

# POLITECNICO DI TORINO

**Corso di Laurea Magistrale  
in Ingegneria Meccanica**

Tesi di Laurea Magistrale

**Progettazione di un sistema di condizionamento  
dello stampo con canali conformati per  
applicazioni di stampaggio a caldo**



**Relatori**

Professore  
Tutor aziendale

Alessandro Salmi  
Ing. Daniele Bassan  
Dott. Eva Butano

**Candidato**

Bartolomeo Sasha Di Grazia  
S241573

Anno Accademico 2018/2019

*“When you’re curious, you find lots of interesting things to do”*

(Walter Elias Disney)

## INDICE

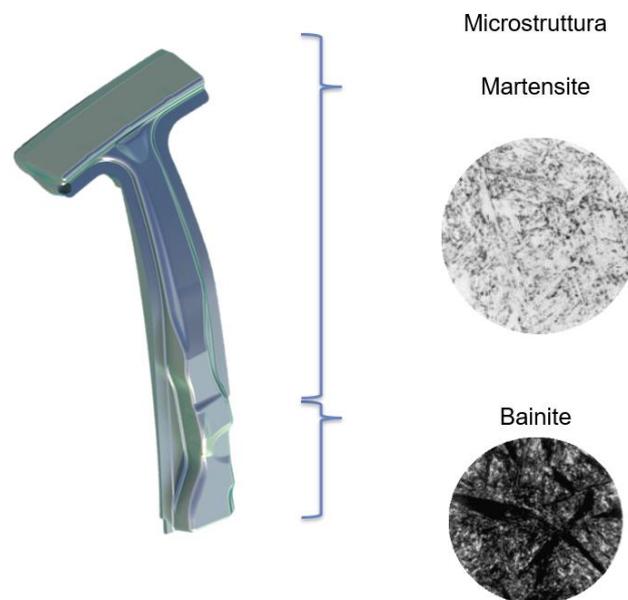
<b>INTRODUZIONE</b> .....	4
<b>1</b> La Storia dell'Additive Manufacturing .....	6
1.1 Prototipi in Additive Manufacturing .....	11
1.2 Vantaggi e svantaggi dell'Additive Manufacturing .....	11
1.3 Materiali per la Fabbricazione Additiva .....	14
1.3.1 <i>Materiali metallici</i> .....	14
1.3.2 <i>Water atomization:</i> .....	16
1.3.3 <i>Gas Atomization:</i> .....	17
1.3.4 <i>Analisi e caratterizzazione delle polveri</i> .....	18
1.3.5 <i>Interazione Laser-Polvere</i> .....	22
1.3.6 <i>Leghe metalliche</i> .....	29
<b>2</b> <b>TECNICHE PER LA FABBRICAZIONE ADDITIVA</b> .....	32
2.1 Tecnologie a letto di polvere.....	32
2.1.1 <i>Laser Powder Bed Fusion (L-PBF)</i> .....	32
2.1.2 <i>Electron Beam Melting</i> .....	37
2.2 Tecnologie di deposizione diretta.....	39
2.2.1 <i>Direct Energy Deposition</i> .....	39
2.2.2 <i>Electron Beam Additive Manufacturing</i> .....	42
2.3 Design for Additive Manufacturing.....	43
2.4 Conformal Cooling.....	47
<b>3</b> <b>CASO STUDIO</b> .....	51
3.1 Esperienza al Centro Ricerche Fiat.....	51
3.2 Componente analizzato .....	54
3.3 Stampo attualmente adoperato .....	55
3.4 Riprogettazione tradizionale.....	59
<b>4</b> <b>RIPROGETTAZIONE MEDIANTE TECNOLOGIE ADDITIVE</b> .....	65
4.1 Scelta della tecnologia .....	65
4.2 Ricostruzione del modello CAD .....	71
<b>5</b> <b>RISULTATI</b> .....	75
5.1 Analisi termiche.....	75
5.2 Analisi di deformazione.....	78
<b>6</b> <b>CONCLUSIONI</b> .....	83
<b>7</b> <b>RIFERIMENTI</b> .....	85

## INTRODUZIONE

Il seguente lavoro di tesi si propone, in primis, di fornire una panoramica generale sull'attuale stato dell'arte del mondo dell'Additive Manufacturing. Verranno descritte le principali peculiarità, i processi produttivi e i limiti generali di questa tecnica produttiva. Tra le varie tecnologie esistenti verrà analizzata in dettaglio la tecnologia Laser Powder Bed Fusion, di cui verranno analizzati i vantaggi rispetto ad una tecnica di produzione tradizionale. Verrà fornita, inoltre, una panoramica sulla situazione attuale e sulla crescita della tecnologia additiva in Europa, evidenziando principalmente i progetti di cui il CRF è partner.

Il lavoro di tesi è incentrato sulla riprogettazione di uno stampo adoperato per la produzione di B-pillar, ossia montante centrale, di una Giulietta Alfa Romeo. Attualmente il processo produttivo è caratterizzato da un'unica fase, ossia lo stampaggio del lamierato, durante il quale si ottiene una struttura completamente martensitica.

L'obiettivo consta nell'ottenere una differente microstruttura durante la fase di hot forming *Figura 1*.



*Figura 1 - Doppia microstruttura del componente B-Pillar*

La particolare microstruttura desiderata è una scelta progettuale legata alla sicurezza del guidatore, o dei passeggeri, nonché necessaria per evitare un infragilimento nella zona di saldatura con la struttura inferiore del telaio. Generando una struttura martensitica nella parte superiore ed una struttura bainitica nella parte inferiore è possibile garantire, in caso

di impatto laterale, il cedimento del montante nella parte bassa garantendo, così, l'incolumità dei passeggeri.

La riprogettazione dello stampo ha come fine ultimo l'ottenimento della differente microstruttura in fase di stampaggio, senza ricorrere ad un trattamento termico successivo. Ciò può essere effettuato adoperando uno stampo in grado di asportare calore con tempi e velocità differenti ottenendo, in tal modo, il componente desiderato in un unico processo produttivo.

Per riprogettare lo stampo e conseguire tali obiettivi è stato necessario implementare in esso dei canali conformali. Mediante analisi termo-fluidodinamiche sono stati dimensionati i canali, definendo: dimensione, distanza dalla superficie, rugosità interna, geometria e numero.

L'implementazione dei canali conformali ha consentito anche un'asportazione di calore più rapida consentendo l'ottenimento del B-Pillar in tempi inferiori.

## 1 La Storia dell'Additive Manufacturing

La Fabbricazione Additiva, la cui evoluzione è mostrata in *Figura 2*, conosciuta anche come Additive Manufacturing, è una tecnologia nata nel 1981 con il nome di Rapid Prototyping. Tale tecnologia è nata con lo scopo di abbattere le tempistiche eccessivamente lunghe per la costruzione di prototipi, il quale, da sempre, rappresenta il collo di bottiglia per lo sviluppo di un prodotto.

Il pioniere della tecnologia additiva può essere ritenuto il Dr. Chuck Hull, il quale è stato l'inventore della Stereolitografia (SLA), 1984, tecnologia basata su una vasca di resina polimerica termoindurente, trasformata in solido mediante l'ausilio di una sorgente laser ultravioletta.

Nel 1990 la tecnologia additiva è stata portata all'interno di grandi aziende con il fine di velocizzare e migliorare la generazione di stampi in sabbia. Nel 1995 con il Rapid Tooling è stato possibile generare inserti per stampi prodotti con tecnologie additive e solo nel 2000 la tecnologia additiva è divenuta una vera e propria tecnologia per la generazione di componenti definitivi, distaccandosi, quindi, dall'adozione puramente prototipale.

# The evolution of 3D printing

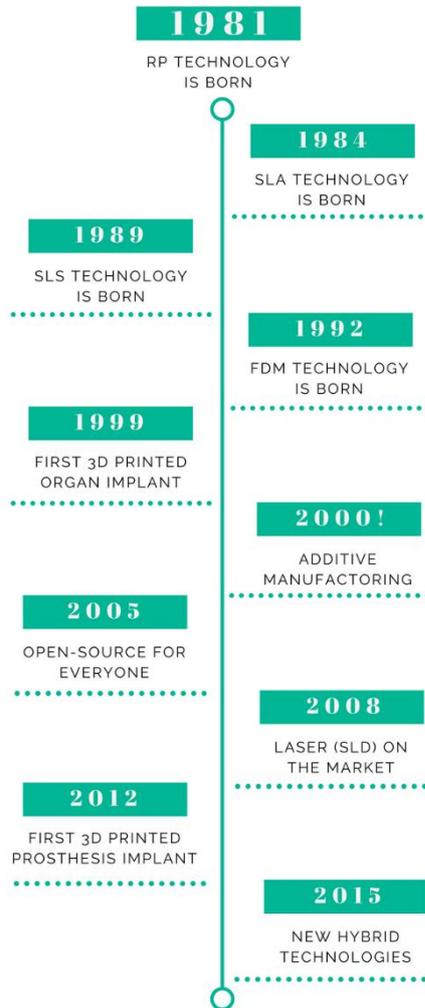
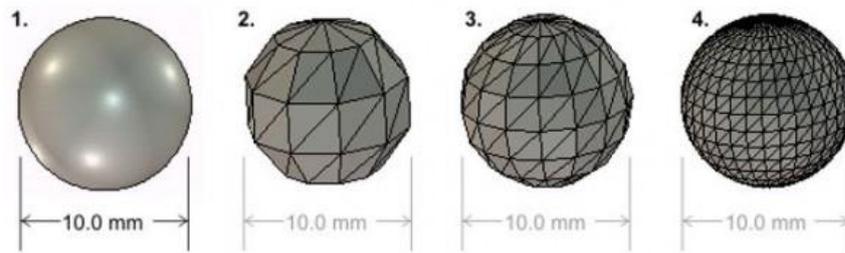


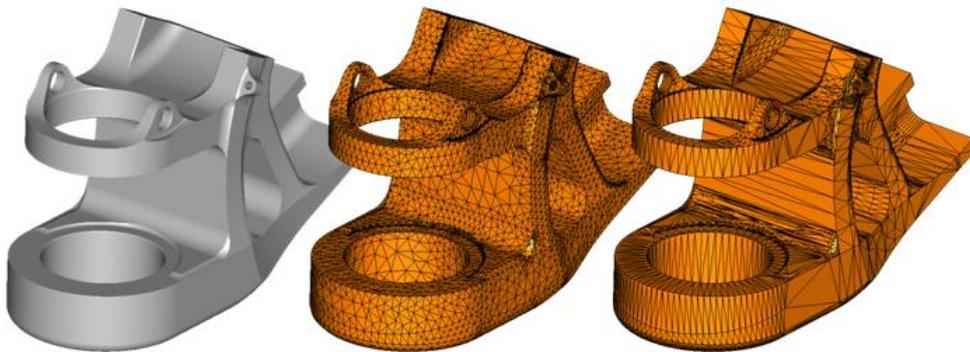
Figura 2 - Evoluzione della Fabbricazione Additiva

Il processo di fabbricazione additiva ha inizio mediante la costruzione di un modello 3D CAD. La matematica di tale modello non può essere adoperata per la costruzione di componenti, di conseguenza occorre semplificare la geometria discretizzando quest'ultimo con una serie di superfici semplici, ossia triangoli. Tale processo trasforma il modello CAD (.iges, .parasolid, .step) in un .STL, Standard Triangulation Language. Com'è intuibile, l'approssimazione di una superficie complessa, curva, mediante figure piane, genererà un errore cordale, tale errore può essere ridotto aumentando il numero di triangoli descrittivi la superficie (Figura 3), ovviamente un numero eccessivo di triangoli

potrebbe aumentare solamente la complessità del file senza avere un significativo miglioramento della qualità superficiale del componente (*Figura 4*).



*Figura 3 - Errore cordale su superficie sferica*



*Figura 4 - Confronto tra differenti file STL*

La generazione del file .STL può essere effettuata con innumerevoli software, gli unici parametri variabili sono:

- *Errore cordale*, massima distanza tra l'arco descrivente la superficie e la corda con cui tale superficie viene approssimata;
- *Errore di angolo*, massimo angolo tra due superfici consecutive.

Il processo immediatamente successivo alla generazione della mesh triangolare è l'orientamento del componente in macchina. Il suo posizionamento è di fondamentale importanza in quanto incide notevolmente sulla riuscita del componente, successivamente viene effettuata la generazione di supporti. Essi adempiono diverse funzioni:

- Ancorare il modello all'area di lavoro, permettendone la più facile rimozione nella fase successiva;
- Separare il componente dalla piattaforma e supportare le parti a sporgenti che altrimenti cadrebbero;

- Gestire la dissipazione di calore nelle tecniche calde che, insieme alla corretta analisi del tensionamento residuo, consentirebbero di evitare ritiri termici differenziali, i quali potrebbero danneggiare il componente o provocarne il distacco dalla superficie.

I supporti, tuttavia, sono un costo aggiuntivo poiché richiedono tempo per la rimozione e rappresentano materiale di scarto, analogo al truciolo delle tecniche tradizionali.

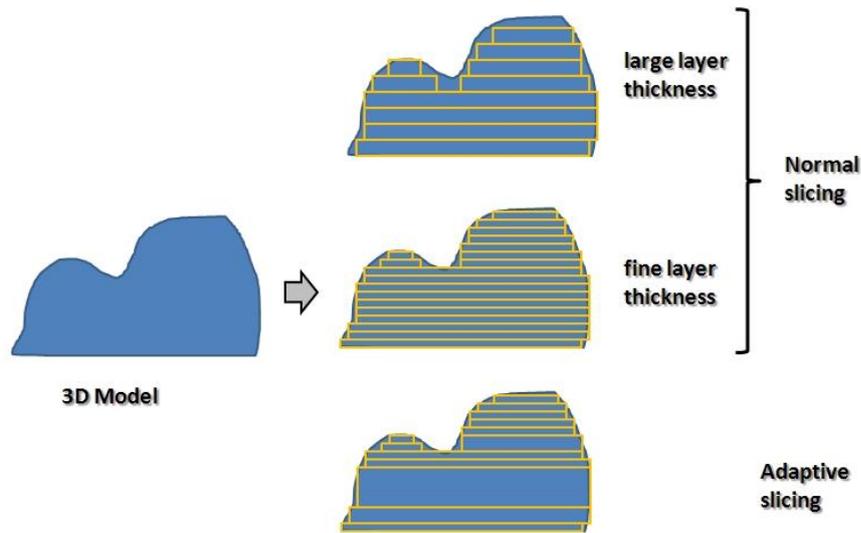
Il quantitativo di supporti, la loro geometria e posizione è un'importante scelta progettuale. Teoricamente l'obiettivo sarebbe quello di minimizzare l'utilizzo di supporti, evitare la generazione di quest'ultimi in zone non accessibili, evitare la loro presenza su superfici visibili poiché potrebbero generare scarsa finitura superficiale o costi aggiuntivi per la finitura di tali superfici. I supporti, nel caso in cui debbano essere rimossi, nella zona di contatto con il componente posseggono una sezione più sottile in modo da facilitarne la rimozione, tuttavia, talvolta, i supporti diventano parte integrante del componente (*Figura 5*). Ovviamente tali osservazioni sono del tutto generiche, a seconda del componente è possibile effettuare differenti scelte progettuali.



*Figura 5 - Supporti su superfici non visibili e supporti integrati come strutture lattice*

La fase successiva alla generazione dei supporti è lo slicing. Esso consta in una semplice operazione matematica rappresentata dall'intersezione del file .STL, comprensivo di supporti, mediante piani equidistanti, in tal modo verranno generati una serie di layer i quali, strato dopo strato, andranno a formare il componente definitivo.

Essendo tale fase un'ulteriore semplificazione della geometria, genererà un nuovo errore denominato Stair Effect, *Figura 6*.



*Figura 6 - Slicing, stair effect case*

Come l'immagine evidenzia, adottare un  $\Delta S$  (spessore del layer) molto grande consente di velocizzare la produzione, tuttavia l'approssimazione di superfici complesse sarà peggiore. Al contempo, adottare un  $\Delta S$  eccessivamente piccolo, potrebbe aumentare inutilmente il tempo di produzione in zone relativamente semplici, con pareti poco complesse. La soluzione sarebbe utilizzare uno slicing variabile in funzione della complessità della superficie, ciò però non è ancora possibile poiché porterebbe eccessive complicazioni sui parametri di processo.

La dimensione del layer, oltre a generare difetti superficiali, potrebbe anche influire sulle proprietà meccaniche del componente, ciò è dovuto alla scarsa aderenza che potrebbe esserci tra uno strato e quello successivo. Nelle tecniche fusorie, è fondamentale che la melting pool compenetri lo strato sottostante così garantendo una perfetta aderenza, con l'obiettivo di ottenere un componente massivo isotropo. Trascurando tale problematica si ottiene un componente con proprietà meccaniche differenti lungo la direzione di costruzione, usualmente con una resistenza meccanica inferiore del 20% rispetto le altre direzioni. (1) (2)

## 1.1 Prototipi in Additive Manufacturing

La Fabbricazione additiva, come detto, è stata concepita nella metà degli anni 80 per ridurre i tempi di realizzazione di prototipi, difatti per molti anni ha assunto il nome di “Prototipazione rapida”.

Durante la fase di sviluppo di un prodotto le tipologie di prototipi generati sono:

- Concettuali, utili a valutare lo stile e la forma, adatti alle verifiche di montaggio in modo da evidenziare eventuali interferenze o difficoltà tecnologiche potenzialmente presenti nella produzione definitiva.
- Funzionali, utili ad effettuare delle prove sul componente per valutare il comportamento funzionale. Si cerca di ottimizzare il prodotto per la sua funzione a tal proposito il materiale dovrà essere simile a quello definitivo, mentre la tecnologia di fabbricazione non ancora considerata.
- Tecnici, consentono il test del prototipo e del processo, infatti si valuta il ciclo di fabbricazione, ossia la realizzazione del prototipo e il suo funzionamento.
- Preserie, per le ultime valutazioni sul prodotto finale, con verifiche marginali annesse. In tal caso il componente viene testato in campo (3) (2).

## 1.2 Vantaggi e svantaggi dell'Additive Manufacturing

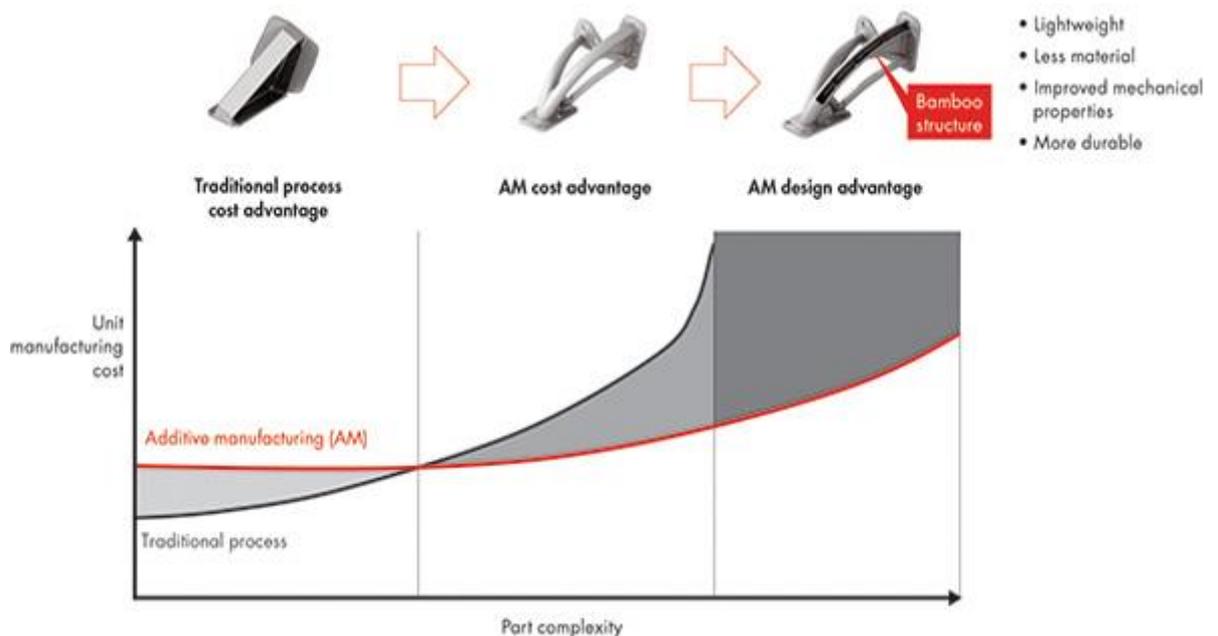
I vantaggi della tecnologia additiva sono notevoli, basti pensare alla possibilità di generare sottosquadri e prototipi in minor tempo. Di seguito verranno riportati i principali vantaggi:

- Vantaggi di prodotto: tale vantaggio è dovuto alla libertà di progettazione, difatti, costruendo il componente strato per strato, è possibile generare pezzi cavi, alleggeriti, integrare più parti e quindi eliminare le problematiche derivanti dall'assemblaggio, passare da sistemi caratterizzati da più componenti ad un unico componente, personalizzare il prodotto sulle richieste del cliente. Inoltre, mediante alcune tecnologie, è anche possibile ottenere proprietà meccaniche migliori.
- Vantaggi di processo: in assenza di vincoli derivanti da stampi o particolari attrezzature è possibile generare forme di vario tipo all'interno della stessa macchina. Lo step produttivo è unico ed inoltre l'intervento dell'operatore è minimo, ciò giova sia ai tempi che ai costi di produzione. Il costo per la

produzione del componente è ridotto anche grazie all'adozione di minor quantitativo di materiale, difatti, diversamente dalle tecniche sottrattive, in tal caso il materiale viene aggiunto solo nella zona di interesse, mentre la polvere in eccesso può essere riadoperata nel successivo job, ovviamente miscelata con polvere nuova.

Ciò che rende tale tecnologia vincente è l'indipendenza del prezzo dalla complessità del componente, difatti, maggiore è la sua complessità, maggiore sarà la convenienza di tale tecnologia rispetto alle tecniche tradizionali. La variabile che detta il prezzo, per la fabbricazione additiva, è il tempo di produzione.

Il grafico riportato nella *Figura 7*, consente di effettuare un confronto tra tecnologia additiva e tecnologia tradizionale. Il confronto è fatto tra il costo per parte prodotta in funzione della complessità del componente.

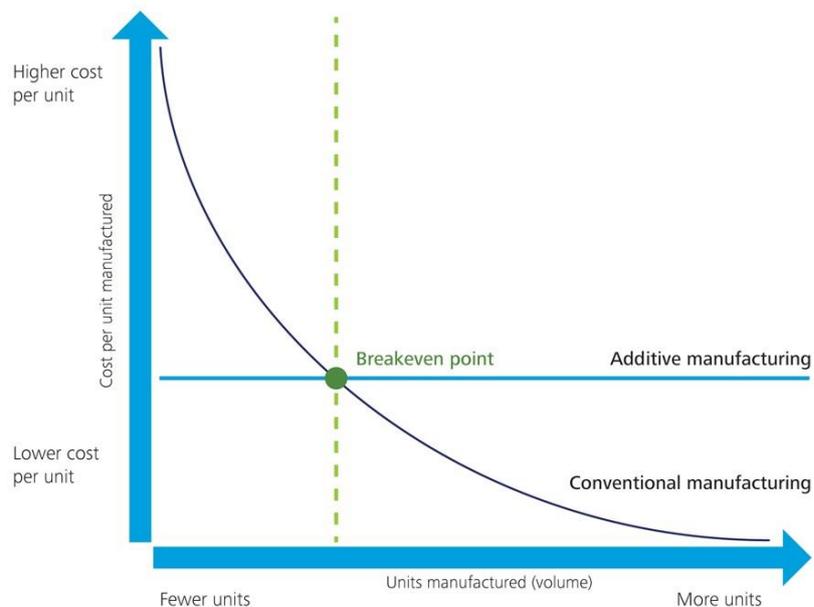


*Figura 7 - Confronto tra tecnologie additive e tecnologie tradizionali*

Evidentemente la tecnologia additiva risulta essere particolarmente vantaggiosa verso componenti molto complessi, tuttavia, quando la complessità del pezzo prodotto è molto elevata, anche l'AM richiede costi elevati, ciò è dovuto alla difficoltà di rimozione dei supporti, o eventualmente polvere residua, in zone difficilmente accessibili.

La fabbricazione additiva, tuttavia, ai tempi odierni, è una tecnica lenta, di conseguenza il principale utilizzo è volto a prodotti ad elevata personalizzazione (ad esempio in campo biomedico, aerospaziale, gioielleria e piccole produzioni per il campo automotive). La tecnologia è ancora acerba per poter essere inserita nella produzione in serie, almeno per quanto concerne le tecniche metalliche, ciò può essere osservato dal grafico in *Figura 8*.

Figure 2. Breakeven analysis comparing conventional and additive manufacturing processes



Source: Mark Cotteleer and Jim Joyce, *3D opportunity: Additive manufacturing paths to performance, innovation, and growth*, Deloitte University Press, <http://dupress.com/articles/dr14-3d-opportunity/>, accessed March 17, 2015.

Graphic: Deloitte University Press | DUPress.com

Figura 8 - BEP comparante tecnologie tradizionali a tecnologie additive

Ulteriori svantaggi possono essere evidenziabili sia per il prodotto che per il processo produttivo:

- Svantaggi di prodotto: la necessità di strutture di supporto causa una scarsa finitura superficiale in alcune zone, finitura tal volta inferiore a quella dei processi tradizionali. Inoltre i materiali disponibili, a causa dello scarso know how presente sul mercato, sono limitati e con prezzo elevato (Ti6Al4V 380 €/kg, CoCrMo 140 €/kg);
- Svantaggi di processo: la difficoltà di gestione delle camere di lavoro, la temperatura, la movimentazione del laser o della testa di deposizione, implica delle limitazioni sul volume della camera di lavoro, tali limitazioni si ripercuotono, ovviamente, sulla dimensione dei componenti prodotti, difatti le

camere di lavoro per tecnologie polimeriche sono dell'ordine del metro cubo, mentre per le tecnologie metalliche raggiungono al più il mezzo metro cubo, usualmente le più diffuse hanno una camera di lavoro pari a 400x400x400 mm<sup>3</sup>. Un ulteriore problema è derivante dal cambio di materiale da impiegare per la produzione. Lavorando con polveri il problema della cross-contamination è elevato, difatti, polveri particolarmente reattive tra loro potrebbero causare incendi o esplosioni. Per evitare tale problematica è necessario effettuare una pulizia accurata della macchina, ciò causa tempi di fermo macchina talvolta eccessivamente lunghi, così rallentando notevolmente la produzione (4).

### 1.3 Materiali per la Fabbricazione Additiva

L'adozione di differenti classi e tipologie di materiali è giustificata dalla tecnica utilizzata per la produzione.

