



**UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE**

**FACOLTÀ DI INGEGNERIA**

Corso di laurea magistrale in Ingegneria Meccanica

Dipartimento di Ingegneria Industriale e Scienze Matematiche

***Miglioramento del processo di pressofusione attraverso l'utilizzo di  
tecniche di Additive Manufacturing***

***Improvement of the die casting process through the use of Additive  
Manufacturing techniques***

Relatore:

**Prof. Michele Germani**

Tesi di Laurea di:

**Antonino Guastadisegni**

Correlatori:

**Dott. Ing. Marco Mandolini**

**Dott. Ing. Paolo Cicconi**

Anno accademico 2018/2019



# Sommario

<b>INTRODUZIONE.....</b>	<b>5</b>
<b>1 PROCESSI E MATERIALI METALLICI UTILIZZATI NELLA FABBRICAZIONE ADDITIVA .....</b>	<b>8</b>
<b>1.1 Processi di fabbricazione additiva .....</b>	<b>9</b>
1.1.1 Powder Bed Fusion .....	9
1.1.2 Electron Beam Melting .....	12
1.1.3 Direct Energy Deposition .....	14
<b>1.2 Dalla progettazione al prototipo fisico.....</b>	<b>15</b>
<b>1.3 Materiali Utilizzati .....</b>	<b>23</b>
<b>1.4 Rapid tooling.....</b>	<b>26</b>
1.4.1 Costruzione di stampi mediante tecniche AM.....	31
<b>1.5 Il processo di pressofusione .....</b>	<b>32</b>
1.5.1 Cenni sul danneggiamento dello stampo .....	35
<b>2 LINEE GUIDA, PRINCIPI BASE NEL DESIGN E SOFTWARE DI PROGETTAZIONE</b>	<b>38</b>
<b>2.1 Principali problematiche .....</b>	<b>38</b>
2.1.1 Qualità superficiale .....	38
2.1.2 Stress termici .....	39
2.2.3 Linee di ritiro .....	41
<b>2.2 Studio dei Supporti .....</b>	<b>41</b>
<b>2.3 Aspetti di progettazione in AM .....</b>	<b>42</b>
2.3.1 Qualità generale di costruzione .....	42
2.3.2 Feature specifiche .....	43
2.3.3 Riduzione degli stress termici.....	44
2.3.4 Riduzione delle linee di ritiro .....	44
2.4.1 Design di strutture freeform e strutture support-free.....	45
2.4.2 Accuratezza dimensionale.....	46
2.4.3 Design dei canali.....	46
2.4.4 Ottimizzazione topologica.....	47
2.4.5 Tecniche di riduzione del peso .....	48

2.3.2	Produzione ibrida.....	49
<b>3</b>	<b><i>METODOLOGIA E FLUSSO DI LAVORO</i></b> .....	<b>50</b>
3.1	Valutazione delle modifiche in ottica AM.....	53
3.2	Ottimizzazione topologica .....	54
3.3	Strategia di modellazione della struttura reticolare.....	56
3.4	Validazione e controllo del design .....	59
3.5	Verifica accurata dei risultati ottenuti.....	65
3.6	Simulazione del processo di stampa.....	67
3.7	Processo produttivo del nuovo componente in ottica AM.....	76
3.8	Modello di costo per parti AM .....	78
<b>4</b>	<b><i>CASO STUDIO</i></b> .....	<b>86</b>
4.1	Modello Iniziale ( AS-IS).....	86
4.2	Modifiche nel design in ottica AM.....	89
4.2.1	Modello definitivo (TO-BE) .....	92
4.3	Simulazioni strutturali .....	94
4.4	Simulazioni di stampa .....	103
4.5	Applicazione del modello di costo.....	111
4.5.1	Confronto con il processo produttivo attuale.....	116
	<b><i>CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI</i></b> .....	<b>118</b>
	<b><i>RIFERIMENTI</i></b> .....	<b>120</b>
	Bibliografia .....	120
	Sitografia .....	120

# INTRODUZIONE

Lo scopo del seguente lavoro di tesi è quello di valutare se le tecnologie di Additive Manufacturing possano effettivamente sostituire efficacemente le tecnologie di produzione tradizionali focalizzando l'attenzione su un caso studio specifico. Il caso studio proposto riguarda sia la realizzazione di un prototipo di bruciatore a tre corone in alluminio e sia la realizzazione in AM degli inserti per i relativi stampi (matrice/punzone) usati nella produzione per pressofusione.

Nello specifico verranno effettuate:

- Proposte di redesign della Matrice e del Punzone in ottica di Additive Manufacturing;
- Analisi Strutturale della configurazione originale AS-IS;
- Analisi Strutturale delle configurazioni modificate TO-BE;
- Simulazioni del processo di stampa della configurazione modificata TO-BE;
- Stampa 3D della matrice in configurazione modificata TO-BE in AM metallico sul qual verranno eseguiti dei test sperimentali per il raffronto con i dati ottenuti dalle precedenti simulazioni;
- Sviluppo di un modello di costo per il confronto del nuovo processo produttivo con quello tradizionale.

L'Additive Manufacturing (AM) è costituita da un insieme di tecnologie per la realizzazione di un modello fisico mediante un processo di stampa 3D. La progettazione meccanica nel contesto AM è anche chiamata con il nome di Generative Design. Tra la fase di modellazione virtuale di un componente e la stampa 3D c'è la realizzazione dello slicing; ovvero la suddivisione in una serie di strati alle quali viene assegnato uno spessore finito di qualche decina di  $\mu\text{m}$ .

Mediante l'utilizzo di macchine per l'additive manufacturing, i singoli strati vengono fusi tra loro per dare origine al componente finito senza dover adeguare la geometria ai processi di produzione e agli utensili, considerando caratteristiche come sottosquadri, angoli di sformo, ecc. Pertanto, in linea generale, una produzione in AM può risultare tanto più vantaggiosa quanto più è complessa la geometria delle parti da realizzare se comparata con i metodi tradizionali.

Questo principio base guida tutti i processi e le macchine per AM indipendentemente dalla tecnologia utilizzata per creare gli strati di materiale e legarli insieme.

Ulteriori variabili che distinguono i processi sono:

- Velocità (m/sec);

- Spessore del layer ( $\mu\text{m}$ );
- Materiale utilizzato;
- Accuratezza (tolleranze dimensionali);
- Costo di produzione (€).

I processi di fabbricazione additiva sono stati sviluppati fin dagli anni '80 per il settore di Rapid Prototyping utilizzando appunto la stampa 3D.

Questo approccio tecnologico è utilizzato in una varietà di settori industriali ad esempio in quello meccanico, aerospaziale, e biomedico sanitario per creare rapidamente un prototipo del prodotto prima della sua versione definitiva allo scopo di testare idee e fornire feedback durante lo sviluppo prima della sua commercializzazione.

Dagli sviluppi iniziali la tecnologia è in continua e rapida evoluzione e si sta migliorando molto in termini di velocità di costruzione, finitura superficiale e di materiali impiegati tanto da suscitare interesse in molti settori industriali come quello meccanico, aerospaziale, racing, e in ambito biomedico e sanitario.

Almeno per il momento la produzione additiva non può soppiantare le lavorazioni tradizionali, tuttavia può rappresentare un valido supporto in alcune applicazioni.

Secondo l'opinione di molti esperti, questa tecnologia è stata descritta come rivoluzionaria principalmente nello sviluppo del prodotto poiché cambia radicalmente sia le tecniche di progettazione che il processo produttivo, permettendo di creare nuove imprese e nuove realtà industriali.

I principali vantaggi che permette la produzione additiva sono:

- Realizzazione di componenti dalla geometria complessa e personalizzati ad esempio un unico esemplare o piccoli lotti di produzione;

Realizzazione di componenti più leggeri a parità di resistenza meccanica rispetto a quelli ottenuti mediante lavorazioni tradizionali;

- Riduzione dei costi dell'attrezzatura realizzando direttamente il prototipo senza bisogno di attrezzature specifiche come matrici di stampaggio o di foratura;
- Semplificazione del processo produttivo eliminando molte fasi complesse e fonti di errore con conseguente riduzione del consumo di energia, della quantità di materiale impiegato, e sfridi rendendolo più eco sostenibile rispetto a lavorazioni convenzionali;
- Realizzazione di riparazioni semplici ed efficaci dei componenti danneggiati.

Un altro settore di applicazione interessante è definito Rapid Tooling riguardante la realizzazione di utensili mediante la produzione additiva. Sebbene l'additive manufacturing non sia adatto per la produzione in serie può comunque fornire un contributo nel miglioramento del processo produttivo del prodotto permettendo una semplificazione nelle operazioni di realizzazione degli strumenti permettendo di ridurre il tempo necessario ed eliminare lavorazioni costose e complesse necessarie con lavorazioni tradizionali. Questa si focalizza anche nel settore Rapid Tooling perché applica i concetti del Generative Design nella costruzione di inserti per stampaggio.

# **1 PROCESSI E MATERIALI METALLICI UTILIZZATI NELLA FABBRICAZIONE ADDITIVA**

Esistono numerosi modi di classificare i processi AM ma l'approccio più diffuso è quello secondo la tecnologia di base impiegata, ad esempio il modo con cui viene fornita l'energia necessaria alla fusione, alla tecnologia di stampa impiegata oppure allo stato del materiale grezzo in input al processo e in generale, però, non è possibile classificare i processi in modo univoco.

Nell'ambito dei materiali plastici, i processi di stampa 3D sono ben consolidati e permettono di produrre prototipi per la valutazione estetica e funzionale di un oggetto prima dell'ingresso sul mercato utilizzando una vasta gamma di materiali polimerici o compositi per aumentarne la resistenza.

Per quanto riguarda la produzione additiva sui materiali metallici, la tecnologia è ancora in evoluzione ma si raggiungeranno miglioramenti significativi delle prestazioni e diminuzione dei costi nei prossimi anni.

Le tecniche di fabbricazione additiva non sono al momento in grado di sostituire i processi di lavorazione per asportazione di materiale ampiamente collaudati e per i quali si hanno a disposizione molte informazioni anche per quanto riguarda i materiali ma, possono costituire un valido aiuto soprattutto nella costruzione di prototipi o componenti altamente personalizzati nei quali si ricercano particolarità nella forma, proprietà meccaniche di leggerezza e resistenza.

Nell'ambito di studio della tesi verranno esaminati solamente le tecniche di fabbricazione additiva maggiormente impiegati e diffusi nell'ambito di realizzazione di parti o utilizzate per la riparazione e modifica di componenti già esistenti.

Un breve cenno viene rivolto alla gamma dei materiali metallici sempre più ampia e prestazionale offerta da un numero di produttori in continua crescita.

Si analizzeranno nuove frontiere e possibilità che i processi di Additive Manufacturing permettono di raggiungere nella produzione di utensili per lo stampaggio ad iniezione e per la pressofusione dell'alluminio analizzando lo stato dell'arte.



# 1.1 Processi di fabbricazione additiva

## 1.1.1 Powder Bed Fusion

Il Powder Bed Fusion (PBF) è un processo di fabbricazione additiva che sfrutta energia termica per fondere e solidificare una regione di un letto di polvere, strato dopo strato (Figura 1.1). Sfruttano questo principio di funzionamento le seguenti tecniche di stampa comunemente utilizzate: Direct Metal Laser Sintering (DMLS), Electron Beam Melting (EBM), Selective Heat Sintering (SHS), Selective Laser Melting (SLM) e Selective Laser Sintering (SLS).

Esistono numerose varianti della tecnologia Powder Bed Fusion sebbene le capacità di processo, le proprietà del materiale e le caratteristiche meccaniche della parte possano variare, condividono il medesimo principio di funzionamento.

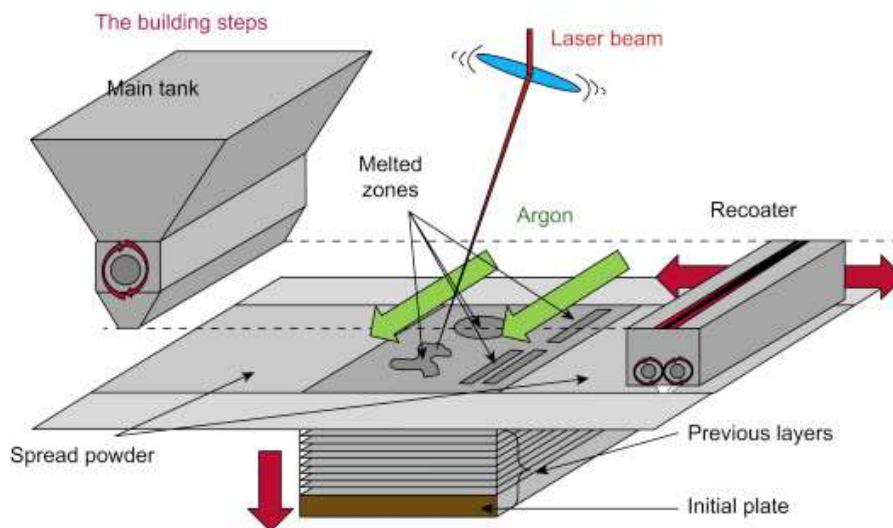


Figura 1.1. Powder Bed Fusion

Il processo di costruzione inizia con la deposizione di un primo strato di polvere metallica di dimensione compresa tra 10  $\mu\text{m}$  e 100  $\mu\text{m}$  che copre tutta l'area della base di stampa mediante un dispositivo a lama o a tergicristallo chiamato Recoater.

Generalmente lo spessore per la maggior parte dei materiali metallici è assunto pari a 40- 50  $\mu\text{m}$ .

L'altezza dello strato di polvere è un fattore importante in questo tipo di processo e viene scelto calibrato anche in funzione di altri parametri come la potenza del raggio laser, la dimensione del granello di polvere e geometria dello strato.

Successivamente alla deposizione dello strato di polvere metallica, il laser scansiona tutta l'area trasversale della geometria percorrendo una traiettoria chiusa.

La distanza tra due tratti paralleli e rettilinei di traiettoria (dimensione  $h$  in figura) è leggermente inferiore al diametro del raggio laser permettendo la sovrapposizione parziale degli strati di fusione evitando una incompleta saldatura della sezione.

Il modo in cui viene scansionata la superficie è indicato dal Raster Pattern, un fattore molto importante che ha un forte impatto sulla qualità, microstruttura,

Una volta scansionata tutta l'area, il laser effettua un percorso sul contorno che delimita l'area in modo da avere una migliore finitura superficiale.

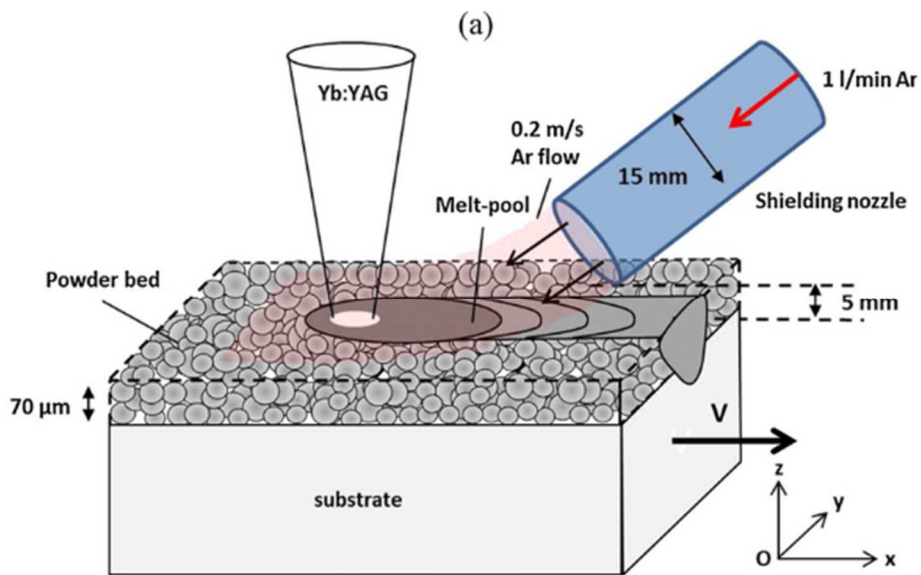


Figura 1.2. Esempio fusione laser

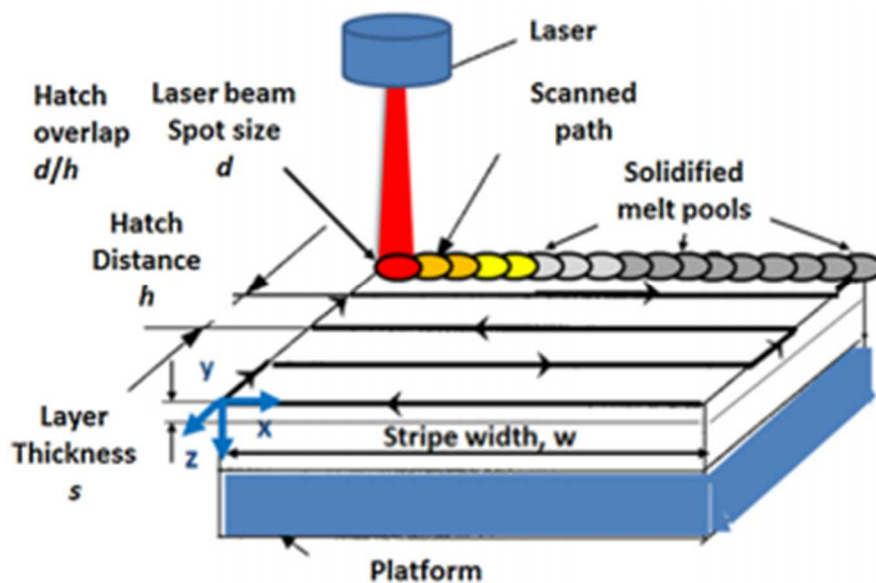


Figura 1.3. Parametri di scansione

Il Raster Pattern tiene conto proprio del movimento e della traiettoria del laser pertanto è un parametro molto importante che ha un forte impatto sulla microstruttura (nel caso di metallo) e difettosità nella parte completa.

Questo processo è applicabile per una vasta gamma di materiali inclusi polimeri, elastomeri, materiali ceramici e compositi.

Come visto precedentemente il Powder bed Fusion per materiali metallici, ha due possibili varianti:

- Selective Laser Sintering (SLS)
- Selective Laser Melting (SLM)

Nel primo la polvere metallica non è completamente fusa ma viene fornita alle particelle una quantità di energia per portarle ad una temperatura elevata che consente la diffusione allo stato solido e la loro unione parziale.

Nella maggior parte dei casi le parti devono essere ancorate alla piastra di stampa mediante dei supporti che impediscono al componente di deformarsi liberamente sotto l'effetto delle tensioni residue.

I supporti hanno anche il compito di favorire lo smaltimento del calore in eccesso, dalla parte alla piastra di stampa che, essendo massivo, funge da dissipatore di calore.

Durante tutto il processo di costruzione, la parte solida si trova immersa nella polvere metallica all'interno della camera di costruzione che possiede una conducibilità termica di circa dieci volte inferiore a quella del materiale solido risultando molto più isolante.

Per avere una buona adesione dei supporti o della parte stessa alla piastra di stampa, questa deve necessariamente essere dello stesso materiale di costruzione della parte pertanto, le macchine sono dotate di più piastre di stampa di differenti materiali.

Una volta finita la fase di build, il componente rimane immerso nella polvere nella camera di costruzione.

Le macchine che adottano una tecnologia Powder Bed Fusion, sono dotate di un complesso sistema di aspirazione provvisto di filtri per rimuovere la polvere in eccesso e rimuovere le impurità tra cui degli agglomerati di particelle parzialmente fuse tra loro oppure della scoria che si forma durante il processo di saldatura.

Solitamente una percentuale inferiore al 10% della polvere metallica utilizzata nella costruzione viene scartata mentre, la restante quantità, filtrata torna nei serbatoi di accumulo di materiale della macchina potendo essere riutilizzata per una nuova stampa.

La possibilità di non produrre sfridi e scarti di lavorazione unita alla semplificazione del processo produttivo, contribuisce ad inserire la tecnologia Powder Bed ed in generale tutti i processi di AM tra le tecnologie Green in rapida evoluzione e diffusione nei prossimi anni.

## 1.1.2 Electron Beam Melting

Il processo di fusione delle polveri mediante fascio di elettroni EBM è in grado di realizzare componenti in metallo in un a camera di costruzione mantenuta sottovuoto ad alte temperature.

Questo processo è impiegato già da anni prevalentemente nell'industria biomedicale con più di 50000 dispositivi già realizzati e impiantati.

Ultimamente questo processo produttivo si sta diffondendo nell'industria aerospaziale per fabbricare componenti in piccola serie.

Un altro fattore che ha contribuito all'espansione dell' EBM nel mercato è lo sviluppo delle polveri per nuovi materiali come le leghe di alluminio 718 a base cromo-molibdeno caratterizzate da un'ottima resistenza alla corrosione e ottima resistenza meccanica ad alte temperature.

Il processo è consolidato per particolari materiali tra cui Titanio, Inconel 625, Inconel 718 e alluminio cobalto.

Rispetto ai processi di fabbricazione tradizionali l'EBM è caratterizzato da bassi volumi di produzione, viene utilizzato solo per componenti di alto valore e riduce il lead time dato che non sono presenti attrezzature dedicate alla produzione della singola parte.

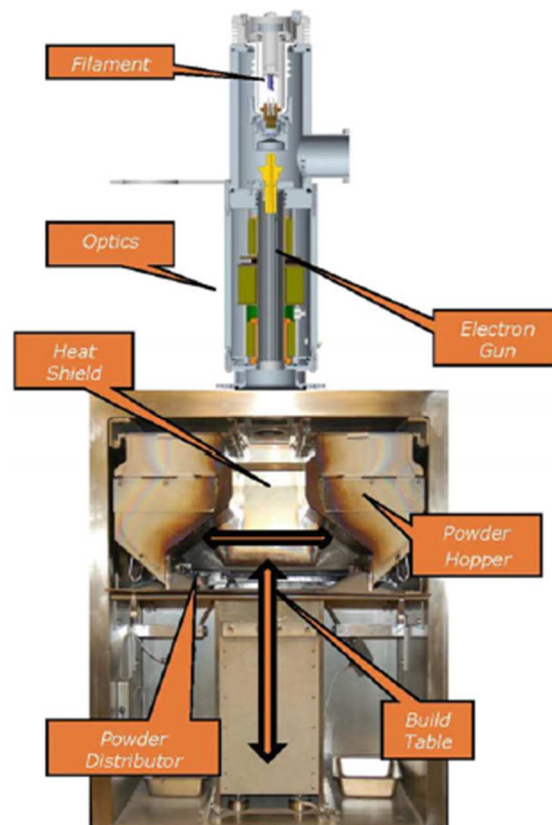


Figura 1.4. Apparecchiatura per Electron Beam Melting

Questa tecnologia è stata messa a sviluppo per la prima volta nel 1993 in Svezia presso l'università di Gothenburg e commercializzata ufficialmente dalla compagnia svedese Arcam che ne portò avanti lo sviluppo e installò il primo sistema nel 2002.

Il processo si focalizza su un fascio di elettroni che fonde un'area discreta, unito ad un sistema a letto di polvere di diametro variabile tra i 45 µm e i 105 µm.

Il sistema EBM è composto indicativamente in questi elementi principali:

- Electron Beam Gun
- Camera a vuoto (pressione 4-10 torr)
- Serbatoio di costruzione per la polvere
- Meccanismo di distribuzione della polvere (tramoggia e recoater)

La pistola a raggio di elettroni basa il suo funzionamento su un filamento di tungsteno che, riscaldato, emette elettroni accelerati poi da una differenza di potenziale di 60 kV generando un fascio di elettroni, focalizzato sull'area da fondere, da alcune lenti elettromagnetiche.

Questo sistema è caratterizzato da:

- Elevata velocità di scansione (fino ad 8000 m/s)
- Buona accuratezza nel posizionamento del raggio laser (0,025 mm)
- Spessore dello strato di polvere metallica compreso tra 0,05 e 0,2 mm

Il processo di costruzione della parte inizia con la deposizione di uno strato di polvere metallica sul piatto di stampa.

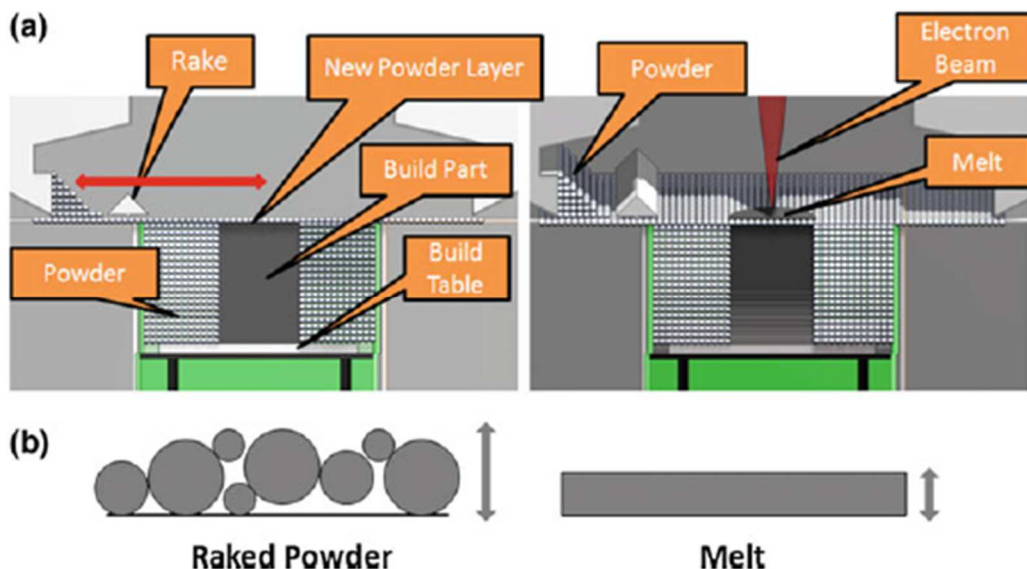


Figura 1.5. Deposizione e fusione della polvere

Il materiale viene prima preriscaldato dal fascio di elettroni e, successivamente fusa da un'altra sequenza di linee di scansione fino alla completa realizzazione di tutta l'area trasversale.

### 1.1.3 Direct Energy Deposition

La tecnologia di Direct Energy Deposition si riferisce in modo ampio a processi di fabbricazione additiva in cui la materia prima e l'energia per la fusione, vengono depositate localmente nel medesimo punto dello spazio costituente la camera di costruzione.

I due principali processi che possono essere inclusi in questa categoria sono:

- Laser Engineered Free Shaped ( LENS)
- Electron Beam Freeform Fabrication ( EBF3)
- Wire and Arc Additive Manufacturing ( WAAM )

E mantengono gli stessi principi di funzionamento ma adottano diverse forme di energia e tipologia di materiale metallico utilizzato.

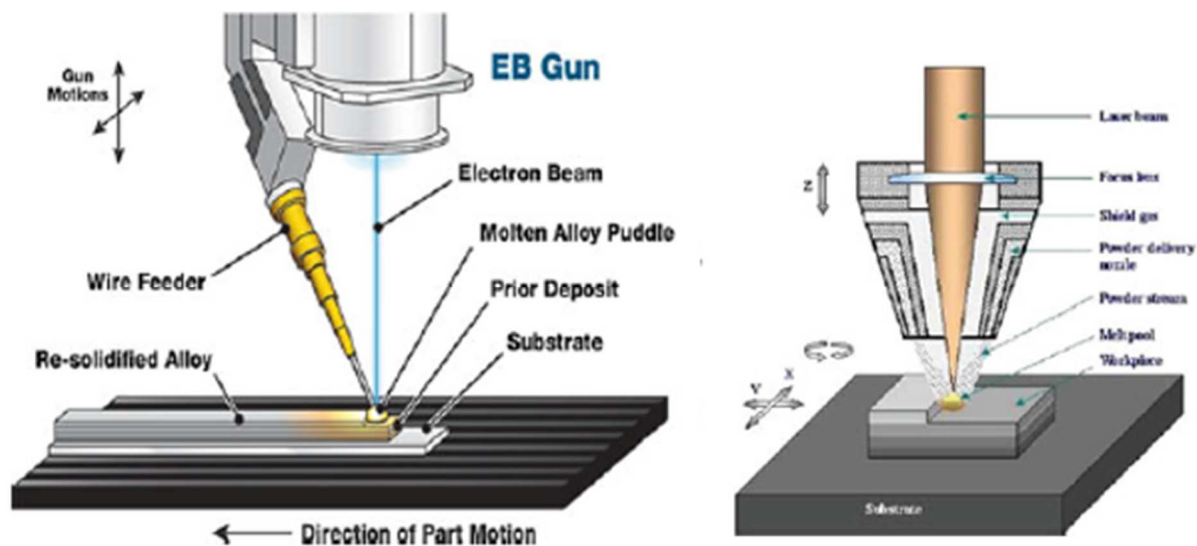


Figura 1.6. Direct Energy Deposition

Nel processo LENS il laser e l'ugello che deposita la polvere metallica, sono montati su di un utensile articolato in grado di compiere una traslazione lungo l'asse z nella direzione normale al piatto di stampa che invece è libero di traslare nelle direzioni x e y del piano e ruotare rispetto alla direzione perpendicolare z e rotazioni nello spazio.

La polvere metallica viene depositata localmente solo sull'area colpita dove il raggio laser concentra la sua energia, formando un bagno fuso che aggiunge materiale al componente in costruzione.

Il bagno fuso si sposta prima su tutta l'area spot-by-spot e line-by-line e successivamente nello spazio layer-by-layer fino alla completa realizzazione della parte.

Seguendo lo stesso principio di funzionamento ma utilizzando una tipologia diversa di materiale grezzo, può essere introdotto il WAAM.

In questo caso, un filo di rame viene introdotto direttamente nel bagno fuso che si genera dall'arco elettrico tra la testa mobile e la superficie della parte in costruzione, generando delle linee di saldatura MIG che seguono un percorso programmato.

Il processo EBF3 invece è una combinazione dei primi due processi in quanto utilizza un filo metallico immerso nel bagno di fusione come materiale grezzo e una fonte di energia per la fusione. L'energia viene fornita da un fascio di elettroni in una camera di costruzione sotto vuoto adatta per favorire la messa a fuoco dell'area da portare alla temperatura di fusione e apportare materiale.

Tutti i processi a deposizione diretta di materiale presentano delle limitazioni nella finitura superficiale e nel ottenimento di tolleranze dimensionali strette che sono dell'ordine di qualche decimo di mm.

I processi di stampa 3D sono configurati come sistemi autonomi di costruzione (Stand Alone) ma spesso vengono configurati come processi ibridi combinati con processi di asportazione di materiale convenzionali per migliorare la finitura superficiale e il rispetto degli intervalli di tolleranza.

La tecnologia di stampa viene integrata su centri di lavoro 5-6 assi che permettono una deposizione del materiale con una diversa angolazione rispetto al piatto di stampa e sono provvisti di cambio utensile per poter eseguire svariate lavorazioni per asportazione di truciolo venendo spesso impiegati per la riparazione di una ampia gamma di componenti meccanici o strutturali di grandi dimensioni.

## **1.2 Dalla progettazione al prototipo fisico**

È possibile riassumere il processo di stampa 3D in una serie di passi da eseguire per poter generare un modello fisico, talvolta anche funzionale, partendo da un concept del componente stesso.

Il processo è dipendente dalla tecnologia, dal materiale utilizzato, dal tipo di macchina utilizzato ma generalmente è sviluppato in 6 step:

### **1. Generazione di un modello CAD della parte:**

Consiste nel tradurre un'idea rappresentata inizialmente mediante schizzo su carta, in un modello solido tridimensionale ottenute tramite un qualsiasi programma di modellazione solida.

Anche se il processo di Additive manufacturing è una sequenza di passi da eseguire per dal modello al prototipo in un'unica direzione, spesso si tratta di un processo iterativo in cui il modello cad viene modificato per avere riscontro in tutti i passaggi della catena critica.

Per quanto riguarda la fabbricazione additiva dei metalli, i punti critici da rispettare possono riguardare l'anisotropia, la distorsione, la direzione di costruzione parallelamente alla storia termica di costruzione, legata alla generazione e alla successiva rimozione dei supporti.

## **2. Conversione del modello CAD in un formato accettato dalla stampante:**

In aggiunta ai parametri di processo deve essere fornito in input alla stampa un file in formato STL.

Questo tipo di formato cattura la superficie del modello 3D precedentemente generato approssimandola con una unione di triangoli di differenti dimensioni

I vertici di ogni triangolo e i vettori normali ad ogni superficie consentono al programma di preprocessing della stampante di individuare la posizione delle singole superfici nello spazio di lavoro.

Il formato STL contiene informazioni riguardanti esclusivamente la geometria del componente e vengono eliminate tutte le altre informazioni come unità di misura, materiale, colore, volume che caratterizzano un file CAD.

La mancanza di queste informazioni potrebbe influenzare il processo di costruzione compromettere la funzionalità della parte stessa.

Per risolvere questo problema è stata sviluppata un'altra tipologia di formato denominata AFM appartenente agli standard ASTM/ISO.

La tipologia di formato maggiormente utilizzata nei processi di AM e supportato dalla gran parte dei programmi CAD rimane l'STL.

## **3. Preparazione del modello CAD**

Una volta disponibile il file STL corretto, vengono eseguiti una serie di step per generare le informazioni necessarie alla al sistema per dare inizio al processo di costruzione in AM.

Molto spesso questo procedimento comincia con la riparazione dei file STL che possono presentare diverse tipologie di errori come gaps tra le superfici triangolari, normale invertita dove il lato sbagliato del triangolo è inteso come interno alla parte.

Altri errori sono triangoli trasversali, spigoli e contorni aperti e gusci.

Dopo che tutti gli errori sono stati corretti, deve essere stabilita una orientazione del modello 3D e la direzione di costruzione rispetto alla piattaforma.

Successivamente vengono scelti, l'orientazione, il materiale, la forma e il numero dei supporti e l'utilizzo, dove possibile, di una struttura interna di alleggerimento (Lattice Structure)



costituita dall'unione di più moduli elementari ripetuti nello spazio e dotata di una propria densità e assegnato un modello 3D alla parte da stampare.

Il processo che gradualmente suddivide il modello 3D così come i supporti in un numero finito di strati con l'altezza desiderata è detto "Slicing".

Ogni sezione trasversale della geometria ha uno spessore costante.

Nel caso si considerino tecniche di additive manufacturing per metallo il file in formato STL vengono utilizzati software specifici come Magics che permettono di assolvere alle operazioni di riparazione delle superfici e di generazione dei supporti.

Ad esempio per metal powder bed process, la principale funzione della struttura dei supporti e quella di estrarre l'energia termica dal modello e ancorare la superfici e forme al piatto di stampa.

Il disegno dei supporti può seguire due principali funzioni:

- Vengono modellati durante la modellazione Cad della parte facendo in modo che siano delle feature del componente stesso
- La struttura viene generata in formato STL durante la fase di pre processing direttamente dal software

Il secondo approccio permette una maggiore flessibilità in quanto adatta la struttura ai dettagli richiesti.

Ad esempio se i supporti sono utili solo durante la fase di build per sostenere determinate superfici della parte ,allora devono essere realizzati utilizzando meno materiale possibile.

Se invece, oltre la funzione strutturale, devono permettere anche lo smaltimento del calore e provvedere all'ancoraggio meccanico del componente al piatto di stampa allora è necessaria un'area trasversale più elevata per essere funzionale.

I supporti hanno un ruolo fondamentale e una corretta progettazione contribuisce a minimizzare tensioni e deformazioni durante la fase di build.

Una volta generati i supporti in base ai seguenti criteri, il programma di preprocesso esegue lo Slicing dividendo il modello in layer nella direzione di costruzione partendo dal piatto di stampa, con spessore costante che varia da un minimo di 25 micron ad un massimo di 50 micron.

Generalmente lo strato di polvere depositato è 25 micron per ottenere superfici con finitura superficiale più alta mentre è di 40- 75 micron per la gran parte delle applicazioni.

Lo spessore del layer è correlato con la dimensione della polvere e il nuovo strato distribuito idealmente dovrebbe essere leggermente più grande del diametro medio della particella tale

che la potenza del laser sia sufficiente a fondere lo strato depositato e, a sua volta, a rifondere quello precedente.

Uno spessore troppo grande porterebbe ad una dispersione dell'energia in input non sufficiente a consentire un assorbimento uniforme dell'energia ottica e del calore, determinando una fusione parziale.

Per ogni strato, il software di Slicer genera anche il percorso che il raggio laser segue per fondere completamente il layer di materiale depositato.

Il bagno fuso, generato dal raggio laser, si muove su un piano in modo analogo a quello di un utensile di fresatura per la lavorazione di una superficie.

Un parametro molto importante è il diametro del laser utile per il calcolo di un parametro chiamato Compensazione del Raggio scelto in modo da far sovrapporre percorsi adiacenti evitando la fusione parziale.

Un altro parametro da tenere in considerazione è l' Isola definita in ogni layer e sposta le linee di scansione considerando un certo offset.

il calore viene introdotto spazialmente e in modo casuale sull'area in modo da evitare il surriscaldamento di una determinata zona rispetto ad una adiacente che porta alla generazione delle tensioni residue e deformazioni.

Il cambio della direzione di scansione e dell'offset delle linee di scansione layer per layer, consente una distribuzione uniforme dell'anisotropia termica e microstrutturale nell' intero modello 3D all'interno della parte permettendo l'isotropia complessiva delle proprietà del materiale.

In alternativa alla strategia di variazione del percorso del laser, i parametri critici che determinano la quantità di energia fornita nell'unità di tempo e sono direttamente riferiti al riscaldamento, alla fusione e al raffreddamento dello strato di polvere:

- La potenza del fascio laser
- Velocità di scansione
- Spostamento del fuoco

La variazione di ognuno di questi parametri influenza le caratteristiche nella fase di build della parte.

