Tipicamente sono realizzati tramite taglio con sega circolare (più utensili allineati) o fresatura attraverso macchine utensili a controllo numerico.

Il principale vantaggio della tecnica è che il lead time è molto ridotto, il feedstock (barra metallica) è facilmente reperibile e il processo di produzione è estremamente rapido.

Lo svantaggio consiste nel complesso attrezzaggio della macchina e nel rischio di danneggiare le alette durante il taglio a causa di difetti nel materiale, nelle lame o nel processo e, di conseguenza, la possibilità di dover eseguire attività di ripristino ulteriori.

Inoltre, è una tecnica che produce molto materiale di scarto (truciolo).

Un esempio di heatsink ottenuto per lavorazione alle macchine utensili è riportato nella Figura 19.

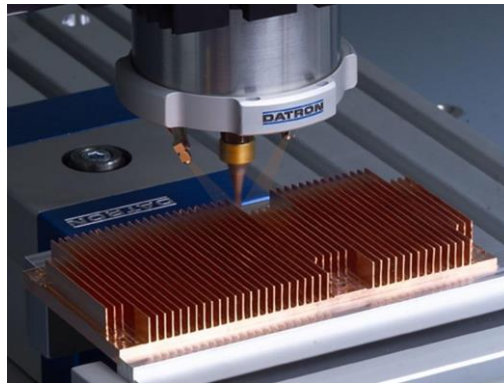


Figura 19 - Esempio di heatsink ottenuto tramite lavorazione alle macchine utensili

Ogni tecnologia elencata ha almeno un limite legato alla forma, limite risolto facilmente attraverso la costruzione con tecnologie di additive.

L'unico vero limite dell'additive è il costo della tecnologia, da valutare a valle di uno studio di fattibilità ed un'analisi economica.

2.3 Metodi di progettazione degli heatsink per produzione con L-PBF

2.3.1 Growth process

I dottori Robin Bornoff e John Parry, ingegneri della Mentor Graphics, hanno sviluppato e brevettato un metodo di progettazione e realizzazione di heatsink studiati per essere prodotti con tecnologie di additive, superando i limiti di geometria imposti dalle tecniche tradizionali di produzione industriale [10].

Questo metodo di progettazione non prevede una geometria imposta a priori ma ottenuta a valle di un processo iterativo di analisi sequenziale e costruzione progressiva del componente finito.

Il metodo consiste in:

1. Studiare le performance termiche di una minima porzione di materiale iniziale;
2. Determinare dove apportare le modifiche al materiale iniziale per migliorarne le performance;
3. Attuare la modifica aggiungendo materiale, tipicamente nei punti in cui la temperatura del componente a fine simulazione è massima;
4. Ripetere il processo con il nuovo componente modificato.

Considerando un heatsink, il processo ha inizio analizzando una piccola sezione della base dalla quale far evolvere tutta la geometria.

La geometria iniziale viene simulata all'interno di un ambiente in cui avviene lo scambio termico, tipicamente per convezione, spesso naturale (anche per un'analisi conservativa) o talvolta forzata. Successivamente, considerando un possibile incremento di performance termiche se si aumenta la superficie di scambio termico nella zona di massima temperatura, si aggiunge un'altra minima sezione di materiale. Infine, la nuova geometria viene simulata e il processo si ripete fino ad ottenere le performance volute e/o saturare lo spazio di progettazione. Nel caso in cui l'aggiunta di materiale nella sezione prescelta fa diminuire le performance termiche, lo step viene annullato e si ricomincia con l'aggiunta di un'altra sezione.

Il processo è molto lungo ed oneroso, più facilmente applicabile ad heatsink a sezione costante (estrusi) ma con geometria troppo complicata per essere ottenuta per estrusione tradizionale.

Il processo di addizione è mostrato in Figura 20.

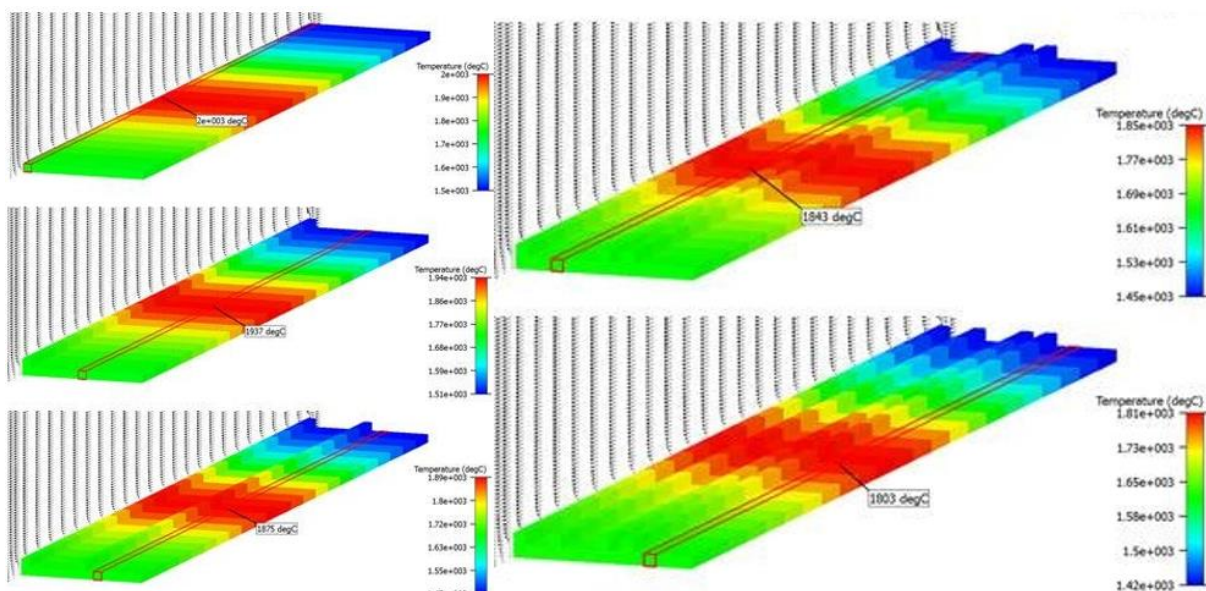


Figura 20 - Processo sequenziale di addizione di porzioni di materiale per la definizione della geometria del componente finale

Un esempio di geometria di un heatsink ottenuto con questo metodo di progettazione è mostrato in Figura 21.

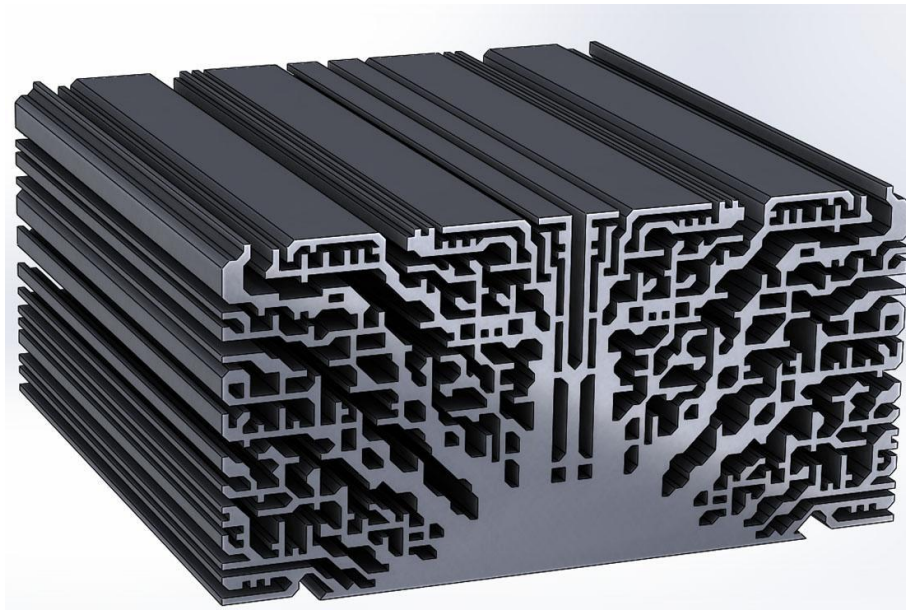


Figura 21 - Heatsink ottenuto con riprogettazione per Growth process

2.3.2 Artificial Intelligence Driven Generative Thermal Design di Diabatix

Diabatix è un'azienda belga fondata nel 2016, specializzata in sistemi avanzati di progettazione termica che combinano tecniche di design generativo all'intelligenza artificiale (AI), realizzando software capaci di progettare, analizzare ed ottimizzare dissipatori di calore.

Tipicamente, nella progettazione di un componente il progettista definisce un design prototipale, simula il suo comportamento in determinate condizioni meccaniche o termiche di interesse, ridefinisce il modello con delle modifiche funzionali atte a migliorarne il comportamento e successivamente lo ri-simula in un processo iterativo.

Diabatix ha cercato di automatizzare questo processo sviluppando una nuova metodologia che integra l'analisi e la simulazione delle condizioni di lavoro con la ri-definizione continua ed automatica del modello [9].

Tale metodologia è capace di integrare l'ottimizzazione del trasferimento del calore, del flusso e della forma del componente in un algoritmo automatico che modella continuamente il componente per soddisfare in modo ottimo i vincoli di progetto.

L'utilizzatore deve implementare le caratteristiche termiche del modello da ottimizzare ed inizializzare l'analisi. Il compilatore esegue l'analisi in remoto attraverso sfruttando una potenza di calcolo molto vasta, restituendo il risultato del componente ottimizzato.

L'interfaccia utente del software permette di visualizzare come cambia progressivamente la geometria del componente ad ogni iterazione in tempo reale.

Un esempio di caso studio effettuato con questa tecnica per un heatsink per il raffreddamento a liquido è riportato in Figura 22.

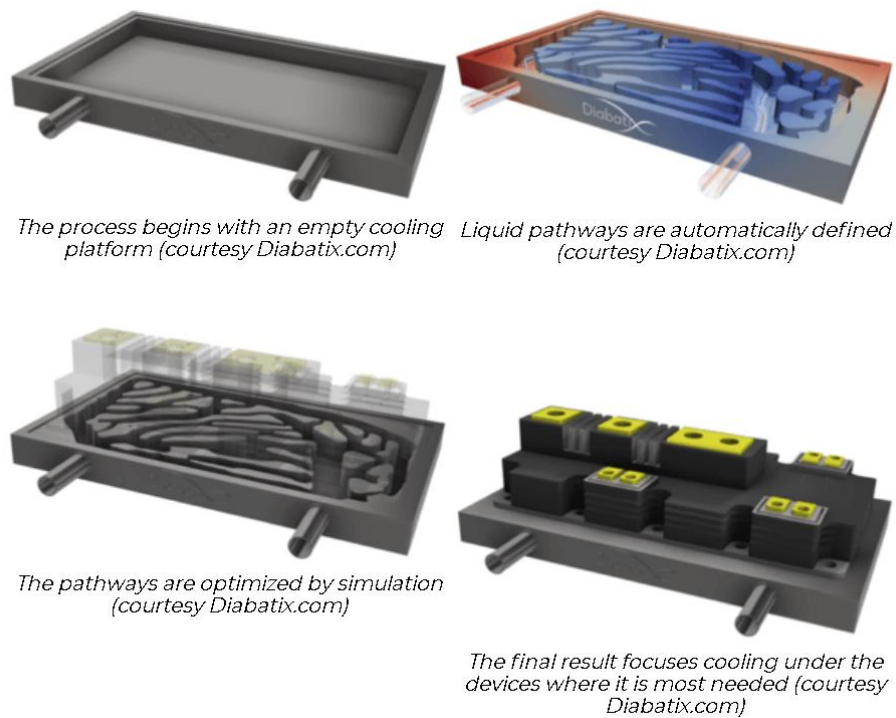


Figura 22 - Processo di riprogettazione con tecnica Diabatix

Si parte con la definizione del design space, lasciando vuota la cavità in cui dovrà essere generato il corpo alettato (Figura 22, in alto a sinistra). Successivamente, all'avvio della simulazione, il software crea delle strutture nel design space che ottimizzano il flusso termico all'interno dell'heatsink (Figura 22, in alto a destra). Si ottiene così un componente con i condotti ottimizzati (Figura 22, in basso a sinistra) sul quale può essere montato il componente da raffreddare (Figura 22, in basso a destra).

Un esempio di heatsink per il raffreddamento per convezione forzata ottenuto con questa tecnologia è riportato in Figura 23.

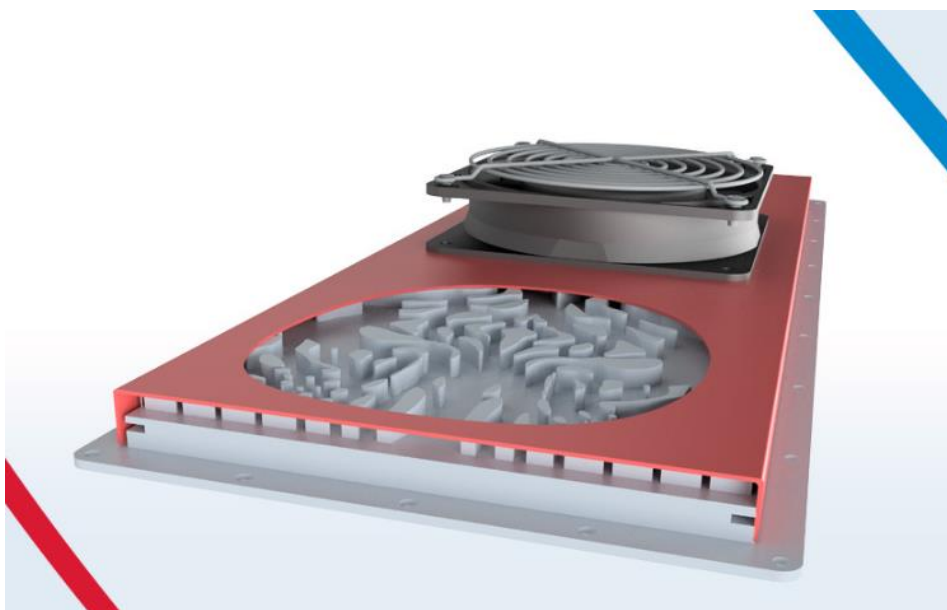


Figura 23 - Esempio di heatsink ottenuto con tecnica Diabatix

2.3.3 Thermal Topology Optimization

L'ottimizzazione topologica è un metodo numerico utilizzato prevalentemente per applicazioni in campo strutturale. Gli obiettivi di ottimizzazione sono spesso la minimizzazione del peso o la massimizzazione della rigidità di un componente come una piastra o una staffa.

L'ottimizzazione topologica in genere prevede le seguenti fasi:

1. Defeaturing, ovvero semplificazione della geometria del componente in modo tale da evitare features che complicherebbero il calcolo di ottimizzazione (come per esempio i raccordi);
2. Definizione delle zone di Non-design space: sono tutte quelle parti del componente che non possono essere alterate dall'ottimizzazione perché funzionali al corretto funzionamento del componente (superfici funzionali, fori, zone di accoppiamento);
3. Definizione del Design Space: è lo spazio di progettazione su cui andrà ad agire il software per svolgere l'ottimizzazione;
4. Definizione dei carichi e dei vincoli strutturali, applicandoli sulle relative superfici del componente.

L'ottimizzatore svolge un calcolo atto ad eliminare il materiale meno sollecitato all'interno del componente. Il calcolo mira ad ottenere per via iterativa una geometria che soddisfa i vincoli progettuali e che risolve l'obiettivo di ottimizzazione.

Oltre che con carichi strutturali, l'ottimizzazione topologica è stata impiegata per applicazioni prototipali di scambio e dissipazione di calore attraverso l'applicazione di carichi termici [11].

Tradizionalmente, il problema di ottimizzazione termica riguarda una variabile di densità di materiale γ , definita in uno spazio bi-dimensionale e da cui dipende la conducibilità termica $k(\gamma)$. L'obiettivo di ottimizzazione è la minimizzazione della conformità termica: il calcolatore svolge delle operazioni di interpolazione della conducibilità termica tra il solido e il vuoto effettuando l'ottimizzatore con un software agli elementi finiti.

La Figura 24 mostra alcuni esempi di geometrie ottenute tramite ottimizzazione topologica termica bi-dimensionale.

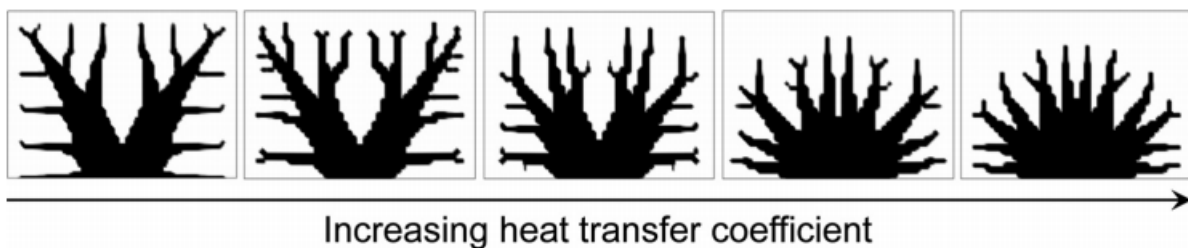


Figura 24 - Ottimizzazione topologica termica 2D di heatsink

Una prima difficoltà del metodo è che si ottengono geometrie difficili da lavorare con tecnologie tradizionali.

Esempi di heatsink ottenuti a valle di tale processo di definizione della geometria sono mostrati in Figura 25.



Figura 25 - Geometrie di heatsink ottenuti con ottimizzazione topologica 2D

Successivamente, sfruttando le tecnologie additive, è stato possibile estendere il metodo di ottimizzazione anche a geometrie tri-dimensionali, di cui un esempio ottenuto è mostrato in Figura 26:

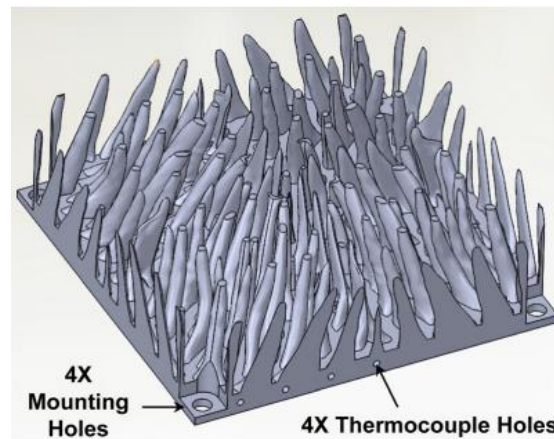


Figura 26 - Geometria di heatsink ottenuto con ottimizzazione topologica 3D

2.3.4 Riprogettazione con geometria libera seguendo le regole di Design For Additive Manufacturing

È possibile sfruttare la libertà di progettazione intrinseca della produzione attraverso tecniche di fabbricazione additiva al fine di ottenere delle geometrie non processabili con le tecniche di produzione industriale tradizionali.

Naturalmente, anche la produzione attraverso tecniche additive impone dei limiti di progettazione.

È buona norma fare riferimento alle linee guide della riprogettazione seguendo le regole di Design For Additive Manufacturing per ottenere componenti adeguati alla produzione attraverso L-PBF[13].

Per la riprogettazione del componente per il lavoro di tesi è stato adottato quest'ultimo approccio.

3. Presentazione del caso studio

In questo capitolo si presentano alcuni cenni sull'impostazione dell'analisi termica preliminare effettuata sul componente originale. Successivamente viene presentato il componente originale da riprogettare, fornendo una panoramica del suo impiego in esercizio e delle caratteristiche termiche.

3.1 Trattazione teorica del modello termico di un heatsink

Per le applicazioni elettriche ed elettroniche si rende necessario l'utilizzo di sistemi e componenti che non permettano il pericoloso surriscaldamento che può portare il device a superare la propria temperatura massima di giunzione (Maximum Junction Temperature T_j^{max}) e causare un decremento delle performance, un guasto o addirittura un incendio.

Per tale motivo, il device deve essere dimensionato in modo tale che la sua massima temperatura di funzionamento non superi in nessuna condizione la T_j^{max} .

L'heatsink è il dispositivo che viene accoppiato al device per fare in modo di dissipare la potenza termica prodotta durante il funzionamento dello stesso e mantenere la temperatura al di sotto della soglia critica.

Segue una breve trattazione teorica al fine di una migliore esposizione delle condizioni di analisi.

3.1.1 Metodi di trasmissione del calore

La trasmissione del calore è una disciplina dell'ingegneria termica che si occupa della generazione, conversione e scambio di energia termica tra due o più sistemi fisici.

I meccanismi di trasmissione del calore sono:

1. Conduzione;
2. Convezione;
3. Irraggiamento.

Le tre metodologie sono schematizzate in Figura 27, e verranno trattate singolarmente nei prossimi sotto paragrafi.

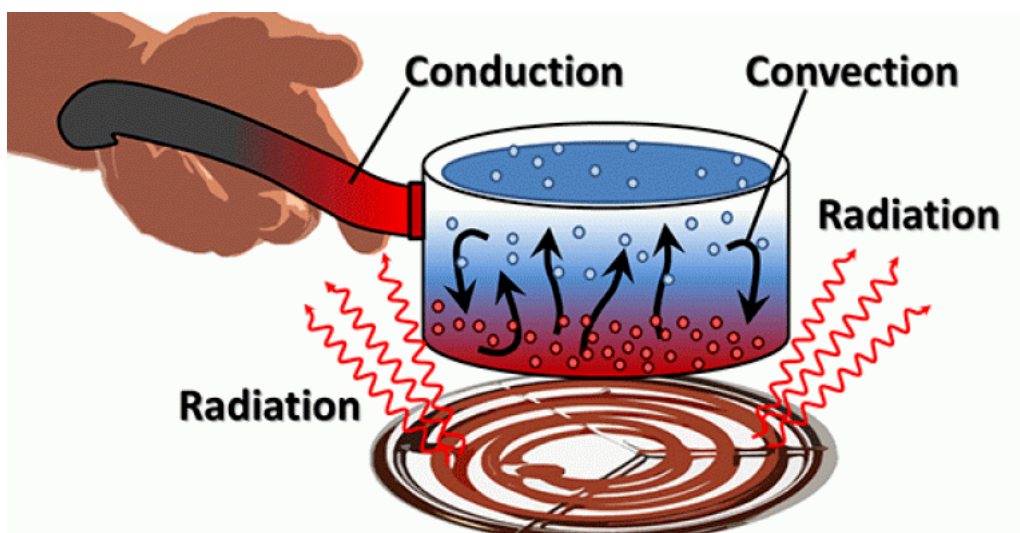


Figura 27 - Metodi di trasmissione del calore

1. Conduzione

La conduzione è un metodo di trasmissione del calore che si attua attraverso un mezzo di propagazione solido, liquido o aeriforme e coinvolge un unico corpo o più corpi a contatto tra loro trasferendo il calore da zone a più alta temperatura a zone a più fredde.

Dal punto di vista microscopico, la conduzione è legata ai moti vibrazionali delle particelle di un solido o di un fluido alle quali viene applicata energia sottoforma di calore: le vibrazioni sono tanto maggiori quanto più è alta la temperatura e, maggiore è la temperatura, maggiore è la porzione di materiale che viene scaldata dallo scambio termico per conduzione.

La Figura 28 mostra uno schema di un sistema in cui avviene scambio termico conduttivo.

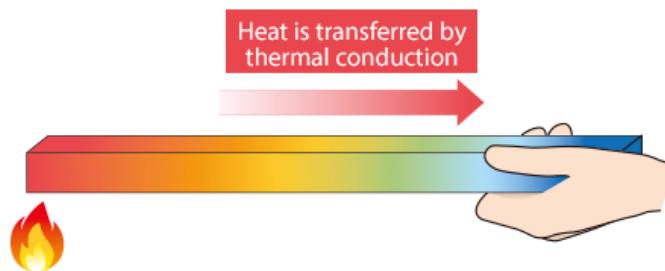


Figura 28 - Schema di trasmissione del calore per conduzione

Per quantificare la facilità con la quale un mezzo scambia calore per conduzione viene utilizzato il coefficiente di scambio termico conduttivo k , definito come la quantità di potenza termica $\dot{Q}$ trasmessa nell'intervallo di tempo t attraverso lo spessore L di materiale, in direzione normale ad una superficie di area A di contatto, a causa di una differenza di temperatura ΔT .

La potenza termica scambiata per conduzione è espressa dall'Equazione 5.

$$\dot{Q} = \frac{kA}{L} \Delta T$$

Equazione 5 - Potenza termica scambiata per conduzione

Dove:

- $\dot{Q}$ è la potenza termica [W];
- k è il coefficiente di scambio termico per conduzione [W/(m·K)];
- A è l'area di scambio termico o di contatto [m²];
- $\Delta T = T_1 - T_2$ è la variazione di temperatura a cui è associato lo scambio termico con T_1 temperatura del corpo più caldo, T_2 temperatura del corpo più freddo [K];
- L è la dimensione specifica del materiale (spessore o lunghezza) [m].

La Figura 29 mostra l'ordine di grandezza della conducibilità termica per diversi materiali in diversi stati.

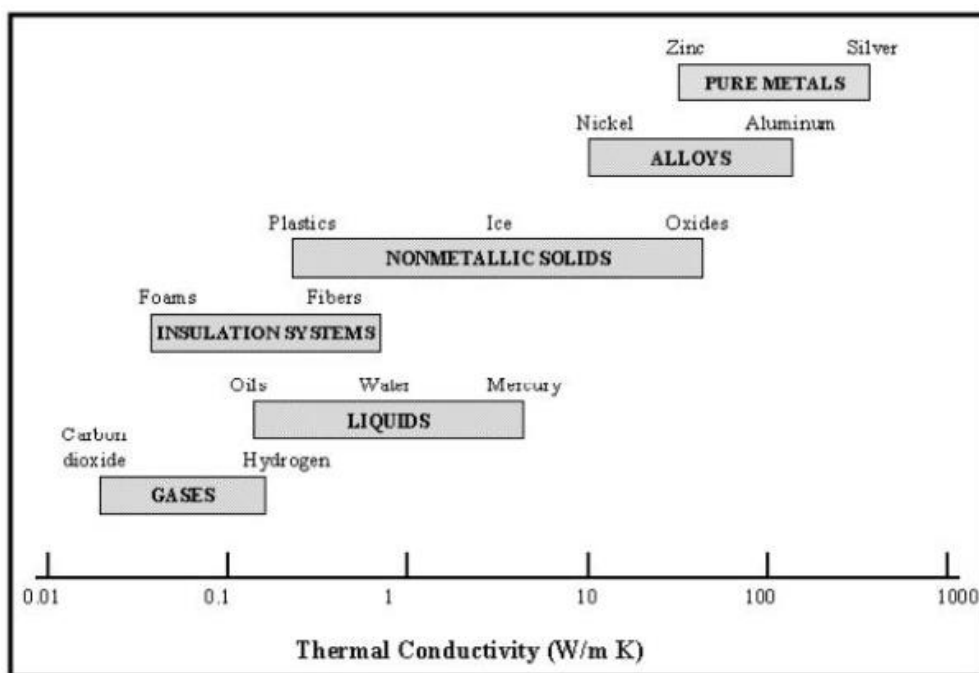


Figura 29 - Ordini di grandezza della conducibilità termica di diversi materiali

Si riporta in Tabella 5 il valore di conducibilità termica di alcuni materiali.

Materiale	k [W/(m·K)]
Diamante	1600
Argento	460
Rame	390
Oro	320
Alluminio	290

Tabella 5 - Valori di conducibilità termica di alcuni materiali

Più in particolare, la Tabella 6 mostra i valori di conducibilità termica di alcuni materiali utilizzati per la produzione degli heatsink [12].

Materiale	k [W/(m·K)]	Produzione
Al – 5052 H36	138	Stampaggio
Al – 6061 T6	167	Estrusione
Al – 6063 T6	209	Estrusione
Al 1100 H14	220	Stampaggio
Cu – CDA110	300	Incollaggio

Tabella 6 - Valori di conducibilità termica riferita ad alcuni materiali per heatsink riferiti ai relativi processi di produzione

Più è elevato il valore di conducibilità termica, più facilmente avviene lo scambio di calore per conduzione.

Dallo schema (Figura 30) e dall'equazione si evince l'andamento lineare del profilo di temperatura all'interno del mezzo durante lo scambio termico per conduzione, con inclinazione proporzionale alla conducibilità termica.

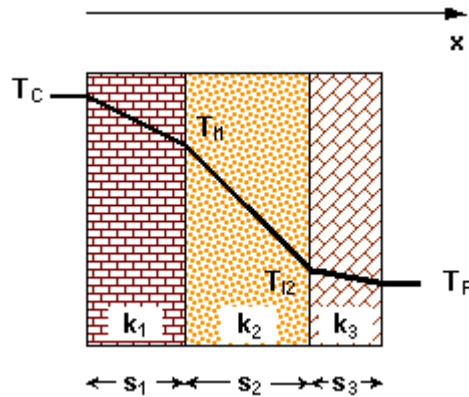


Figura 30 - Decadimento di temperatura in un mezzo che trasmette calore per conduzione

Le relative temperature del decadimento possono essere ricavate dalle Equazioni 6, 7, 8:

$$T_{i1} = T_c - \frac{q}{K_1 \cdot A} \cdot s_1$$

Equazione 6 - Temperatura a fine decadimento nel corpo 1

$$T_{i2} = T_{i1} - \frac{q}{K_2 \cdot A} \cdot s_2$$

Equazione 7 - Temperatura a fine decadimento nel corpo 2

$$T_F = T_{i2} - \frac{q}{K_3 \cdot A} \cdot s_3$$

Equazione 8 - Temperatura a fine decadimento nel corpo 3

I requisiti fondamentali per uno scambio termico prestazionale sono:

1. Superfici con bassa rugosità ed elevata planarità;
2. Applicazione di pasta termica (Thermal Interface Materials o TIMs) tra le superfici a contatto;
3. In caso di più device raffreddati dallo stesso heatsink, prevedere dello spazio tra i due device in modo tale da uniformare la potenza termica dissipabile dall'intero volume dell'heatsink.

Dal punto di vista della modellazione per l'analisi termica si utilizza l'analogia elettrica, come riassunto in Figura 31 ed espresso con l'Equazione 9.