I materiali adottati nelle varie tecnologie additive sono:

- Materiali polimerici
- Materiali metallici

#### 1.3.1 Materiali metallici

Per quanto concerne le polveri metalliche adottate per la fabbricazione additiva occorre effettuare una particolare attenzione alla geometria e alla dimensione delle particelle, difatti, queste due variabili, giocano un importante ruolo in AM. Principalmente si prediligono polveri di geometria perfettamente sferica per garantire il corretto scorrimento delle une sulle altre e un corretto spandimento del letto di polvere. Le dimensioni desiderate non possono essere troppo piccole in quanto un rapporto area volume eccessivamente alto potrebbe comportare l'aggregazione di microparticelle, oltre ad aumentare la piroforicità delle polveri, così generando strutture estremamente difficili da spargere, inoltre un rapporto alto comporterebbe anche una più facile ossidazione. A causa del processo ossidativo le polveri non sono riciclabili al 100%, bensì esiste un limite di ossigeno massimo che può essere accettato nelle polveri, per esempio tale limite, in alcune applicazioni ed in alcuni settori, consente il riutilizzo del 30-40% della polvere di scarto. Le polveri oltre ad avere delle geometrie e dimensioni particolari, devono anche avere delle garanzie sulle proprietà, infatti vengono effettuati dei test sulla fluidità e composizione chimica per la corretta categorizzazione.

Ottenere delle polveri così caratteristiche richiede tempo e produzioni particolari, il costo di uno stesso materiale, se prodotto in polvere, può arrivare a costare oltre un ordine di grandezza in più rispetto ad un lingotto.

Il vero costo non risiede nel processo di fabbricazione ma nel know-how, problematica accentuata dal numero limitato di produttori di polveri metalliche specializzati in determinate polveri. Un impianto del genere, come vedremo, non è assolutamente versatile, difatti si richiede una vasca dove convogliare il metallo fuso, una serie di ugelli che consente il passaggio del fuso e la successiva solidificazione mediante acqua o gas. La scarsa versatilità risiede principalmente nel voler fabbricare polveri metalliche di differenti materiali, difatti in tal caso occorrerebbe un fermo macchina 24-48h per pulire correttamente la vasca di fuso e sostituire l'ugello, evitando così la contaminazione.

Uno tra i vantaggi più importanti rispetto alla colata per fonderia consiste nella perfetta miscibilità. Difatti, in un processo fusorio, adoperando metalli con densità differente si potrebbe creare una stratificazione del liquido non consentendo l'ottenimento di un componente con struttura mista. Nel caso delle polveri, essendo entrambe allo stato solido, la miscibilità è garantita e non ostacolata da alcun processo fisico-chimico, a meno che le due polveri non siano reagenti tra loro.

Il sistema produttivo per la formazione di polveri metalliche è schematizzato in *Figura 9*:

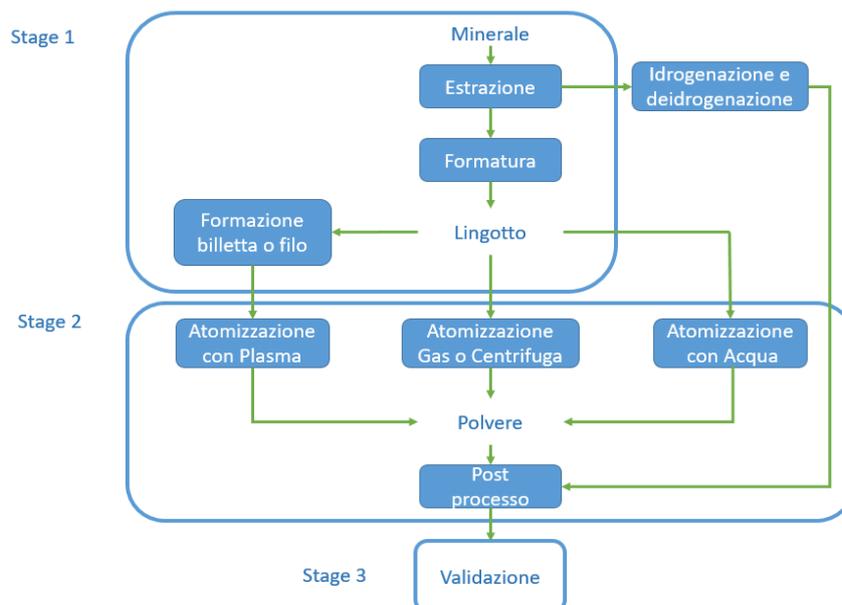


Figura 9 - Processo produttivo per la fabbricazione di polveri

Il primo step consiste nell'estrazione del minerale, successivamente, attraverso un processo fusorio, vengono eliminate le scorie e si ottiene il metallo puro, o la lega desiderata, sotto forma di billetta, filo o bramma, appropriata per la produzione di polveri.

Nel secondo step avviene il processo della formazione di polvere vera e propria, essa può avvenire mediante plasma, atomizzazione a gas o ad acqua, o centrifuga. La principale tecnica produttiva è la gas atomization, tuttavia la miglior qualità delle polveri è ottenibile mediante l'utilizzo del plasma, il quale richiede l'adduzione di materiale sottoforma di filamento. Polveri con qualità più scarsa ma di costo inferiore possono essere ottenute mediante la water atomization, principalmente adoperata da produttori indirizzati a grandi quantità (ovviamente si prediligono i metalli con meno propensione all'ossidazione, richiedendo sistemi di produzione meno complessi). Generata la polvere si effettua il post processing, esso consiste nella suddivisione granulometrica della polvere, da quella più fine a quella più grossolana. Questo processo viene effettuato meccanicamente e semplicemente attraverso setacci con mesh via via crescente. La distinzione è necessaria poiché a seconda della tecnica si richiedono dimensioni granulometriche differenti (5) (2).

### 1.3.2 *Water atomization:*

In tale processo si parte da un bagno fuso di materiale metallico, quest'ultimo viene convogliato, grazie alla pressione idrostatica o tal volta ad una pressione superficiale, attraverso un ugello convergente-divergente e successivamente raffreddato in modo istantaneo con getti d'acqua (*Figura 10*). Tale raffreddamento impedisce di raggiungere autonomamente il punto di minima energia della particella (geometria sferica), per tal motivo le particelle pulviscolari avranno geometria differente l'una dall'altra e difficilmente di forma perfettamente sferica. Un ulteriore problematica potrebbe essere la formazione di granuli di dimensione estremamente, essi causano la coesione con le particelle circostanti generando aggregati che rendono complesso lo spandimento della polvere sul piano di costruzione.

Per quanto detto, la formazione di una granulometria con una geometria tondeggiante e priva di difetti superficiali richiede un raffreddamento controllato e lento, per tal motivo il miglior risultato è ottenibile con la Gas Atomization (2).

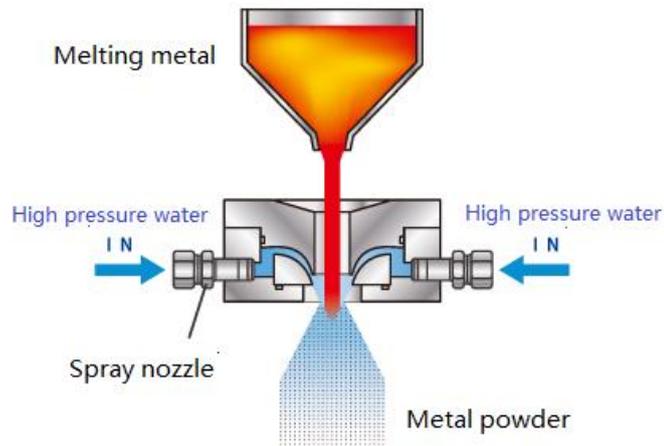


Figura 10 - Water atomization

### 1.3.3 Gas Atomization:

Tale processo di gran lunga più complesso, esso richiede l'adozione di una sorgente di gas il quale, intervenendo come il getto d'acqua nel caso precedente, viene fatto passare attraverso un ugello coassiale al sistema di colata di fuso (*Figura 11*). A differenza dal caso precedente, il raffreddamento avviene lentamente, ciò consente l'ottenimento di particelle di polvere di geometria perfettamente sferica. Le dimensioni sono ovviamente varie per cui occorrerà effettuare un post processo meccanico di setacciamento per suddividere le differenti dimensioni granulometriche. Le polveri più sottili tendono a sollevarsi nell'aria miscelandosi con il gas che, per ovvie ragioni legate ai costi, deve essere opportunamente riciclato, per cui un cilindro connesso ad un compressore aspira il gas dalla camera, filtrando le polveri in sospensione. L'intero processo di gas atomizzazione è un processo lento e non continuo, difatti al completamento di ogni lavorazione occorre aprire la parte superiore e inferiore per l'estrazione di polvere e l'aggiunta di fuso. Prima di poter aprire il tank è necessario eliminare il gas interno, dunque le pompe, che generano il vuoto, rendono il processo estremamente lento.

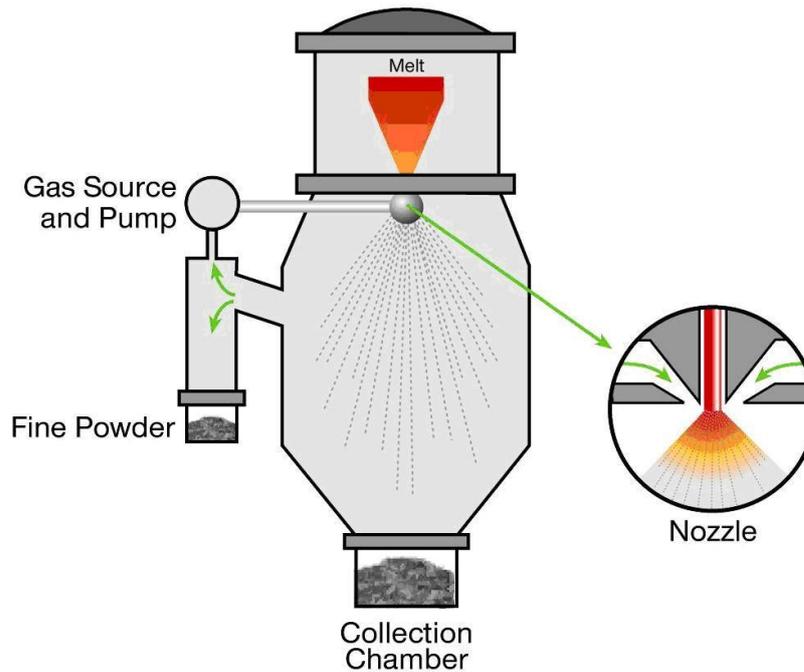


Figura 11 - Gas atomization

Tra i principali vantaggi evidenziabili nel processo di gas atomization vi sono:

- Elevata disponibilità di materiali prealligati;
- Problematiche legate all'ossidazione delle polveri ridotte grazie alle atmosfere inerti, così consentendo di recuperare gran parte della polvere. La materia prima arriva sotto forma di lingotti dunque perfettamente gestibile ed a basso costo (le dimensioni delle camere ospitanti il fuso possono andare dal mezzo litro a 150 litri);
- Particelle di geometria principalmente sferica.

Tra i principali svantaggi invece vi è la problematica del raffreddamento, la quale, per consentire alle particelle di assumere la forma più stabile ovvero quella sferica, è estremamente lenta.

I principali lingotti di materia prima sono in: Ni, Co, Ti, Al e Cu (5) (2).

#### 1.3.4 Analisi e caratterizzazione delle polveri

Il post processing sulle polveri gioca un importante ruolo per la produzione. Com'è noto, alla fine della formazione delle polveri mediante i processi sopra citati, non tutte le polveri avranno una geometria perfetta, difatti, vi è la compresenza di polveri con superfici rugose e con superfici lisce, di dimensioni più grandi e più piccole. Per omogeneizzare la polvere occorre in primo luogo consentire il distacco di satelliti da particelle di dimensione più

grande e rettificare le superfici, ciò viene effettuato mediante un processo di sabbiatura ultrasonica. Dopo la prima fase si procede con il setacciamento, ovvero, una serie di setacci con mesh crescente (*Figura 12*), impilati gli uni sugli altri, vengono posti in vibrazione, in tal modo è possibile suddividere la polvere in base alla dimensione granulometrica, per poi distinguerle per le varie tecniche di AM. Per l'impiego di polveri metalliche di differente materiale, è necessario utilizzare diversi setacci al fine di evitare la cross-contamination.



*Figura 12 - Sistema per il setacciamento delle polveri*

Intuibilmente, la qualità del componente prodotto in additive è strettamente connessa alle proprietà delle particelle di polvere adoperate. I parametri fondamentali da analizzare per distinguere le differenti polveri derivanti dalle case produttive sono:

- *Composizione chimica*: Analisi necessaria per valutare il quantitativo, con errore pari al decimo di punto percentuale, di elementi di lega e inquinanti come ossigeno e carbonio. La *micro analysis methods* analizza le spettroscopie dispersive di energia mediante un particolare microscopio. Il metodo di spettroscopia parte da un quantitativo di polvere ben stabilito il quale viene diluito in un acido, tale acido deve essere in grado di sciogliere tutto il materiale solido della polvere. Evidentemente ogni elemento riesce a sciogliersi più o meno bene con determinati acidi, di conseguenza la soluzione adoperata per la diluizione sarà caratterizzata da più acidi. Una volta ottenuta la completa solubilizzazione occorre diluire la miscela per ottenere una quantità molto piccola di peso noto (il coefficiente di

diluizione solitamente è 1:10000, esso deve essere estremamente preciso per ottenere un'analisi corretta, anche una piccola variazione potrebbe comportare risultati lontani dalla realtà). La soluzione così ottenuta viene inserita in una macchina, la quale, mediante un fascio laser (a plasma o onde elettromagnetiche) tende ad eccitare gli atomi presenti all'interno della soluzione portando i suoi elettroni ad un livello (Figura 13) energetico instabile.

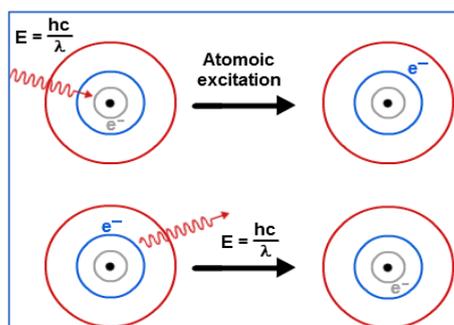


Figura 13 - Eccitazione dell'elettrone

Arrestando il fascio laser tale eccitazione, gli atomi, non avendo più l'energia necessaria per permanere nell'orbitale di eccitazione, tornano nella condizione di equilibrio rilasciando energia analizzabile sotto forma di lunghezze d'onda. Ovviamente ogni atomo appartenente ad un elemento differente, subirà un'eccitazione differente, e dunque emetterà, nel ritornare alla condizione di equilibrio, un'energia con lunghezza d'onda differente. Un particolare macchinario analizza tale energia ed effettua un diagramma (Figura 14) con in ascissa la lunghezza d'onda, dunque l'elemento di riferimento, e in ordinata il quantitativo di tale elemento, essendo l'altezza del cuneo funzione della quantità dell'elemento analizzato.

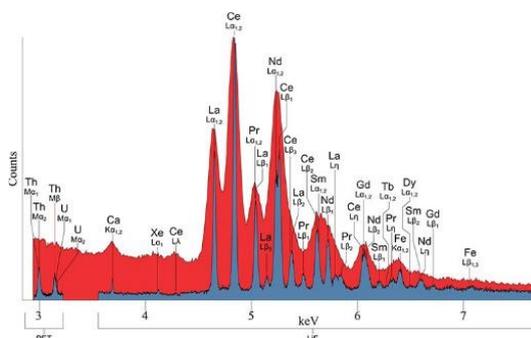


Figura 14 - Output della composizione chimica

Tale tecnica evidentemente è lenta e non può essere effettuata su ogni quantitativo di polvere, tuttavia è necessaria in fase di sviluppo. Per la produzione invece

vengono adoperate tecniche di analisi simili, funzionanti, però, allo stato solido. Tale sistema di analisi è detta “*fluorescenza ai raggi X*”, che mediante dei detector, consente di ottenere risultati simili a quelli visti in precedenza. Ciò è possibile solo allor quando si è in possesso di elementi di confronto analizzati con la tecnica precedentemente esplicitata.

Oltre all’analisi puntuale, è possibile anche effettuare una mappatura della superficie dell’elemento analizzato, in cui avremo delle zone con diverse tonalità di colore che indicano il quantitativo e la tipologia degli elementi in una determinata area.

- *Forma delle particelle*: analisi effettuata mediante rugosimetro, definisce la rugosità della superficie delle particelle.
- *Dimensione e distribuzione delle particelle*: oltre la possibilità di effettuare una caratterizzazione mediante setacci, è possibile effettuare una caratterizzazione dimensionale mediante la *diffrazione di un fascio laser*. Tale analisi viene effettuata adoperando un fascio laser, il quale, oltrepassa una soluzione di polvere. Tale fascio viene ovviamente deviato e, grazie all’adozione di sensori, è possibile correlare tale diffrazione alla dimensione della particella (*Figura 15*).

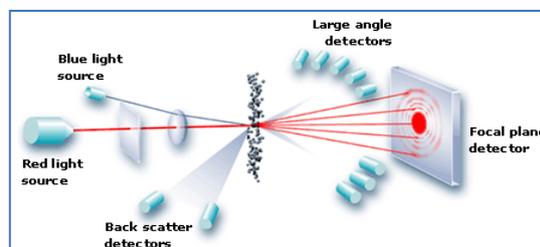


Figura 15 - Diffrazione del fascio laser

L’obiettivo delle analisi dimensionali è ottenere una distribuzione delle particelle, in cui l’area sottesa a tale distribuzione, rappresenta il quantitativo di particelle della dimensione indicata in ascisse. In *Figura 16* è rappresentata la distribuzione di particelle in base alla dimensione (indicata in ascisse), la retta rossa indica che il 50% delle particelle è al disotto della dimensione per cui passa tale retta. Evidentemente, più la curva è stretta, più accurata è la produzione di polveri.

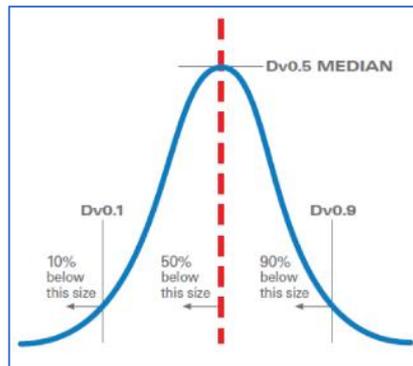


Figura 16 - Distribuzione gaussiana della dimensione delle particelle

- *Analisi morfologica e della densità apparente delle polveri:* per analizzare correttamente la morfologia della polvere viene adoperato un microscopio elettronico ad elevata potenza. Quest'ultimo consente di ottenere un'immagine 3D della particella evidenziandone l'area superficiale ed eventuali difetti presenti su quest'ultima. Per analizzare invece la densità apparente si procede unendo la polvere metallica ad una matrice polimerica, successivamente, mediante carta abrasiva con grana via via più fine, si asporta materiale così consentendo di "sezionare" la particella. A tal punto, mediante un microscopio ottico, è possibile evidenziare l'eventuale porosità interna. La porosità può essere ridotta, o quanto meno raccordata, mediante un processo di densificazione, il quale prevede un sistema di pressione isostatica a caldo che compatta le difettosità interne.
- *Fluidità:* In tale analisi viene posta della polvere in un contenitore con estremità conica e si analizza il tempo per il riempimento completo del cilindro. Difatti la fluidità di una polvere è espressa in secondi (6).

### 1.3.5 Interazione Laser-Polvere

La tecnica produttiva, così come i parametri di processo e le polveri adoperate, sono tutte variabili che influenzano il prodotto ottenuto per AM. Come primo approccio, non tenendo in considerazione le tecniche e la polvere adoperata, è possibile evidenziare il legame emergente tra due parametri di processo di rilevante importanza, ossia: "*velocità di deposizione*" e "*spessore dello strato*". La Figura 17 mostra come, la dimensione dello strato, influenzi notevolmente la velocità di deposizione, difatti, aumentando lo spessore del layer, il rateo di deposizione incrementa, così distinguendo due principali regioni in cui si collocano le tecniche di fabbricazione additiva.

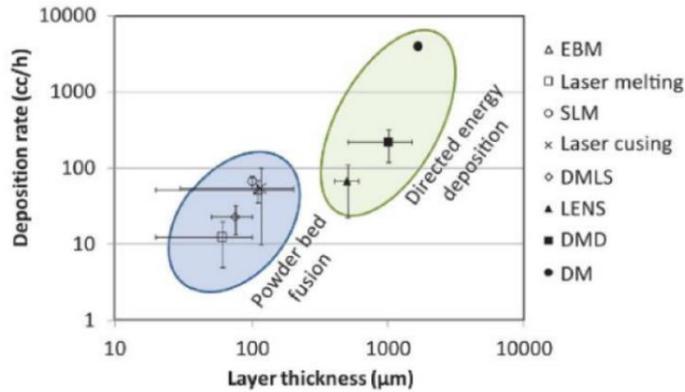


Figura 17 - Confronto tra velocità di deposizione e spessore di strato

Le regioni osservate non dipendono in alcun modo dalle caratteristiche meccaniche, difatti esse vengono esplicate in un grafico ulteriore, questa volta considerando l'elongazione massima del materiale fino a rottura e  $\sigma_u$ .

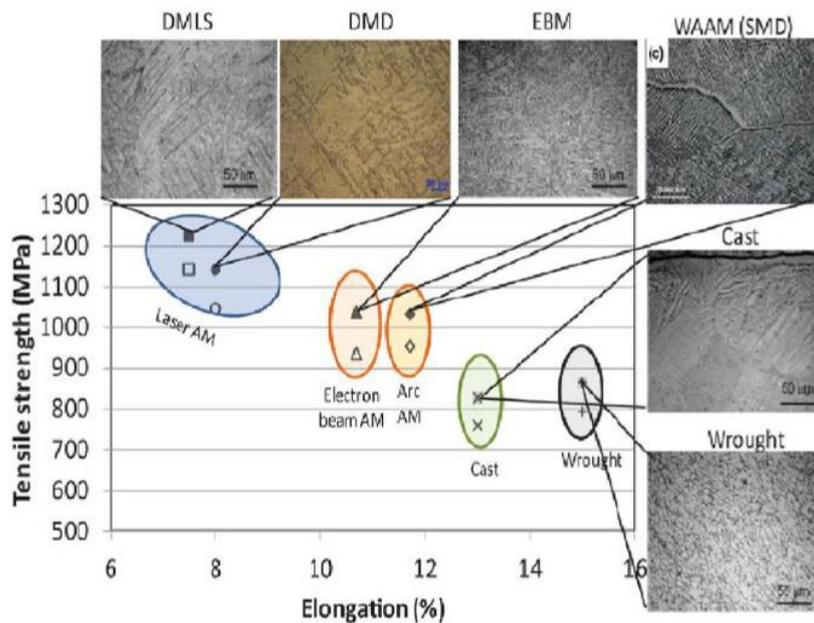


Figura 18 - Proprietà meccaniche in funzione della tecnologia produttiva adoperata

Viste le proprietà meccaniche, il materiale mostrato in *Figura 18*, a titolo di esempio, è sicuramente un Ti64. Come si nota, in base alla tecnica adoperata si evidenziano differenti comportamenti del materiale. Nel caso di processi di fabbricazione mediante laser, è evidente che il pezzo risultante ha un comportamento estremamente fragile essendo caratterizzato da una scarsa capacità di deformazione plastica e una  $\sigma_r$  elevata. La causa di tale caratteristica meccanica è già evidente dalle micrografie connesse alla regione

“*laser AM*” del diagramma. Com’è noto, il trattamento mediante fascio laser focalizzato comporta un istantaneo incremento di temperatura in un determinato punto, all’avanzare del fascio laser, essendo il melting pool precedente circondato da materiale a temperatura decisamente più bassa si avrà l’istantanea solidificazione. Il processo di fusione e successivo raffreddamento rapido comporta una struttura interna simile ad un materiale temprato, di conseguenza dotato di un elevato quantitativo di grani cristallini molto fini, i quali evidenziano un importante ostacolo all’avanzamento delle dislocazioni e dunque rendono il materiale fragile. Evidentemente, ciò non rappresenta un limite per i processi laser in quanto un successivo trattamento termico consente l’accrescimento dei grani rendendoli equiassici e incrementando la tenacità. I processi “*Arc Am*” o “*Electron beam AM*” consentono l’ottenimento di materiali con ottimi compromessi tra  $\epsilon_{\max}$  e  $\sigma_u$ , ciò è dovuto alla tecnica adoperata definita “a camera calda”. La polvere, prima di essere fusa, subisce un preriscaldamento il quale la porta ad una temperatura di circa 800 °C. In tal caso il raffreddamento, successivo al processo fusorio, avviene in tempi decisamente più lunghi consentendo la crescita del grano cristallino. Infine, nella stessa figura, vengono riportate le regioni indicanti le proprietà meccaniche ottenibili per i tradizionali processi di fonderia. In tal caso, si osservano materiali più duttili e con sigma modeste.

Il vantaggio di ottenere, alla fine del processo di formazione, un componente fragile piuttosto che duttile risiede principalmente nel processo termico da effettuare, difatti, far acquisire ad un materiale duttilità risulta particolarmente semplice, poiché consiste in un semplice processo di riscaldamento. L’operazione inversa, ossia donare rigidità ad un materiale duttile, richiede processi più complessi, ad esempio il quenching, effettuando poi particolari attenzioni a ritiri termici differenziali che potrebbero comportare la nascita di tensioni residue.

Durante il processo fusorio, l’interazione tra laser e letto di polvere genera una zona termicamente alterata che può essere distinta in 3 regioni (*Figura 19*):

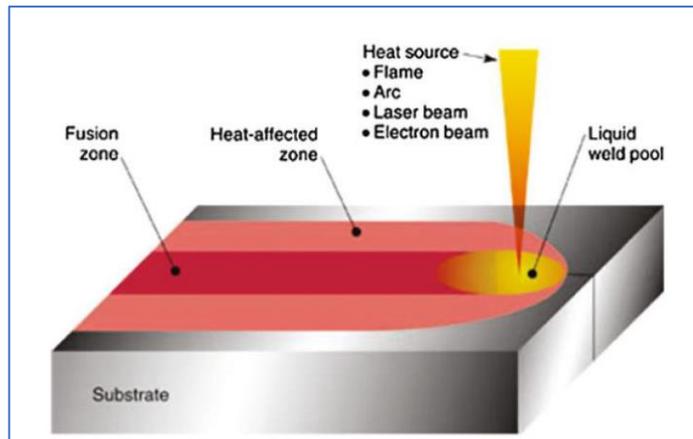


Figura 19 - Zona termicamente alterata

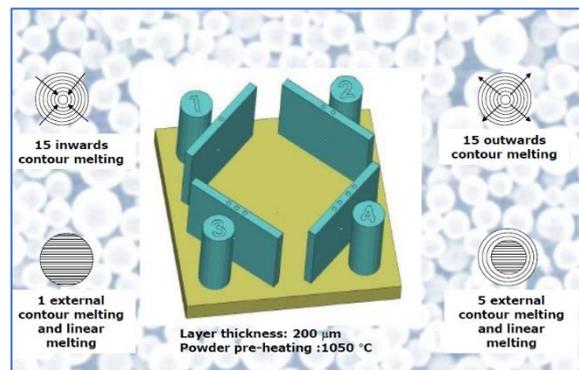
La prima regione è la zona di melting pool, ossia la zona dove avviene la vera e propria fusione della polvere.