Compatibilmente con i parametri della macchina, fornire alta potenza combinata con una elevata velocità di scansione produce una storia termica sensibilmente differente da quella ottenuta impostando bassa potenza ed elevata velocità di scansione a parità di potenza termica in ingresso.

Il tipo di microstruttura ottenuta e le proprietà meccaniche del componente possono differire sensibilmente dato che il bagno fuso si muove a diverse velocità generando differenze nel processo di solidificazione.

Una volta ottenuto lo slicing del materiale, viene trasferito nel software all'interfaccia della macchina che permette di trasformare i dati di costruzione in controlli della macchina per realizzare l'effettivo processo di costruzione.

#### **4. Setup della macchina**

La preparazione della macchina è il passo che precede l'effettiva realizzazione della parte e può essere divisa principalmente in due fasi principali:

- Configurazione dell'hardware della macchina
- Controllo del processo

La configurazione dell'hardware prevede tutte le operazioni di preprocessing necessarie prima della effettiva fase di build della parte:

- la pulizia della camera di stampa
- il caricamento della polvere metallica
- verifica di routine di tutte le impostazioni di build critiche e dei controlli di processo come pressione del gas, pressione, sensori di ossigeno

La sequenza e la modalità con cui vengono eseguiti questi controlli dipendono direttamente dal tipo di macchina installata ma, generalmente, è pronta per l'effettiva fase di build prendendo in input il file di slicing ottenuto dalle precedenti fasi del processo di progettazione.

La fase di Controllo del processo consente ad un sistema AM di accettare i file di build, avviare la compilazione ed interromperla in qualsiasi momento, preparazione della macchina per l'estrazione del pezzo finito e lo scarico della polvere metallica in eccesso mediante aspirazione.

La fase di compilazione è la più delicata in quanto prevede il posizionamento della parte sulla piattaforma di stampa e rimangono attive alcune funzionalità di scala delle dimensioni e di manipolazione di base della geometria.

Decisa la posizione fisica delle parti sul piatto stampa vengono stabiliti:

- Parametri di processo e costruzione
- Parametri materiali
- Parametri della parte

Il parametro di processo controlla il parametro a livello macchina a cui è applicata l'intera fase di build.

Esempi riguardano i processi di iniezione di gas inerte nella camera di costruzione, movimento e riciclo del materiale e ventilazione definendo il funzionamento di base della macchina per rendere operativo l'ambiente di costruzione.

I Parametri materiali indicano le quantità di dosaggio della polvere e il controllo dell'ambiente della camera di costruzione mediante l'iniezione di gas inerte.

Il parametro più importante è il "Dose Factor" indica il modo in cui lo strato di materiale depositato viene comparato con la discesa del piatto di stampa.

Un dose factor del 100% indica che l'altezza dello strato di materiale depositato coincide con l'altezza dello strato di materiale fuso dal laser.

All'inizio della fase di build, il Dose Factor è compreso in un intervallo che va dal 150% al 200% per garantire la copertura del layer precedente con un nuovo strato di polvere metallica.

Durante tutto il processo questo parametro deve assumere valori superiori al 100% perché il materiale fuso in uno strato solido ha un volume inferiore rispetto alla polvere dato che sono stati eliminati gli spazi tra le particelle.

La superficie delle aree fuse risulta più bassa rispetto al resto del letto di polvere e specialmente quando l'area della sezione della parte aumenta rispetto al letto di polvere, il Dose Factor deve essere aumentato di conseguenza.

Può essere modificato in qualunque momento durante la fase di build secondo le necessità.

Un altro fattore da considerare nei parametri del materiale è la concentrazione di gas inerte come Azoto o Argon tipicamente utilizzati nella camera per controllare la concentrazione di ossigeno che risulta di fondamentale importanza per il successo del processo di costruzione e per l'ottenimento di proprietà meccaniche migliori e per motivi di sicurezza.

Le polveri metalliche possono ossidarsi in contatto con l'ossigeno atmosferico e, in alcuni casi, essere facilmente infiammabili come nel caso del titanio.

Per questo la concentrazione di ossigeno nella fase di build deve essere mantenuta al di sotto dell'1% 2%.

Per valori superiori o inferiori si attiva il sistema di iniezione del gas inerte o il sistema di ventilazione e il processo di costruzione della parte si interrompe fino a quando non viene ripristinata la concentrazione corretta.

Nel caso di materiali particolarmente reattivi (come Titanio, Alluminio), nel processo Powder Bed, il controllo della concentrazione di ossigeno è particolarmente importante per motivi di sicurezza e l'iniezione di gas inerte rimane attiva anche dopo la fine del processo di costruzione della parte.

In fine vengono impostati i Parametri della Parte assegnati a ciascun componente da costruire.

Possono essere impostati anche valori diversi dei parametri su più parti diverse realizzate nella stessa fase di build.

Questi parametri vengono impostati nella fase di Slicing nel passo precedente della catena dei processi e devono coincidere con quelli effettivi impostati nella macchina, durante l'effettiva fase di costruzione.

La maggior parte delle macchine è dotata di strumenti che forniscono un feedback durante la stampa come raggio diagnostico che monitora la temperatura controllando l'intensità della radiazione proveniente dal bagno di fusione e le sue dimensioni.

Con questi dati è possibile avere una indicazione qualitativa della parte che si sta realizzando. Un altro tipo di feedback tool presente sulla maggior parte dei sistemi riguarda il re-coating e si basa su un sensore ottico e utilizza informazioni sulla riflettività dello strato per capire se è avvenuto un rivestimento completo.

In alcuni casi questo valore viene utilizzato per mettere in pausa il processo e prevenire in tempo il fallimento della fase di build, lo scarto della parte e danni al sistema del re-coater.

## **5. Rimozione della parte**

Il tempo di costruzione della parte dipende da diversi fattori ma il più importante è sicuramente l'altezza della parte da stampare influenzando il tempo di stampa che può variare da un minimo di qualche ora ad un massimo di qualche giorno.

Per il processo Powder Bed o SLS, una volta terminata la fase di build la camera di costruzione deve essere svuotata della polvere in eccesso mediante un sistema di aspirazione, filtrata e setacciata per la rimozione delle scorie e agglomerati parzialmente fusi.

Una volta filtrata, la polvere viene stoccata nuovamente per poter essere riutilizzata in stampate successive.

Il piatto stampa con la parte saldata viene mantenuto ad una temperatura di 200°C durante tutta la fase di costruzione e nella successiva rimozione e, se necessario; deve poi essere movimentato verso un forno per il trattamento termico di distensione delle tensioni e conseguente diminuzione delle deformazioni residue.

La parte finita, nel processo powder bed, è saldata alla piastra è saldata al piatto stampa mediante le strutture di supporto.

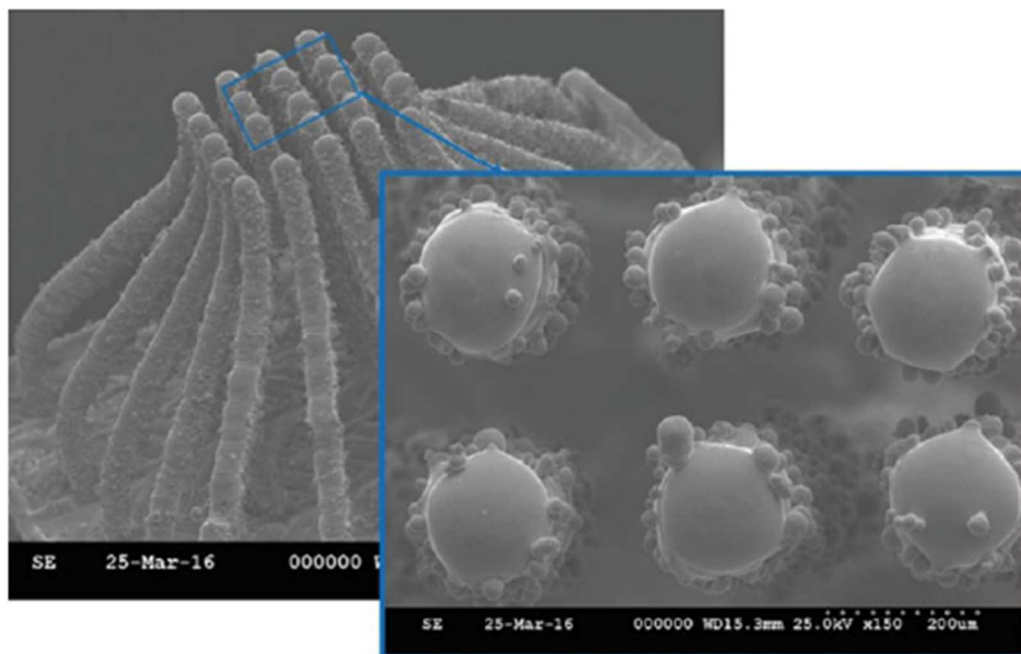
Le macchine devono essere dotate di più piatti stampa in quanto per ogni tipologia di polvere che sia acciaio, alluminio, titanio, si deve utilizzare una piastra di materiale analogo per favorire la saldatura del primo strato di polvere depositato.

La parte finita, a questo punto, si trova saldata al piatto mediante i supporti e dovrà essere successivamente rimossa mediante elettroerosione a filo EDM che permette grande precisione e flessibilità.

## 6. Post processing

A seconda della tecnologia AM utilizzata, le operazioni di post processing sulla parte possono variare in un'ampia gamma.

Il componente può richiedere una serie di operazioni per modificarne la geometria, per avere migliori proprietà del materiale mediante trattamento termico, per ottenere finitura superficiale migliore, per cambiarne le dimensioni e rispettare tolleranze geometriche e dimensionali imposte nel progetto.



*Figura 1.7. Esempio finitura metallica per processi AM*

Nella figura è possibile osservare caratteristiche uniche di finitura superficiale ottenibile con la tecnologia powder bed fusion dove le particelle di polvere metallica parzialmente fuse, sono legate alla superficie della parte costruita.

Questo fenomeno, insieme alle linee di saldatura in diverse direzioni man mano che si procede con la costruzione strato per strato della parte, generano una finitura superficiale differente da ogni altro tipo di processo produttivo.

La rimozione dei supporti può avvenire manualmente mediante l'utilizzo di semplici utensili da taglio o semplici pinze, oppure in modo più preciso utilizzando macchine CNC che permettono di avere migliori finiture superficiali e rispettare le tolleranze dimensionali.

Come detto precedentemente i sistemi Powder Bed possono generare elevate tensioni termiche durante la fase di Build e il supporto funge da ancoraggio meccanico per mantenere la parte nella posizione desiderata ed evitare che subisca distorsioni elevate che ne comprometterebbero il corretto funzionamento e il rispetto dei requisiti di progetto.

Se i supporti vengono rimossi, separando il pezzo dalla piastra dopo la fase di costruzione, molto probabilmente si verificheranno delle distorsioni.

Per questo motivo, nella maggior parte dei casi, deve essere effettuato un trattamento di Ricottura termica per la distensione delle tensioni termiche residue.

Un'altra operazione di post processing utile a migliorare la qualità della parte è l' HIP (hot isostatic pressing) in cui il componente è sottoposto ad una temperatura che va poco oltre il 50% di quella di fusione pressioni elevate nell'ordine dei 100 Mpa all' interno di uno speciale recipiente in pressione. L'applicazione della pressione in queste condizioni è equivalente all'applicazione a freddo di una pressione di 300 Mpa e permette alla parte realizzata di raggiungere una densità finale di circa il 95% della densità effettiva del materiale riducendo di molto le porosità e i vuoti che si generano con il processo Powder Bed

### **1.3 Materiali Utilizzati**

La tecnologie AM analizzate possono disporre di una notevole varietà di polveri metalliche e, soprattutto negli ultimi anni, con la maggiore diffusione della tecnologia in ambito industriale, le tipologie di materiale disponibili sul mercato, sono aumentate notevolmente e ,molto probabilmente, diminuiranno di costo, con l'avvento di nuovi produttori.

Al momento i maggiori produttori di polveri metalliche per le tecnologie additive ed in particolare per PBF, EBM , DED sono EOS, Renishaw i quali producono anche le macchine e UDDEHOLM.

I principali materiali presenti in catalogo adatti alla prototipazione rapida per la costruzione e di parti funzionali e per il Rapid tooling sono:

1. Leghe di alluminio:
  - Aluminium AlSi10Mg
2. Leghe di Titanio
  - Titanium Ti64 Ti6Al4V
3. Leghe di Cobalto-Cromo:
  - CobaltCrome SP1
  - CobaltCrome SP2
4. Superleghe a base di Nichel:

- NickelAlloy NX
  - NickelAlloy IN625
  - NickelAlloy IN718
5. Acciai per utensili:
    - MaragingSteel MS1
  6. Acciai Inossidabili:
    - StainlessSteel 316L
    - StainlessSteel CX
  7. Titanio puro:
    - Titanium TiCP Grade 2
  8. Leghe a base di Rame
  9. Platino
  10. Palladio
  11. Argento
  12. Oro

La lega AlSi10Mg è largamente utilizzata per le sue proprietà di fusione e nello specifico per realizzare componenti con pareti sottili e geometria complessa.

Hanno una buona resistenza a trazione, elevata durezza e buone proprietà dinamiche che le rendono adatte per resistere ad alti carichi.

Le parti realizzate con questa lega sono caratterizzate dalla combinazione di buone proprietà termiche e peso contenuto.

Trova impiego in diversi settori come l'industria aerospaziale, il motorsport, produzione in piccola serie di componenti per veicoli e nella realizzazione di prototipi funzionali.

La lega NickelAlloy NX è una lega di alluminio a base Ni-Cr-Mo caratterizzata da una elevata resistenza a trazione e resistenza all'ossidazione ad elevata temperatura.

Viene spesso impiegata fino a 1200°C per realizzare parti di turbine a gas e in ambito aerospaziale con tecnologia PBF e successivamente trattata termicamente, e seguite da operazioni di finitura a macchina, elettroerosione, lucidatura o applicazione di un rivestimento interno.

I principali campi di applicazione spaziano dall'industria aerospaziale alla realizzazione di prototipi funzionali.

Per le sue proprietà termiche è adatta per la realizzazione di componenti soggetti ad ossidazione e temperature elevate come parti di camere di combustione, componenti di bruciatori e supporti per forni industriali.



Oltre che per la costruzione di nuovi componenti questa lega può essere utilizzata anche per operazioni di riparazione con processo DED.

La lega NickelAlloy IN625 corrispondente alla denominazione normata DIN NiCr22Mo9Nb è caratterizzata da eccellenti proprietà meccaniche tra cui elevata tensione di snervamento e carico di rottura, resistenza a creep e buona resistenza alla corrosione nella maggior parte degli ambienti corrosivi.

Le proprietà meccaniche ottenute mediante la realizzazione in AM sono paragonabili a quelle di un componente ricavato dal pieno per asportazione di truciolo e, risultano molto superiori a quelle derivanti da un processo fusorio.

La buona resistenza ad elevate temperature, unita alle caratteristiche di resistenza meccanica, favorisce l'impiego nel settore aerospaziale, realizzazione di pale di turbine in ambito industriale, prototipazione rapida e realizzazione di prototipi funzionali.

La lega di alluminio NickelAlloy IN718 ha caratteristiche di resistenza a fatica, a creep ed elevato carico di snervamento e rottura ad elevata temperatura, superiori all'IN625 maggiormente utilizzata per applicazioni sopra i 700°C.

Un'altra applicazione nella quale può essere vantaggiosa l'applicazione del processo di additive manufacturing è il Rapid tooling ovvero nella produzione di utensili impiegati per la successiva produzione in serie di un prodotto.

I maggiori produttori di polveri dispongono in catalogo degli acciai per utensili maggiormente impiegati.

A questa categoria appartengono gli acciai inossidabili per utensili, impiegati per la realizzazione di stampi nei processi di stampaggio ad iniezione per la produzione di parti in materiale polimerico corrosive

Hanno una buona resistenza alla corrosione combinata con un'elevata tensione di snervamento e una buona durezza raggiungendo, in seguito a trattamenti termici, un valore di 50 HRC.

Gli utensili realizzati con questo materiale possono essere finiti a macchina aggiungendo il sovrametallo, oppure lucidati con grande facilità.

Sono disponibili anche le leghe di titanio (Ti64 e Ti6Al4V) che, mediante un processo laser sintering, permette la realizzazione di componenti con un basso numero di difetti e porosità interne da cui derivano eccellenti caratteristiche meccaniche.

Sono impiegate nel settore aerospaziale, in ambito automobilistico e in campo medico per realizzare prototipi funzionali o produzioni in piccola serie.

## 1.4 Rapid tooling

I processi realizzazione di parti in AM spesso non possono, con le attuali tecnologie, essere considerati per una produzione di grandi volumi sebbene presenti dei grandi vantaggi nella produzione di utensili utili alla produzione in serie.

Da questo punto di vista l'utilizzo di questi nuovi processi risulta vantaggioso se possono essere impiegati nuovi materiali, migliori proprietà meccaniche, forme realizzative che comportano dei miglioramenti nel funzionamento, non ottenibili con i metodi di realizzazione tradizionali oppure, più in generale, dove può semplificare la catena del processo produttivo.

In generale, il termine "tooling", si riferisce alla creazione di strumenti di produzione e spesso comprende un intero stampo, degli inserti per l'ottenimento della parte finale.

Negli ultimi anni si è cercato di produrre parti in AM sempre di migliore qualità e tali da poter essere utilizzate direttamente una volta rimosse dal piatto di stampa della macchina.

Viene definito anche come "Direct Digital Manufacturing" e, per numerose ragioni può essere una alternativa valida oppure preferibile rispetto al metodo di produzione tradizionale.

Tuttavia devono essere considerati diversi fattori che favoriscono le lavorazioni tradizionali a discapito del processo DDM:

- Maggiore è il numero di parti da realizzare, maggiore sarà la convenienza ad utilizzare un processo di produzione tradizionale essendo noto quante parti possono essere realizzate utilizzando tale strumento
- I requisiti della parte finale devono essere molto specifici e non è attualmente disponibile come materiale AM ma realizzabile per asportazione di truciolo calcolando il percorso utensile
- È possibile che lo sviluppatore di prodotto voglia capire nel dettaglio il processo di additive manufacturing e crea un utensile prototipo
- Al momento può essere la strada più veloce per creare un nuovo prototipo secondo le specifiche richieste ed è particolarmente vantaggioso in caso di brevi tempi di consegna

Gli utensili, indicati con il termine tooling, possono essere divisi in due tipologie principali:

- Short Run Tooling
- Long Run Tooling

Gli Short Run Tooling possono essere definiti utensili a breve termine e definiti anche come Prototype Tooling, con l'obiettivo finale di realizzare l'utensile con tecniche che semplifichino il processo produttivo precedente.

Spesso la fase di build della parte è seguita da operazioni di finitura dato che solo alcune delle superfici dell'oggetto sono direttamente utilizzabili.

Dopo ogni utilizzo, l'utensile deve essere controllato per accertarsi che non abbia subito danni e soddisfi le aspettative.

In seguito a queste verifiche potrebbe essere necessario effettuare delle riparazioni con apporto di materiale e successive operazioni meccaniche prima che possa tornare in servizio.

Ne consegue che, la realizzazione di utensili con processi AM è percorribile se necessariamente deve essere individuata la soluzione al problema in un intervallo di tempo breve ( dell'ordine di qualche giorno) per poter consegnare la parte al cliente in un tempo ridotto.

Alla prima tipologia si contrappone il Long Run Tooling che vengono principalmente impiegati nei processi di produzione di massa.

Esempi possono essere degli inserti da inserire in uno stampo o l'intero stampo se di ridotte dimensioni, per processi di stampaggio ad iniezione e possono durare anche per milioni di cicli a seconda dell'applicazione.

Solitamente l'usura di questi utensili è molto bassa ed è dovuta principalmente ai valori di durezza (circa 50 HRC) utilizzando polveri di acciaio per utensili, in generale maggiore di quella di parti ricavate del pieno che devono essere necessariamente trattate termicamente.

Anche in questo caso, la realizzazione di un utensile con questo nuovo metodo di costruzione, deve essere scelta se comporta una riduzione e semplificazione del processo produttivo con conseguente riduzione dei costi di fabbricazione, oppure se devono essere rispettati lead time relativamente bassi. In questo caso allora potrebbe essere utile confrontare il processo produttivo tradizionale ( sottrattivo) con il nuovo processo AM sia in termini di costo che di tempo ciclo.

I benefici dell' introduzione del Rapid Tooling nel processo produttivo dei componenti dei componenti di un nuovo prodotto possono essere molto difficili da valutare ma, a volte, possono essere enormi.

L'intento principale sarebbe quello di ottenere un componente direttamente dalla stampa senza l'utilizzo di attrezzature dedicate ma, come già visto, sono previste quasi sempre delle fasi di post processing.

Proprio l'incertezza nel risultato finale rende difficoltosa la pianificazione di processo per il singolo componente affinché rispetti le specifiche di progetto.

Ad esempio, nel lancio sul mercato di un nuovo prodotto in ottica di Additive Manufacturing, alcuni dei suoi componenti dovranno essere modificati e altri riprogettati totalmente.

Molte di queste parti possono essere semplici da modificare mentre per altre si possono avere delle difficoltà con conseguente aumento del lead time.

La fabbricazione di un componente molto semplice potrebbe ritardare di molto lo sviluppo e l'immissione sul mercato di un prodotto.

Allora l'utilizzo degli utensili Short e Long Run può essere determinante ed estremamente benefica perché riduce i tempi di reazione alle complicazioni in modo più efficiente e semplifica il processo produttivo.

Gli utensili Short Run possono essere utilizzati anche per colmare il divario o l'intervallo di tempo tra l'inizio della realizzazione della parte e il completamento dell'utensile vero e proprio realizzato con metodi convenzionali.

La maggior parte delle soluzioni sono incentrate sulla creazione di utensili impiegati nei processi di stampaggio ad iniezione dato che un grandissimo numero e varietà di parti vengono realizzati con questa tecnica.

Allo stesso modo la strategia di realizzazione di utensili basati su processi di costruzione AM può essere estesa anche ad altri tipi di processi produttivi come la costruzione di stampi per la pressofusione dell'alluminio oppure nei processi fusori.

A questo scopo sono disponibili una ampia varietà di materiali che comprende diversi tipi di metalli, materiali ceramici, polimerici e materiali compositi.

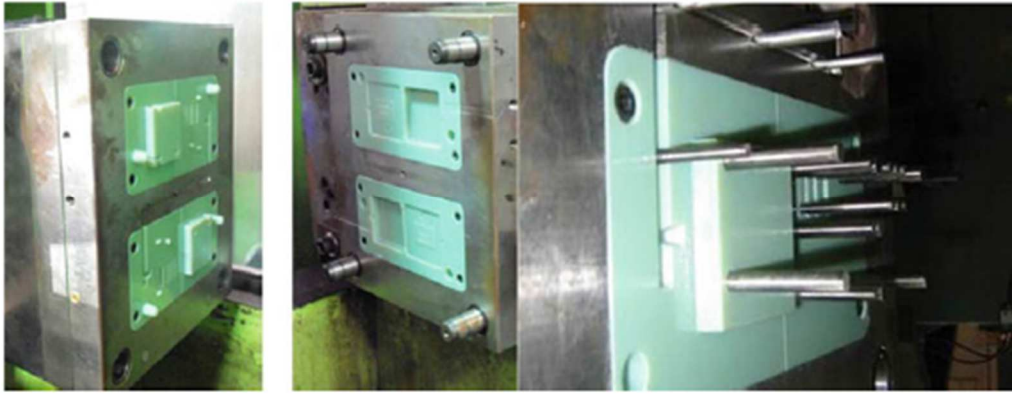
Nello stampaggio ad iniezione una quantità di polimero fuso viene iniettata all'interno di una cavità a seguito della chiusura della matrice e punzone che compongono lo stampo.

Il materiale polimerico iniettato deve rimanere liquido fino al completo riempimento della forma altrimenti possono verificarsi problemi in corrispondenza di pareti sottili oppure di spigoli dovuti a forma complessa.

Per risolvere questi problemi occorre posizionare correttamente tutti i canali di iniezione, gestire in modo corretto la temperatura della superficie in vari punti dello stampo intervenendo sui canali di raffreddamento e posizionare in modo corretto gli estrattori per separare il pezzo dallo stampo.

Gli utensili realizzati con processi di AM non sono vincolati a seguire forme e geometrie prestabilite dovuti ai limiti delle attrezzature e dei processi convenzionali per sottrazione di materiale e risulta possibile agire direttamente sulla forma dei canali di raffreddamento che non devono seguire necessariamente percorsi rettilinei ma, possono avere una forma a spirale mantenendo sempre la corretta distanza dalla superficie a contatto con il materiale fuso.

Lo stesso ragionamento può essere fatto per i canali di iniezioni che possono essere posizionati nei punti dello stampo tali da garantire un completo riempimento.



*Figura 1.8. Utensili Short Run Tooling per materiali polimerici*

In questo caso gli inserti realizzati in AM possono essere prodotti in materiale metallico o in materiale polimerico.

Gli inserti in materiale polimerico sono meno durevoli ma sono veloci e semplici da realizzare utili principalmente per delle valutazioni iniziali.

Buone prestazioni sono state raggiunte utilizzando inserti realizzati in resina ABS mediante processi di Selective laser melting e polymer laser sintered parts e impiegate su macchine per lo stampaggio ad iniezione in grado di utilizzare diversi materiali, raggiungendo diverse centinaia di cicli ad una temperatura di 300°C prima di osservare rotture.

Il ciclo di iniezione deve essere allungato in modo che la parte solidifichi all'interno dello stampo prima della separazione e dell'espulsione perché si opera vicino alla temperatura di deflessione per il materiale AM.

Questo tipo di inserto funziona solo in caso di geometrie molto semplici delle cave e abbastanza ampie e, nel caso siano applicabili, i costi sono dimezzati e vengono ridotti anche i tempi di consegna rispetto allo stesso inserto realizzato in alluminio.

I processi più accurati prevedono basse temperature di fusione, bassa usura e alta temperatura del materiale AM.

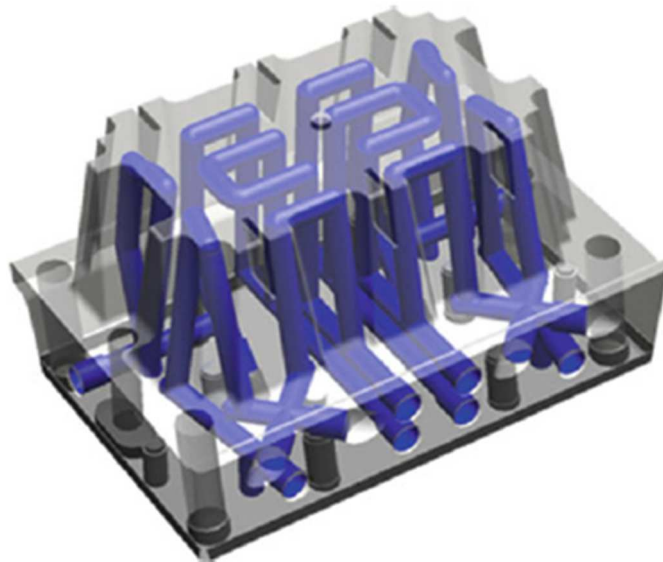
In seguito a numerosi tentativi sono stati anche sviluppati materiali appositi per la realizzazione di inserti nello stampaggio ad iniezione come il copper-polyammide composto da particelle di rame in una matrice polimerica sviluppato principalmente per il processo Powder Bed Fusion.

Le particelle in materiale metallico permettono una migliore trasmissione del calore dalla superficie a contatto con il materiale fuso verso l'interno dello stampo e, allo stesso tempo permettono di migliorare la resistenza meccanica e la durata dell'inserto stesso.

Oltre ai materiali polimerici e le polveri di alluminio si stanno sviluppando e diffondendo anche gli acciai per utensili (H11 e H13) per la costruzione di inserti dedicati anche agli altri processi produttivi ed impiegati nella pressofusione dell'alluminio.

Solitamente queste polveri sono dedicate ai processi AM Powder Bed Fusion electron beam melting e direct energy deposition trattati precedentemente.

La geometria finale ottenuta spesso non rispecchia le tolleranze geometriche e dimensionali su alcune superfici sulle quali si ha una rugosità Ra di 12-20  $\mu\text{m}$  e, nella maggior parte delle applicazioni, specialmente nella produzione di utensili non è accettabile.



*Figura 1.9. Esempio di inserto Long Run Tooling per materiale polimerico*

Se la superficie richiede una adeguata finitura superficiale, o un accoppiamento preciso dell'inserto nello stampo, deve essere previsto dal progettista un adeguato sovrametallo in modo che la geometria finale si trovi in ogni punto, compresa all'interno del volume effettivamente stampato.

Una mancanza di materiale potrebbe portare ad una impossibilità di lavorare la superficie e il progettista deve aggiungere uno spessore di sovrametallo già nella fase di disegno del modello CAD.

Il beneficio nell'utilizzo di un processo di AM permette grande versatilità nel disegno dei canali di raffreddamento per favorire un corretto raffreddamento del materiale fuso in seguito all'iniezione.

La disposizione del sistema di canali è direttamente dipendente dalla geometria della parte da realizzare aumentando il raffreddamento e la quantità di canali in corrispondenza di regioni a maggiore spessore e rallentandolo in corrispondenza piccoli spessori.

Un raffreddamento omogeneo di tutta la parte può ridurre le tensioni e le conseguenti deformazioni termiche migliorando la qualità del componente finale.

Questo approccio può essere applicato sia per short run che per long run tooling.

## 1.4.1 Costruzione di stampi mediante tecniche AM

La costruzione di stampi oppure di inserti per forme più complesse mediante processi AM riguarda principalmente il settore dello stampaggio ad iniezione e comporta dei grandi vantaggi in termini di durata dello stampo e di qualità del prodotto finito.

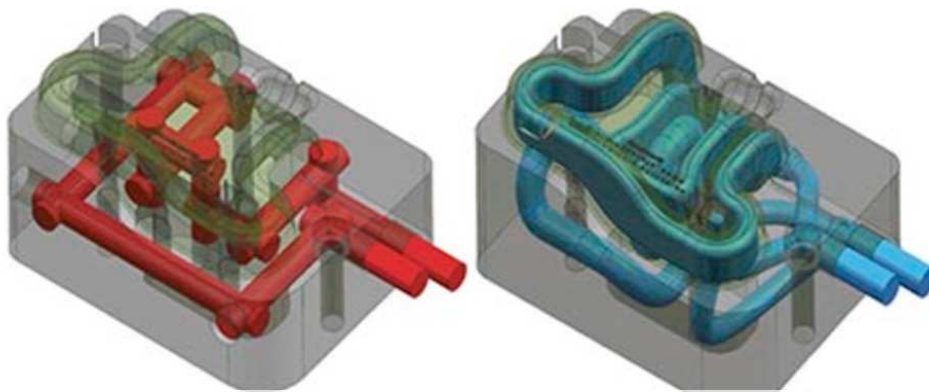
Il processo di costruzione tradizionale prevede l'adozione di lavorazioni convenzionali di fresatura o tornitura per la realizzazione della superficie esterna e per garantirne l'accoppiamento con altre parti e lavorazioni molto costose come EDM elettroerosione a filo per la realizzazione di strette cavità sulla superficie non realizzabili con un utensile da taglio.

Nel caso di "Conventional cooling", il sistema di raffreddamento viene realizzato mediante operazioni di foratura che consentono di realizzare passaggi per il fluido esclusivamente rettilinei e solo nelle zone più accessibili.

Non possono essere realizzate curve ma solo intersezioni che comportano aumento delle perdite di carico e delle vie chiuse nel quale possono depositarsi impurità e compromettendone il corretto funzionamento.

Il vantaggio maggiore nell'utilizzo di tecniche di AM risiede nella capacità di poter modellare qualsiasi tipo di geometria senza sottostare ai vincoli imposti dall'utilizzo di utensili tradizionali.

A questo scopo viene introdotto il "Conformal cooling"



*Figura 1.10. Inserto per stampaggio plastico realizzato mediante tecniche tradizionali e mediante processi AM con Conformal cooling*

Si definisce "Conformal cooling" una particolare forma dei canali di raffreddamento che segue la superficie dei rilievi o delle cavità dello stampo per ottenere un controllo della temperatura ottimale durante la fase di raffreddamento.

Ci sono diversi fattori che determinano un tempo ciclo lungo ma, il **controllo termico dello stampo** è l'aspetto più influente.

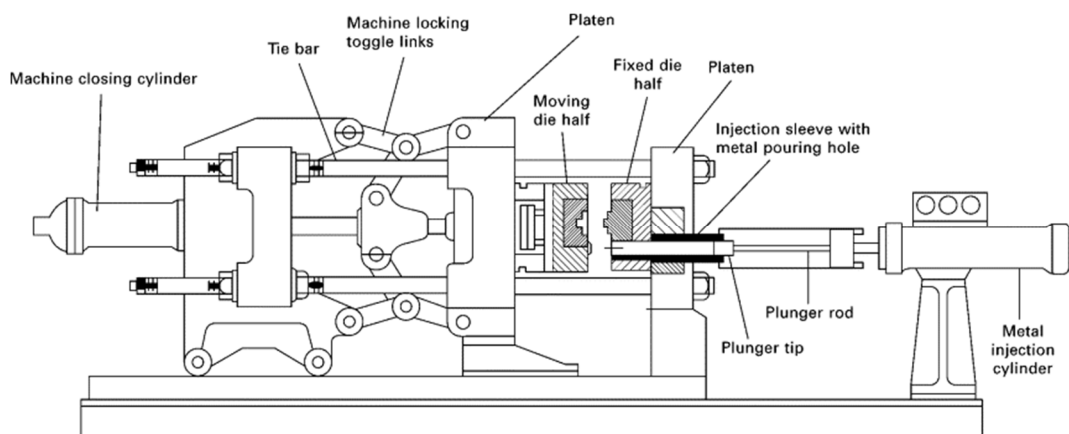
Se la superficie dello stampo non viene raffreddata uniformemente e alcune zone si raffreddano maggiormente, vengono indotte nella parte delle tensioni residue che danno luogo a deformazioni determinando una bassa qualità del prodotto finale.

L'utilizzo di un processo di costruzione AM unito alla nuova geometria dei canali di raffreddamento comporta i seguenti benefici:

- Riduzione del tempo ciclo con conseguente aumento della produttività oraria;
- Aumento della qualità del prodotto finale;
- Aumento della durata dello stampo.

## 1.5 Il processo di pressofusione

Il caso studio presentato in questa tesi si focalizza su bruciatori a gas realizzati in pressofusione di alluminio. Pertanto, questa sezione introduce caratteristiche e funzionamento di questo processo produttivo.



*Figura 1.11. Macchina per la pressofusione dell'alluminio*

Il processo di pressofusione HPDC è quello maggiormente utilizzato nella realizzazione di manufatti non ferrosi e trova grande applicazione principalmente nel campo dell'industria automobilistica.

In sostanza è caratterizzato dall'iniezione di metallo fuso all'interno di una cavità che si genera dalla chiusura di due semi stampi chiamati matrice e punzone ed è caratterizzato da elevate velocità di riempimento e di solidificazione permettendo di produrre forme molto complesse e dettagliate non raggiungibili con i processi fusori per gravità o a bassa pressione.

Sono impiegate principalmente le leghe non ferrose, principalmente alluminio, zinco, magnesio ed è il processo più adatto quando devono essere prodotti componenti a spessore sottile accoppiato ad un tempo ciclo di realizzazione molto breve che può andare da pochi secondi a diversi minuti a seconda del volume e dello spessore delle pareti.

Una sola macchina può quindi compiere più di 60 cicli di stampaggio in un'ora.



La matrice e il punzone che costituiscono lo stampo, hanno una durata variabile influenzata da fenomeni come la fatica termica, l'erosione del metallo che in pochi secondi riempie la cavità presentando durate comprese tra i 50000 e i 200.000 cicli.

Se nel materiale di partenza si generano delle cricche allora la rottura può avvenire prima della durata minima stabilita dal costruttore.

Durante il loro esercizio, lo stampo può subire erosione superficiale dovuta all'erosione del materiale in ingresso oppure generazione di cricche per il fenomeno della fatica termica.

Queste rotture possono essere riparate con nuovo materiale d'apporto e successive lavorazioni di fresatura o elettroerosione mentre cricche che interessano i canali di raffreddamento non possono essere riparate.

Durante la fase di iniezione, l'alluminio fuso ad una temperatura compresa tra i 550°C e 710°C viene iniettato nella cavità ad una velocità di circa 30 m/s ad una pressione che va da 40 a 80 bar.