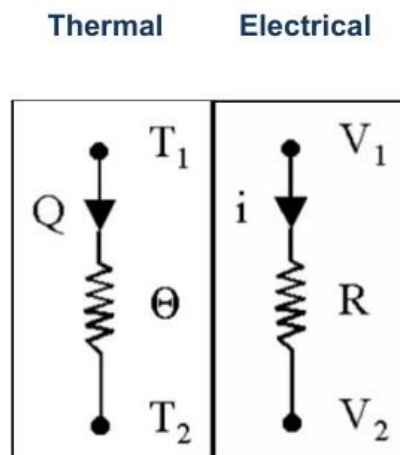


Figura 31 - Schema per analogia termica - elettrica per modellazione analisi termica

$$\dot{Q} = \frac{T_1 - T_2}{\Theta} \rightarrow i = \frac{V_1 - V_2}{R}$$

Equazione 9 - Analogia termica - elettrica per modellazione analisi termica

Con:

- i intensità di corrente [A];
- V tensione elettrica [V];
- R resistenza elettrica [Ω];
- Θ resistenza termica [K/W].

Si può facilmente ricavare la resistenza termica di conduzione R_{Θ}^{cond} tramite l'espressione mostrata dall'Equazione 10:

$$\dot{Q} = \frac{kA}{L} \Delta T \rightarrow \frac{\dot{Q}}{\Delta T} = \frac{1}{R_{\Theta}^{cond}} = \frac{kA}{L} \rightarrow R_{\Theta}^{cond} = \frac{L}{kA}$$

Equazione 10 - Calcolo resistenza termica di conduzione

2. Convezione

La convezione è una modalità di trasmissione del calore che viene favorita dal movimento delle molecole nei fluidi (materiali allo stato liquido o gassoso).

Lo scambio termico per convezione avviene quando un solido ad una certa temperatura scambia calore con un fluido ad esso adiacente. Se la velocità del fluido è nulla o di poco superiore si parla di *convezione naturale* altrimenti, se il fluido è accelerato e intorno alla fonte di energia termica ha velocità elevata si parla di *convezione forzata* (nel caso degli heatsink attuata attraverso l'impiego di una ventola di raffreddamento).

Uno schema di scambio termico convettivo è mostrato in Figura 32.

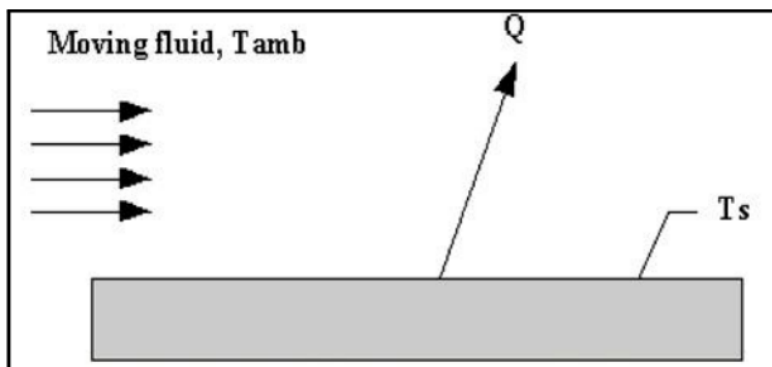


Figura 32 - Schema di trasmissione del calore per convezione

La potenza termica scambiata durante un trasferimento termico convettivo è rappresentata dall'Equazione 11.

$$\dot{Q} = h A \Delta T$$

Equazione 11 - Potenza termica scambiata per convezione

Dove:

- $\dot{Q}$ è la potenza termica [W];
- h è il coefficiente di scambio termico per convezione [$W/(m^2 \cdot K)$];
- A è l'area di scambio termico [m^2];
- $\Delta T = T_1 - T_a$ è la variazione di temperatura a cui è associato lo scambio termico con T_1 temperatura del corpo caldo, T_a temperatura ambiente [K];

Si può facilmente ricavare la resistenza termica di convezione R_{θ}^{conv} utilizzando l'analogia elettrica tramite l'espressione riportata nell'Equazione 12:

$$\dot{Q} = h A \Delta T \rightarrow \frac{\dot{Q}}{\Delta T} = \frac{1}{R_{\theta}^{conv}} = h A \rightarrow R_{\theta}^{conv} = \frac{1}{h A}$$

Equazione 12 - Calcolo resistenza termica di convezione

2.1 Convezione Naturale

In un dissipatore di calore statico lo scambio termico avviene per il 70% per convezione naturale, per il 30% per irraggiamento (a livello del mare, dove la densità dell'aria è massima).

Per il progetto di un heatsink che scambia calore per convezione naturale bisogna considerare che [12]:

- Il corpo alettato deve essere ben ventilato sia nella parte superiore che inferiore;
- Heatsink estrusi devono avere le alette verticalmente allineate;
- Lo spazio tra le alette deve essere maggiore di 6 mm;
- Heatsink per estrusione più performanti;
- L'installazione verticale favorisce la conduzione naturale, specie in presenza di installazioni multiple;
- Le alette hanno generalmente spessori di 1,27 – 1,52 mm.

2.2 Convezione forzata

La convezione è forzata quando il fluido intorno al device da raffreddare e all'heatsink viene accelerato con l'impiego di ventole.

Con la convezione forzata, la quantità di calore ceduto per irraggiamento si riduce al 2 – 7%.

Per il progetto di un heatsink che scambia calore per convezione forzata bisogna considerare che [12]:

- È conveniente avere uno spessore di aletta di minimo 2 mm;
- È conveniente avere un'elevata densità di alettatura, 6 alette/ 25,4 mm;
- Heatsink ottenuti per incollaggio sono i più performanti.

Il coefficiente di scambio termico per convezione è molto sensibile a variazioni di:

- Conducibilità termica;
- Viscosità dinamica;
- Densità;
- Calore specifico;
- Velocità del fluido;
- Tipo di flusso (laminare o turbolento).

In particolare, il flusso di un fluido che lambisce una superficie piana può essere laminare o turbolento, con una zona intermedia di transizione (Figura 33).

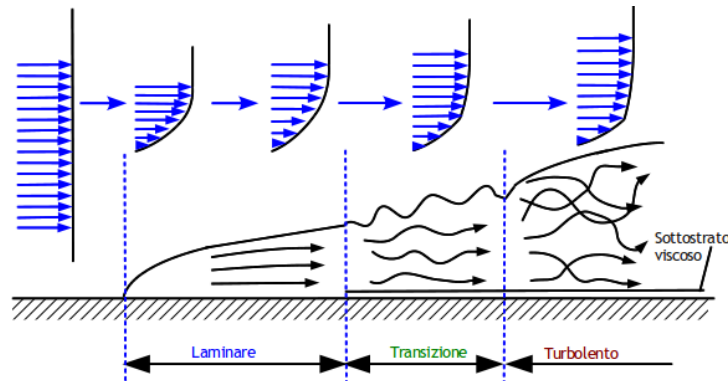


Figura 33 - Schema di tipologia di flusso in prossimità di una superficie

- Si parla di flusso laminare quando gli strati di fluido scorrono l'uno sopra l'altro senza un rimescolamento durante il moto. È il regime di flusso che favorisce lo scambio termico;
- Si parla di flusso turbolento quando il moto è caotico (le forze di inerzia vincono sulle forze viscose).

Il grafico in Figura 34 mostra l'andamento del coefficiente di scambio termico per convezione e dello spessore dello strato limite in funzione del regime di flusso.

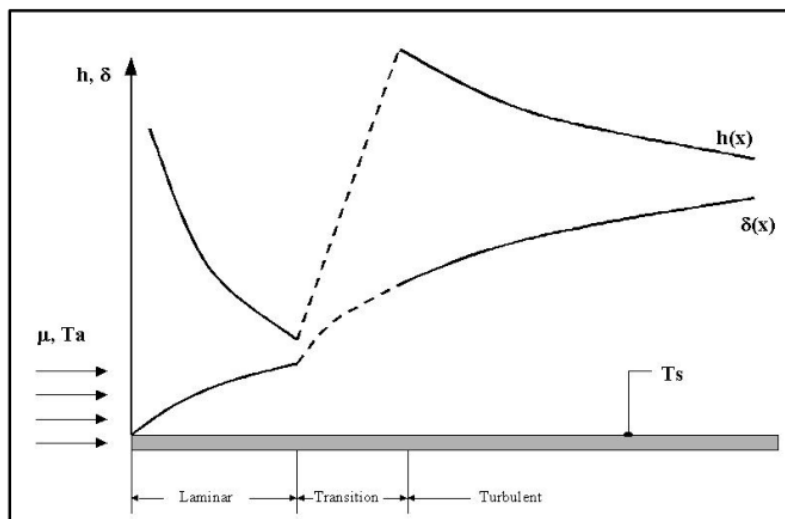


Figura 34 - Andamento del coefficiente di scambio termico per convezione h e dello spessore dello strato limite δ in funzione del tipo di flusso

Valori tipici del coefficiente di scambio termico per convezione sono riportati in Tabella 7:

Fluido	h [$\text{W}/\text{m}^2 \text{K}$]
Aria	5 – 100
Acqua	500 – 10.000

Tabella 7 - Valori di coefficiente di scambio termico per convezione dei fluidi principali

Per quanto riguarda la trasmissione del calore per convezione, l'efficienza dell'heatsink aumenta:

- Al diminuire dell'altezza delle alette;
- All'aumentare dello spessore delle alette;
- All'aumentare della conducibilità termica (k);
- Al diminuire del coefficiente di scambio termico convettivo (h).

Per heatsink in convezione forzata l'efficienza è del 40 – 70%.

Per il progetto di un heatsink che scambia calore per convezione forzata bisogna considerare che [12]:

1. È consigliabile che le alette del corpo alettato siano sfasate l'una rispetto all'altra, in modo tale che il flusso di aria investa più alette possibile;
2. Non bisogna creare zone in cui il flusso di aria ristagna;
3. Le alette hanno generalmente spessori di 1,52 – 2,54 mm.
4. Al fine di aumentare l'efficienza del 20 – 30% si possono utilizzare alette ondulate, aumentando la superficie di scambio termico.

3. Irraggiamento

L'irraggiamento è la modalità con la quale il calore viene trasmesso attraverso la propagazione di onde elettromagnetiche.

Poiché lo scambio termico avviene tramite radiazioni, non è necessario un mezzo di trasmissione ovvero un materiale interposto tra le due fonti che scambiano calore, al contrario di conduzione e convezione.

Infatti, lo scambio termico per irraggiamento raggiunge la sua massima efficienza nel vuoto (schema in Figura 35).

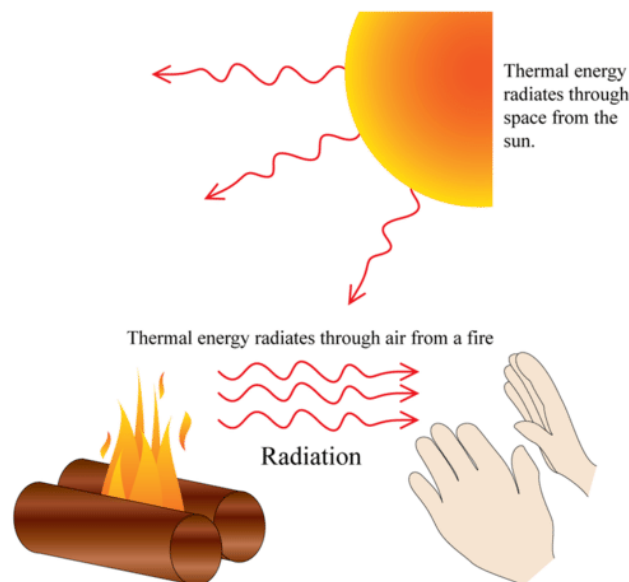


Figura 35 - Schema di trasmissione del calore per irraggiamento

Ogni corpo a qualsiasi temperatura emette ed assorbe radiazioni elettromagnetiche e solo oltre determinate temperature, elevate, il contributo dello scambio termico per irraggiamento diventa maggiore di quelli per convezione e conduzione.

Ciò accade perché la potenza termica scambiata per irraggiamento è proporzionale alla quarta potenza della temperatura del corpo.

Il corpo che ha la maggiore tendenza a scambiare calore per irraggiamento è il *corpo nero*: esso è un oggetto ideale che assorbe tutta la radiazione elettromagnetica incidente, senza rifletterla.

L'indicazione della capacità di un corpo di scambiare calore per irraggiamento è l'emissività ε : questa è una grandezza che esprime la frazione di energia irraggiata da un materiale rispetto a quella irraggiata da un corpo nero alla stessa temperatura. $\varepsilon = 1$ per un corpo nero; $0 < \varepsilon < 1$ per un corpo reale. ε dipende da fattori come temperatura, angolo di emissione, lunghezza d'onda e finitura superficiale del materiale.

La potenza termica scambiata per irraggiamento è espressa dall'Equazione 13 e il coefficiente di scambio termico per irraggiamento dall'Equazione 14:

$$\dot{Q} = \varepsilon \sigma A (T_s^4 - T_a^4)$$

Equazione 13 - Potenza termica scambiata per irraggiamento

$$h_r = \varepsilon \sigma (T_s + T_a) (T_s^2 + T_a^2)$$

Equazione 14 - Coefficiente di scambio termico per irraggiamento

Dove:

- $\dot{Q}$ è la potenza termica scambiata [W];
- ε è l'emissività del materiale;
- A è la superficie interessata dallo scambio termico per irraggiamento [m²];
- T_s è la temperatura della superficie di scambio termico [K];
- T_a è la temperatura ambiente [K];
- σ è la costante di Stefan – Boltzmann che vale $5.67 \cdot 10^{-8} [W/m^2K^4]$;
- h_r è il coefficiente di scambio termico radiativo $[W/m^2K]$

Si può facilmente ricavare la resistenza termica di irraggiamento R_{θ}^{rad} utilizzando l'analogia elettrica tramite l'espressione (Equazione 15):

$$\begin{aligned} \dot{Q} &= \varepsilon \sigma A (T_s^4 - T_a^4) \rightarrow \dot{Q} = \varepsilon \sigma A (T_s^2 - T_a^2)(T_s^2 + T_a^2) \rightarrow \dot{Q} = \varepsilon \sigma A (T_s - T_a)(T_s + T_a)(T_s^2 + T_a^2) \rightarrow \\ &\rightarrow \dot{Q} = A (T_s - T_a) \varepsilon \sigma (T_s + T_a)(T_s^2 + T_a^2) \rightarrow \dot{Q} = A (T_s - T_a) h_r \rightarrow \end{aligned}$$

$$\frac{\dot{Q}}{(T_s - T_a)} = \frac{1}{R_{\theta}^{rad}} = h_r A \rightarrow R_{\theta}^{rad} = \frac{1}{h_r A}$$

Equazione 15 - Calcolo resistenza termica di irraggiamento

Per il progetto di un heatsink che scambia calore per irraggiamento bisogna considerare che:

- L'emissività del materiale deve essere massima;
- Massimizzare le aree senza ostacoli per lo scambio termico;
- Due alette adiacenti scambiano calore per irraggiamento nell'area che le separa.

La Figura 36 mostra l'ordine di grandezza dell'emissività termica per diversi materiali con diverse condizioni superficiali.

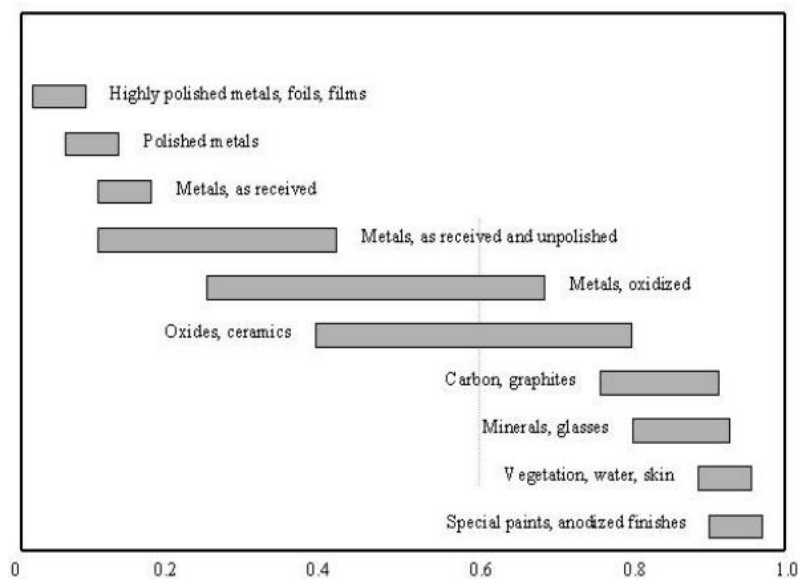


Figura 36 - Valori emissività per diversi tipi di materiali

Migliore è la qualità e la finitura superficiale del materiale, maggiore è la potenza termica scambiabile per irraggiamento.

Valori tipici dell'emissività sono riportati in Tabella 8:

Materiale	ε []
Alluminio - Lucidato	0.04
Alluminio - Estruso	0.06
Alluminio - Anodizzato	0.80
Rame - Lucidato	0.03
Rame – Lavorato CNC	0.07
Rame - Ossidato	0.78

Tabella 8 - Valori emissività di alcuni metalli per heatsink

3.1.2 Definizione del modello termico di un heatsink

Al fine di introdurre il modello termico di heatsink è necessario definire alcune grandezze (schema in Figura 37).

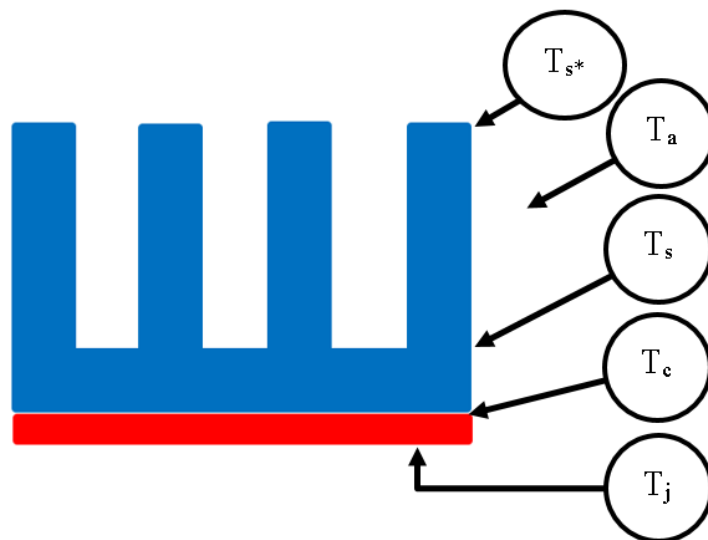


Figura 37 - Schema Temperature per modellazione heatsink

- T_j è la temperatura del device da raffreddare, detta Junction Temperature [K];
- T_c è la temperatura della base dell'heatsink, detta Case Temperature[K];
- T_s è la temperatura lontano dalla base dell'heatsink, detta Sink Temperature[K];
- T_a è la temperatura ambiente [K];

Il modello termico dell'heatsink si può schematizzare come in Figura 38. Le Resistenza termiche possono essere calcolate dalle Equazioni 16 e 17.

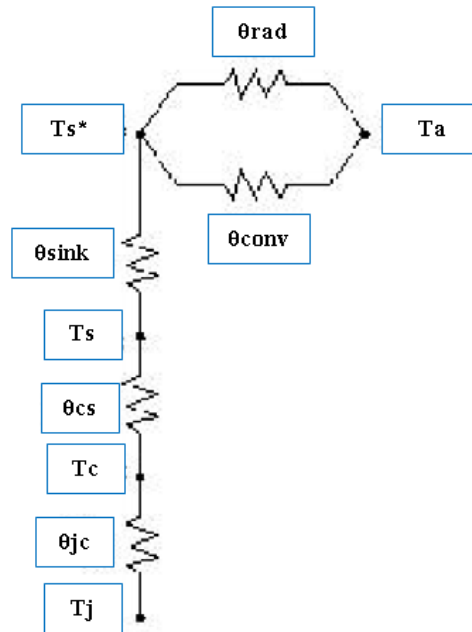


Figura 38 - Schema modello termico heatsink

$$\theta_{ja} = \frac{T_j - T_a}{\dot{Q}} ; \theta_{ja} = \theta_{ja} + \theta_{cs} + \theta_{sa}$$

Equazione 16 - Espressione per il calcolo di resistenza termica junction-to-ambient

$$\theta_{sa} = \frac{\theta_{conv} \theta_{rad}}{\theta_{conv} + \theta_{rad} + \theta_{sink}}$$

Equazione 17 - Espressione per il calcolo di resistenza termica sink-to-ambient

Dove:

- θ_{jc} è la resistenza termica junction-to-case [K/W];
- θ_{cs} è la resistenza termica case-to-sink [K/W];
- θ_{sa} è la resistenza termica sink-to-ambient [K/W].

Per la corretta scelta di un heatsink è necessario basarne il dimensionamento considerando i seguenti parametri:

- $\dot{Q}$ [W] potenza termica da dissipare;
- T_j^{max} [K] massima temperatura di giunzione;
- T_a [K] temperatura dell'ambiente nei pressi dell'heatsink;
- θ_{jc} [K/W] Resistenza termica junction-to-case;
- θ_{cs} [K/W] Resistenza termica case-to-sink;
- t [m] spessore delle pareti dell'heatsink;
- A [m²] area di contatto tra superfici di scambio termico;
- Tipo di convezione: naturale o forzata;
- Flusso di aria.

Concludendo, maggiore è il costo dell'heatsink, migliori sono le sue performance (perché derivano da processi produttivi migliori) [12]:

- Heatsink stampati sono molto economici e garantiscono performance minime;
- Heatsink estrusi hanno un costo medio con discrete performance;
- Heatsink ottenuti per incollaggio godono delle performance migliori ad un costo, però, elevato.

3.2 Presentazione del modello fisico da riprogettare

L'heatsink che si vuole riprogettare è disponibile in commercio e comunemente utilizzato per il raffreddamento del processore di un modulo Raspberry Pi.

Raspberry Pi è un computer dotato di una singola scheda (single-board computer) sviluppato nel Regno Unito dalla Raspberry Foundation allo scopo di divulgare conoscenze di informatica base nelle scuole e nei Paesi in via di sviluppo.

La Figura 39 mostra lo schema hardware del modulo, la Figura 40 il componente fisico Raspberry Pi.

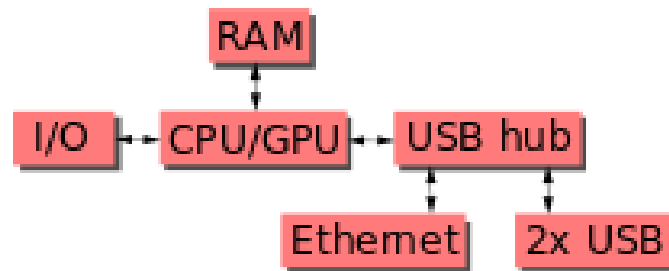


Figura 39 - Schema hardware di una scheda RaspberryPi



Figura 40 - Modulo Raspberry Pi

La Figura 41 mostra l'immagine di una termocamera puntata su un modulo Raspberry durante il normale funzionamento.

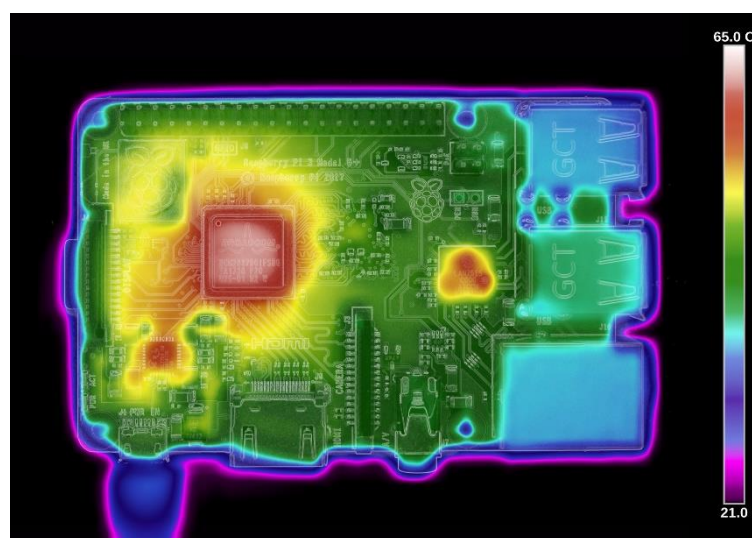


Figura 41 - Distribuzione di temperatura di un modulo Raspberry Pi in funzione

Il processore del Raspberry, in determinate condizioni di calcolo, può raggiungere una temperatura di oltre 85°C. Temperature così elevate possono ridurre in modo considerevole la vita utile del processore o addirittura danneggiarlo irreparabilmente.

Se si supera il valore di soglia interviene un dispositivo di protezione termica che limita il funzionamento del processore, facendolo girare alla propria frequenza minima. Se questa azione di contenimento non basta un secondo sistema di protezione provvede a spegnere automaticamente la CPU.

Nasce quindi la necessità di mantenere la temperatura del processore sotto delle soglie di accettabilità, dissipando il calore generato dal device durante le operazioni di calcolo attraverso un dissipatore passivo di calore o heatsink.

Il Raspberry è controllato da un processore Broadcom single- o quad-core, da 32- o 64-bit, da 6 MHz a 1.4 GHz, tipicamente con dimensioni 14 x 14 mm (corrispondenti alla base dell'heatsink, fissato con un adesivo termico che funge da interfaccia TIM).

Un esempio di installazione di Heatsink sulla CPU di un modulo Raspberry è mostrato in Figura 42.

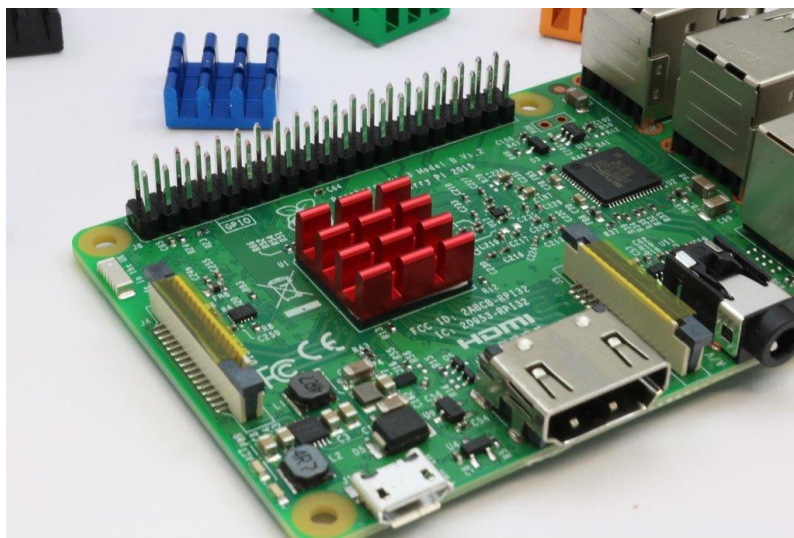


Figura 42 - Esempio di installazione di un heatsink su un modulo Raspberry Pi

Lo scopo del lavoro di tesi è effettuare l'analisi termica di un heatsink tradizionale per il raffreddamento della CPU di un modulo Raspberry e, successivamente, riprogettarlo per l'Additive Manufacturing per poi, infine, studiarne e confrontarne le performance termiche.

3.3 Impostazione dell'analisi termica del componente originale

L'analisi termica tra componente originale e riprogettato sarà comparativa, si basa quindi su stesso materiale e stesse condizioni di carico termico e ambiente.

3.3.1 Definizione del modello da analizzare

Non avendo disponibile il CAD 3D del componente originale, questo è stato disegnato con l'ausilio del software di modellazione CAD parametrica Autodesk Inventor 3D.

La Figura 43 mostra il componente originale da analizzare, un dissipatore passivo di calore disponibile in commercio per il raffreddamento della CPU di un modulo Raspberry Pi. La Figura 44 mostra come il componente è montato sul modulo.



Figura 43 - Componente originale da riprogettare



Figura 44 - Installazione del componente originale sul modulo Raspberry Pi

Per la modellazione 3D sono state adottate, a misura, le quote mostrate nella Figura 45.

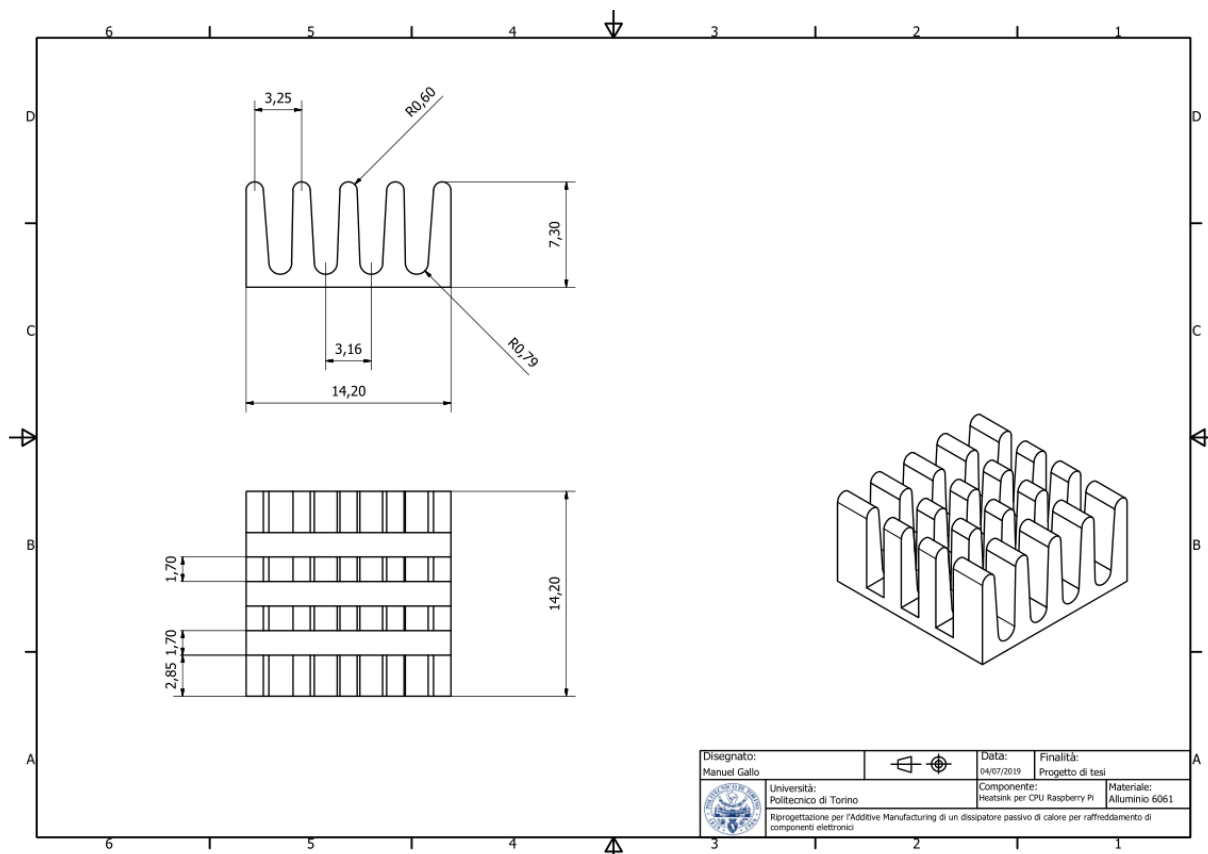


Figura 45 - Tavola con quote significative del componente originale da riprogettare

A valle della modellazione CAD 3D è stata ottenuta la geometria mostrata in Figura 46.

