



UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE
FACOLTA' DI INGEGNERIA

Corso di Laurea triennale in Ingegneria Meccanica

**Studio del processo di additive manufacturing di acciai
inossidabili al variare dei parametri di stampa**

**Study of the additive manufacturing process of stainless
steels as the printing parameters vary**

Relatore:

Prof. Archimede Forcellese

Tesi di Laurea di:

Alessio Gentile

A.A. 2020/2021

INDICE DEI CONTENUTI:

Introduzione.....	6
-------------------	---

Capitolo 1

Stato dell'arte.....	8
1.1 Additive manufacturing.....	8
1.2. Materiali utilizzati nelle tecniche additive.....	10
1.3. Tecniche di additive manufacturing.....	13
1.4. Bound Metal Deposition.....	25

Capitolo 2

Parametri di stampa nella BMD.....	30
2.1. Larghezza del filamento.....	31
2.2. Orientazione del filamento.....	31
2.3. Direzione di crescita nel piano.....	35
2.4. Spessore del layer.....	36
2.5. Air gap.....	38
2.6. Ulteriori parametri di processo.....	39

Capitolo 3

Materiali e procedure sperimentali.....	40
---	----

3.1. Acciaio inossidabile 17-4 PH.....	40
3.2.1. Obiettivo dello studio.....	42
3.2.2. Fasi del progetto.....	43
3.3. Procedure sperimentali.....	45
3.4. Processo di generazione di provini con spessore del layer di 0.10mm.....	47

Capitolo 4

Analisi dei risultati ottenuti dalla prova di trazione.....	51
4.1. Analisi dei dati relativi a provini con larghezza del filamento di 0.40mm.....	52
4.1.1. Confronto provini con larghezza del filamento di 0.40mm.....	52
4.2. Analisi dei dati relativi a provini con larghezza del filamento di 0.25mm.....	54
4.2.1. Confronto provini con larghezza del filamento di 0.25mm.....	55
4.2.2. Confronto provini con larghezza del filamento di 0.25mm trattati termicamente attraverso H900.....	56
4.3.1. Confronto tra i provini con orientazione 0° e larghezza del filamento di 0.25mm e 0.40mm.....	58
4.3.2. Confronto tra i provini con orientazione 90° e larghezza del filamento di 0.25mm e 0.40mm.....	59
4.3.3. Confronto tra i provini con orientazione 45° e larghezza del filamento di 0.25mm e 0.40mm.....	60
4.4. Confronto dei valori ricavati dalle prove di trazione con la normativa di riferimento MPIF Standard 35.....	61