Le principali caratteristiche che deve avere un materiale adatto alla pressofusione sono:

- Resistenza agli shock termici
- Resistenza al softening per elevate temperature

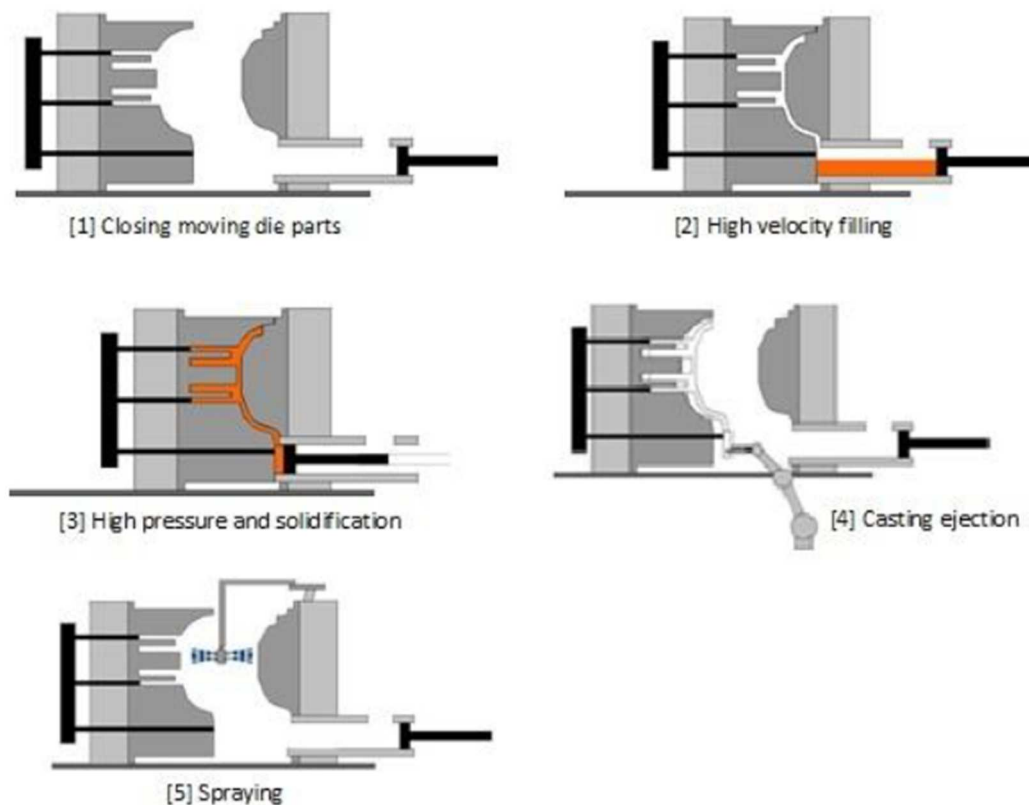
I materiali più comunemente usati sono gli acciai H11 ( aisi 1.2343) e H13 ( aisi 1.2344) hot work tool steel.

La longevità della matrice è direttamente collegata:

- Alla temperatura di colata del metallo fuso
- Al gradiente termico
- Alla frequenza di esposizione della superficie ad alte temperature

Il processo HPDC è utilizzato per il 70% per la fabbricazione di componenti in alluminio nell'industria dell'automotive permettendo grandi volumi di produzione.

Vengono realizzati componenti di grandi dimensioni come scatole del cambio e blocco motore che hanno massa di circa 15 kg.



*Figura 1.12. Fasi ciclo di stampaggio*

Il ciclo di stampaggio è composto da sei fasi:

- Chiusura della Matrice e del Punzone
- Riempimento del cilindro contenente il materiale fuso
- Iniezione
- Solidificazione ad alta pressione
- Estrazione del pezzo
- Lubrificazione dello stampo

La solidificazione avviene ad alta pressione per:

- Ridurre la porosità dovuta ai gas sviluppati
- Ridurre la porosità dovuta al ritiro
- Aumentare l'accuratezza dimensionale del pezzo

Dopo la solidificazione lo stampo si apre e il pezzo viene separato dal punzone mediante gli estrattori idraulici.

La superficie dello stampo viene rapidamente portata alla temperatura di fusione dell'alluminio con l'ingresso del metallo fuso e poi decresce durante la fase di solidificazione e la successiva estrazione del pezzo.

Successivamente viene spruzzato sulle superfici della matrice e del punzone una misura di acqua e olio che ha la duplice funzione di raffreddare e lubrificare in modo che nel ciclo di stampaggio successivo l'alluminio non rimanga attaccato alla superficie dello stampo.

Nel processo HPDC non viene usato uno strato isolante riportato sulla superficie dello stampo e l'alluminio fuso dato che il processo è caratterizzato da un'alta velocità di solidificazione e un tempo di contatto ridotto, in contrapposizione ai processi fusori per gravità.

Inoltre, il flusso termico ( $W/mm^2$ ) dalla superficie verso l'intero stampo e la temperatura di picco sono molto più elevate rispetto ai processi fusori per gravità.

### 1.5.1 Cenni sul danneggiamento dello stampo

Gli stampi per la pressofusione dell'alluminio subiscono delle sollecitazioni simultanee che sono principalmente di due tipi:

- Generate durante la manifattura
- Generate durante l'attività di esercizio

Portando a delle rotture e facendo aumentare i costi in termini manutenzione e dei tempi di produzione.

La maggior parte del costo del processo è dato dalla costruzione dello stampo e dalle successive operazioni di manutenzione ed è possibile ridurli semplificandone il processo produttivo e prevenire i costi di manutenzione in fase di progettazione.

Durante l'esecuzione dei cicli del processo di pressofusione si verificano differenti tipologie di guasto.

La tipologia di danno più rilevante è dovuta alla variazione della temperatura sulle superfici causate dalla **fatica termica** del materiale dello stampo che si verifica in una apertura e propagazione delle cricche a causa delle dilatazioni e dei ritiri che subisce la superficie dello stampo, causando dei segni indesiderati (fins) sulla superficie della parte realizzata.

Ci sono due tipologie di cricche generate dagli stress termici:

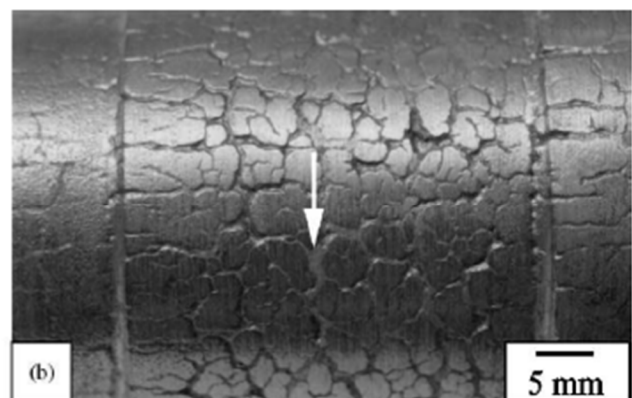
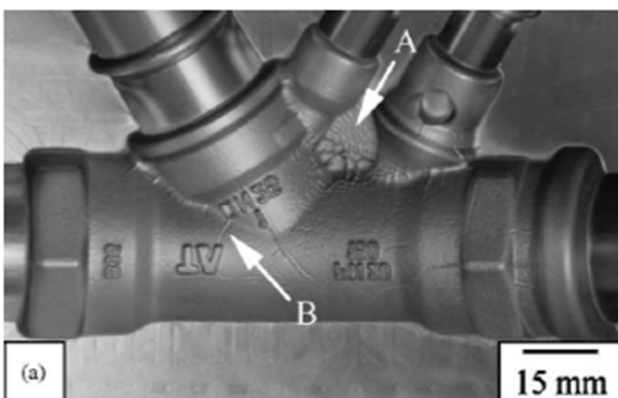
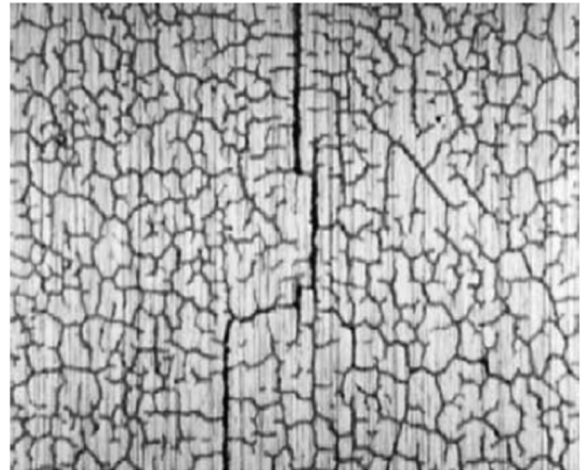
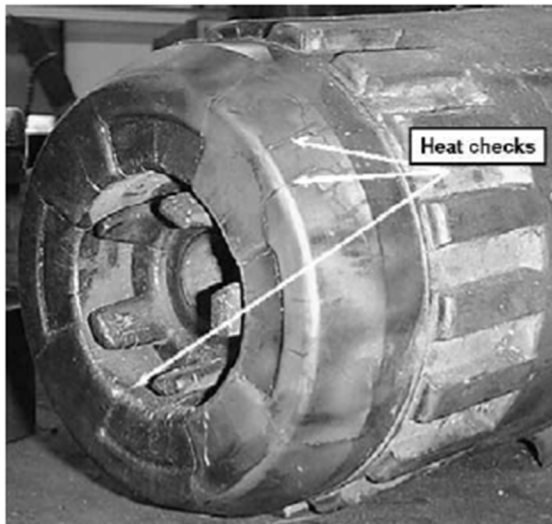
- Heat checks
- Corner cracks

**Heat checks** si osservano sulle superfici piatte dove non sono presenti delle concentrazioni di tensione.

Si raggiunge un elevato gradiente termico e, alla fase di riscaldamento, corrisponde uno stato di compressione mentre durante la fase di raffreddamento ad opera del refrigerante, si passa ad uno stato di trazione.

La direzione di espansione della cricca dipende dalla componente di tensione dominante ma è possibile che in un punto dello stampo possano esistere più direzioni e tensione massima e la cricca può propagarsi in entrambe le direzioni.

Questo fenomeno deteriora la superficie dello stampo mediante la propagazione delle cricche causandone la rottura.

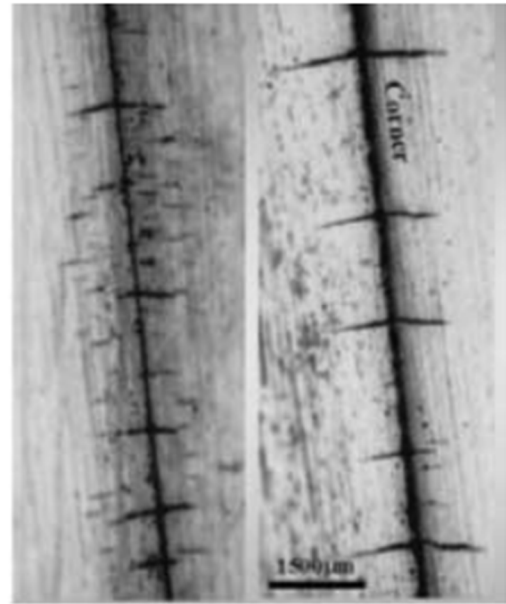
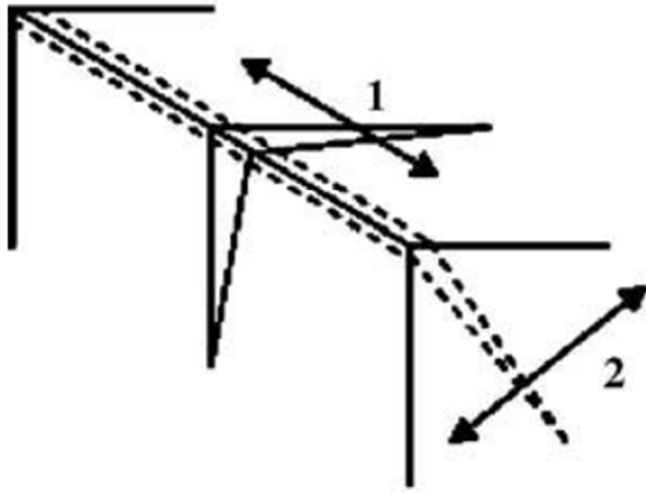


*Figura 1.13. Heat checks sulla superficie*

**Corner cracks** è la tipologia di danno maggiormente osservata e si genera in corrispondenza di angoli con raggio di raccordo stretto, in presenza di spigoli vivi, o in corrispondenza di brusche variazioni di sezione.

Durante i cicli di tensione, le cricche si propagano in due differenti direzioni:

- Perpendicolare alla direzione dello spigolo dovuta alla tensione in direzione 1
- Lungo la direzione dello spigolo dovuta alla tensione in direzione 2



*Figura 1.14. Corner Cracks*

A queste si sommano altre tipologie di danno come:

- **Corrosione e Saldatura** dovuta all'ossidazione dell'alluminio in contatto con l'acciaio dello stampo
- **Erosione** legata al flusso metallico
- **Danno catastrofico** dovuto agli shock termici
- **Riscaldamento del materiale dello stampo** che causa instabilità delle proprietà meccaniche

## 2 LINEE GUIDA, PRINCIPI BASE NEL DESIGN E SOFTWARE DI PROGETTAZIONE

Affinché la realizzazione di un componente venga svolta nel modo migliore, devono essere adottati particolari accorgimenti e regole generali già in fase di progettazione e di modellazione. Tali linee di guida sono riassunte in questa sezione.

### 2.1 Principali problematiche

#### 2.1.1 Qualità superficiale

Tutti i processi di AM, si sono caratterizzati da una alta rugosità delle superfici laterali inclinate. Tale effetto è chiamato “Staircase Effect” perché sono evidenti i segni dei singoli strati sulle superfici oblique.

Questo effetto è tanto più marcato quanto maggiore è l’inclinazione della superficie rispetto al piatto di stampa e lo spessore del layer di costruzione.

Secondo la terminologia di base, le superfici possono essere suddivise in intermedie (**middle**), rivolte verso l’alto (**upfacing**) e rivolte verso il basso (**downfacing**).

Si può identificare con  $\alpha$  l’angolo compreso tra la piastra di costruzione orizzontale e la linea tangente alla superficie del pezzo.

Le superfici upfacing sono caratterizzate dalla normale al pezzo che si allontana dalla piastra, mentre nel caso delle superfici downfacing la normale è diretta verso la piastra.

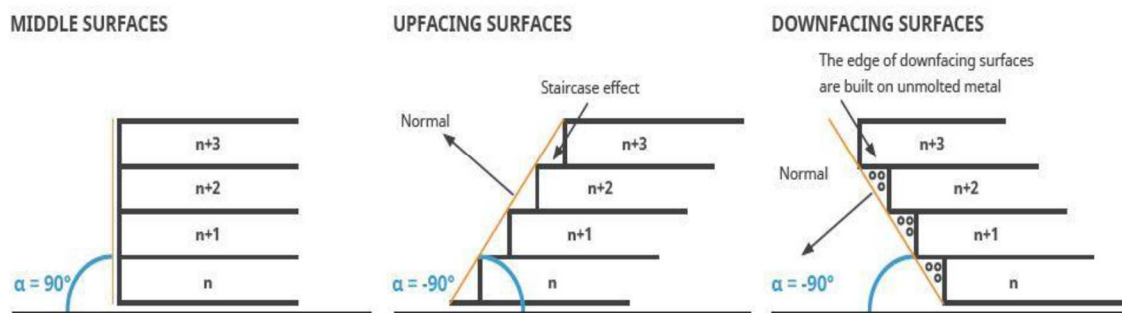


Figura 2.1. Superfici Upfacing e Downfacing



*Figura 2.2 Finitura superficiale delle superfici Upfacing.*



*Figura 2.3 Finitura delle superfici in Downfacing in un range di angoli compresi tra 75° e 90°.*

La qualità della superficie dipende dall'orientazione di quest'ultima.

In tutte le tecnologie di produzione additiva, può essere ridotto costruendo superfici orientate più verticalmente o completamente orizzontali. Nelle superfici upfacing questo effetto è chiaramente visibile ed importante.

## 2.1.2 Stress termici

Le ragioni principali per cui si possono avere stress termici sono:

- elevate temperature di fusione (es: Titanio:1650 °C; Acciaio inossidabile:1200 °C );
- elevate velocità di raffreddamento (<1ms-100 °C);
- accumuli di stress attraverso gli strati, perché i layer successivi ad ogni layer sono riscaldati e raffreddati continuamente. Espansione e ritiro, bloccato dagli strati già solidificati, causano stress residui;
- il comportamento di deformazione specifico di ogni materiale.

Gli stress termici sono proporzionali all'area della superficie fusa ( $\sigma_T \sim A$ ). Per limitare ciò occorre:

- ridurre l'area da fondere su ogni layer;
- assicurarsi che la direzione di maggior estensione del pezzo sia lungo l'asse z;
- avere un elevato numero di piccole sezioni piuttosto che un'unica grande sezione;

- estensione della sezione più omogenea possibile nella direzione z di costruzione.

Gli stress termici sono proporzionali anche alla caduta di temperatura durante la solidificazione ( $\sigma T \sim \Delta T$ ) e all'omogeneità di raffreddamento sulla sezione.

Bisogna accertarsi di avere un buon trasferimento di calore verso la piastra di base e la macchina.

La parte è immersa nella polvere metallica che ha una conducibilità termica circa 10 volte inferiore a quella del metallo solido per la minore densità ed in caso di necessità dovranno essere previsti dei supporti per il trasferimento del calore al piatto di stampa.

Ad un migliore trasferimento di calore dal corpo alla piastra corrisponderà una minore distorsione del pezzo.

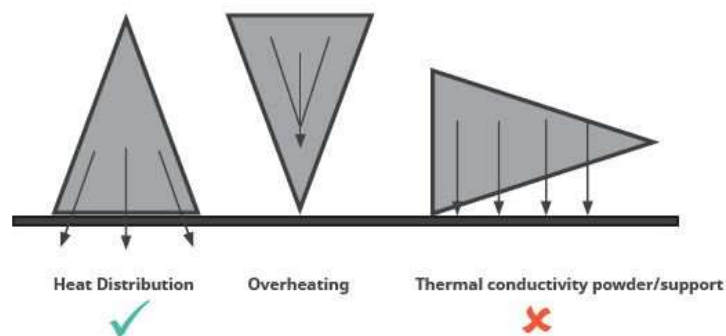


Figura 2.4. Posizionamento e conduzione del calore

Per fronteggiare con efficacia gli stress termici è necessario considerare che:

- gli stress residui si generano in parti che vogliono ritirarsi;
- sono richieste strutture di supporto per evitare la deformazione e mantenere il pezzo in posizione;
- gli stress permangono nel pezzo dopo la costruzione e se i supporti vengono immediatamente rimossi, il pezzo si deformerà comunque verso la posizione voluta;
- vanno effettuati trattamenti termici dopo la rimozione della polvere, e prima della rimozione della piastra e dei supporti.

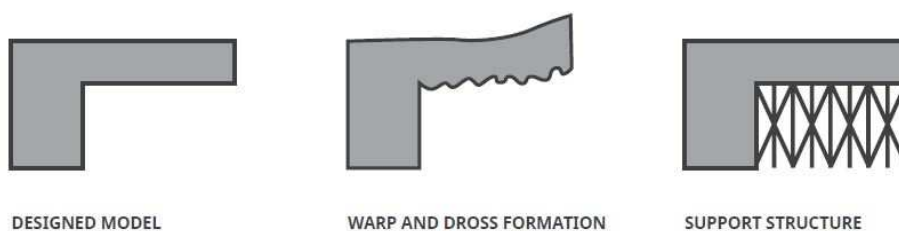


Figura 2.5. Struttura di supporto per conduzione termica



### 2.2.3 Linee di ritiro

Le linee di ritiro si generano quando due entità separate vengono connesse in un layer.

- La superficie di connessione si ritira e trascina le due entità l'una verso l'altra;
- Il layer successivo viene stampato secondo la dimensione originale;
- La linea rimane visibile sul pezzo;
- Questo effetto è tipico di ponti e canali interni.

Scegliere un'orientazione di stampa (aspetto trattato in seguito) differente per un stesso componente può risolvere il problema della formazione di linee di ritiro.

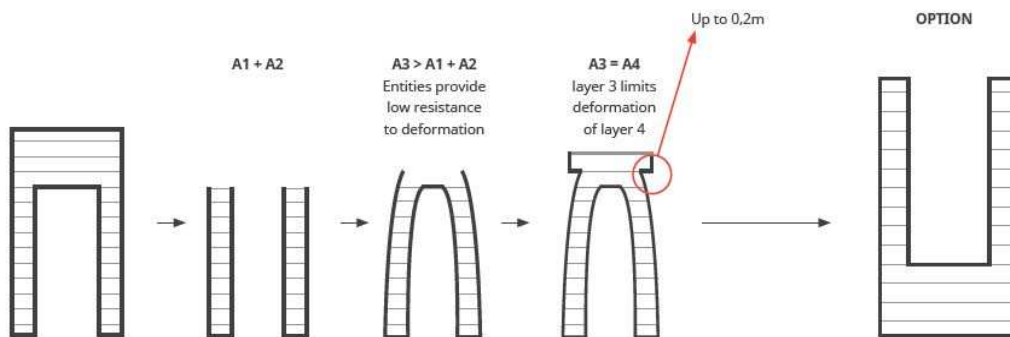


Figura 2.6. Linee di ritiro

## 2.2 Studio dei Supporti

Come già anticipato, i supporti sono necessari per ridurre la formazione di scorie sulle superfici downfacing, prevenire deformazioni mantenendo il pezzo in posizione, ma anche per permettere un miglior trasferimento di calore e minimizzare le linee di ritiro.

Può essere impiegata una gran varietà di strutture di supporto. Di seguito vengono riportati alcuni esempi.



Figura 2.11 - Tipologie di supporti

Tuttavia, i supporti rappresentano anche una criticità per il processo Additive poiché:

- allungano i tempi di produzione;

- allungano i tempi di finitura;
- crescono con il pezzo e devono essere rimossi.

Pertanto il loro utilizzo va ridotto al minimo necessario ed effettuato dopo un'attenta analisi e secondo un certo know-how.

## 2.3 Aspetti di progettazione in AM

Tutte le considerazioni effettuate finora sono strettamente collegate con l'orientazione di stampa del pezzo, che va determinata secondo un giusto compromesso di caratteristiche. Si vanno ora ad indicarne alcune linee guida.

### 2.3.1 Qualità generale di costruzione

L'orientazione del pezzo legata alla qualità generale dipende principalmente dalle superfici downfacing. Esse sono le superfici peggiori, caratterizzate da un'elevata rugosità. Quindi si può affermare che diminuendo la quantità di superfici downfacing generalmente aumenterà la qualità dell'oggetto stampato.

Le superfici downfacing più critiche sono quelle al di sotto dell'angolo di autosupporto  $\alpha$ , il quale dipende dal materiale e dal processo di stampa. Per le leghe di Titanio  $\alpha=40-45^\circ$ , mentre per leghe di Acciaio, CoCr e Alluminio  $\alpha=50-55^\circ$ .

L'esempio riportato in Figura 2.12 mostra questa situazione. La parte di sinistra ha un prolungamento che forma un angolo di  $30^\circ$  con la piastra di costruzione, perciò tale prolungamento va supportato (perché si trova al di sotto dell'angolo di autosupporto). Rotando la parte di  $30^\circ$  il prolungamento formerà ora un angolo di  $60^\circ$  con la piastra, così in questa regione non ci sarà bisogno di supporto e la qualità generale del pezzo aumenterà.

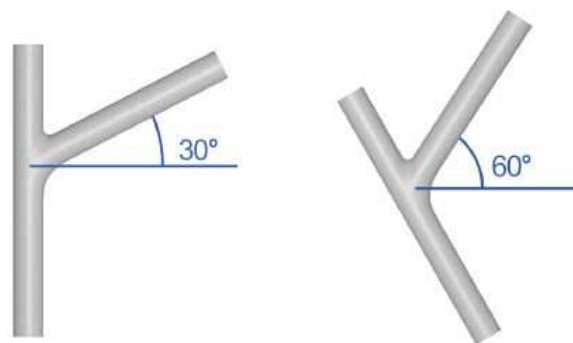
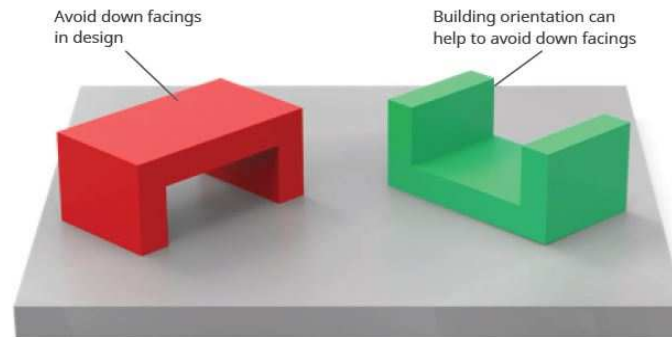


Figura 2.7. Esempio di superficie non autosupportante e autosupportante

In definitiva si può affermare che, qualora possibile, ampie superfici downfacing (soprattutto se al di sotto di  $\alpha$ ) e sporgenze vanno evitate, prediligendo superfici middle e upfacing. Un caso simile a quello già introdotto parlando delle linee di ritiro.



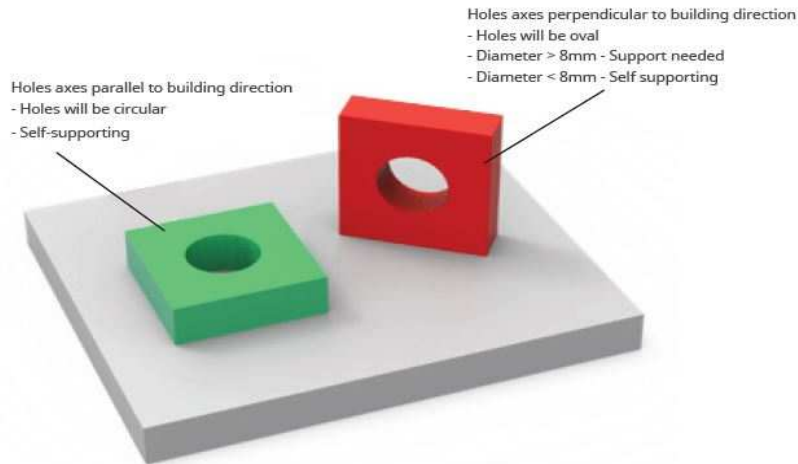
*Figura 2.8 Importanza dell'orientazione di stampa nell'evitare superfici downfacing*

L'orientazione in rosso è da evitare a causa dell'ampia sporgenza, mentre l'orientazione in verde non presenta problemi poiché è costruita immediatamente sulla piastra e non presenta superfici downfacing.

### **2.3.2 Feature specifiche**

La qualità di feature di stampa come fori, cavità, filettature ecc. dipende dall'orientazione della parte. La qualità migliore viene ottenuta quando la stampa avviene in direzione z (perpendicolare alla piastra di costruzione), mentre quando queste feature vengono stampate in direzione x/y (parallele alla piastra di costruzione) la loro qualità viene meno a causa di effetti di downfacing.

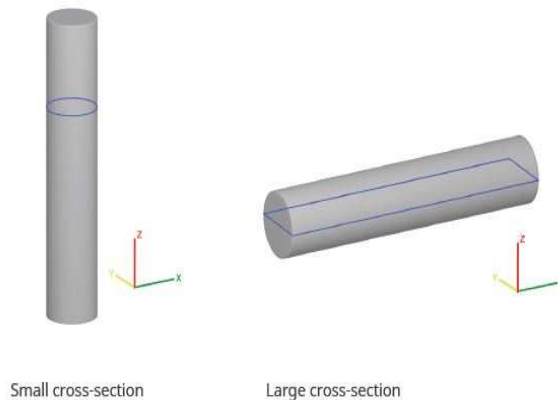
La Figura 2.14 mostra come il pezzo in verde, avendo l'asse del foro parallelo alla direzione di costruzione, avrà una feature circolare e sarà autosupportato, mentre il pezzo in rosso, avendo l'asse del foro perpendicolare alla direzione di costruzione, presenterà problemi di ovalizzazione e potrebbe richiedere dei supporti per la feature.



*Figura 2.9 Orientazione di stampa nella realizzazione di fori*

### 2.3.3 Riduzione degli stress termici

Come già introdotto precedentemente, gli stress termici si generano a causa di un primo riscaldamento locale della polvere fino a fusione seguito da un rapido raffreddamento. Un modo per rendere gli stress più bassi possibili è ridurre al minimo la sezione trasversale (ossia ciò che viene stampato su ogni layer). In Figura 2.15, l'orientazione di sinistra presenta la più piccola sezione trasversale quindi in questo caso gli stress termici saranno ridotti al minimo. L'orientazione di destra può essere stampata ma sarà necessaria una rigida struttura di supporto per mantenere il pezzo in posizione.



*Figura 2.10 Superficie di stampa nella riduzione degli stress termici*

### 2.3.4 Riduzione delle linee di ritiro

Un'orientazione divergente è da preferire ad una convergente. Il design di sinistra mostra come ovunque si abbiano due entità che convergono insieme si creerà una linea di ritiro, cioè in ogni zona cerchiata in rosso tale problematica sarà visibile. Nel design di destra invece c'è divergenza quindi nuove entità vengono create anziché connesse, evitando pertanto la formazione di linee di ritiro.



Figura 2.11 Formazione di linee di ritiro con orientazione convergente (sinistra) e prevenzione di linee di ritiro con orientazione divergente (destra).

## 2.4.1 Design di strutture freeform e strutture support-free

Quando si progetta per Additive Manufacturing è bene, quando possibile:

- Evitare la creazione di parti tipicamente realizzate per fonderia o CNC. Esse in genere presentano spigoli vivi ed un andamento di costruzione non progressivo;
- Prediligere la creazione di strutture *freeform*, evitando superfici *downfacing*, così da avere una migliore qualità superficiale e minor bisogno di supporti, raggiungere un livello maggiore di accuratezza, e nella maggior parte dei casi una maggiore riduzione di peso.

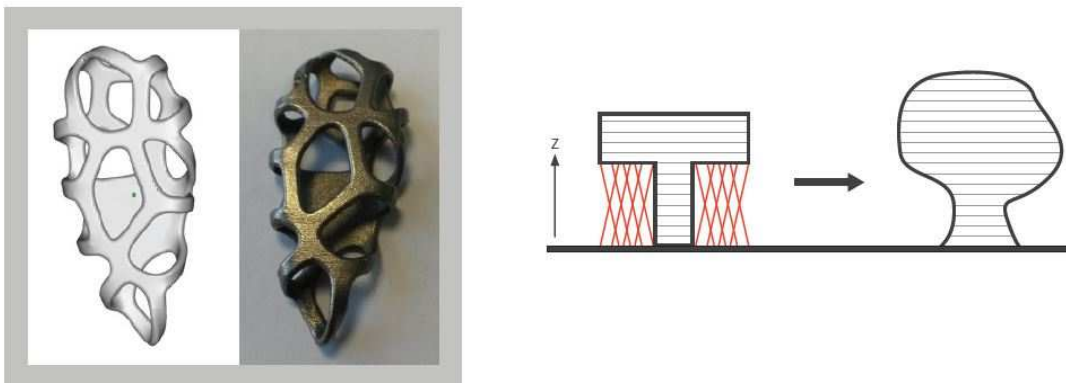
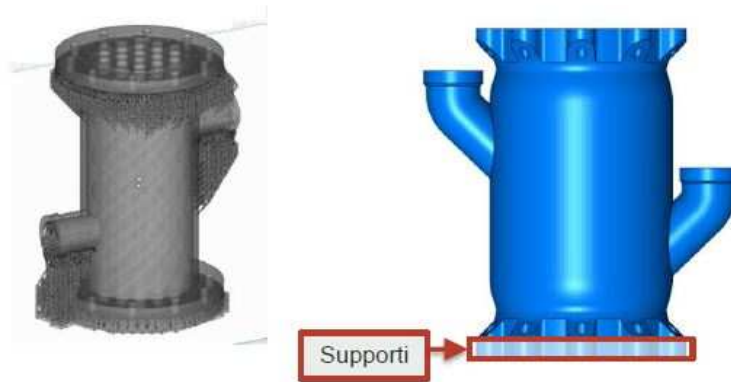


Figura 2.12 Strutture freeform

Pertanto la stampa può essere agevolata andando a modificare (quando possibile) in maniera intelligente il design di un pezzo. Ad esempio, si può dare una certa inclinazione a sbalzi e raccordi in modo da ottenere angoli autoportanti. Anche rendere verticali dei fori di collegamento o canali (magari precedentemente pensati orizzontali) permette di evitare l'utilizzo di strutture di supporto e al contempo il pericolo di ovalizzazione.



*Figura 2.13 Modifica della geometria per ridurre i supporti*

## 2.4.2 Accuratezza dimensionale

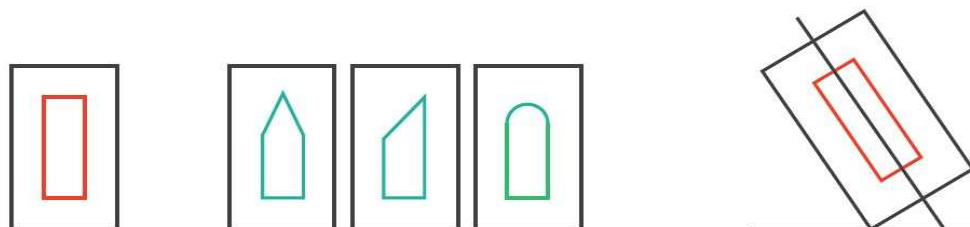
Per assicurare la massima accuratezza dimensionale occorre:

- Prevedere una transizione graduale tra layer successivi (utilizzando raccordi, archi, smussi, design organici, così da evitare una concentrazione delle tensioni);
- Utilizzare un numero sufficiente di strutture di supporto per mantenere il pezzo in posizione (il trattamento termico allevierà gli stress in seguito);
- Applicare lavorazioni di post-processing dopo la costruzione.

## 2.4.3 Design dei canali

Ampie sporgenze interne sono impossibili da stampare. Qualora siano previste, occorre:

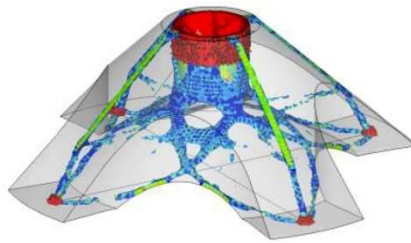
- Cambiarne (quanto più consentito) il design;
- Inclinare il pezzo secondo un angolo di autosupporto (maggiore di 45 °);
- Inclinare il pezzo ed eventualmente sostenerlo all'esterno con strutture di supporto.



*Figura 2.14 modellazione di un canale interno*

## 2.4.4 Ottimizzazione topologica

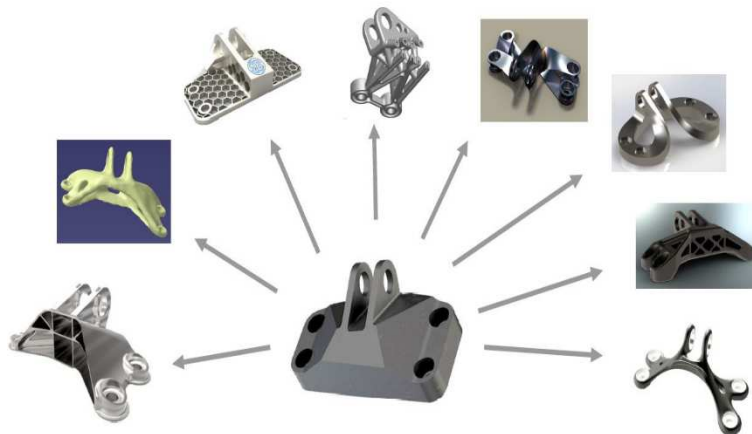
L'ottimizzazione della topologia è un metodo di redesign che consente ad algoritmi matematici di decidere dove posizionare il materiale per ottimizzare il valore del rapporto forza-peso. Tali algoritmi cercano di utilizzare la minor quantità di materiale possibile e posizionarla in modo da soddisfare le caratteristiche desiderate. L'ottimizzazione della topologia utilizza l'analisi agli elementi finiti per prendere decisioni di progettazione. Il processo di solito inizia con uno "spazio di design" di forma regolare per una parte. L'utente aggiunge quindi le forze e i vincoli che la parte dovrebbe sopportare durante il funzionamento. Diversi algoritmi possono essere utilizzati per rimuovere il materiale dalle regioni a bassa sollecitazione per arrivare a un design concettuale leggero.



*Figura 2.15 Geometria originale e ottimizzata*

Tale design presenta quasi sempre una morfologia con un certo grado di irregolarità, in alcuni casi non adatta alla produzione finale; il progettista può eventualmente migliorarla e modificarla tramite tecniche che consentono di cogliere ed “in scatolare”, inseguire tridimensionalmente con volumi elementari le feature principali proposte dall'ottimizzazione topologica.

È importante sottolineare come per uno stesso componente è possibile ottenere un ampio ventaglio di soluzioni di ottimizzazione topologica, in base alle specifiche esigenze del caso.



*Figura 2.21 - Esempi di possibili ottimizzazioni topologiche per uno stesso componente*

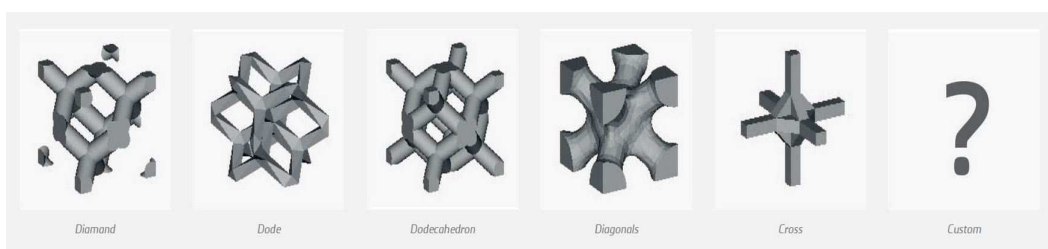
## 2.4.5 Tecniche di riduzione del peso

Per la realizzazione di un pezzo più leggero vengono impiegate strutture lattice, porose, honeycomb, trabecolari, disponibili in diverse varianti. Ciò comporta il riempimento dell'interno di una parte o delle pareti di una parte, con una struttura che è molto più leggera del materiale solido ottenibile con tecniche di produzione tradizionali. Il reticolo viene in genere applicato su porzioni del pezzo o addirittura sull'intera parte, tuttavia si è soliti lasciare la forma esterna intatta per ragioni funzionali, ergonomiche o estetiche. La produzione additiva, attraverso l'uso di strutture reticolari, è in grado di produrre parti con funzionalità che imitano da vicino quelle delle strutture trabecolari ossee, che presentano tipicamente una porosità del 50-90%.