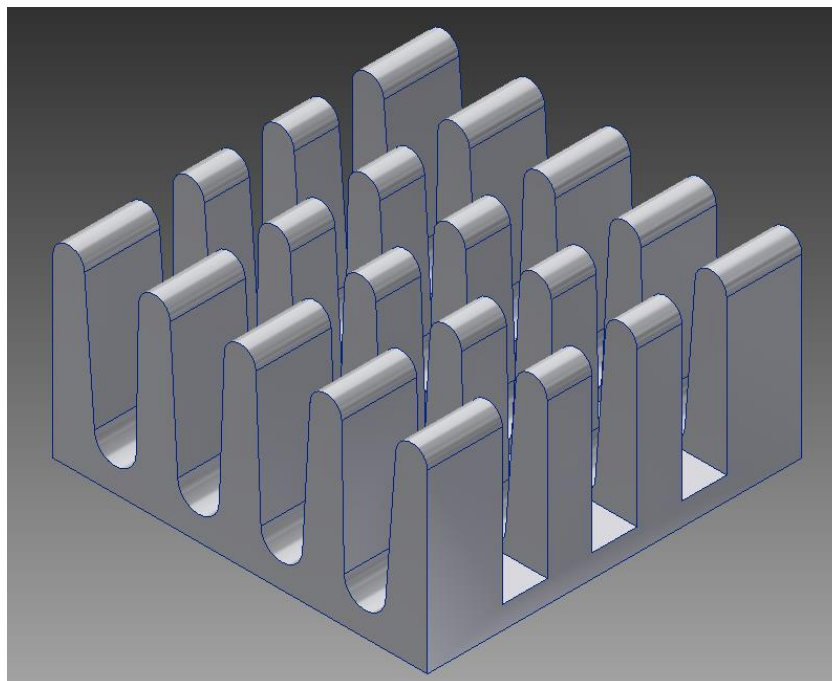


Figura 46 - Geometria ricostruita al CAD del componente originale da riprogettare

La geometria creata ha un formato di file processabile direttamente dal software per l'analisi termica.

Per effettuare l'analisi termica è necessario impostare i carichi termici e le condizioni di funzionamento del componente originale.

Per quanto riguarda i carichi termici, è possibile implementare:

1. Temperatura uniforme (Applied Temperature): simula un'ideale fonte di calore che scalda una superficie o un insieme di superfici, mantenendole ad una temperatura costante impostabile;
2. Sorgente di calore (Heat source): Simula una fonte di calore che fornisce una determinata potenza termica, impostabile, al modello, distribuita su una superficie o su un insieme di superfici;
3. Caratteristiche di scambio termico per irraggiamento (Radiation): simula le condizioni di scambio termico per irraggiamento, impostando l'emissività del materiale (valore compreso tra 0 e 1, più basso per i materiali altamente riflettenti, più elevato per i materiali altamente assorbenti) e la temperatura dell'ambiente in cui è immerso il componente;
4. Caratteristiche di scambio termico per convezione (Convection): simula le condizioni di scambio termico per convezione, è possibile settare il valore del coefficiente di scambio termico per convezione (per un calcolo conservativo $5 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$ per aria in convezione naturale, valori più elevati per la convezione forzata) e la temperatura dell'ambiente che circonda il modello;
5. Fonte di calore interna (Internal Heat): simula una sorgente di calore che fornisce una determinata potenza termica con erogazione dall'interno del componente.

Prima dell'applicazione del carico è necessario definire le superfici o il componente sul quale esso agisce.

L'heatsink reale è in lega di Alluminio Al6061, ottenuto tramite lavorazione alle macchine a controllo numerico, trattato per avere una finitura superficiale nera opaca allo scopo di aumentare l'emissività e, di conseguenza, la potenza termica dissipata per irraggiamento.

I componenti riprogettati saranno costituiti da una lega di Alluminio processabile attraverso tecnica L-PBF, ovvero la lega AlSi10Mg.

Le proprietà dell'AlSi10Mg impostate nel software sono mostrate nella Tabella 9:

Proprietà	Valore	Unità di misura
Densità	$2,67 \cdot 10^{-6}$	kg/mm ³
Modulo di Young (E)	71000	MPa
Modulo di Poisson	0,33	-
Resistenza a snervamento	240	MPa
Resistenza a rottura	460	MPa
Conducibilità termica (k)	0,165	W/(mm°C)
Coefficiente di dilatazione termica	$2,1 \cdot 10^{-5}$	/°C
Calore Specifico	880	J/(kg°C)

Tabella 9 - Proprietà dell'AlSi10Mg per l'analisi termica

3.3.2 Impostazione del calore generato dalla fonte termica (CPU)

Viene considerata l'ipotesi che la CPU sia nella peggior condizione di funzionamento possibile, alla massima temperatura ammissibile di 85°C, e che questa sia la temperatura che è presente alla base dell'heatsink su tutta la superficie, trascurando la resistenza termica e la caduta di calore che avviene nel TIM (Thermal Interface Material).

Il risultato dell'operazione è mostrato in Figura 47.

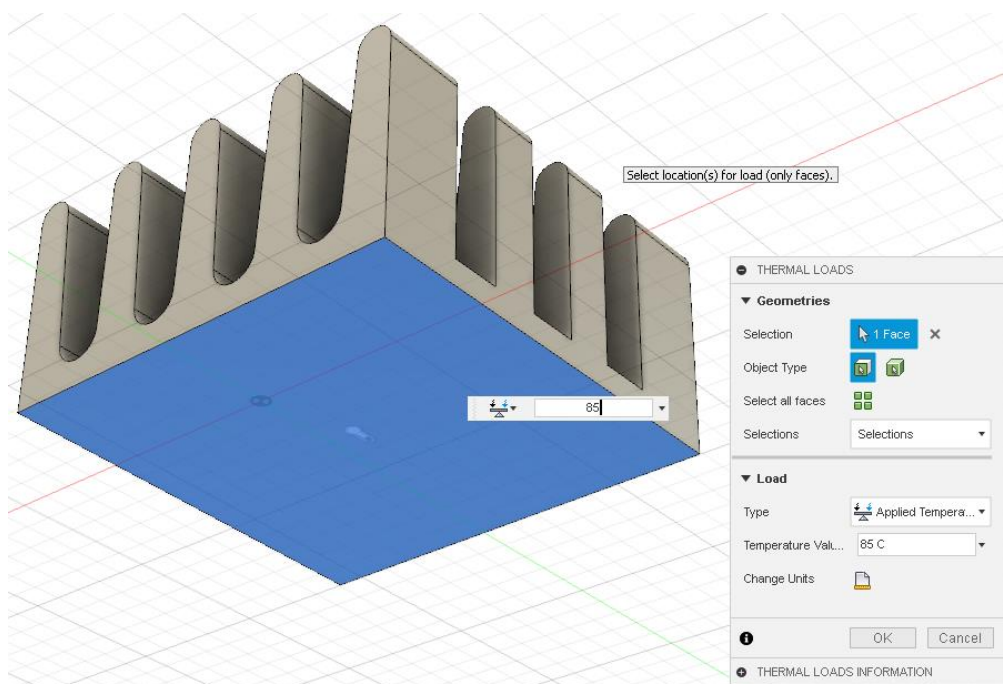


Figura 47 - Applicazione del carico termico di temperatura uniformemente distribuita

3.3.3 Impostazione delle condizioni di dissipazione per convezione

Si passa, dunque, all'impostazione delle condizioni di dissipazione dovute allo scambio termico per convezione.

Al fine di considerare le condizioni più gravose e, al contempo, più plausibili per un'applicazione reale, si è deciso di adottare una soluzione di scambio termico per convezione naturale, impostando un coefficiente di scambio termico per convezione di $5 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ e una temperatura ambiente di 25°C .

Il risultato dell'operazione è mostrato in Figura 48.

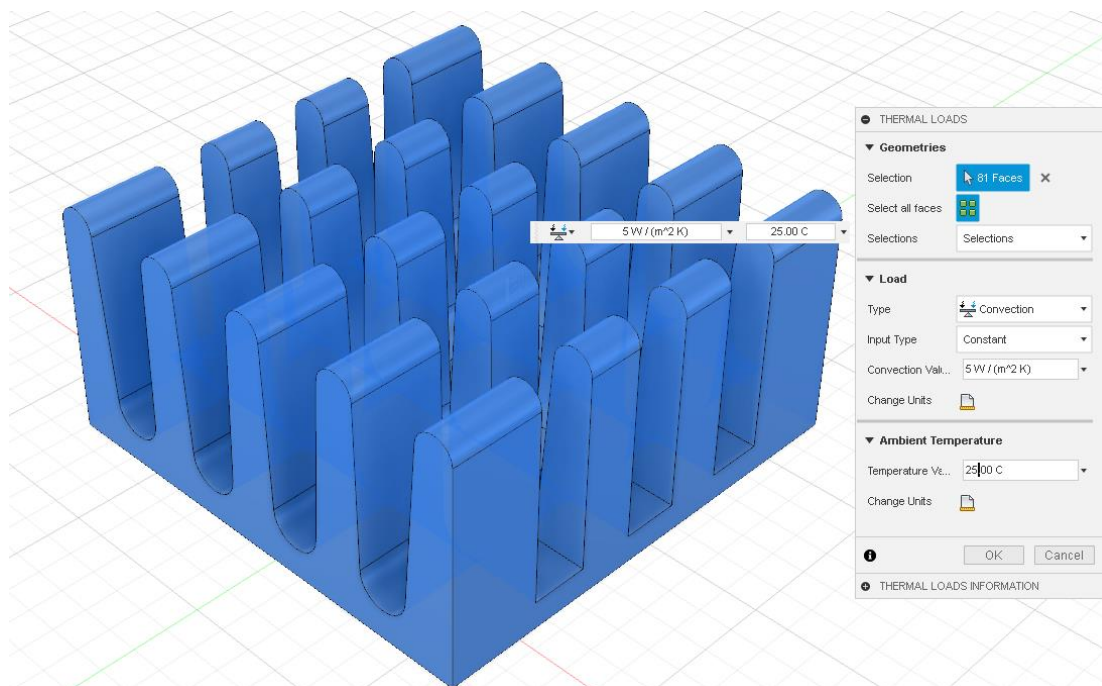


Figura 48 - Applicazione del carico termico convettivo

3.3.4 Impostazione delle condizioni di dissipazione per irraggiamento

Infine, sono state impostate le condizioni di dissipazione del calore per scambio termico per irraggiamento, considerando le peggiori condizioni di un componente in Alluminio non trattato in superficie.

È stato utilizzato un valore di emissività del materiale di 0,04, con un valore di temperatura ambiente di 25 °C.

Il risultato dell'operazione è mostrato in Figura 49.

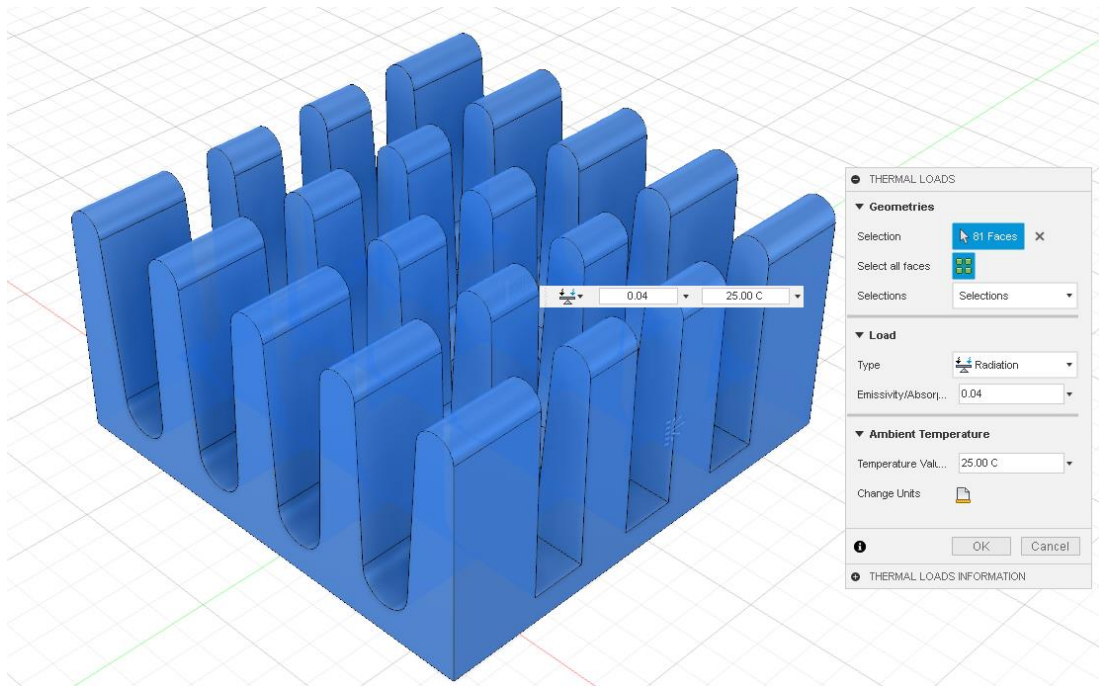


Figura 49 - Applicazione del carico termico radiativo

3.3.5 Calcolo Termico

A valle dell'impostazione del materiale e dei carichi termici che agiscono su componente, è possibile effettuare l'analisi termica.

In caso di più componenti, è necessario generare i contatti (operazione effettuata automaticamente dal software, salvo errori di geometria nel CAD).

Il risultato dell'analisi termica del componente originale è mostrato in Figura 50.

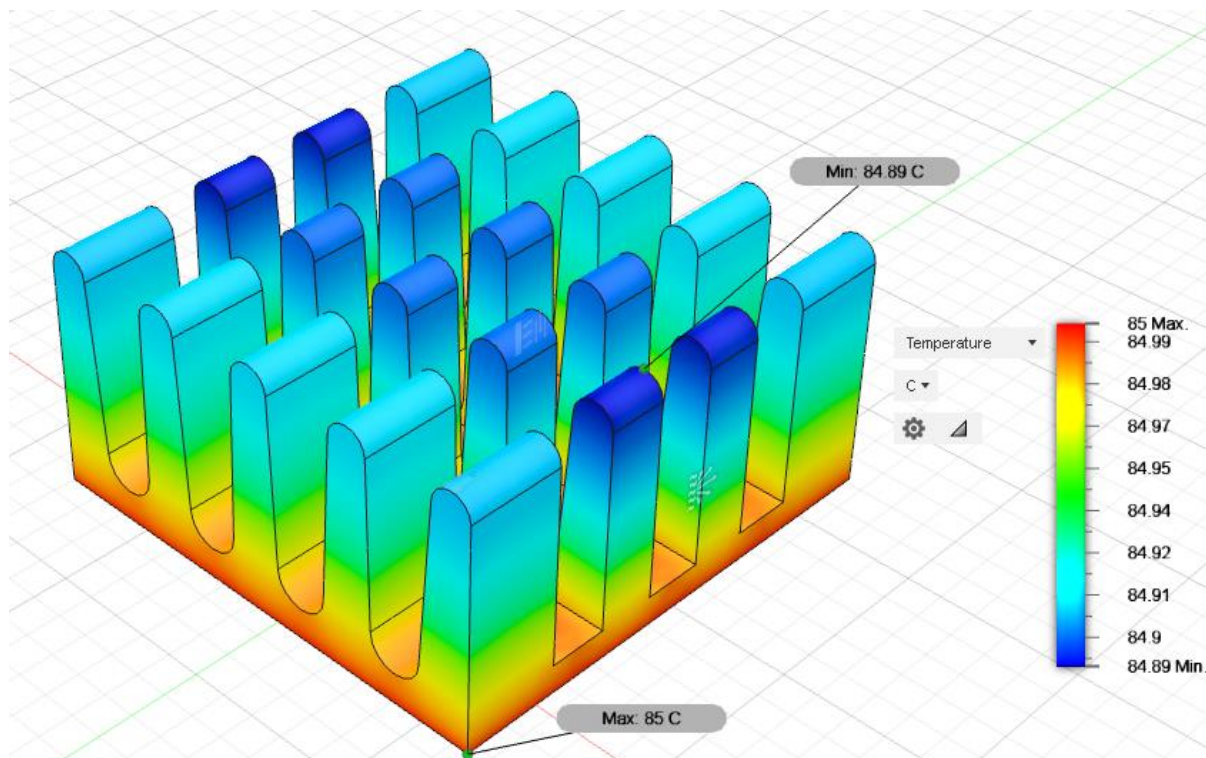


Figura 50 - Risultato analisi termica del componente originale

Con tale configurazione, nelle condizioni peggiori, a calcolo si nota una diminuzione di temperatura di 0,11 °C nella parte centrale dell'heatsink, di 0,1 °C nella zona laterale in cui le fasce delle alette sono più larghe.

Ai fini di un'analisi puramente comparativa con il componente riprogettato, nel caso in cui si dovesse trovare a calcolo una temperatura meglio distribuita e minore nel componente riprogettato rispetto all'attuale configurazione, ciò costituirebbe un incremento delle performance termiche che renderebbe giustificabile, almeno dal solo punto di vista delle prestazioni termiche, il nuovo componente.

Per riassumere, il componente originale ha le caratteristiche esposte in Tabella 10.

Heatsink	Materiale	Massa [g]	Area [mm ²]	Decadimento Temperatura max da 85°C [°C]	Incremento percentuale [%]
originale	Al6061	3,97	1334,20	-0,11	-

Tabella 10 - Caratteristiche componente originale

L'obiettivo è quello di definire delle geometrie che presentino un incremento della caduta di temperatura rispetto al componente originale poiché al maggiore decadimento di temperatura corrisponde un maggiore flusso termico nel componente e, quindi, una maggiore potenza termica dissipata.

Al contempo, la distribuzione di temperatura deve essere anche uniformemente distribuita su tutto l'heatsink.

Altri requisiti di progetto sono:

- Aumento della superficie di scambio termico;
- Diminuzione della quantità di materiale utilizzato per la costruzione del pezzo.

4. Riprogettazione per l'Additive Manufacturing del componente

Si affronta, dunque, la riprogettazione del componente originale per la produzione attraverso la tecnica di Additive Manufacturing di Laser Powder Bed Fusion.

4.1 Il Design For Additive Manufacturing e linee guida

Lo scopo della DFAM (Design For Additive Manufacturing) è la massimizzazione delle prestazioni di un prodotto attraverso una sintesi di forme, dimensioni, strutture gerarchiche e composizione del materiale soggetta al potenziale delle tecnologie additive.

Nella riprogettazione di un componente si deve tener conto che con le tecnologie additive è permesso:

- avere sottosquadri, cercando di evitare, in quelle zone, la necessità e la conseguente creazione di strutture di supporto;
- conferire spessori variabili alle pareti di un componente;
- creare canali di geometria complessa, evitando la creazione di supporti e garantendo uno o più punti di evacuazione per la polvere a fine costruzione;
- produrre componenti con elevata complessità geometrica (forme svergolate, fori ciechi, filettature, ...);
- produrre un complessivo assemblato attraverso la realizzazione di giunti o cerniere.

Il DFAM può essere utilizzato per:

- Minimizzare il peso di un componente conservandone la rigidità strutturale;
- Massimizzare le prestazioni meccaniche o termiche di un prodotto;
- Ottimizzare il comportamento dinamico di un pezzo e le sue performance vibrazionali;
- Ridurre il numero di componenti e ottenere complessivi assemblati attraverso la progettazione integrata.

Attualmente, i metodi più utilizzati di riprogettazione per Additive Manufacturing sono:

- *Ottimizzazione topologica (Topology Optimization)*: è un tipo di ottimizzazione strutturale per cui, una volta definiti i vincoli geometrici progettuali quali le superfici funzionali o di accoppiamento (NON-Design Space) e la parte di geometria che verrà manipolata dal metodo di ottimizzazione (Design Space), a valle di un'analisi strutturale delle tensioni e delle deformazioni derivanti dai carichi meccanici applicati sul componente che simulano le sue condizioni di lavoro, si ottiene una geometria ottimizzata che rispetta i vincoli di progetto imposti (minimo peso e/o massima rigidità), alleggerita di quella porzione di materiale che subisce minori sollecitazioni;
- *Multiscale structure design*: è il metodo in cui si sfrutta la libertà di realizzazione di geometrie elaborate sfruttando il processo di additive e ottenendo strutture con un pattern a celle o strutture reticolari (lattice) costituite da travi con diametro anche dell'ordine di decine di μm (tale metodo viene utilizzato per la minimizzazione del peso in settore aeronautico o per la creazione di strutture porose per il settore biomedico che favoriscono l'osteointegrazione);
- *Multi-material Design*: possibilità, specialmente per le tecniche di additive per polimeri, di creare componenti multi-materiale, sfruttando e personalizzando l'utilizzo e le proprietà di un materiale in determinate zone funzionali del componente (integrazione parti più rigide e parti più flessibili);
- *Design for mass customization*: la possibilità di produrre pezzi direttamente in macchina da un modello CAD senza il dover ricorrere ad attrezzature dedicate permette di accorciare i tempi di consegna (lead time) e produrre componenti personalizzabili secondo le necessità del cliente;
- *Parts consolidation*: metodo per la progettazione di complessivi che vengono prodotti direttamente assemblati in macchina attraverso il design di componenti integrati;
- *Lattice structures*: grazie alla progettazione free-form resa possibile dall'Additive Manufacturing si possono realizzare strutture ad alta intensità di pattern reticolari ad elevata resistenza meccanica e massa limitata; il metodo è molto utilizzato nel settore aerospace e biomedical.

Applicando le regole di DFAM, linee guida per la riprogettazione di componenti volta ad ottenere prodotti ottimizzati per la realizzazione attraverso tecnologie di additive, si intende generare una geometria libera che permetta di superare, attraverso la libertà di design per additive, i limiti di progettazione e produzione imposti dalle tecniche tradizionali, ottenendo un prodotto con migliori performance meccaniche e termiche.

Si propongono, dunque, nel dettaglio le principali norme di Design for Additive Manufacturing comunemente utilizzate durante la riprogettazione di componenti e la definizione di geometrie per la produzione con tecnologie additive.

Ai fini della tesi, è necessario però chiarire che sebbene le regole elencate rappresentino la principale linea guida per la progettazione per l'additive, queste sono pensate per geometrie e componenti di dimensioni molto maggiori rispetto al caso studio oggetto del lavoro.

Per esempio, le regole di DFAM consigliano di non utilizzare valori di wall thickness minori di 1 mm, in realtà per geometrie piccole, realizzate in Alluminio mediante L-PBF si può arrivare a valori fino a 0,125 mm.

4.1.1 DFAM – linee guida per la tecnica L-PBF

1 Piattaforma di costruzione

La piattaforma di costruzione ha in genere una base di dimensioni di 250x250 mm ed è costituita da acciaio. I componenti sono costruiti verticalmente a partire dalla base, un layer alla volta. Lo spazio di lavoro ha un'altezza di 250 o 350 mm (è un cubo o un parallelepipedo).

In genere, prima della costruzione del componente viene costruita dalla base una struttura di supporti che solleva il pezzo finito e ne rende più agevole la rimozione dalla piattaforma di lavoro, processo eseguito attraverso EDM (Electrode Discharge Machining ossia l'elettroerosione a filo).

L'EDM è una tecnica di lavorazione per il taglio di materiali metallici che sfrutta l'elettricità e le capacità erosive di un utensile da taglio, l'elettrodo, che rilascia delle scariche che provocano l'erosione del materiale. Il processo avviene all'interno di un liquido dielettrico.

Prima della rimozione del componente dalla piattaforma, comunque, è necessario effettuare un trattamento termico di distensione (stress relieving) in una fornace per diverse ore al fine di rilassare il materiale tensionato.

Successivamente alla rimozione del pezzo con EDM si rimuovono attraverso fresatura i pochi millimetri residui di materiale rimasti sulla piastra che, dopo rettifica, è pronta per essere utilizzata per il job successivo.

La Figura 51 riassume le fasi del processo.



Figura 51 - Fasi del processo di rimozione del pezzo finito dalla piattaforma di costruzione

2 Orientamento del pezzo e creazione dei supporti

I migliori componenti da costruire in additive sono gli estrusi verticali. Non ha però senso utilizzare questo tipo di tecnologie per la costruzione di geometrie così semplici, facilmente ottenibili con processi di lavorazione meno costosi.

La maggior parte dei componenti costruiti in additive hanno geometrie complesse con superfici inclinate o a sbalzo.

La polvere non fornisce nessun supporto al layer in costruzione, quindi talvolta diventa necessario inserire delle strutture che svolgano questo compito, i supporti.

I supporti sono strutture di scarto, utili a creare superfici di sostegno per il pezzo in costruzione e a meglio distribuire le sollecitazioni termiche nel pezzo, per evitare ritiri, e nella camera di lavoro. Una volta ultimata la costruzione e il trattamento termico di stress relieving, i supporti devono essere rimossi per via meccanica o attraverso EDM (aumentando la quantità di energia necessaria per la costruzione del componente).

L'ideale sarebbe minimizzare la quantità di supporti necessari per il componente.

Ci sono casi in cui, sebbene le superfici siano inclinate o a sbalzo, non ci sono gli estremi per la creazione dei supporti e il sostenimento della sola polvere è sufficiente.

Gli angoli minimi per il sostenimento autonomo del pezzo sono, rispetto al piano della piastra:

- Per acciaio inossidabile: 30°;
- Per Inconel e leghe di Nichel: 45°;
- Per leghe di Titanio: 20 – 30°;
- Per leghe di Alluminio: 45°;
- Per leghe Cromo – Cobalto: 30°.

Inoltre, non necessitano supporti le superfici a sbalzo che sporgono per massimo 2 mm.

3 Fori

Per quanto riguarda i fori, non sempre è necessaria la presenza delle strutture di supporto poiché, utilizzando alcuni accorgimenti di progettazione, è possibile creare fori auto-supportanti.

Con le tecnologie di additive non si è vincolati a realizzare fori ad asse dritto, passanti o ciechi con base conica, essendo libera la geometria ottenibile.

Per quanto riguarda i fori nel componente:

- Piccoli fori possono essere realizzati comodamente, anche se hanno asse perpendicolare alla direzione di crescita del pezzo (ossia alla normale della superficie di costruzione). Idealmente, i fori con diametro minore o uguale a 6mm possono essere realizzati direttamente in macchina con alta precisione e senza l'utilizzo di supporti;
- Fori con diametro maggiore, anche se il materiale dovesse avere capacità auto-supportanti tali da non necessitare della generazione delle strutture, presenterebbero la superficie superiore con rugosità molto elevata o con presenza di difettosità. In questo caso, la feature necessiterebbe di una lavorazione di finitura ulteriore;
- Fori più grandi di 6 mm necessitano superfici di supporto (esempio in Figura 52), aggiunte e generate nel centro del foro per evitare il collasso o la distorsione del pezzo in lavorazione. I supporti dovranno poi essere eliminati meccanicamente o con EDM;



Figura 52 - Necessità di supporti per fori con diametro maggiore di 6 mm

- Per evitare l'utilizzo di supporti è possibile alterarne la geometria, esclusivamente per fori non funzionali ad utilizzo prevalentemente estetico o decorativo (esempio in Figura 53).



Figura 53 - Esempio di modifica di geometria del foro per evitare il bisogno dei supporti

4 Superfici inferiori

Ogni superficie rivolta verso il basso necessita di essere supportata, aggiungendo energia nel processo di costruzione del pezzo a causa del bisogno di eliminare i supporti.

La più semplice e comune generazione di strutture di supporto prevederebbe il riempimento della sezione vuota del pezzo (Figura 54).

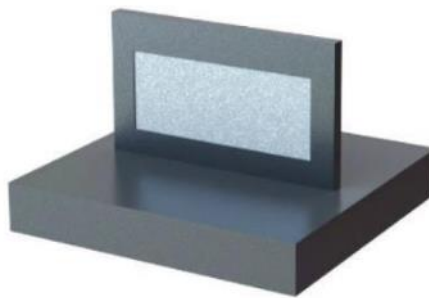


Figura 54 – Supporti di superfici orizzontali

Tale soluzione sarebbe, però, inefficiente poiché sarebbe necessario post-processare 4 superfici al fine di ottenere il pezzo finito.

È possibile creare, o far generare al software, delle superfici di supporto più efficienti in modo da limitare lo sforzo di post-processing del pezzo una volta ultimata la costruzione in macchina (esempio in Figura 55, una sola superficie da lavorare sul pezzo, oltre la rimozione dei supporti dalla piattaforma di costruzione).

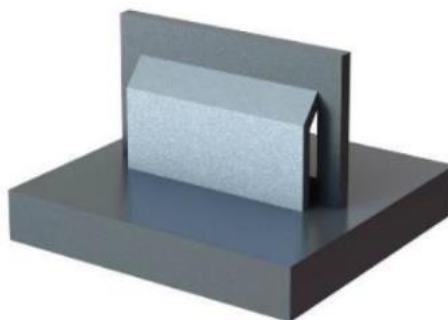


Figura 55 - Esempio di offset supporti per diminuire le superfici da lavorare

Un'altra soluzione possibile è quella di studiare l'orientamento del pezzo in macchina in modo tale da azzerare il numero di superfici che richiedono supporti, come mostrato nell'esempio in Figura 56.