Nelle zone circostanti si possono distinguere: una regione di polvere già fusa e solidificata dovuta al precedente passaggio del laser e una regione in cui non avviene l'interazione con il laser caratterizzata da proprietà meccaniche differenti a causa del riscaldamento. Di fondamentale importanza è il parametro di *overlapping*, esso definisce come, e quanto, sovrapporre le tre regioni tra due passaggi consecutivi del laser, in quanto esso definisce importanti variazioni delle proprietà meccaniche. Tale parametro va tenuto in considerazione sia per passaggi ripetuti lungo X- Y, sia lungo Z. Un passaggio multiplo del laser potrebbe causare un più facile raggiungimento della tensione di vapore e dunque generare l'evaporazione dell'elemento di lega basso fondente mutando le proprietà del componente finale.

Sapendo che la progettazione in additive comporta la costruzione del pezzo strato dopo strato, è immediato intuire che la resistenza meccanica del componente è differente lungo le direzioni X, Y e Z, difatti proprio in quest'ultimo, si assiste ad una riduzione delle proprietà meccaniche del 20% rispetto i piani X e Y, problematica risolvibile mediante un trattamento termico, ottenendo un comportamento isotropo. Ovviamente il comportamento differente lungo i diversi assi va preso in considerazione durante l'orientamento del pezzo in macchina, non trascurando, però, i gradienti termici, che potrebbero generare tensioni residue. La differenza di capacità resistenziale lungo Z rispetto gli assi X e Y, può essere attenuata mediante un'adeguata scelta dello spessore del layer. Spessori molto piccoli consentono di ottenere una ottima aderenza tra i diversi strati e ridurre le disomogeneità lungo Z, tuttavia, comportando la fusione ripetuta, potrebbero causare l'evaporazione dell'elemento basso fondente, oltre a rallentare il

processo. Spessori più grandi invece consentirebbero di ottenere una produzione più rapida ammettendo il comportamento differente, dal punto di vista meccanico, lungo l'asse di costruzione. Dunque, occorre scegliere spessori adeguati in base alle richieste di progettazione e produzione.

La tecnica di passaggio del laser, ovvero la strategia di scansione, gioca un ruolo fondamentale nella fase di progettazione. In *Figura 20* sono raffigurati 4 campioni effettuati mediante quattro tecniche di passaggio laser differenti:



*Figura 20 - Metodi di scansione*

- 1) Passaggio circolare dall'esterno all'interno;
- 2) Passaggio circolare dall'interno all'esterno;
- 3) Passaggio lineare-parallelo dopo aver fatto un contour esterno (per contenere il pezzo ed evitare l'andamento a gradini);
- 4) Passaggio lineare-parallelo dopo aver fatto 5 contour esterni.

Per il corretto confronto occorre adoperare lo stesso spessore di layer.

La prima tecnica, mostrata in *Figura 21*, mostra un'inadeguatezza alla dispersione del calore. Difatti la struttura risultante possiede una geometria di grani differente tra interno ed esterno del provino. Nella zona più esterna il componente è a contatto con polvere ad una temperatura decisamente inferiore a quella di fusione, nonostante essa sia preriscaldata. A causa del  $\Delta T$  elevato lo scambio termico avviene rapidamente, ciò implica una microstruttura fine. Nella zona centrale il comportamento non è il medesimo, difatti, la polvere fusa è circondata da materiale appena solidificato, dunque ad una temperatura non molto distante da quella di fusione. Lo scambio termico più lento, nella zona centrale, implica la formazione di grani con dimensione maggiore. Il raffreddamento

differenziale causa, inoltre, stress residui all'interno del componente, la zona più esterna è in compressione mentre l'anima del provino è in trazione.

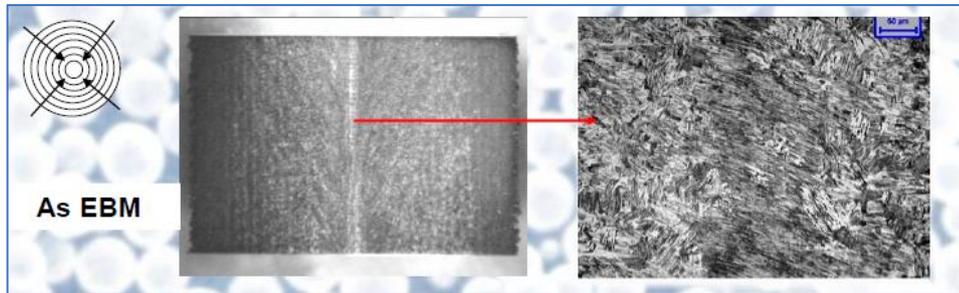


Figura 21 - Scansione circolare dall'esterno verso l'interno

La seconda e la terza tecnica portano ad una struttura finale simile tra loro e estremamente omogenea (Figura 22), ciò grazie alla capacità di asportare calore in modo efficace, difatti, sia nel caso di passaggi concentrici dall'interno verso l'esterno, sia per passaggi lineari-paralleli, la zona di fuso è sempre in contatto con la polvere, il  $\Delta T$ , dunque lo scambio termico, sono mediamente costanti, di conseguenza il componente avrà una struttura omogenea e non tensionata.

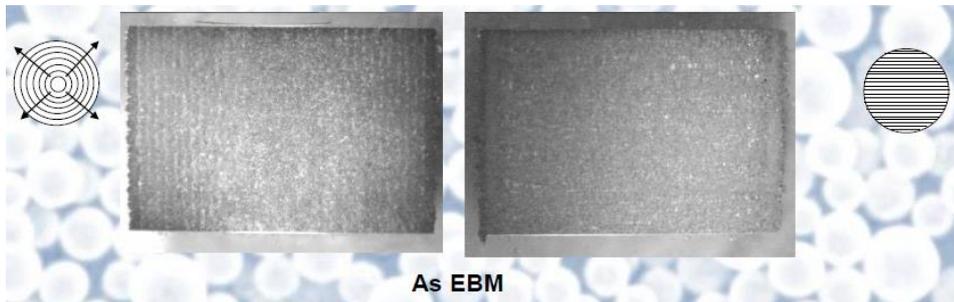


Figura 22 - Scansione circolare dall'interno all'esterno e scansione unidirezionale

La quarta tecnica porta a risultati non accettabili in ambito produttivo (Figura 23). Effettuando prima i contour esterni e successivamente i passaggi lineari-paralleli interni, oltre alle problematiche legate alla differente microstruttura interna, la tecnica costruttiva differente tra interno ed esterno causa un ritiro termico differenziale comportando delle porosità interne al componente.

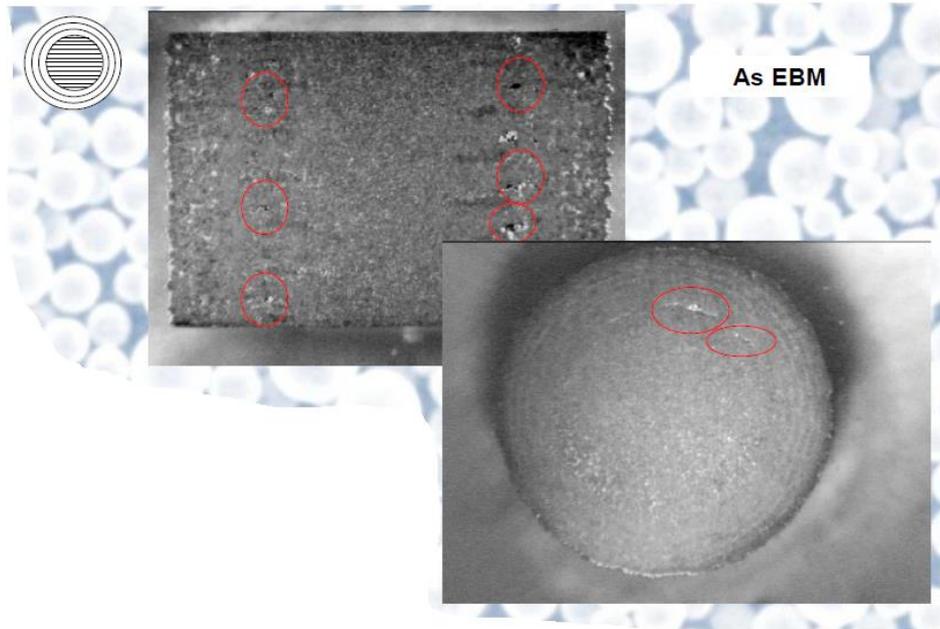


Figura 23 - Scansione con contour esterno e unidirezionale internamente

Per garantire isotropia e determinate caratteristiche meccaniche al componente è necessario intervenire sui parametri macchina. Di base i parametri variabili macchina sono (Figura 24) (7):

- Potenza laser (Laser Power LP 160-200W)
- Tempo di esposizione (Exposure Time ET)
- Distanza tra due passaggi consecutivi (Hatch Distance HD)
- Distanza tra uno spot e il successivo, solo nel caso di laser pulsato (Point Distance PD)

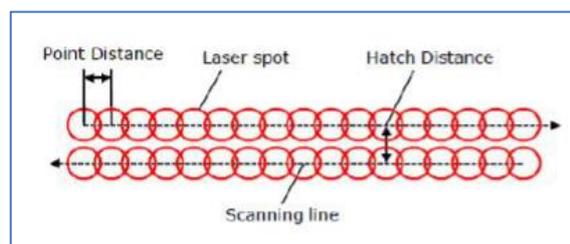


Figura 24 - Rappresentazione dei parametri macchina

Il primo parametro è altamente variabile, potenze basse consentirebbero di ottenere elevata precisione ma bassa velocità di produzione, viceversa potenze elevate consentirebbero rapidità in produzione tuttavia la possibile nascita di porosità dovute allo scarso controllo di ritiri termici.

Intuibilmente tali parametri possono essere mutati indipendentemente gli uni dagli altri, occorre dunque definire la giusta combinazione, su una determinata polvere, per ottimizzare i risultati e ottenere componenti con densità prossima al 100%. Per ricercare la giusta combinazione dei parametri si procede con analisi sperimentali.

Su una piattaforma posta in una macchina per AM vengono costruiti una serie di cubi variando mutuamente HD e LP (7). A job completato si effettua l'analisi delle porosità e si evidenzia quale combinazione consente di ottenere la densità più elevata, tale metodologia è definita *try and error*. La variazione dei parametri avviene lungo gli assi X e Y, difatti, l'analisi è principalmente effettuata lungo tale piano trascurando le problematiche lungo Z.

Una volta ristretto il range su cui effettuare la variazione dei parametri, viene effettuata nuovamente la prova all'interno di tale range, finché il risultato non è il migliore ottenibile. L'analisi della porosità al microscopio non può essere effettuata basandosi sul peso, poiché si potrebbe ottenere lo stesso valore di porosità ma internamente una distribuzione differente delle stesse, ossia, vacanze grandi e poco distribuite o vacanze piccole e molto distribuite.

Evidentemente il test deve essere ripetuto non solo per i parametri HD e LP, ma anche combinando quest'ultimi con ET e PD. Una volta effettuata la scelta dei parametri macchina occorre ancora effettuare la combinazione con i parametri di processo per ottenere le strutture cristallografiche desiderate.

Attualmente, un modo per velocizzare il processo è effettuare l'analisi di porosità su delle strisce di materiale. La caratterizzazione avviene effettuando una sezione della striscia di metallo fuso. Di tale sezione vengono analizzati parametri come: profondità di penetrazione, altezza del fuso, angolo sinistro e destro del cordone rispetto la superficie e larghezza. Ovviamente in base alla potenza del fascio laser, e in base alla velocità di passata, si ottengono differenti risultati (6).

#### 1.3.6 *Leghe metalliche*

Le principali leghe di interesse in AM sono le seguenti:

- Leghe di Ni
- Leghe di Ti
- Leghe di Co

- Leghe di Al

**Le leghe di Ni** consentono di ottenere, esclusivamente in AM, proprietà meccaniche fuori dal comune. A differenza di tutte le altre leghe, le quali subiscono il problema del sovrainvecchiamento, le leghe di Ni, all'aumentare della temperatura, vedono un incremento delle proprietà meccaniche significativo. Ciò è dovuto alla presenza di precipitati possedenti un coefficiente di dilatazione termica differente rispetto la matrice, all'aumentare della temperatura, la differente dilatazione termica, incrementa la distorsione del reticolo ostacolando maggiormente l'avanzamento delle dislocazioni, il che evidenzia un'ottima resistenza al creep. Principalmente vengono adoperate per parti statiche come statori a causa della scarsa tenacità. Se confrontate con leghes di ferro, alluminio o titanio si evidenzia il loro vantaggio in funzione della temperatura. Il titanio a temperatura ambiente possiede caratteristiche meccaniche migliori, tuttavia, ad alti livelli di temperatura (700°C circa), perde le proprietà antiossidanti, comportando un assorbimento di ossigeno tra gli strati causando l'esfoliazione degli stessi. Tale problematica non si evidenzia per le leghe di Ni, poiché l'alluminio migra verso la superficie formando allumina e generando uno strato protettivo antiossidante per la superlega. L'adozione degli acciai ad alta temperatura è totalmente impensabile, in quanto subiscono il fenomeno del creep.

Le principali leghe di Ni sono:

- Inconel 625, 713, 718, 738, 939;
- Haynes 230;
- Waspalloy;
- Hastelloy-X;

CM 247, 263, 276.

**Le leghe di titanio** fanno parte delle famiglie di leghe più adoperate in AM, è una delle prime ad avere un'applicazione a livello industriale in campi come: aerospazio, biomedico, meccanico, ciò grazie alle sue principali peculiarità, quali: bassa densità, resistenza meccanica comparabile a quella delle super leghe, se rapportata alla densità, buona resistenza a corrosione e a creep anche ad elevate temperature. L'impiego in aerospazio è dovuto alla possibilità di fornire significative diminuzioni di peso, mentre l'adozione in ambito biomedico è dovuta alla compatibilità con il corpo umano, la favorita osteointegrazione e la possibilità di deformarsi ed essere affine al comportamento osseo.

La complessità per l'ottenimento del titanio partendo dagli ossidi e le sue elevate proprietà meccaniche ne giustificano l'elevato costo. Negli ultimi anni si procede nel riprodurre, in ambito biomedico, sempre più fedelmente, la struttura ossea, generando strutture porose che potrebbero contenere il midollo osseo. La produzione di polveri di titanio non mira all'ottenimento di particelle con superfici perfettamente definite in quanto esso viene principalmente adottato in EBM e, in ogni caso, si avrebbe una superficie con rugosità elevata (ciò rappresenta un punto a favore per l'osteointegrazione). Il costo del titanio però, supera di un ordine di grandezza le altre leghe, ciò è dovuto al processo articolato di deossidazione. Il processo di ottenimento del Ti parte dalle cave o sabbie a cielo aperto, all'interno delle quali viene estratto il  $\text{TiO}_2$  (2.00\$ per pound), un ossido particolarmente duro e difficile da estrarre (questo comporta già un primo incremento del prezzo). Tale ossido è possibile trovarlo in due forme:

Rutilio → connessione tra le celle cristalline lungo i lati

Anatasio → connessione tra le celle cristalline lungo i vertici

L'ossido così ottenuto è estremamente stabile e difficile da dividere. Il processo di deossidazione comincia in un reattore ad alta temperatura ed ad alta pressione il quale mira alla formazione di Cloruro di titanio,  $\text{TiCl}_4$  (0.55\$ per pound). Dopo tale processo il titanio viene portato in un altro reattore, definito declorizzatore, che consente l'ottenimento del titanio in forma di spugna. Come si nota, il processo di deossidazione non è diretto, bensì richiede il passaggio in due reattori, i quali assorbono molta energia e comportano l'incremento del costo del titanio. Essendo il titanio particolarmente "reattivo" il processo per l'ottenimento della polvere per il powder bed deve garantire un rapporto superficie/volume delle particelle molto piccolo.

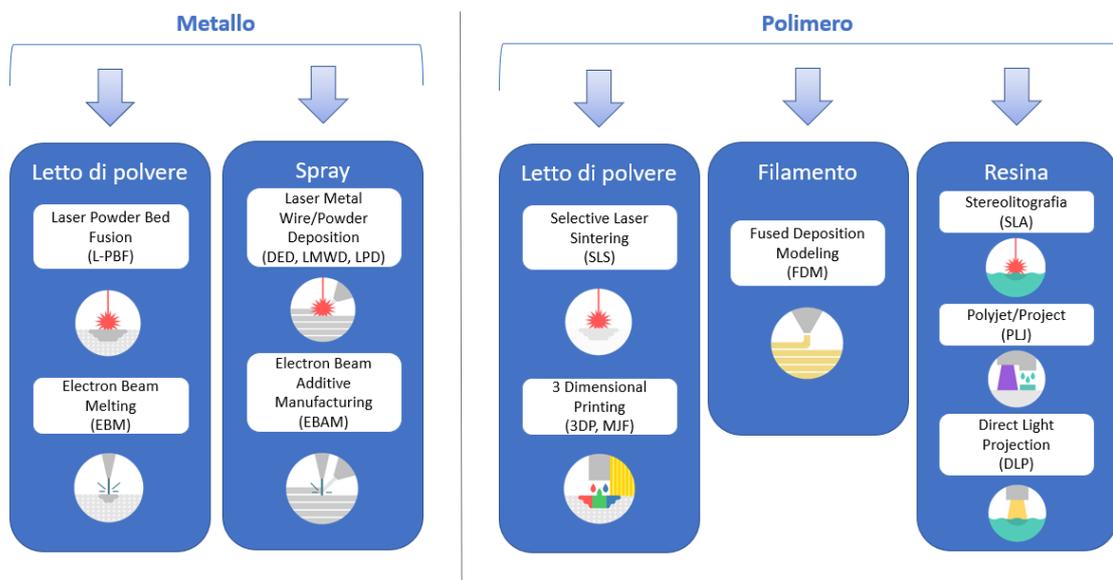
Le principali leghe di Titanio sono:  $\text{Ti6Al4V}$ ,  $\text{TiAl}$ .

Quest'ultima lega è di fondamentale interesse e di largo impiego nel mondo AM. Tale lega è inappropriata per processi di colata difatti, essendo particolarmente fragile, è estremamente difficile gestirne i ritiri termici all'interno degli stampi da fonderia. Le leghe  $\text{TiAl}$ , oltre ad avere elevate proprietà meccaniche, posseggono anche densità molto basse ( $3.8 \text{ g/cm}^3$  in confronto a  $7.9 \text{ g/cm}^3$  delle super leghe) che le rendono perfette per l'ambiente aeronautico, dove è particolarmente ricercato un alleggerimento (6).

## 2 TECNICHE PER LA FABBRICAZIONE ADDITIVA

Come detto precedentemente, La fabbricazione additiva nasce nel 1984, grazie a Dr. Hall, con il nome di prototipazione rapida, in quanto essa veniva impiegata principalmente per lo sviluppo di prototipi in breve tempo. Nell' 87 diviene una realtà commerciale, per poi passare da prototipi alla vera e propria costruzione di pezzi definitivi nel '90, prendendo il nome di Rapid Casting e Rapid Tooling. Solo nel 2000 essa si consolida come tecnologia definitiva con il nome di Additive Manufacturing.

Attualmente, una macro-distinzione per le tecnologie additive più diffuse può essere effettuata in base al materiale adoperato, come mostrato in *Figura 25*.



*Figura 25 - Tecniche per la Fabbricazione Additiva*

Le tecnologie metalliche possono essere a loro volta distinte in base alla tipologia di adduzione della polvere. Esse possono essere a letto di polvere o a deposizione diretta.

### 2.1 Tecnologie a letto di polvere

#### 2.1.1 Laser Powder Bed Fusion (L-PBF)

Tecnologia a letto di polvere, attualmente più diffusa al mondo in ambito metallico, essa è caratterizzata da una sorgente laser la quale fonde le particelle metalliche consentendo la formazione del componente.

In *Figura 26* è riportato uno schema della tecnologia:

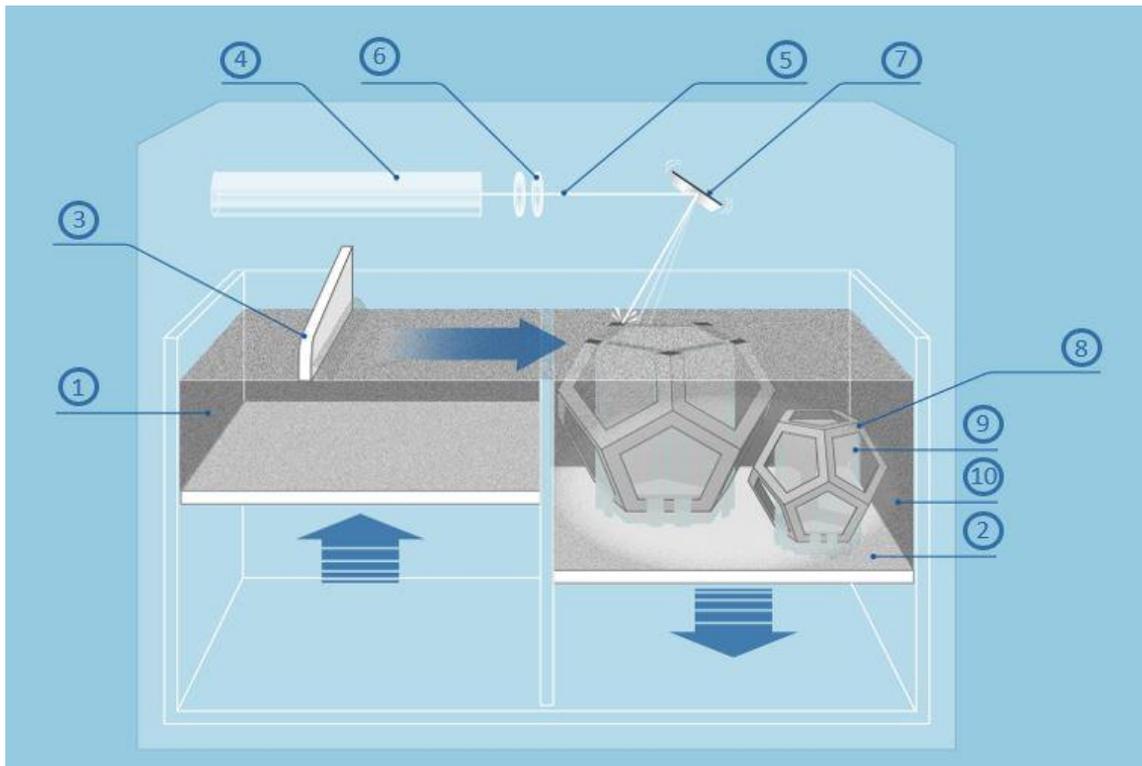


Figura 26 - Laser Powder Bed Fusion

Il numero (1), posto a sinistra della piattaforma di costruzione (2), rappresenta il recipiente contenente la polvere metallica. Grazie a tale posizionamento, la racla (3), effettua il corretto spandimento della polvere sulla piattaforma di costruzione. La sorgente laser (4) proietta un fascio laser (5), il quale viene focalizzato mediante un sistema di lenti (6) e movimentato con l'ausilio di specchi (7) consentendo un posizionamento dello spot rapido e preciso. Al termine del job, all'interno della camera di lavoro saranno presenti: il componente (8), i supporti (9), circondati da polvere non fusa (10).

Il processo comincia con la piattaforma di costruzione (2) priva di polvere, successivamente il rullo (3) spande la polvere sul ripiano grazie all'innalzamento del pistone all'interno del recipiente (1). La polvere preriscaldata mediante il controllo della temperatura della piattaforma di costruzione subisce una fusione localizzata, ottenibile mediante la sorgente laser (4). Terminato il primo strato, la piattaforma di costruzione si abbassa di  $\Delta S$  (per tale tecnologia il minimo è di  $10 \mu\text{m}$ ) e il processo ricomincia.

Tipicamente la lavorazione avviene in atmosfera inerte, con gas come argon o azoto, in tal modo è possibile evitare l'interazione tra polvere e ossigeno che potrebbe causare ossidazioni.

La fusione della polvere, e la successiva solidificazione rapida, garantisce un componente dalle proprietà meccaniche simili a quelle ottenibili da un processo di tempra. Difatti, la struttura granulometrica è estremamente fine così ottenendo un elevato quantitativo di bordi di grano e, dunque, impedendo lo scorrimento delle dislocazioni.

La tecnologia Selective Laser Melting ha avuto un processo evolutivo:

*1- Fusione del solo legante*

Inizialmente le polveri adoperate per tale tecnologia erano pre - rivestite da un legante polimerico il quale, durante l'esecuzione del job, sottoposto ad una sorgente laser, fondeva così garantendo l'aggregazione delle particelle metalliche. La fase successiva prevedeva l'inserimento del componente in forno con la conseguente evaporazione del polimero e l'infiltrazione di ottone fuso.

*2- Fusione del metallo bassofondente*

L'evoluzione del processo precedente è stata il Selective Laser Sintering. Tale tecnologia adoperava una miscela caratterizzata da polveri altofondenti e bassofondenti, la presenza di quest'ultime garantisce, anche con una bassa potenza del laser, la fusione parziale della polvere metallica e la coesione tra le particelle altofondenti. Un classico esempio è la miscela Bronzo-Nichel.

*3- Fusione completa e solidificazione*

Grazie alla potenza raggiunta dai laser attuali, è possibile effettuare facilmente la fusione localizzata della polvere e ottenere il componente desiderato.

Dunque, la polvere metallica è di un unico materiale, tuttavia, le particelle posseggono una differente geometria e dimensione a causa del processo di gas/water atomization.

Il passaggio dalla sinterizzazione alla fusione ha consentito di eliminare le miscele multi-componente, ciò ha portato un grande vantaggio sulla densità del componente che, con le tecniche attuali, è prossima al 100%.

L'energia necessaria per la fusione della polvere è fornita da una sorgente laser allo stato solido come il cristallo d'ittrio e alluminio drogato Nd-Ya e trasmessa mediante fibra ottica.