I rapporti forza-peso delle strutture reticolari AM possono essere ottimizzati. A seconda di come il carico operativo viene trasmesso attraverso la parte, alcune regioni richiedono più materiale mentre altre ne richiedono meno. Si può andare ad agire variando lo spessore dei "montanti" all'interno del reticolo o cambiandone il tipo di struttura. Un accorgimento importante è quello di progettare strutture reticolari che consentano di rimuovere il materiale di supporto dopo il completamento della costruzione AM. Il design ideale è quello che richiede poco o nessun materiale di supporto aggiuntivo.



*Figura 2.22 - Braccetto con struttura lattice a spessore variabile*



*Figura 2.23 - Esempi di celle unitarie per strutture reticolari*



## 2.3.2 Produzione ibrida

Il modo più semplice di definire la produzione ibrida è indicarla come combinazione di processi additivi di stampa 3D, nota nel contesto della produzione come produzione additiva (AM) - e processi sottrattivi che comprendono tutte le lavorazioni per asportazione di materiale (*machining*).

Molte parti che vengono realizzate sempre più frequentemente attraverso una combinazione di questi processi ma utilizzando macchine separate.

La caratteristica fondamentale che identifica la produzione ibrida è che entrambi i processi avvengono in sequenza sulla stessa macchina.

Sebbene il numero complessivo di macchine ibride disponibili sia ancora relativamente piccolo, è utile dividerle in due tipologie principali:

- macchine ibride standard
- modifiche additive per macchine utensili convenzionali



*Figura 2.16 Utensili AM con tecnologia DED affiancati ad utensili tradizionali*

Ad esempio componenti massivi non sono sempre possibili da realizzare con processi AM ed occorre combinare lavorazioni tradizionali con la stampa additiva per generare dei dettagli.

I seguenti due approcci offrono una soluzione economica:

- Realizzare strutture e dettagli complessi su parti semilavorate realizzate in precedenza per CNC.  
È fondamentale un attento allineamento con la macchina, e la sezione su cui si va a costruire deve essere piatta;
- Costruire strutture complesse sulla piastra di base e fresare la base successivamente.  
Questa soluzione è tipicamente adottata per gli stampi.

### 3 METODOLOGIA E FLUSSO DI LAVORO

Una volta noti tutti gli aspetti relativi ai processi costruttivi e alle tecniche di progettazione, è stato definito un flusso di lavoro per poter realizzare un componente mediante tecniche AM partendo dal modello iniziale realizzato con processi produttivi tradizionali.

Il principale vantaggio di questi processi innovativi consiste nel poter realizzare forme e geometrie complesse non ottenibili utilizzando processi fusori o sottrattivi.

Verranno valutate delle proposte di re-design partendo da modifiche poco invasive fino ad ottenere un componente che si differenzia molto dal design iniziale.

Le differenti soluzioni verranno validate mediante delle semplici simulazioni strutturali in grado di fornire dei risultati in tempi brevi.

Il modello definitivo deve essere valutato in modo più accurato andando a ricreare in modo più fedele possibile le reali condizioni di utilizzo.

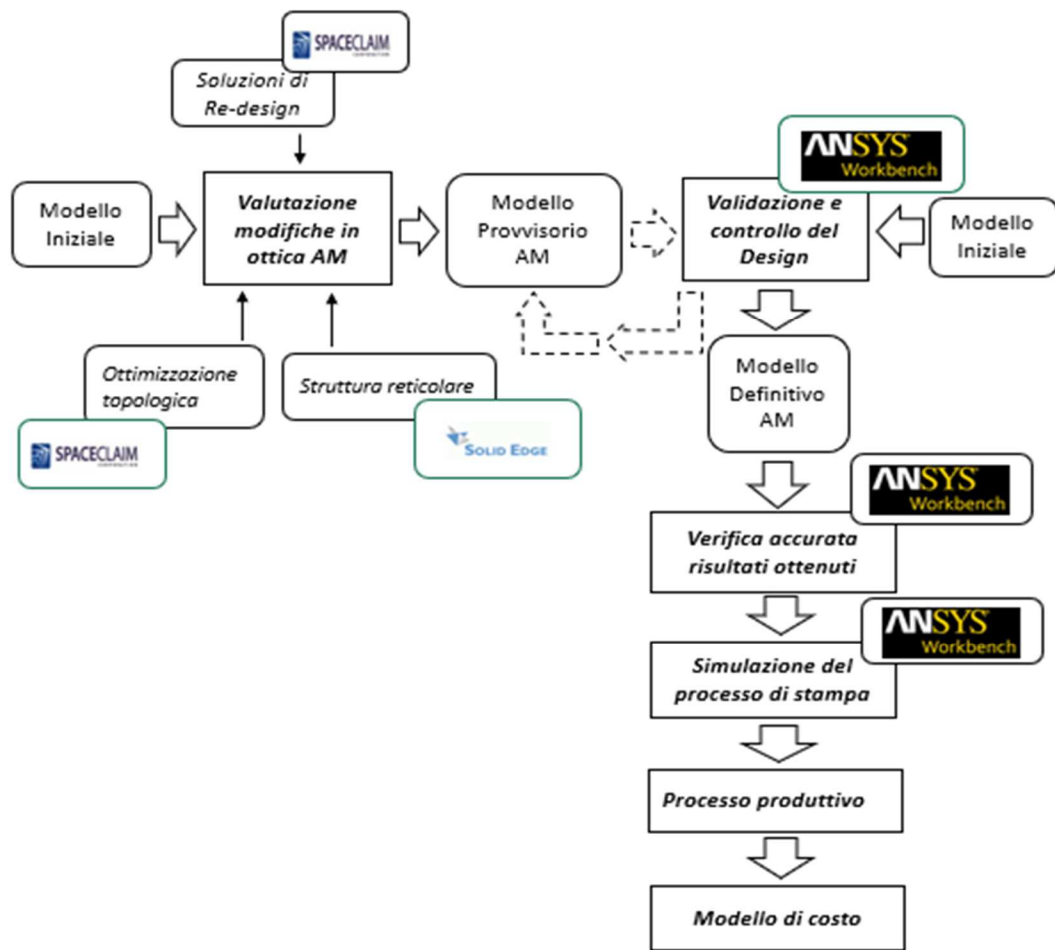
Una volta validato il design, individuato il migliore orientamento, viene simulato il processo di stampa per poter ricavare le grandezze caratteristiche come tensione, deformazione e tempo di build utile per il confronto con il processo produttivo tradizionale e per una stima del costo.

In questo capitolo verrà quindi descritto il metodo e le fasi che lo compongono nel dettaglio ponendo l'attenzione sulle strategie di modellazione e sui software utilizzati.

L'obiettivo principale è la definizione di una metodologia di lavoro che possa essere applicata ad un generico componente riprogettato e realizzato tramite dei processi in ottica di additive manufacturing. Successivamente alcune fasi del flusso principale sono state scomposte in una serie di operazioni più semplici in cui sono messe in evidenza i dati in ingresso e le informazioni in uscita generate dai software di simulazione utilizzati.

Il punto di partenza è rappresentato dal modello iniziale fornito dall'azienda che rappresenta il caso studio e sul quale verranno valutate una serie di modifiche sulla struttura interna.

Il processo di alleggerimento del componente con struttura reticolare viene eseguito in più modi differenti.



*Figura 3.1 Metodologia e flusso di lavoro*

In particolare il software SPACECLAIM, cad indiretto compreso in Ansys, ha un modulo interno per l'ottimizzazione topologica che permette di selezionare differenti tipologie di reticolo e modificarne le dimensioni della cella unitaria che la compone.

Il risultato di questa elaborazione è un file in formato STL pronto per essere caricato nel software della macchina e codificato per il processo di stampa rendendolo di fatto inutilizzabile per le successive analisi strutturali e dei processi di stampa.

In alternativa il componente è stato generato con una strategia di modellazione differente utilizzando il software di modellazione solida SolidEdge per la creazione della struttura reticolare in combinazione con il software SPACECLAIM particolarmente adatto per le modifiche delle superfici e per la preparazione del modello al processo di stampa.

Una volta definite le soluzioni di re-design si passa alla validazione e al controllo del modello mediante delle simulazioni Statiche Strutturali mediante il software Ansys Workbench.

Le simulazioni semplificate sui nuovi modelli forniscono dei risultati approssimati in breve tempo e devono essere confrontati con i valori ottenuti per il modello originale in modo da avere un riscontro veloce.

È un processo di tipo iterativo utile per valutare tutte le modifiche possibili sul modello.

Una volta individuato il design definitivo, viene svolta sul modello una analisi termomeccanica più approfondita che si avvicini alle reali condizioni di funzionamento del componente sulla base dei dati forniti dall'azienda.

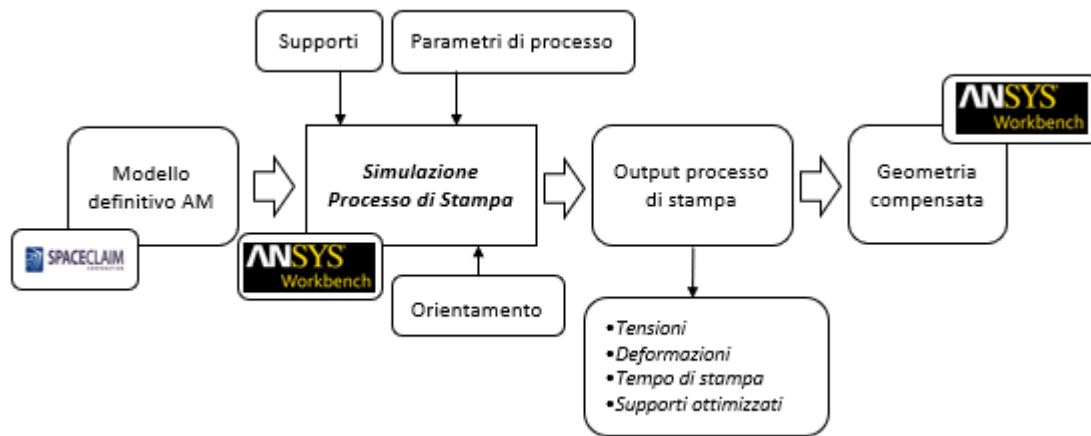


Figura 3.2 Dettaglio flusso di lavoro fase di stampa

Dopo aver eseguito verifica più accurata si passa alla fase di stampa mediante il modulo *Ansys Additive Wizard* che , mediante una procedura guidata, permette di integrare vari strumenti già presenti in *Ansys Workbench*.

Vengono scelti opportunamente l'orientamento e i parametri di processo della macchina e si valuta la possibilità di inserire i supporti ottenendo in output grandezze come tensioni, deformazioni massime e il tempo di stampa utile per i passi successivi.

Dalla fase di *build* della parte si ricava la geometria compensata che permette di ridurre le deformazioni proprie del processo di costruzione AM senza aggiunta di ulteriori supporti.

Inoltre è possibile fare una stima del sovrametallo da considerare sulle superfici funzionali per il rispetto delle tolleranze geometriche e dimensionali.

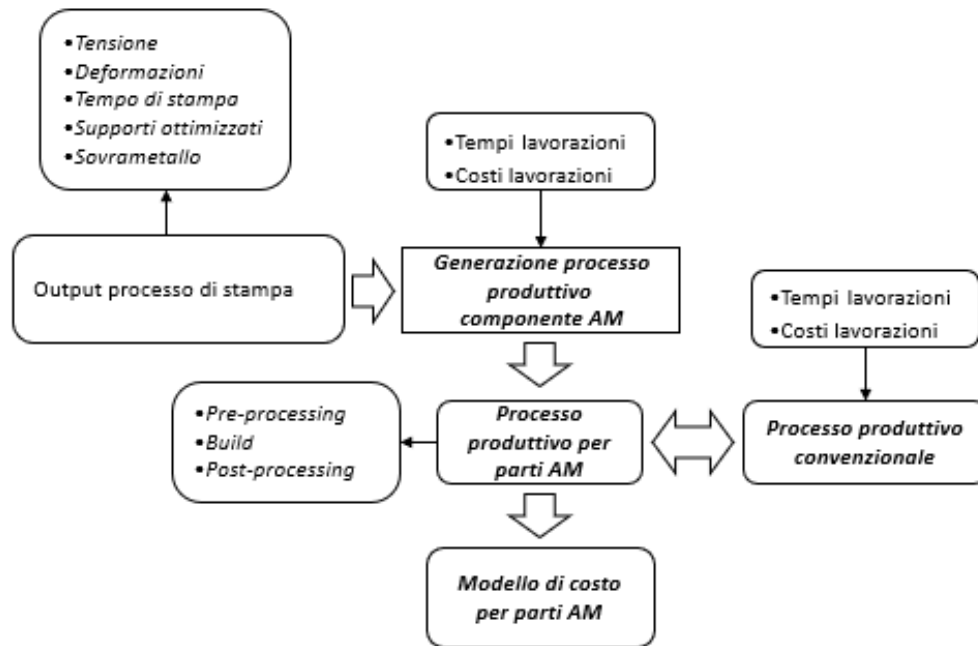


Figura 3.3 flusso dalla fase di stampa al modello di costo

Una volta definito il tempo utile alla stampa e la forma definitiva unita alla conoscenza dettagliata di tutte le varie operazioni elementari che costituiscono il produttivo e il relativo costo, viene eseguito un confronto con il processo produttivo tradizionale per stabilire se risulta conveniente o meno produrre la parte mediante processi AM.

### 3.1 Valutazione delle modifiche in ottica AM

Costituisce la prima fase del flusso di lavoro individuando alcune delle possibili soluzioni di re-design in ottica di Additive Manufacturing.

Vengono prese in considerazione tutte le possibili soluzioni al problema già realizzate in precedenza ed elencate nello stato dell'arte ed in particolare le principali tecnologie impiegate per il raffreddamento degli stampi:

- *Conformal Cooling*
- *Lattice Structure Cooling*

Nelle applicazioni sullo stampaggio ad iniezione di polimeri, le esigenze di raffreddamento sono più stringenti ed è richiesta una migliore estrazione del calore in determinate zone dello stampo.

Risulta conveniente realizzare degli inserti della matrice con processi AM che permettono di posizionare i canali di raffreddamento più vicini al profilo della superficie riducendo le deformazioni e aumentando la qualità della parte.

Nella pressofusione dell'alluminio l'esigenza di avere un raffreddamento capillare non è indispensabile come nello stampaggio dei polimeri, tuttavia può essere presa in considerazione la

prima tipologia di raffreddamento che porta dei vantaggi in termini di omogeneità ed efficacia nell'estrazione del calore permettendo l'utilizzo di un distaccante solido che impedisce solamente l'adesione del pezzo allo stampo.

Per lo studio di un sistema di raffreddamento di tipo *Lattice Cooling*

A tale scopo possono essere adottate differenti strategie:

- Utilizzo del modulo di ottimizzazione topologica presente in SPACECLAIM;
- Disegno di un volume reticolato con tecniche di modellazione tradizionale.

## 3.2 Ottimizzazione topologica

All'interno del modellatore Spaceclaim è presente un modulo utile per l'ottimizzazione topologica dei componenti inizialmente caratterizzati da una struttura piena.

Mediante il comando *facetes* e selezionando la funzione *shell* è possibile creare un guscio di spessore uniforme a partire dal contorno esterno del solido.

Non può essere generato un guscio con spessori variabili e questa funzione rappresenta un limite nel caso studio analizzato successivamente.

Si può scegliere di riempire la cavità con una struttura reticolare selezionando l'opzione *Basic* e scegliendo come *Shape* la struttura *lattice*.

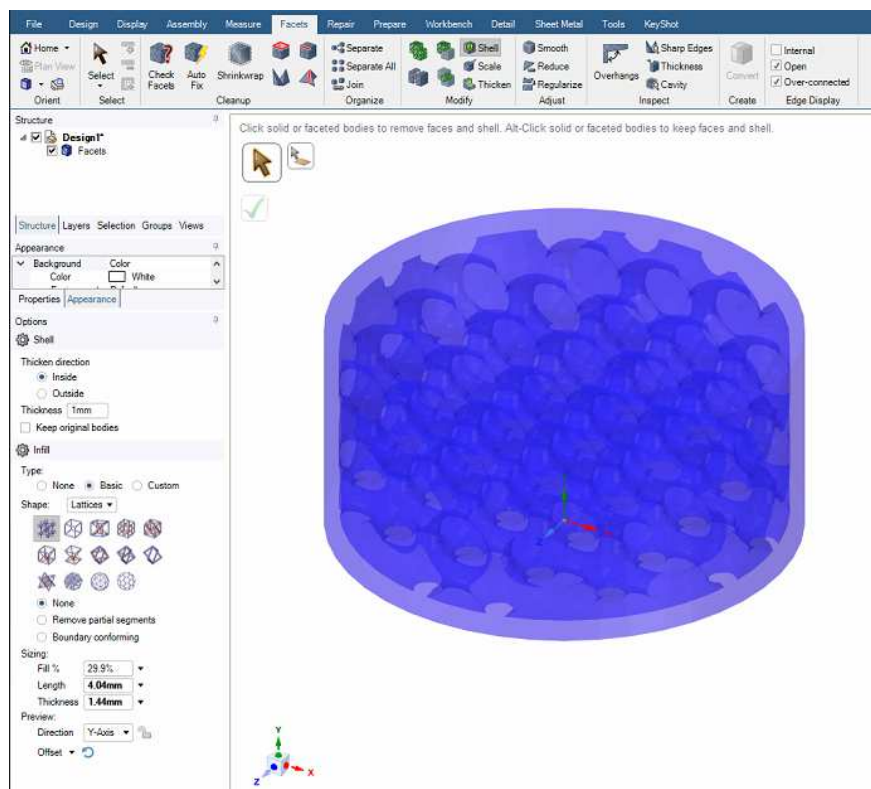


Figura 3.4 Esempio ottimizzazione topologica con Spaceclaim

Sono disponibili più tipi di strutture di riempimento lattice e sono tutte autosupportanti per poter essere stampate all'interno delle parti senza generare supporti altrimenti impossibili da rimuovere.

Ogni unità elementare della struttura è caratterizzata da tre parametri principali:

- *Fill %*
- *Length :*
- *Thickness :*

*Fill%* rappresenta la percentuale di riempimento di una unità elementare cubica che compone il reticolo.

Può variare in un intervallo di valori compresi tra 0 ed 1 corrispondenti rispettivamente al materiale vuoto e al materiale pieno.

Una struttura reticolare è caratterizzata da un riempimento pari al 60%.

Gli altri due parametri caratteristici sono la lunghezza (*length*) e da uno spessore degli elementi interni (*Thickness*).

Mediante le impostazioni *direction* e *offset* è possibile modificare l'orientamento del reticolo nello spazio e il punto di partenza dal piano perpendicolare all'asse scelto dato che tutte le possibili tipologie di reticolo hanno proprietà meccaniche anisotrope che variano con la direzione di carico.

Il software ha molte funzioni che permettono di andare ad analizzare e controllare la qualità della geometria ottenuta.

Mediante la funzione *overhangs* permette di individuare tutte le superfici che hanno una inclinazione inferiore a 45° che non sono autosupportanti oppure caratterizzate da una bassa finitura superficiale per l'effetto gradino (*downstears*).

Dopo aver effettuato una ottimizzazione topologica il formato della parte viene modificato automaticamente passando da corpo solido ad un corpo sfaccettato composto dall'unione di più superfici triangolari elementari.



Il formato STL contiene solamente informazioni relative alle coordinate necessarie per individuare i singoli vettori che orientano le superfici elementari che approssimano la forma esterna ed interna del componente.

Con il passaggio da formato STL a STP vengono perse tutte le informazioni relative al volume.

Per poter analizzare strutturalmente il componente nell'ambiente Spaceclaim è previsto un tool che permette di riportare la parte in formato STP dopo l'ottimizzazione topologica.

Questo passaggio inverso è percorribile solamente se si hanno parti di dimensioni ridotte e dalla geometria semplice altrimenti la dimensione del file STP risultante dalla conversione risulta troppo elevata e non utilizzabile per i passaggi successivi dell'analisi.



*Figura 3.5 Preparazione e riparazione superfici*

Spaceclaim mette a disposizione una serie di *tools* utili nella preparazione e nella riparazione di eventuali errori che possono essere commessi durante la modellazione come spigoli inesatti e o superfici superflue fino alla correzione della completa ermeticità della forma.

Mediante l'utilizzo del comando *move* è possibile spostare la parte rispetto al sistema di riferimento e orientarla nella direzione più idonea per la stampa.

Il sistema di riferimento deve trovarsi sulla superficie inferiore della parte con l'asse z rivolto lungo la direzione di stampa per favorire la successiva importazione nei software di simulazione per il processo e per il posizionamento corretto rispetto al piatto di stampa.

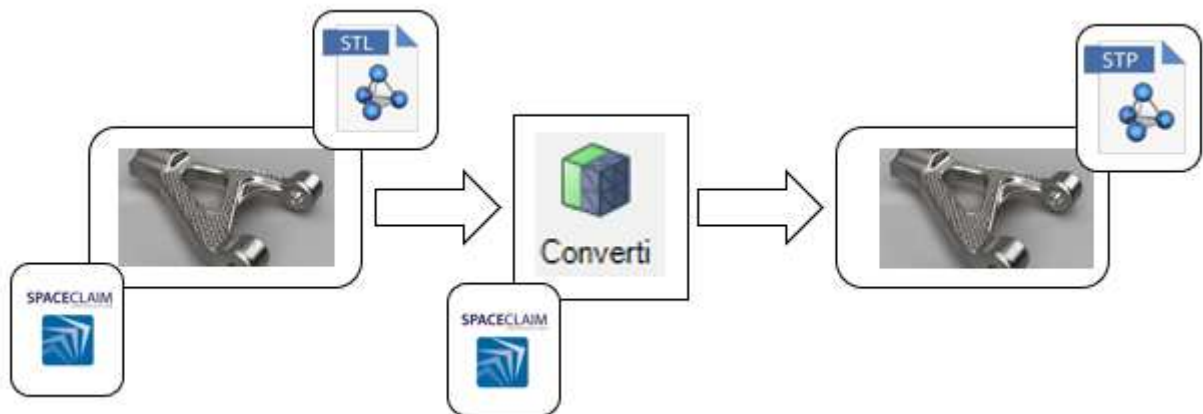
Le operazioni di correzione della geometria e spostamento del sistema di riferimento sono spesso necessarie prima della simulazione del processo.

### **3.3 Strategia di modellazione della struttura reticolare**

Nel caso in cui il modello da analizzare sia di grandi dimensioni oppure abbia una geometria complessa e molto sfaccettata, può risultare molto complesso e dispendioso per il calcolatore, fare il passaggio inverso ovvero la conversione di una geometria ottimizzata in formato STL, tramite il modulo di ottimizzazione topologica, in un file STP.

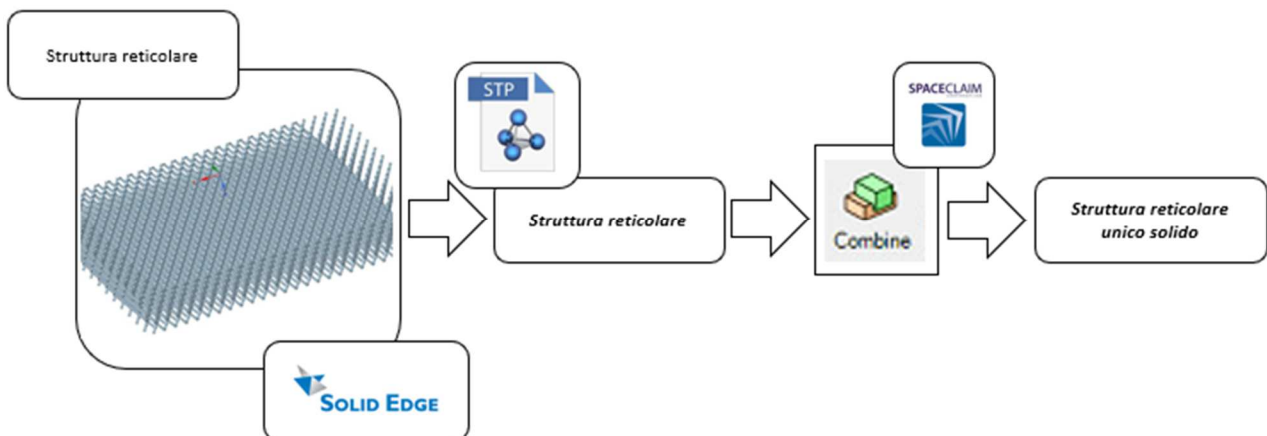


Il risultato di questa conversione è un file di geometria di grandi dimensioni tale da non poter essere elaborato per le successive analisi strutturali necessarie per la validazione del nuovo design.



*Figura 3.6 Passaggio inverso da formato STL a STP*

Per risolvere questo problema si è deciso di modellare una porzione di spazio avente una struttura reticolare con un modellatore cad diretto e, successivamente, sfruttando le potenzialità del software Spaceclaim utile per le modifiche.



*Figura 3.7 Modellazione della struttura solida reticolare*

La struttura reticolare da inserire all'interno del nuovo modello è stata generata in *SolidEdge* basandosi orientativamente sulle misure dei reticoli disponibili nel modulo di ottimizzazione topologica presente in *Spaceclaim*.

Il reticolo deve avere le seguenti caratteristiche:

- Buona resistenza alle sollecitazioni imposte dall'esterno
- Deve essere costituito da superfici autosupportanti

Il primo passo per la creazione del reticolo è stato il disegno della pianta sul piano orizzontale XY prendendo da un triangolo equilatero con lato lungo 8 mm.

Sfruttando le potenzialità del comando *schizzo 3D* sono state disegnate sui vertici delle linee inclinate di  $60^\circ$  rispetto al piano *xy* tali da formare una piramide.

Lungo questi assi, con una estrusione sono state disegnate delle barre di sezione circolare di diametro 2mm.

Le dimensioni sono state stabilite partendo dalle *struttura lattice* dell'ottimizzazione topologica.

Effettuando delle *campiture lineari* di queste travi lungo le direzioni individuate dai lati del triangolo si ottiene la struttura reticolare desiderata.

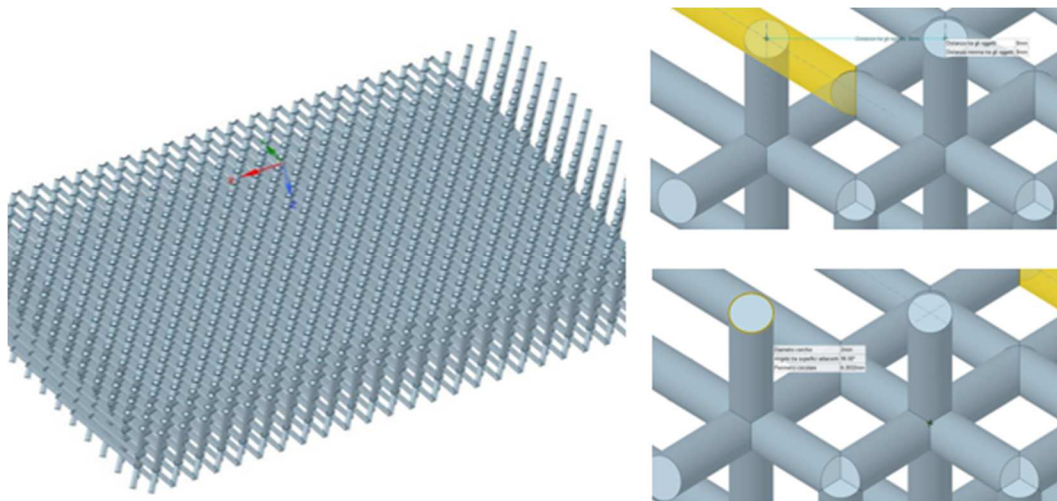
Il risultato sarà un *file Part* composto da una serie di solidi che si intersecano ma ancora indipendenti tra loro.

Risultano necessari altri passaggi aggiuntivi affinché la porzione di spazio reticolata risulti utilizzabile.

Si procede all'esportazione di questo modello nell'ambiente di modellazione *Spaceclaim* passando da un formato *Part* ad un formato *STP*.

Questo software di modellazione offre delle soluzioni di costruzione molto più semplici, veloci e immediate nell'utilizzo rispetto ad un cad tradizionale permettendo di modificare le dimensioni delle *feature*, i raggi di raccordo, fori di un oggetto utilizzando il solo comando *pull*, che esercita una azione di trascinamento.

Per contro il programma non rende disponibile l'albero delle lavorazioni rendendo talvolta difficoltoso riuscire ad individuare la sequenza di operazioni eseguite per ottenere la parte.



*Figura 3.8 Dettaglio del modello reticolare*

La struttura reticolare composta da corpi separati tra loro non può essere utilizzata per produrre l'alleggerimento desiderato e deve essere trasformata in un unico solido.

A questo scopo risulta adatta la funzione *combine* che permette di unire tutte le singole travi, inizialmente separate, per generare un blocco rettangolare da cui ricavare con operazioni di *trim*, i volumi di riempimento delle parti.

La regione reticolare deve riempire la cavità della parte in modo omogeneo e senza imperfezioni pertanto viene utilizzata la zona centrale.

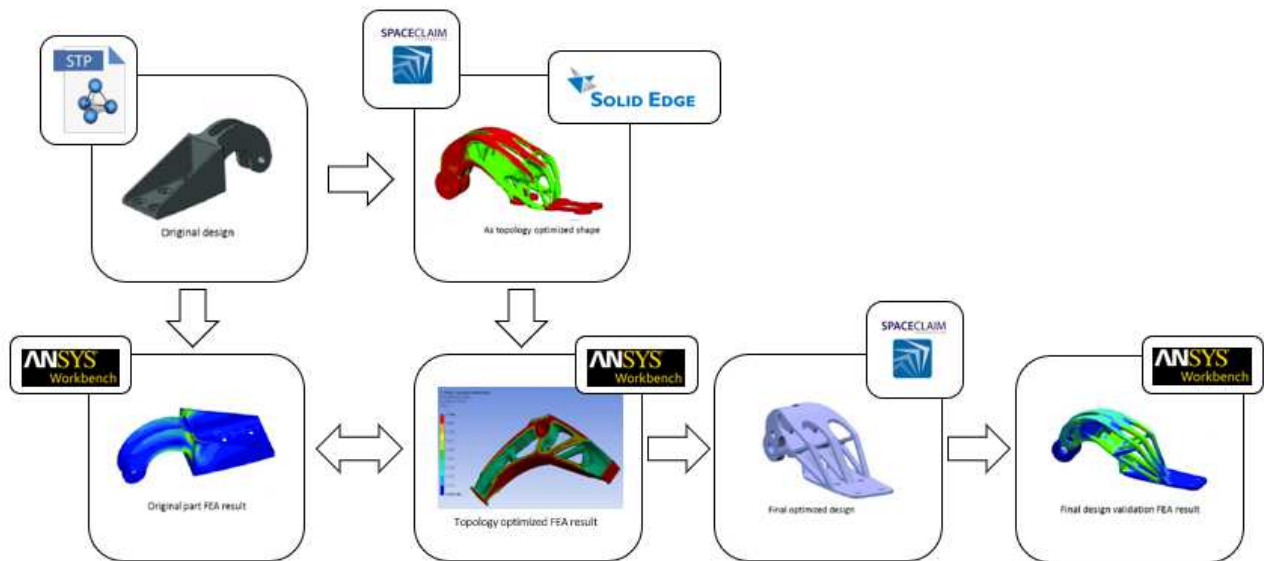
Ne consegue che la regione di spazio reticolato deve essere molto più estesa della parte.

Questo procedimento risulta laborioso ma permette di generare un componente ottimizzato topologicamente utilizzabile per le successive analisi strutturali evitando la conversione automatica in formato STL.

### 3.4 Validazione e controllo del design

Le possibili soluzioni di individuate precedentemente devono essere verificate dal punto di vista strutturale per capire se possono essere una valida alternativa al modello originale.

Le proposte di ottimizzazione topologica individuate devono essere verificate mediante Analisi Strutturale.



*Figura 3.9 Flusso di lavoro nella Validazione*

In figura è rappresentato il flusso di lavoro seguito in questa fase che parte dall'analisi del modello originale in quanto non si hanno a disposizione informazioni sperimentali per quanto riguarda i valori delle tensioni e delle deformazioni massime raggiunte durante il funzionamento.

Prendendo questi valori come riferimento, vengono impostate delle simulazioni statiche strutturali con le stesse condizioni al contorno (vincoli, carichi, temperatura, materiale) impostate nella simulazione di riferimento per poter confrontare i risultati in modo attendibile e verificare che entrambi i modelli abbiano il medesimo comportamento in termini di tensioni e deformazioni.

La simulazione strutturale è stata impostata utilizzando il modulo *Static Structural* presente nella piattaforma *Workbench* la quale permette di impostare analisi termiche, strutturali, fluidodinamiche ed elettriche su qualsiasi tipo di componente.

## **Static Structural Analysis**

Un'analisi strutturale statica determina:

- gli spostamenti
- le sollecitazioni
- le deformazioni
- le forze in strutture o componenti causate da carichi che non inducono significativi effetti di inerzia e smorzamento

Si presuppongono:

- condizioni di caricamento e risposta costanti

ovvero si assume che i carichi e la risposta della struttura cambino lentamente rispetto al tempo.

Questo tipo di analisi prevede che possano essere utilizzati il risolutore ANSYS, Samcef o ABAQUS.

In una analisi statica possono essere applicate le seguenti tipologie di carico:

- Forze e pressioni applicate esternamente
- Forze inerziali allo stato stazionario (come gravità o velocità di rotazione)
- Vincoli imposti (limitazioni degli spostamenti anche diversi da zero)
- Temperature (per sollecitazione termica)

Per le impostazioni di temperatura è disponibile solamente la selezione del volume relativa all'intera parte.

Un'analisi statica strutturale può essere:

- lineare
- non lineare

Tutti i tipi di non linearità possono essere considerati:

- Grandi deformazioni
- Plasticità
- Stress stiffening
- Contact elements
- Iperelasticità

Dato che le proprietà del materiale variano in base alla temperatura, questa informazione permette di valutare in modo più realistico le variazioni delle grandezze caratteristiche ( modulo di elasticità, carico di snervamento, carico di rottura, densità, ecc..)

La libreria presente nella sezione *Engineering Data* risulta comunque limitata rispetto alle applicazioni possibili e talvolta risulta necessario programmare i dati relativi ad un materiale utilizzando come fonte un database esterno.

Per le applicazioni nella produzione di inserti o stampi nella pressofusione dell'alluminio, viene impiegato un particolare tipo di acciaio che prende il nome di *hot work tool steel (X40CrMoV5-1)* denominato con la sigla AISI 1.2344 in base alla normativa americana oppure ISO H13 secondo quella europea.

Contiene elementi in lega come vanadio e molibdeno che aumentano di molto la resistenza allo snervamento e mantiene elevata durezza e resistenza a temperature elevate.

Ha una buona resistenza a fatica termica, erosione e usura.

Acciaio con altissima solidità, buona duttilità e temprabilità.

Le proprietà meccaniche di un pezzo realizzato con processi AM possono essere equiparate a quelle di un pezzo forgiato per durezza e resistenza, dovute alla dimensione ridotta dei grani e alla bassissima porosità della parte.

I dati relativi al materiale dovrebbero essere ricavati da prove sperimentali eseguite su provini normati realizzati mediante processi di costruzione AM.

Tuttavia i dati relativi alle proprietà meccaniche delle polveri metalliche sono ancora poco diffusi per diverse motivazioni:

- Bassa diffusione dei processi AM in ambito industriale;
- Le proprietà meccaniche del componente realizzato variano con l'impostazione dei parametri di processo sulla singola macchina (potenza e velocità di scansione del laser, spessore del layer polvere).

Le informazioni relative al materiale sono state ricavate ,per quanto possibile, da database presenti in rete come *Totalmateria* oppure direttamente dai cataloghi dei produttori di acciaio e polveri metalliche ma non rappresentano una fonte certa ed univoca, influenzando il risultato delle simulazioni.

Maggiore sarà il dettaglio dei dati in ingresso e conseguentemente il modello impostato riuscirà a riprodurre la situazione reale.

In particolare per l'esecuzione delle simulazioni termico-strutturali (*Transient Thermal, Static Structural*), ogni materiale utilizzato deve essere caratterizzato almeno dalle seguenti proprietà meccaniche dipendenti dalla temperatura:

- Densità;
- Curva caratteristica Tensione Deformazione (*modello Multilinear*);
- Curva caratteristica Tensione Deformazione (*modello Bilinear*);
- Carico di snervamento (*Tensile Yield Strenght*);
- Carico di rottura (*Tensile Ultimate Strenght*);
- Coefficiente di dilatazione lineare;
- Conducibilità termica.