Figura 56 - Esempio di modifica dell'orientazione del pezzo per evitare il bisogno di supporti

In un caso reale, è molto difficile e raro trovare un orientamento che azzeri il bisogno di supporti. Ciò che si fa è cercare la configurazione utile per minimizzarli, o attraverso la creazione di superfici auto-supportanti (Figura 57) o attraverso l'introduzione di features non funzionali che però facilitano la realizzazione ed il post-processing del componente (Figura 58).

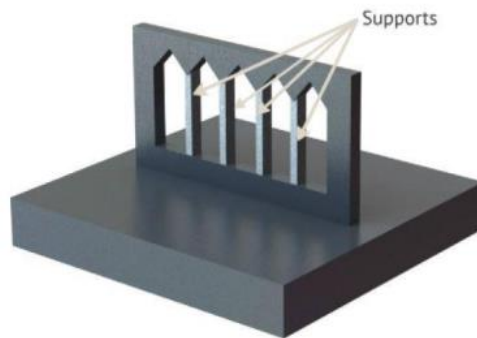


Figura 57 – Esempio di variazione della geometria della superficie orizzontale per diminuire il bisogno di supporti



Figura 58 - Esempio di aggiunta di features non funzionali atte ad eliminare la necessità di supporti

5 Direzione di ricoprimento

Il ricoprimento (Re-coating) è la stesura del successivo strato di polvere sul piano di costruzione del pezzo, una volta che la fusione selettiva del precedente layer è ultimata.

Il re-coater, ovvero il dispositivo che effettua il re-coating, può essere, a seconda dell'azienda costruttrice della macchina, un rullo o una lama.

Specialmente nel caso della lama, per evitare problemi al re-coater o difetti al pezzo dovuti alla stesura della polvere, è necessario adottare alcuni accorgimenti riguardo l'orientamento del pezzo sul piano xy della piattaforma di costruzione.

Questa esigenza nasce dal fatto che il re-coater, durante la corsa di ricoprimento, passa su materiale di diversa densità incontrando zone dense e dure composte da metallo fuso e solidificato, e zone scorrevoli in cui prevale la polvere. L'azione del re-coater sul pezzo già solidificato dovrebbe essere graduale in modo da evitare l'insorgere di forze elevate sullo spigolo della lama (spesso in materiale ceramico, quindi, molto fragile).

L'ideale sarebbe, come mostra la Figura 59, che il re-coater agisse su una superficie circolare o ad U (il ricoprimento interessa, gradualmente, una sezione prima puntuale, poi con incremento regolare).

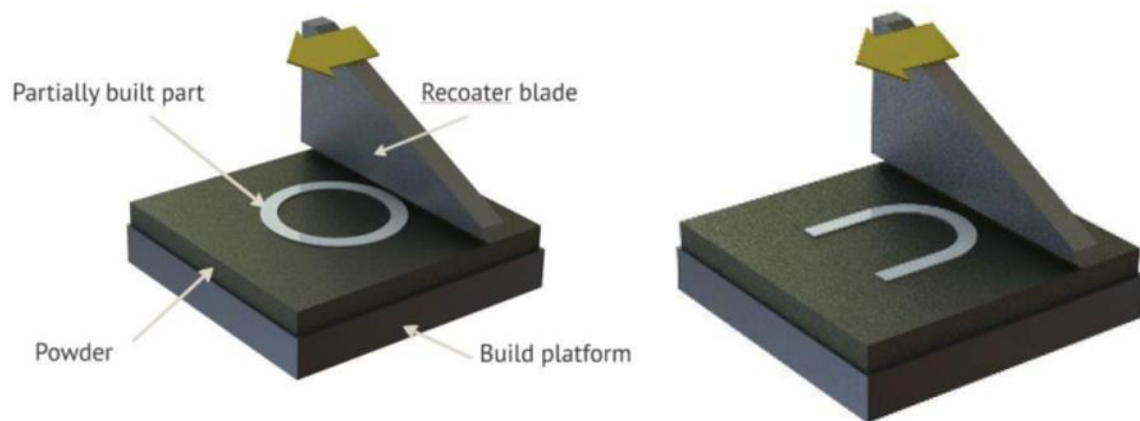


Figura 59 - Condizione ideale per il re-coating

Il caso peggiore sarebbe far impattare la lama sul lato maggiore della superficie in costruzione durante il ricoprimento, come mostra la Figura 60.

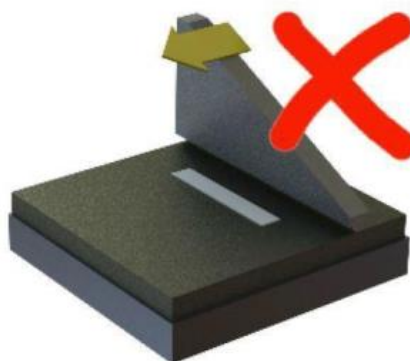


Figura 60 - Condizione peggiore per il re-coating

Infatti, per evitare danneggiamenti bisognerebbe:

- Fare in modo che ogni superficie piana perpendicolare alla direzione di ricoprimento sia inclinata, rispetto al movimento del re-coater, di almeno 5° , in modo tale che questo tocchi per primo un punto, non un lato (Figura 61);

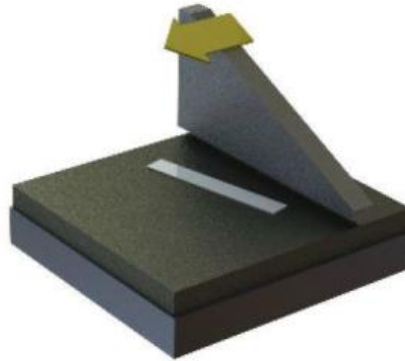


Figura 61 - Esempio di inclinazione del layer per rendere più graduale il re-coating

- Sarebbe meglio che la superficie sia anche rigida, in modo da non deformarsi sotto l'azione delle forze di ricoprimento del re-coater (Figura 62);

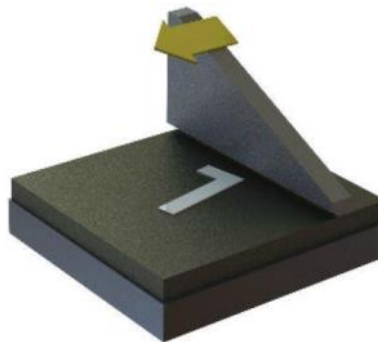


Figura 62 - Esempio di orientamento del layer per garantire massima rigidezza in direzione di re-coating

- Eventualmente, valutare l'introduzione di lati arrotondati lungo la direzione di ricoprimento (esempio in Figura 63);

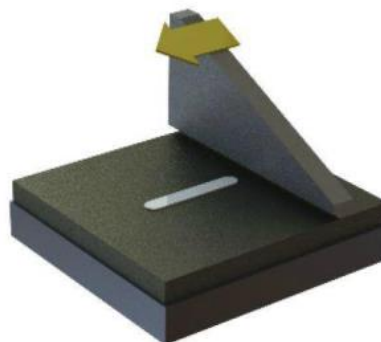


Figura 63 - Arrotondamento della parte di layer in prossimità della direzione di re-coating

6 Costruzione di parti snelle

Per la costruzione di componenti verticali snelli, è buona norma che il lato della superficie di base e l'altezza del pezzo siano tra loro di un rapporto 1:8 (Figura 64).



Figura 64 - Mantenimento del rapporto 1:8 tra lato corto base ed altezza di strutture snelle

Questo vincolo deriva dall'aumentare della forza applicata dal re-coater durante il ricoprimento sul pezzo, man mano che la sua altezza aumenta. Ciò può portare ad un alteramento della geometria del pezzo in fase di costruzione con relativi conseguenti difetti di proporzione e forma (esempio in Figura 65).



Figura 65 - Esempio di inflessione di strutture snelle

Anche in questo caso, per arginare il limite è possibile sfruttare la libertà di progettazione ed alterazione funzionale del design aggiungendo, come nell'esempio in Figura 66, delle strutture aggiuntive che costituiscano un supporto strutturale per il pezzo in costruzione.



Figura 66 - Esempio di soluzione dell'inflessione attraverso l'aggiunta di strutture che aumentano la rigidità del pezzo

La stessa problematica si riscontra nella costruzione di strutture snelle normalmente resistenti ma che durante la fase di costruzione necessitano di supporto per la fase di re-coating. Per esempio, una struttura snella triangolare (Figura 67) sarà molto debole in prossimità del vertice.

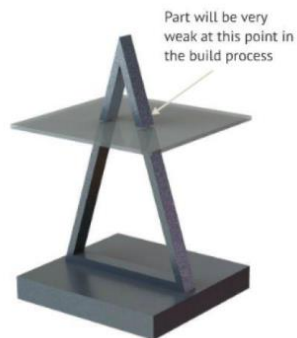


Figura 67 - Esempio di struttura che è più debole in sommità

Il limite può essere superato aggiungendo delle strutture di supporto attorno alla zona più sollecitata durante la costruzione, al fine di aumentare la rigidità del componente, oppure aggiungere dei fori che non richiedono supporti, quindi con diametro non maggiore di 6 mm (soluzioni mostrate in Figura 68).



Figura 68 - Esempio di aggiunta di strutture ausiliarie per irrigidire il pezzo in fase di costruzione

7 Geometrie con spigoli vivi

Laddove possibile, bisognerebbe evitare la presenza di geometrie o porzioni con features contenenti spigoli vivi o bordi affilati, progettando pezzi con spigoli di minimo 0.5 mm di raccordo. Questo limite è legato prevalentemente allo spot del laser, circolare, e all'impossibilità di creare bordi taglienti in macchina a causa della formazione di cluster di polvere solidificata in prossimità della minima superficie illuminata dal laser.

Inoltre, sarebbe meglio evitare che superfici con angoli o spigoli vivi siano incontrate dal re-coater durante il ricoprimento: potrebbero causare un aumento della resistenza incontrata dai servo-meccanismi tale da terminare la costruzione e/o danneggiare la lama del re-coater.

Poiché gli spigoli vivi rappresentano delle zone di concentrazione delle tensioni, si può sfruttare la libertà di design per riprogettare il componente con bordi più arrotondati (esempio in Figura 69).

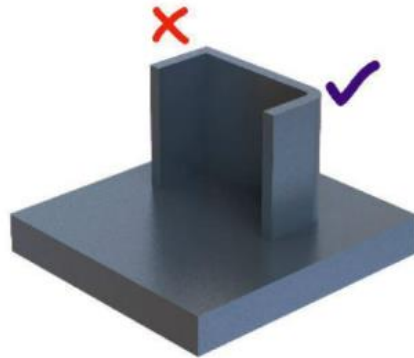


Figura 69 - Esempio di modifica degli spigoli vivi

Un laser per applicazioni L-PBF emette un fascio di diametro 0,03 mm, che è il minimo raggio di raccordo per gli spigoli del componente [14].

8 Sezioni estese

È sempre meglio evitare che la costruzione del pezzo in macchina avvenga attraverso sezioni estese e costanti. Al fine di distribuire meglio le sollecitazioni termiche che si generano in fase di costruzione ed evitare, quindi, possibili fenomeni di ritiro che risulterebbero in un componente difettoso o, peggio, nel danneggiamento del re-coater, è consigliabile conferire un angolo alla parte al fine di minimizzare la sezione orizzontale da scannerizzare per ogni layer (esempio in Figura 70).

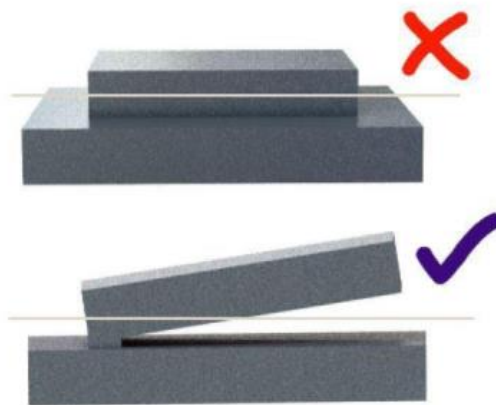


Figura 70 - Esempio di modifica di inclinazione del pezzo per rendere graduale l'estensione del layer da fondere

9 Rimozione pezzo dalla piattaforma di lavoro

Si è detto che, a valle della costruzione del pezzo in macchina e del trattamento termico di stress-relieving, è necessario rimuovere il pezzo dalla piattaforma di lavoro e spesso è necessario usare la tecnica di EDM.

È possibile integrare nel design del pezzo il percorso dell'EDM in modo tale da ottenere un risparmio vantaggioso in fase di post-processing del componente (esempio in Figura 71).

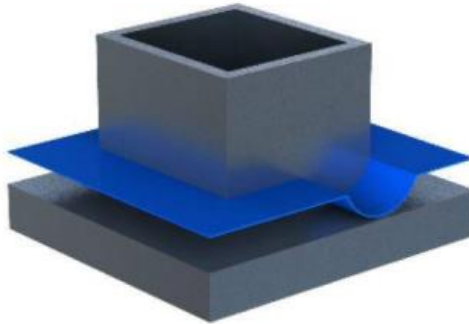


Figura 71 - Esempio di definizione della geometria di una parte di pezzo sfruttando l'EDM per la rimozione dei supporti

10 Costruzione di parti multiple

La tecnica di L-PBF dà la possibilità di costruire dei componenti integrati, studiando appositamente giochi e accoppiamenti delle parti in modo tale da assicurarne il movimento relativo.

Per complessivi integrati, questo tipo di caratteristica di produzione permette il risparmio di tempi e costi di lavorazione ed assemblaggio.

11 Generazione dei supporti

Uno dei maggiori limiti della tecnica di produzione di Additive Manufacturing L-PBF è la necessità di utilizzo di strutture esterne al componente finito dette supporti, realizzate in macchine con del materiale che a fine processo sarà di scarto, che necessitano di lavorazioni ulteriori per essere rimosse, provocando l'aumento di energia assorbita dalla produzione di una parte sia in fase di costruzione in macchina, sia in fase di rimozione meccanica o tramite EDM delle strutture.

La necessità dei supporti per la costruzione del componente finito può essere minimizzata adottando delle norme di progettazione.

Le strutture di supporto in fase di costruzione sono necessarie perché:

- Rappresentano una base di supporto per superfici inclinate o a sbalzo appena interessate dal processo fusorio;
- Garantiscono una maggiore resistenza del layer al fenomeno del ritiro, che ne genererebbe la deformazione con conseguenze sia sulla qualità del componente finale, sia su possibile danneggiamento delle parti in movimento della macchina;
- Forniscono ulteriori canali preferenziali per la dissipazione del calore durante la fase di costruzione, scongiurando il ritiro o la formazione di tensioni termiche troppo elevate;
- Permettono il sostentamento temporaneo di geometrie parziali che avranno una resistenza strutturale significativa solo a fine costruzione in macchina.

Sfruttando le regole di DFAM e la libertà di progettazione intrinseca nell'utilizzo delle tecniche di Additive Manufacturing sarebbe ideale creare una geometria che non abbia bisogno di supporti in fase di costruzione ma, nella realtà, la norma vuole che il pezzo da realizzare abbia la minima quantità di supporti possibile (esempio in Figura 72).

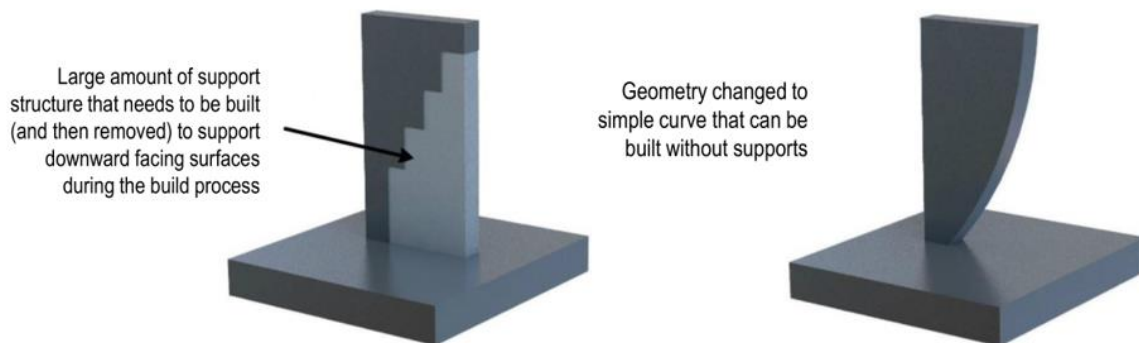


Figura 72 - Esempio di modifica di geometria per diminuire la necessità di supporti

11.1 Superfici orizzontali

Nel caso di intere porzioni di componente contenenti superfici completamente supportate, è necessario prevedere delle features che facilitino l'intervento di rimozione meccanica o tramite EDM dei supporti. L'esempio in Figura 73 mostra il caso in cui un componente con superficie orizzontale completamente supportata presenta un foro nella struttura di supporto (diametro massimo 6 mm per non necessitare di supporti) per facilitare l'inserimento del filo per l'EDM, necessaria per la rimozione dei supporti.

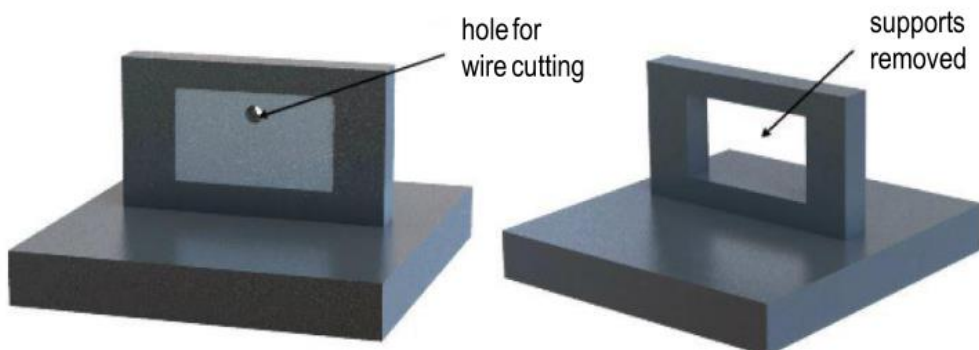


Figura 73 - Esempio di preparazione alla rimozione dei supporti attraverso features costruite di pezzo in macchina

In questo caso, sfruttando il vantaggio del processo di additive, è stata riprogettata la geometria della struttura di supporto in modo conveniente all'ottenimento del pezzo finito.

11.2 Superfici a sbalzo

Le superfici a sbalzo possono essere supportate:

- Superfici che sporgono di massimo 2 mm riescono ad essere supportate dalla sola polvere;
- Dalla piattaforma di costruzione, portando però ad una quantità di supporti considerevole;
- Dal pezzo (buttress supports), strutture che crescono dalla geometria e supportano la superficie a sbalzo attraverso un angolo (compatibilmente agli angoli di auto-supporto del materiale);
- Variando la geometria del componente, generando una feature con superfici auto-supportanti.

Esempi delle tre soluzioni sono mostrati in Figura 74.

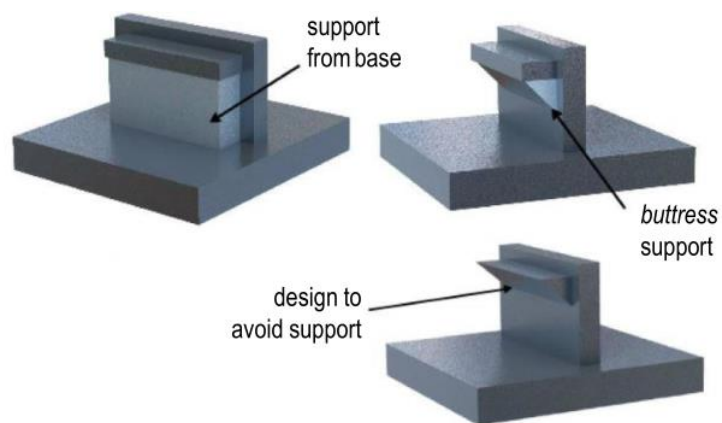


Figura 74 - Esempi di diverse soluzioni per supportare una superficie a sbalzo

11.3 Superfici curve

Talvolta è necessario supportare superfici curve con concavità rivolta verso l'alto in modo tale da evitare il collasso strutturale del pezzo in costruzione o la generazione di superfici con elevata rugosità.

Una struttura di supporto viene generata sotto il componente, successivamente rimossa con EDM o lavorazioni meccaniche. La Figura 75 ne mostra un esempio.

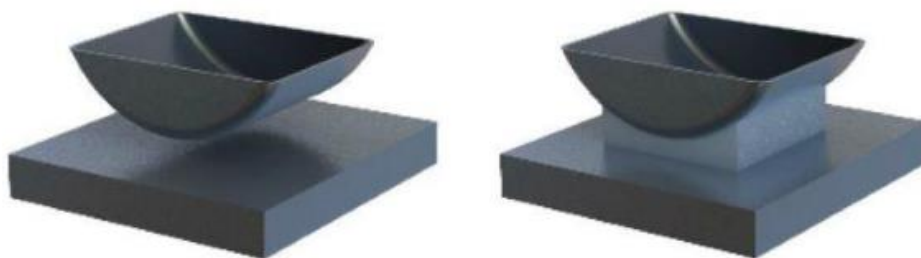


Figura 75 - Esempio di supporto di superfici curve

12 Impatto degli stress termici

La rapida fusione e successivo raffreddamento e solidificazione delle porzioni di layer in costruzione colpite dal laser causa il generarsi di tensioni di origine termica all'interno del pezzo.

La presenza di stress termici può portare a:

- Delaminazione del layer: le tensioni di ritiro sono tali da creare dei fenomeni di non aderenza tra diverse porzioni dei layer, causando un effetto di sfogliatura che sfocia in deformazione del pezzo e può portare a difetti nel componente o danneggiamento degli organi in moto della macchina;
- Cricche interne al materiale;
- Distorsione del pezzo;
- Difetti in fase di finitura superficiale.

Al fine di evitare la presenza di tensioni termiche troppo elevate nel pezzo è possibile rilassare il materiale attraverso:

- Pallinatura o sabbiatura (shot peenig), generalmente con le stesse polveri di costruzione per evitare, specialmente in macchina, difetti dovuti a fenomeni di cross-contamination;
- Trattamento termico di distensione (Stress Relieving).

Usare strutture di supporto spesse e robuste può minimizzare l'insorgere di stress termici elevati e dannosi durante la costruzione.

La Figura 76 mostra alcuni difetti causati da sollecitazioni termiche elevate durante la costruzione.

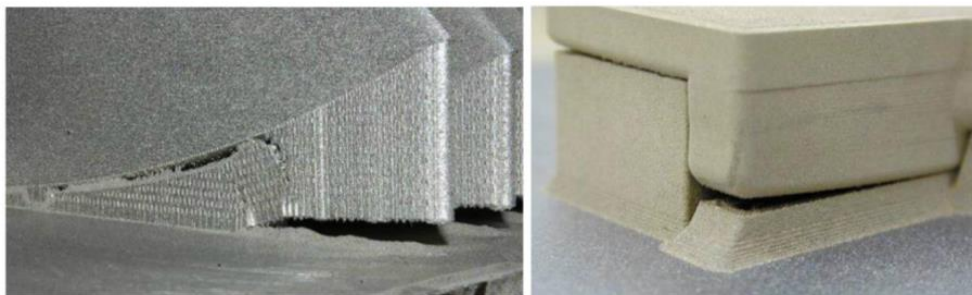


Figura 76 - Esempi di difetti dovuti alle tensioni termiche

13 Spessore delle pareti e piccoli dettagli

Lo spessore delle pareti (wall thickness) dipende dal materiale ma in genere è dell'ordine di grandezza di 1 mm. Avere valori di wall thickness troppo bassi possono causare difetti nel componente o distorsione nelle pareti.

È anche possibile conferire al componente features molto piccole, come piccoli fori.

La Figura 77 mostra un componente ottenuto per L-PBF con una parete di spessore 0.9 mm e un foro dal diametro di 0.4 mm.

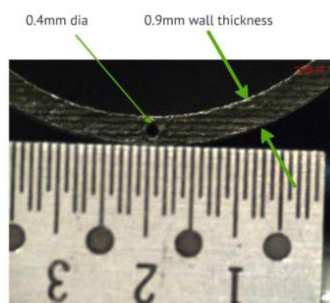


Figura 77 - Esempio di ottenimento di piccoli dettagli per il pezzo

4.2 Riprogettazione del componente per la L-PBF

L'heatsink è riprogettato attraverso un processo di definizione di una geometria libera, seguendo le norme di DFAM e mirando ad un'ottimizzazione delle performance termiche, cercando di incrementare ulteriormente il decadimento di temperatura da 85°C mantenendo omogenea la distribuzione di temperatura.

La riprogettazione del componente è stata definita secondo diversi approcci, risultanti nelle seguenti geometrie:

1. Componente originale con la sola aggiunta di features ottenibili con il processo di L-PBF;
2. Componente con nuova geometria delle sole alette;
3. Componente con geometria estrusa;
4. Componente con geometria libera;
 - 4.1. Componente con geometria libera con caduta di temperatura uniformemente distribuita;
 - 4.2. Componente con geometria libera con caduta di temperatura migliorata;

Ogni componente riprogettato è pensato per essere prodotto con lega AlSi10Mg.

Per la definizione di ogni geometria è stato ipotizzato di mantenere l'ingombro del componente originale (14,2x14,2x7,3 mm), definendo come zona di non-design space la base dell'heatsink, funzionale per l'accoppiamento con il microprocessore da raffreddare attraverso un Thermal Interface Material adesivo.

Il TIM adesivo permette di non aggiungere features per l'ancoraggio dell'heatsink, non necessarie considerando anche le dimensioni ridotte del componente.

Anche per i componenti riprogettati è stata svolta l'analisi termica implementando i carichi termici riassunti in Tabella 11.

Carico termico	Grandezza caratteristica	Valore	Superficie su cui agisce
Conduzione	Temperatura uniforme	85 °C	Superficie inferiore della base
Convezione naturale	Coeff sc. termico conduttivo	5 W/(m ² K)	Tutte le superfici tranne quella inferiore
Irraggiamento	Emissività	0.04	Tutte le superfici tranne quella inferiore

Tabella 11 - Condizioni di carico termico per analisi geometrie

Per ogni condizione di carico, la temperatura dell'aria circostante all'heatsink è stata impostata a 25°C.

Si è pensato di riprogettare il componente attraverso la creazione di geometrie producibili con L-PBF, mirando ai seguenti obiettivi e requisiti di progetto:

- Miglioramento delle performance termiche: incremento del decadimento di temperatura rispetto all'heatsink originale con salto termico uniformemente distribuito su tutto il componente;
- Aumento della superficie di scambio termico;
- Diminuzione della quantità di materiale utilizzato per la costruzione del pezzo.

In particolare, il requisito di diminuzione del materiale utile ha anche una componente ecologica: ricavare l'heatsink originale da un blocco di Alluminio con tecniche per asportazione di truciolo necessiterebbe di 1472 mm³ di materiale (trascurando l'eventuale sovrametallo per la lavorazione) per un peso di 3,974 g (considerando la densità dell'Alluminio 6061 di 2,7 g/cm³) per ottenere un componente di 1,588 g con la creazione di 2,386 g per pezzo prodotto di materiale di scarto (più del 60% del pezzo finito).

Per l'heatsink riprogettato, invece, tutto il materiale processato è utilizzato per il componente e, in assenza di supporti da eliminare e smaltire, non vi è quasi creazione di materiale di scarto (ad eccezioni dei supporti per ancorare il pezzo alla piattaforma di costruzione).

Nei prossimi sotto-paragrafi sono presentate le geometrie ottenute e le rispettive performance termiche.

4.2.1 Componente originale riprogettato con features ottenibili attraverso L-PBF

La prima geometria riprogettata è stata ottenuta considerando il componente originale senza alterarne la forma, aggiungendo delle features realizzabili attraverso L-PBF ma difficilmente ottenibili attraverso tecnologie di produzione tradizionale.

La geometria ottenuta è mostrata in Figura 78.

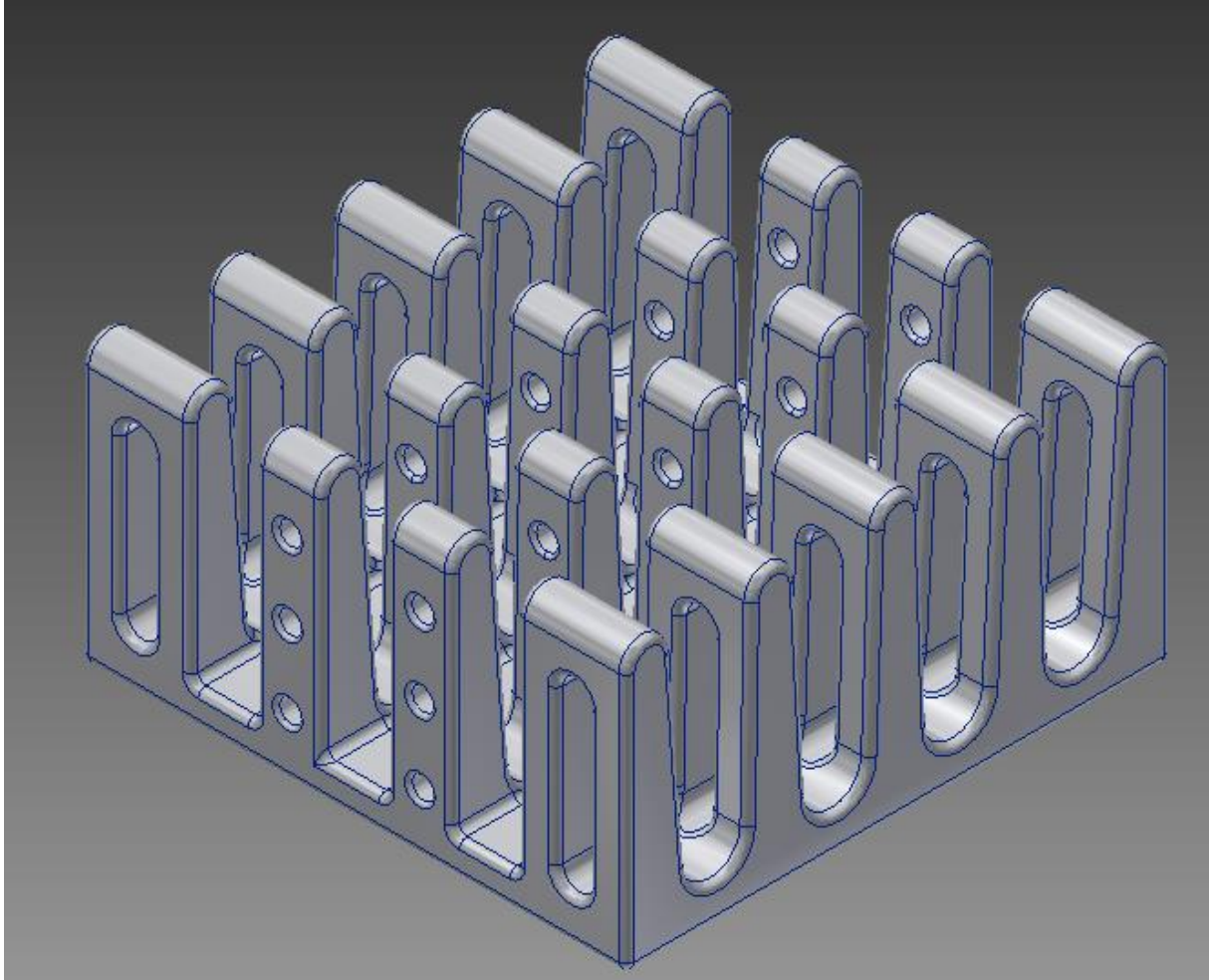


Figura 78 - Componente riprogettato con aggiunta di features aggiuntive ottenibili con L-PBF

Sono stati aggiunti dei fori e delle tasche di alleggerimento all'interno delle alette, sul lato lungo.