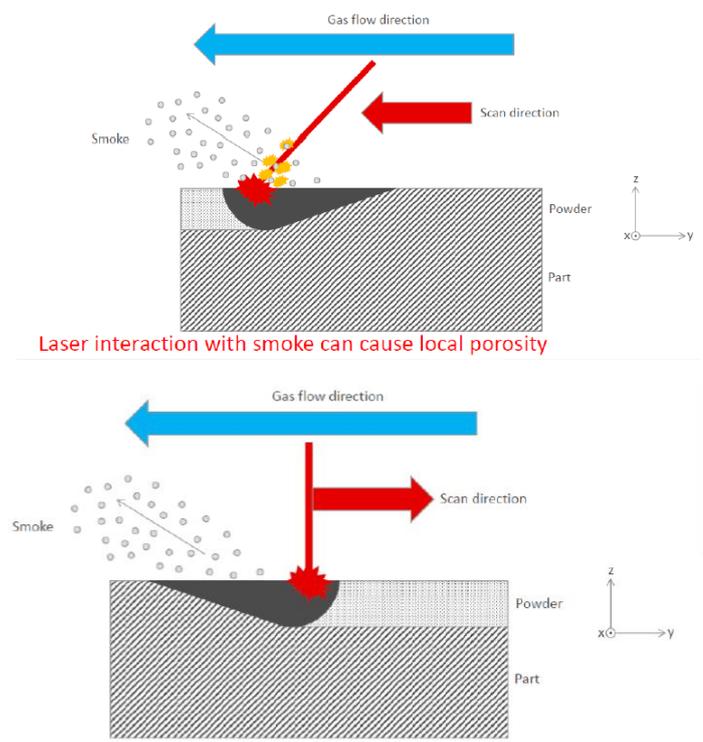
Nonostante la temperatura della camera sia di circa 200 °C, la fusione e la successiva solidificazione della polvere avviene in breve tempo, ciò causa una struttura amorfa particolarmente tensionata, che rende il componente fragile. Per aggirare tale problematica è possibile effettuare un trattamento termico di

distensione in modo da eliminare i tensionamenti residui e consentire la rimozione del pezzo dalla piattaforma e dai supporti che, altrimenti, si deformerebbe istantaneamente.

Un ulteriore problematica da considerare per garantire la riuscita del componente è quella inerente alla porosità, essa viene controllata mediante un'adeguata pulizia della camera, asportando i fumi prodotti durante il processo fusorio e lavorando in atmosfera controllata, così evitando anche eventuali ossidazioni.

La polvere non fusa durante il processo di costruzione del componente non viene completamente recuperata, bensì essa viene setacciata in modo da scartare eventuali agglomerati che renderebbero difficoltosa la stesura sulla building platform.

La necessità di rimuovere i fumi è evidenziabile in *Figura 27*.



*Figura 27 - Influenza della direzione del gas di copertura sui fumi*

I principali attori presenti nel mercato per tale tecnologia sono: EOS, 3DSystems, SLM Solutions GmbH, Renishaw, ConceptLaser, Additive Industries.

Le principali applicazioni della tecnologia L-PBF sono:

- 1- *Componente alleggerito*, un esempio è la cerniera per le celle motore per A380 (*Figura 28*) riprogettata in AM e costruita in titanio. Il processo di ottimizzazione

topologia e il cambio di materiale ha consentito una riduzione di peso del 65 %, così permettendo il risparmio di carburante e la riduzione delle emissioni.

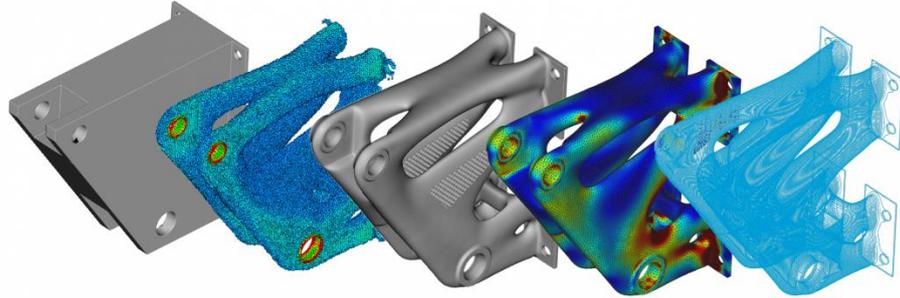


Figura 28 - Ottimizzazione topologica per alleggerimento

- 2- *Impianti biomedicali*, progettati direttamente sul paziente con vantaggi come costi clinici e tempi di riabilitazione ridotti. Inoltre, la possibilità di ottenere strutture ibride con una parte densa ed una porosa, definite “*strutture trabecolari*”, consente di facilitare l’osteointegrazione (*Figura 29*).



Figura 29 - Strutture lattice per osteointegrazione

- 3- *Scambiatore di calore*. L’assenza del vincolo dei sottosquadri, durante la fase di progettazione, consente di integrare più parti ottimizzando l’uso degli spazi a disposizione, inoltre, una geometria opportunamente progettata, non realizzabile con tecniche tradizionali, garantisce delle turbolenze utili alla massimizzazione dello scambio termico (*Figura 30*) (1) (8).

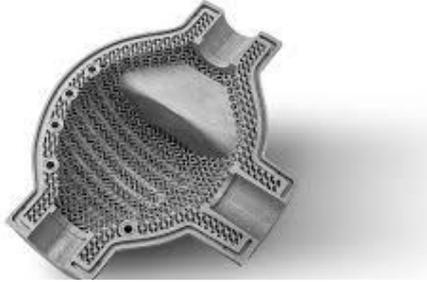


Figura 30 - Scambiatore di calore con strutture lattice

### 2.1.2 Electron Beam Melting

Così come il caso precedente, essa è una tecnologia a letto di polvere. Attualmente esiste un unico produttore essendo l'unico detentore del brevetto, Arcam del gruppo General Electric. Differentemente dal L-PBF, in tal caso la fusione del letto di polvere è garantita da un fascio elettronico.

La schematizzazione del processo produttivo è riportata in *Figura 31*:

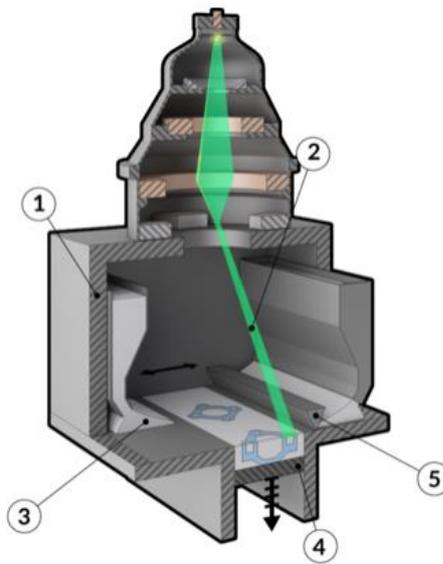


Figura 31 - Electron Beam Melting

Il processo ha inizio generando un'atmosfera di vuoto spinto ( $10^{-3}$  Pa) all'interno della camera (1), ciò è necessario per evitare che i gas presenti all'interno della macchina possano interferire con il fascio elettronico. I contenitori (3), posti a destra e sinistra della piattaforma, lasciano cadere un determinato quantitativo di polvere che viene opportunamente distribuito mediante la racla (5) sulla building platform (4). Il fascio elettronico (2), opportunamente deviato e focalizzato mediante un sistema di lenti elettromagnetiche, inizialmente riscalda lo strato di polvere appena depositato mediante

un fascio defocalizzato, successivamente, focalizzando il fascio, consente la fusione selettiva della polvere, infine il piano di costruzione viene abbassato di  $\Delta S$  (per tale tecnologia il valore minimo è di 50  $\mu\text{m}$ ) e il processo ricomincia.

Prima che il processo di formazione del componente abbia inizio è necessario preriscaldare la piastra di costruzione ad una temperatura prossima agli 800°C, ciò è indispensabile poiché, in tal modo, è possibile presinterizzare la polvere ed evitare che essa possa diffondersi liberamente in camera durante l'interazione con il fascio elettronico.

Le temperature di lavoro alte e l'adozione di un fascio elettronico rendono tale tecnica poco conveniente per materiali basso-fondenti e ferromagnetici, tuttavia, consentono l'impiego di un minor quantitativo di supporti, essendo il componente caratterizzato da tensionamenti residui ridotti, nonché una microstruttura meno fine rispetto a quella ottenibile in L-PBF, ciò garantisce una maggiore duttilità.

Il fascio elettronico è generato da un filo di tungsteno portato ad incandescenza, esso deve subire manutenzione periodica per evitare il malfunzionamento del macchinario. Gli elettroni generati vengono accelerati mediante un potenziale anodico di 60kV raggiungendo velocità comprese tra 0.1/0.4 volte la velocità della luce, essi vengono proiettati sul letto di polvere con uno spot minimo di 0.1 mm. L'interazione tra elettroni ad elevata velocità e particelle di polvere è paragonabile ad un urto meccanico, l'energia dissipata durante tale urto viene trasformata da energia cinetica in calore, così consentendo la fusione della polvere metallica.

	<b>L-PBF</b>	<b>EBM</b>
<b>Sorgente termica</b>	Laser	Fascio elettronico
<b>Condizioni della camera</b>	Gas inerte	Vuoto con pressione parziale di elio
<b>Spessore di strato</b>	20 $\mu\text{m}$	50 $\mu\text{m}$
<b>Tensioni residue</b>	Presenti	Minima
<b>Microstruttura</b>	Fine	Grossolana
<b>Rugosità</b>	Bassa	Elevata
<b>Temperatura camera di lavoro</b>	Fino a 200 °C	800 °C

Tabella 1 - Confronto tra L-PBF e EBM

Differentemente dalla Laser Powder Bed Fusion, nel processo di Electron Beam Melting, come osservato dal confronto in *Tabella 1*, è presente un'interazione tra il fascio elettronico ed il letto di polvere. La proiezione dell'elettrone potrebbe causare l'innalzamento di una nube pulviscolare, causato dalla forza repulsiva esistente tra la carica elettronica e la carica elettrostatica della polvere, e potrebbe essere asportata dalla pompa generante il vuoto. Per ovviare a tale problematica è necessario, evitando l'interruzione del processo, oltre a lavorare in un ambiente preriscaldato, occorre utilizzare particelle di polvere con diametri più grandi rispetto a quelle adoperate per L-PBF e spot maggiori per evitare la concentrazione della carica elettronica. In tal modo la forza coulombiana di repulsione sarà inferiore alla forza peso della singola particella, impedendone l'innalzamento (1) (8).

## 2.2 Tecnologie di deposizione diretta

### 2.2.1 Direct Energy Deposition

Tale tecnologia è antecedente alla nascita della L-PBF. Essa, difatti, ha origine dal *laser cladding*, ovvero tecnologia che prevede la riparazione della parte usurata di un componente mediante l'aggiunta di materiale d'apporto. Tale tecnologia è adoperata, infatti, per la riparazione di componenti meccanici, invece è impiegata in modo ridotto per i processi di fabbricazione del componente. Per quanto detto, il settore di impiego principale è quello aerospaziale, in tal caso la tecnologia è adatta alle riparazioni di pale di turbina, in modo da abbattere i costi di ri-fabbricazione.

Il processo di Direct Energy Deposition, o Deposizione Laser, è riportato come schema in *Figura 32*:

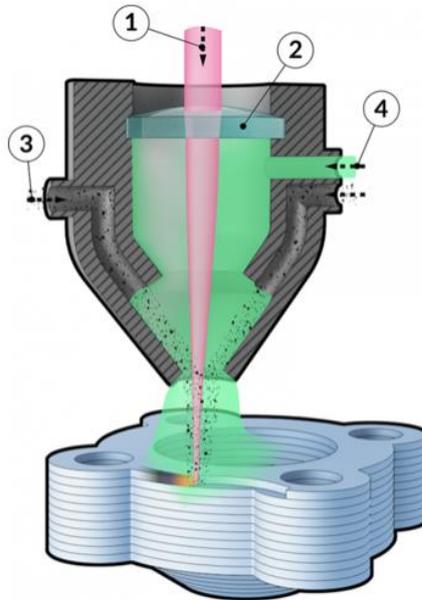


Figura 32 - Direct Energy Deposition

La testa di deposizione è solitamente connessa ad un robot a 5 assi, ciò è necessario per far sì che possa raggiungere qualsiasi punto del componente ed aggiungere materiale dove necessario. Essa è caratterizzata da un fascio laser (1) focalizzato mediante la lente (2). La polvere, entrante nell'ugello di deposizione dalla sezione (3), viene depositata sul componente e contemporaneamente fusa dal fascio laser. Per evitare che l'ossigeno presente in camera possa comportare l'ossidazione della polvere durante la fase di deposizione o che si possano formare delle porosità, è necessario adoperare un gas di copertura (solitamente argon), insufflato dalla sezione (4). La movimentazione della testa mediante un sistema robotizzato elimina la problematica legata alla dimensione del componente da fabbricare, difatti, mentre per le tecnologie L-PBF e EBM le camere di costruzione sono rispettivamente  $0.16 \text{ m}^3$  e  $0.015 \text{ m}^3$  (9) (10) di dimensione massima, per DED la camera di costruzione è  $1.2 \text{ m}^3$  (11).

La possibilità di adoperare più ugelli per la deposizione conferisce, a tale tecnologia, un notevole vantaggio, difatti è possibile adoperare materiali differenti ottenendo leghe, o componenti multi-materiale, direttamente durante la fase di deposizione. Il problema della cross contamination non è presente essendo ogni ugello indipendente e quindi, potenzialmente, collegato al proprio contenitore di polvere. Un ulteriore vantaggio per tale tecnologia è il quantitativo di polvere da utilizzare. In tal caso non sarà necessario ottenere un letto di polvere, difatti la polvere è depositata solamente dove indispensabile.

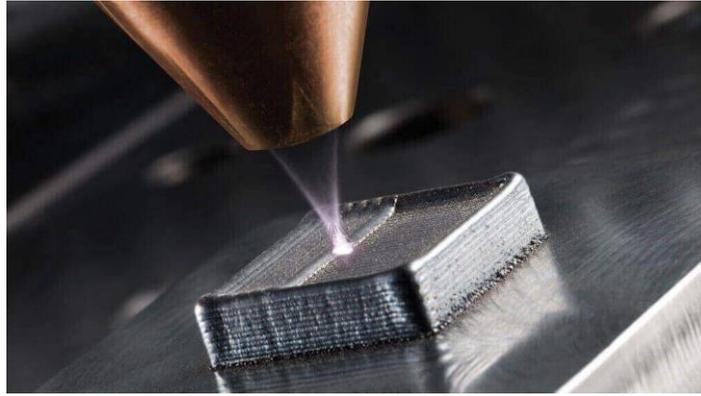


Figura 33 - Finitura superficiale di un provino DED

La principale limitazione di tale tecnologia, oltre alla scarsa finitura superficiale (Figura 33), è legata all'impossibilità di costruire supporti. La presenza di sottosquadri deve essere opportunamente analizzata, poiché possono essere costruiti solo mediante la mobilitazione della testa di deposizione e della tavola di costruzione. Strutture complesse, come inserti per stampi dotati di canali conformali, non possono essere costruite.

Commercialmente, la tecnologia DED è di ristretto impiego, la sua applicazione, attualmente, è confinata principalmente al *Cladding*.

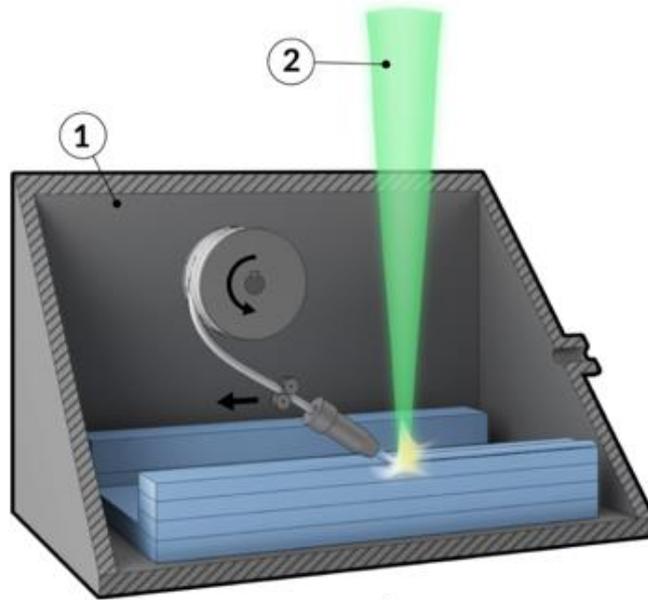
I produttori di tale tecnologia sono pochi, tra i pionieri rientrano Optomec e DMD, a seguire DGM Mori Seiki e Prima Industrie, quest'ultima adopera un sistema a portale in cui la testa di deposizione può essere sostituita con una testa di ablazione, in tal modo è possibile ottenere una lavorazione di finitura senza interrompere il job.

La possibilità di effettuare il cambio utensile conferisce a tale tecnologia un'implementazione ibrida. Attualmente, in mercato, sono presenti macchine ibride dotate di una testa di deposizione, che consente la fabbricazione additiva, e una testa utensile, o mandrino, adoperata per lo sgrossamento e finitura.

La geometria e la dimensione della polvere non giocano un importante aspetto per tale tecnologia. La scarsa finitura superficiale e la presenza di un ugello in grado di spruzzare la polvere piuttosto che stenderla, consente l'impiego di particelle con granulometria non perfettamente sferica e con dimensioni più grandi rispetto a quelle adoperate per le tecniche a letto di polvere, intuibilmente ciò abbatta i costi di approvvigionamento (1) (8).

### 2.2.2 Electron Beam Additive Manufacturing

Tale tecnologia adoperata un fascio elettronico che proiettato su un filo metallico di materiale d'apporto ne consente la fusione. Uno schema della tecnologia è riportato in *Figura 34*:



*Figura 34 - Electron Beam Additive Manufacturing*

Il fascio elettronico (2), generato da un filo di tungsteno, come per la tecnologia EBM, viene adoperato per la fusione del filo metallico opportunamente posizionato grazie all'ausilio di un ugello e una bobina. Per operare in modo efficace è necessario generare il vuoto spinto all'interno della camera (1), ciò consente anche di evitare ossidazioni ed ottenere un cordone di saldatura privo di difetti, adatto per le lavorazioni successive. Ovviamente la generazione del vuoto risulta complessa e richiede pareti spesse per evitare l'implosione del macchinario.

Così come per la Direct Energy Deposition vi è la possibilità di adottare due filamenti di materiale differente, in tal modo è possibile generare la lega in macchina.

La tecnologia ha largo impiego nel settore aerospaziale, ciò è dovuto ai bassi volumi produttivi che renderebbero ingiustificato l'acquisto di uno stampo per la formazione di componenti.

Il volume di lavoro è di 8,5 m<sup>3</sup> con la possibilità di realizzare componenti assial-simmetrici fino ad un diametro di 2.4 m (1) (8).

### 2.3 Design for Additive Manufacturing

Il fine ultimo del DfAM è la “massimizzazione delle prestazioni del prodotto attraverso una sintesi delle forme, dimensioni, strutture gerarchiche e composizione del materiale soggetta al potenziale delle tecnologie additive”.

Il DfAM è una metodologia di progettazione che, prendendo in considerazione le caratteristiche funzionali del prodotto, i processi di fabbricazione e altri punti chiave per la progettazione del prodotto stesso, consente di semplificare e ottimizzare la produzione di un componente (12). Gli obiettivi del DfAM possono essere raccolti nel seguente elenco:

- minimizzazione del peso;
- massimizzazione delle prestazioni meccaniche;
- ottimizzazione del comportamento dinamico;
- ottimizzazione delle prestazioni meccaniche;
- riduzione del numero di componenti;
- integrazione delle funzioni in un unico elemento.

Per ottenere le peculiarità precedentemente esposte occorre prestare attenzione ad alcuni vincoli progettuali presenti nel campo additive, in tal modo è possibile evitare la scorretta realizzazione del componente.

Di seguito vengono riportate alcune regole di Design per una corretta progettazione in L-PBF.

- *Spessore della building platform:* Come ben noto, il processo di fabbricazione additiva consiste nella formazione del componente strato dopo strato. La base di partenza, ovvero il primo strato, può essere aderente alla piattaforma di costruzione o distanziato mediante l'utilizzo di supporti. Lo spessore della building platform è correlato al materiale di cui essa costituita, esso è di fondamentale importanza per garantire rigidità meccanica e un'uniforme distribuzione del calore. La rimozione del componente dalla piattaforma può avvenire in modo meccanico o mediante elettroerosione a filo (EDM), in entrambi i casi verranno lasciate tracce su di essa per cui è indispensabile un'operazione di spianatura e successiva pallinatura (*Figura 35*) per garantire l'adesione del primo strato.



Figura 35 - Pulizia della building platform

- *Superfici inclinate aggettanti*: Parti a sbalzo devono essere opportunamente supportate, la polvere non fornisce alcun supporto a tali parti essendo di geometria sferica e con facile scorrevolezza. Esiste un angolo discriminante, angolo formato tra sbalzo e piano di costruzione (Figura 36), al disotto del quale è necessario l'impiego di supporti, tale angolo è dipendente dal materiale adottato per il componente.

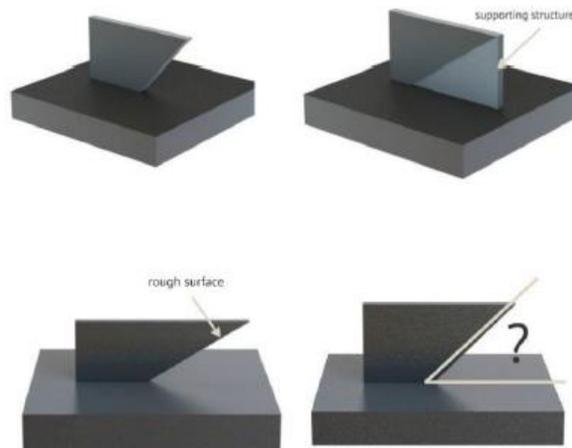


Figura 36 - Angolo discriminante per la generazione di supporti

L'assenza di supporto genera una superficie difettosa con effetto di *stair-stepping* (effetto scalino). Una zona di connessione tra supporti e componente ben progettata potrebbe fornire una finitura superficiale migliore del caso della completa assenza di quest'ultimi, inoltre, l'adozione dei supporti è indispensabile anche per una corretta distribuzione di calore.

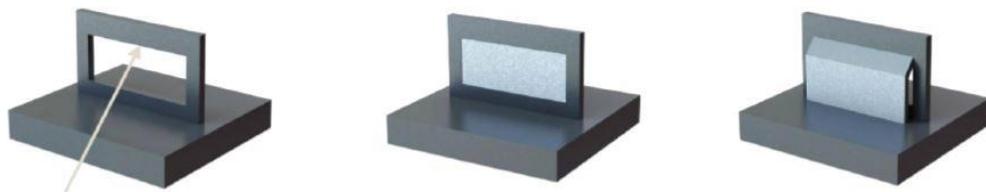
- *Costruzione di fori*: I fori con asse parallelo alla building platform vengono eseguiti correttamente fino a 6mm di diametro, dimensione massima per garantire la capacità auto-supportante della parte. Per diametri superiori, così come le superfici inclinate, è necessario adottare supporti per evitare la generazione di superfici difettate. Data la necessità di generare strutture di supporto, che

andranno comunque rimosse alla fine del processo di fabbricazione, è conveniente generare i fori, di diametro superiore ai 6 mm, direttamente durante la fase di finitura e rettifica. Per fori di dimensioni molto grandi, per risparmiare materiale di scarto durante la fase di lavorazione al CNC, è conveniente adottare una struttura a goccia, la quale rende la struttura auto-supportante (*Figura 37*).



*Figura 37 - Fori in Additive Manufacturing*

- *Costruzione di superfici orizzontali:* Nel caso di superfici parallele alla building platform l'adozione dei supporti è necessaria, tuttavia, facendo riferimento alla *Figura 38*, è preferibile non adottare la soluzione centrale, in quanto entrambe le superfici, superiore ed inferiore, avranno dei difetti superficiali generati dai supporti stessi. La soluzione a destra è la più conveniente, generando un angolo di  $45^\circ$  per i supporti è possibile garantire la capacità auto-supportante e quindi compromettere solo la finitura della superficie superiore.



*Figura 38 - Costruzione dei supporti in AM*

Ulteriori soluzioni per evitare, o ridurre, l'adozione di strutture di supporto sono riportate in *Figura 39*. Nel primo caso, la rotazione del componente di  $45^\circ$ , consente di ottenere tutte pareti auto-supportanti tuttavia peggiorando la finitura superficiale del componente. La seconda soluzione prevede una struttura a dente di sega con angolo di  $45^\circ$ , in tal modo sarà necessario supportare solo le estremità

dei denti. La terza soluzione consta nella generazione di asole con raggio di raccordo di 3 mm, condizione sufficiente per evitare la generazione di supporti. Le tre soluzioni sono ugualmente valide poiché tutte implicano una lavorazione meccanica successiva.

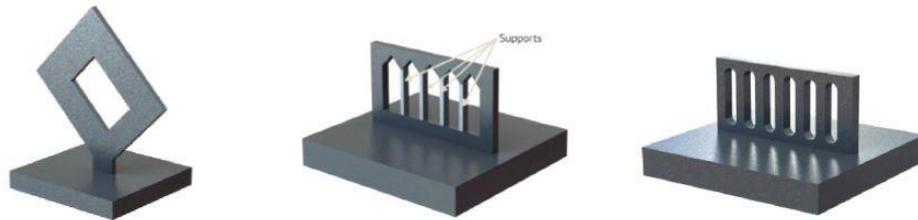


Figura 39 - Soluzioni progettuali per mitigare l'utilizzo di supporti

- *Posizionamento del componente sulla building platform:* L'orientamento del componente gioca un importante fattore per garantire la riuscita del job ed evitare il danneggiamento della macchina. Come detto, la tecnologia EBM adopera una racla per lo spandimento della polvere, essendo in materiale ceramico, uno scorretto orientamento potrebbe causare la rottura di quest'ultima a causa dell'impatto sul componente. Garantendo, alla racla, un ingresso progressivo sulla geometria, è possibile evitare l'impatto e consentire un'area di contatto crescente durante lo spandimento della polvere. Come mostrato in *Figura 40*, le soluzioni adottabili sono differenti:
  - orientare il componente in modo che la geometria curva sia la prima zona in contatto con la racla;
  - orientare il componente fornendo un angolo minimo di 5° rispetto alla direzione di avanzamento della racla;
  - orientare il lato maggiore del componente lungo la direzione di avanzamento della racla;
  - orientare il componente in modo che la geometria raccordata sia la prima zona in contatto con la racla.



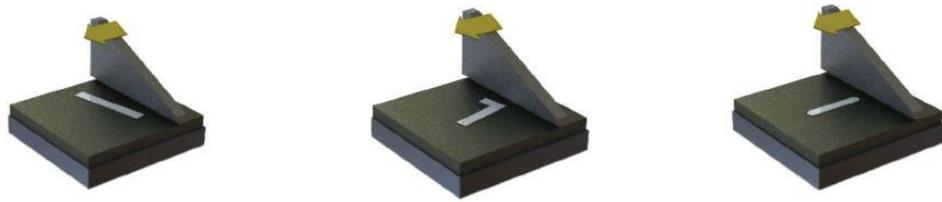


Figura 40 - Orientamento del componente in macchina rispetto la racla

L'avanzamento del recoater, o racla, genera una sollecitazione sul job, ciò impedisce la costruzione di componenti snelli, con rapporto tra altezza e larghezza superiore ad 1:8. Nel caso di pareti sottili poco distanziate è preferibile, dunque, connettere le due pareti e, successivamente, rimuovere la connessione durante la fase di finitura (Figura 41).