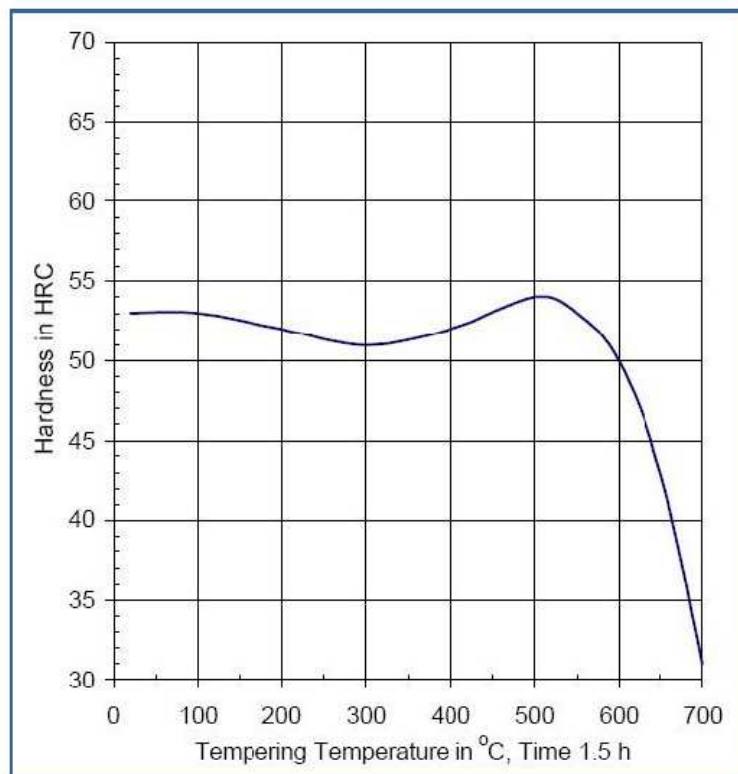
In particolare prendendo come riferimento i cataloghi di produttori gli acciai 1.2344 raggiungono elevati valori di snervamento e durezza:

**Tempering Temperature (°C) vs. Hardness (HRC) vs. Tensile Stregh (N/mm<sup>2</sup>)**

100°C	200°C	300°C	400°C	500°C	550°C	600°C	650°C	700°C
53	52	51	52	54	53	50	43	31
1845	1790	1730	1790	1910	1845	1680	1360	995

*Figura 3.10 Valori di durezza HRC e tensioni di snervamento raggiunti in seguito a trattamento termico*

**Tempering Diagram**



*Figura 3.11 Durezza HRC in funzione della temperatura trattamento tempra*

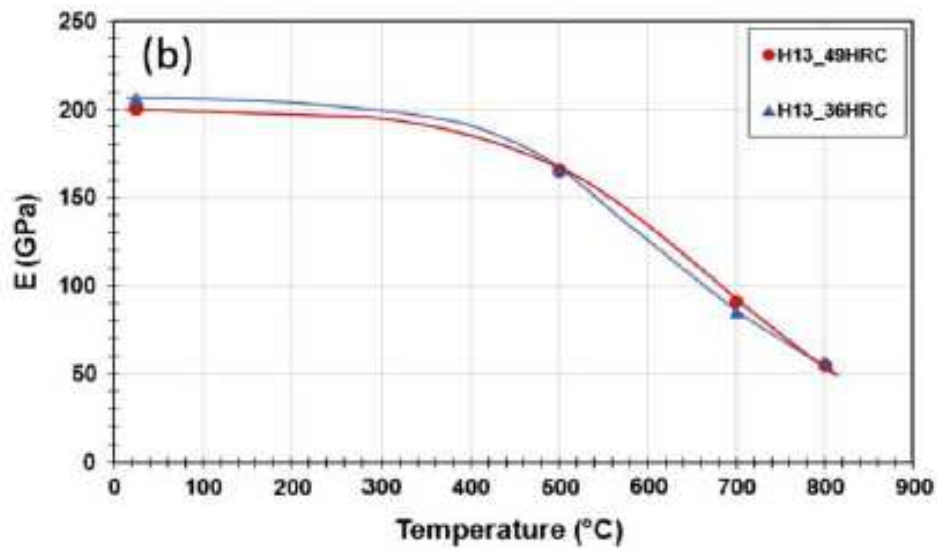


Figura 3.12 Modulo elastico in funzione della temperatura per due valori di durezza HRC

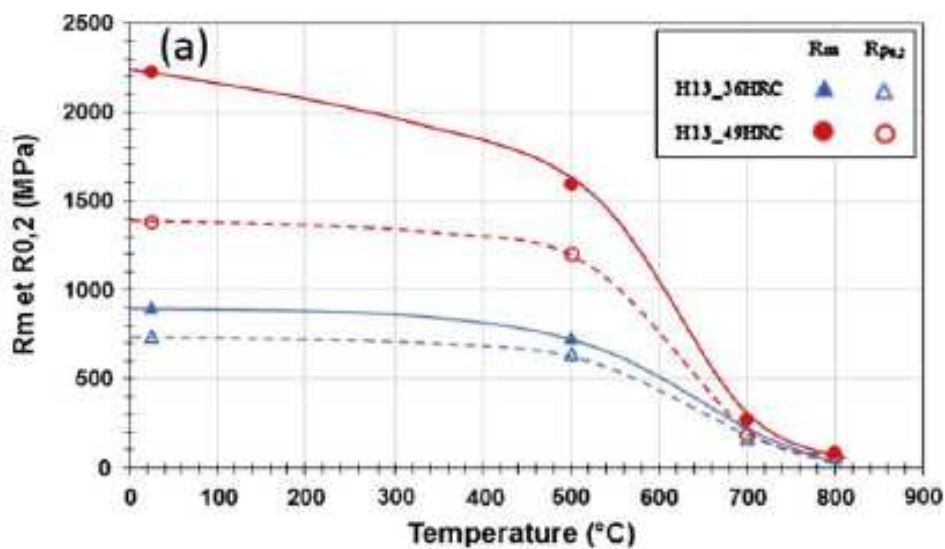


Figura 3.13 Carico di snervamento R0,2 e di rottura Rm in funzione della temperatura per due valori due valori di durezza HRC

Thermal conductivity [W/m.K]M

20°C	500°C	600°C
25	28.5	29.3

Density [g/cm<sup>3</sup>]

20°C	500°C	600°C
7.78	7.64	7.60

Specific heat capacity[J/g.K]

20°C	500°C	600°C
0.46	0.55	0.59

Figura 3.14 Conducibilità termica, densità e calore specifico in funzione della temperatura

Coefficient of Linear Thermal Expansion  $10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$

20-100 $^{\circ}\text{C}$	20-200 $^{\circ}\text{C}$	20-300 $^{\circ}\text{C}$	20-400 $^{\circ}\text{C}$	20-500 $^{\circ}\text{C}$	20-600 $^{\circ}\text{C}$	20-700 $^{\circ}\text{C}$	20-800 $^{\circ}\text{C}$
10.7	11.9	12.2	12.5	12.7	13.1	13.5	13.7

Figura 3.15 Variazione del Coefficiente di espansione termica lineare con la temperatura

Le informazioni relative alle proprietà meccaniche del materiale sono state ricavate partendo dai cataloghi dei produttori di acciaio e da database presenti *on-line* che offrono la possibilità di esportare i dati in formato *.dat* permettendo di esportarle in direttamente nel modulo *engineering data*.

Per la programmazione di un materiale ex novo deve essere preso come riferimento un materiale già presente nella libreria di Ansys in modo da poter replicare l'ordine delle informazioni contenute, necessarie per lo specifico tipo di analisi.

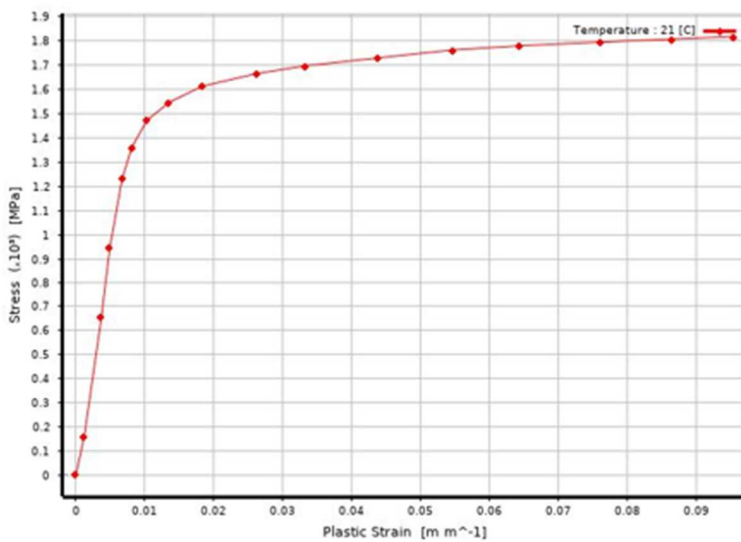


Table of Properties Row 21: Multilinear Isotropic Hardening		
A	B	C
1 Temperature (C)	1 Plastic Strain (m m^-1)	2 Stress (MPa)
2 21	2 0	2
3 550	3 0.0012	161
*	4 0.0037	656
	5 0.0049	946
	6 0.0067	1232
	7 0.0081	1362
	8 0.0103	1473
	9 0.0135	1547
	10 0.0183	1614
	11 0.0262	1666
	12 0.0332	1698
	13 0.0438	1731
	14 0.0547	1764
	15 0.0643	1781
	16 0.076	1796
	17 0.0865	1809
	18 0.0953	1819
	*	

Figura 3.16 Curva tensione deformazione T 21°C

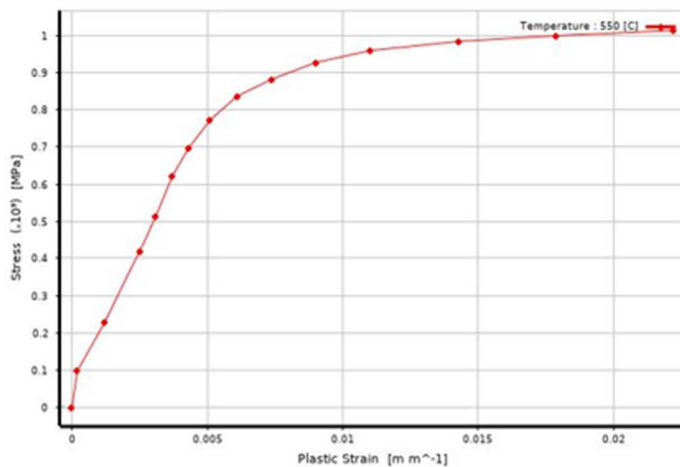


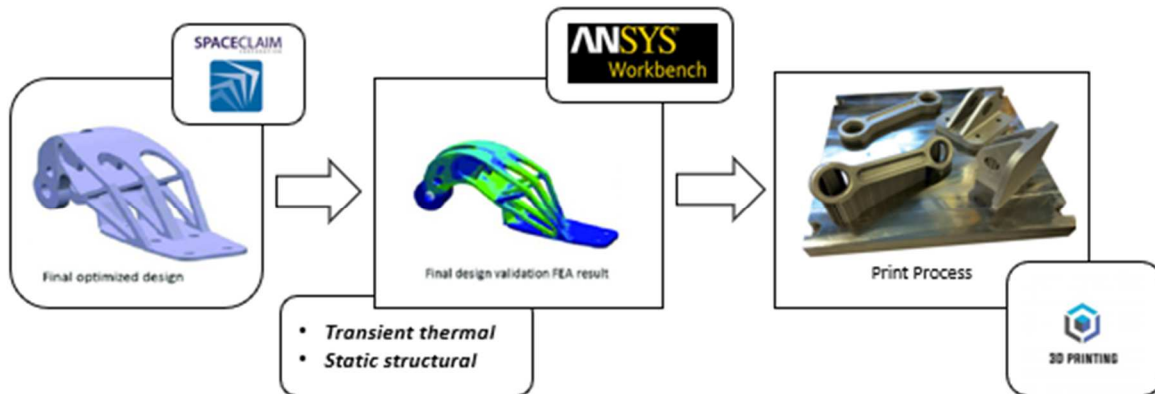
Table of Properties Row 21: Multilinear Isotropic Hardening	
B	C
1 Plastic Strain (m m^-1)	2 Stress (MPa)
2 0	2
3 0.0002	99
4 0.0012	228
5 0.0025	420
6 0.0031	516
7 0.0037	622
8 0.0043	697
9 0.0051	773
10 0.0061	837
11 0.0074	883
12 0.009	927
13 0.011	959
14 0.0143	984
15 0.0179	999
16 0.0222	1013
*	

Figura 3.17 Curva tensione deformazione T 550°C



### 3.5 Verifica accurata dei risultati ottenuti

Una volta validato il modello con un design modificato rispetto al modello originale, viene eseguita una analisi più approfondita che riproduce con maggiore fedeltà le condizioni di utilizzo del componente rispetto alle semplici analisi Statiche strutturali.



È la fase finale prima della costruzione mediante processi AM.

Per riprodurre le condizioni di utilizzo di una matrice per la pressofusione dell'alluminio si è deciso di impostare una simulazione accoppiata termica-strutturale.

Nell'ambiente Workbench possono essere combinati i due moduli:

- *Transient Thermal*
- *Static Structural*

In modo da combinare gli effetti dovuti alla trasmissione del calore variabili nel tempo con le sollecitazioni statiche che agiscono sulla superficie della matrice.

#### **Transient thermal Analysis**

Le analisi termiche transitorie determinano temperature e altre quantità termiche che variano nel tempo.

La variazione della distribuzione della temperatura nel tempo è di interesse in un'ampia gamma di applicazioni, dal raffreddamento di circuiti e componenti elettronici fino ad un'analisi di tempra per il trattamento termico.

Anche di interesse sono i risultati della distribuzione della temperatura in stress termici che possono causare guasti.

In tali casi le temperature di un'analisi termica transitoria vengono utilizzate come input per un'analisi strutturale per le valutazioni dello stress termico.

Le analisi termiche transitorie possono essere eseguite utilizzando il risolutore ANSYS, Samcef o ABAQUS.

Molte applicazioni di trasferimento di calore come problemi di trattamento termico, progettazione di pacchetti elettronici, ugelli, blocchi motore, recipienti a pressione, problemi di interazione fluido-struttura e così via, comportano analisi termiche transitorie.

Un'analisi termica transitoria può essere lineare o non lineare. Le proprietà dei materiali dipendenti dalla temperatura (conduttività termica, calore o densità specifici), i coefficienti di convezione dipendenti dalla temperatura o gli effetti delle radiazioni possono determinare analisi non lineari che richiedono una procedura iterativa per ottenere soluzioni accurate. Le proprietà termiche della maggior parte dei materiali variano con la temperatura, quindi l'analisi di solito non è lineare.

Il modello del materiale caricato nel modulo *engineering data* deve essere definito dalle seguenti proprietà:

- Conduttività termica ( può essere isotropica o ortotropica)
- Densità
- Calore specifico
- Conduttività termica può essere isotropica o ortotropica

Tutte le proprietà possono essere costanti o dipendenti dalla temperatura.

In un'analisi termica è valido solo il contatto. Eventuali giunti o molle vengono ignorati.

Con il contatto lo stato iniziale viene mantenuto per tutta l'analisi termica, ovvero tutte le facce di contatto chiuse rimarranno chiuse e tutte le facce di contatto aperte rimarranno aperte per la durata dell'analisi termica.

Nell'analisi termica transitoria sono supportati i seguenti carichi termici applicabili sulle superfici della parte:

- Temperatura
- Convezione
- Irraggiamento
- Flusso di calore
- Perfettamente isolato
- Flusso di calore
- Generazione di calore interno

Devono essere inserite all'interno del modulo *Engineering Data*, le proprietà necessarie per l'analisi termica.

### **3.6 Simulazione del processo di stampa**

Una volta verificato in modo più approfondito il design definitivo della nuova parte da realizzare si passa alla simulazione del processo di stampa.

Ansys mette a disposizione due tipologie di software che permettono di simulare i processi di costruzione AM:

- Ansys Additive 2019
- Modulo Ansys Additive Manufacturing in Workbench

Utilizzano approcci e impostazioni differenti per arrivare alla soluzione.

Il primo è uno strumento più veloce ed immediato nell'utilizzo ma molto meno versatile.

Il limite principale risiede nella libreria dei materiali in cui non è presente l'acciaio per utensili e nel modello utilizzato che è di tipo lineare e approssima bene il tratto elastico della curva caratteristica.

Il punto di forza sta nella possibilità di generare automaticamente i supporti ottimizzati in base:

- Minimizzazione delle tensioni residue
- Minimizzazione degli spostamenti

I supporti generati possono essere di due tipologie:

- Supporti di superficie
- Supporti di volume

I supporti di superficie sono rappresentati idealmente come una struttura reticolare di superfici a spessore nullo.

Maggiori saranno le tensioni residue o gli spostamenti da impedire e maggiore sarà la densità del reticolo.

I supporti in volume generati hanno una struttura reticolare e spessore variabile in base alla tensione o deformazione da controllare.

Inoltre Ansys additive 2019 permette di ottenere solo informazioni relative:

- Deformazioni residue
- Tensioni residue
- Geometria compensata

E non permette di avere una stima del tempo di stampa, necessario nella successiva fase relativa al modello di costo.

In seguito a queste considerazioni si è deciso di utilizzare il modulo *Ansys Additive Manufacturing* con la procedura guidata *Additive Wizard*.

In seguito vengono illustrati i principi di simulazione utilizzati dal modulo workbench.

## **Simulazione processo di stampa in Workbench**

La simulazione del processo di stampa presenta ancora diverse sfide e ostacoli da superare:

- *Discretizzazione locale*

Si cerca di generare una mesh che abbia le stesse dimensioni dello strato depositato

Le dimensioni della luce laser sono dell'ordine dei

- *Discretizzazione temporale*

Il tempo di realizzazione di un singolo strato è nell'ordine di secondi mentre il tempo necessario al modello per il calcolo può essere di ore.

### **Lumped Layer Approach**

Il metodo usato per simulare l'intera struttura in un modello di simulazione globale è chiamato *lumped layer approach*.

Permette di avere una visione generale e catturare il fenomeno delle tensioni e deformazioni fedelmente al reale processo di stampa.

Si basa sull'utilizzo di una tecnica che utilizza degli "*birth/death elements*" per simulare l'avanzamento del processo di costruzione.

Inoltre, anche le condizioni al contorno dei singoli elementi si evolvono come le superfici di convezione termica.

Il processo è completo quando tutti gli strati di elementi sono stati aggiunti.

I tempi di analisi e il time stepping non sono noti a priori ma dipendono dai parametri di processo impostati e vengono gestiti internamente dal programma.

Le simulazioni sono composte da una parte termica che modella i flussi di calore e da una parte strutturale che determina i fenomeni fisici.

All'interno di ciascuno strato vengono fatte delle simulazioni in sequenza dove in ogni stato dell'elemento e le condizioni al contorno, come la convezione, vengono aggiornate.

Il tempo di simulazione utilizzato in questo approccio non è lo stesso del processo reale di costruzione dato che, le assunzioni fatte hanno bisogno di un adattamento del tempo necessario e il risultato deve essere corretto alla fine.

Simulare l'intero processo di costruzione per una parte reale seguendo il modello di scansione del raggio richiederebbe un enorme tempo di calcolo rendendolo poco pratico.

Per ottenere una simulazione veloce devono essere adottate delle semplificazioni:

- La fisica termica e quella strutturale sono disaccoppiate
- Non si segue il percorso del raggio laser
- Molti *layer* di povere siano compresi in un “*finite elements layer*” (10-20 *layers*) chiamati “*SuperLayers*” poiché la cronologia delle temperature di ogni strato adiacente è simile, un approccio “*Lump Layer*” è appropriato.
- *Layer by layer addition*: il materiale viene aggiunto e riscaldato tutto in una volta per ogni strato di elemento.

Per le macchine di ultima generazione e i loro modelli di scansione, questa è una approssimazione ragionevole.

Gli effetti termici nel piano non contribuiscono in misura minore alla distorsione rispetto agli effetti termici della direzione di costruzione quindi il software non utilizzerà le informazioni del modello di scansione del percorso laser come input.

- *Applied temperature*: non viene applicato il flusso di calore ad una porzione di materiale ma, l'intero strato viene inizialmente impostato sulla temperatura di fusione.

Il presupposto è che i parametri di processo per la *build* siano stati impostati in modo appropriato in modo che:

1. la temperatura sviluppata sia sempre uguale o superiore a quella di fusione (nessuna mancanza di fusione)
2. la temperatura sviluppata non superi di molto la fusione.

- *Time step size*: durante la simulazione vengono utilizzate grandi dimensioni del passo temporale di integrazione.

Questo è sufficiente per catturare le deformazioni termiche e plastiche indotte che guidano la distorsione. Le curve localizzate di riscaldamento e raffreddamento non verranno catturate in dettaglio.

- *Supports*: i supporti sono rappresentati come un solido omogeneo ortotropico di cui vengono scalate le proprietà meccaniche.

Sebbene sia possibile fornire una geometria di supporto dettagliata, la modellazione in questo modo è sufficiente per acquisire:

1. la distorsione della parte
2. ottenere stime del fallimento del supporto.

- *Surrounding Powder*: nella tecnologia “*Powder Bed Fusion*”, non è necessario modellare esplicitamente la polvere circostante non fusa.

Invece, la trasmissione di calore nella polvere può essere spiegata in un approccio semplificato usando una condizione di confine convettiva all'interfaccia tra polvere e materiale solido.

- *Inert gas*: non viene modellato esplicitamente ma viene applicata una condizione convettiva sulla superficie della parte

**Nota:** il tempo di costruzione della macchina reale è approssimativamente il tempo di simulazione della fase di costruzione termica transitoria moltiplicato dove  $R$  è il numero di strati polvere depositi in un *super layer* di un elemento.

$$T_{build} = T_{simulation} (R)^{0.33} \quad R = \frac{Mesh_{height}}{Deposition_{thickness}}$$

## Dati dei materiali

Il processo di costruzione AM viene simulato da una simulazione transiente termica e da una statica strutturale.

Nell'analisi transiente termica deve essere risolto l'equilibrio:

$$[C] * \{\dot{T}\} + [K] * \{T\} = -\{Q(t)\}$$

Sono necessarie:

- Densità
- Conducibilità termica
- Calore specifico

Tutte le proprietà variano con la temperatura

Nell'analisi strutturale invece deve essere risolto l'equilibrio:

$$[M] * \{\ddot{u}\} + [C] * \{\dot{u}\} + [K] * \{u\} = \{F\} + \alpha \Delta T$$

I termini relativi alle forze di inerzia e allo smorzamento sono nulli.

Sono necessarie le seguenti proprietà del materiale:

- Modulo di Young
- Coefficiente di Poisson
- Coefficiente di espansione termica
- Curva caratteristica del materiale (tensione, deformazione)

Dato che il processo prevede che la polvere venga depositata alla temperatura di preriscaldamento e che venga fusa al laser, i valori di tutte le grandezze variano dalla temperatura della camera di costruzione fino alla temperatura di fusione.

I materiali più popolari per AM sono forniti come campioni nella libreria ANSYS Additive Materials:

- Acciaio inossidabile 17-4PH
- Acciaio inossidabile 316
- Lega di alluminio AlSi10Mg
- Inconel 625
- Inconel 718
- Lega di titanio Ti-6Al-4V

Nel caso in cui il materiale non sia inserito nel modulo *engineering data*, è possibile programmarlo se si dispone dei dati relativi alle proprietà elencate precedentemente.

## Generazione della Mesh

Ricordando che il processo di stampa additiva strato per strato è simulato con strati di elementi aggiunti uno sull'altro usando la tecnica di "*Birth/Death*" dell'elemento.

Pertanto, la mesh deve avere una dimensione uniforme nella direzione di costruzione (Z globale) e ogni strato di elemento deve avere la stessa altezza (coordinata Z costante).

La procedura guidata *Additive Wizard* permette di realizzare una *mesh cartesiana* o *tetraedrica* che approssima corpo per ottenere questi strati di mesh uniformi.

- *Cartesian Mesher*: crea una mesh voxel che si approssima la geometria del modello. Le feature di piccole dimensioni come le superfici curve e le superfici orizzontali o verticali che non sono multipli della dimensione della mesh non vengono approssimate in modo accurato a meno che non venga utilizzata una dimensione di mesh ridotta.

L'utilizzo di questo tipo di mesh permette di avere tempi di simulazione più bassi e risulta adeguato per la previsione delle tensioni e deformazioni residue.

- *Tetraedron Mesher*: crea una mesh di tetraedri conforme a una dimensione del layer specificata. Cattura bene la geometria ed è utile se ci sono curve organiche, piccole caratteristiche, come fori o parti con pareti sottili.

Bisogna fare attenzione per garantire che la geometria sia tagliata in modo tale da evitare slicing troppo sottile che può provocare elementi di forma irregolare e non esatta.

Normalmente la regolazione della dimensione del layer mesh o l'aumento della tolleranza relativa porta a una mesh di qualità superiore.

Utilizzando una *mesh tetraedrica*, il numero di nodi e di elementi sarà maggiore e i tempi di calcolo saranno più lunghi.

È consigliabile di utilizzare un “*super layer*” di elementi finiti di elementi cartesiani per rappresentare *10-20 strati reali di polvere*.

Ad esempio se il *Recoater* ha uno spessore dello strato di polvere di 25 micron (*Deposition thickness*), la dimensione dell'elemento deve essere compresa tra 0,25 e 0,5 mm.

## Supporti

I supporti sono stampati con lo stesso materiale della parte ma con strutture a parete sottile con meno massa della parte.

Nella simulazione modelliamo i supporti come un solido "omogeneo" equivalente piuttosto che come strutture a parete sottile. Indipendentemente dal fatto che i supporti siano predefiniti o generati automaticamente, sarà necessario ridimensionare le loro proprietà. (modulo elastico, il modulo di taglio, la densità e la conduttività termica).

I modi per farlo includono:

- Specifica di un “*overall multiplication factor*” che indica il rapporto tra l'area di supporto effettiva e l'area dell'area solida;
- Specificare i singoli “*multiplication factor*” per ciascuna direzione ortotropa di ciascuna proprietà del materiale;
- Specificare lo spessore della parete (T) e la lunghezza (L) per i supporti di tipo “*Block type*”, comunemente prodotti dagli strumenti di generazione del supporto al quale corrispondono fattori calcolati automaticamente.

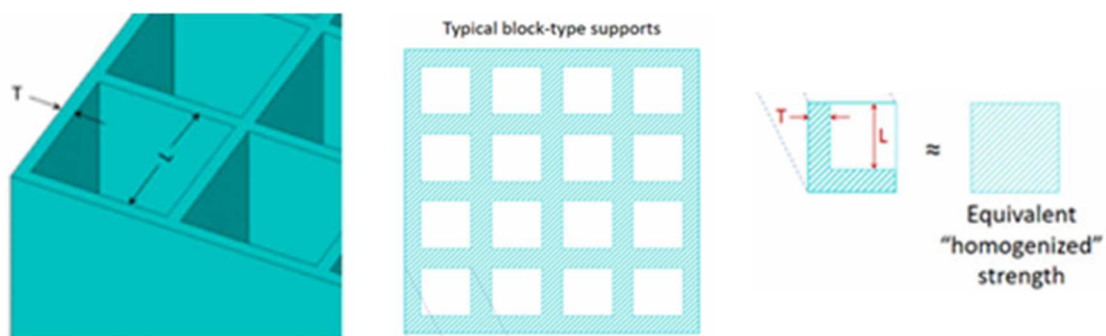


Figura 3.18 Supporti Automatici generati in Ansys Workbench



Nel caso si utilizzi una mesh tetraedrica, non vengono generati in automatico i supporti mentre se la geometria è approssimata da una mesh cartesiana, vengono generati automaticamente i supporti su tutte le superfici che superano l'*overhang angle* massimo.

## Definizione degli AM Steps e parametri di processo

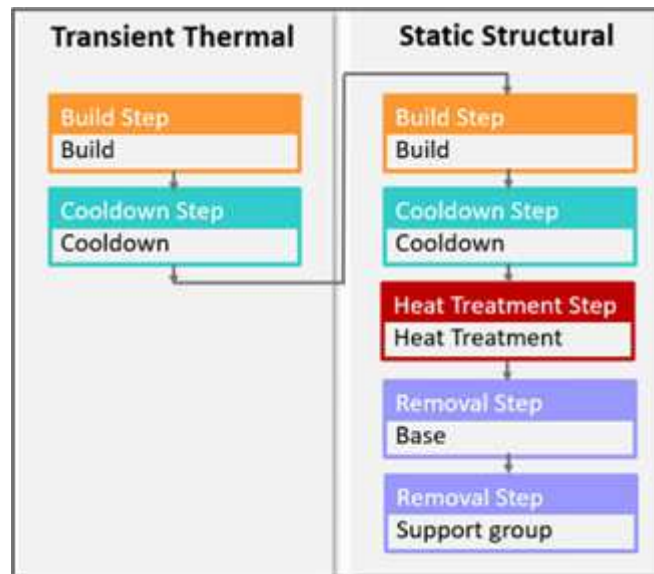


Figura 3.19 Steps di processo nella simulazione

È importante notare che i valori di distorsione e stress residuo possono essere influenzati dall'ordine in cui vengono rimossi i supporti ed è possibile specificarne l'ordine di rimozione.

È possibile simulare il trattamento termico distensione da che precede il distacco dalla base e la rimozione completa dei supporti per osservare i valori delle tensioni e deformazioni finali.

Successivamente vengono impostati i parametri di processo:

- *Deposition Thickness*: spessore del layer di materiale depositato dal recoater;
- *Hatch Spacing*: spazio tra due linee di scansione adiacenti del percorso del laser;
- *Scan Speed*: La velocità media alla quale il laser esegue la scansione, escluse le velocità di salto e velocità di accelerazione e decelerazione;
- *Dwell Time*: intervallo di tempo che intercorre tra la fine della scansione laser di uno strato e l'inizio della scansione laser del livello successivo. Include il tempo necessario per il riposizionamento della *recoater* e la deposizione di un nuovo strato di polvere;
- *Dwell Time Multiple*: è un moltiplicatore che rappresenta più di una parte durante la scansione e nuova deposizione del *layer* di materiale.

Se sulla piastra sono disposte più parti uguali con lo stesso orientamento, il moltiplicatore è il numero di parti;

Se devono essere posizionate parti diverse sulla piastra, il moltiplicatore è una stima del tempo necessario per costruire le altre parti rispetto alla parte da simulare.

- *Number of heat sources*: numero di sorgenti laser presenti sulla macchina.

L'impostazione degli Steps e dei parametri di processo vengono utilizzati per calcolare la durata del tempo fisico reale del processo di costruzione.

I parametri di processo variano in base al produttore della macchina e al materiale impiegato.

Successivamente vengono impostate le “*Build condition*” relative all'ambiente nella camera di costruzione:

- *Pre-heat temperature*: la temperatura iniziale della piastra di base
- *Gas temperature / powder*: temperatura del gas e della polvere nella camera di costruzione.
- *Gas convection coefficient*: coefficiente di convezione dalla parte al gas nella camera applicata solo alla parte superiore di uno strato appena depositato.

Nel processo DED, la convezione viene applicata anche alle pareti laterali

- *Powder convection coefficient*: coefficiente di convezione efficace dalla parte alla polvere nella camera di costruzione.

In genere questo è un valore molto piccolo ed è spesso ignorato.

- *Powder property factor*: un fattore di scala utilizzato per stimare le proprietà della polvere. L'applicazione meccanica applica il fattore alle proprietà del materiale solido per stimare le proprietà del layer di polvere.

Le proprietà dello stato in polvere vengono aggiunte durante il riscaldamento del nuovo strato (prima della sua successiva solidificazione e cooldown), prima dell'applicazione dello strato successivo. Il valore predefinito è 0,01.

Dopo aver impostato i parametri relativi al materiale, vengono definite le “*Cooldown Condition*” relative all'ambiente di costruzione relative all'ultimo *layer* stampato:

- *Room temperature*;
- *Gas / powder temperature*: temperatura di preriscaldamento del gas e della polvere nella camera di costruzione. Potrebbero avere valori differenti;
- *Gas Convection coefficient* : coefficiente di convezione dalla parte al gas nella camera e viene applicata solo all'ultimo layer stampato;
- *Powder convection coefficient*: coefficiente di convezione efficace dalla superficie della parte verso i layer di polvere depositati;

Per stimare, dividere la proprietà di conduzione della polvere (KXX) per una lunghezza di conduzione caratteristica nella polvere (ad esempio, un quarto della distanza dal confine della parte alla parete della camera di costruzione).

In genere questo è un valore molto piccolo ed è spesso trascurato.

## **Thermal Boundary condition**

C'è un'altra area di trasferimento del calore da considerare e che è associata alla piastra di base.

Durante il processo di costruzione, la piastra viene in genere riscaldata sul fondo per mantenere una temperatura costante compresa tra 100°C e 200°C.

Nella simulazione viene inserito un vincolo di temperatura o una superficie di convezione per la fase di build.

Al termine del processo di stampa, il riscaldamento della piastra di base viene rimosso e la parte costruita si raffredda fino alla temperatura ambiente.

Il raffreddamento è simulato da una superficie di convezione a temperatura ambiente applicata sulla superficie inferiore della piastra di base nella fase di *Cooldown*.

La durata del *Cooldown* step è stimata in base alla temperatura media della parte alla fine della costruzione, al suo volume e alle proprietà del materiale.

Utilizzando i valori di convezione e la temperatura della camera di costruzione, il *Mechanical* risolve la semplice equazione del trasferimento di calore per ottenere una stima del tempo di raffreddamento.

Viene eseguito un passaggio finale che forza tutte le temperature fino a quella della camera di costruzione per il successivo calcolo delle distorsioni e della sollecitazione.

## **Structural boundary conditions**

La superficie inferiore della piastra di base è ancorata al sistema di riferimento durante l'intero processo di stampa.

Questa condizione è rappresentata nell'analisi strutturale come una condizione al contorno tramite l'applicazione di un "*fixed support*" sul fondo della piastra di base.

Alla fine del processo di costruzione, la parte può essere rimossa dalla base ed è necessario applicare condizioni al contorno fisse a tre nodi sulla parte per vincolarla impedendo il movimento del corpo rigido nello spazio di lavoro.

## Heat Treatment after the Build

Dopo la costruzione di una parte (stampata in 3D), è necessario trattarla a caldo per alleviare le tensioni residue.

Il trattamento termico è un processo che permette di alterare le proprietà fisiche e chimiche di un materiale.

In un processo di ricottura, il metallo viene riscaldato in un forno a una temperatura particolarmente elevata, per alcune ore e, successivamente, lasciato raffreddare lentamente e spesso viene fatto prima di aver rimosso la parte dalla piastra di base.

Questi scenari possono essere simulati mediante un'analisi termica transitoria aggiuntiva separata per modellare il processo di trattamento termico.

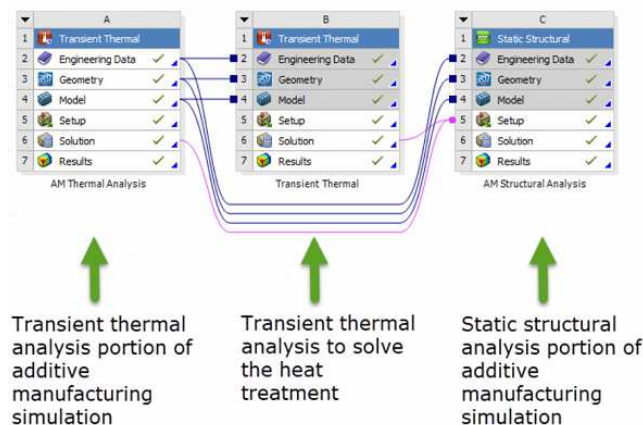


Figura 3.20 Flusso di lavoro per trattamento termico

L'impostazione del trattamento termico viene definita nella procedura automatica Wizard oppure impostata manualmente alla fine della fase di build.

## 3.7 Processo produttivo del nuovo componente in ottica AM

Il processo produttivo per parti realizzate in Additive si divide in tre fasi principali, a loro volta scomposte in una serie di operazioni elementari.

Il *pre-processing* che raggruppa tutti i passaggi necessari per la preparazione della macchina alla successiva fase di costruzione della parte.

Una volta stampato il componente è sempre necessaria una fase di *post-processing*.

Il numero delle operazioni da eseguire è dipendente dalla precisione della parte da ottenere e spesso sono necessarie delle lavorazioni convenzionali per asportazione di truciolo o elettroerosione per rispettare le tolleranze di progetto.

L'individuazione di tutte le operazioni necessarie alla realizzazione è fondamentale per poter generare un modello di costo generale da poter adattare ad una vasta gamma di parti realizzate in AM.

## Pre-processing

- **Setup della macchina**( impostazione parametri di processo)  
Caricamento della geometria, velocità di scansione e potenza del laser, spessore del layer depositato.
- **Caricamento del fusto** con materiale di costruzione  
Prelievo del fusto dal locale di stoccaggio, trasporto e caricamento del serbatoio della macchina.
- **Montaggio del piatto di stampa** nel volume della camera
- **Riscaldamento della camera** di stampa ad una temperatura di circa **200°C**
- Riempimento della camera con **gas inerte**

## Build

Building della parte (stampa dei supporti e del componente)

- **Passaggio del recoater** e deposizione della polvere sull'intera area del piatto stampa
- **Sinterizzazione della polvere** mediante laser prima nell'interno della sezione, poi sul contorno della stessa
- **Passaggio del recoater** per deposizione di un nuovo strato di polvere
- **Iniezione del gas inerte** per mantenere la concentrazione costante

## Post-processing

- **Aspirazione della polvere** in eccesso che ha riempito la camera fino all'altezza max del pezzo
- **Aspirazione del gas inerte** rimasto
- Apertura della camera ed **estrazione del piatto stampa** con attaccato il pezzo e supporti (**40-50 Kg**) alla **T= 200°C**
- **Trasporto del piatto stampa** con attaccato il pezzo dalla macchina al forno per trattamento termico
- **Trattamento termico** di distensione delle tensioni residue
- **Distacco del pezzo dal piatto stampa** (Taglio dei supporti mediante elettroerosione)
- **Rimozione meccanica dei supporti** dal pezzo:

Supporti solidi: Tornitura, Fresatura

Supporti di superficie : se possibile anche manualmente

- Eventuali **lavorazioni di finitura superficiale** da eseguire
- **Rettifica** del piatto stampa (**0,1- 0,2 mm**) ad ogni stampa

Le parti metalliche realizzate mediante tecnologie hanno livelli di finitura e tolleranze (geometriche e dimensionali) comparabili con quelli ottenibili mediante le tecniche di fonderia tradizionale. Questo richiede una rilavorazione alle macchine utensili che deve essere svolta considerando da un lato le caratteristiche dei materiali lavorati (spesso di difficile truciolabilità), dall'altro le geometrie non convenzionali permesse dalle tecnologie additive. Inoltre, in alcune applicazioni, è necessario svolgere post-trattamenti per migliorare le caratteristiche metallografiche e meccaniche del manufatto.