La rimozione di materiale ha la duplice funzione di alleggerire il componente e, al contempo, di aumentare la superficie di scambio termico in modo tale da favorire la dissipazione del calore durante la messa in esercizio dell'heatsink.

Per la definizione della geometria sono state seguite le seguenti regole di progettazione:

1. Fori con diametro minore di 6 mm per non necessitare di supporti, maggiore di 0.4 mm per essere realizzabile → i fori hanno un diametro di 0,6 mm;
2. Pareti orizzontali che non sporgono per più di 2 mm → massima superficie a sbalzo con sporgenza di 1.58 mm;
3. Massimo rapporto tra lato base e altezza di una struttura snella di 8:1 → massimo rapporto nella geometria riprogettata è 4,04:1;
4. Nessuno spigolo vivo → tutti gli spigoli sono stati raccordati con raggio di 0,20 mm;
5. Wall thickness dell'ordine di 1 mm.

La Figura 79 mostra il disegno 2D della geometria con le quote di interesse.

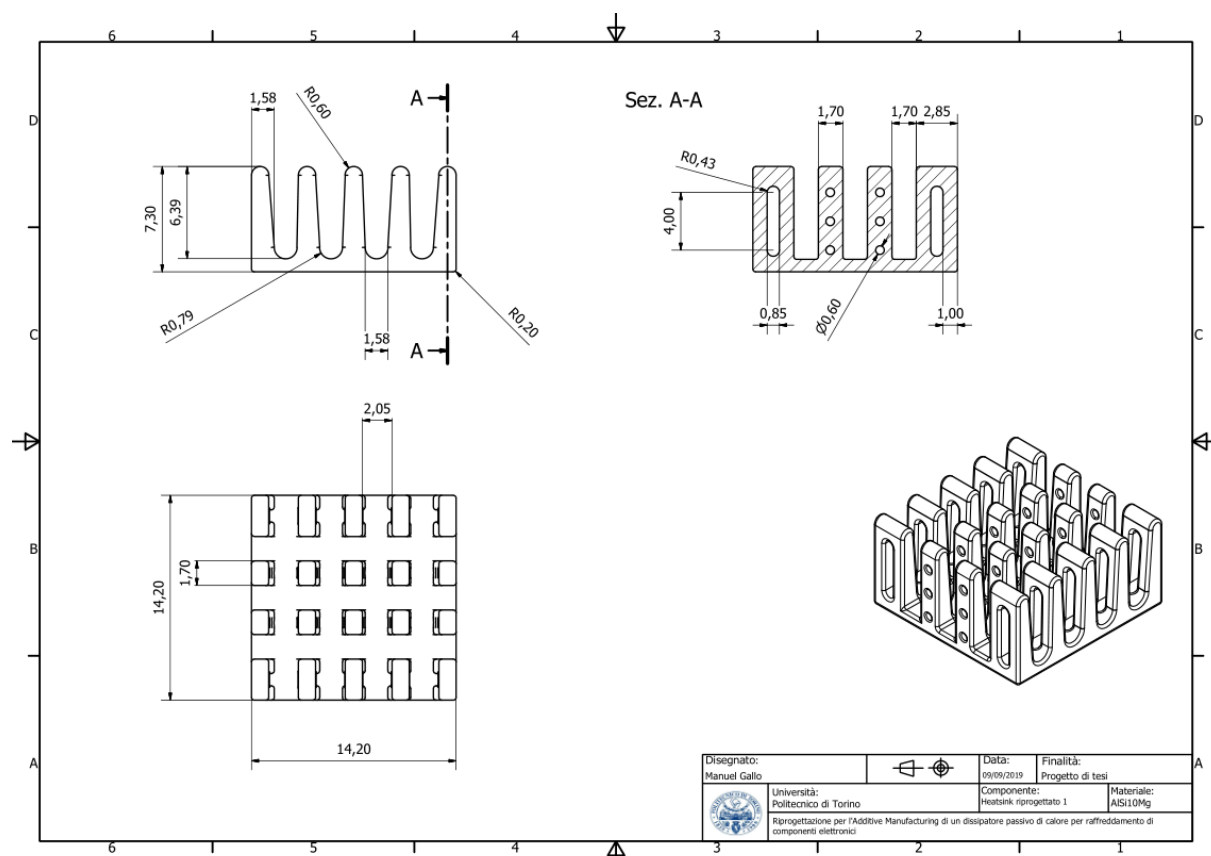


Figura 79 - Disegno CAD con quote significative per la geometria con features aggiuntive ottenibili con L-PBF

Il componente è stato sottoposto ad analisi termica numerica, con le condizioni di funzionamento critiche implementate per il componente originale con l'unica differenza del materiale che per i componenti riprogettati è l'AlSi10Mg.

Il risultato della simulazione delle performance termiche è riportato in Figura 80.

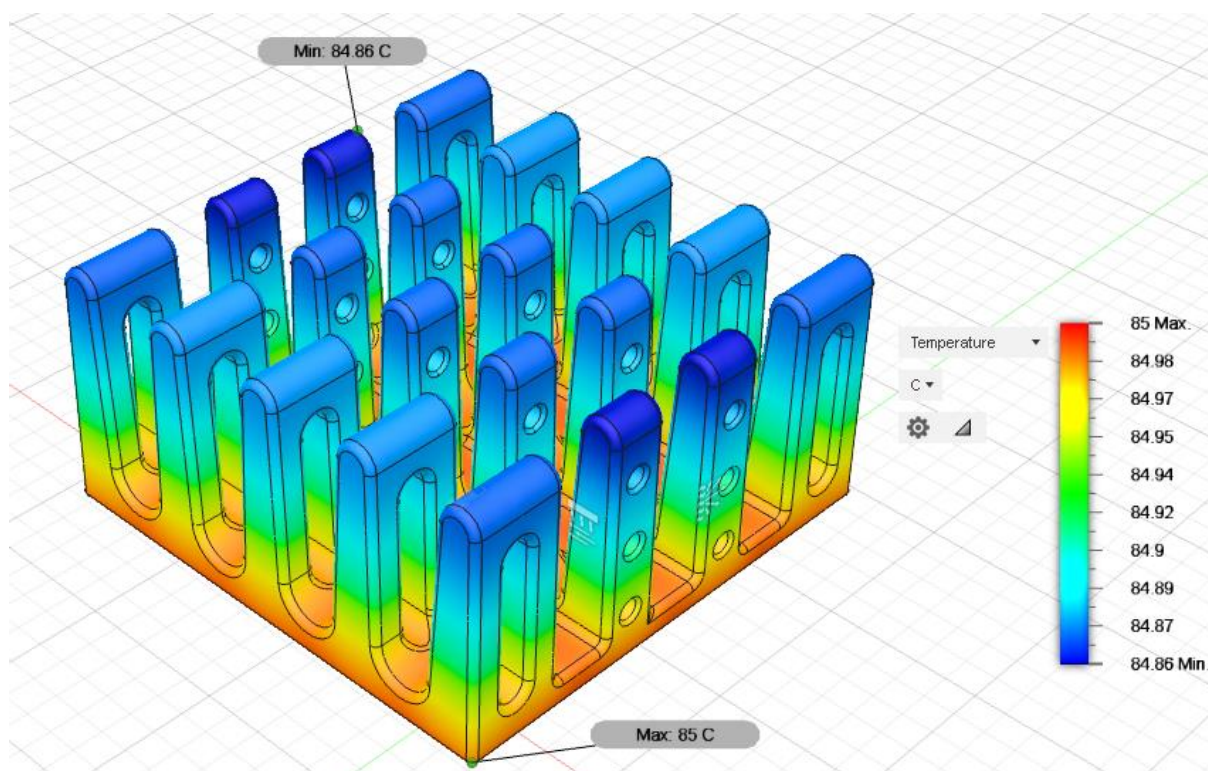


Figura 80 - Risultato dell'analisi termica della geometria con features aggiuntive ottenibili con L-PBF

Dal risultato della simulazione si nota una migliore distribuzione della temperatura sulle alette dell'heatsink e una temperatura minima di 84,86 °C, con un decadimento di temperatura di 0,14 °C, il 27,3 % in più rispetto al componente originale.

Le caratteristiche del primo componente riprogettato, denominato Geometria #1, sono riportate in Tabella 12 insieme a quelle del componente originale.

Heatsink	Materiale	Massa [g]	Area [mm ²]	Decadimento Temperatura max da 85°C [°C]	Incremento percentuale [%]
Originale	Al6061	3,97	1334,20	-0,11	-
Geometria #1	AlSi10Mg	1,380	1395,50	-0,14	27,27

Tabella 12 - Confronto caratteristiche geometrie

4.2.2 Componente riprogettato con nuova geometria delle alette

La seconda geometria è stata definita utilizzando le regole di DFAM per realizzare un nuovo corpo alettato.

Prima della definizione della nuova geometria delle alette è stato eseguito il defeaturing del componente originale, ovvero la semplificazione della geometria per renderne più agevole la riprogettazione.

Nell'operazione di defeaturing sono state disegnate alette dello stesso spessore, equidistanti e con superfici laterali verticali.

La geometria ottenuta è mostrata in Figura 81.

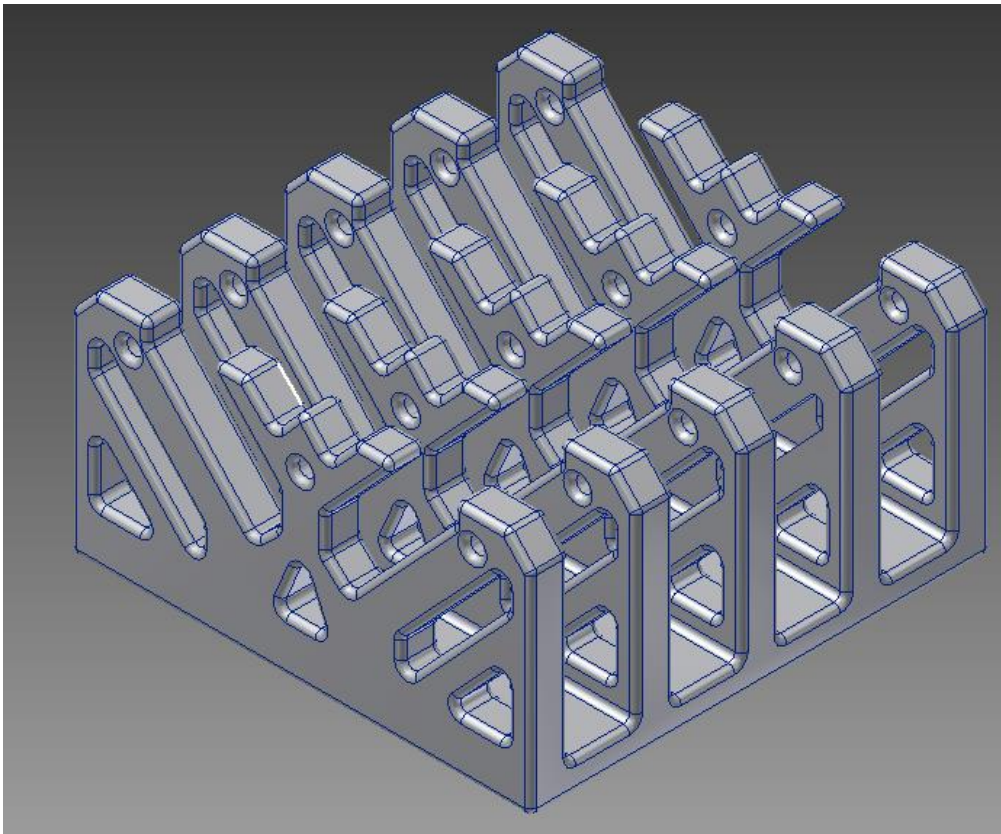


Figura 81 - Componente riprogettato con nuova geometria alette

Per la definizione della geometria sono state seguite le seguenti regole di progettazione:

1. Fori con diametro minore di 6 mm per non necessitare di supporti, maggiore di 0.4 mm per essere realizzabile → i fori hanno un diametro di 0,5 mm;
2. Pareti orizzontali che non sporgono per più di 2 mm → massima superficie a sbalzo con sporgenza di 1.20 mm;
3. Nessuno spigolo vivo → tutti gli spigoli sono stati raccordati con raggio di 0,20 mm;
4. Wall thickness dell'ordine di 1 mm.
5. Minimo angolo di auto-supporto per componenti prodotti per L-PBF in Alluminio di 45° → le superfici inclinate hanno angoli di inclinazione di 47° o 66,72°.

Un disegno 2D con le quote più significative per il componente riprogettato è mostrato in Figura 82.

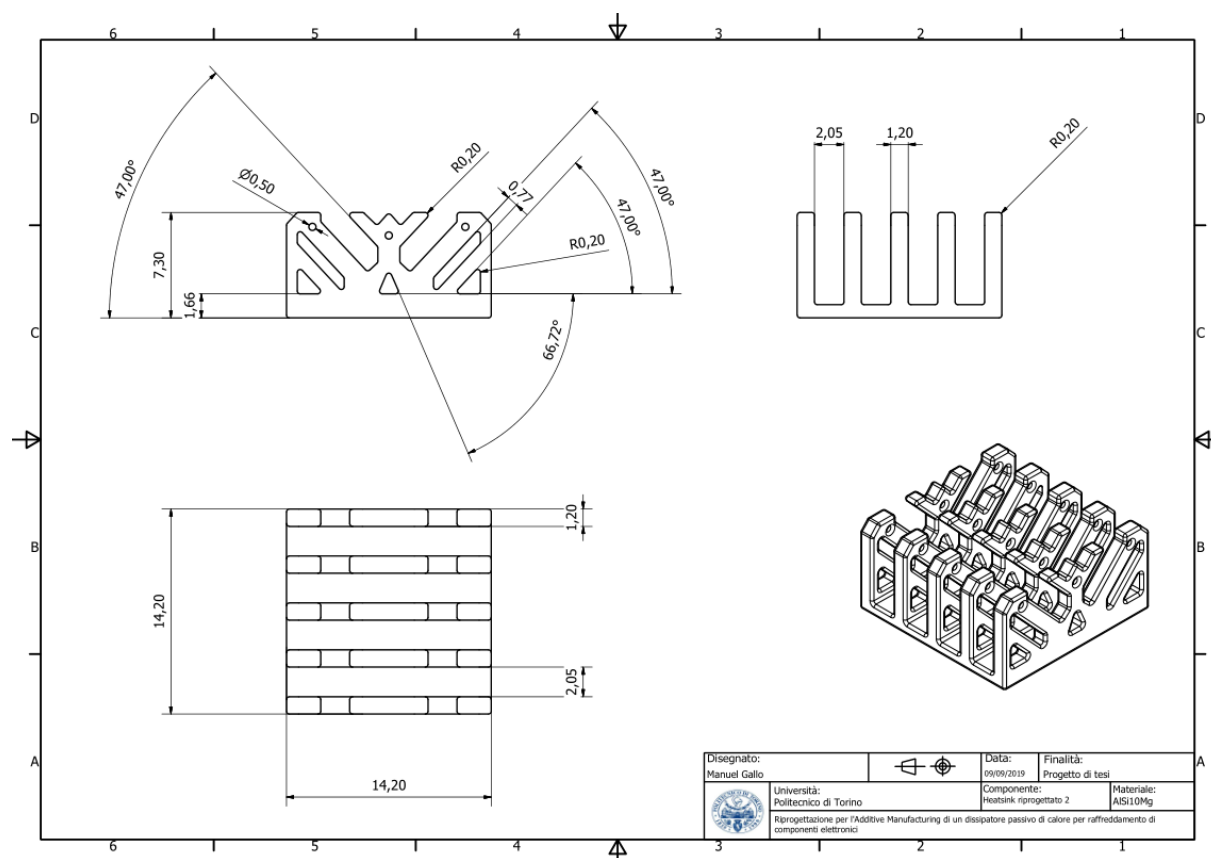


Figura 82 - Disegno CAD con quote significative per il componente con nuova geometria delle alette

Il componente è stato sottoposto ad analisi termica numerica, con le condizioni di funzionamento critiche implementate per il componente originale.

Il risultato della simulazione delle performance termiche è riportato in Figura 83.

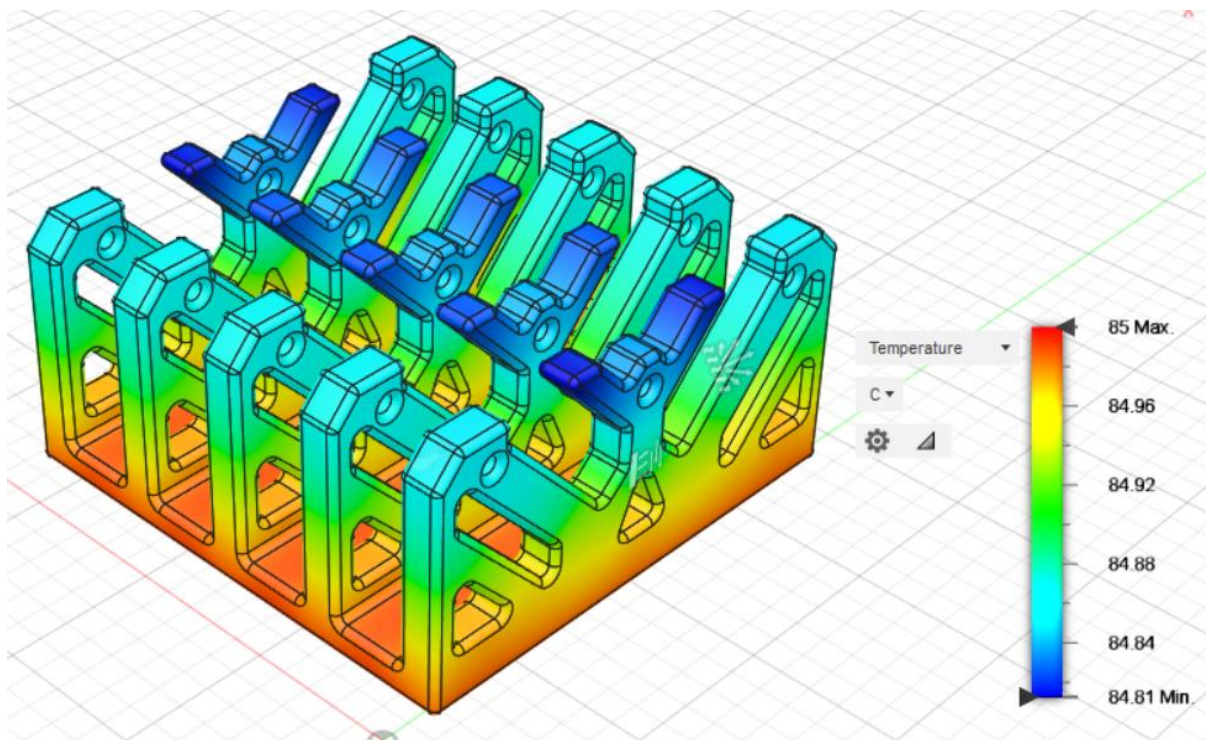


Figura 83 - Risultato analisi termica del componente riprogettato con nuova geometria alette

Dal risultato della simulazione si nota il raggiungimento di una temperatura minima di 84,81 °C, con un decadimento di temperatura di 0,19 °C, il 72,70% in più rispetto al componente originale.

Anche in questo caso vi è stato sia un aumento della superficie di scambio termico, sia una diminuzione della massa totale del componente riprogettato rispetto all'originale.

Le caratteristiche del secondo componente riprogettato, denominato Geometria #2, sono riportate in Tabella 13 insieme a quelle del componente originale e della Geometria #1.

Heatsink	Materiale	Massa [g]	Area [mm ²]	Decadimento Temperatura max da 85°C [°C]	Incremento percentuale [%]
Originale	Al6061	3,97	1334,20	-0,11	-
Geometria #1	AlSi10Mg	1,380	1395,50	-0,14	27,27
Geometria #2	AlSi10Mg	1,456	1400,30	-0,19	72,73

Tabella 13 - Confronto caratteristiche geometrie

4.2.3 Componente riprogettato con geometria estrusa

Con riferimento al metodo di progettazione growth process (paragrafo 2.3.1) si è cercato di ottenere una geometria estrusa, processabile attraverso L-PBF e capace di incrementare le performance termiche del componente originale.

La geometria ottenuta utilizzando questo approccio è mostrata in Figura 84.

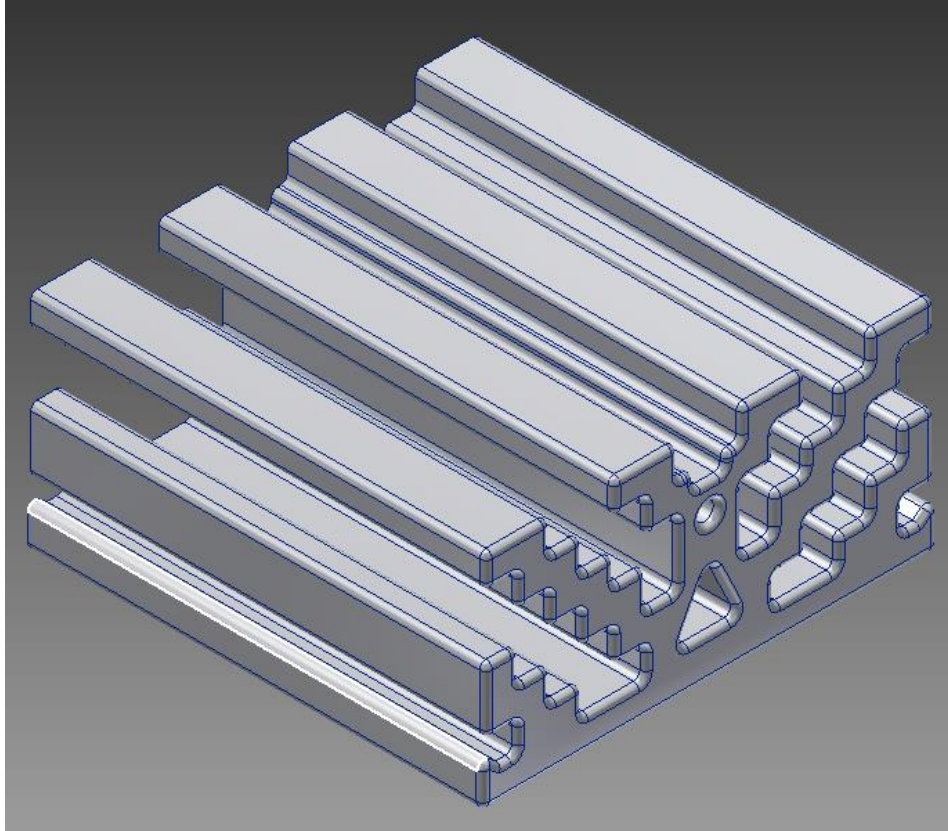


Figura 84 - Componente riprogettato con geometria estrusa

Le uniche regole di progettazione applicate sono:

1. il mantenimento dello spessore delle pareti dell'ordine di grandezza di 1 mm;
2. l'eliminazione degli spigoli vivi.

Essendo una geometria estrusa non esistono particolari limiti per la realizzazione attraverso L-PBF, sebbene questa tecnica non sia ottimale per l'ottenimento di questo tipo di geometrie poiché con l'estrusione non si sfruttano al meglio le caratteristiche di un processo di produzione additiva.

Bisogna anche precisare, però, che una geometria di questo tipo è estremamente difficile da ottenere con tecniche di produzione tradizionale.

Le quote caratteristiche della geometria sono riportate nel disegno 2D in Figura 85.

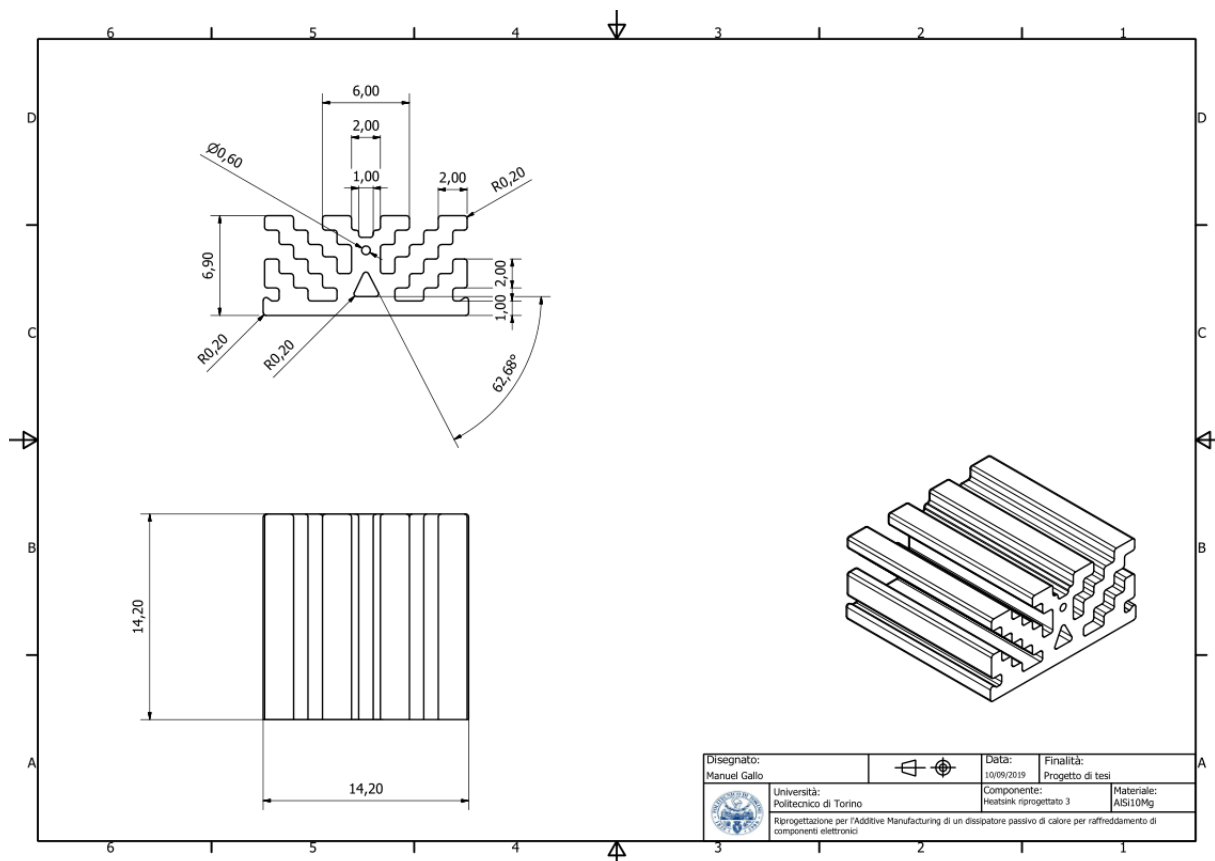


Figura 85 - Disegno CAD con quote significative per il componente con geometria estrusa

È stata eseguita anche in questo caso una simulazione delle performance termiche del componente, i cui risultati sono mostrati in Figura 86.

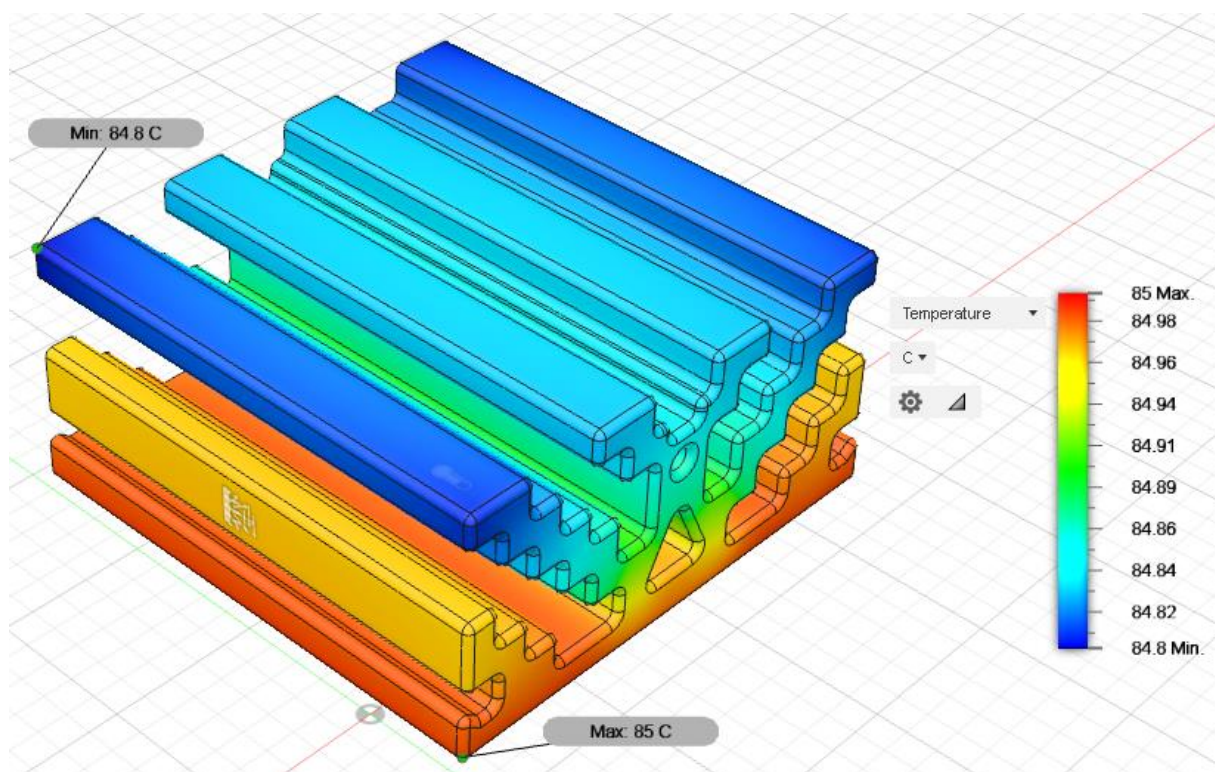


Figura 86 - Risultato analisi termica del componente riprogettato geometria estrusa

Come si nota dalla simulazione, la minima temperatura raggiunta è di 84,8 °C con un decadimento di temperatura da 85 °C di 0,2 °C, l'81,8 % in più rispetto al componente originale.