Figura 41 - Costruzioni di geometrie snelle

Durante l'esecuzione dello slicing è preferibile osservare attentamente le sezioni del job, superfici fuse eccessivamente grandi potrebbero causare difficoltà nel ritiro termico generando deformazioni o componenti tensionati. La soluzione, dunque, per la costruzione di superfici piane è fornire una leggera inclinazione al componente (13).

## 2.4 Conformal Cooling

L'adozione della tecnologia L-PBF è di largo impiego per lo sviluppo di canali conformali. Tale tipologia di canali consente di ottenere una miglora per i processi di stampaggio, siano essi in materiale plastico o metallico. Come mostrato dal grafico a torta in Figura 42, chiusura, iniezione, riempimento, apertura ed estrazione richiedono solamente il 30% del tempo totale del processo, il restante 70% è associato al tempo di raffreddamento. La riprogettazione possiede come vincolo

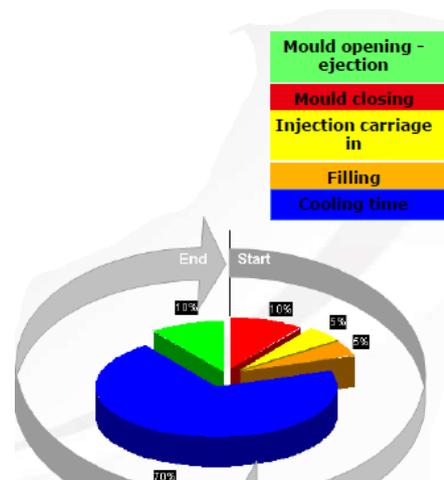
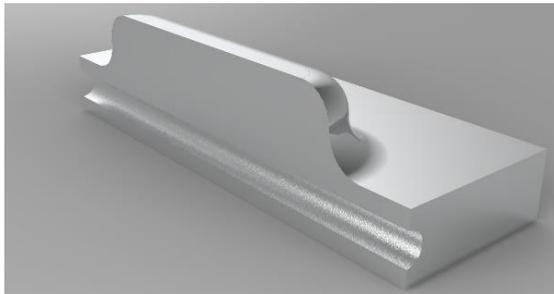


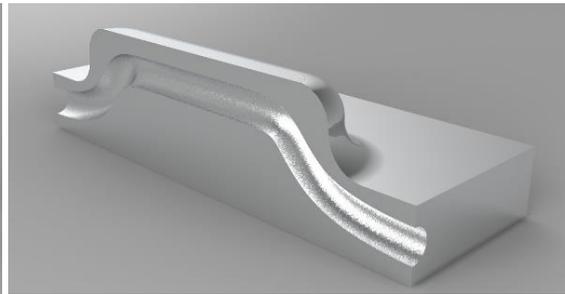
Figura 42 - Tempistiche per ogni fase del processo di stampaggio

l'impossibilità di modificare la struttura esterna, tuttavia, la geometria interna, è priva di qualsiasi vincolo progettuale.

Lo sviluppo di canali conformali, ossia canali non vincolati a geometria rettilinea bensì formati in modo tale da seguire la geometria del componente ed eliminare i punti caldi (*Figura 43 e Figura 44*), consente di velocizzare la produzione ed ottenere un miglior controllo del ritiro da solidificazione (nel caso di stampaggio per iniezione). L'incremento di prezzo del singolo stampo è mitigato dall'incremento di produzione ottenibile con tale riprogettazione.



*Figura 43 - Canali tradizionali*



*Figura 44 - Canali conformali*

Nonostante l'assenza di vincoli di riprogettazione, per ragioni legate alla resistenza meccanica e strutturale dello stampo, è preferibile conservare un offset dalla superficie di almeno un millimetro, nonché adottare canali con diametro massimo di 6 mm, in tal modo è possibile garantire una geometria auto-sopportante ed evitare la generazione di supporti interni, i quali sarebbero di impossibile rimozione.

La possibilità di costruire inserti o semplicemente adottare soluzioni ibride, unendo la tecnologia tradizionale e la fabbricazione additiva, consente di abbattere i costi per la costruzione di tali stampi.

Un esempio è riportato in *Figura 45*, raffigurante la sezione di uno stampo per ambiente automotive. Come si nota, in tal caso, la gestione della temperatura deve essere migliorata solo superficialmente, ciò implica l'adozione dei canali conformali solo nella parte superiore.

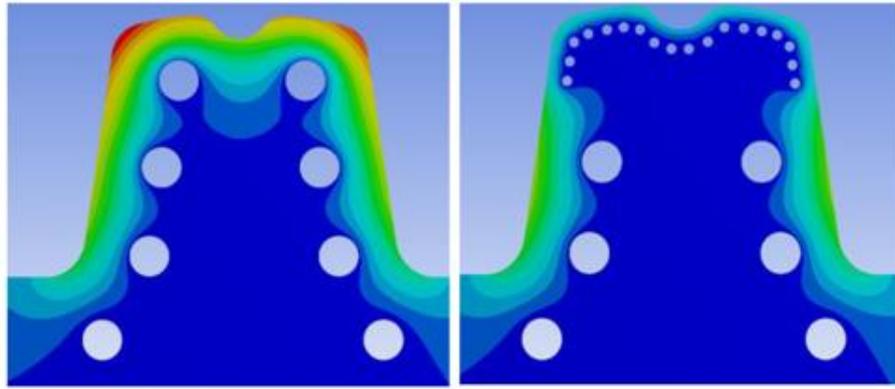


Figura 45 - Esempio di raffreddamento mediante canali conformali

La migioria della distribuzione di temperature è necessaria poiché, come mostra la *Figura 46*, il 60% dei difetti derivanti dalla produzione è dovuto alla difficoltà di gestione del raffreddamento.

Come detto, la riprogettazione riguarda solo la parte superiore dello stampo, ciò consente di adoperare una soluzione ibrida. Il blocco a sinistra, in *Figura 47*, è stato ottenuto mediante lavorazione al CNC ed è già dotato di canali tradizionali. Successivamente, il componente è stato sottoposto al L-PBF ed è stata additivata la parte dei canali conformali, a destra in *Figura 47*, così ottenendo significativi vantaggi riguardo il tempo necessario per la produzione dello stampo ed il quantitativo di polvere necessaria.

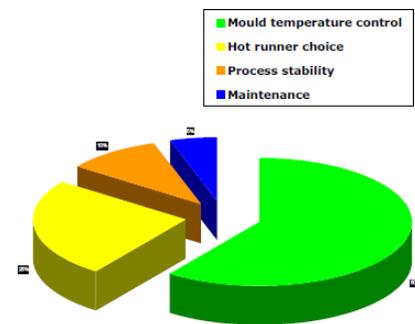
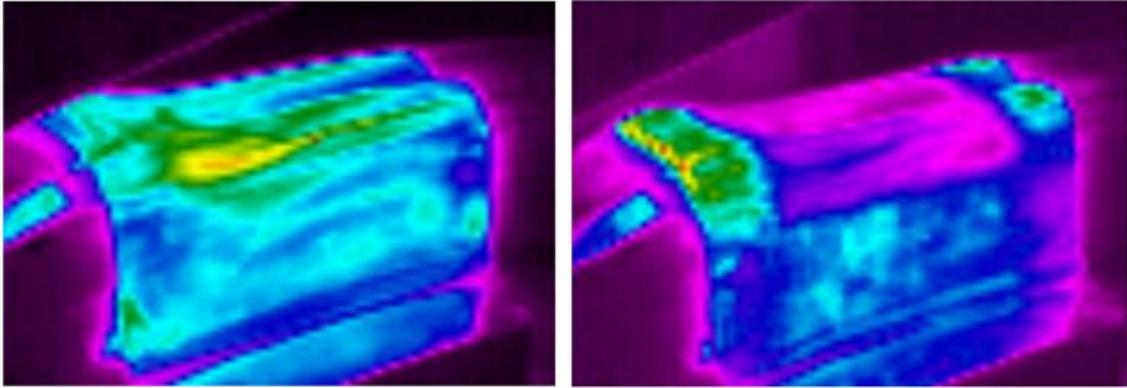


Figura 46 - Cause failure nel processo di stampaggio



Figura 47 - Soluzione ibrida

L'analisi alla termo-camera (*Figura 48*) mostra come l'impiego della riprogettazione con canali conformali ha giovato il controllo termico del processo consentendo di eliminare i punti caldi (14).



*Figura 48 - Analisi alla termo-camera*

## 3 CASO STUDIO

### 3.1 Esperienza al Centro Ricerche Fiat

Lo studio e la redazione della tesi sono stati preceduti da un tirocinio curriculare all'interno del Centro Ricerche Fiat.

Il Centro Ricerche Fiat, CRF, è stato fondato nel 1978 come centro di riferimento per la ricerca tecnologica di Fiat Chrysler Automobiles, FCA. Il CRF svolge principalmente tre compiti:

- Sviluppare motori per la propulsione di veicoli terrestri, sistemi veicolo, materiali, metodologie e processi innovativi in modo da migliorare qualitativamente e quantitativamente la produzione, implementando la competitività dei prodotti di FCA sul mercato;
- Rappresentare FCA nella ricerca collaborativa a livello europeo e nazionale, promuovendo lo sviluppo di contatti e partnership a livello internazionale;
- Supportare FCA nella valorizzazione del proprio capitale intangibile.

La sede principale del Centro Ricerche Fiat è situata ad Orbassano (TO), tuttavia sedi più piccole sono dislocate sul territorio nazionale, Mirafiori, Pomigliano d'Arco, Valenzano, Melfi e Trento.

La struttura è organizzata in quattro aree tecniche:

- Powertrain Research & Technology;
- Vehicle Research & Innovation;
- Group Materials Labs;
- World Class Manufacturing Research & Innovation.

Il CRF proietta le attività di ricerca e sviluppo in un'ottica di sostenibilità, dividendole in tre aree:

- *Sostenibilità ambientale*: progetti di ricerca finalizzati all'aumento dell'efficienza energetica e alla riduzione dell'impatto ambientale su tutto il ciclo di vita del veicolo;
- *Sostenibilità sociale*: progetti finalizzati allo sviluppo di sistemi di sicurezza attiva, passiva, preventiva e cooperativa dei sistemi di trasporto e studiando

sistemi di misure per garantire l'accesso alla mobilità a tutte le persone indipendentemente dalle loro specificità;

- *Competitività economicamente sostenibile*: progetti finalizzati al miglioramento di prestazioni e funzionalità dei veicoli, orientati anche alla riduzione dei tempi di introduzione sul mercato dei risultati di ricerca.

Il CRF possiede differenti laboratori tecnologicamente all'avanguardia, come le sale per sperimentazione su motorizzazioni e veicoli, camera di compatibilità elettromagnetica, il simulatore dinamico di guida, i laboratori di robotica collettiva e di additive manufacturing.

La possibilità di essere nel mondo della ricerca garantisce al CRF di prender parte a numerosi programmi, difatti esso partecipa alle Public Private Partnership, come “*European Green Vehicle Initiative*” e “*Factories of the Future (FoF)*”, istituite dalla Commissione Europea per focalizzare la ricerca industriale pubblica e privata su temi di significativa rilevanza per la competitività industriale e l'occupazione.

Il Centro Ricerche Fiat possiede una proprietà intellettuale di 496 invenzioni, esse sono protette da 2346 brevetti e domande di brevetto. La reale svolta si è avuta negli ultimi anni, grazie alla industrializzazione di prodotti distintivi per i marchi FCA, tra cui si segnalano: il sistema *Diesel Common Rail* (UNIJET and MultiJet); il sistema *MULTIAIR®* e il nuovo motore *TwinAir*, la tecnologia *DDCT* (Dual Dry Clutch Transmission), sistemi di *alimentazione per veicoli a metano*, sistemi di condizionamento *energy saving*, la connettività veicolo basata su *Blue&Me™*, i sistemi di ausilio alla guida (*Driving Advisor e Magic Parking*) e di eco-navigation (*ECODrive™*).

Il tirocinio curriculare di 12 CFU, pari a 300 ore, è stato effettuato all'intero dell'area tecnica ***World Class Manufacturing Research & Innovation***.

Durante tale periodo è stato possibile far parte di un'esperienza lavorativa completa.

Il primo periodo di stage è stato incentrato sulla definizione di termini chiave per la corretta comprensione dei progetti europei. Grazie al sostegno di un team di professionisti, ossia la Dott.ssa Eva Butano e l'Ing. Daniele Bassan, è stato possibile acquisire informazioni riguardanti la struttura di progetti europei nonché una competenza tecnica necessaria per la lettura critica di *Proposal e Deliverable*.

I progetti europei sono suddivisi in *Work Package*, a loro volta sono suddivisi in *Task*.

*Proposal*→ Rappresenta un documento ufficiale da proporre alla comunità europea al fine di ottenere il finanziamento e garantire lo sviluppo di quest'ultimo. A tal proposito, tale documento, possiede le linee guida per lo sviluppo del progetto stesso, la suddivisione del lavoro in WP, la scelta comune del Project Leader e dei Task Leader.

*Deliverable*→ Documento ufficiale per comunicare ai vari partner l'avanzamento del progetto e le eventuali problematiche di sviluppo.

I *progetti europei* seguiti durante il secondo periodo sono:

***Encompass***, progetto europeo volto allo sviluppo di una piattaforma denominata ***IDDS*** (Integrated Design Decision Support). Tale piattaforma ha l'obiettivo di ottimizzare autonomamente il componente per lo sviluppo in Additive. A tal proposito essa sarà in grado di effettuare una riprogettazione del componente seguendo le regole di progettazione per Additive Manufacturing (inclinazione del componente, modifica automatica di zone per evitare la generazione di supporti di difficile rimozione, generazione automatica di differenti tipologie di supporto con analisi di dissipazione termica evitando stress residui). In tale progetto il CRF figura come End User, a tal proposito esso adopererà tale piattaforma per capirne le effettive potenzialità.

***OpenHybrid***, progetto europeo volto alla progettazione di una macchina ibrida sottrattiva/additiva. Lo slogan di tale macchina è "All in One", difatti l'obiettivo è progettare e costruire un'unica macchina ibrida per Additive Manufacturing mediante una struttura gantry. Consentendo anche eventuali trattamenti termici nella medesima piattaforma sarà possibile velocizzare la produzione eliminando le fasi di trasferimento da un macchinario ad un altro. Ciò è possibile mediante un magazzino utensili possedente sia la testa di deposizione, sia gli utensili per la rettifica e finitura, sia la testa per trattamenti termici. Anche in tale progetto il CRF è l'End User, per cui esso possiede il compito di verificare le potenzialità della macchina ed evidenziare eventuali problematiche.

Per poter effettuare analisi fluidodinamiche e strutturali è stato necessario approfondire la conoscenza del software Hyperworks. A tal proposito sono stati seguiti degli opportuni corsi presso la sede di Altair in Torino. I corsi sono stati utili a elaborare e generare in modo rapido mesh complesse, settare i parametri della simulazione ed osservarne i risultati (15).

### 3.2 Componente analizzato

Lo sviluppo della tesi è stato incentrato su un componente del campo automotive, più nello specifico sullo stampo per il montante centrale, o B-Pillar, dell'autovettura Giulietta di Alfa Romeo (*Figura 49*). Lo studio mira al miglioramento del processo di ottenimento di tale componente, fabbricato mediante formatura a caldo.



*Figura 49 - Telaio Alfa Romeo Giulietta*

Il materiale adoperato per la fabbricazione del componente è *USIBOR® 1500* o *22MnB5*, un acciaio ad alte prestazioni meccaniche impiegato in ambito automotive per parti strutturali e componenti di sicurezza. I principali vantaggi di tale acciaio sono riassumibili nei seguenti punti:

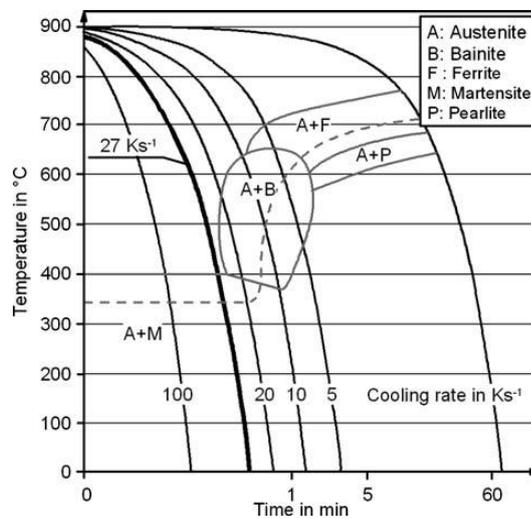
- Capacità di assumere forme complesse sia in processi diretti (formatura dalla fase austenitica) che indiretti (formatura a freddo). Tale capacità lo rende particolarmente adatto per soluzioni integrate, eliminando la necessità di parti di rinforzo o di assemblaggi;
- Eccezionale resistenza a fatica e ad impatti, ciò consente una significativa riduzione di peso.

Il B-pillar rappresenta un elemento fondamentale per le autovetture, esso consente di fornire solidità al telaio dell'autoveicolo e salvaguardare l'incolumità dei passeggeri in caso di impatti laterali o ribaltamenti.

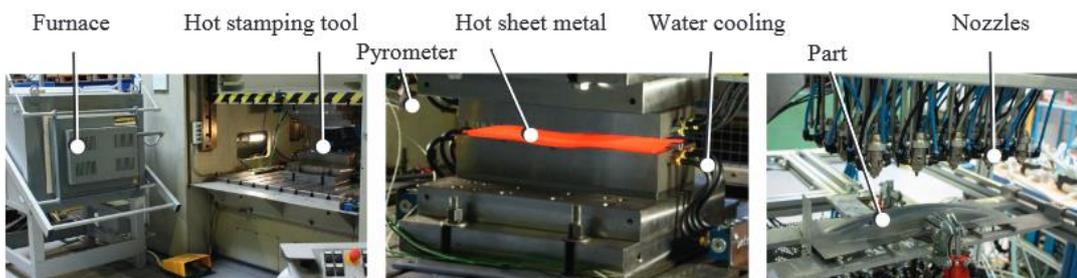
Il processo di fabbricazione del componente comincia con il riscaldamento del lamierato, con spessore di 1,4 mm, fino ad una temperatura superiore ad 850 °C. Tale riscaldamento

è indispensabile per garantire la completa esistenza di una microstruttura austenitica, la quale fornisce una sufficiente duttilità al componente consentendone la formatura.

Il lamierato, alla temperatura di 850°C viene posto all'interno dello stampo, quest'ultimo, mediante la movimentazione della matrice, consente la formatura, il taglio e il raffreddamento del lamierato stesso. Raggiunta la temperatura di 350°C, lo stampo viene riaperto e il B-Pillar estratto. Per far sì che la struttura sia completamente martensitica è necessario effettuare un raffreddamento con velocità non inferiore ai 27 K/s. Il diagramma Continuous Cooling Transformation per il materiale 22Mn5B è mostrato in *Figura 50* mentre il processo è mostrato in *Figura 51*.



*Figura 50 - Curve CCT per 22Mn5B*



*Figura 51 - Processo di stampaggio*

Il componente, una volta prodotto, viene assemblato con la restante parte dell'autoveicolo mediante un processo di saldatura a punti.

### 3.3 Stampo attualmente adoperato

Lo stampo attualmente adoperato è mostrato in *Figura 52*, privo del sistema di adduzione del fluido refrigerante.

Come si nota lo stampo attuale è dotato di quattro differenti parti. I due blocchi centrali, dal basso verso l'alto, rappresentano rispettivamente il punzone e la matrice, essi hanno il compito di formare e tagliare il lamierato.

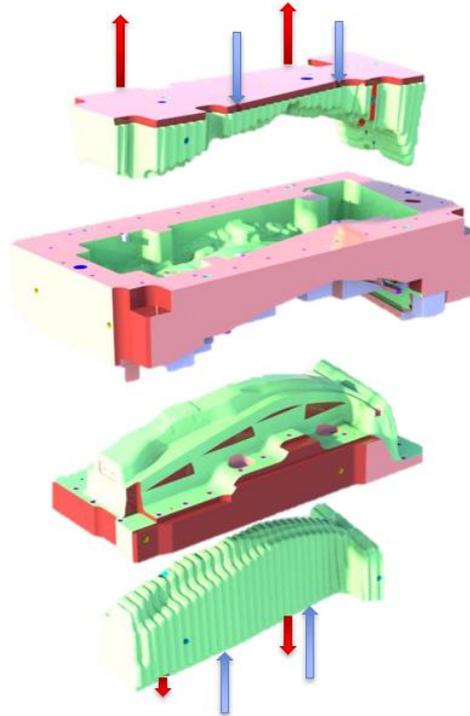


Figura 52 - Stampo attualmente adoperato per la produzione del B-Pillar

Punzone e matrice sono svuotati per fornire uno spazio sufficiente per l'inserimento delle rispettive anime e per lo scorrimento del fluido refrigerante, entrante dalle frecce in azzurro e fuoriuscente dalle frecce in rosso. L'adozione di tali anime consente di asportare il calore dal componente in modo rapido ed ottenere una struttura completamente martensitica, esse devono essere opportunamente scanalate per consentire il passaggio del fluido e seguire il profilo del lamierato.

La principale problematica di tale stampo consiste nella complessità costruttiva e nei trafiletti di fluido dopo differenti operazioni di stampaggio.

Gli obiettivi della seguente tesi sono riassumibili nei seguenti punti:

- *Riduzione della complessità dello stampo:* La complessità dello stampo rappresenta un grande svantaggio durante la fase di progettazione e fabbricazione. Per ovviare a tale problematica si è proceduti effettuando una riprogettazione

dello stesso, generando parti integrate, in tal modo le due anime sono state inglobate all'interno di punzone e matrice;

- *Riduzione del tempo necessario per il raffreddamento:* La riprogettazione ha il fine di ridurre il tempo necessario per il raffreddamento del lamierato, attualmente tale tempo ammonta a 6 secondi;
- *Ottenere differenti microstrutture durante la fase di stampaggio:* Come precedentemente osservato, il B-pillar, a fine processo, possiede una struttura completamente martensitica. Tale caratteristica, nonostante fornisca proprietà meccaniche notevoli, non è la migliore ottenibile. La soluzione più adatta è ottenere una struttura con elevate proprietà meccaniche nella zona superiore, tuttavia duttile nella parte inferiore (*Figura 53*).



*Figura 53 - Raffreddamento bi-zona*

Tale soluzione non compromette la capacità strutturale del veicolo bensì, in caso di un impatto laterale, la zona più duttile cederà prima lasciando la parte martensitica indeformata, dunque il guidatore/passeggero incolume, nonché mitigare problematiche inerenti al processo di saldatura con la parte inferiore del telaio dell'autovettura.

- *Mostrare i vantaggi ottenibile dalla fabbricazione additiva applicata all'ambiente automotive:* La *Figura 54* rappresenta il TRL (Technology Readiness Level ovvero Livello di Maturità Tecnologica) della tecnologia additiva in differenti settori. Essa è particolarmente sviluppata nei settori aerospaziale e medicale. L'avanzamento di tale tecnologia in ambiente automotive è ancora in un livello compreso tra 4 e 5, per cui è di estremo interesse mostrare come il tooling, connesso al mondo automotive, possa portare alla progressione dell'AM.

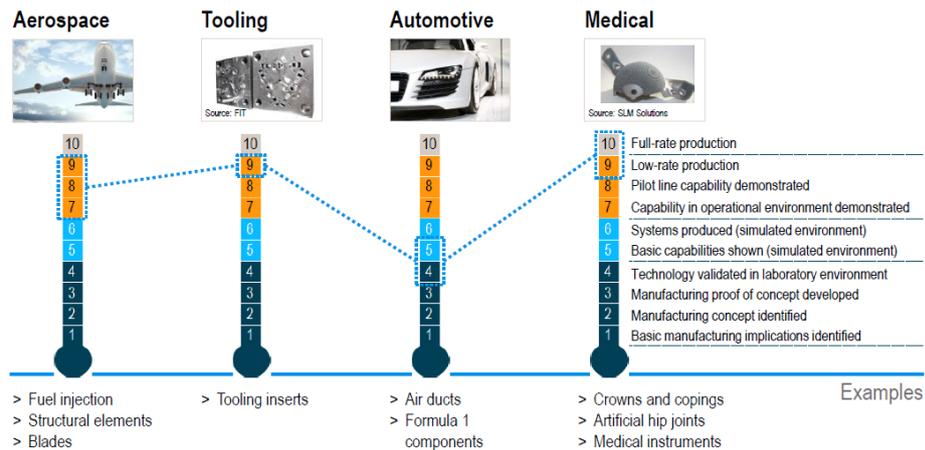


Figura 54 - TRL, livello di maturità tecnologica

L'operazione di riprogettazione prevede, in primis, la ricostruzione della geometria e la semplificazione della stessa. La matematica iniziale, fornita dall'azienda, è mostrata in *Figura 55*, a sinistra la matrice a destra il punzone.

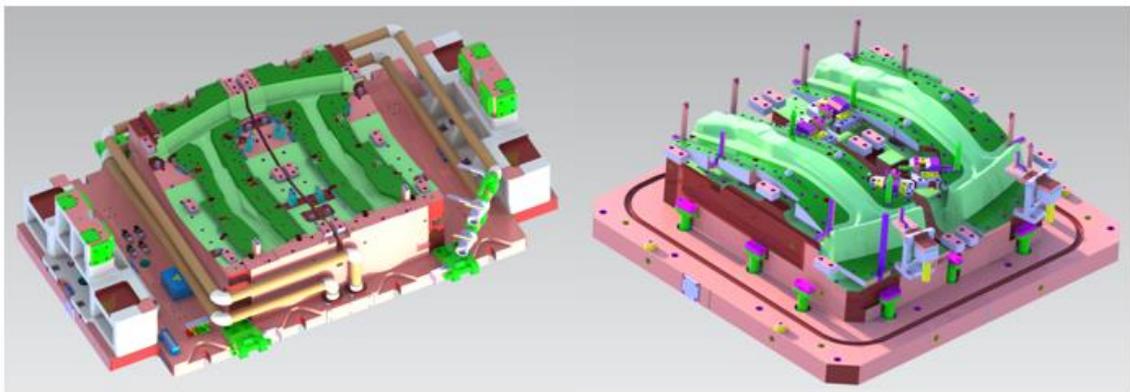


Figura 55 - CAD iniziale dello stampo, a sinistra la matrice a destra il punzone

Come si nota essa, oltre a possedere un'anima per il punzone e una per la matrice, è estremamente complessa e prevede differenti scanalature, canalizzazioni, fori, spine di centraggio, pistoni di estrazione, tasselli e sistemi di raffreddamento. La riprogettazione su CAD così articolati risulta inefficiente e difficoltosa, per ovviare a tale problematica si è analizzata solo una parte dello stampo effettuando, su di essa, le opportune semplificazioni. Sono stati eliminati tasselli e fori per il passaggio del fluido, le anime sono state inglobate all'interno del punzone e della matrice, le spine di centraggio sono state rimosse, il premi lamiera è stato eliminato. La geometria così semplificata è mostrata in *Figura 56*.