Questa necessità è limitata nella realizzazione di manufatti in polimero, dove spesso non sono necessarie operazioni di finitura superficiale e, l'intera fase di post processing, si riduce alla rimozione dei supporti.

### 3.8 Modello di costo per parti AM

Partendo dal processo produttivo sintetizzato nel paragrafo è stato generato un modello di costo che permetta di stimare in modo accurato il costo di un generico componente realizzato tramite processi AM.

Come il processo produttivo, anche questo è stata suddivisa in tre parti principali:

- Costo Pre-Processing;
- Costo della fase di Build;
- Costo Post-Processing.

e al loro interno sono comprese tutte le singole operazioni e lavorazioni da eseguire.

Il costo totale della parte è dato da:

$$C_t = C_{pre-processing} + C_{build} + C_{post-processing}$$

#### Costo della fase Pre-Processing

In questa fase vengono svolte manualmente tutte le operazioni di preparazione della macchina e risulta necessaria la presenza di almeno un operatore.

Le operazioni sono compiute manualmente ed è richiesta la presenza del personale per tutta la durata, fino alla successiva fase di build.

Il costo del pre processing è dato dalla somma di un costo relativo al personale e da una parte relativa alla macchina.

$$C_{Pre-Processing} = c_{ph} * (T_{cf} + T_{cb}) + c_{omh} * (T_{rp} + T_{cg})$$

$c_{ph}$	Costo orario del personale	€/h
$T_{cf}$	Tempo necessario per il trasporto dal magazzino e caricamento della polvere nel serbatoio della macchina	h
$T_{cb}$	Tempo necessario per il posizionamento del piatto di stampa	h

$c_{omh}$	Costo orario della macchina	€/h
$T_{rp}$	Tempo necessario riscaldamento del piatto stampa	h
$T_{cg}$	Tempo di riempimento camera di costruzione con gas inerte	h

Si stima il costo totale della fase di pre-processing come il prodotto di un costo orario per il tempo impiegato per compiere la singola operazione.

In questa fase l'operatore prepara la macchina prelevando il contenitore della polvere dal magazzino e caricando il serbatoio.

Successivamente la macchina viene avviata e inizia la fase di riscaldamento del piatto stampa e il riempimento della camera di costruzione con gas inerte.

## Costo della fase di Build

È riferito al costo effettivo della fase di stampa e viene suddiviso in tre termini principali:

- Costo indiretto;
- Costo del materiale utilizzato;
- Costo dell'energia utilizzata.

$$C_{build} = C_{indirect} \cdot T_{build} + w \cdot C_{material} + E_{build} \cdot C_{energy}$$

## Costi Indiretti

$$C_{indirect} = C_{ph} \cdot f_u + C_{gas} \cdot f_{consumo} + \frac{R}{T_{lavorative} \cdot f_{efficienza}}$$

$C_{ph}$	Costo orario del personale	€/h
$f_u$	< 1 Fattore di utilizzo del personale	
$C_{gas}$	Costo unitario del Gas inerte	€/m <sup>3</sup> h
$f_c$	< 1 Fattore di consumo del gas inerte	
a	Rata ammortamento annuale	
$P_m$	Prezzo di acquisto della macchina	€
$T_{lavorative}$	Ore lavorative in un anno	h
$f_{efficienza}$	Fattore che tiene conto delle inefficienze e fermi macchina in un anno	

Il termine  $C_{indirect}$  tiene conto di più fattori che si verificano durante la fase di build.

Il personale non deve necessariamente essere presente durante tutta la fase di stampa ma, di norma, esegue solamente dei controlli periodici per verificare che il pezzo non interferisca con il recoater in seguito a delle deformazioni eccessive non previste che, nel peggiore dei casi potrebbero causare dei danni.

Di norma questo si potrebbe verificare nella prima metà del tempo di stampa.

Nel caso in cui non si verificano dei danni, il pezzo viene comunque scartato.

Durante il tempo di stampa l'operatore può eseguire controlli ed eseguire operazioni su più macchine, pertanto è previsto un fattore di utilizzo del personale che tiene conto della sua occupazione.

Si raggruppa nei costi indiretti il termine relativo al consumo di gas nella camera di costruzione che non è tenuta stagna.

I costruttori prevedono una immissione ad intervalli regolari del gas inerte durante tutta la fase di costruzione.

Per tenere conto della discontinuità si considera un fattore di utilizzo del gas inerte.

L'ultimo termine preso in considerazione nei costi indiretti è la parte di costo unitario relativo all'ammortamento della macchina.



Si prevede di ammortizzare il costo dell'investimento iniziale in un massimo di 5 anni dato che il settore è in rapida evoluzione e una tecnologia attuale potrebbe diventare obsolete in un tempo ridotto. Si considera un piano di ammortamento a Rata Costante:

$$R = C \frac{i}{1 - 1/(1 + i)^n}$$

- R = Importo della rata annuale;
- C = Capitale iniziale ( prezzo di acquisto della macchina);
- i = Tasso di interesse annuale sul capitale residuo;
- n = Numero di rate.

La Rata annuale calcolata deve essere ripartita sulle ore lavorative in un anno(  $T_{lavorative}$  ).

Si considera un fattore di utilizzo  $f_{utilizzo}$  che tiene conto delle inefficienze della macchina e delle operazioni periodiche necessarie per la manutenzione.

## Tempo di costruzione

Per il calcolo dei costi indiretti è necessario il tempo effettivo di realizzazione della parte

$$T_{build} = T_{simulation} \left( \frac{Mesh_{height}}{Deposition_{thickness}} \right)^{0.33}$$

$T_{simulation}$	Tempo di simulazione Ansys Additive	h
$Mesh_{height}$	Element size della Mesh	mm
$Deposition_{thickness}$	Spessore layer polvere	mm

Il tempo di stampa  $T_{build}$  viene ricavato direttamente dal Worksheet delle soluzioni di Ansys Workbench, al termine della simulazione e risulta:

- Direttamente proporzionale alla durata della simulazione;
- Proporzionale alla grandezza degli elementi della mesh;
- Dipendente dallo spessore del layer dello strato di polvere.

Questa formula empirica permette di fare una stima del tempo necessario alla costruzione in fase preliminare di progettazione e potrebbe differire leggermente dal tempo effettivo di stampa.

## Costo del materiale

$$w = \rho \cdot (1 + f_{pp}) \cdot (V_{supporti} + V_{pezzo})$$

$$C_{material} = \text{Prezzo del materiale metallico (€ / kg)}$$

$w$	Massa di materiale Impiegato per supporti e parte	$m^3$
$\rho$	Densità del materiale metallico	$Kg/m^3$
$f_{pp}$	Fattore di Perdita della polvere	adimensionale
$V_{supporti}$	Volume totale dei supporti	$m^3$
$V_{pezzo}$	Volume totale della parte	$m^3$

Il costo del materiale metallico impiegato dipende dal volume della parte e dei supporti.

Le informazioni relative ai volumi vengono ricavate direttamente dalla modellazione.

*Spaceclaim* ha un tool di misura che permette di ricavare velocemente il volume della parte modellata.

Si considera un fattore di perdita della polvere ( $f_{pp}$ ) che tiene conto del materiale parzialmente fuso e scartato dal sistema di aspirazione e filtraggio della macchina.

La massa della parte e dei supporti viene moltiplicata per prezzo di mercato attuale (€/kg) del materiale utilizzato.

## Costo dell'energia

$$E_{build} = Power_{consumption} \cdot T_{build}$$

$$C_{energy} = \text{Prezzo dell'energia (€/KWh)}$$

$E_{build}$	Energia necessaria per la stampa	KWh
$Power_{consumption}$	Potenza media della macchina	KW
$T_{build}$	Tempo di costruzione della parte	h

Ricavata da catalogo la potenza media della macchina e considerando il tempo di costruzione, si ricava l'energia (KWh) consumata dalla macchina.

Il costo totale dell'energia consumata nella fase di *build* della parte si ottiene moltiplicando il prezzo dell'energia elettrica nel mercato attuale per la quantità utilizzata.

## Post processing

La fase di post processing è necessaria e racchiude tutte le operazioni necessarie affinché la parte rispetti le specifiche di progetto.

Comprende i costi delle seguenti operazioni:

- Costo personale necessario per aspirazione della polvere, del gas e per la rimozione del piatto stampa
- Trattamento termico di distensione delle tensioni residue;
- Costo dell'elettroerosione a filo per la rimozione dei supporti;
- Lavorazioni di tornitura e fresatura e alesatura per finitura superficiale;
- Rettifica del piatto di stampa necessaria dopo ogni stampata.

$$C_{post-processing} = C_{personale} + C_{distensione} + C_{elettroerosione} + C_{aspruciolo} + C_{rettifica}$$

## Costo del personale

Il costo del personale considera le operazioni da eseguire immediatamente successive alla stampa, necessarie per la rimozione del piatto e della parte e il successivo posizionamento nel forno per il trattamento di distensione.

Nel costo relativo al personale non vengono inclusi i termini relativi al trattamento di distensione e alle lavorazioni sottrattive di finitura della parte e del piatto stampa.

$$C_{personale} = C_{ph} \cdot (T_{asppolvere} + T_{aspgas} + T_{estrpiatto})$$

$C_p$	Costo del personale	€
-------	---------------------	---

$C_{ph}$	Costo orario del personale	€/h
$T_{asppolvere}$	Tempo di aspirazione polvere	sec
$T_{aspgas}$	Tempo di aspirazione del gas	sec
$T_{estripiatto}$	Tempo di estrazione del piatto	sec

## Costo trattamento termico e finitura

Il pezzo viene sottoposto ad un trattamento termico di distensione delle tensioni residue che dura da un minimo di qualche ora ad un massimo di qualche giorno in relazione alle caratteristiche del pezzo che si vogliono ottenere.

Il costo per la singola parte da trattare risulta difficile da stimare.

Dopo il trattamento di distensione la parte deve separata dal piatto di stampa tagliando i supporti con elettroerosione a filo.

Per stimare il costo di questa lavorazione si considera un costo orario comprendente sia la quota dovuta alla macchina e quella dovuta all'operatore ed il tempo necessario.

$$C_{elettroerosione} = C_{elettroerosione\ h} \cdot T_{elettroerosione}$$

$C_{elettroerosione\ h}$	Costo orario elettroerosione a filo	€
$T_{elettroerosione}$	Costo orario del personale	€/h

Dopo la rimozione dei supporti, le superfici funzionali della parte devono essere rilavorate alle macchine utensili per rispettare le tolleranze di progetto.

Le lavorazioni per asportazione di truciolo si possono dividere in sgrossatura, semifinitura e finitura.

Nella rilavorazione di un componente realizzato con tecnologia PBF potrebbero non essere necessari tutti i passaggi.

$$C_{asptruciolo} = C_{ATsgrossatura} + C_{ATsemifinitura} + C_{ATfinitura}$$

Una volta terminata la fase di *build* di una o più parti sullo stesso piatto stampa, risulta necessaria la rettifica della piastra stessa.

I costi delle lavorazioni sottrattive sulla parte e sul piatto vengono valutati come prodotto di costi orari che comprendono la quota dovuta all'operatore e alla macchina e il tempo necessario per eseguirla.

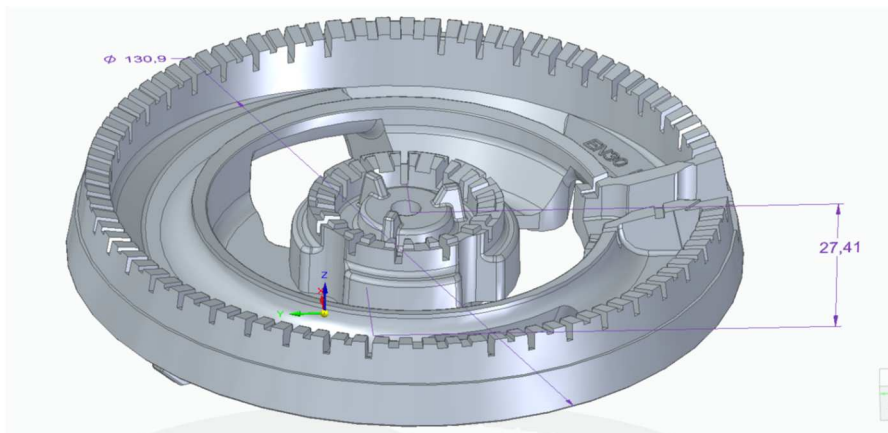
## 4 CASO STUDIO

In questo capitolo verrà introdotto un caso studio relativo alla modifica e alla costruzione di un componente in ottica di additive manufacturing.

Pertanto, verrà applicato il metodo relativo alla progettazione e alla definizione dei costi ad un caso studio specifico andando ad analizzare i risultati ottenuti. In particolare, si focalizza l'attenzione sul nuovo design ottenuto e verificato tramite alcune simulazioni strutturali e, successivamente, sulla possibilità di poter considerare un processo produttivo alternativo rispetto a quello convenzionale mediante delle simulazioni del processo di costruzione e su un modello di costo per parti realizzate con le tecnologie di Additive Manufacturing.

### 4.1 Modello Iniziale ( AS-IS)

Il caso studio è stato fornito dalla DEFENDI ITALY SRL e si tratta di una coppia di stampi matrice e punzone per la produzione di un bruciatore a tre corone impiegato da diversi marchi di piani cottura per uso domestico

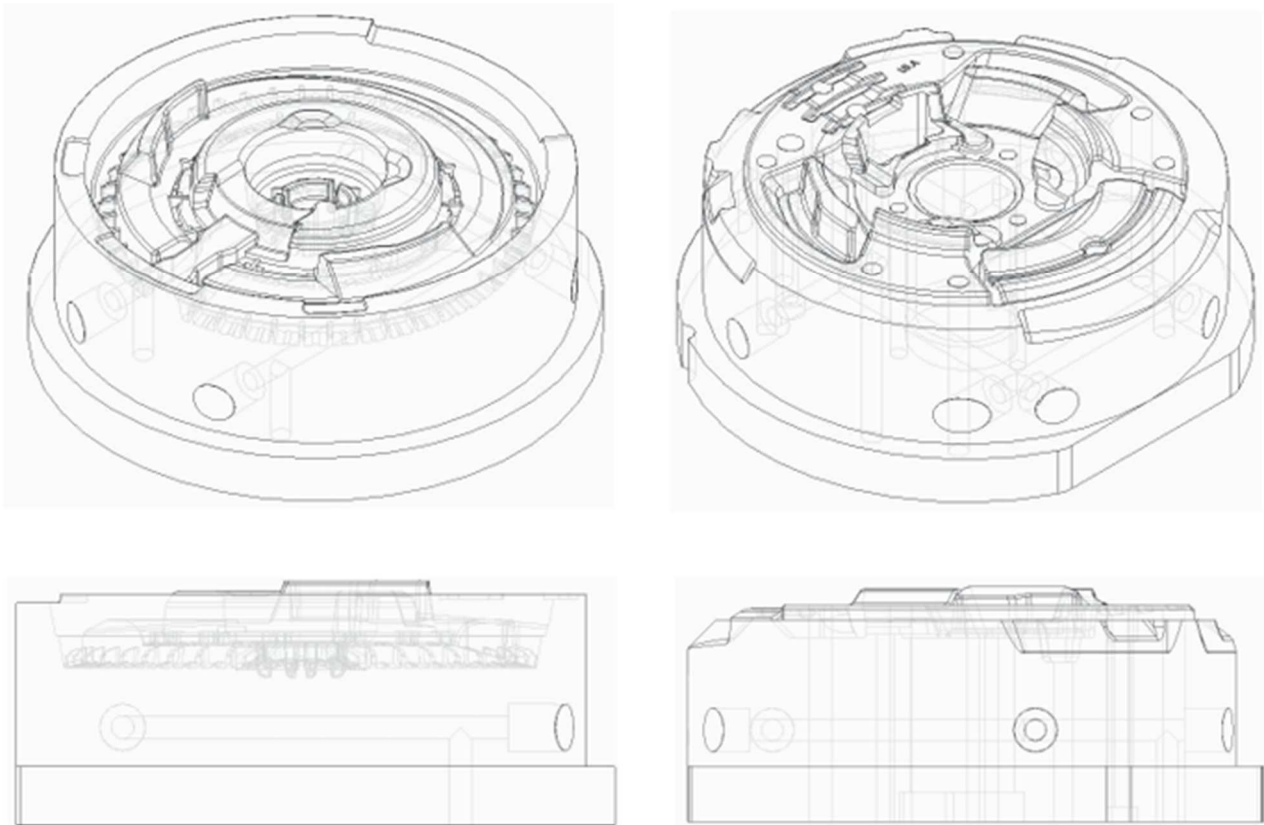


*Figura 4.1 Spartifiamma a tre corone*

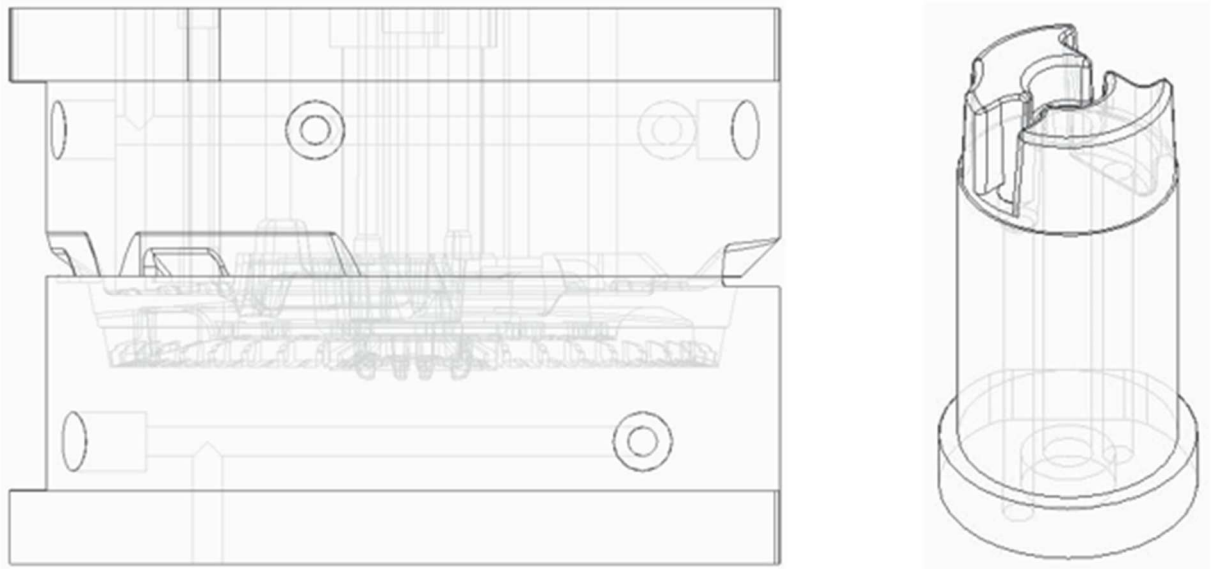
Il componente ha un diametro massimo di 130.9 mm e una altezza di 27,4 mm e presenta importanti variazioni di sezione e spessori molto variabili.

Sul componente sono ammesse tolleranze dimensionali di 0.2 mm.

Lo spartifiamma è realizzato in una lega di alluminio chiamata Pyral che ha una temperatura di fusione di 550°C, superiore a quella dell'alluminio puro e viene prodotto mediante pressofusione dell'alluminio tramite una coppia di utensili matrice e punzone che generano una cavità interna per il materiale fuso.



*Figura 4.2 Semistampi Matrice e Punzone*



*Figura 4.3 Accoppiamento e inserto centrale*

Dalle viste frontali ed isometriche i due elementi matrice e punzone hanno dei canali di raffreddamento all'interno ottenuti posizionando la parte in una maschera ed eseguendo delle operazioni di foratura.

Questa lavorazione lascia dei fori di apertura sulle superfici laterali di entrambi i semistampi che dovranno essere chiusi mediante tappi in teflon per garantire la tenuta del circuito di raffreddamento.

L'estrazione del calore avviene in due modi:

- Circolazione continua di liquido refrigerante nei canali del circuito
- Distribuzione omogenea di una miscela di liquido refrigerante e distaccante, direttamente sulla superficie dei semistampi al termine di ogni ciclo di pressofusione

Nella parte superiore viene ricavata l'impronta mediante elettroerosione che garantisce l'ottenimento di tolleranze dimensionali pari a 0,05 mm.

Sia la matrice che il punzone sono posizionate all'interno di piastre portastampo che inglobano i canali di colata e consentono di inserire più impronte contemporaneamente in modo da avere più parti in una sola stampata.

Entrambi i semistampi sono accoppiati con le piastre portastampo con una tolleranza di accoppiamento H7/g6.

Sul punzone, la parte fissa dei due semistampi, sono presenti dei fori per le barre di estrazione che hanno il compito di staccare il pezzo alla fine del ciclo di pressofusione.

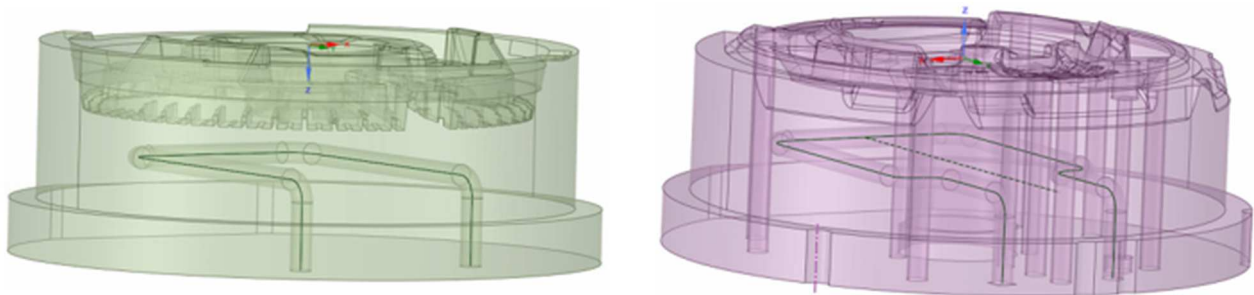
All'interno è presente anche un inserto di forma cilindrica non raffreddato nel quale sono presenti solo i fori di estrazione.



## 4.2 Modifiche nel design in ottica AM

A partire dal modello iniziale sono state valutate le modifiche volte principalmente alla modifica della struttura interna del raffreddamento, sostituendo i canali rettilinei realizzati mediante foratura con una struttura reticolare del tipo “*Lattice Cooling*” con funzione strutturale e di raffreddamento.

Il design definitivo è stato ottenuto per step partendo da una riprogettazione dei soli canali di raffreddamento fino alla struttura reticolare.



*Figura 4.4 Redesign dei canali di raffreddamento*

Questa soluzione permette di evitare brusche deviazioni del fluido di raffreddamento e, allo stesso tempo, di semplificare il processo produttivo evitando le operazioni di foratura per la realizzazione dei canali interni e l’applicazione dei tappi esterni.

I processi AM presuppongono un modello alleggerito e spessori contenuti, pertanto la realizzazione di un componente massivo risulta molto complessa o impossibile.

Inoltre la polvere di acciaio per utensili ha un costo considerevolmente più alto del semilavorato di partenza utilizzato nel processo produttivo convenzionale.

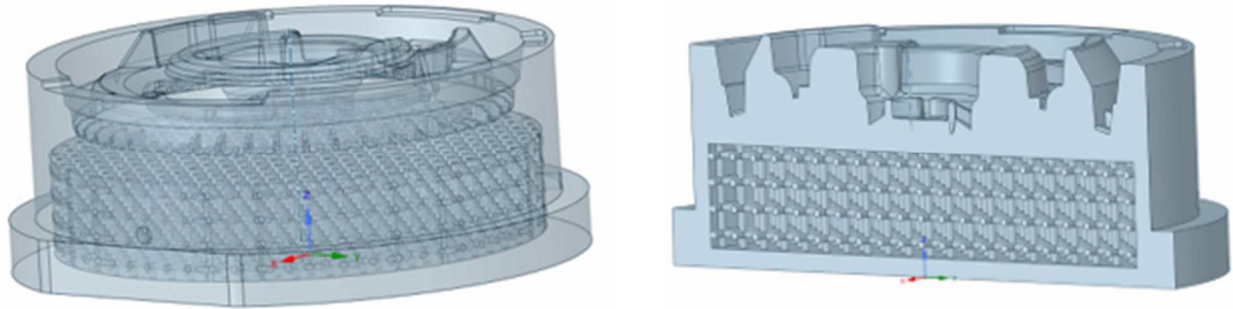
Questa soluzione non verrà considerata nelle analisi successive.

Nella pressofusione dell’alluminio non è necessario un raffreddamento capillare in specifiche zone dello stampo.

allora si ipotizza una soluzione differente di tipo “*Lattice Cooling*”.

Mediante gli strumenti presenti in *Spaceclaim* viene modellata una cavità interna mantenendo uno spessore minimo delle pareti di 5 mm.

Utilizzando le superfici interne della cavità viene tagliato il reticolo precedentemente generato in Solid Edge e unito al corpo dello stampo in modo da creare un unico solido.



*Figura 4.5 Modello reticolare non autosupportante*

Il reticolo costituito dall'intersezione di travi perpendicolari e parallele al piano della base che intersecano ma risulta impossibile da realizzare.

Molte superfici all'interno hanno una inclinazione minore dell'*overhang angle* minimo di  $45^\circ$  per generare superfici autosupportanti.

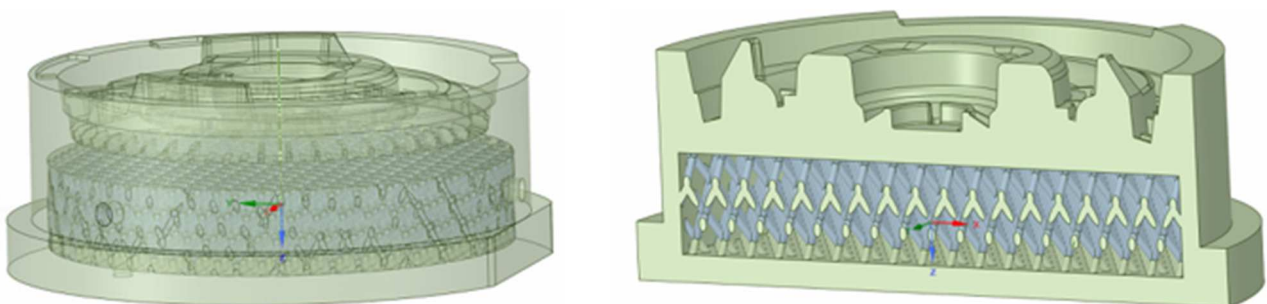
Questa soluzione è da scartare dato che, durante il processo di costruzione, genera dei supporti impossibili da rimuovere.

Per risolvere il problema, il reticolo è stato modificato cambiando l'angolo tra gli elementi che lo compongono.

Le travi hanno tutte una inclinazione di  $60^\circ$  rispetto al piano orizzontale, maggiore dell'angolo minimo richiesto per avere superfici autosupportanti.

Sulla superficie laterale cilindrica sono previsti dei fori per l'aspirazione della polvere residua nella parte interna che non potrebbe essere estratta se non dai fori per l'ingresso e uscita.

I fori di scarico hanno un diametro di 8 mm affinché siano autosupportanti.



*Figura 4.6 Modello reticolare autosupportante*

Il modello con reticolo autosupportante presenta comunque delle criticità nel funzionamento e nella geometria.

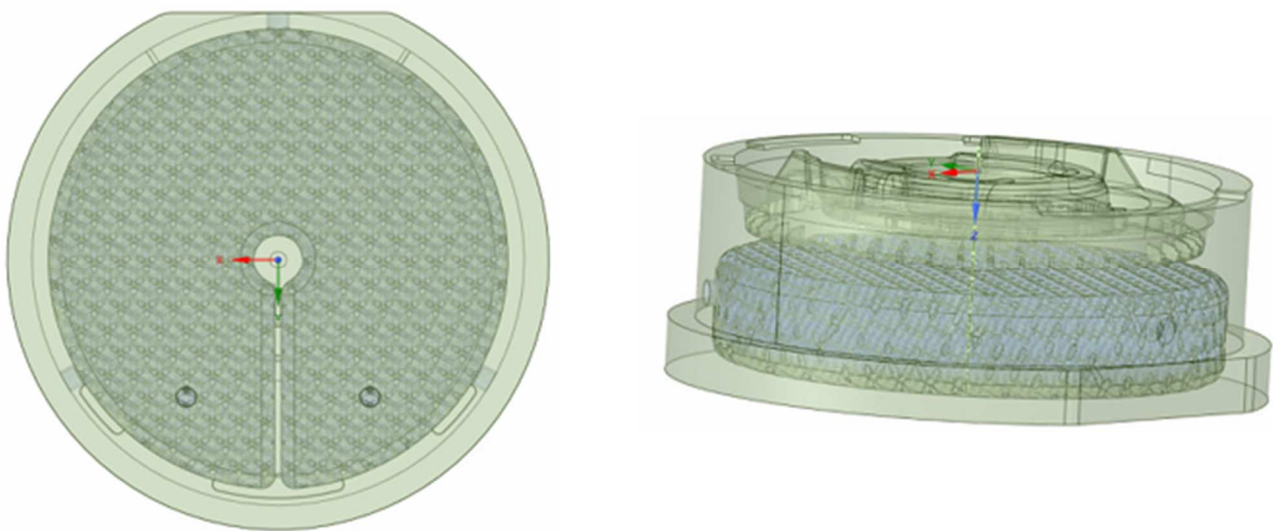
Nella parte inferiore sono presenti i fori per l'ingresso e l'uscita del fluido refrigerante che devono accoppiarsi con le rispettive sedi sulla macchina e non possono essere ricollocati in altri punti del modello.

All'interno della struttura reticolare, il fluido non è obbligato nel seguire un percorso stabilito e alcune parti della superficie della forma non si raffredderebbero correttamente.

Viene inserita una paratia di separazione e un rinforzo centrale che separano l'ingresso del fluido dall'uscita e per avere una circolazione del migliore del fluido.

In corrispondenza dell'unione tra la superficie laterale, la parte superiore dell'impronta e la superficie di base si genera uno spigolo vivo e una brusca variazione di sezione che potrebbe generare un aumento della tensione interna in fase di esercizio.

Gli spigoli vivi all'interno della cavità e il rinforzo centrale vengono raccordati con una superficie di raccordo di raggio 4 mm.



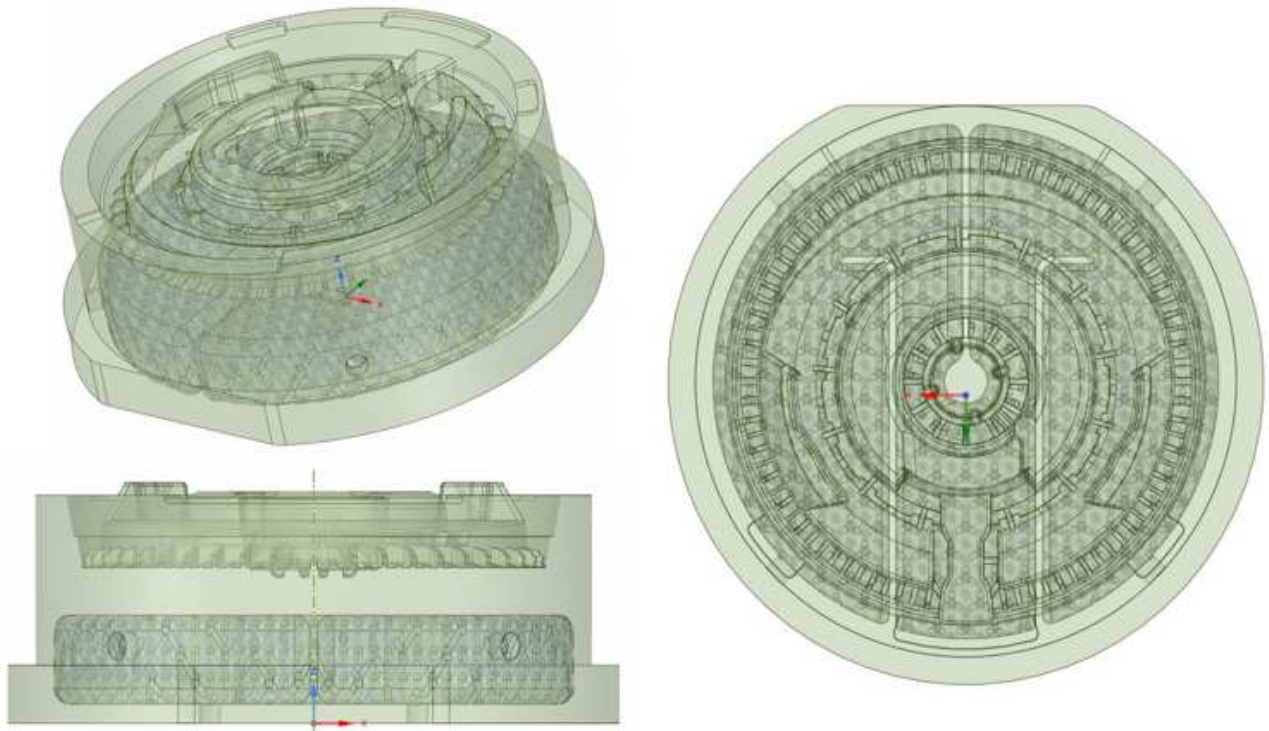
*Figura 4.7 Modello reticolare con rinforzo centrale e paratia*

Rispetto al sistema di raffreddamento originale, il *Lattice cooling* risulta molto sovradimensionato. Si può ridurre ulteriormente l'altezza della camera di raffreddamento reticolata e l'altezza totale del modello generandone una versione ribassata.

### 4.2.1 Modello definitivo (TO-BE)

Dalle modifiche progressive modificate validate mediante analisi strutturali semplificate è stato generato il modello definitivo della matrice che sarà sottoposto ad una ulteriore verifica nelle fasi successive.

La matrice è il componente più critico dal punto di vista strutturale tra i due semistampi, pertanto anche il punzone verrà modificato seguendo le stesse indicazioni.

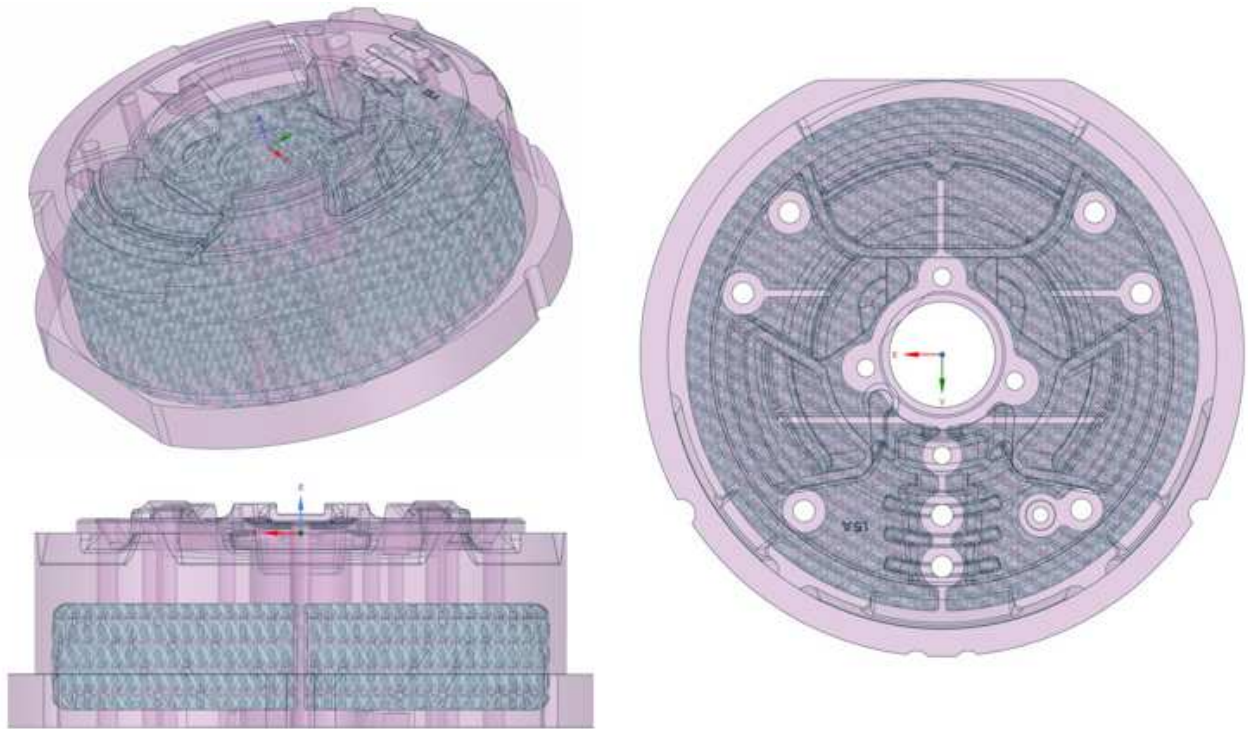


*Figura 4.8 Modello definitivo della matrice*

Il modello definitivo della matrice presenta ulteriori modifiche rispetto a quello precedente:

- Lo spessore minimo del materiale sotto l'impronta è di 10 mm per aumentarne la rigidità strutturale;
- Inserimento di tre paratie di spessore 2mm per migliorare il sistema di raffreddamento;
- Inserimento di raggi di raccordo di 4mm degli elementi interni alla cavità;
- L'altezza totale dello stampo è rimasta invariata per poter essere inserito nella piastra portastampo già esistente;
- Sono previsti 4 fori di scarico per la polvere sulla superficie laterale in quanto non è possibile utilizzare quelli nella parte inferiore;
- Il peso della nuova parte è di 5,49 kg rispetto ai 7,57 kg del modello originale.