La superficie di scambio termico è aumentata a 1608,47 mm² sebbene anche la massa dell'heatsink sia incrementata a 2,27 g.

Le caratteristiche del terzo componente riprogettato, denominato Geometria #3, sono riportate in Tabella 14 insieme a quelle del componente originale, della Geometria #1 e della Geometria #2.

Heatsink	Materiale	Massa [g]	Area [mm ²]	Decadimento Temperatura max da 85°C [°C]	Incremento percentuale [%]
Originale	Al6061	3,97	1334,20	-0,11	-
Geometria #1	AlSi10Mg	1,380	1395,50	-0,14	27,27
Geometria #2	AlSi10Mg	1,456	1400,30	-0,19	72,73
Geometria #3	AlSi10Mg	2,270	1608,47	-0,20	81,82

Tabella 14 - Confronto caratteristiche geometrie

4.2.4 Componente riprogettato con geometria libera

Per l'ultima geometria ci si è discostati dal componente originale e si sono utilizzate le tecniche di DFAM per ottenere un componente più performante.

La geometria riprogettata ottenuta è mostrata in Figura 87.

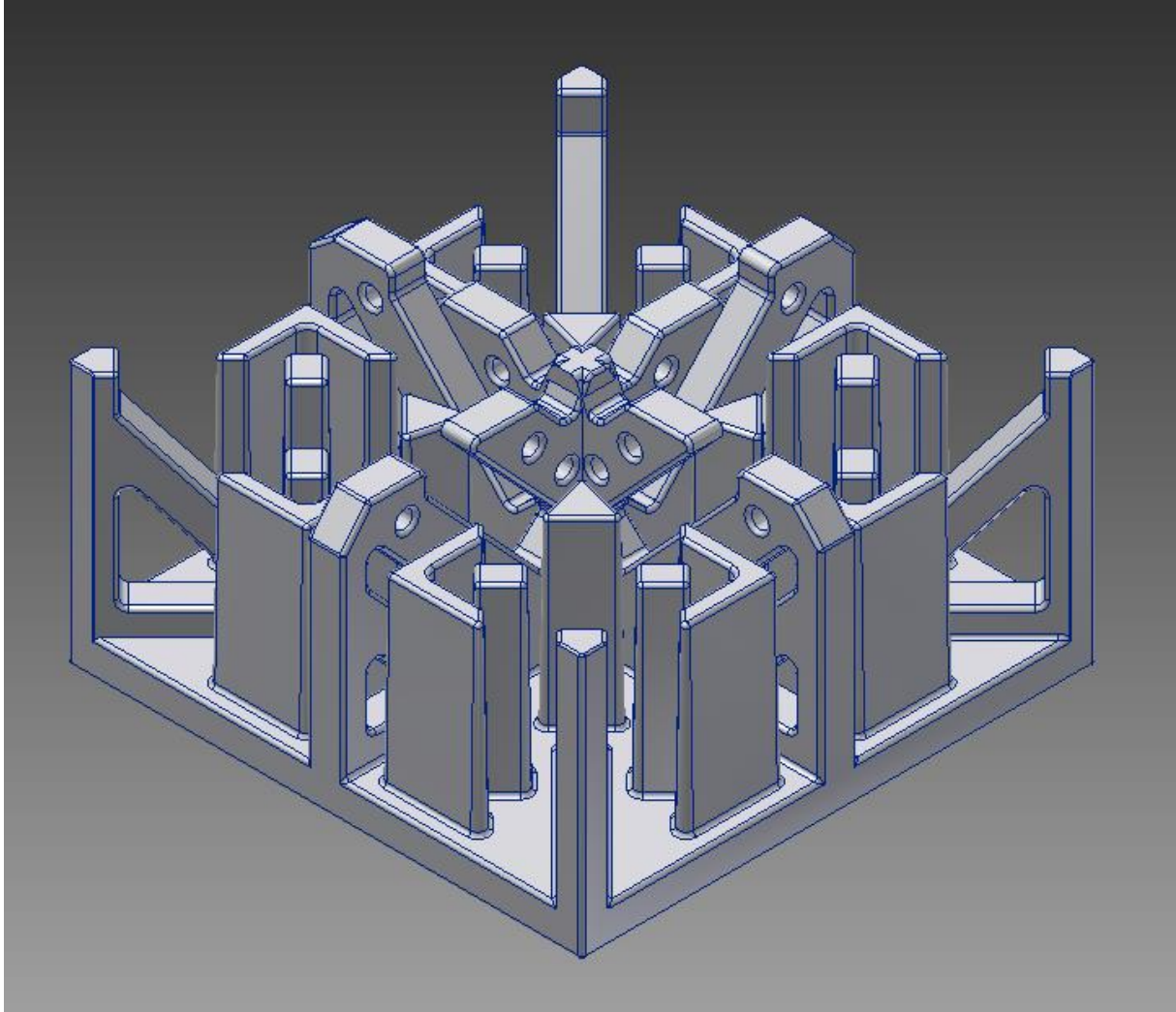


Figura 87 - Componente riprogettato con geometria libera

Per l'ottenimento della geometria sono state rispettate le seguenti regole di progettazione:

1. Fori con diametro minore di 6 mm per non necessitare di supporti, maggiore di 0.4 mm per essere realizzabile → i fori hanno un diametro di 0,5 mm;
2. Pareti orizzontali che non sporgono per più di 2 mm → massima superficie a sbalzo con sporgenza di 1 mm;
3. Nessuno spigolo vivo → tutti gli spigoli sono stati raccordati con raggio di 0,10 mm;
4. Wall thickness dell'ordine di 1 mm.
5. Minimo angolo di auto-supporto per componenti prodotti per L-PBF in Alluminio di 45° → le superfici inclinate hanno angoli di inclinazione di 47° ;
6. Massimo rapporto lato corto base/altezza per le strutture snelle di 1:8 → il massimo rapporto per la geometria è per le strutture a base quadrata ed è di 1:6.

Le principali grandezze dimensionali della geometria ottenuta sono mostrate nel disegno in Figura 88.

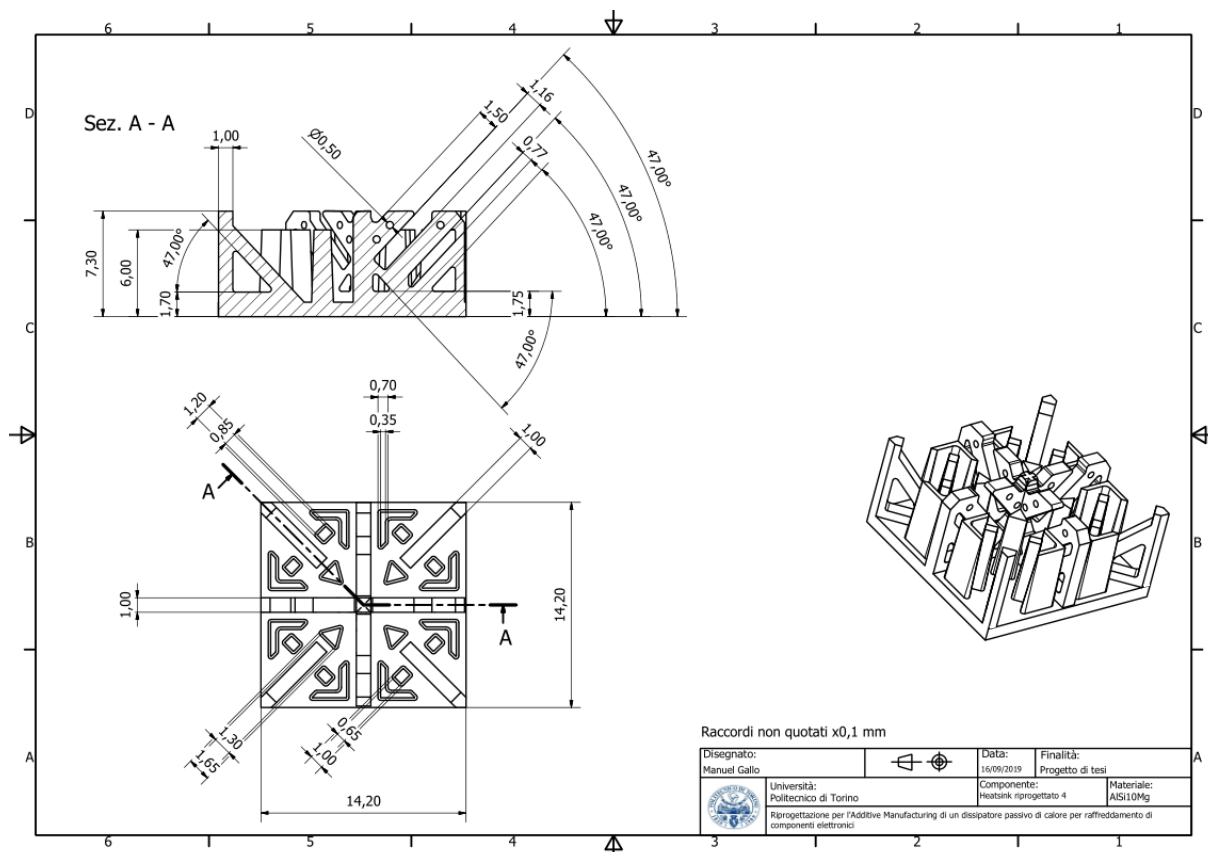


Figura 88 - Disegno CAD con quote significative per il componente con geometria libera

Le alette minori sono rastremate di -1° . In questo modo le strutture si evolvono in direzione verticale aumentando la distanza reciproca e favorendo, così, lo scambio termico per convezione naturale ed irraggiamento.

È stata eseguita anche in questo caso una simulazione delle performance termiche del componente, i cui risultati sono mostrati in Figura 89.

Al fine di alleggerire il calcolo dell'analisi termica è stato effettuato il defeaturing della geometria, semplificandola attraverso l'eliminazione dei raccordi.

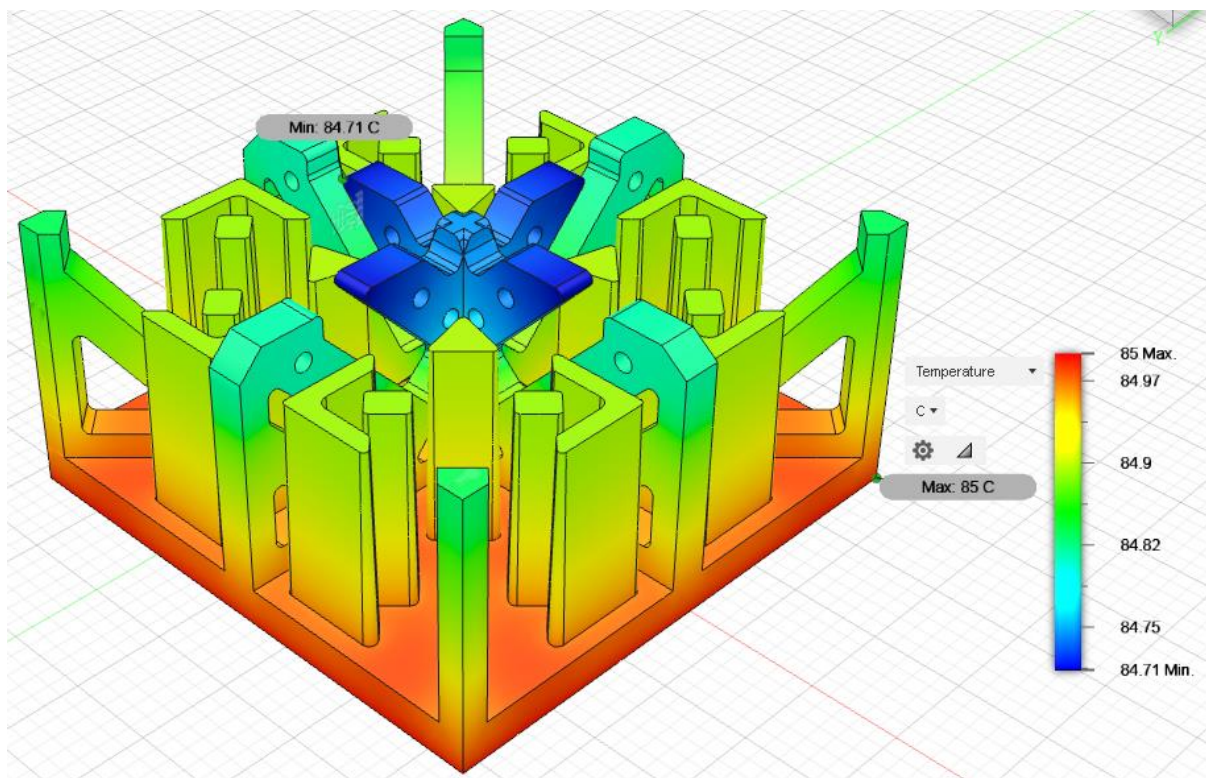


Figura 89 - Risultato analisi termica del componente riprogettato geometria libera

Come si nota dalla simulazione, la minima temperatura raggiunta è di 84,71 °C con un decadimento di temperatura da 85 °C di 0,29 °C, 163,64 % in più rispetto al componente originale.

La superficie di scambio termico è aumentata a 1617,52 mm² con una diminuzione della massa complessiva del componente fino a 1,410 g, l'12,62 % in meno rispetto al componente originale.

Le caratteristiche del quarto componente riprogettato, denominato Geometria #4, sono riportate in Tabella 15 insieme a quelle del componente originale, della Geometria #1, della Geometria #2 e della Geometria #3.

Heatsink	Materiale	Massa [g]	Area [mm ²]	Decadimento Temperatura max da 85°C [°C]	Incremento percentuale [%]
Originale	Al6061	3,97	1334,20	-0,11	-
Geometria #1	AlSi10Mg	1,380	1395,50	-0,14	27,27
Geometria #2	AlSi10Mg	1,456	1400,30	-0,19	72,73
Geometria #3	AlSi10Mg	2,270	1608,47	-0,20	81,82
Geometria #4	AlSi10Mg	1,410	1617,52	-0,29	163,64

Tabella 15 - Confronto caratteristiche geometrie

4.2.5 Componente riprogettato con geometria libera e distribuzione di temperatura migliorata

La Geometria#4 è quella che più si presta ad essere prodotta attraverso L-PBF ma, come si nota dall'analisi termica, sebbene il decadimento di temperatura sia considerevole, questo è significativamente concentrato al centro dell'heatsink mentre nel resto del componente le temperature finali sono più alte.

Questo risulta in performance non uniformemente distribuite e in gradienti termici che possono generare stress durante il funzionamento del sistema.

L'ideale sarebbe uniformare la caduta di temperatura in tutto l'heatsink, anche a discapito del salto totale di temperatura, al fine di migliorare le performance termiche e la resa in esercizio del componente.

Si è proceduto alla definizione di una geometria finale che migliorasse le performance della Geometria#4.

La nuova geometria, denominata Geometria #4.1, è mostrata in Figura 90.

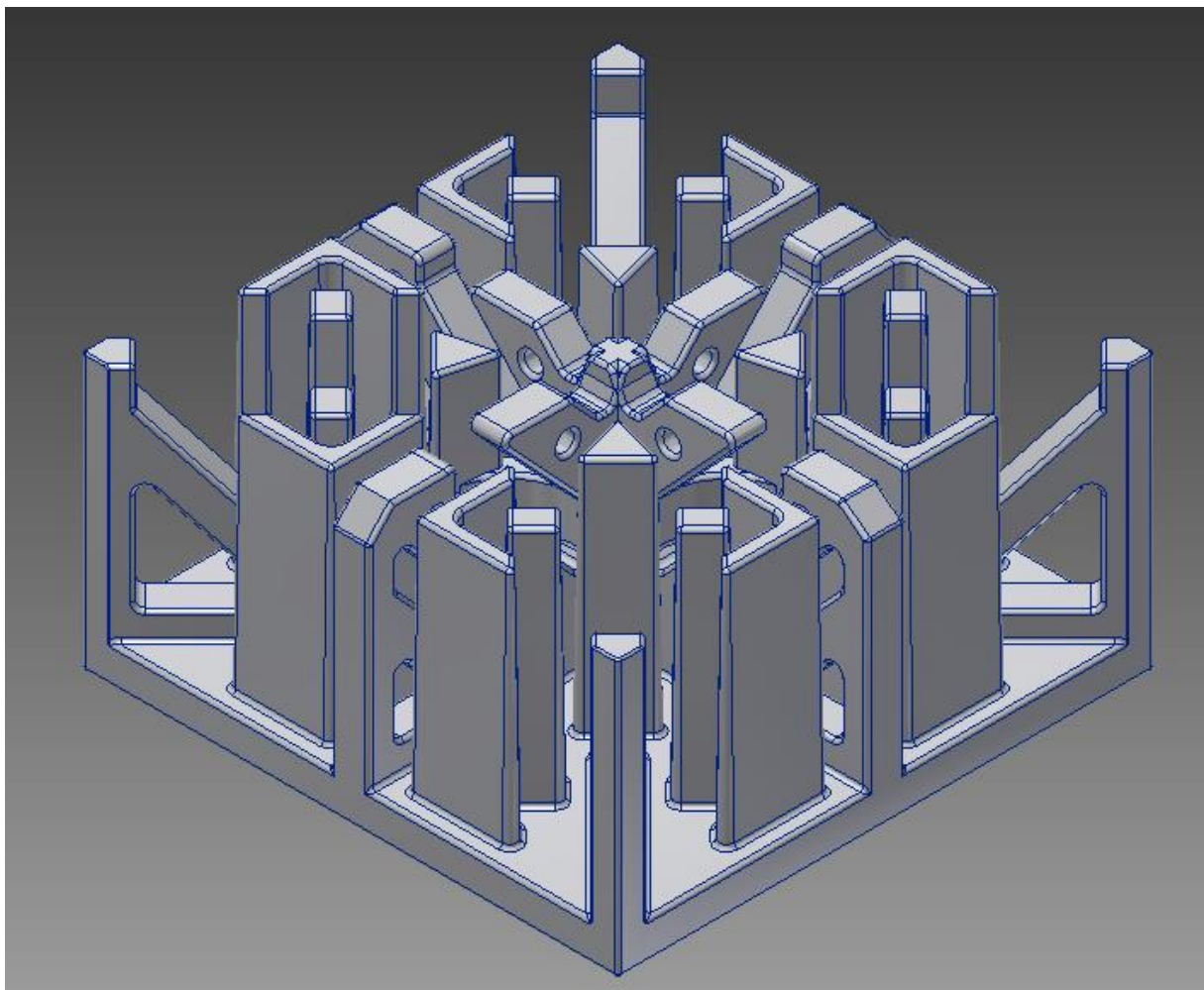


Figura 90 - Componente riprogettato con geometria libera per migliorare performance termiche

Rispetto alla Geometria#4, al fine di migliorare lo scambio termico e la potenza termica dissipata, per la Geometria#4.1 è stata aumentata l'altezza del corpo alettato dei quadranti e, soprattutto, è stata aggiunta una massa al centro, evidenziata in Figura 91.

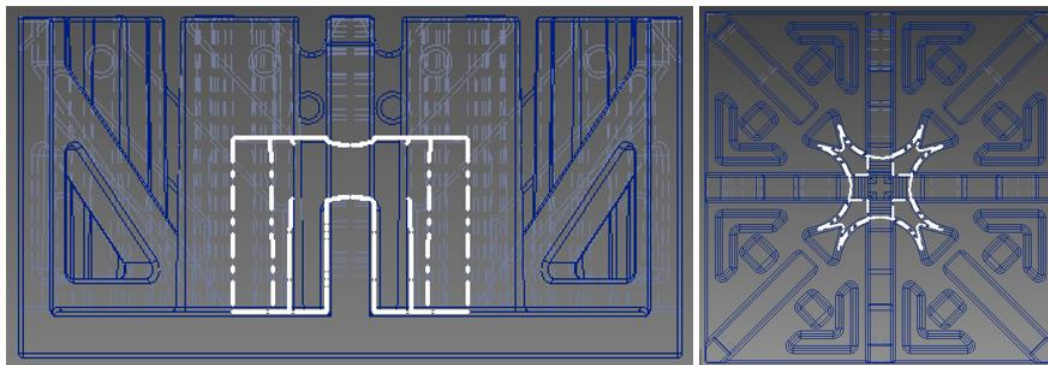


Figura 91 - Massa aggiuntiva per migliore distribuzione di temperatura nell'heatsink

La Figura 92 mostra il disegno CAD con le quote delle sole modifiche.

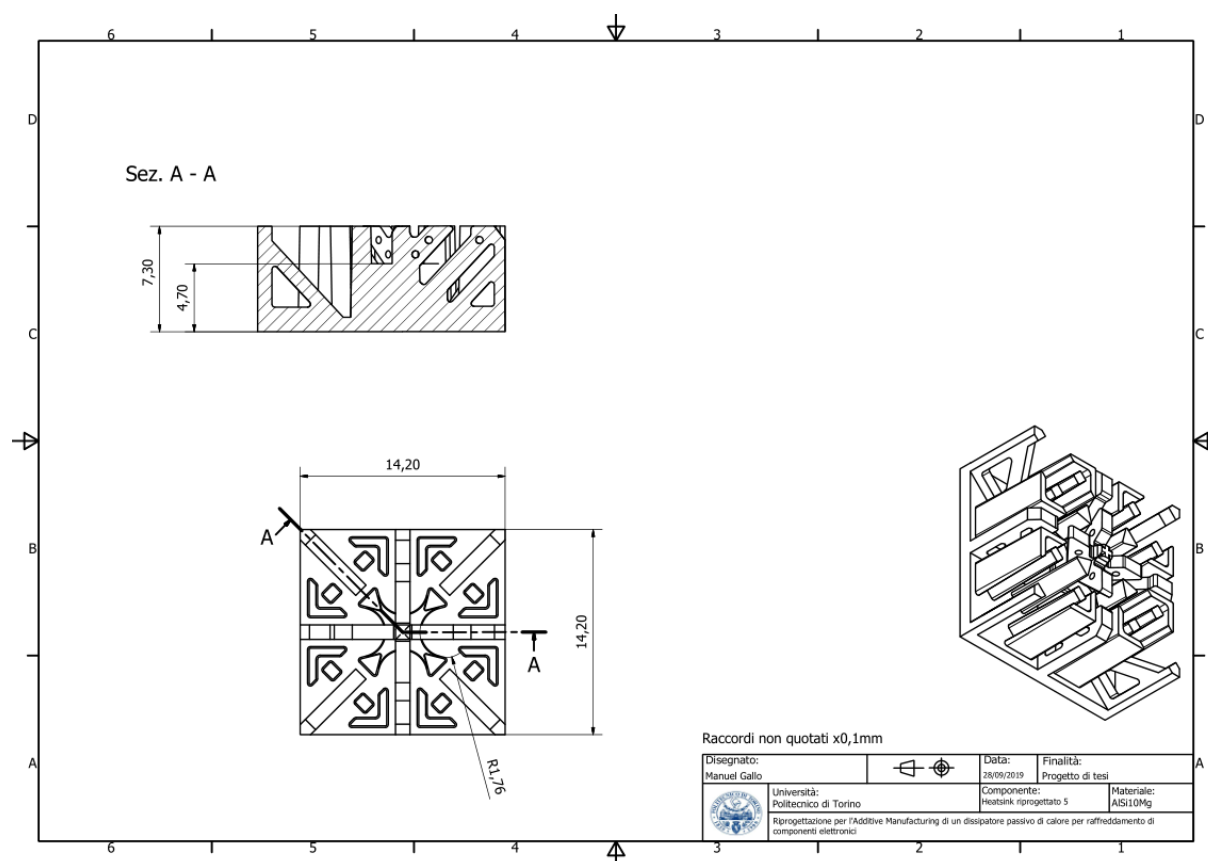


Figura 92 - Disegno CAD con modifiche relative alla Geometria #4.1

Anche in questo caso, al fine di alleggerire il calcolo termico è stato effettuato il defeaturing sulla geometria del componente, semplificandola attraverso l'eliminazione dei raccordi.

L'analisi termica relativa alla Geometria#4.1 è mostrata in Figura 93.

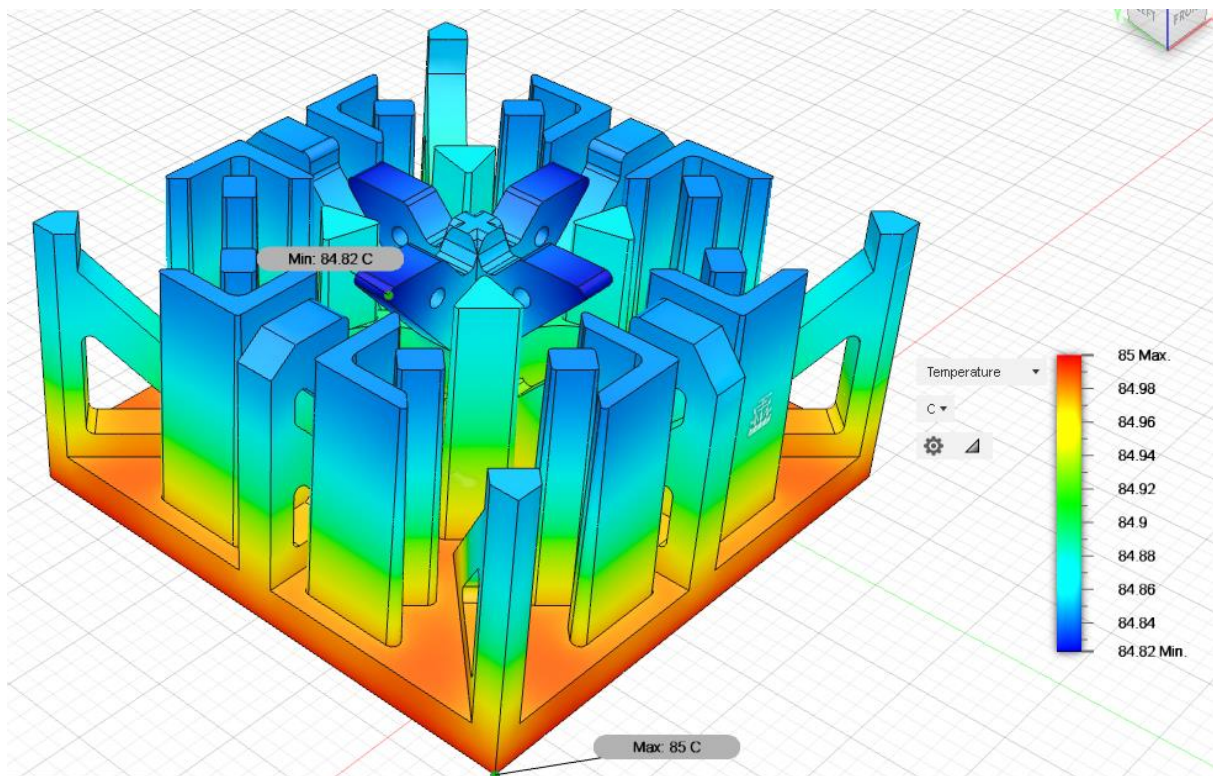


Figura 93 - Risultato analisi termica del componente riprogettato con geometria libera e distribuzione di temperatura migliorata

Come si nota dalla simulazione, la minima temperatura raggiunta è di 84,82 °C con un decadimento di temperatura da 85 °C di 0,18 °C, 63,64 % in più rispetto al componente originale.

Sebbene sia un decadimento di temperatura minore rispetto alla Geometria #4, si può notare come la distribuzione di temperatura in questo caso sia molto più uniforme, come mostrato in Figura 94. Questo è a vantaggio delle performance termiche e della resa in esercizio del componente.

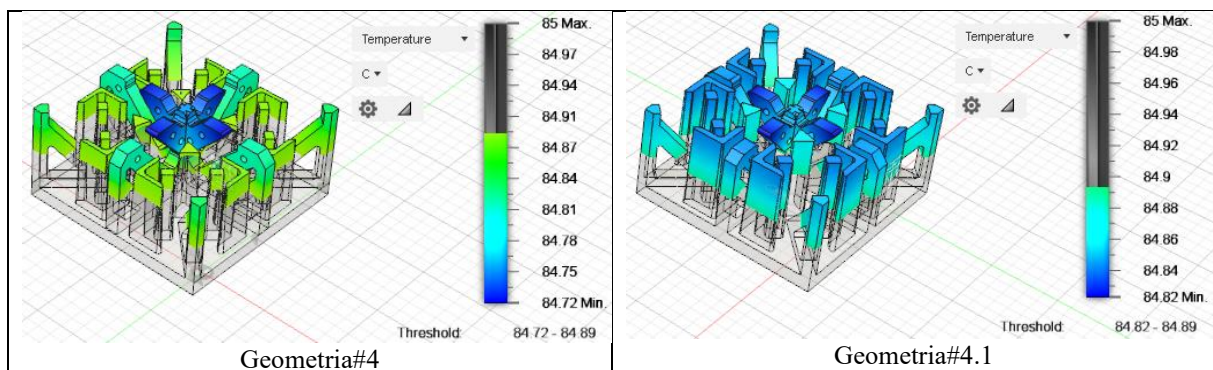


Figura 94 - Confronto decadimento di temperatura e distribuzione tra Geometria #4 e Geometria #4.1

Nel confronto si può notare come la parte più fredda dell'heatsink della Geometria #4 abbia una temperatura molto diversa rispetto al resto (differenza tra le punte di 0,15 °C), mentre nella Geometria #4.1 l'heatsink lavora con una distribuzione di temperatura più uniforme (differenza tra le punte di 0,03 °C).