Conclusioni.....62

Bibliografia.....66

Introduzione

È possibile definire l'additive manufacturing (AM) come la famiglia di processi basati sulla stratificazione progressiva di materiale su livelli sovrapposti lungo un determinato asse di crescita, al fine di ottenere un oggetto tridimensionale che soddisfi le specifiche richieste da progetto. Queste tecniche nascono dalla necessità di generare prototipi, utensili e prodotti personalizzati in tempi brevi e con costi più bassi rispetto a quelli che si avrebbero utilizzando i processi sottrattivi tradizionali, basati sull'asportazione progressiva di materiale dal pieno. L'adozione dell'AM rappresenta un enorme passo in avanti dal punto di vista industriale poiché, essendo un processo additivo, limita al massimo lo sfrido, quindi lo spreco di materiale durante la lavorazione. Non risente inoltre delle numerose limitazioni, dovute propriamente alla fisica del processo produttivo, presenti nelle altre lavorazioni; permette ad esempio la generazione di pezzi dalla geometria anche molto complessa, che prima non si sarebbero potuti realizzare in maniera semplice e con costi relativamente contenuti. Altre caratteristiche peculiari sono la versatilità e la semplicità di utilizzo delle macchine, è infatti possibile stampare sia materiali ceramici che polimerici, ma anche metallici grazie ad apposite strumentazioni. La facilità di utilizzo della strumentazione, coadiuvata dallo sviluppo dell'industria 4.0 (la quale prevede che le macchine comunichino automaticamente fra loro), rende questa tecnologia accessibile ad una vasta gamma di possibili utilizzatori, non per forza legati al solo ambito della produzione industriale. Visto il rapido avanzamento tecnologico e l'innegabile potenzialità, si è cominciato ad utilizzare tecniche AM non solo per i prototipi, ma anche per la generazione di prodotti finiti che andranno ad affiancare o, si spera, sostituire quelli realizzati con le più comuni tecniche di fabbricazione industriale. Alla luce di questa nuova tendenza, dal punto di vista ingegneristico, si è implementato lo studio delle tecniche che permettono la lavorazione di materiali metallici, in particolare l'acciaio, poiché garantisce elevate proprietà meccaniche e strutturali. Le tecniche che fanno parte della famiglia AM differiscono fra loro sulla base del processo fisico utilizzato, possono essere divise in tre grandi categorie a seconda che si utilizzi materiale da stampaggio allo stato solido, liquido o di polvere. Sarà dunque necessario scegliere quella più adatta in base al tipo di materiale che bisogna andare a lavorare, alle proprietà meccaniche, alla finitura superficiale richiesta al prodotto finito, alla velocità ed ai costi da sostenere per la produzione. Nella seguente trattazione si focalizzerà l'attenzione sulla tecnica della Bound metal deposition (BMD) attraverso l'analisi e l'utilizzo della macchina Studio System prodotta dall'azienda statunitense Desktop Metal. La BMD è un processo utilizzato per la generazione di componenti metallici basato sull'estrusione di particolari barre costituite da polvere metallica in sospensione all'interno di un legante di natura polimerica e/o ceramica. Si tratta di un processo multistadio, composto da tre fasi consecutive: stampaggio della barretta, rimozione del

legante attraverso il debinding, consolidamento della polvere metallica attraverso forno di sinterizzazione. Nella generazione dei provini verranno modificati volta per volta alcuni dei parametri di stampa fondamentali, come altezza del layer, larghezza del filamento e angolo di direzione di crescita. I provini saranno successivamente sottoposti ad una prova di trazione ed i dati da essa estrapolati verranno confrontati allo scopo di conoscere come la variazione dei parametri di stampa abbia influenzato le proprietà meccaniche del materiale. Il materiale utilizzato nello studio è il 17-4 PH, un acciaio inossidabile fornito dal produttore della stampante sotto forma di barrette di polvere metallica tenuta insieme da un legante in resina, contenute all' interno di apposite cartucce da inserire nell' alloggio della stampante. Il fine ultimo dello studio del processo di stampaggio additivo del 17-4 PH con l' utilizzo della BMD è andare a definire la combinazione dei parametri di stampa tale da massimizzare le proprietà meccaniche del provino richieste dalle specifiche di progetto, tenendo conto anche degli eventuali trattamenti termici a cui lo stesso viene sottoposto. Trattandosi di una tecnica relativamente nuova, che prevede l' utilizzo di materiali complessi, sarà inoltre inevitabile il confronto, a livello di proprietà meccaniche, tra i provini generati mediante BMD e quelli sviluppati con tecniche tradizionali, allo scopo di valutare l' effettiva convenienza del processo oltre che in termini economici anche sotto l' aspetto qualitativo. Risulta infatti innegabile che, se si riuscissero a garantire le stesse proprietà meccaniche in entrambe le tipologie di provini, si potrebbero porre le basi per una vera e propria rivoluzione dell' industria manifatturiera.