La matrice è il componente più critico dal punto di vista strutturale in quanto non presenta una superficie dell'impronta maggiore e una struttura alleggerita meno rigida.



*Figura 4.9 Modello definitivo del punzone*

Le modifiche allo stampo punzone seguono quelle fatte sul modello della matrice.

Devono essere mantenute le sedi cilindriche degli estrattori che hanno funzione strutturale. Sfruttando la disposizione degli elementi cilindrici e unendoli tramite delle paratie si crea un percorso per il fluido di raffreddamento dal foro di ingresso a quello di uscita.

Il nuovo modello del punzone presenta le seguenti caratteristiche:

- Spessore del materiale sotto l'impronta pari a 10 mm;
- Sedi cilindriche degli estrattori di spessore 3mm;
- Sistema di paratie interno di spessore 2 mm;
- Raccordi delle superfici all'interno della cavità di raggio 4mm;
- Il peso della nuova parte è di 5,23 kg rispetto a 7,47 kg del modello originale.

## 4.3 Simulazioni strutturali

Le modifiche del modello iniziale vengono validate mediante delle simulazioni statiche strutturali semplificate in modo da avere un riscontro in tempi brevi.

### Simulazione sul modello originale

In mancanza di dati sperimentali sui valori massimi di tensione e deformazione raggiunti dallo stampo si procede cercando di riprodurre in modo semplificato le condizioni di esercizio.

Sono stati impostati i seguenti parametri:

- *Durata simulazione:* 1 sec
- *Mesh:* linear mechanical 1 mm
- *Andamento grandezze fisiche:* Rampa fino al valore massimo
- *Materiale:* Acciaio 1.2344

Condizioni al contorno:

- *Pressione Alluminio Fuso:* 40 Mpa
- *Pressione di chiusura dei semistampi:* 50 Mpa
- *Temperatura costante di esercizio:* 280°C

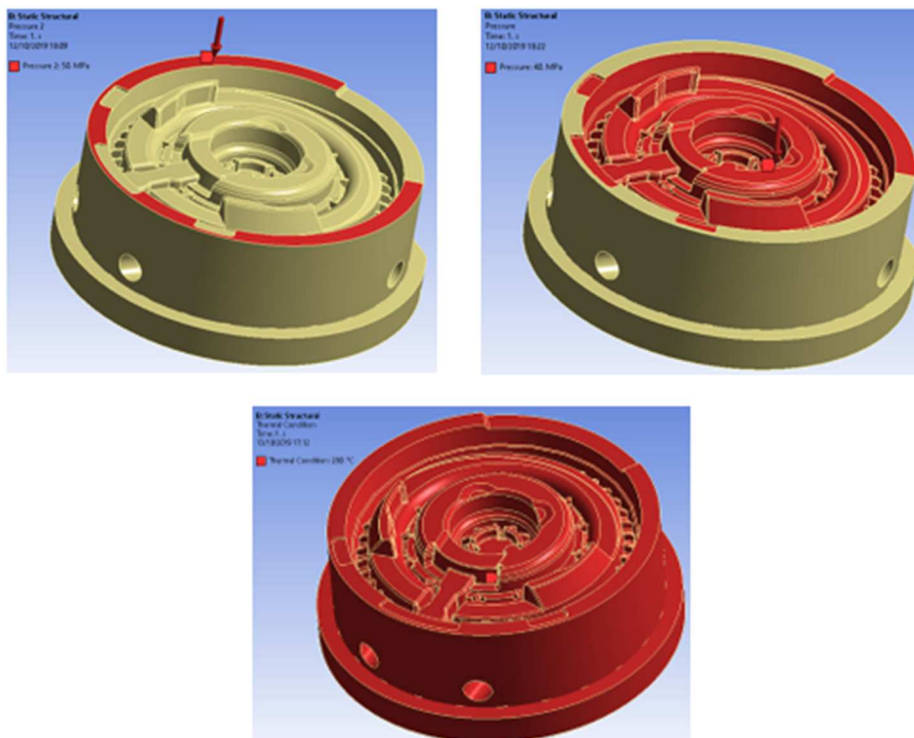
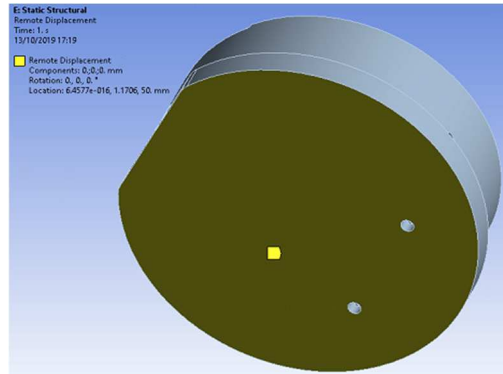


Figura 4.10 Applicazione della pressione e della temperatura

Vincoli:

- *Remote displacement* sulla superficie inferiore
- *Compression support only* sulla superficie inferiore



*Figura 4.11 Applicazione dei vincoli*

La combinazione dei due vincoli sulla stessa superficie permette di bloccare la matrice nello spazio di lavoro e lasciare libera la deformazione del pezzo nelle tre direzioni dello spazio.

Il supporto di compressione impedisce la deformazione della superficie inferiore nella direzione di applicazione de carico, simulando la piastra inferiore di supporto.

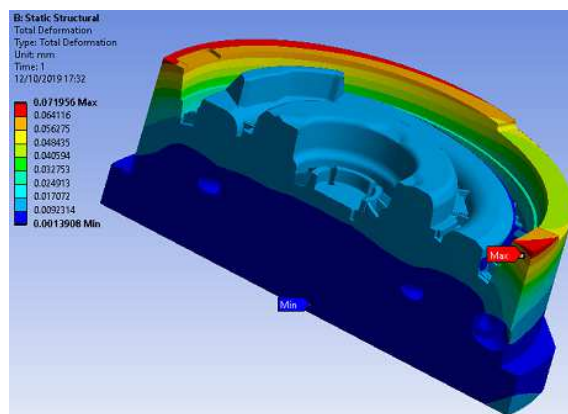
Non viene considerato l'effetto della piastra portastampo che limita la deformazione radiale sul piano XY.

L'aggiunta di un ulteriore vincolo sulla superficie laterale cilindrica comporta un aumento della complessità del modello e, conseguentemente di calcolo.

L'impostazione della temperatura sull'intero corpo permette di considerare l'effetto della variazione modulo elastico diminuendo la resistenza meccanica.

I risultati ottenuti sono:

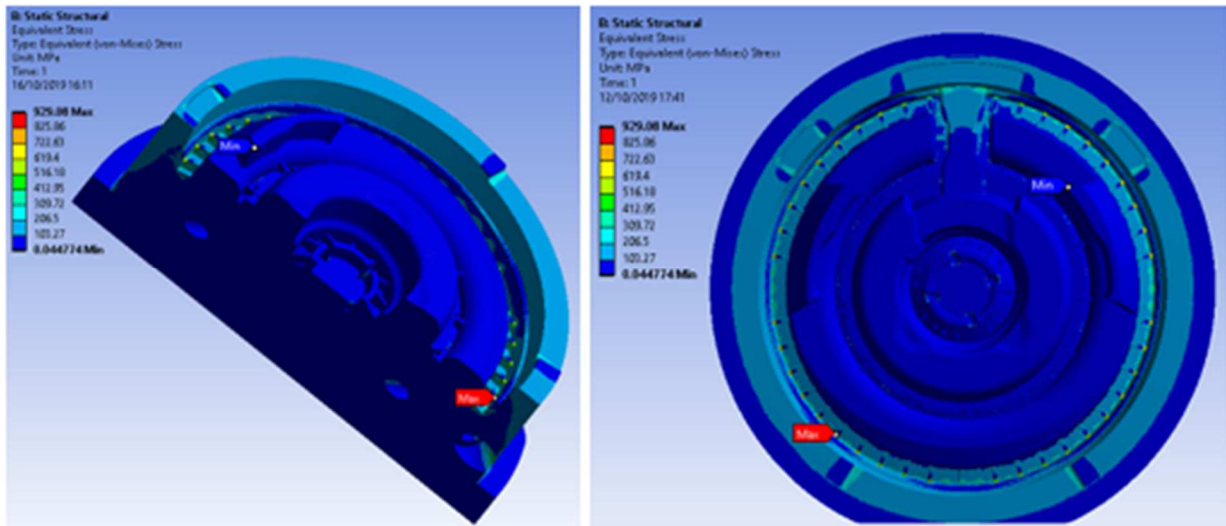
- Deformazione totale
- Tensione equivalente di Von Mises



*Figura 4.12 Deformazione del modello originale*

La deformazione sul modello originale è di 0,072 mm sulla corona circolare dove è presente l'effetto combinato della pressione di chiusura e quella dell'alluminio fuso.

Nel volume sottostante l'impronta le deformazioni sono molto contenute e la parte può essere alleggerita internamente.



*Figura 4.13 Tensione equivalente di Von Mises Modello originale*

La tensione equivalente di Von Mises massima si raggiunge all'interno dell'impronta, sulle pareti sottili per la modellazione delle cave del bruciatore e vale 929,08 Mpa al di sotto della tensione di snervamento del materiale.

In tutti gli altri punti dello stampo la tensione raggiunge valori inferiori a 500 Mpa.

Nella zona inferiore dello stampo, nella quale sono alloggiati i canali di raffreddamento, la tensione equivalente è molto bassa.



## Simulazione sul modello con reticolo inclinato 60°

Le impostazioni del setup iniziale, materiale, carichi e vincoli sono le stesse dell'analisi precedente.

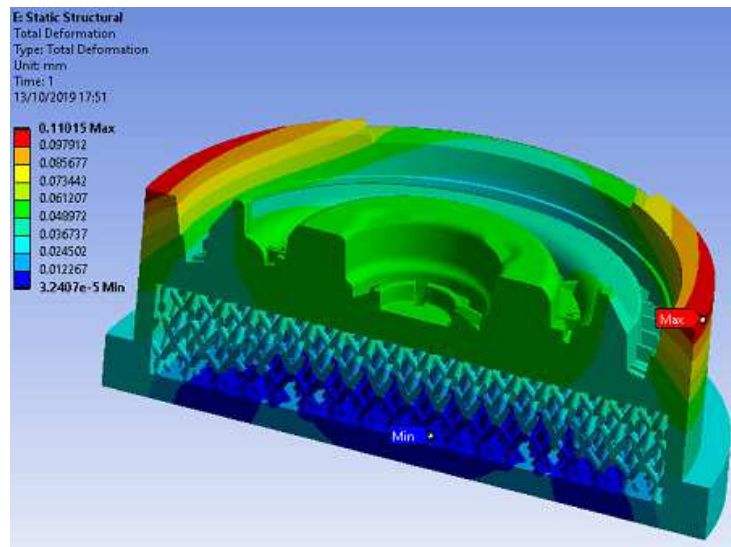


Figura 4.14 Deformazione totale modello reticolare

Il modello con struttura reticolare presenta lo stesso comportamento del modello originale.

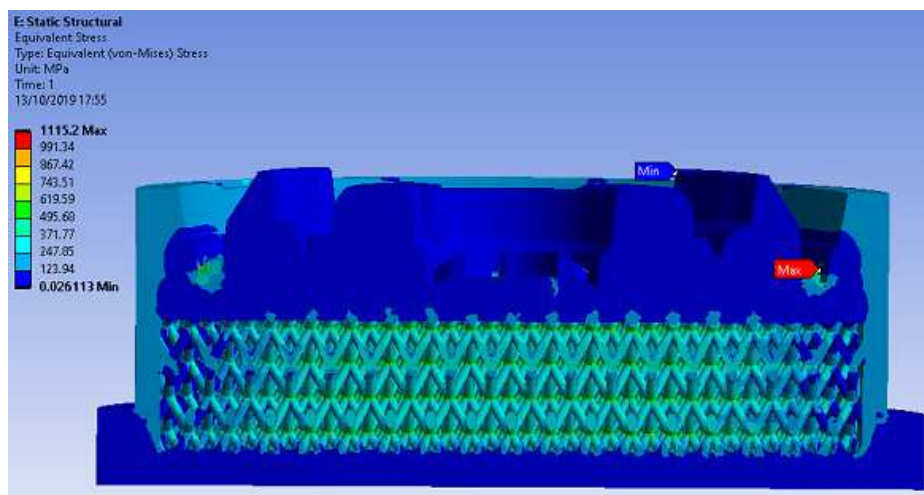
La deformazione massima è di 0,11 mm sulla corona esterna per l'effetto combinato della pressione di chiusura e della pressione interna alla cavità.

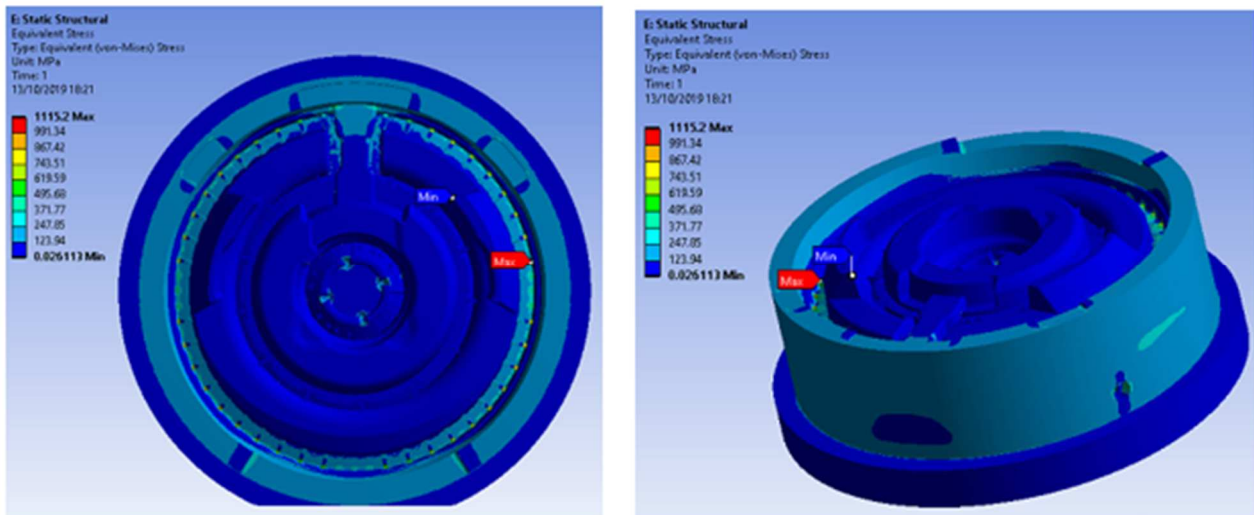
L'impronta si deforma in modo disomogeneo.

L'introduzione della cavità reticolare indebolisce la struttura e l'impronta presenta una deformazione totale di 0,06 mm nella parte centrale e di 0,04 mm sulla corona più esterna.

Il reticolo rimane quasi indeformato nella zona centrale a contatto con la base e presenta uno spostamento di 0,06 mm nella parte sotto l'impronta.

È opportuno inserire degli elementi di rinforzo interni per limitare le deformazioni.





*Figura 4.15. Tensione equivalente di Von Mises*

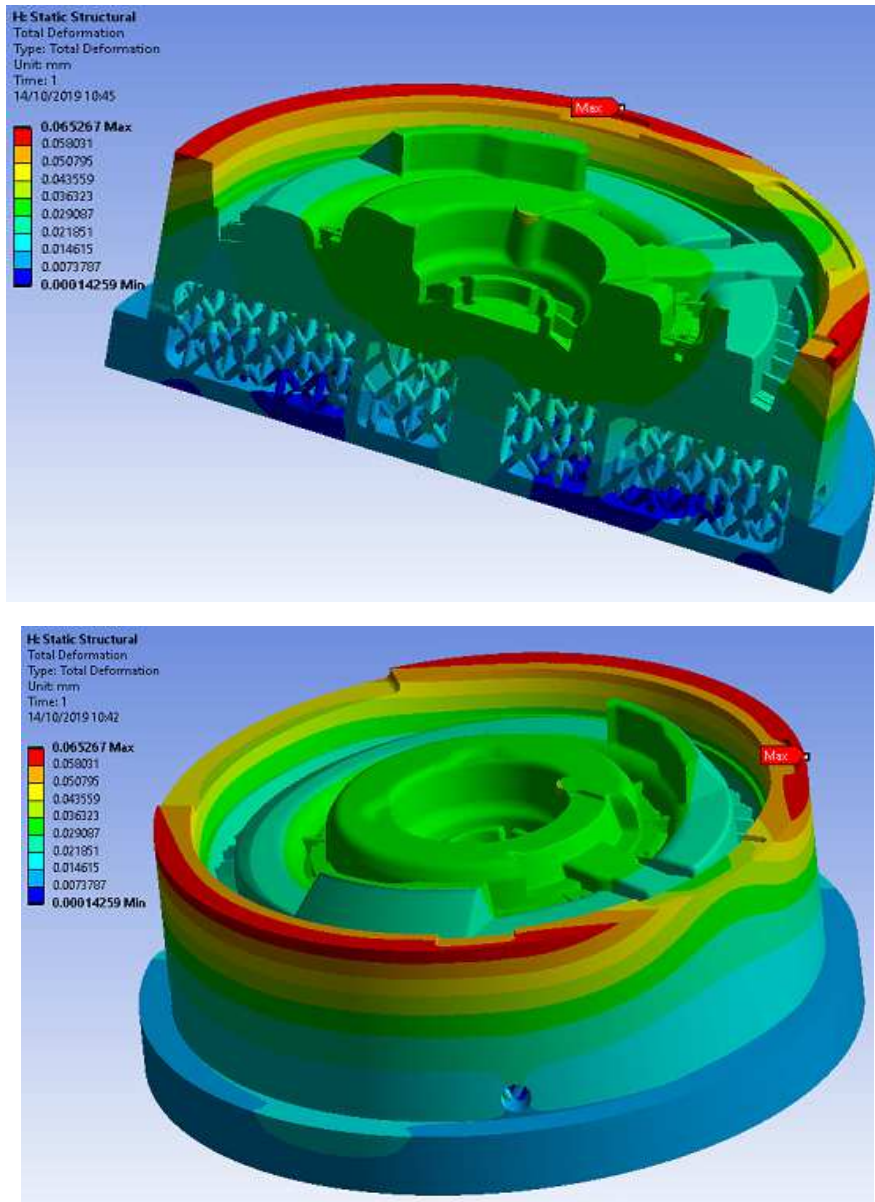
Dal punto di vista tensionale si raggiunge un valore critico sugli elementi sottili che generano le cave del bruciatore, negli stessi punti della matrice originale.

Nella zona reticolare interna le tensioni massime raggiungono valori compresi tra i 350 Mpa e i 600Mpa, al di sotto della tensione di snervamento per l'acciaio 1.2344.

In corrispondenza dell'intersezione delle travi che lo compongono, la presenza di spigoli vivi intensifica le tensioni interne non essendo possibile inserire dei raggi di raccordo.

## Simulazione sul modello reticolare con supporto centrale e paratie

La simulazione sul modello quasi definitivo provvisto di elementi di rinforzo e alcune paratie viene svolta con le stesse condizioni di carico e vincolo presenti nei due casi precedenti in modo da poter confrontare i risultati.

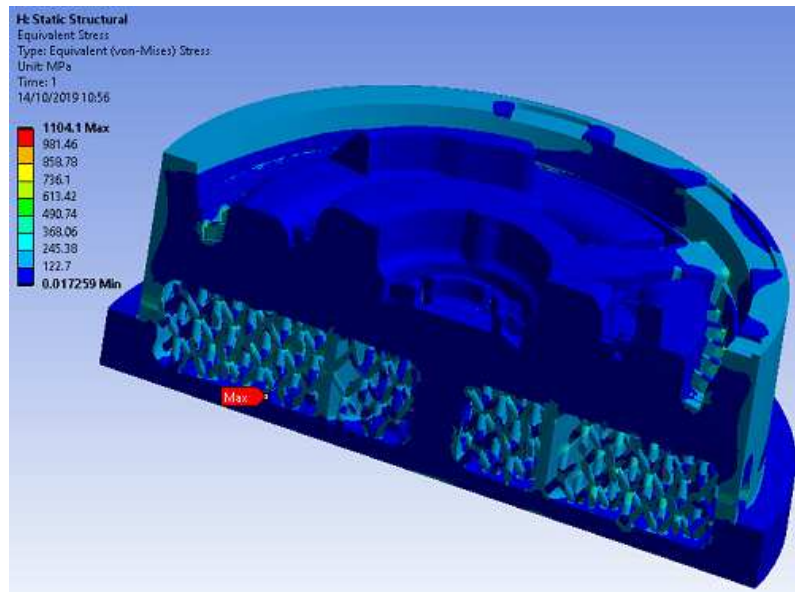


*Figura 4.16 Deformazione totale*

La deformazione massima vale 0,065 mm in corrispondenza della corona esterna risulta paragonabile a quella ottenuta sul modello originale.

Sull'impronta vengono raggiunte deformazioni totali variabili tra 0,035 mm e 0,02 mm.

All'interno della struttura reticolare le deformazioni sono molto contenute.



*Figura 4.17 Tensione equivalente di Von Mises*

Le tensioni nella zona centrale dell'impronta sono quasi nulle e aumentano nella corona circolare più esterna e la tensione sugli elementi che modellano le cave del bruciatore si attesta ad un massimo di 800 Mpa.

All'interno del reticolo la tensione equivalente raggiunge valori compresi tra un massimo di 650 Mpa in corrispondenza degli spigoli le intersezioni degli elementi che lo compongono e il valore nullo in corrispondenza della superficie di base.

All'interno del reticolo c'è un punto singolare nel quale si raggiunge un valore di tensione elevato, dovuto ad una difettosità della mesh nell'approssimazione della geometria.

### **Simulazione termica strutturale in condizioni di esercizio**

Il modello definitivo generato per passi successivi viene sottoposto ad una analisi più specifica andando ad impostare una simulazione termica strutturale che riproduca nel modo più accurato possibile le condizioni reali di esercizio dell'utensile.

A tal fine è stato utilizzato il modulo di analisi *Transient Thermal* combinato con il modulo *Static Structural* presenti nella piattaforma *Workbench*.

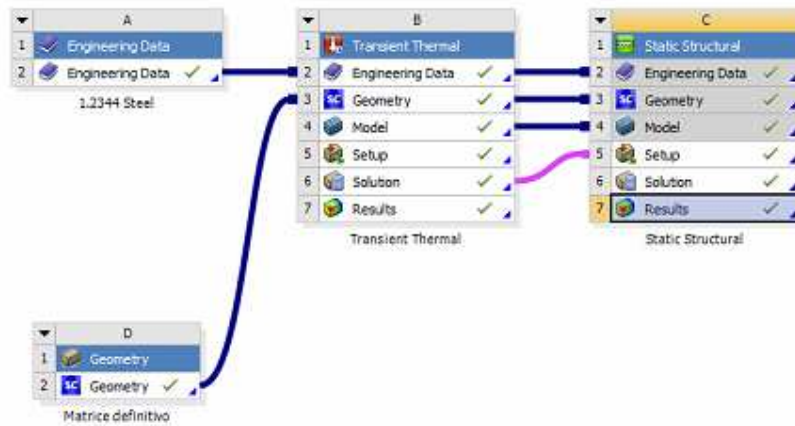


Figura 4.18 Impostazione analisi Ansys Workbench

Sono stati impostati i seguenti parametri:

- *Durata simulazione:* 7,5 sec
- *Mesh:* Quadratic mechanical 0.8 mm
- *Andamento grandezze fisiche:* Variabile nell'intervallo di tempo
- *Materiale:* Acciaio 1.2344

Condizioni al contorno:

- *Pressione alluminio fuso:* 40 Mpa;
- *Temperatura alluminio fuso:* 550°C;
- *Pressione di chiusura dei semistampi:* 50 Mpa;
- *Temperatura costante di esercizio:* 280°C;
- *Convezione termica:* 500 W/m<sup>2</sup>C.

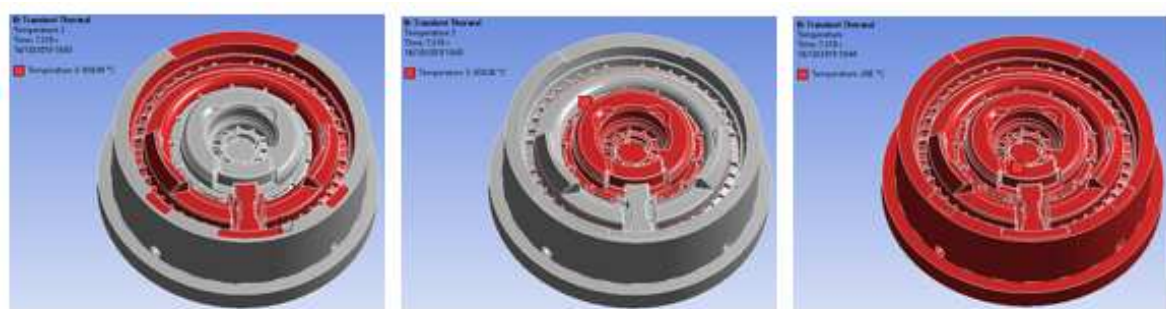
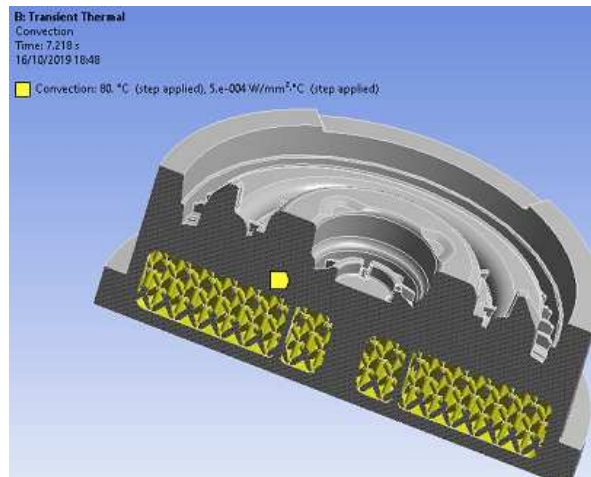
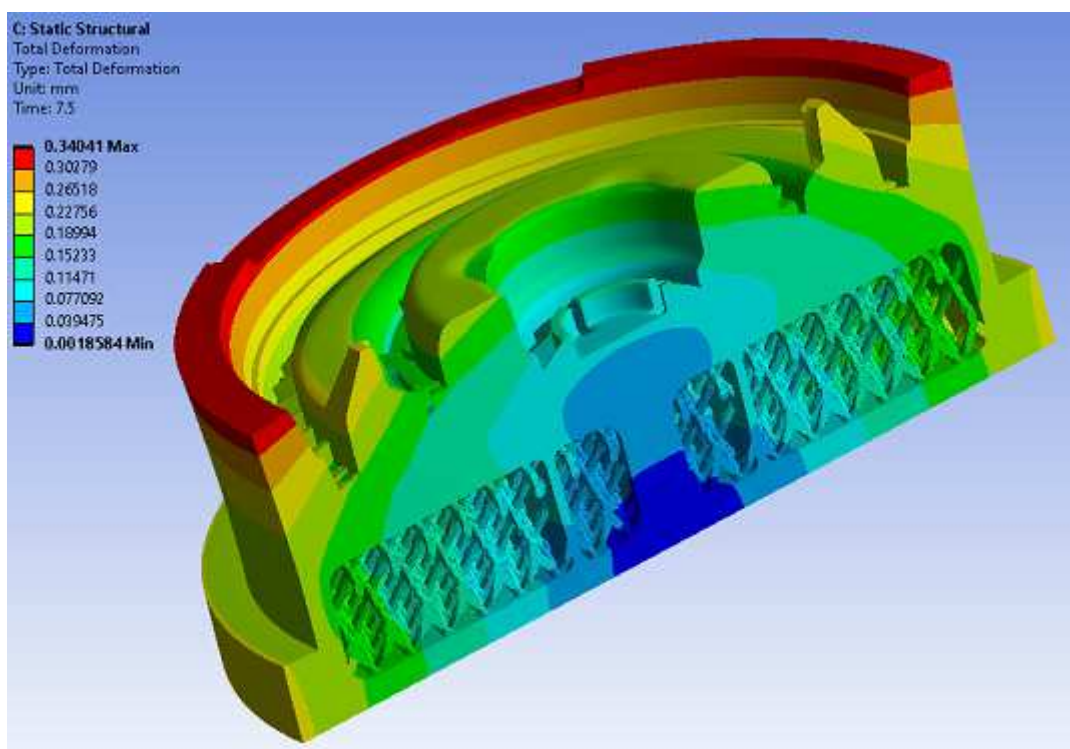


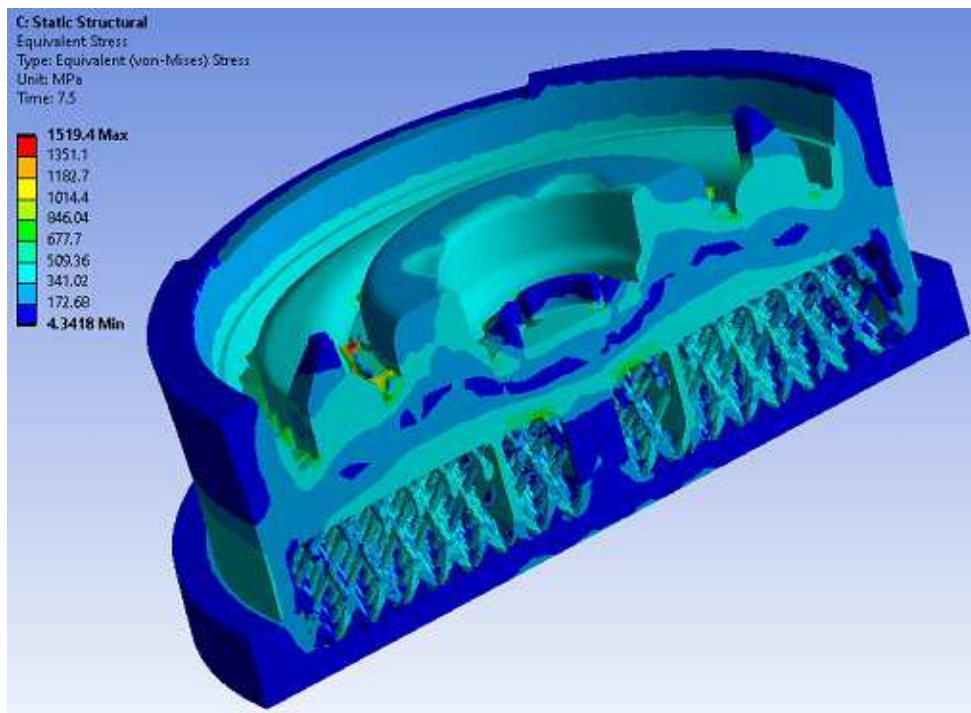
Figura 4.19 Applicazione delle condizioni di temperatura



*Figura 4.20 Applicazione della convezione termica*



*Figura 4.21 Deformazione totale*



*Figura 4.22 Tensione equivalente di Von Mises*

## 4.4 Simulazioni di stampa

La simulazione di stampa è stata impostata utilizzando la procedura guidata Additive Wizard che permette di impostare la configurazione iniziale della parte e posizionarla sul piatto di stampa e impostare le condizioni al contorno.

In base all'orientazione di stampa e alla presenza di diverse tipologie e dimensioni dei supporti variano le seguenti grandezze alla fine del processo:

- Tensione;
- Deformazione;
- Tempo di stampa;

L'orientamento della parte deve essere stabilito a priori prima dell'avvio del processo di simulazione. Il tempo totale di costruzione dipende principalmente dall'altezza della parte ed in misura minore dall'estensione della sezione trasversale.

Il calcolo di un processo di stampa impiega molte risorse in termini di memoria utilizzata pertanto sono state impostati dei parametri che permettono di ottenere dei risultati in tempi ragionevoli.

Sono state fatte delle ipotesi semplificative:

- La parte è direttamente saldata sul piatto di stampa evitando la generazione dei supporti di collegamento alla base;
- Il componente viene stampato in piano per minimizzare l'altezza.
- Si considera una macchina di medie dimensioni con un piatto di stampa di 250 x 250 x 30 mm

## **Impostazione dei parametri.**

Impostazioni della Mesh:

- *Materiale parte e della base:* 1.2344 Steel;
- *Dimensione della base:* 250 x 250 x 30 mm
- *Dimensione della Mesh della parte:* 1.5 mm;
- *Dimensione della mesh della base:* 10 mm

Setup della macchina:

- *Spessore Layer:* 0,04 mm;
- *Hach spacing:* 0.13 mm;
- *Velocità del laser:* 1200 mm/sec;
- *Time between layers:* 10 sec
- *Numero di sorgenti laser:* 1

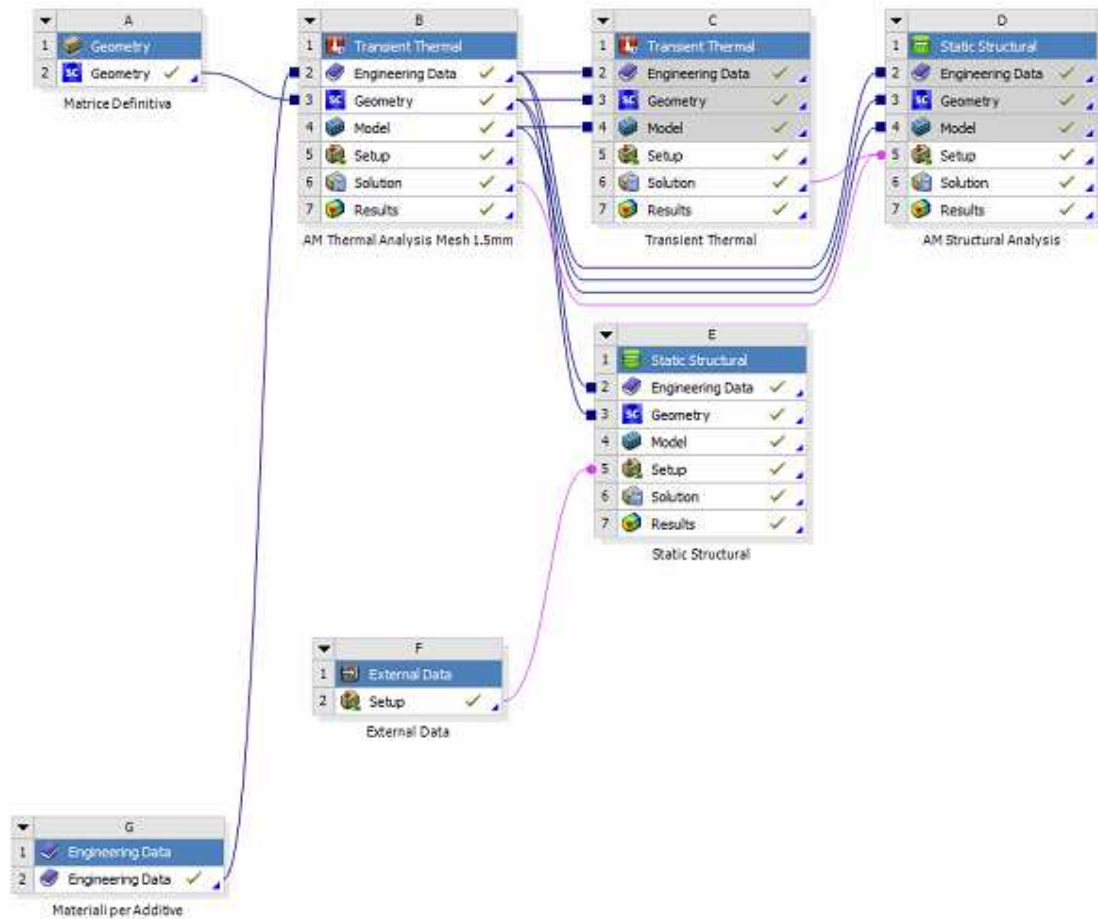
Condizioni di costruzione:

- *Preriscaldamento del piatto di costruzione:* 200°C
- *Preriscaldamento polvere metallica:* 200°C
- *Preriscaldamento gas inerte:* 200°C

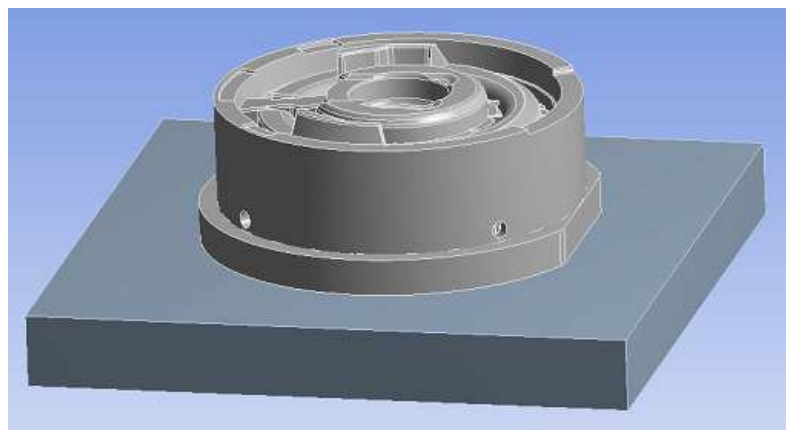
Alla fine del processo di costruzione vengono inclusi:

- Cooldown fino alla temperatura ambiente di 22°C;
- Breve trattamento termico di distensione;
- Rimozione della base.