Le caratteristiche del componente riprogettato denominato Geometria #4.1 sono riportate in Tabella 16 insieme a quelle del componente originale, della Geometria #1, della Geometria #2 e della Geometria #3 e della Geometria #4.

Heatsink	Materiale	Massa [g]	Area [mm ²]	Decadimento Temperatura max da 85°C [°C]	Incremento percentuale [%]
Originale	Al6061	3,97	1334,20	-0,11	-
Geometria #1	AlSi10Mg	1,380	1395,50	-0,14	27,27
Geometria #2	AlSi10Mg	1,456	1400,30	-0,19	72,73
Geometria #3	AlSi10Mg	2,270	1608,47	-0,20	81,82
Geometria #4	AlSi10Mg	1,410	1617,52	-0,29	163,64
Geometria #4.1	AlSi10Mg	1,642	1760,08	-0,18	63,64

Tabella 16 - Confronto caratteristiche geometrie

4.2.6 Componente con geometria libera con caduta di temperatura migliorata

Per la geometria finale si è cercato di manipolare nuovamente il componente che più si presta alla produzione attraverso L-PBF, la Geometria #4, con l'obiettivo di incrementare nuovamente la caduta di temperatura dell'heatsink.

Volendo fare una premessa, tutte le geometrie ottenute fino ad ora seguono le regole di DFAM universalmente riconosciute. Va precisato, però, che tali regole sono state fornite per l'applicazione in generale. Nella realtà tuttavia, i limiti di forma riguardanti le geometrie ottenibili con i processi di Additive Manufacturing dipendono da diversi fattori quali tipologia di materiale, tipologia di processo di produzione, macchina utilizzata per la produzione, combinazione ottimale dei parametri di processo.

Inoltre, le regole di DFAM sono maggiormente vincolanti per la produzione di pezzi di dimensioni significative, caso che non riguarda il componente oggetto del lavoro di tesi.

In particolare, per la definizione dell'ultima geometria si è considerato che:

- Il minimo spigolo vivo è dato dal minimo diametro dello spot del laser → 0,03 mm;
- Combinando opportunamente i parametri di processo del sistema di produzione si possono ottenere spessori delle pareti molto sottili, ben al di sotto di 1 mm → il minimo spessore realizzato è 0,123 mm.

Strutture di alleggerimento di tipo honeycomb e spessori di pareti sottili sono stati aggiunti alla Geometria #4.1 con lo scopo di aumentare drasticamente il decadimento di temperatura.

L'obiettivo è stato, al contempo, mantenere la distribuzione di temperatura sull'heatsink uniforme, aggiungendo delle strutture verticali a base triangolare e abbassando in modo opportuno le altezze delle alette che in analisi termica preliminare raggiungevano una temperatura molto più bassa rispetto al resto dell'heatsink.

Il nuovo componente, denominato Geometria #4.2, è mostrato in Figura 95.

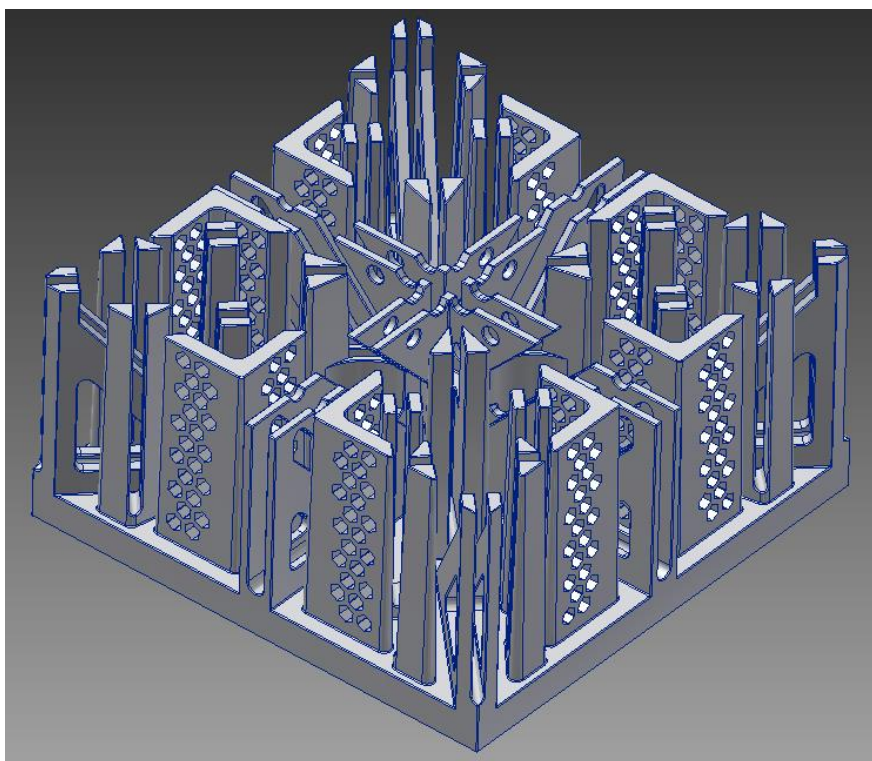


Figura 95 - Componente con geometria libera con caduta di temperatura migliorata

La Figura 96 mostra il disegno con le quote delle sole modifiche rispetto alla Geometria #4.1.

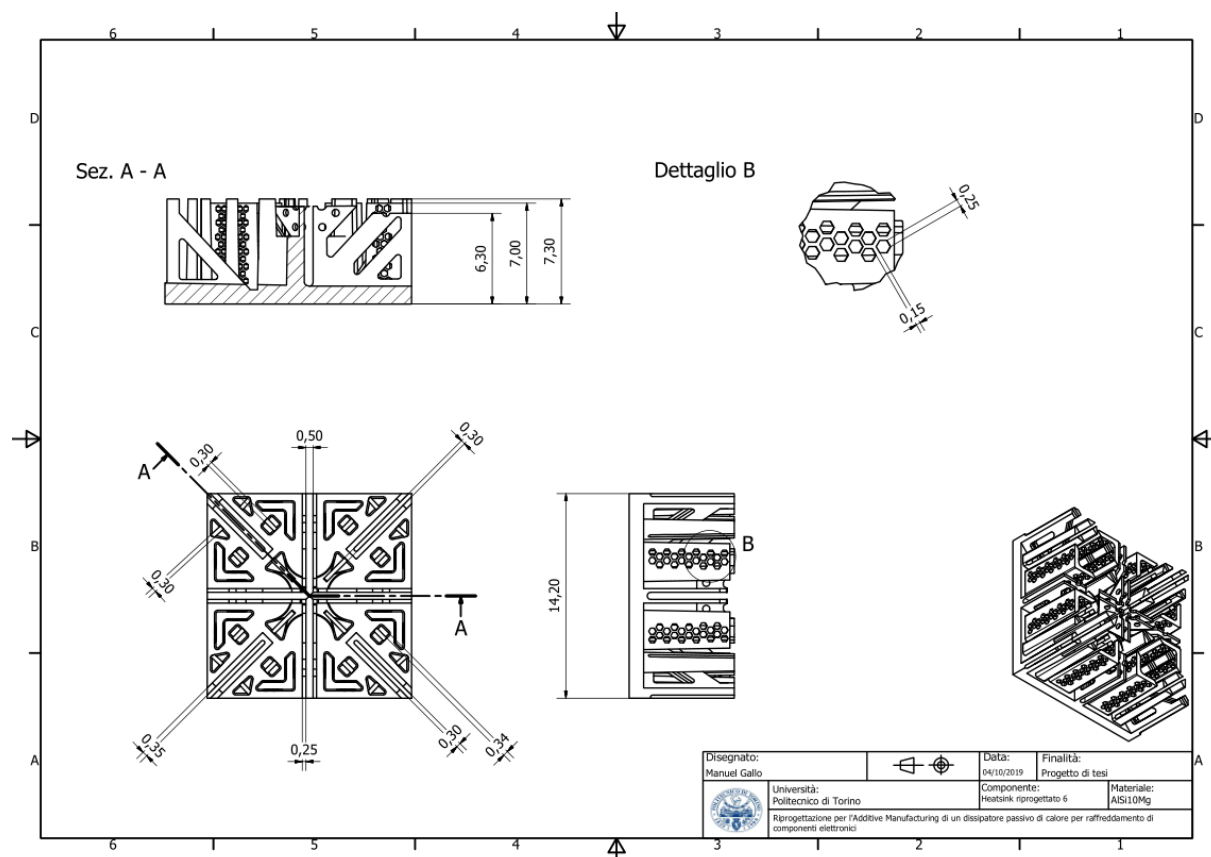


Figura 96 - Disegno CAD con modifiche relative alla Geometria #4.2

Anche in questo caso, per l'analisi termica è stato svolto il defeaturing del componente.

L'analisi termica relativa alla Geometria #4.2 è mostrata in Figura 97.

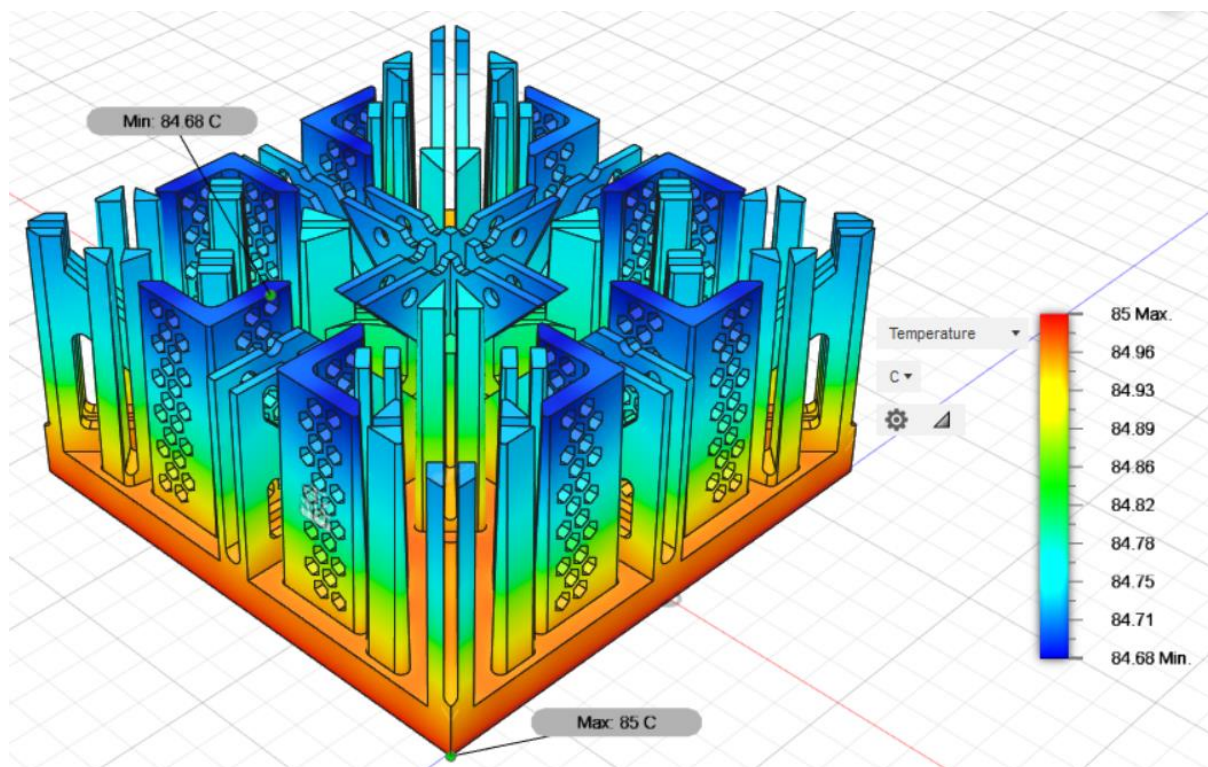


Figura 97 - Risultato analisi termica del componente riprogettato con geometria libera e caduta di temperatura migliorata

Come si nota dalla simulazione, la minima temperatura raggiunta è di 84,68 °C con un decadimento di temperatura da 85 °C di 0,32 °C, il 190,91% in meno rispetto al componente originale.

Molto significativo è anche l'incremento di superficie di scambio termico, del valore di 2508,96 mm², l'88,05% rispetto al componente originale.

Nel confronto in Figura 98 si può notare come la parte più fredda dell'heatsink della Geometria #4 abbia una temperatura molto diversa rispetto al resto (differenza tra le punte di 0,15 °C), mentre nella Geometria #4.2 l'heatsink lavora con una distribuzione di temperatura più uniforme (differenza massima tra le punte di 0,08 °C).

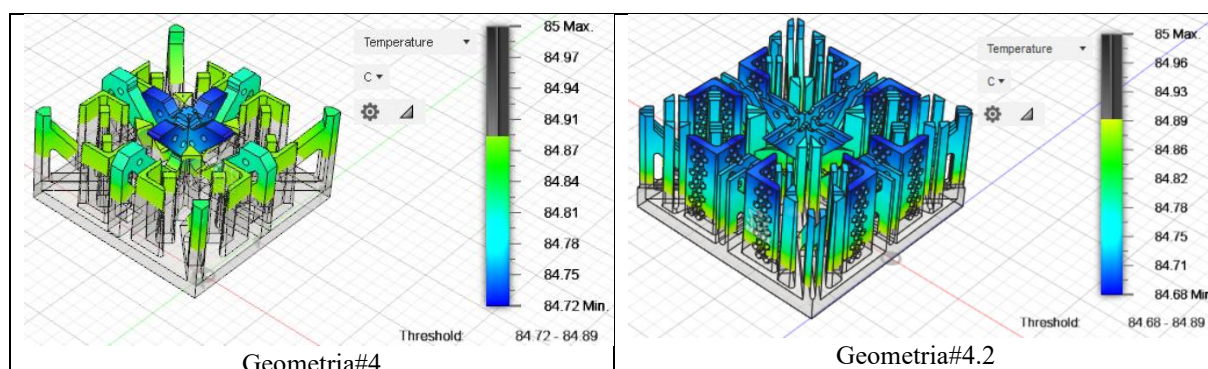


Figura 98 - Confronto decadimento di temperatura e distribuzione tra Geometria #4 e Geometria #4.2

Le caratteristiche del componente riprogettato denominato Geometria #4.2 sono riportate in Tabella 17 insieme a quelle del componente originale, della Geometria #1, della Geometria #2 e della Geometria #3 e della Geometria #4.

Heatsink	Materiale	Massa [g]	Area [mm ²]	Decadimento Temperatura max da 85°C [°C]	Incremento percentuale [%]
Originale	Al6061	3,97	1334,20	-0,11	-
Geometria #1	AlSi10Mg	1,380	1395,50	-0,14	27,27
Geometria #2	AlSi10Mg	1,456	1400,30	-0,19	72,73
Geometria #3	AlSi10Mg	2,270	1608,47	-0,20	81,82
Geometria #4	AlSi10Mg	1,410	1617,52	-0,29	163,64
Geometria #4.1	AlSi10Mg	1,642	1760,08	-0,18	63,64
Geometria #4.2	AlSi10Mg	1,328	2508,96	-0,32	190,91

Tabella 17 - Confronto caratteristiche geometrie

5. Risultati

5.1 Analisi sulla quantità di materiale necessario alla produzione

Si presentano, dunque, i principali risultati derivanti dal lavoro di tesi ed in particolare si approfondiscono, comparando i dati tra le geometrie riprogettate, i seguenti aspetti:

- Risparmio di materiale delle nuove geometrie rispetto alla produzione del componente originale con tecniche tradizionali;
- L'incremento di superficie di scambio termico delle geometrie riprogettate;
- La caduta di temperatura nei diversi componenti e le relative performance termiche;

Il confronto tra le masse finali delle geometrie riprogettate con quella del componente originale è riportato in Tabella 18.

Componente	Massa [g]	Decremento vs originale [%]
Originale	1,588	-
Geometria#1	1,380	-13,10
Geometria#2	1,446	-8,94
Geometria#3	2,270	42,95
Geometria#4	1,410	-11,21
Geometria#4.1	1,642	3,40
Geometria#4.2	1,328	-16,37

Tabella 18 - Confronto tra le masse del componente finito

Si può notare come la Geometria #4.2, la migliore in termini di performance termiche, presenti una massa minore rispetto a tutte le altre geometrie compreso il componente originale, risultando in un componente ad elevate prestazioni ma più leggero, sebbene la diminuzione di peso non sia né di interesse per il componente finale né un requisito di progetto.

È d'interesse, tuttavia, l'estensione dell'analisi sulla massa alla totalità del materiale necessario alla produzione di ogni singolo componente.

Premettendo che sia il componente originale, sia le geometrie riprogettate sono prodotti in Alluminio, materiale riciclabile al 100%, si evidenzia che:

- L'unico materiale di scarto per il processo L-PBF è rappresentato dalla struttura che ancora il componente alla piattaforma di costruzione, essendo le geometrie riprogettate in modo tale che ogni sezione sia auto-supportante;
- Per la lavorazione alle macchine utensili del pezzo (tecnologia utilizzata per la realizzazione del componente originale) l'unico scarto è rappresentato dai trucioli;
- La differenza è nella quantità di materiale utilizzata per la produzione.

Un confronto di massima è riportato in Tabella 19:

Componente	Massa iniziale stimata [g]	Massa finale [g]	Massa scarto di produzione [g]	Percentuale scarto di produzione [%]	Risparmio di materiale rispetto originale [g]	Risparmio in massa vs originale [%]
Originale	3,974	1,588	2,386	-60,04	-	-
Geometria#1	1,924	1,380	0,544	-28,29	2,050	51,58
Geometria#2	2,000	1,456	0,544	-27,22	1,974	49,67
Geometria#3	2,814	2,27	0,544	-19,34	1,160	29,18
Geometria#4	1,954	1,410	0,544	-27,86	2,020	50,82
Geometria#4.1	2,186	1,642	0,544	-24,90	1,788	44,99
Geometria#4.2	1,872	1,328	0,544	-29,08	2,102	52,89

Tabella 19 - Analisi del risparmio di massa per ogni componente riprogettato

Considerando costante la densità dell'Alluminio e pari a $2,7 \text{ g/cm}^3$, i valori della Tabella 18 si riferiscono:

- Massa iniziale stimata: la massa totale del componente da produrre, compreso materiale di scarto.
Per il componente originale si è ipotizzato di dover utilizzare un blocchetto di Alluminio pari al volume dell'ingombro (14,2x14,2x7,3 mm), trascurando sovrametallo di lavorazione (ipotesi cautelativa per sottostima).
Per i componenti riprogettati si è considerata la massa effettiva a fine produzione, aggiungendo il volume addizionale della base per l'ancoraggio alla piattaforma di costruzione, dall'ingombro 14,2x14,2x1 mm;
- Massa finale: massa effettiva del componente finito;
- Massa di scarto di produzione: massa del materiale di scarto che non è compreso nel componente finale da produrre, ottenuta come differenza tra i primi due valori;
- Percentuale scarto rispetto al pezzo finito: variazione percentuale tra massa iniziale, necessaria per realizzare il pezzo, e massa finale propria del componente finito;
- Risparmio di materiale rispetto all'originale: quantità di massa in meno necessaria alla produzione delle geometrie riprogettate con L-PBF (presentata sia in grammi che in variazione percentuale).

Per la stima dell'area di supporto base della Geometria #3 è stato effettuato il seguente calcolo: prodotto tra area della superficie laterale ($59,27 \text{ mm}^2$) per distanza minima dalla piattaforma (1 mm).

Come è possibile notare, anche con le dovute ipotesi cautelative per il calcolo, il decremento di materiale necessario alla produzione di un singolo componente è significativo per tutte le geometrie prodotte in L-PBF.

Infatti, per la produzione del componente originale con tecnologie industriali tradizionali, nello specifico lavorazione alle macchine utensili, più del 60% del totale del blocco da lavorare risulta in materiale di scarto.

Per la produzione con processo L-PBF il massimo materiale di scarto rappresenta il 29,08 % del totale, con un risparmio di materiale utilizzato medio rispetto al componente originale del 45%.

Per la Geometria#4.2 di interesse. Quella finale di interesse, la quantità di materiale risparmiato rispetto al componente originale è del 52,89%.

L'analisi sulla massa totale è riassunta in Figura 99.

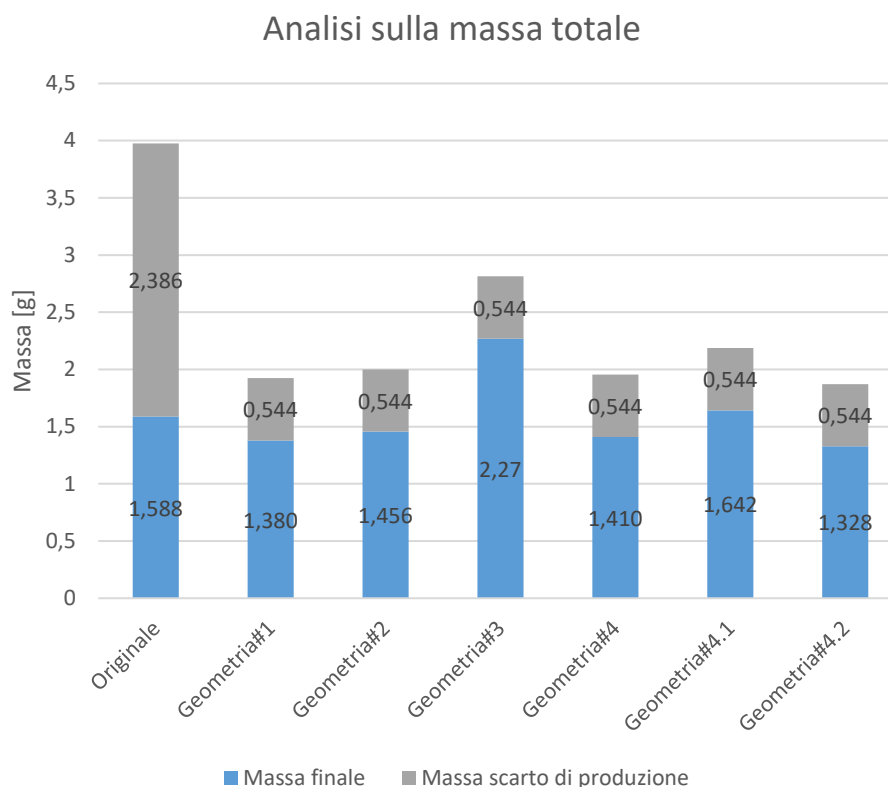


Figura 99 - Analisi massa complessiva necessaria alla produzione di ogni componente

Si nota come il componente che richiede l'utilizzo di meno materiale è rappresentato dalla Geometria #4.2.

5.2 Analisi sull'incremento di superficie di scambio termico

Sensibile è anche l'incremento della superficie di scambio termico per ogni geometria riprogettata rispetto al componente originale, fattore che contribuisce al miglioramento delle performance termiche poiché la quantità di materiale responsabile della dissipazione di calore è maggiore, causando una diminuzione della resistenza termica, come maggiore è anche la superficie a contatto con l'ambiente (aria), che favorisce lo scambio termico per convezione naturale e irraggiamento.

L'incremento di superficie di scambio termico è riassunto in Tabella 20 e mostrato nel grafico della Figura 100, in cui sono stati messi a confronto i valori delle diverse geometrie.

Componente	Area [mm ²]	Incremento vs originale [mm ²]	Incremento vs originale [%]
Originale	1334,2	-	-
Geometria#1	1395,5	61,3	4,59
Geometria#2	1400,3	66,1	4,95
Geometria#3	1608,47	274,27	20,56
Geometria#4	1617,52	283,32	21,24
Geometria#4.1	1760,08	425,88	31,92
Geometria#4.2	2508,96	1174,76	88,05

Tabella 20 - Valori della superficie di scambio termico per ogni geometria ed incremento vs originale

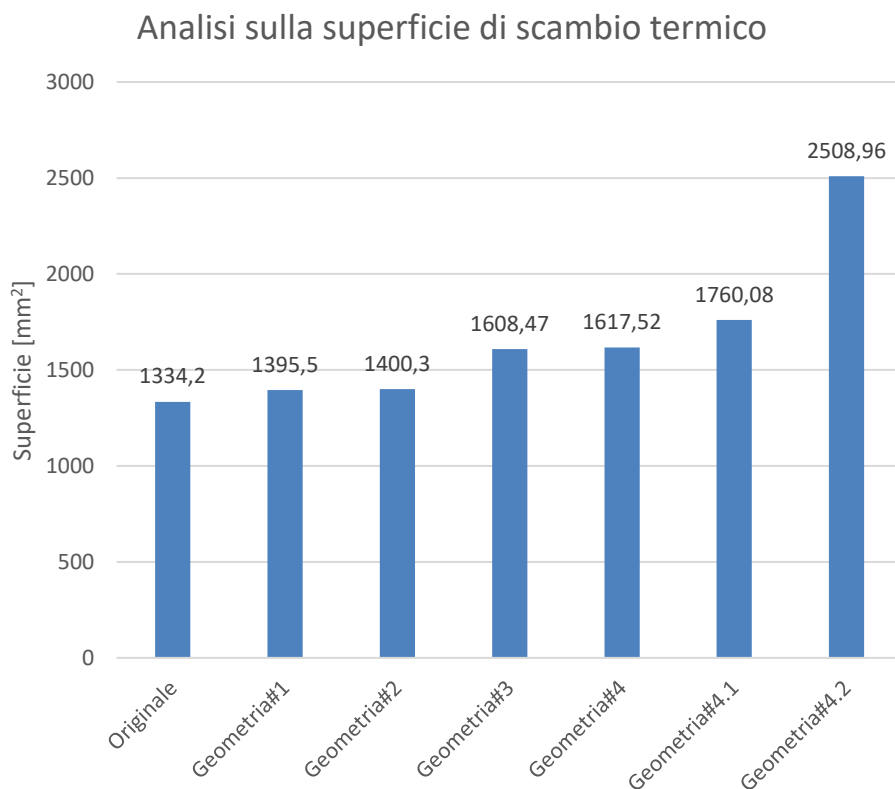


Figura 100 - Confronto tra valori superficie di scambio termico delle diverse geometrie

Anche in questo caso, la Geometria #4.2 è quella che presenta il miglioramento più evidente, caratteristica confermata anche dalla caduta di temperatura risultante.

5.3 Analisi sull'incremento di performance termiche

Si confrontano, dunque, le performance termiche delle geometrie riprogettate con quelle del componente originale.

I risultati dell'analisi termica per ogni geometria, riguardanti il decadimento di temperatura, sono mostrati in Figura 101.

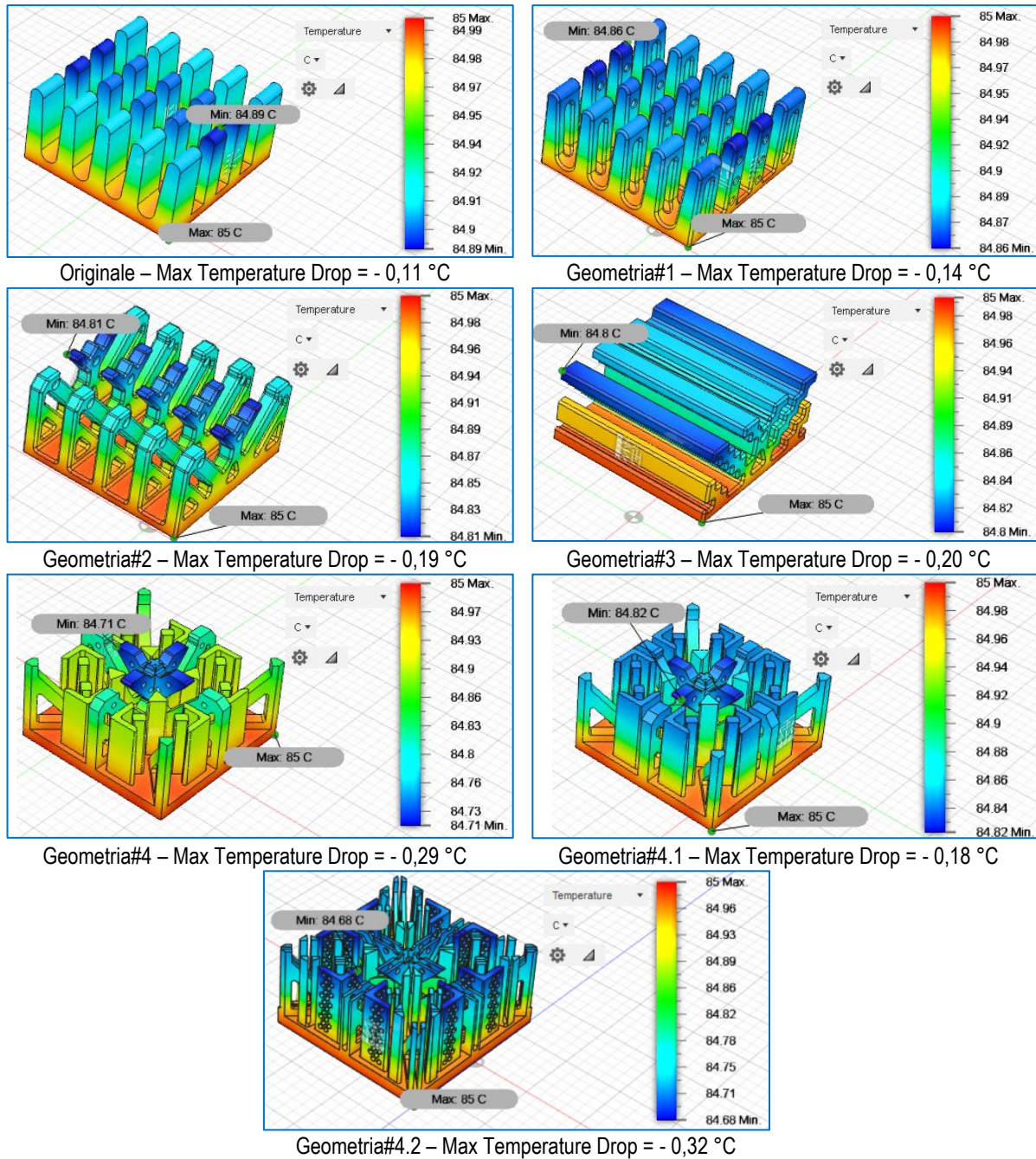


Figura 101 – Confronto caduta di temperatura per ogni componente

Si può notare che in ogni caso di riprogettazione, la caduta di temperatura della geometria riprogettata è maggiore rispetto al componente originale.