Capitolo 1

Stato dell' arte:

1.1. Additive manufacturing:

Il termine ADDITIVE MANUFACTURING (AM) racchiude in sé tutti quei processi che prevedono una stratificazione progressiva di materiale lungo una direzione di crescita ben definita, al fine di ottenere un oggetto tridimensionale che soddisfi le caratteristiche richieste da progetto. Venne coniato per racchiudere in sé tre concetti fondamentali, corrispondenti alle principali destinazioni di utilizzo:

- **Rapid prototyping:** prototipazione rapida. Le tecniche AM in partenza sono state sviluppate per andare a risolvere uno dei problemi fondamentali presenti nell' industria manifatturiera, ossia il fatto che, per generare dei prototipi, fossero necessarie delle tempistiche molto lunghe ed un dispiegamento di forze non consono all' effettiva complessità del prodotto. Solitamente per la prototipazione venivano e vengono tutt' ora utilizzate macchine a controllo numerico che lavorano sfruttando tecniche di taglio con asportazione di materiale da un blocco pieno, ciò comporta che, durante la lavorazione, si venga a generare una grande quantità di sfrido. Proprio la generazione di sfrido mette alla luce la prima problematica presente in questo processo, il grande spreco di materiale; infatti, il truciolo generato durante le operazioni di taglio solitamente non può essere più utilizzato per applicazioni industriali, viste le modifiche a livello di proprietà sia meccaniche che strutturali che il materiale subisce durante l'operazione. La seconda problematica consiste nel fatto che, con le lavorazioni classiche, risulta essere molto complessa la generazione di prototipi con geometrie complesse, sia in termini di tempistiche che in termini di costi. Come si vedrà in seguito le tecniche AM saranno in grado, almeno in parte, di risolvere tali problematiche, vista la loro grande versatilità.
- **Rapid tooling:** rapida generazione di utensili. Alla luce dell'effettiva validità delle tecniche si è cominciato ad utilizzare l'AM per generare utensili e componenti per l'industria. Oltre al costo ridotto ed alla facilità di realizzazione si è notato che i prodotti realizzati con tecniche additive, in alcuni casi, potessero essere in grado di sostituire componenti creati con tecniche tradizionali.
- **Rapid manufacturing:** produzione rapida. Corrisponde alla nuova frontiera per l'AM, l'effettiva generazione di prodotti finiti che saranno poi immessi sul mercato. Come già accennato precedentemente le lavorazioni additive rappresentano un enorme passo in

avanti nell'ambito dell'industria manifatturiera in quanto garantiscono la possibilità di realizzare prodotti con la geometria desiderata in maniera semplice ed in tempi brevi. Si presume e si auspica che i prodotti generati con queste tecniche siano destinati ad affiancare e/o sostituire quelli realizzati con le più comuni tecniche di fabbricazione industriale. Per rendere ciò possibile sarà però necessario diminuire ulteriormente i tempi di produzione e garantire che i prodotti godano di proprietà meccaniche identiche o al più simili a quelle possedute dai loro omologhi realizzati con tecniche tradizionali.

L' AM è dunque una modalità di produzione che consente la realizzazione di prodotti generando e sommando strati successivi di materiale. La sua caratteristica peculiare, che la differenzia dalle tecniche tradizionali, è il fatto che in tali processi si rovescia il principio di funzionamento solitamente adottato. Si parla per l'appunto di fabbricazione additiva e non più sottrattiva con generazione di ingenti quantità di scarti.



Figura 1- Confronto tra tecniche AM e lavorazioni sottrattive

Andando ad aggiungere strati successivi di materiale, come mostrato in figura, si vanno ad eliminare la maggior parte delle limitazioni, legate alla geometria del prodotto, che si presentavano nel caso delle lavorazioni sottrattive tradizionali. Sarà infatti possibile realizzare ad esempio pezzi che presentano numerosi fori o cavità interne senza difficoltà.

Un' ulteriore caratteristica delle tecniche AM è la semplicità di utilizzo; i macchinari, infatti, nella maggior parte dei casi, sono progettati per lavorare in maniera quasi completamente automatizzata, riducendo al massimo il compito dell'operatore, il quale si limiterà ad inserire nel sistema le specifiche di progetto richieste al pezzo che si deve generare.

Quest'ultima caratteristica, unita alla possibilità di acquistare tale tecnologia a prezzi tutto sommato contenuti, ha fatto sì che comparissero stampanti 3D anche sulle scrivanie di studenti o appassionati senza specifica preparazione.