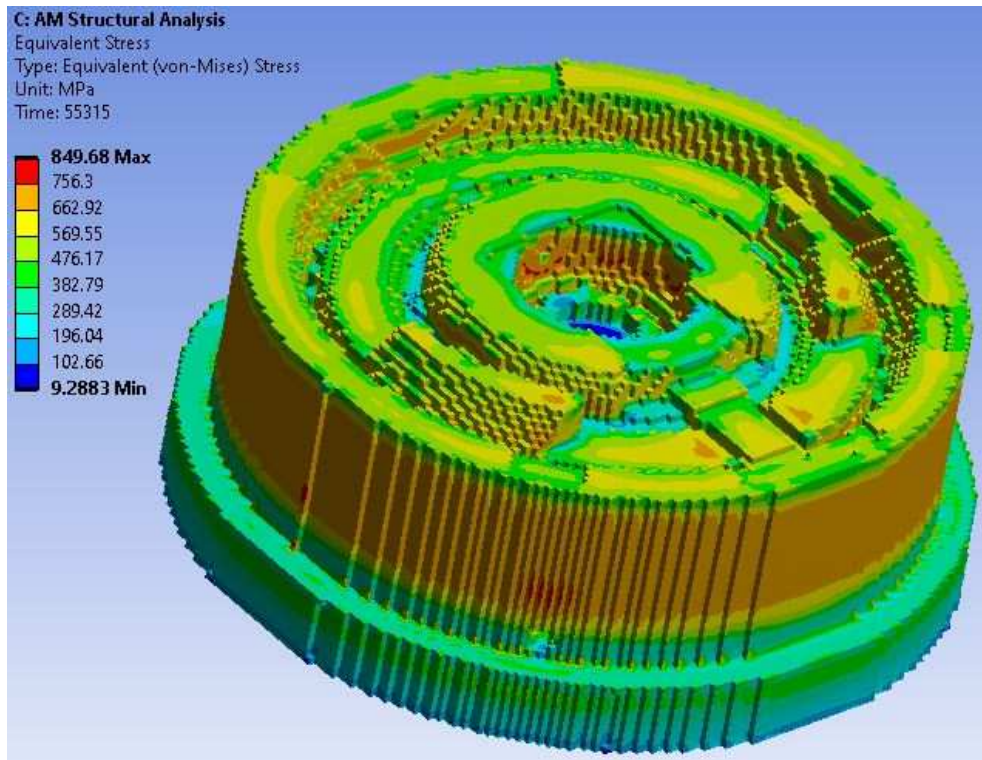




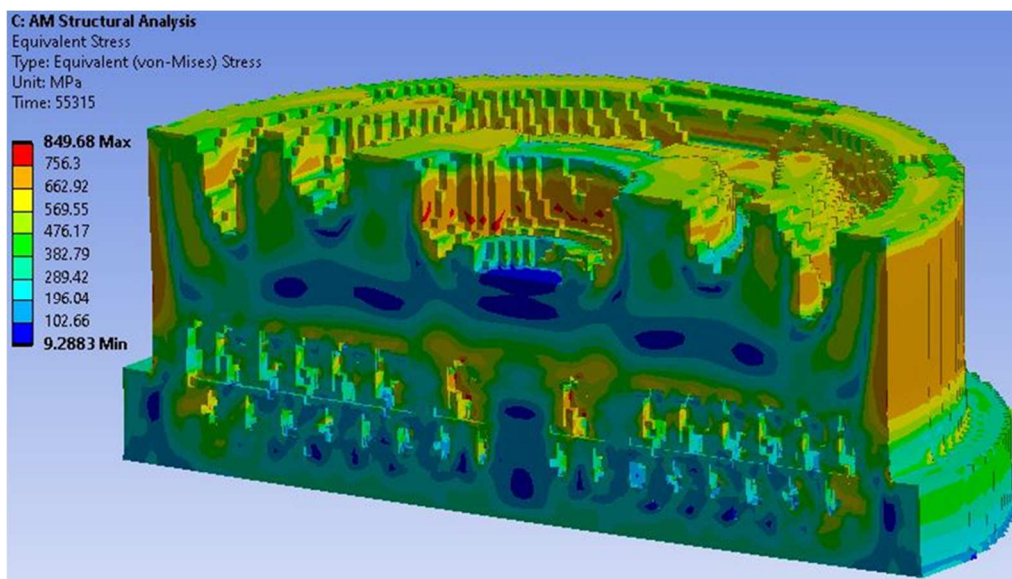
*Figura 4.23 Impostazione simulazione di stampa Workbench*



*Figura 4.24 Posizionamento della parte sul piatto stampa*



*Figura 4.25 Tensione equivalente di Von Mises*



*Figura 4.26 Sezione trasversale*

I valori massimi di tensione si raggiungono in corrispondenza delle variazioni di sezione interne alla cavità della forma e in corrispondenza delle variazioni di sezione trasversale .

La tensione interna si genera in corrispondenza di zone caratterizzate da una differente conduzione termica del calore verso la piastra di base.

Questo accade in corrispondenza di importanti variazioni di sezione tra la cavità reticolare interna e la zona sottostante all'impronta e, successivamente nella progressiva costruzione della parte superiore.

Il valore massimo raggiunto è di tensione vale 849,68 Mpa inferiore alla tensione di snervamento.

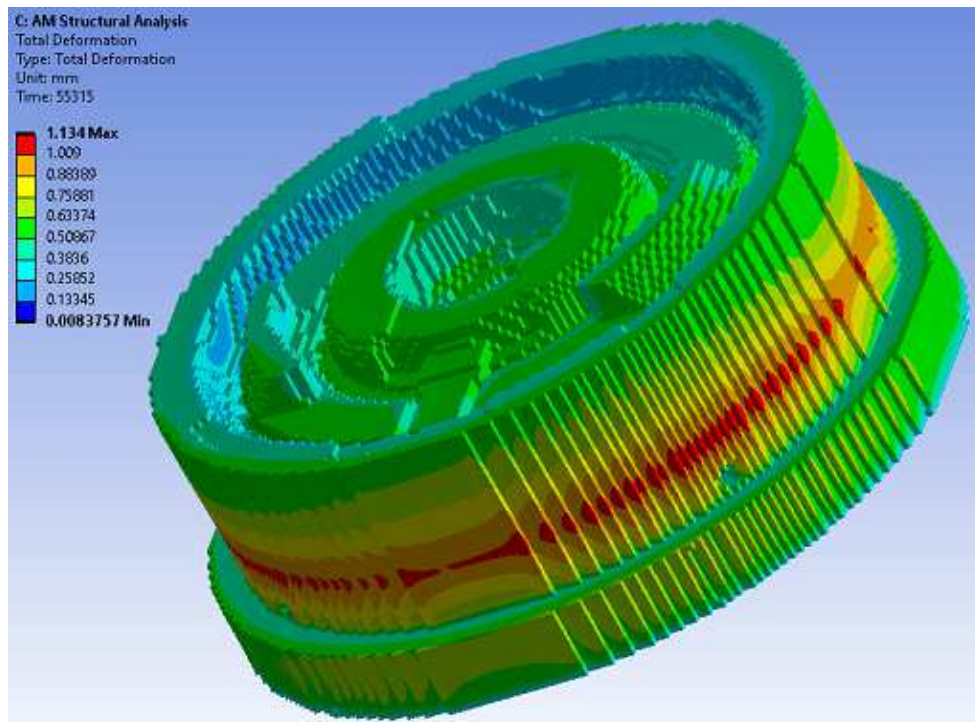


Figura 4.27 Deformazione totale residua dopo il trattamento termico

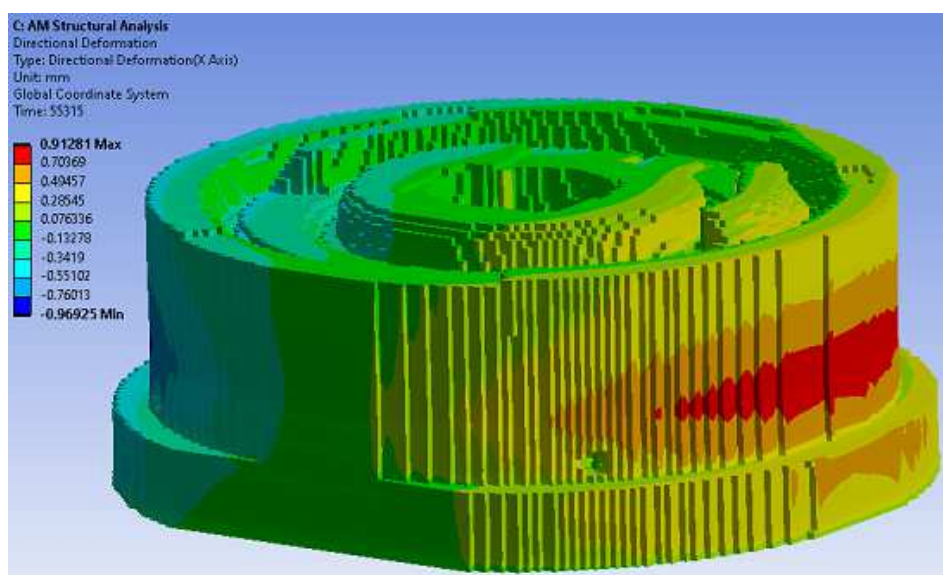
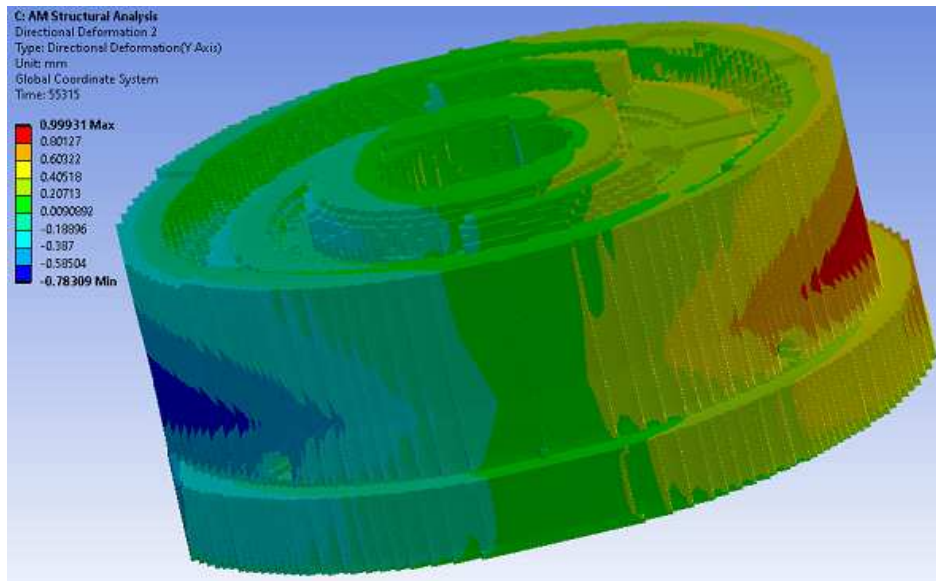
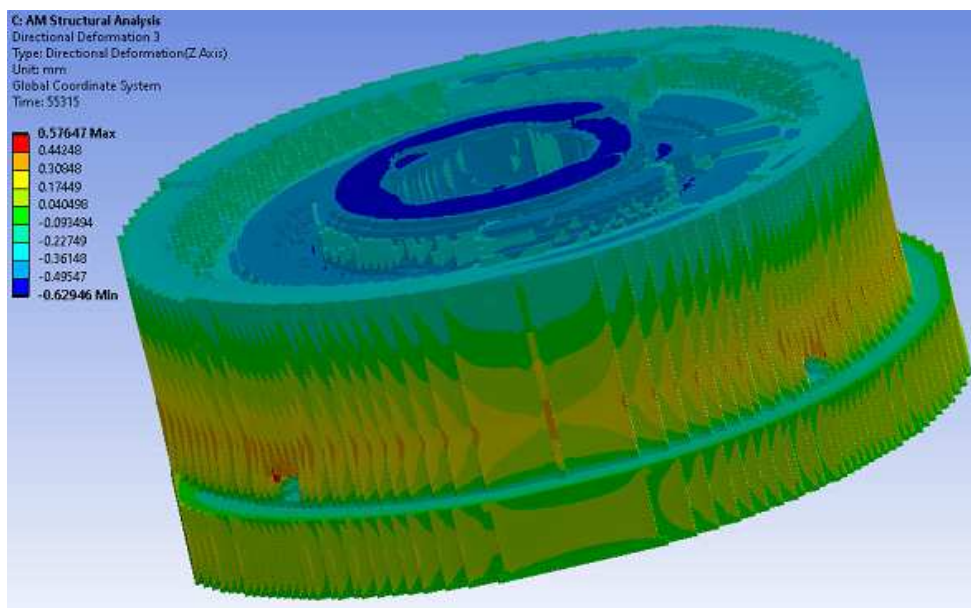


Figura 4.28 Deformazione direzionale asse X



*Figura 4.29 Deformazione direzionale asse Y*



*Figura 4.30 Deformazione direzionale asse Z*

Conseguentemente all'andamento delle tensioni residue, il valore massimo di deformazione totale, si trova sulla superficie laterale in corrispondenza della variazione di sezione tra la parte reticolare della cavità e la zona di materiale presente al di sotto dell'impronta e vale 1,134 mm.

Anche la parte superiore per la formatura dell'alluminio, che dovrebbe essere caratterizzata da tolleranze geometriche e dimensionali strette, subisce distorsioni molto importanti che vanno da un minimo di 0,25 mm ad un massimo di 0,60 mm.

Le deformazione lungo gli assi X e Y è prevalente rispetto a quella lungo l'asse Z in direzione di costruzione.

L'utilizzo di una mesh cartesiana permette di avere un numero minore di nodi e di ridurre i tempi di calcolo ma, non approssima correttamente le feature di base del modello.

Gli elementi cubici utilizzati hanno una dimensione troppo elevata e permettono di interpretare qualitativamente il fenomeno.

Nel worksheet delle soluzioni sono contenute le informazioni relative al tempo di simulazione e al tempo simulato di costruzione della parte.

## **Geometria compensata**

La geometria originale della parte subisce distorsioni troppo elevate pertanto nell'ambiente di workbench è possibile andare a calcolare la geometria compensata che permette di ridurre la deformazione in modo da contrastare l'effetto delle tensioni residue.

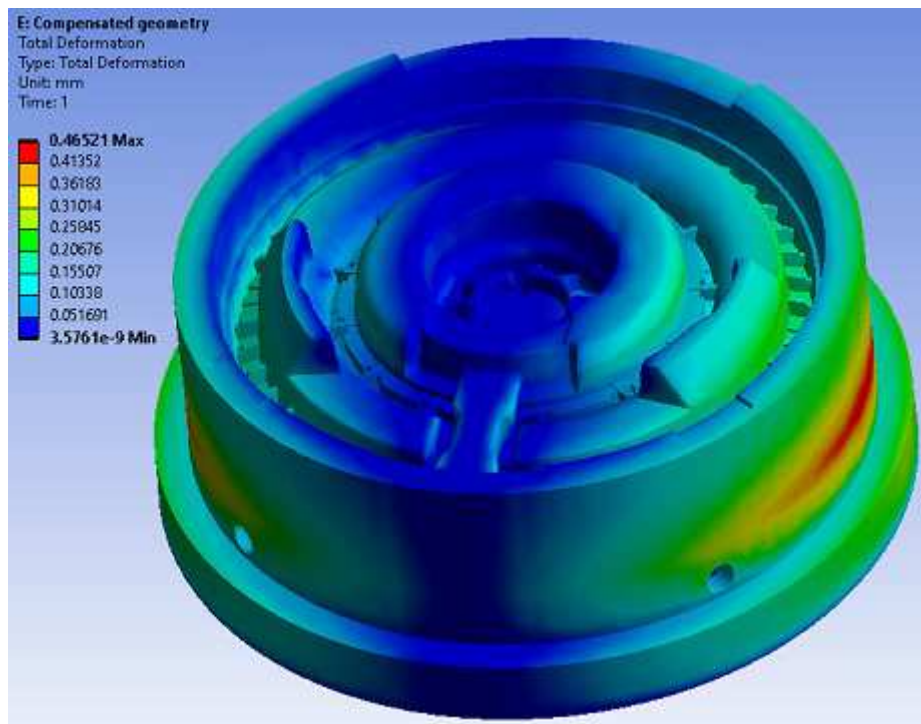
La generazione della geometria compensata non è un processo lineare e deve essere validata mediante la calibrazione

Una volta eseguita la simulazione di stampa ed ottenuta la geometria deformata:

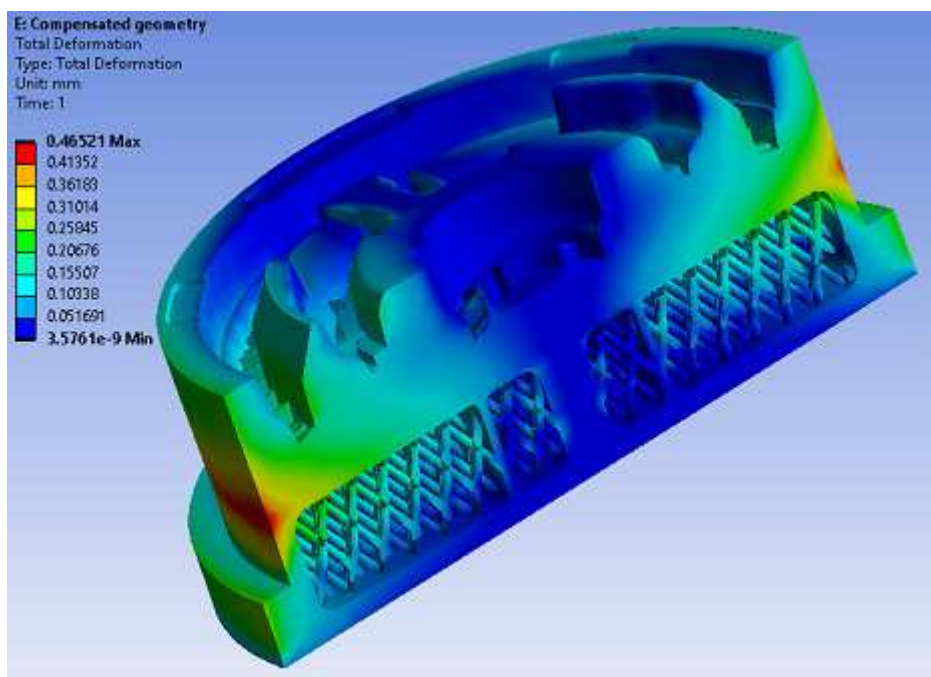
- vengono esportate le coordinate nodali e gli spostamenti dei singoli elementi che compongono la mesh;
- Viene definito lo *Strain scaling factor* compreso tra 0 ed 1.

La definizione dello strain scaling factor permette di riposizionare i nodi in un altro punto dello spazio ricavando in modo preciso da operazioni di calibrazione del software in cui la deformazione simulata viene confrontata con quella reale di stampa di una geometria di prova.

Una buona approssimazione della geometria compensata si ricava utilizzando un valore dello *Strain Scaling Factor* pari a 0,75 se non è stata effettuata una calibrazione del software.



*Figura 4.31 Geometria compensata*



*Figura 4.32 Sezione della geometria compensata*

Questa nuova geometria ottenuta permette di ridurre di molto le deformazioni residue. Sulla superficie laterale la deformazione totale raggiunge un picco di 0,465 mm in corrispondenza del punto di variazione di sezione sopra la zona reticolare.

Si osserva un netto miglioramento delle deformazioni nella zona dell'impronta raggiungendo valori massimi di 0,26 mm.

Il software non fornisce informazioni sullo stato tensionale di questa nuova geometria ma se ne deduce che è analogo a quello della geometria originale.

L'inserto va inserito in una piastra portastampo montata sulla macchina che comprende i canali di colata con un accoppiamento molto stretto.

Anche la geometria compensata richiede delle lavorazioni di finitura superficiale dell'impronta e un sovrametallo di 1mm sul diametro

## 4.5 Applicazione del modello di costo

In questa sezione si applica il modello di costo generale per parti realizzate in AM al caso studio specifico della costruzione della matrice:

### Pre processing

In questa fase sono stati stabiliti i tempi necessari per l'attrezzaggio della macchina e per le operazioni di riscaldamento del piatto di stampa e del caricamento del volume di stampa con gas inerte.

$$C_{Pre-Processing} = c_{ph} * (T_{fusto} + T_{piatto}) + c_{omh} * (T_{riscaldamento} + T_{gas})$$

$T_{fusto}$	0,25	$h$
$T_{piatto}$	0,16	$h$
$C_{ph}$	30	€/h
$C_{personale}$	12,3	€
$T_{risc}$	0,33	$h$
$T_{gas}$	0,08	$h$
$C_{oh}$	20	€/h
$C_o$	8,2	€
$C_{pre-processing}$	20,5	€

Si considera un solo operatore addetto alla macchina e le operazioni di caricamento del serbatoio di materiale e il piatto di stampa vengano svolte in sequenza.

Alle operazioni manuali seguono le operazioni elementari di preriscaldamento del piatto e caricamento del gas inerte svolte in sequenza dalla macchina.

Il tempo totale per svolgere la fase di pre processing è di 0,74 h.

Stabilendo un costo orario del personale di 30 €/h e un costo orario della macchina di 20 €/h , il costo della fase di pre processing è di 20,50 €.

## Build della parte

$$C_{build} = C_{indirect} \cdot T_{build} + w \cdot C_{material} + E_{build} \cdot C_{energy}$$

Il costo della fase di *build* viene suddiviso in tre parti:

### Costi Indiretti:

tengono conto dei costi del personale e del suo impiego, dell'ammortamento della macchina, e del consumo di gas inerte durante la costruzione.

$$C_{indirect} = C_{ph} \cdot f_u + C_{gas} \cdot f_{consumo} + \frac{R}{T_{lavorative} \cdot f_{efficienza}}$$

C i n d i r e t t	$C_{ph}$	30	€/h	Europa Occidentale
	$f_u$	0,15		
	<b>N°operatori</b>	1		
	$C_{personale}$	4,5	€/h	
	<b>Consumo gas [EOS 404]</b>	15	m <sup>3</sup> /h	<a href="#">DataSheet,p.3</a>
	$C_{gas}$	0,475	€/m <sup>3</sup>	<a href="#">Costo Argon</a>
	<b>Pressione lavoro macchina</b>	700	Pa	
	$C_{gas}$	7,125	€/h	
	<b>Tasso attualizzazione</b>	0,1		
	<b>Periodo ammortamento</b>	5	anni	
	<b>Prezzo_machina</b>	400000	€	
	<b>Rata ammortamento</b>	105518,99	€	
	$f_{efficienza}$	0,70		
	<b>giorni lavorativi</b>	330,00	giorni	
	<b>ore/anno</b>	5544	h	
$C_{amm\_unitario\_macchina}$	19,03	€/h		
$C_{indirect}$	30,66	€/h		

Figura 4.33 Dati per il calcolo dei costi indiretti

Il personale non è sempre presente durante la fase di stampa e viene considerato un fattore di utilizzo pari a 0,15 che moltiplica il costo orario di 30 €/h.

Le informazioni relative al consumo di gas inerte sono state ricavate dal catalogo del produttore Eos.

Si suppone di ammortizzare il prezzo totale della macchina in 5 anni.

$$R = Pm \frac{i}{1 - 1/(1+i)^n}$$



Considerando un piano di ammortamento a rata costante con un tasso di interesse di 0,1, la rata annuale è di 105519 €.

Considerando le ore di lavoro annuali della macchina, il costo di ammortamento unitario è di 19,03 €/h.

I costo indiretto unitario è di 30,66 €/h.

I costi unitari vengono moltiplicati per il tempo reale di costruzione.

$$T_{build} = T_{simulation} \left( \frac{Mesh_{height}}{Deposition_{thickness}} \right)^{0.33}$$

<b>b u i l d</b>	<b>Simulation build time</b>	49175	s	<b>Ansys</b>
	<b>Mesh<sub>height</sub></b>	1,5	mm	<b>Ansys</b>
	<b>Deposition<sub>thickness</sub></b>	0,04	mm	<b>Ansys</b>
	<b>T<sub>build</sub></b>	162620,3	s	
		45,1723	h	

Figura 4.34 Tempo effettivo di costruzione

### Costo del materiale

Dal modello cad della parte si ricavano le informazioni relative al volume necessarie per il calcolo del costo relativo al materiale impiegato.

<b>C material</b>	<b>V<sub>pezzo</sub></b>	699400	mm <sup>3</sup>	0,0006994	m <sup>3</sup>
	<b>V<sub>supporti</sub></b>	0	mm <sup>3</sup>	0	m <sup>3</sup>
	<b>V<sub>tot</sub></b>	699400	mm <sup>3</sup>	0,0006994	m <sup>3</sup>
	<b>Perdita polvere</b>	6,00	%		
	<b>V<sub>necessario</sub></b>	741364	mm <sup>3</sup>	0,00074136	m <sup>3</sup>
	<b>Densità polvere</b>	7860	kg/m <sup>3</sup>		
	<b>w</b>	5,82712	kg		
	<b>Prezzo materiale</b>	89	€/kg		

Figura 4.35 Massa del materiale utilizzato

Si stima un fattore di perdita della polvere pari al 6%.

Moltiplicando il prezzo unitario della polvere di acciaio per utensili per la massa della parte si ottiene il costo relativo al materiale impiegato.

## Costo dell'energia

Considerando la potenza della macchina, il tempo di stampa e il prezzo di mercato dell'energia elettrica.

<b>E</b>	<b>C<sub>energy</sub></b>	0,22	€/KWh
	<b>Potenza Macchina</b>	26	KW
	<b>T<sub>build</sub></b>	45,1723	h
	<b>E<sub>build</sub></b>	1174,48	kWh

Figura 4.36 Costo dell'energia

Si possono riassumere i valori dei costi ottenuti:

<b>C<sub>indirect</sub></b>	1384,89	€
<b>C<sub>material</sub></b>	518,61	€
<b>C<sub>energy</sub></b>	258,39	€
<b>C<sub>build</sub></b>	<b>2161,89</b>	€

## Post processing

La fase di post processing comprende le operazioni necessarie alla rimozione del piatto di stampa dalla macchina, il trattamento di distensione e il distacco dal piatto di stampa mediante elettroerosione a filo.

Per soddisfare le specifiche di progetto sono indispensabili le lavorazioni per asportazione di truciolo e di finitura superficiale.

$$C_{post-processing} = C_{personale} + C_{distensione} + C_{elettroerosione} + C_{asptruciolo} + C_{rettifica}$$

$T_{asp\_polv}$	0,16	<i>h</i>
$T_{asp\_gas}$	0,08	<i>h</i>
$T_{estr\_piastra}$	0,16	<i>h</i>
$C_{ph}$	30	€/h
$C_{personale\ tot}$	12	€
<b>Distesione</b>	40	€
$T_{elettroerosione\ filo}$	0,25	<i>h</i>
<b>Elettroerosione a filo</b>	50	€/h
$C_{elettroerosione}$	12,5	€
$C_{AT\_sgrossatura}$	0	€
$C_{AT\_semifinitura}$	0	€
$C_{AT\_finitura}$	60	€
$C_{asportazione\_truciolo}$	60	€
$T_{rettifica}$	0,5	<i>h</i>
<b>Rettifica</b>	50	€/h
$C_{Rettifica}$	25	€
$C_{post\_processing}$	<b>149,5</b>	€

Figura 4.37 Fattori considerati nella fase di post processing

Nella fase di post processing si considerano i costi orari e il tempo necessario per la lavorazione.

## Costo totale

La fase di build della parte rappresenta la quota maggiore del costo totale della parte principalmente per la quota di ammortamento annuale che incide pesantemente sul prezzo finale della parte

<b>Costo Pre-processing</b>	20,5	€
<b>Costo Build</b>	2161,89	€
<b>Costo Post-processing</b>	149,60	€
<b>Costo totale</b>	2331,99	€
<b>Efficienza di stampa</b>	0,7	
<b>Costo Process Yield</b>	<b>3331,42</b>	€

È stato assunto un fattore di efficienza del processo pari a 0,7 che tiene conto del fatto che si possono verificare degli errori dovuti ad una errata progettazione dei supporti o dell'orientamento causando una interruzione della fase di costruzione e lo scarto della parte.

$$\text{Process Yield Cost} = \frac{\text{Costo totale}}{\text{Efficienza di stampa}}$$

Il costo totale della parte è di 2331,99 € al quale viene applicato il fattore di efficienza pari a 0,7 portando il costo totale della parte a 3331,42 €.

Il modello di costo considera solamente le voci di costo che devono essere sostenute se si decide di acquistare la macchina per produrre le parti internamente.

Se la parte viene prodotta da una azienda fornitrice esterna alla voce di costo finale devono essere aggiunti il compenso finale e la tassazione da applicare al momento della vendita.

#### 4.5.1 Confronto con il processo produttivo attuale

Nella tabella sono riportate le lavorazioni del processo produttivo attuale e sono riferite alla coppia di stampi matrice e punzone.

Il ciclo di lavorazione prevede delle lavorazioni per asportazione di truciolo partendo da un semilavorato di sezione circolare di acciaio 1.2344e l'elettroerosione nella parte superiore per realizzare l'impronta.

Affinché si raggiungano valori di durezza di 52 HRC è necessario eseguire un trattamento di tempra. Non si hanno a disposizione ulteriori informazioni riguardo al trattamento termico.

Lavorazione	Tempo Impiegato ( h )	Costo Orario ( €/h )	Costo ( € )
<b>Tornitura</b>	<i>1 x 2 matrici</i>	25	50
<b>Foratura</b>	<i>6 x 2 matrici</i>	30	180
<b>Fresatura</b>	<i>20 x matrici</i>	30	600
<b>Elettroerosione</b>	24	20	480
<b>Elettrodo per Elettro erosione</b>	20	30	600
<b>Tempra</b>	-	-	-
<b>Totale</b>	<b>71</b>	-	<b>1910</b>

I costi orari comprendono tutte le voci di costo relative all'energia alle macchine e alla manodopera impiegata.

Dai costi orari e i tempi necessari per l'esecuzione delle lavorazioni , per la costruzione della coppia di stampi, sono necessarie 71 ore.

Il costo totale è di 1910 € per la coppia di stampi.

Non sono compresi il costo del materiale che risulta trascurabile e l'ammortamento della macchina che si suppone sia stata già ammortizzata nel tempo.

- Considerando tutte le fasi di pre-processing, build e post-processing, il tempo necessario per la produzione della parte è superiore a 46 ore;
- Per la produzione della sola matrice utilizzando tecniche AM il prezzo è di 3 € considerando la produzione interna e l'acquisto della macchina;
- La quota di ammortamento della macchina che deve essere ripagata nel periodo di 5 anni incide pesantemente sul prezzo finale della parte;
- Per produrre il componente in modo tradizionale occorrono circa 36 ore;
- Per la produzione di entrambe le matrici con metodi tradizionali il prezzo è circa 1970 € facendo tutte le lavorazioni internamente.

# CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI

Il fine principale di questo lavoro di tesi è stato quello di studiare un metodo di progettazione per parti realizzate in AM che possa essere utilizzato nello studio di un'ampia gamma di componenti. In particolare, la tesi si focalizza sulla tematica del rapid tooling.

Si è cercato di valutare se l'Additive Manufacturing metallico possa sostituire efficacemente i tradizionali metodi di produzione in termini di precisione, tempi, e costi.

In particolare, lo studio è stato condotto su una coppia di inserti usati negli stampi per pressofusione in alluminio. Il flusso di lavoro può essere diviso in tre fasi:

- generazione di una struttura di tipo reticolare interna con funzione sia strutturale che di canale di raffreddamento;
- simulazione strutturale del comportamento in condizioni operative;
- simulazione del processo di stampaggio in AM al fine di individuarne le criticità.

L'utilizzo di tecniche AM ha permesso di ridisegnare completamente il canale interno di raffreddamento, raggiungendo come risultato:

- una temperatura più omogenea sulla superficie;
- migliore estrazione del calore;
- utilizzo di un distaccante solido in contrapposizione a quello liquido tradizionale.

Considerando lo stato attuale della tecnologia, le simulazioni hanno evidenziato che i processi in AM non possono garantire gli stessi standard qualitativi in termini di rispetto delle tolleranze geometriche e dimensionali, e finitura superficiale rispetto alle lavorazioni tradizionali.

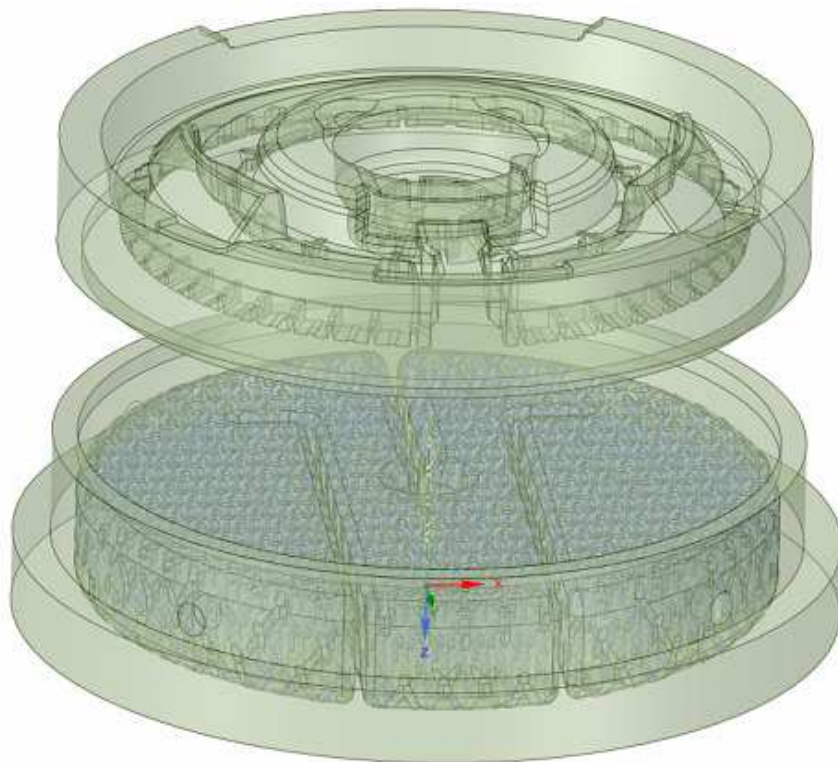
Dai risultati ottenuti si deduce che:

- le deformazioni relative al processo di stampa sono troppo elevate per il caso studio proposto sul Rapid Tooling;
- pertanto, le parti realizzate in AM devono comunque essere rilavorate sulle superfici funzionali con una conseguente complicazione del processo produttivo;
- La precisione di realizzazione dell'impronta di un inserto per stampi non è paragonabile a quella ottenibile con il metodo dell'elettroerosione a tuffo;
- il tempo di realizzazione con processo AM è di circa 46 ore contro le 36 di quello attuale, quindi circa il 28% in più;

- confrontando i dati del modello di costo applicato al caso studio con quelli forniti dall'azienda per la realizzazione del componente, si evidenzia un costo di produzione circa 4 volte più alto.

In conclusione, le tecnologie additive sono meno convenienti per i casi studio dove la riduzione del peso non è molto importante e dove possono essere utilizzate anche tecnologie tradizionali per ottenere le stesse geometrie. Inoltre, le simulazioni strutturali e quelle del processo di stampa dovrebbero essere confrontate con quelle del prototipo fisico.

Come sviluppi futuri si potrebbe studiare la fattibilità di uno stampo realizzato in due part, sfruttando i vantaggi dell'elettroerosione per la lavorazione dell'impronta ed i vantaggi dei processi AM per la realizzazione della base contenente i canali di raffreddamento (Figura 0.1). Potrebbero anche essere studiate delle nuove configurazioni di orientamento del pezzo durante la fase di stampaggio con adatte tipologie di supporti per favorire la diminuzione delle tensioni residue e delle deformazioni.



*Figura 0.1 Variante dell'inserto diviso in due parti distinte, realizzare con due tecnologie distinte: AM per la base e tecnologie classiche per la parte superiore.*

# RIFERIMENTI

## Bibliografia

- [1] Li Yang, Heng Hsu, Brian Baughman, Donald Godfrey, Francesco Medina, Mamballykalathil Menon, Soeren Wiener : *Additive Manufacturing of Metals: The Technology, Materials, Design and Production* (Springer 2017).
- [2] Ian Gibson, David Rosen, Brent Stucker: *Additive Manufacturing Technologies* (Springer 2015).
- [3] *Catalogo SITHERM 1.2344 steel.*
- [4] D. N. Korade, V.M. Dandge, K.V. Ramana, K.R. Jagtap : *Effect of Heat Treatments on Fatigue Failure and Fracture Toughness of Various Tool Steel.*
- [5] D. Klobčar, J. Tušek, B. Taljat : *Thermal fatigue of materials for die-casting tooling*
- [6] Tesi di laurea di F.Sciarra. Università Politecnica delle Marche, a.a. 2017/2018.
- [7] Tesi di laurea di L.Manuguerra. Università Politecnica delle Marche, a.a. 2018/2019.
- [8] Tesi di laurea di S.Sciamanna. Università Politecnica delle Marche, a.a. 2015/2016.
- [9] Tesi di laurea di T.Cundari. Università degli Studi di Padova, a.a. 2015/2016.
- [10] Ansys Additive 2019, User guide

## Sitografia

<http://www.opmlab.net/en/column3/index.html>

<http://www.objectify.co.in/conformal-cooling/>

<https://www.ptonline.com/products/tooling-3d-printed-mold-inserts-with-conformal-cooling>

<https://www.zare.it/en/how-additive-manufacturing-can-be-used-to-make-molding-inserts>

[https://it.wikipedia.org/wiki/Ammortamento\\_a\\_rate\\_costanti](https://it.wikipedia.org/wiki/Ammortamento_a_rate_costanti)

<https://ansyshelp.ansys.com>