Nonostante ciò, le geometrie che presentano delle caratteristiche termiche vantaggiose sia in termini di caduta di temperatura, sia per come la caduta di temperatura si distribuisce su tutto l'heatsink sono le Geometrie #1, #4.1 e #4.2.

I valori del decadimento di temperatura per ogni geometria e l'incremento percentuale rispetto al componente originale sono riassunti in Tabella 21.

Componente	Decadimento Temperatura da 85°C [°C]	Incremento vs originale [%]
Originale	-0,11	-
Geometria#1	-0,14	27,27
Geometria#2	-0,19	72,73
Geometria#3	-0,20	81,82
Geometria#4	-0,29	163,64
Geometria#4.1	-0,18	63,64
Geometria#4.2	-0,32	190,91

Tabella 21 - Decadimento di temperatura per ogni componente ed incremento percentuale vs originale

In Figura 102 è mostrato in modo più immediato il confronto della caduta di temperatura per ogni heatsink.

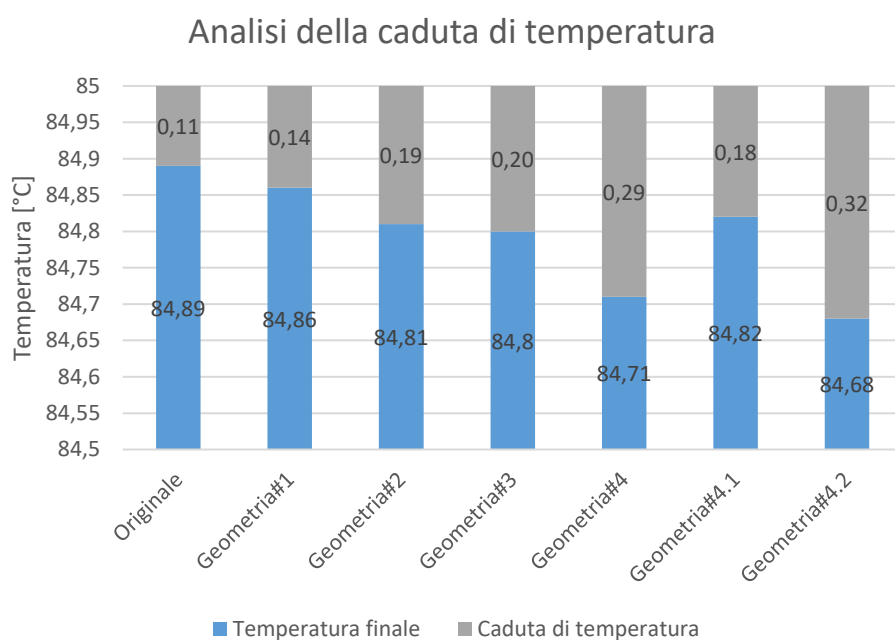


Figura 102 - Confronto caduta di temperatura

Più in particolare, in Figura 103 viene mostrata la percentuale di heatsink riprogettato che realizza il drop di temperatura totale dell'heatsink originale ($85,00^{\circ}\text{C} \rightarrow 84,89^{\circ}\text{C}$).

Ancora una volta è possibile notare i miglioramenti apportati alle performance termiche dalle nuove geometrie.

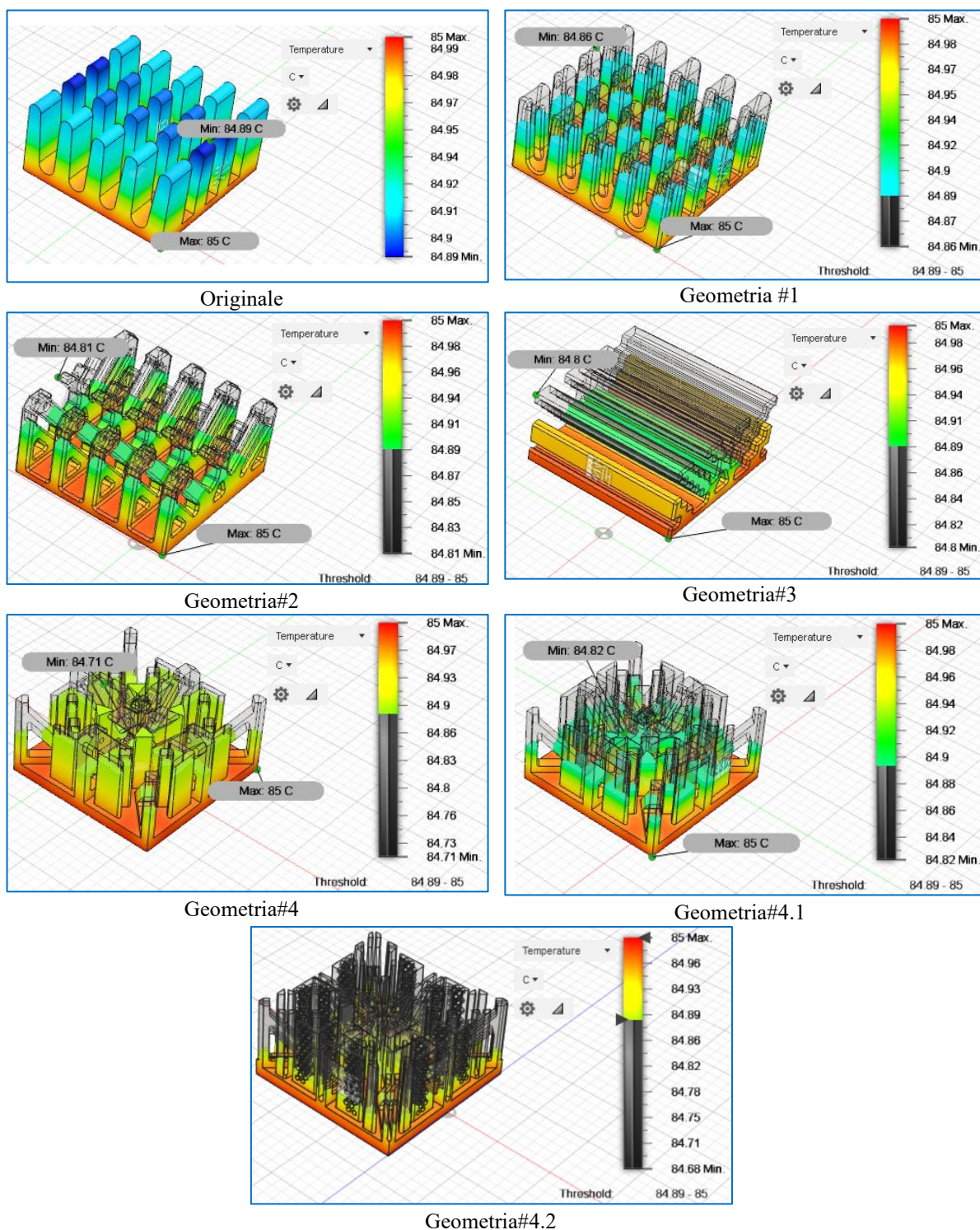


Figura 103 – Parte di heatsink riprogettato che realizza il temperature drop dell'originale

Una volta realizzato il salto termico di riferimento per la progettazione, relativo cioè al componente originale, si può notare come la Geometria#4.2 sia l'unica con la maggior parte del materiale ancora disponibile per la dissipazione del calore.

Il flusso termico è definito come la quantità di calore [J] trasferita nell'unità di tempo [s] in un determinato materiale, e la sua espressione nel caso unidimensionale è mostrata con l'Equazione 18.

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = -k A \frac{\Delta T}{\Delta x}$$

Equazione 18 - Espressione del flusso termico

Dove:

- ΔQ è la quantità di calore scambiata [J];
- Δt è la quantità di tempo in avviene lo scambio termico [s];
- k è la conducibilità termica del materiale [W/(m K)];
- A è la superficie di scambio termico [m²];
- Δx è lo spessore del materiale che scambia calore [m];
- ΔT è la caduta di temperatura nel materiale [K]

A parità delle altre grandezze, se aumenta la superficie di scambio termico A e la caduta di temperatura ΔT si ha un aumento del flusso termico e, quindi, un incremento della potenza termica dissipata dall'heatsink.

Essendo il flusso termico espressione del gradiente di temperatura sull'heatsink e combinando tale risultato con il maggior decadimento di temperatura realizzato, è possibile concludere che la Geometria #4.2 ha performance migliori rispetto al componente originale.

Il miglioramento in termini di performance giustifica la progettazione e la realizzazione del nuovo componente, geometria ottenibile esclusivamente attraverso il processo di Additive Manufacturing Laser-Powder Bed Fusion.

5.4 Analisi di messa in macchina del componente

Infine, è stata svolta un'analisi di messa in macchina del componente finale ottimizzato, la Geometria#4.2, fornendo una soluzione per la saturazione del volume di lavoro.

Prima del posizionamento del pezzo in macchina, è stata implementata una modifica alla geometria: poiché la rimozione del pezzo dalla piattaforma di costruzione viene effettuata attraverso EDM, è stato aggiunto 1 mm di sovrametallo sulla base dell'heatsink, modifica mostrata in Figura 104.

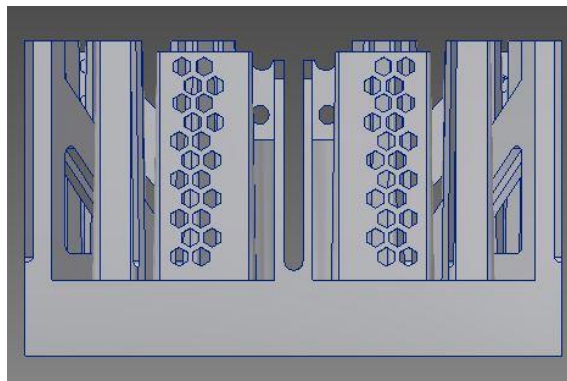


Figura 104 - Geometria#4.2 con base maggiorata di 1mm per messa in macchina

Per la messa in macchina sono state utilizzate le seguenti ipotesi:

- Utilizzo della macchina EOS Eosint M270 con le caratteristiche riportate in Figura 105

Technical Data

<i>Effective building volume (including building platform)</i>	250 mm x 250 mm x 215 mm (9.85 x 9.85 x 8.5 in.)
<i>Building speed (material-dependent)</i>	2 - 20 mm ³ /s (0.0001 - 0.001 in ³ /sec.)
<i>Layer thickness (material-dependent)</i>	20 - 100 µm (0.001 - 0.004 in.)
<i>Laser type</i>	Yb-fibre laser, 200 W
<i>Precision optics</i>	F-theta-lens, high-speed scanner
<i>Scan speed</i>	up to 7.0 m/s (23 ft./sec.)
<i>Variable focus diameter</i>	100 - 500 µm (0.004 - 0.02 in.)
<i>Power supply</i>	32 A
<i>Power consumption</i>	maximum 5.5 kW
<i>Nitrogen generator</i>	standard
<i>Compressed air supply</i>	7,000 hPa; 20 m ³ /h (102 psi; 26.2 yd ³ /h.)

Figura 105 - Caratteristiche tecniche della macchina per L-PBF EOS Eosint M270

- Distanza minima dai bordi di 10 mm per considerare sistemi di fissaggio della piattaforma di costruzione sulla base della macchina e il suo ancoraggio durante la fase di rimozione dei componenti tramite EDM;
- Distanza minima di 15 mm dagli angoli su cui sono alloggiati le sedi per le viti che fissano la piattaforma sul piatto di costruzione della macchina;
- Componenti distanziati tra loro di almeno 1mm;
- Inclinazione dei componenti di 5° rispetto alla direzione di ricoprimento, in modo tale che durante questa fase la quantità di materiale incontrata dal re-coater abbia una sezione con incremento graduale per evitare impuntamenti, danneggiamenti o generazione di difetti nel pezzo;
- Componente posizionato con la base sulla piattaforma, garantendo il fissaggio del pezzo durante tutta la fase di costruzione.

La Figura 106 mostra la modalità di messa in macchina del componente, con la piattaforma di costruzione vista dall'alto.

Per la messa in macchina è stata ipotizzata Y come direzione di re-coating.

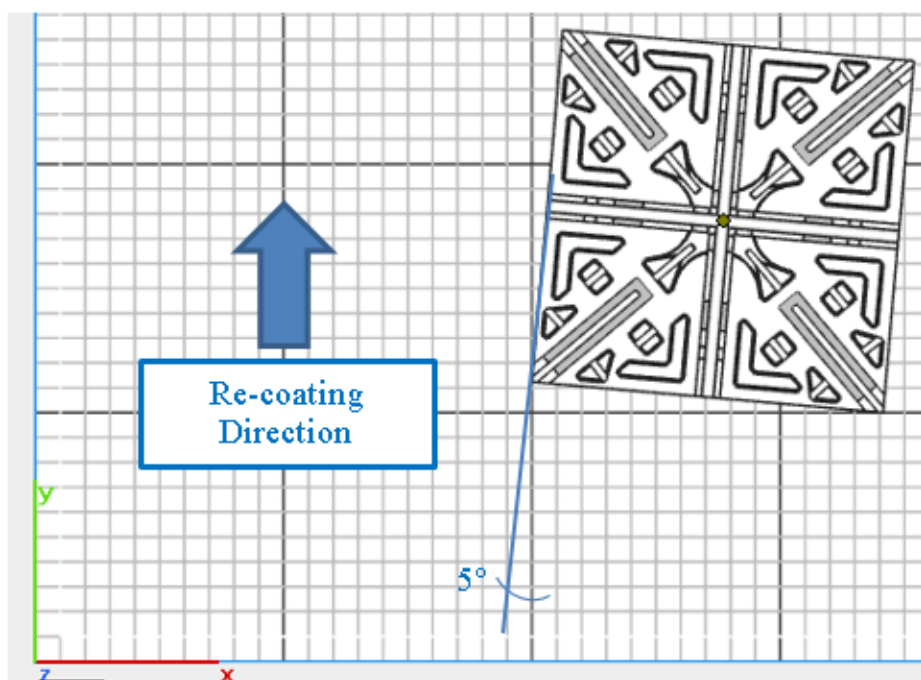


Figura 106 - Posizionamento del componente in macchina

Con questa configurazione e con le ipotesi descritte è possibile saturare il volume di produzione con 187 componenti in un unico job, come mostrato in Figura 107.

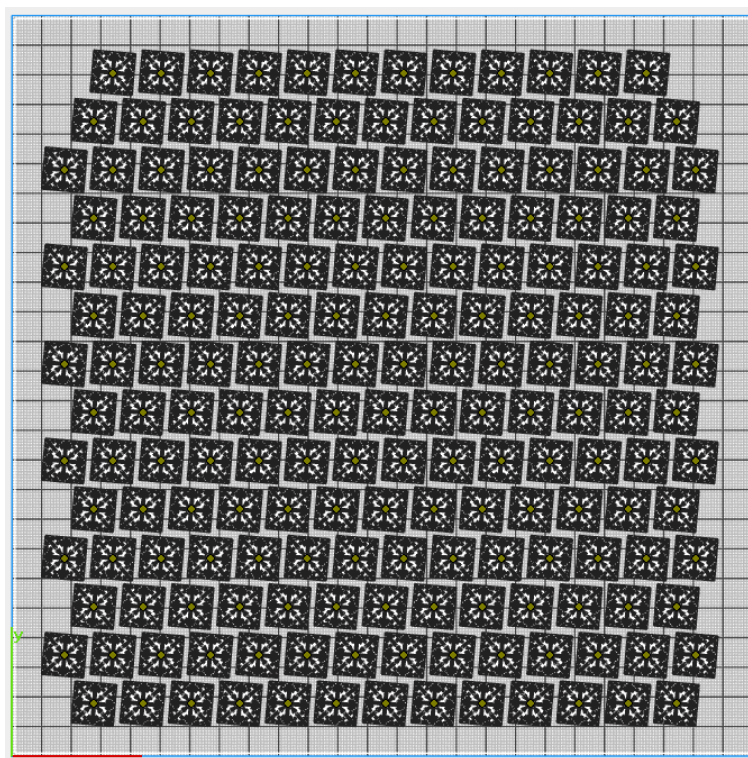
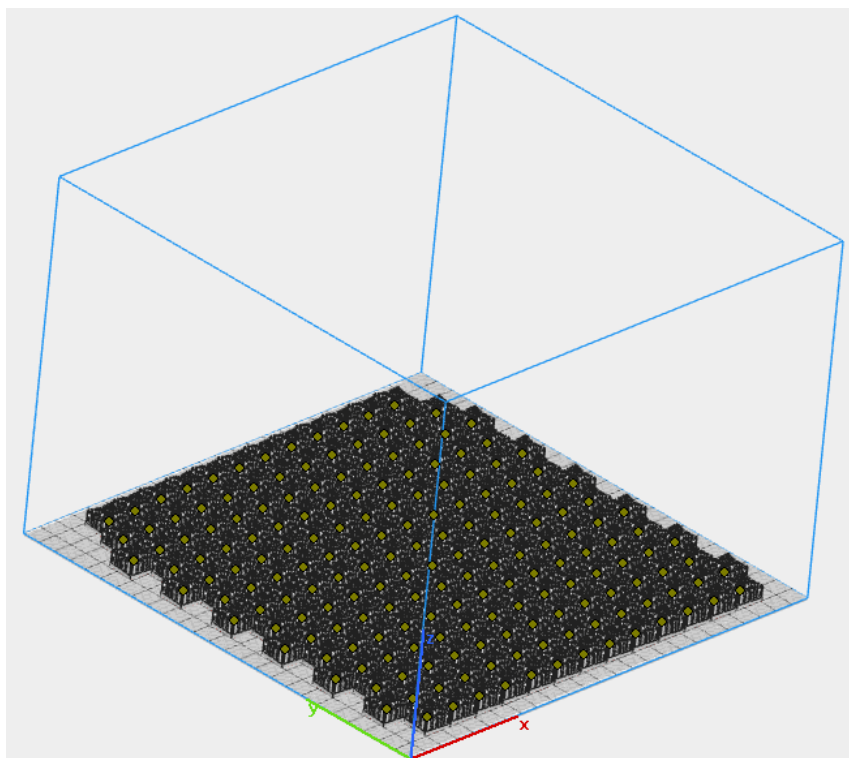


Figura 107 - Saturazione volume di lavoro

Il tempo di produzione per il job del componente con il volume di produzione saturato, la pulizia dei componenti e la rimozione dalla piattaforma di costruzione è stimato in 3 ore.

Una volta rimosso dalla piattaforma, il componente è pronto per essere messo in opera.

6. Conclusioni

Per la riprogettazione si è partiti da un modello reale di heatsink commerciale utilizzato per il raffreddamento della CPU di un modulo Raspberry Pi.

I principali vantaggi del componente originale sono:

- facile reperibilità;
- processo di produzione consolidato ed adatto a volumi di produzioni molto elevati (lavorazione alle macchine utensili);
- Costo contenuto (anche conseguenza del processo di produzione tradizionale);

I principali svantaggi del componente originale sono:

- Geometria vincolata da limiti imposti dalla tecnologia di produzione;
- Prestazioni ottimizzabili;
- Elevata quantità di materiale di scarto.

I vincoli geometrici di progetto durante la fase di design sono stati l'ingombro del componente originale (14,2x14,2x7,3 mm) e la base dell'heatsink poiché funzionale (attraverso un Thermal Interface Material adesivo posto sulla superficie inferiore si applica l'heatsink alla CPU).

Successivamente sono state definite le geometrie riprogettate, secondo gli obiettivi di:

- Adeguatezza alla produzione con L-PBF in termini di sfruttamento delle potenzialità della tecnologia;
- Aumento della caduta di temperatura nell'heatsink rispetto al componente originale;
- Incremento delle performance termiche in termini di distribuzione globale di temperatura su tutto il volume utile dell'heatsink;
- Incremento della superficie di scambio termico rispetto al componente originale;
- Diminuzione della quantità di materiale necessario alla produzione del pezzo.

Per quanto riguarda la riprogettazione, attraverso le regole di Design For Additive Manufacturing, sono state definite le seguenti geometrie, ciascuna delle quali non ottenibile con tecniche di produzione tradizionali:

- Geometria#1: è una geometria ottenuta a partire dal componente originale a cui sono state aggiunte delle features ottenibili attraverso tecniche additive come fori e tasche intermedie sulle alette;
- Geometria#2: è un componente ottenuto rielaborando la geometria delle sole alette al fine di renderle ottenibili attraverso tecniche additive;
- Geometria#3: è una geometria di tipo “estruso” realizzabile esclusivamente con tecniche di additive, seppur non ne sfrutti a pieno le potenzialità. È stata presentata poiché tale geometria non è ottenibile attraverso tecnologie di produzione tradizionali ed ha comunque dimostrato miglioramenti, a calcolo, rispetto al componente originale;
- Geometria#4: riprogettazione libera di un nuovo corpo alettato, utilizzando le regole di DFAM. Questa geometria ha mostrato i miglioramenti di performance più significativi rispetto al componente originale in termini di decadimento di temperatura totale ma una distribuzione di temperatura non ottimale;
 - ❖ Geometria#4.1: geometria ottenuta a partire dal caso studio #4 con l'obiettivo di migliorare la distribuzione di temperatura del sistema;
 - ❖ Geometria#4.2: geometria ottenuta a partire dal caso studio #4 e #4.1 con l'obiettivo di migliorare la distribuzione e la caduta di temperatura del sistema.

Successivamente è stata svolta l'analisi termica di ogni componente per identificare le performance termiche ed uno studio di ingombro al fine di stimare la quantità di materiale necessaria alla produzione del singolo pezzo finito.

Di tutte le geometrie riprogettate, la Geometria #4.2 rispetta al meglio i requisiti di progetto e, per questo motivo, ne è stata definita e simulata la messa in macchina per la produzione attraverso L-PBF.

Concludendo, produrre il componente attraverso L-PBF ed utilizzarlo per sostituire l'heatsink originale ottenuto tramite lavorazione alle macchine utensili è giustificabile perché si otterrebbero i seguenti vantaggi:

- Migliori performance termiche che si traducono in un uso ottimizzato del materiale con cui è costruito l'heatsink e una maggiore vita utile in termini di durata del device su cui viene montato;
- Risparmio di materiale per la produzione del componente;
- Non sono necessarie attrezzature per la produzione del componente, impianti, centri di lavoro, staffaggi, sistemi di raffreddamento o lubrificazione durante la costruzione: basta un sistema per la produzione attraverso L-PBF;
- Considerando le dimensioni del componente, è possibile saturare il volume di lavoro producendo diversi pezzi contemporaneamente in tempi relativamente brevi;
- Considerando le dimensioni e le caratteristiche del componente e nel caso di richiesta di volumi di produzione minori, è semplice integrare la costruzione dell'heatsink nei job in cui vengono realizzati altri componenti anche di dimensioni maggiori, abbattendo maggiormente i costi di produzione;
- A fine processo di produzione, il componente non necessita di particolari cicli di finitura: l'unica superficie funzionale è quella inferiore della base, per la quale è sufficiente la planarità che viene conferita a valle della rimozione del pezzo dalla piattaforma di costruzione tramite EDM (le eventuali irregolarità della superficie vengono compensate dal Thermal Interface Material);
- Non è necessario un ciclo di finitura superficiale poiché la rugosità conferita dal processo di produzione per L-PBF ($8 - 12 \mu\text{m}$) non è sfavorevole allo scambio termico.

Partendo da un dissipatore di calore in commercio, utilizzato normalmente in casi reali al fine di dissipare il calore generato dalla CPU di un modulo Raspberry Pi durante il normale funzionamento e applicando le regole di progettazione, i principi e le potenzialità dell'Additive Manufacturing, nello specifico del processo L-PBF, si è dimostrato, attraverso il lavoro di tesi, che è possibile ottenere delle geometrie, non realizzabili mediante i processi di produzione industriale tradizionali, che garantiscono il miglioramento e l'ottimizzazione del componente di partenza.

7. Next steps

Per la fine del lavoro di tesi, si propongono degli argomenti e degli aspetti che potrebbero essere opportunamente approfonditi in possibili sviluppi futuri, quali:

- Analisi economica e del costo di produzione per la realizzazione di un componente, in modo tale da avere una prospettiva di inserimento nel mercato dell'heatsink ottimizzato prodotto con tecnologie additive;
- Integrazione di strutture lattice alle geometrie proposte;
- Prototipazione dei componenti riprogettati con analisi di messa in macchina effettiva, settaggio dei parametri di processo al fine di ottenere tutte le features e gli spessori delle geometrie, analisi del processo di rimozione dei supporti, valutazione della necessità di cicli di trattamento termico e/o finitura funzionale, saturazione del volume di lavoro;
- Test di temperatura della CPU: equipaggiare la CPU del modulo Raspberry Pi con l'heatsink originale e il riprogettato, far compilare al device lo stesso codice di calcolo e misurare la Junction Temperature ottenuta con ciascun componente, strutturando un confronto.

Bibliografia/Sitografia

- [1] Hyub Lee, Chin Huat Joel Lim, Mun Ji Low, Nicholas Tham, Vadakke Matham Murukeshan, and Young-Jin Kim, Lasers in Additive Manufacturing: A Review, Article in International Journal of Precision Engineering and Manufacturing - Green Technology, July 2017.
- [2] Silvia Vock, Burghardt Klöden, Alexander Kirchner, Thomas Weißgärber, Bernd Kieback, Powders for powder bed fusion: a review, 18/11/2017
- [3] <https://www.bluepower-casting.com/en/produkte/plants-for-metal-powder-production/>
- [4] <https://www.carpenteradditive.com/technical-library/powder-production/>
- [5] http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=powder_preparation
- [6] Giulia Di Matteo, Selective laser melting aluminum alloys for automotive component, Master of Science Thesis, Politecnico di Torino, Marzo 2018
- [7] John O. Milewski, Additive Manufacturing of Metals, From Fundamental Technology to Rocket Nozzles, Medical Implants, and Custom Jewelry, Springer
- [8] Heatsink Manufacturing Technologies, articolo in Qpedia Magazine, Volume IV, Issue XI, Novembre 2010.
- [9] <https://www.engineering.com/DesignSoftware/DesignSoftwareArticles/ArticleID/15013/Designing-Liquid-Cooling-Components-with-CFD-in-the-Browser.aspx>
- [10] Robin Bornoff, John Parry, An Additive Design Heatsink Geometry Topology Identification and Optimisation Algorithm, Proceedings of SEMI-THERM Conference, San Jose, March 2015
- [11] Ercan M. Dede1, Shailesh N. Joshi, Feng Zhou, Topology Optimization, Additive Layer Manufacturing, and Experimental Testing of an Air-Cooled Heat Sink, Article in Journal of Mechanical Design, July 2015.
- [12] wakefield – vette, Heat sink design facts & guidelines for thermal analysis, Thermal Cooling Solutions from Smart to Finish, www.wakefield-vette.com
- [13] Crucible Design Ltd., Design guidelines for Direct Metal Laser Sintering (DMLS), 2015
- [14] S.H. Riza, C.Wen, Advances in Additive Manufacturing and Tooling, in Comprehensive Materials Processing, 2014
- [15] <https://it.ccm.net/faq/825-il-processore-si-suriscalda-problema-di-temperatura>
- [16] Daniel Brateris, Heat Sinks: Basic Introduction to Heat Sinks, 02/2019

Ringraziamenti

Sono giunto finalmente alla fine di un percorso di studi che mi ha permesso di crescere molto, sia dal punto di vista delle competenze, sia per quanto riguarda l'aspetto personale e caratteriale.

Impegno, passione e voglia di fare e di portare a termine i propri obiettivi non sono stati sufficienti a raggiungere questo importante traguardo: non ci sarei riuscito senza le persone che mi hanno guidato, consigliato, supportato e sopportato in questi anni di studio.

Un grazie immenso va ai miei genitori, sempre presenti, pronti a proteggermi, consolarmi ed incoraggiarmi nei momenti di delusione e sempre preziosi nel darmi la forza e la motivazione di lottare ed impegnarmi. Senza di loro non sarebbe stato possibile conseguire questo importante titolo in questa prestigiosa Università e vivere in questa bellissima città.

Grazie a mio fratello, ai nonni, agli zii, ai cugini e alla mia famiglia acquisita che anche con semplici gesti e parole sono sempre riusciti a farsi sentire più vicini dei tanti chilometri di distanza.

Un grazie agli amici veri, quelli storici, sempre presenti, con cui non si vede l'ora di fare due chiacchiere sulle cose assurde che succedono tutti i giorni, quelli che è un piacere immenso ritrovare ogni volta che si ritorna a casa.

Grazie agli amici incontrati durante questa esperienza fuori tra casa, università e lavoro. Una delle cose di cui sono più grato a Torino è che mi ha fatto conoscere persone meravigliose con cui ho condiviso momenti indimenticabili e che sono riuscite a farmi sentire meno lontano da casa.

Un grazie a tutte le persone a cui sono legato e che mi sono state vicine durante questo percorso.

Grazie alla mia bellissima ragazza, grazie per il sostegno e l'amore. Sei il motore della mia vita, ogni cosa è più bella e meno difficile se l'affrontiamo insieme. Sei il pilastro di tutto ciò che sono e che faccio. Grazie per aver condiviso con me sacrifici, delusioni, gioie, soddisfazioni, speranze. Insieme abbiamo imparato cosa significa amarsi veramente, vincendo anche la difficoltà della lontananza. Che questo sia un ulteriore passo verso la realizzazione dei nostri sogni.

È stato un percorso lungo, impegnativo, faticoso, pieno di difficoltà ma anche di soddisfazioni e vittorie. Non ce l'avrei mai fatta ad arrivare sin qui senza ciascuno di voi.

Grazie.