1.2. Materiali utilizzati nelle tecniche additive:

Le lavorazioni additive sono rinomate per la loro versatilità, si è infatti in grado di trattare sia materiali ceramici che polimerici, ma anche e soprattutto metallici. Dal punto di vista industriale quelli di maggiore interesse sono indubbiamente i polimeri ed i metalli. I polimeri permettono una più ampia scelta dei processi di stampa e dei costi ridotti rispetto ai metalli sia per quanto riguarda il materiale stesso che viene lavorato che per l'effettivo costo delle tecnologie di stampa ad esso associate. I metalli invece garantiscono, di partenza, delle proprietà meccaniche più elevate rispetto ai polimeri ma, oltre al costo della materia prima, c'è anche da considerare che, per essere lavorati, necessitano di tecniche più complesse, dunque più costose.

Si procede adesso a fornire un elenco dei materiali polimerici comunemente utilizzati per processi di stampa:

- **Acido polilattico:** comunemente noto come PLA, è uno dei materiali più sfruttati per uso dilettantistico. Il suo trattamento risulta essere molto semplice da realizzare, infatti, viene stampato a temperature inferiori rispetto agli altri polimeri, non richiedendo infatti un letto riscaldato. È un materiale molto economico e permette di generare prodotti che possono essere utilizzati per un'ampia varietà di applicazioni. Non essendo molto resistente alle alte temperature, sarà necessario tenerlo a debita distanza da eventuali fonti di calore. È generato dalla lavorazione di vari prodotti vegetali, tra cui mais, patate o barbabietole da zucchero; ed è per questo considerato una plastica 'ecologica'. Solitamente viene impiegato in imballaggi per alimenti e contenitori. Il filamento plastico di PLA inoltre è ideale per stampe 3D in cui la componente estetica ricopre un ruolo fondamentale, grazie alla sua bassa temperatura di stampa che lo rende più adatto per parti con dettagli fini. Ha un aspetto lucido una volta stampato.
- **ABS (acrilonitrile-butadiene-stirene):** è uno dei materiali maggiormente sfruttati per creare filamenti plastici funzionali alla stampa 3D. È una plastica particolarmente robusta e resistente agli urti che consente di stampare parti di ricambio durevoli e resistenti a fatica e usura. Questo tipo di plastica è molto versatile e leggermente flessibile e può resistere a

temperature fino a circa 85 °C senza subire deformazioni. I prototipi creati con l'ABS sono piacevoli alla vista grazie alla capacità di questo materiale di poter essere liscio e verniciato. L'ABS è un termopolimero molto diffuso per via della sua leggerezza e rigidità, ma anche grazie al fatto che può essere lavorato sia mediante estrusione che stampaggio ad iniezione. Possiede buone proprietà meccaniche, è meno friabile del PLA e in più sopporta temperature più alte. Pur essendo resistente alla graffiatura, risente molto degli agenti atmosferici e presenta fenomeni di ritiro che devono essere tenuti sotto controllo in fase di stampa.

- **Nylon:** è una plastica sintetica, poliammidica, dotata di notevoli proprietà meccaniche. Utilizzato da molti produttori in tutto il mondo questo materiale è noto per la sua impressionante durezza, alto rapporto resistenza/peso, flessibilità, basso attrito e resistenza alla corrosione e infine, la capacità di resistere a stress meccanici significativi. Il Nylon è una scelta eccellente per strumenti di stampa 3D, prototipi funzionali e componenti di uso finale. Grazie alla sua proprietà auto-saldante, inoltre, si ha una migliore finitura superficiale del prodotto stampato. Presenta problemi applicativi a causa dell'elevata temperatura di stampa (220-250°C), sussiste tuttavia la possibilità che il materiale assorba liquidi anche dopo il completamento del processo, cosa che rende necessari alcuni accorgimenti per la conservazione, al fine di evitare il contatto ad esempio con l'umidità. Essendo per l'appunto un materiale igroscopico (che assorbe liquidi), è possibile immergere il filamento in tinture tessili liquide per fargli assumere un determinato colore.
- **HDPE (Polietilene ad alta densità):** è un polimero termoplastico ricavato dal petrolio. In particolare, è un polietilene poco ramificato: ciò significa che possiede forze intermolecolari elevate e maggiore rigidità rispetto al polietilene a bassa densità, il che garantisce una maggiore resistenza a trazione rispetto a quest'ultimo. Inoltre, risulta anche più duro ed opaco e può sopportare temperature più elevate. Si tratta di uno dei materiali maggiormente presenti nella vita quotidiana: l'HDPE costituisce, infatti, il 40% del volume totale della produzione mondiale di materie plastiche, ed è facilmente reperibile in molti oggetti di utilizzo comune come: fusti di detersivi, tappi di bottiglia, contenitori di vario tipo e sedie pieghevoli; è anche presente in tubature e cavi per le telecomunicazioni. Non assorbe acqua o liquidi, viene intaccato, infatti, solamente da acidi ossidanti quali acido nitrico, acido solforico e dagli alogeni. Possiede ottime proprietà isolanti e stabilità chimica,