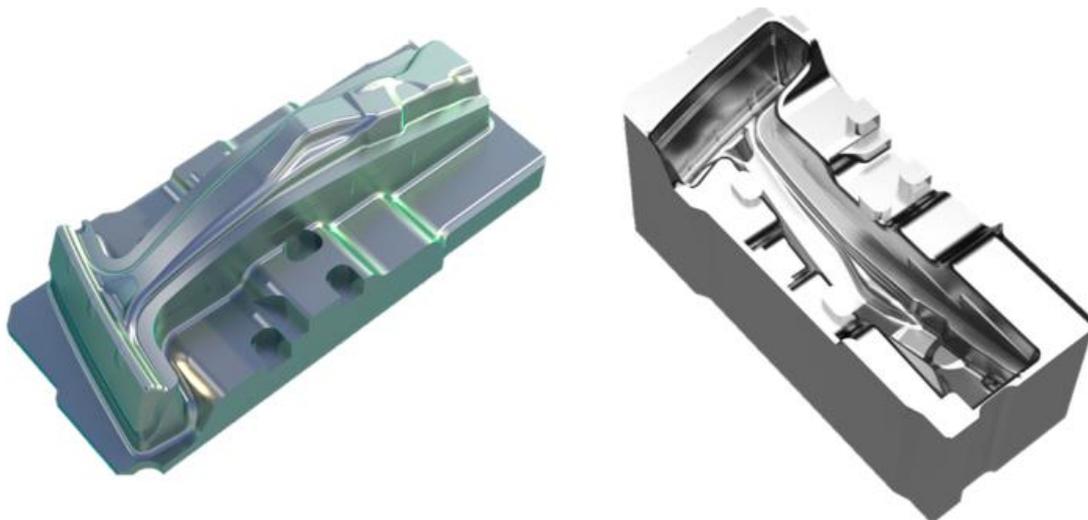


Figura 56 - Geometria dello stampo semplificata

Le dimensioni della matrice e del punzone sono riportati in *Tabella 2*.

	<b>Punzone</b>	<b>Matrice</b>
<b>Larghezza (mm)</b>	500	500
<b>Lunghezza (mm)</b>	1200	1200
<b>Altezza (mm)</b>	400	450

Tabella 2 - Dimensioni dello stampo

### 3.4 Riprogettazione tradizionale

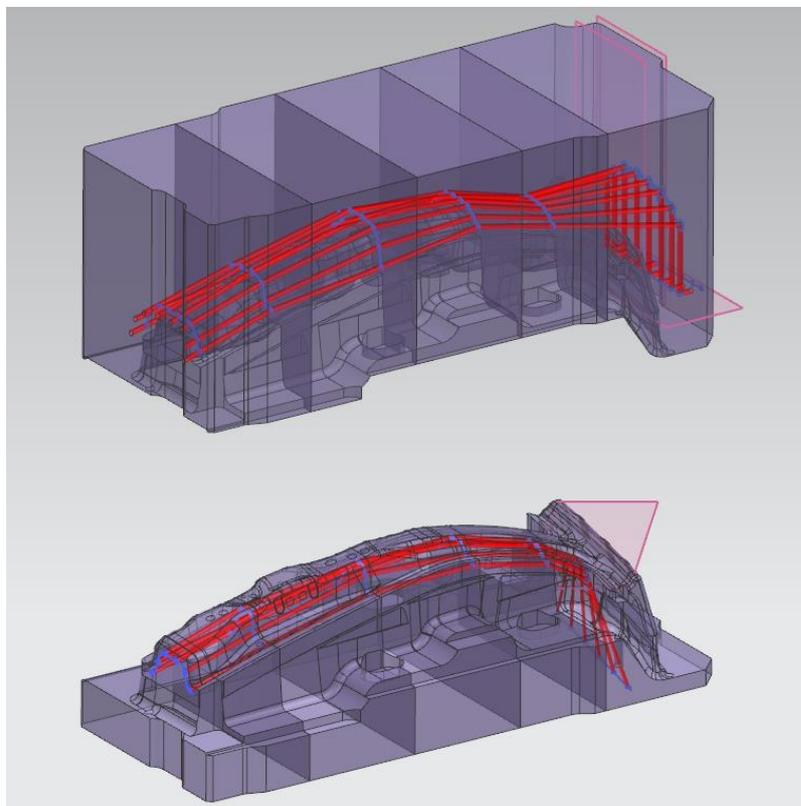
Prima di effettuare una riprogettazione dello stampo mediante le tecnologie additive, per avere un corretto confronto e valutarne gli effettivi vantaggi, si è proceduti mediante una riprogettazione con tecniche tradizionale.

Lo stampo, tradizionalmente, è ottenuto mediante lavorazione al CNC a 5 assi. Ovviamente, le lavorazioni di asportazione di materiale posseggono dei vincoli progettuali legati ai limiti impliciti della tecnologia adoperata. In riferimento a stampi di B-Pillar di altre autovetture appartenenti al gruppo Fiat Chrysler Automobiles, sono stati identificati i seguenti limiti tecnologici:

- *Diametro dei canali per raffreddamento*: il diametro adoperato per gli stampi di B-Pillar è usualmente pari a 12 mm, tale diametro è sufficiente per consentire una corretta portata di fluido refrigerante ed ottenere un idoneo controllo del calore asportato;

- *Lunghezza della punta di foratura:* in riferimento al diametro dei canali, la lunghezza della punta di foratura non può superare i 125 mm. Come osservato nel paragrafo precedente, la dimensione dello stampo è tale da implicare una suddivisione dello stesso, matrice e punzone, in 5 parti. Ogni blocco ha la dimensione, in lunghezza, di 250 mm, in tal modo è possibile garantire la costruzione del canale;
- *Interasse tra i canali:* l'interasse dei canali ha un valore di 40 mm. Sperimentalmente, tale distanza è stata valutata ottimale sia dal punto di vista resistenziale sia per lo scambio termico;
- *Distanza dalla superficie:* l'offset dei canali rispetto la superficie dello stampo è di 20 mm, sufficiente a garantire rigidità allo stampo;
- *Canali rettilinei:* il vincolo principale è rappresentato dall'impossibilità di generare canali che seguano perfettamente la superficie, ciò implica l'esistenza di zone con distanza tra superficie e canale inferiore, o superiore, di 20 mm, non garantendo l'asporto di calore omogeneo.

Con i vincoli precedentemente esposti, lo stampo riprogettato tradizionalmente è mostrato in *Figura 57*.



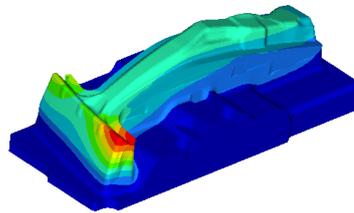
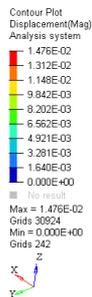
*Figura 57 - Riprogettazione con canali tradizionali*

Come si osserva, la matrice e il punzone sono stati divisi in 5 parti, mentre i segmenti in rosso rappresentano i canali costruiti all'interno dello stampo.

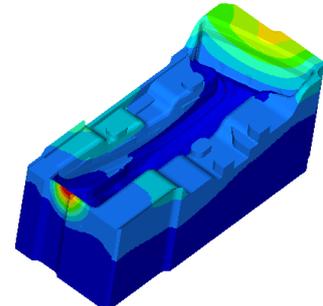
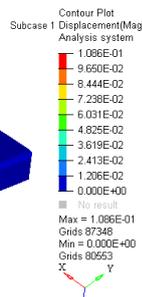
Intuibilmente, la distanza dei canali rispetto la superficie non può essere costante, dati i vincoli, per cui, prima di analizzare il comportamento termico, è stato necessario effettuare un'analisi FEM sulle deformazioni per garantire che, durante il processo di stampaggio, i canali non vengano eccessivamente deformati impedendo il corretto scorrimento del fluido refrigerante.

Sapendo che la forza di chiusura dello stampo è di 1961,33 N, rapportati alla superficie pari a 3800 cm<sup>2</sup>, superficie calcolata mediante software CAD (NX 12 - Siemens), è stato possibile calcolare la pressione esercitata, pari a 5,16 MPa.

L'analisi di deformazione è stata effettuata adoperando la suite Hyperworks, con solutore Optistruct, di Altair. Le simulazioni hanno portato ai risultati mostrati in *Figura 58* per il punzone e in *Figura 59* per la matrice.



*Figura 58 - Analisi delle deformazioni del punzone*



*Figura 59 - Analisi delle deformazioni della matrice*

La deformazione massima ottenuta nel caso del punzone è pari a 0,014 mm, mentre per la matrice è pari a 0,1 mm, tali deformazioni hanno un'entità irrilevante dunque non influenzano la fluidodinamica del problema, inoltre, le deformazioni massime sono localizzate in zone prive di canali di raffreddamento.

Dopo aver verificato la completa assenza di deformazioni significative, si è proceduti con l'analisi termica dello stampo. La suite adoperato in tal caso è ThermoSolver di Autoform, software aziendale per lo studio di stampaggio di lamierati. Esso simula l'intero processo di stampaggio (*Figura 60*) partendo dalle condizioni iniziali del lamierato, temperatura

ambiente di 20 °C, seguendo il riscaldamento fino a 850 °C, analizzando la fase di drawing, quenching e cooling.

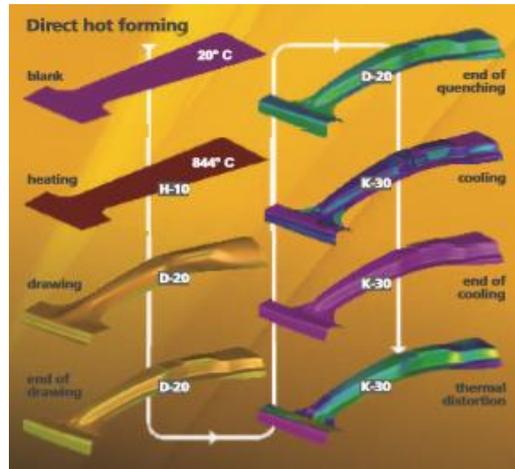


Figura 60 - Processo di stampaggio

I dati di input forniti al software e le condizioni al contorno sono le seguenti:

- Fluido refrigerante: Acqua;
- Temperatura fluido refrigerante: 20° C;
- Temperatura premi lamiera costante: 80 °C;
- Temperatura ambiente: 20 °C;
- Flusso turbolento.

I parametri di processo sono:

- Tempo di attesa della lamiera sullo stampo: 3 s;
- Tempo per la chiusura: 2 s;
- Tempo di permanenza dello stampo chiuso: 6 s.

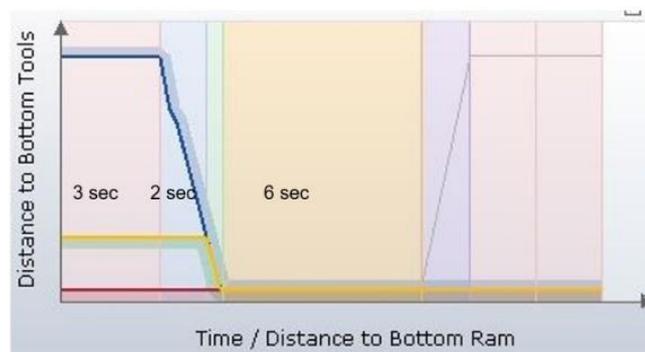
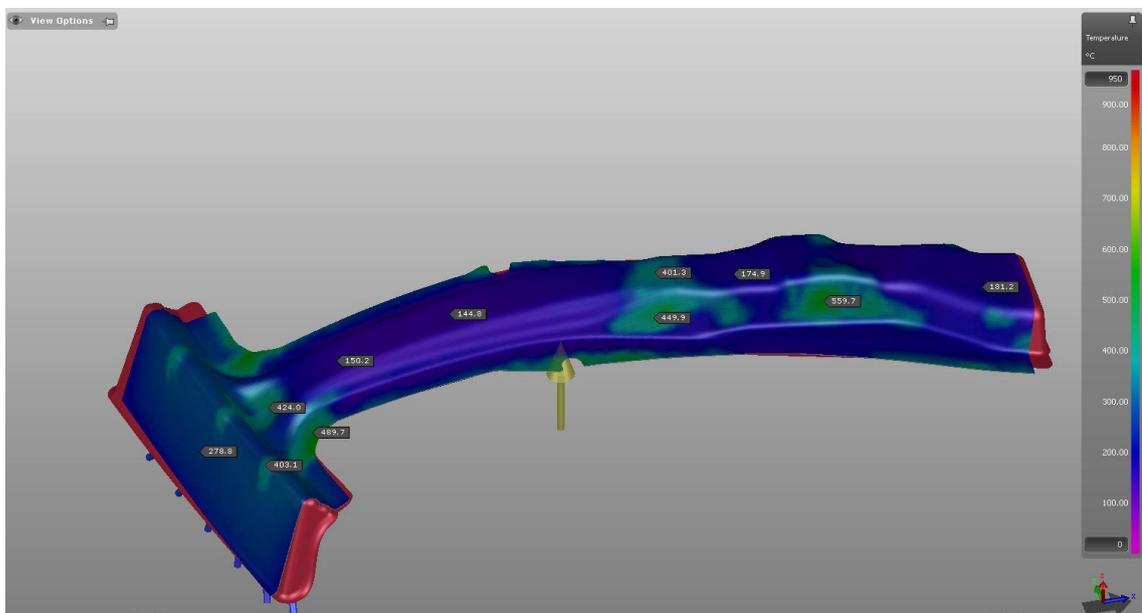


Figura 61 - Tempistiche del processo di hot forming

Le tempistiche appena esposte possono essere raffigurate come in *Figura 61*. In ascisse è presente il tempo, in ordinate la quota dell'utensile. La curva blu rappresenta la quota del punzone, la curva gialla la quota del lamierato mentre in rosso la quota della matrice.

La simulazione del comportamento termodinamico effettuata sullo stampo riprogettato mediante tecniche convenzionali ha portato i seguenti risultati.

La *Figura 62* mostra la temperatura del componente al termine del processo di quenching, come si nota esso possiede la temperatura media inferiore a 350°C, condizione desiderata. Tuttavia, alcuni punti, come rientranze o bugne, posseggono una temperatura decisamente superiore ciò, evidentemente, è dovuto all'impossibilità di seguire la superficie mediante canali rettilinei.



*Figura 62 – Mappa della temperatura al termine del quenching*

L'output del software, oltre ad un controllo sulla temperatura, consente di analizzare la microstruttura ottenuta. Come mostra la *Figura 63* il componente risulta completamente martensitico, ad eccezione nelle zone precedentemente citate, difatti la temperatura superiore ai 500° C al termine del processo di quenching, ha causato la presenza di austenite, perlite e bainite.

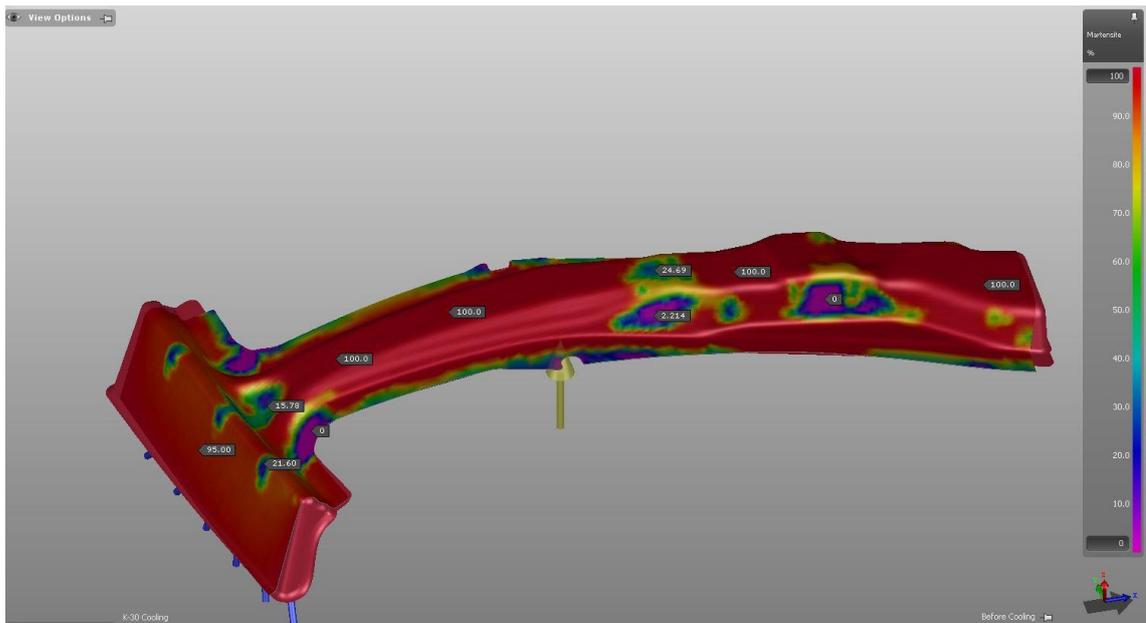


Figura 63 - Mappa della microstruttura martensitica al termine del quenching

## 4 RIPROGETTAZIONE MEDIANTE TECNOLOGIE ADDITIVE

### 4.1 Scelta della tecnologia

Il paragrafo 3.3 ha evidenziato la principale problematica dell'impiego delle tecnologie additive per la riprogettazione, ossia la dimensione dello stampo. Come noto, il principale problema delle tecnologie additive è la dimensione del volume di lavoro, tuttavia, a causa della tipologia di elementi da realizzare, ossia canali conformali, la scelta della tecnologia più adatta ricade sulla Laser Powder Bed Fusion.

Attualmente, lo sviluppo della tecnologia DED, non consente la costruzione di canali conformali a causa dello scarso sviluppo di tale tecnologia per la particolare applicazione, tuttavia risulta interessante effettuare un confronto con la tecnologia L-PBF per evidenziare i vantaggi e gli svantaggi di ciascuna.

La tecnologia DED non possiede limiti eccessivamente vincolanti riguardo la dimensione della building platform, difatti, in riferimento a macchine esistenti, è possibile costruire punzone e matrice in soli due job, dunque senza effettuare la suddivisione dello stampo. La tecnologia L-PBF possiede una significativa limitazione riguardo la dimensione della camera di costruzione, difatti, in riferimento alla macchina più grande presente in commercio, sarà comunque necessario suddividere matrice e punzone in 3 parti. La *Tabella 3* riporta il confronto tra le due tecnologie.

	<b>L-PBF</b> ConceptLaser XLine 2000R	<b>DED</b> Optomec CS 1500 System
<b>Camera di costruzione (mm<sup>3</sup>)</b>	800x400x500	900x1500x900
<b>Numero job</b>	6 (3x2)	2
<b>Spessore di strato (µm)</b>	30	500
<b>Finitura superficiale</b>	Media	Bassa
<b>Polvere</b>	Maraging 1.2709	Maraging 1.2709
<b>Supporti</b>	Presenti	Non presenti

*Tabella 3 - Confronto tra le tecnologie*

Come esplicitato in *Tabella 3*, in caso di letto di polvere, è necessario suddividere lo stampo in tre parti in modo da garantire che la dimensione di ogni singolo blocco rientri perfettamente nella camera di costruzione, come mostra la *Figura 64*,

La fabbricazione dello stampo, mediante tecnologia L-PBF, può avvenire mediante tre differenti soluzioni:

- 1) Componente completamente in polvere;
- 2) Soluzione ibrida, polvere più massivo;
- 3) Costruzione del tassello dotato di canali conformali.

Il tempo di costruzione del job moltiplicato per il costo orario della macchina e il quantitativo di polvere adoperato rappresentano i principali costi di fabbricazione.

Per abbattere tali costi legati al quantitativo di polvere necessario è preferibile adottare una soluzione ibrida, ovvero lavorare il massivo al CNC ottenendo una zona adatta alla deposizione di polvere e alla successiva fusione, così facendo uso della tecnologia additiva per la sola parte interessata dai canali conformali. Un esempio di lavorazione al CNC è mostrato in *Figura 65*

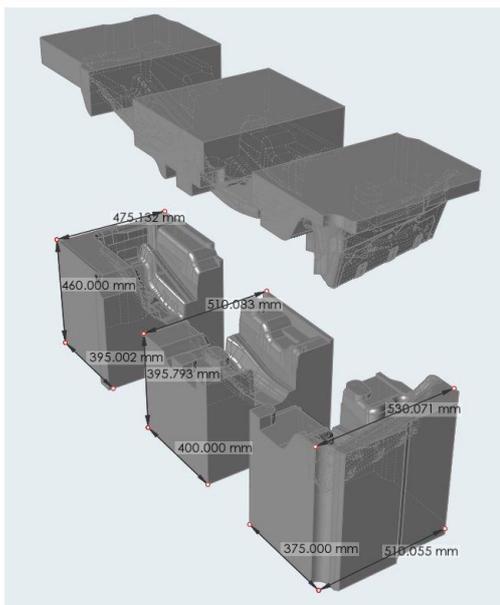


Figura 64 - Suddivisione stampo e quotatura

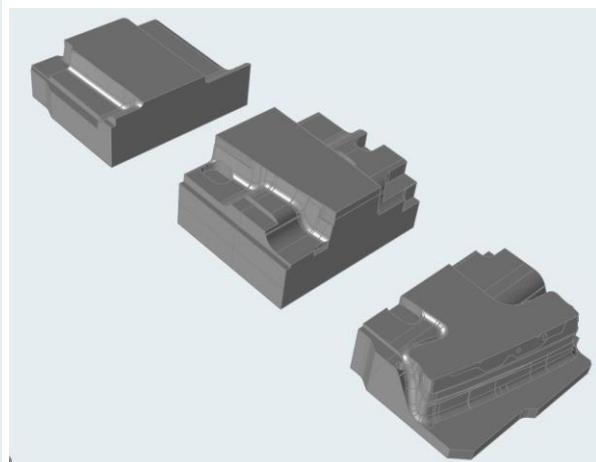


Figura 65 - Stampo lavorato al CNC per la soluzione ibrida in tecnologia L-PBF

Il confronto tra la soluzione 1) e 2) mostrato in *Tabella 4* evidenzia il notevole risparmio ottenibile mediante la soluzione ibrida. Il calcolo è stato effettuato considerando il costo della polvere pari a 90 €/kg.

	<b>Completamente in polvere</b>	<b>Ibrido (massivo + polvere)</b>
<b>Massa dello stampo (kg)</b>	2675,8	2675,8
<b>Massa parte massiva dello stampo (kg)</b>	0	2261,3
<b>Polvere necessaria (kg)</b>	2675,8	414,5
<b>Costo polvere (k€)</b>	241	37

Tabella 4 - Analisi costo della polvere L-PBF

La 3° e ultima soluzione investigata si è mostrata la più adatta per la costruzione dello stampo. Essa prevede l'adozione della lavorazione al CNC per il componente massivo e l'impiego della tecnologia L-PBF per la costruzione del tassello dotato di canali conformali. Differentemente dalla soluzione ibrida, in tal caso, non è presente la fusione del letto di polvere sulla parte massiva, in quanto il tassello sarà assemblato mediante bulloni o viti di serraggio, ciò consente di ottenere differenti vantaggi:

- *Tempo di esecuzione del job*: Evidentemente, il componente, data la geometria poco complessa, può essere orientato, con ovvie considerazioni sulla geometria, nella macchina in modo tale da ridurre il tempo di costruzione, nonché può essere progettato in modo avere dimensioni ridotte e velocizzare l'esecuzione del job. L'analisi delle tempistiche necessarie per la costruzione del componente sono state effettuate con l'ausilio del software Netfabb di Autodesk. Adoperando la macchina EOS 400, impostando i parametri macchina di default per l'acciaio selezionato, si è evidenziato il notevole vantaggio della soluzione "tassello" rispetto quella "ibrida". Il tempo di esecuzione del job per la soluzione ibrida è pari a 734h 18m e 45s, mentre la soluzione "tassello" ha richiesto un tempo di 107h 30m 20s, con la possibilità di costruire più componenti nella stessa piattaforma, come osservabile in *Figura 66*.

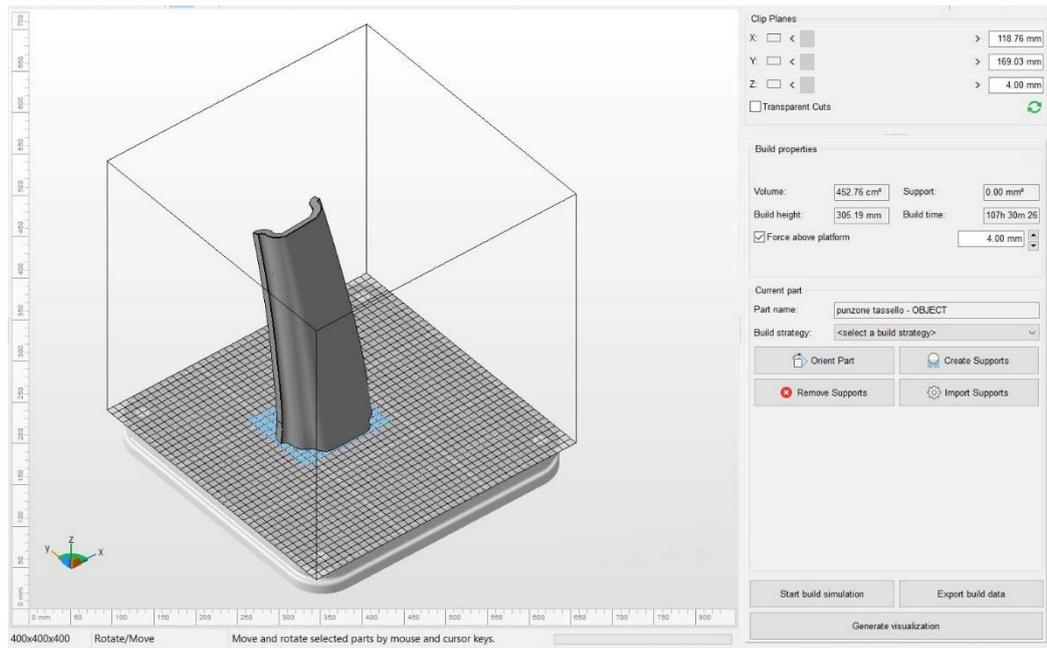


Figura 66 - Simulazione tempo di fabbricazione

- *Macchine per L-PBF più piccole:* Grazie alla dimensione ridotta del tassello e alla possibilità di orientarlo all'interno della macchina in diverse posizioni, rispettando i vincoli imposti dalla geometria, è possibile adoperare macchinari più piccoli con dimensione rilevante esclusivamente in Z, ciò garantisce anche un miglior controllo del ritiro termico da solidificazione;
- *Possibilità di costruire più tasselli in un job:* La dimensione ridotta del tassello, consente la costruzione di più componenti in un unico job;
- *Caso di rottura:* In caso di rottura o usura del tassello è possibile sostituire esclusivamente la parte danneggiata senza dover ricostruire l'intero blocco ripartendo dalla lavorazione al CNC.

Un esempio di tassello costruito in L-PBF è riportato in *Figura 67*.

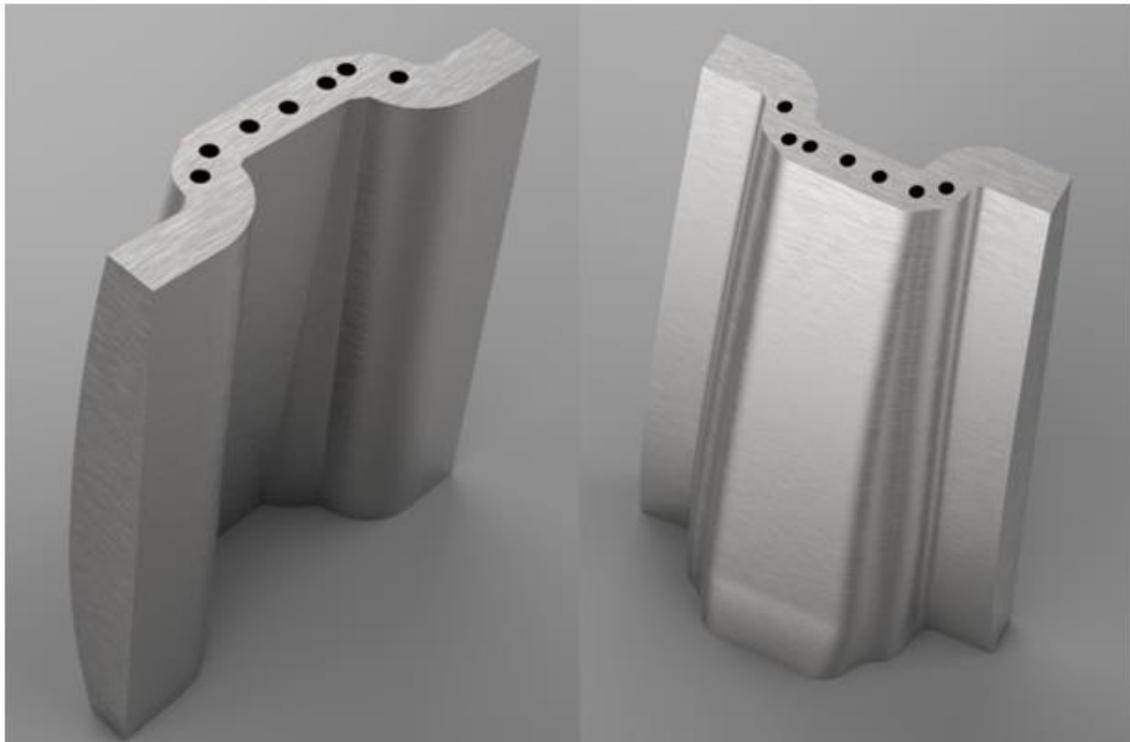


Figura 67 - Tassello fabbricato in L-PBF

Il costo della polvere necessaria per la fabbricazione additiva, solitamente, rappresenta una aliquota trascurabile rispetto al costo del processo di fabbricazione. Oltre agli evidenti vantaggi ottenibili dalla soluzione “tassello”, oltre al significativo risparmio economico riguardo la polvere necessaria per la fabbricazione del componente, è possibile evidenziare l’effettiva riduzione di costo ottenibile dalla *terza soluzione* rispetto le altre analizzando il costo orario della macchina.

Come mostra la *Tabella 5*, il tempo necessario per la fabbricazione del componente adottando la soluzione “ibrida” è notevolmente più alto rispetto alla soluzione “tassello”, moltiplicando quest’ultimo per il costo orario indiretto associato alla macchina per L-PBF di 50€/h, si evidenzia una significativa riduzione di prezzo per la soluzione 3 (16).

	<b>Tempo job (h)</b>	<b>Costo macchina (€)</b>
<b>Soluzione “ibrida”</b>	735	36750
<b>Soluzione “tassello”</b>	108	5400

Tabella 5 - Analisi costo del processo di fabbricazione

La scelta della tecnologia più adatta per la riprogettazione dello stampo mediante tecnologia additiva deve tener conto anche delle perdite di carico collegate alla rugosità

superficiale dei canali conformali. Ovviamente la finitura interna non può essere migliorata mediante lavorazione al CNC, ed essa è dipendente esclusivamente dalla tecnologia impiegata per la costruzione del tassello.

L'analisi delle perdite di carico è stata condotta analizzando l'Equazione 1:

$$\left(\frac{\Delta p}{\rho}\right) = \lambda \frac{L w^2}{D \cdot 2}$$

Equazione 1 - Equazione per il calcolo delle perdite di carico

In primis si è proceduti con il calcolo del rapporto  $\frac{\epsilon}{D}$ , in cui il valore  $\epsilon$  è stato definito mediante letteratura. Successivamente, dopo il calcolo del numero di Reynolds  $\frac{\rho L w}{\mu}$ , si è proceduti definendo il fattore di attrito  $\lambda$  mediante il diagramma di Moody mostrato in Figura 68 e di seguito la perdita di carico  $\Delta p$ .

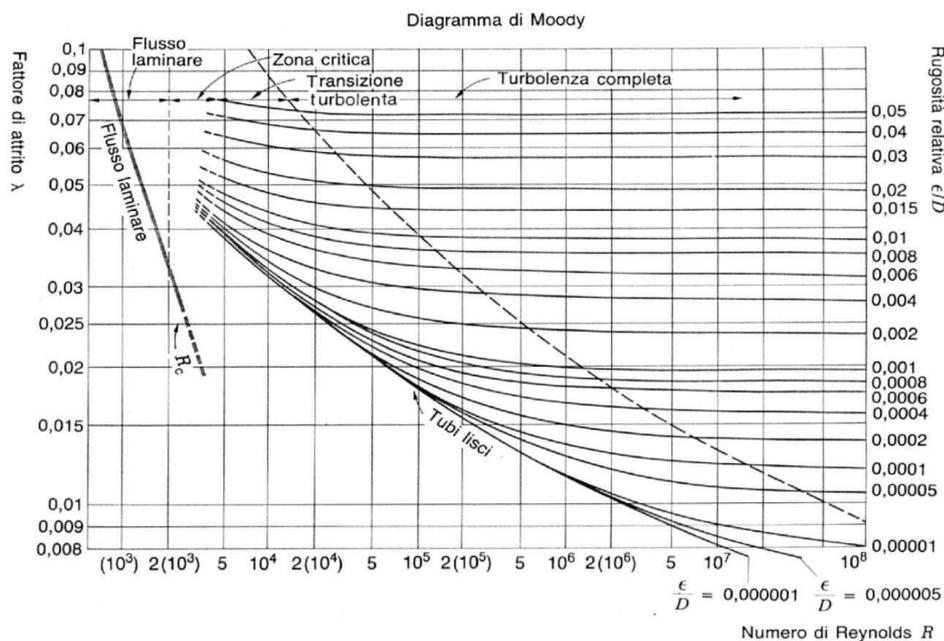


Figura 68 - Diagramma di Moody

Di seguito, in Tabella 6, si riporta un confronto tra le perdite di carico per la tecnologia L-PBF e DED. Il confronto è esente dalle perdite di carico concentrate, ciò poiché esse sono indipendenti dalla tecnologia utilizzata e sono le medesime sia per L-PBF sia per DED. Utilizzando come parametri un condotto di diametro pari ad 8 mm con lunghezza pari a 1 m, si evidenzia una perdita di 750 Pa per la tecnologia L-PBF e di 975 Pa per la tecnologia DED. Tale variazione è dovuta esclusivamente alla rugosità interna dei canali. Intuibilmente, sarà necessario adottare una pompa più potente per consentire il passaggio

del fluido refrigerante all'interno dei canali costruiti mediante DED, per cui, anche in tal caso, la tecnologia L-PBF è vincente.

L-PBF		DED	
Calcolo Perdite di Carico		Calcolo Perdite di Carico	
D	0,008 m	D	0,008 m
L	1 m	L	1 m
w	20 m/s	w	20 m/s
eps	0,000025 m	eps	0,00009 m
mu	0,0004 Pa*s	mu	0,0004 Pa*s
rho	997 Kg/m <sup>3</sup>	rho	997 Kg/m <sup>3</sup>
Re	398800 Flusso turbolento	Re	398800 Flusso turbolento
eps/D	0,003125	eps/D	0,01125
ξ (da Moody )	0,03	ξ (da Moody )	0,04
Perdite di carico	750 Pa	Perdite di carico	975 Pa

Tabella 6 - Perdite di carico per tecnologia L-PBF e DED

## 4.2 Ricostruzione del modello CAD

Per effettuare una corretta riprogettazione è stato necessario iterare il processo di ricostruzione e verifica del modello CAD. Esso consiste nell'implementare la matematica del problema, mediante il software CAD, generando canali conformali di dimensione pari a 6 mm che, come esplicitato nelle regole di DfAM, rappresenta l'unico vincolo progettuale per generare strutture auto supportanti. Successivamente sono state effettuate le analisi termiche per verificare il miglioramento del processo di stampaggio e l'ottenimento degli obiettivi definiti nel paragrafo 3.3., verificate quest'ultime si è proceduti con l'analisi di deformazione per garantire la resistenza strutturale dello stampo.

La prima ricostruzione del modello CAD è rappresentata in *Figura 69*. Partendo dalla condizione iniziale, il numero di canali appartenenti alla matrice e al punzone sono stati aumentati inoltre tutti sono stati posti ad una distanza dalla superficie pari a 5 mm.

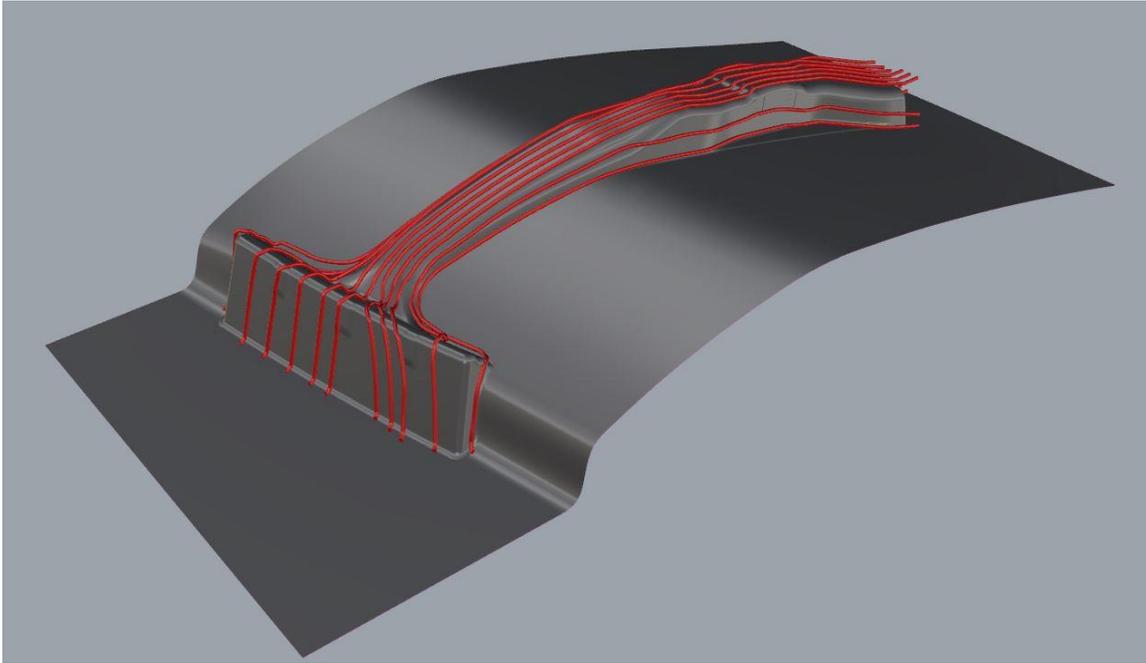


Figura 69 - Riprogettazione con canali conformali

La simulazione termodinamica ha portato al soddisfacimento di uno degli obiettivi preposti, come mostrato in *Figura 70*. Come si nota, dal confronto tra il processo di stampaggio tradizionale e stampaggio mediante stampo dotato di canali conformali, analizzando lo stesso punto appartenente al B-Pillar, al termine del quenching, si evidenzia una significativa riduzione del tempo necessario per l'ottenimento della microstruttura martensitica (rappresentata in rosso). Il diagramma evidenzia che il tempo necessario si riduce di circa del 50%, passando da 4 secondi a 2,1 secondi. Il vantaggio è anche riscontrabile sul miglior raffreddamento ottenibile sulle bugne nella parte superiore e nella zona in contatto con la matrice. Tuttavia, il conseguimento dell'obiettivo desiderato, ossia l'ottenimento della microstruttura bainitica nella parte inferiore, non ancora è stato raggiunto, inoltre sono presenti problematiche inerenti al raffreddamento nelle rientranze laterali causando austenite residua al termine del processo di stampaggio, ciò è dovuto al basso quantitativo di canali presenti in tali zone.

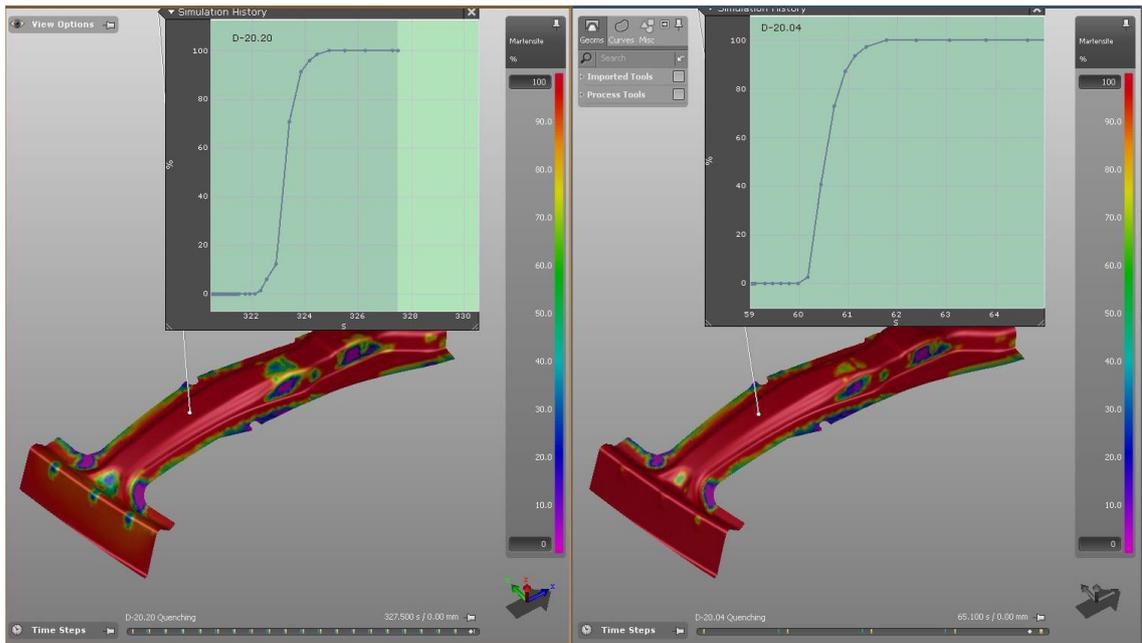
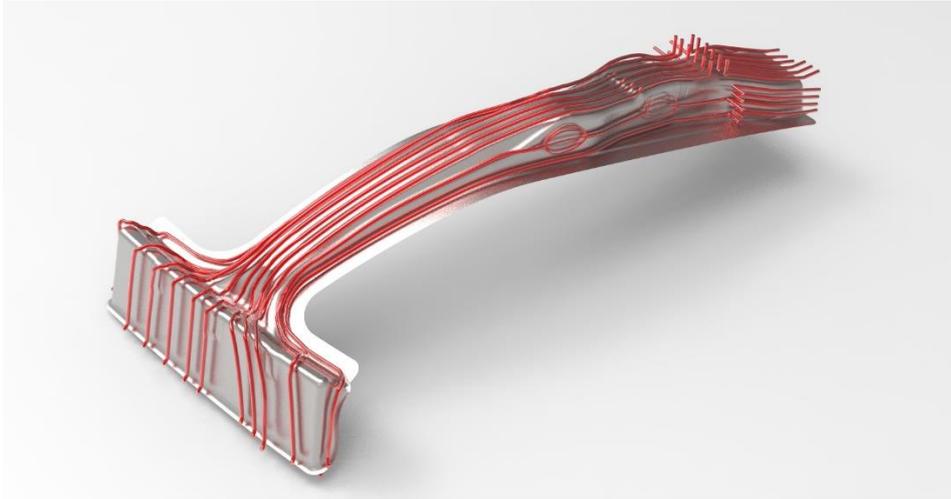


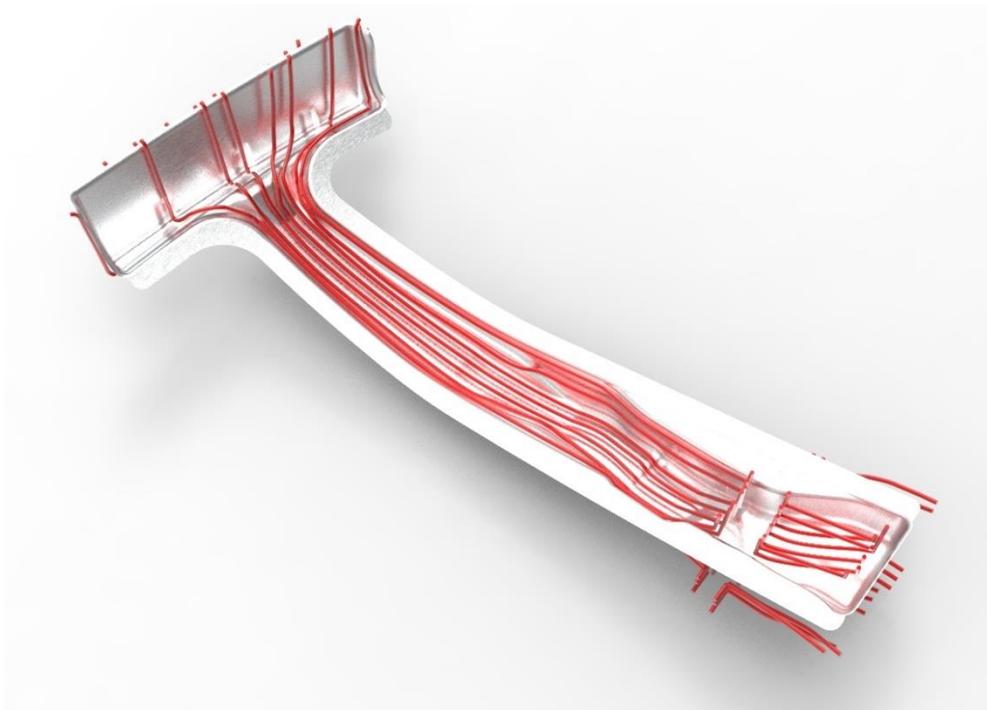
Figura 70 - Confronto della microstruttura martensitica ottenibile con riprogettazione tradizionale e riprogettazione con canali conformali

Lo stampo così riprogettato non consente il conseguimento di tutti gli obiettivi prefissati. A tal proposito, per la seconda riprogettazione, si è proceduti cambiando la geometria dei canali, in particolar modo, le zone calde sulle pareti laterali sono state dotate di diramazioni collegate ai canali principali, così garantendo un miglior asporto di calore. Inoltre, per ottenere la microstruttura desiderata nella zona inferiore, si è proceduti suddividendo i canali in due parti, una per la zona martensitica ed una per la zona bainitica, aggiungendo a quest'ultima un maggior numero di canali. In tal modo è stato possibile adoperare un fluido refrigerante differente per le due zone, ovvero acqua a 20° C e olio a 380° C.

I canali dello stampo riprogettato sono mostrati in *Figura 71* per la matrice e in *Figura 72* per il punzone.



*Figura 71 - Canali conformali matrice*



*Figura 72 - Canali conformali punzone*

## 5 RISULTATI

### 5.1 Analisi termiche

La modifica apportata nel secondo tentativo di riprogettazione ha portato al conseguimento degli obiettivi richiesti.

Come mostra la *Figura 73* rappresentante il B-Pillar al termine del processo di quenching, la distribuzione termica è stata notevolmente migliorata consentendo di ottenere una temperatura uniforme di circa 80° C sulla parte superiore, mentre sulla parte inferiore di 450° C, inoltre i punti caldi sulle pareti laterali sono stati notevolmente ridotti.

In tale figura è, inoltre, osservabile il comportamento termico durante l'intero processo di stampaggio. Come si nota, il tratto iniziale porta il lamierato da 850 °C, ossia la temperatura al termine della fase di riscaldamento, ad un valore di poco inferiore agli 800 °C. Il raffreddamento lento è associato ad una convezione naturale in aria di durata pari a 5 s, con ambiente a 20 °C. La velocità di raffreddamento è evidenziabile dalla pendenza della curva la quale rappresenta il cooling rate.

Nel tratto successivo si nota un importante incremento del cooling rate, ciò è legato al contatto del lamierato con lo stampo, quest'ultimo asporta calore rapidamente dal B-Pillar essendo ad una temperatura notevolmente inferiore. Ovviamente la velocità di raffreddamento sarà differente tra tratto superiore e inferiore. Nella zona interessata da una microstruttura martensitica, in riferimento alle curve CCT, si è mantenuto il cooling rate superiore ai 27 °C/s, differentemente, nella zona interessata da una struttura bainitica, si è mantenuto il cooling rate inferiore ai 26°C/s e superiore ai 10 °C/s, tale condizione è necessaria e sufficiente per mitigare la presenza della microstruttura perlitica o martensitica.

Per quanto detto inizialmente, le curve di raffreddamento terminano a 80°C, per la parte martensitica, e 450°C per la parte bainitica, tale interruzione è legata all'apertura dello stampo.

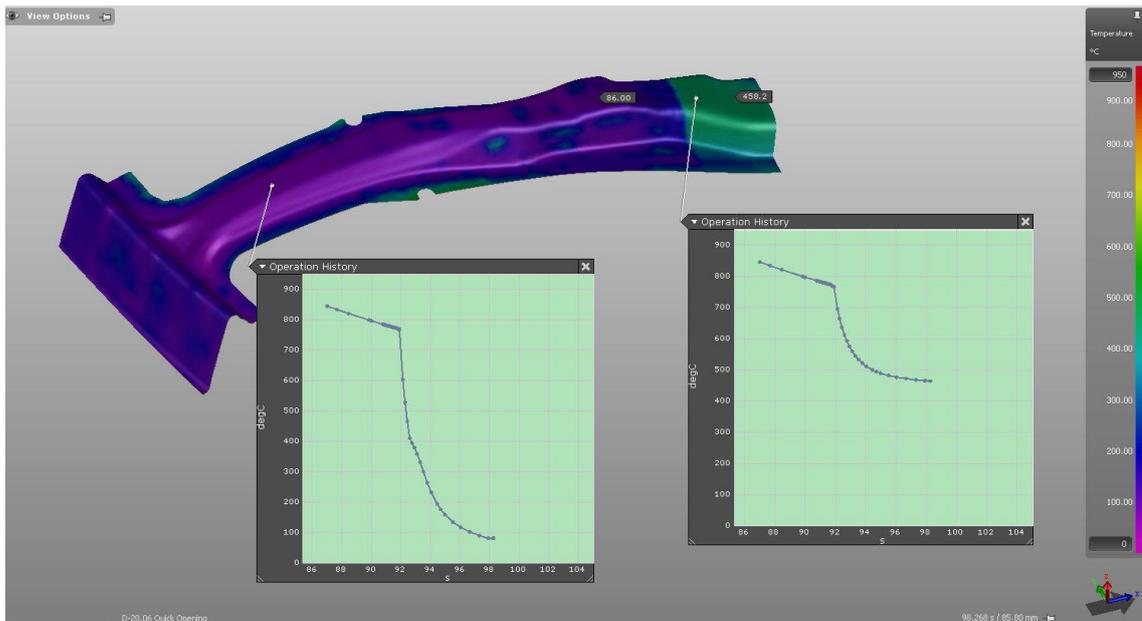


Figura 73 - Mappa temperatura alla fine del processo di quenching e andamento della temperatura per l'intero processo di stampaggio

Nonostante lo stampo resti chiuso per un tempo pari a 6 s, è sufficiente che la temperatura raggiunga un valore inferiore ai 350°C per garantire la presenza della martensite, difatti, come mostra la *Figura 74*, la struttura raggiunge il 100% di martensite dopo soli 2 secondi. Analogo ragionamento può essere ripetuto per la zona bainitica, difatti la temperatura necessaria per garantire l'esistenza della microstruttura desiderata è di 500 °C, temperatura raggiunta dopo soli 2 s.

Quanto dimostrato evidenzia la possibilità di velocizzare il processo di stampaggio, richiedendo un tempo pari 2 secondi per la produzione del componente richiesto, una riduzione del 66,6 %.

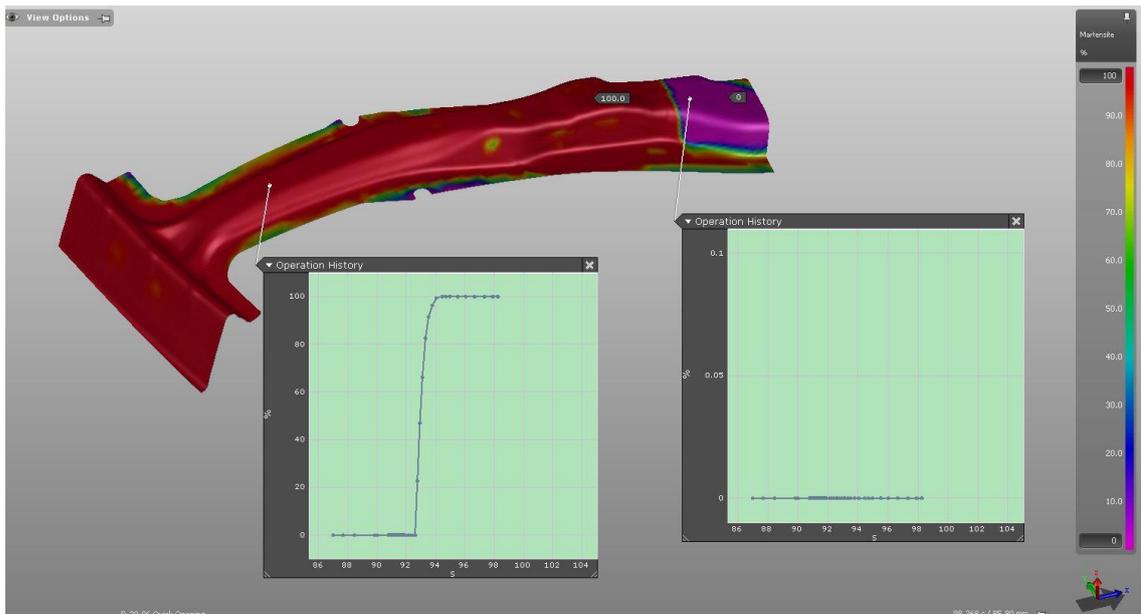


Figura 74 - Mappa della microstruttura martensitica al termine del processo di quenching

La Figura 75 mostra il B-Pillar al termine del processo di stampaggio. I diagrammi a torta indicano le fasi presenti nel punto indicato. Come si nota, la zona superiore possiede la struttura completamente martensitica, la zona inferiore completamente bainitica. L'interfaccia tra le due differenti microstrutture è caratterizzata da un'estensione di circa 20 mm in cui vi è la compresenza della martensite e della bainite, in una percentuale quasi uguale. Le alette, invece, posseggono una struttura con una percentuale molto bassa di bainite, risultato desiderato poiché consente di conservare la rigidità strutturale del componente.

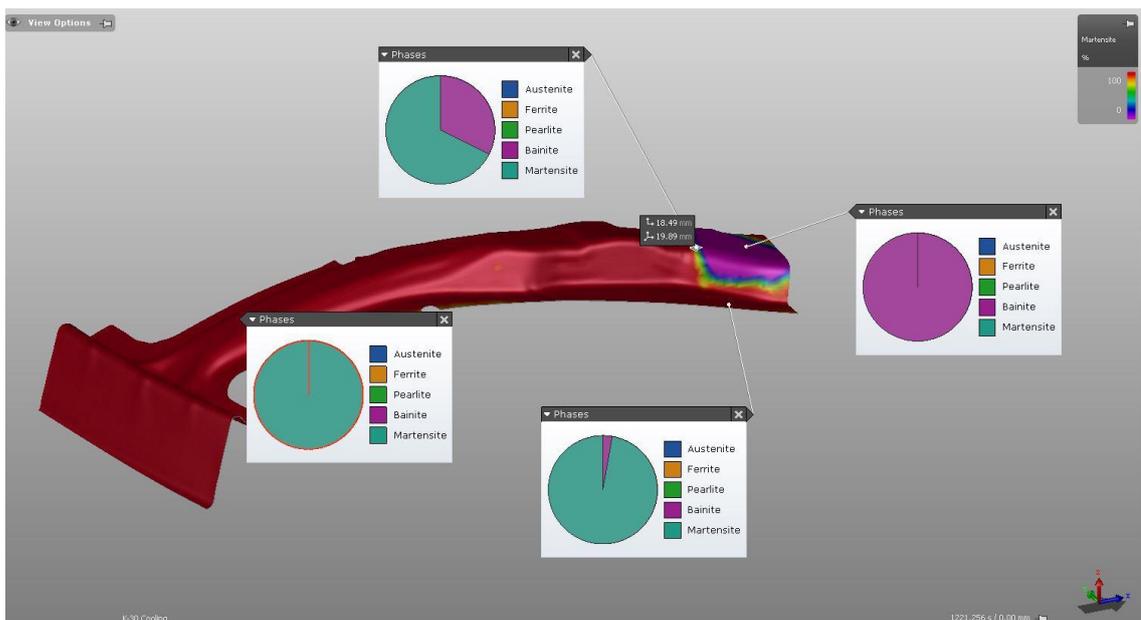
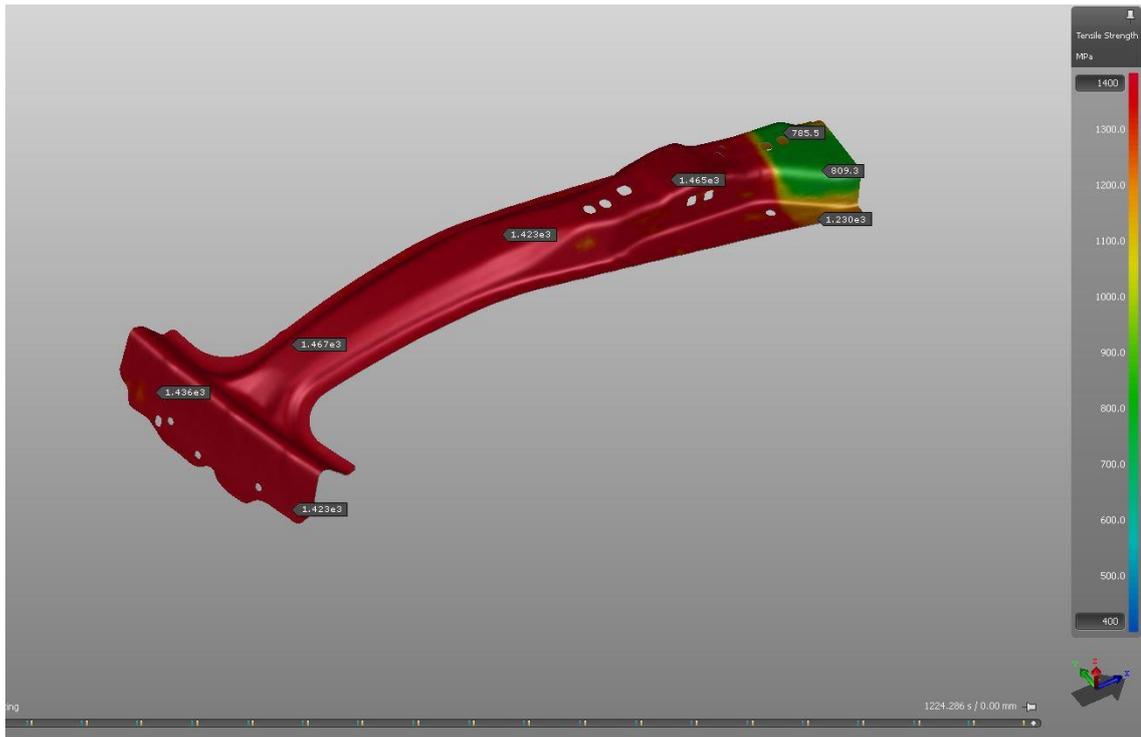


Figura 75 - Fasi presenti nel B-Pillar al termine del processo di stampaggio

La *Figura 76* evidenzia come la diversa microstruttura conferisca a B-Pillar proprietà meccaniche differenti. L'immagine mostra il la tensione di rottura, nella parte superiore il valore della tensione di snervamento è pari mediamente a 1450 MPa, nella parte inferiore, invece, il valore è di circa 750 MPa.

Per cui, come desiderato, la tensione di rottura differente garantisce il cedimento primario della parte più duttile in caso di impatto laterale.



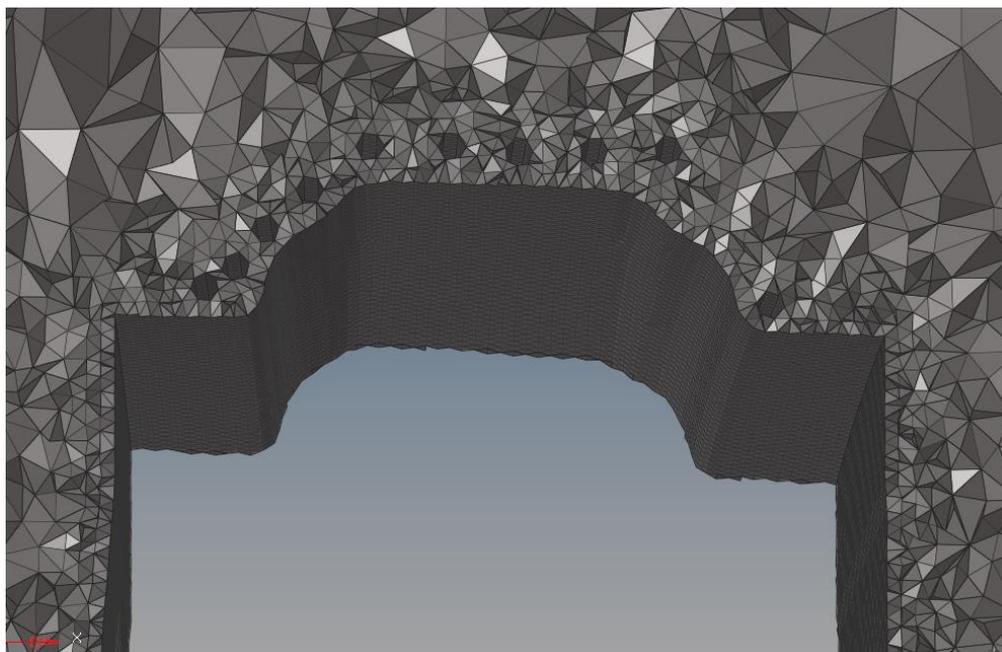
*Figura 76 - Mappa del tensile strength al termine del processo di stampaggio*

## 5.2 Analisi di deformazione

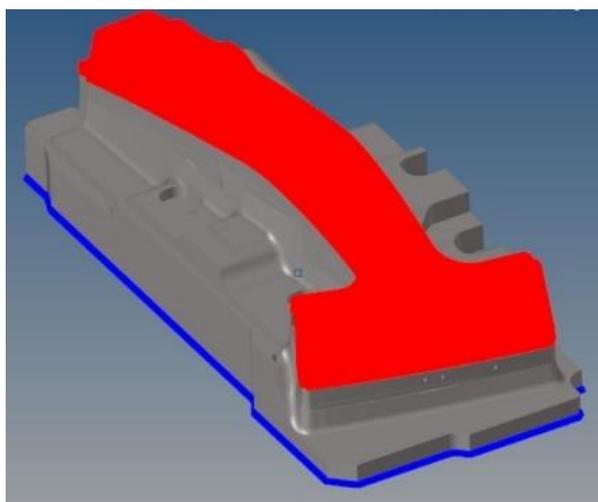
I miglioramenti osservati dalle analisi termiche, grazie allo sviluppo di canali conformali, potrebbero comportare una riduzione delle proprietà meccaniche dello stampo. Tale problematica è correlata all'aumento del numero di canali ed alla loro distanza rispetto la superficie, notevolmente inferiore rispetto al caso tradizionale.

A tal proposito sono state condotte delle analisi di deformazione sullo stampo per garantire la resistenza strutturale, evitando il cedimento dello stesso in fase di stampaggio.

Partendo dalla matematica ricostruita mediante software CAD, è stata costruita la mesh tetragonale. Come mostra la *Figura 77*, essa possiede una dimensione variabile in base alla sua posizione, difatti è particolarmente fitta nella zona dei canali e lungo la superficie in contatto con la lamiera, mentre è più rada nella zona interna.



*Figura 77 - Mesh progressiva*



*Figura 78 - Distribuzione di carichi e vincoli*

Effettuata la mesh si è proceduti con l'aggiunta dei carichi e dei vincoli rappresentanti la meccanica del processo. Dalla *Figura 78* si evidenzia una zona in blu indicante i vincoli, ossia incastri bloccanti traslazioni e rotazioni, mentre in rosso la pressione esercitata durante il processo di stampaggio.

Le *Figura 79* e *Figura 80* sono il risultato della simulazione ad elementi finiti sul punzone. Come si nota, la deformazione massima è pari a 0.019 mm, maggiore di 0.005

mm rispetto alla riprogettazione mediante tecniche tradizionali. Essendo la deformazione massima accettabile pari a 0.5 mm, essa può essere ritenuta trascurabile, inoltre è localizzata in una zona esente da canali conformali, per cui ininfluente per la fluidodinamica dei canali di raffreddamento.

La zona di massima deformazione è localizzata nello stesso punto sia per i canali tradizionali che per i canali conformali, ciò è dovuto alla presenza di uno spigolo vivo il quale causa una concentrazione di tensioni.

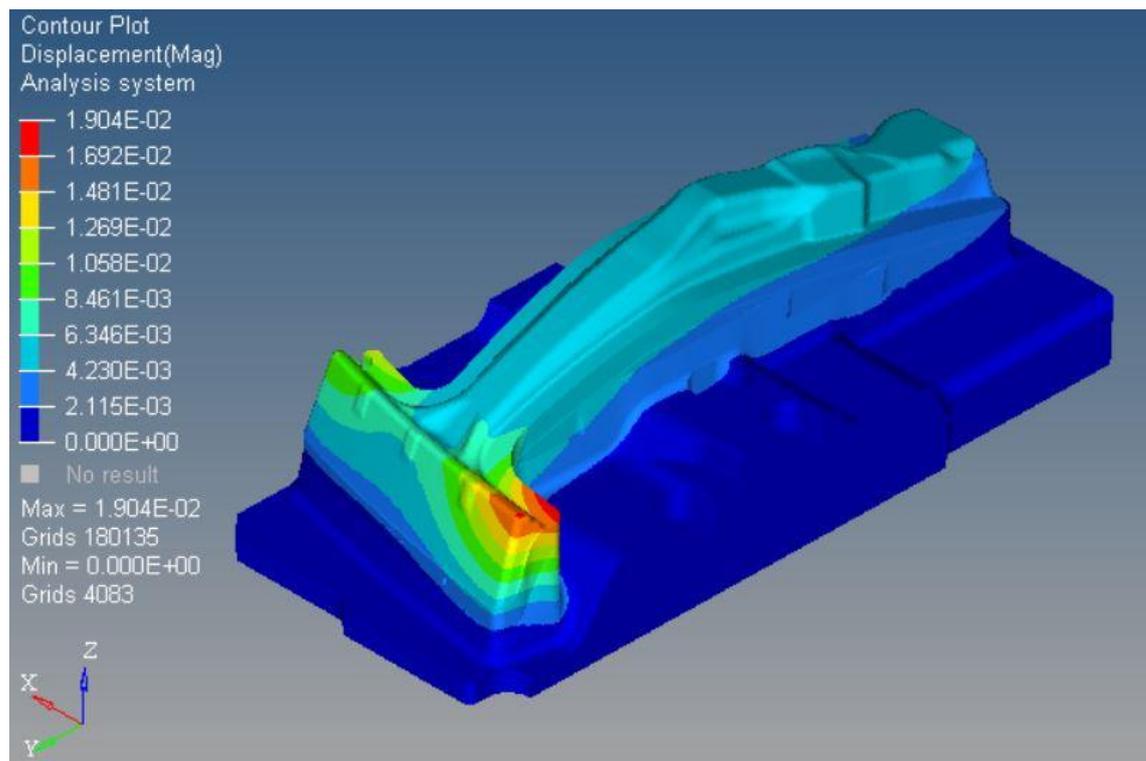


Figura 79 - Andamento delle deformazioni del punzone

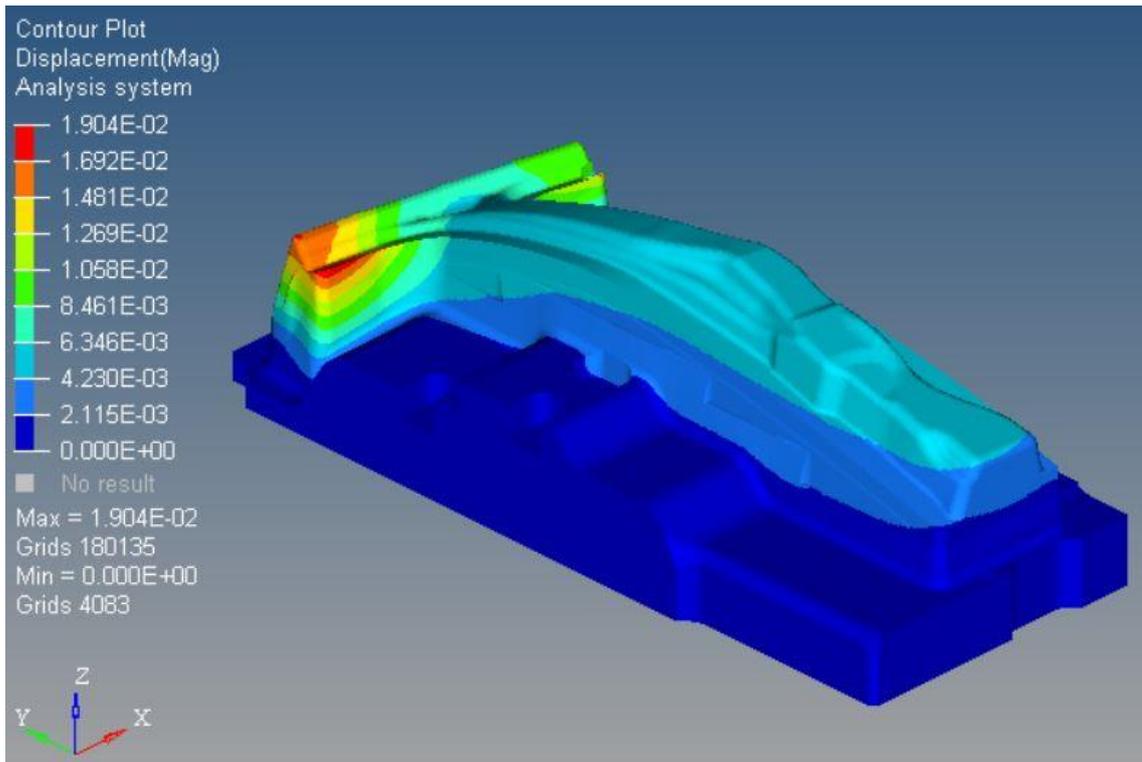


Figura 80 - Andamento delle deformazioni del punzone

L'analisi della deformazione è stata condotta, così come per il punzone, anche sulla matrice. In tal caso la soluzione ha mostrato una deformazione massima pari a 0.039 mm, decisamente inferiore rispetto alla riprogettazione con canali tradizionali, tuttavia in una zona completamente differente, come riscontrabile dalla *Figura 81* e *Figura 82*. La deformazione, così come per il caso precedente, oltre ad inferiore a 0.5 mm, è localizzata in una zona esente da canali conformali, dunque non genera alcun ostacolo al passaggio del fluido refrigerante.

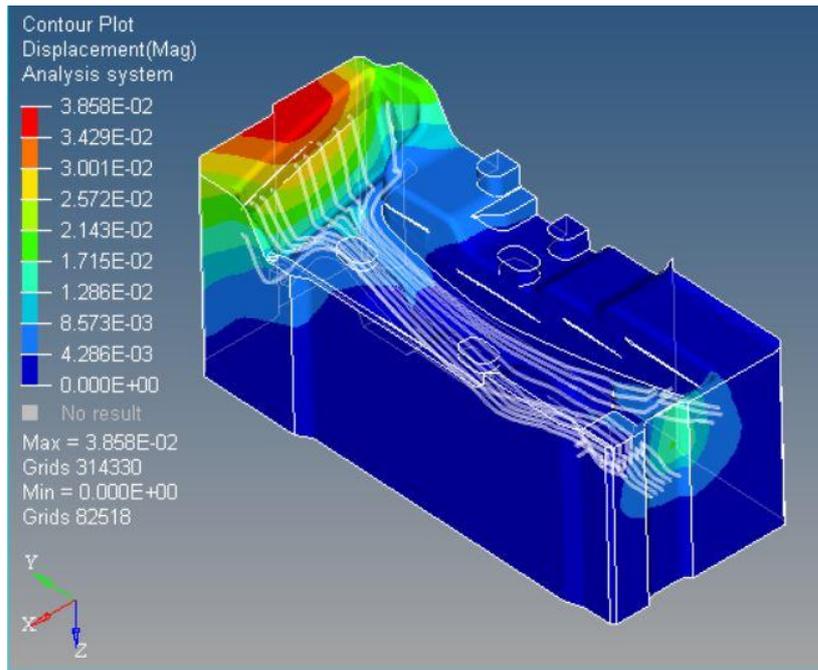


Figura 81 - Andamento delle deformazioni della matrice

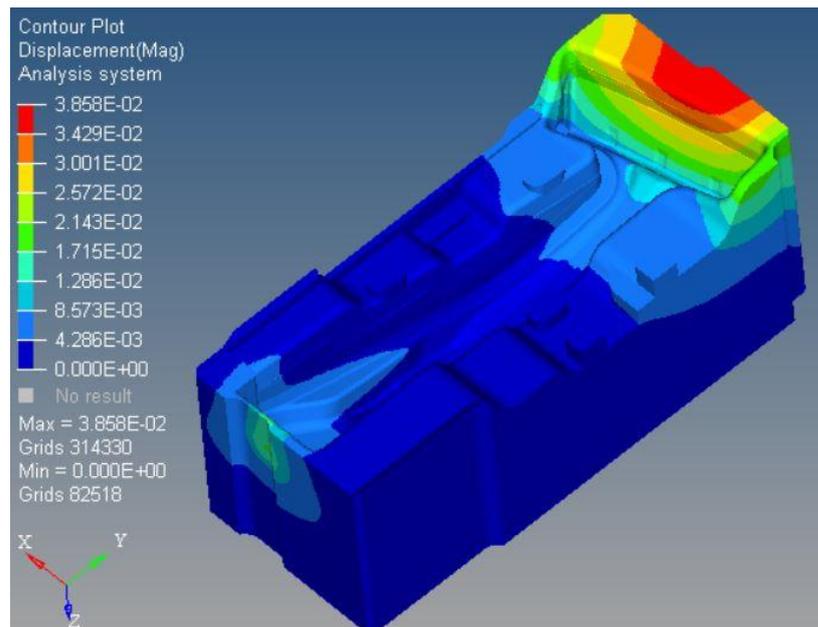


Figura 82 - Andamento delle deformazioni della matrice

## 6 CONCLUSIONI

Lo studio teorico riguardo la riprogettazione condotta sullo stampo per la produzione di B-Pillar è stato motivato da problemi realmente riscontrati in fase di produzione del componente.

La riprogettazione dello stampo è stata effettuata solo dopo aver definito la tecnologia additiva più adatta alla fabbricazione. Sono state analizzate due differenti tecnologie, la Laser Powder Bed Fusione e la Direct Energy Deposition, a causa del limitato impiego della seconda, lo studio è stato condotto analizzando solo la L-PBF. Per tale tecnologia sono state analizzate tre differenti soluzioni progettuali, con il fine di abbattere i costi di fabbricazione e, consequenzialmente, ridurre il tempo di costruzione del job.

Dall'analisi economica effettuata, si è evidenziato che la soluzione migliore risulta essere la “*soluzione tassello*”, tale soluzione prevede la lavorazione al CNC di un blocco massivo e, successivamente, l'assemblaggio di un tassello dotato di canali conformali, dunque ottenuto mediante L-PBF, su di esso.

Dopo aver effettuato l'analisi dei costi e aver scelto la soluzione progettuale più adatta, si è proceduti con la riprogettazione. Essa è stata condotta seguendo un ciclo iterativo su software CAD e FEM. Il primo step ha previsto la ricostruzione della geometria mediante software CAD, successivamente sono state effettuate le analisi termiche che hanno portato al soddisfacimento degli obiettivi prefissati solo dopo diverse modifiche progettuali. Infine, sono state condotte le analisi di deformazione, per verificare l'effettiva resistenza meccanica dello stampo riprogettato.

La riprogettazione ha portato ai risultati desiderati. La ricostruzione della geometria ha consentito di ottenere una significativa semplificazione dello stampo, infatti, l'integrazione delle parti, l'unione delle anime scanalate con il punzone e la matrice, ha permesso di ovviare ai problemi di durabilità e perdite di fluido refrigerante.

La riprogettazione per realizzare parti di stampo con tecnologie additive ha consentito, dal punto di vista teorico, lo sviluppo di canali conformali, i quali hanno mostrato la possibilità di ottenere differenti microstrutture nel B-Pillar. Nella fattispecie le simulazioni, condotte dopo la riprogettazione, hanno mostrato una microstruttura martensitica nella parte superiore e bainitica in quella inferiore, così giovando la sicurezza

dei passeggeri, in caso di impatto laterale, e facilitando il processo di saldatura con la parte restante del telaio.

La capacità di costruire canali di raffreddamento conformali, dunque la possibilità di seguire accuratamente la geometria, ha consentito di avvicinare quest'ultimi alla superficie dello stampo così asportando calore in tempi inferiori e riducendo di 1/3 il tempo di produzione.

## 7 RIFERIMENTI

1. *Overview on Additive Manufacturing Technologies*. **Calignano F., Manfredi D., Ambrosio E. P., Biamino S., Lombardi M., Atzeni E., Salmi A., Minetola P., Iuliano L., Fino P.** 4, TORINO : s.n., 2017, Vol. 105. WOS:000398906000002.
2. **Milewski, John O.** *Additive Manufacturing of Metals From Fundamental Technology to Rocket Nozzles, Medical Implants, and Custom Jewelry*. s.l. : Springer, 2017. 978-3-319-58204-7.
3. **Ian Gibson, David Rosen, Brent Stucker.** *Additive Manufacturing Technologies – Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing*. s.l. : Springer, 2010. 978 1 4419 1119 3.
4. *Additive manufacturing as a cost-effective way to produce metal parts*. **E. Atzeni, L. Iuliano, G. Marchiandi, P. Minetola, A. Salmi, E. Bassoli, L. Denti, A. Gatto.** Torino : Research Gate, 2014. DOI: 10.1201/b15961-3.
5. **Wiener, Li Yang · Keng Hsu · Brian Baughman Donald Godfrey · Francisco Medina Mamballykalathil Menon · Soeren.** *Additive Manufacturing of Metals: The Technology, Materials, Design and Production*. Switzerland : Springer, 2017. 1860-5168.
6. **Gu, Dongdong.** *Laser Additive Manufacturing of High-Performance Materials*. Berlin : Springer, 2015. 978-3-662-46088-7.
7. *The selection of process parameters in additive manufacturing for aerospace alloys*. **Mostafa Yakuot, Andrea Cadamuro, M.A. Elbestawi, Stephen C.Veldehuis.** London : CrossMark, 2017. DOI 10.1007/s00170-017-0280-7.
8. *Additive Manufacturing Technologies 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing Second Edition*. **New York : Springer, 2015. 978-1-4939-2112-6.**
9. **Concept Laser.** [Online] <https://www.concept-laser.de/en/products/machines.html>.
10. **Arcam.** [Online] <http://www.arcam.com/technology/products/arcam-a2x-3/>.
11. **Optomec.** [Online] <https://www.optomec.com/3d-printed-metals/lens-printers/metal-component-repair-3d-printer/>.
12. **Tang, Yunlong.** A survey of the design methods for additive manufacturing to improve functional performance. *Rapid Prototyping Journal*. 3, 2016, Vol. 22, doi:10.1108/RPJ-01-2015-0011.
13. **Joran W.Booth, Jeffrey Alperovich, Pratik Chawla, Jiayan Ma, Tahira N.Reid, Karthik Ramani.** The Design for Additive Manufacturing Worksheet. *Journal of Mechanical Design*. 2017, Vol. 139, 10.
14. *Added Value in Tooling for Sheet Metal Forming through Additive Manufacturing*. **B.Mueller, R.Hund, R.Malek, Mathias Gebauer, Stefan Polster, Mathias Kotzian, Prof.Reimund Neugebauer.** Germany : International Conference on Competitive Manufacturing, 2013. 02PO2730.
15. **Centro Ricerche Fiat.** [Online] <https://www.crf.it/IT>.
16. **Erica, Liverani.** STUDIO E OTTIMIZZAZIONE DEL PROCESSO DI FABBRICAZIONE ADDITIVA (SLM) PER APPLICAZIONI IN AMBITO BIOMEDICALE: PRODUZIONE DI PROTESI E STRUTTURE RETICOLARI. *DOTTORATO DI RICERCA* . Bologna : Alma Mater Studiorum - Università di Bologna, 2017.