oltre ad essere atossico e quindi adatto ad essere utilizzato nel settore alimentare ed anche in quello medicale.

- **PVA (alcol polivinilico):** è utilizzato per la creazione di supporti da eliminare mediante immersione in acqua, essendo questo un materiale idrosolubile ma pur resistente agli idrocarburi. Risulta leggermente più complesso da estrarre rispetto ad altri polimeri a causa dell'elevata temperatura di stampa. Va conservato in luoghi asciutti per evitarne il degrado.

Per quanto riguarda i materiali metallici, quelli maggiormente impiegati sono:

- **ALLUMINIO:** è una lega metallica forte e leggera che combina eccezionali proprietà meccaniche e termiche. Per questi motivi, le leghe di alluminio sono uno dei metalli più popolari al mondo, essendo ampiamente utilizzate nell'industria aerospaziale, automobilistica e biomedicale. Le notevoli caratteristiche di questo materiale lo rendono un'ottima scelta per parti funzionali ad alte prestazioni, soggette cioè a carichi elevati. Le leghe di alluminio sono adatte anche per componenti del motore e strumenti di produzione, nonché per scambiatori di calore e applicazioni esterne. Il materiale può essere utilizzato sia per la prototipazione che per la produzione. La qualità delle parti stampate in alluminio è pari a quella delle componenti prodotte con CNC.
- **SUPERLEGA COBALTO-CROMO:** è ben nota per il suo elevato rapporto resistenza-peso, per l'elevata resistenza alla corrosione e allo scorrimento, e per la possibilità di ottenere lucidature estremamente lisce. Il suo basso contenuto di nichel le conferisce un'eccellente biocompatibilità, il che la rende ideale per applicazioni ortopediche e odontoiatriche. Queste sue proprietà lo rendendolo ideale per applicazioni mediche come, ad esempio, protesi articolari o dentarie. Tali proprietà meccaniche e termiche vanno a migliorare con il crescere della temperatura fino a ad un massimo di 500-600°C.
- **NICHEL:** utilizzato principalmente nel settore energetico e aerospaziale, possiede una resistenza a temperature elevatissime (utilizzabile fino a temperature di 1200°C), inoltre presenta un'ottima resistenza meccanica e all'ossidazione.

- **ACCIAIO:** si tratta della lega maggiormente utilizzata a causa del suo ottimo rapporto costo/prestazioni; ne esistono varie tipologie e possono essere sia inossidabili che trattabili termicamente (Tempra, invecchiamento...). Lo sviluppo di tecniche AM che utilizzano questo materiale è di enorme rilevanza per il settore industriale e ingegneristico; in quanto favorirà la transizione che porterà, si auspica, ad una diminuzione dell'utilizzo delle tecniche tradizionali nell'industria manifatturiera.
- **TITANIO:** ideale per applicazioni biomediche ma anche in ambito motorsport e aerospaziale. Lega dalla bassa densità, possiede notevoli proprietà meccaniche, ottima resistenza alla corrosione e buonissima biocompatibilità (protesi).

1.3. Tecniche di additive manufacturing:

Le tecnologie additive possono essere suddivise in tre macrocategorie, basate sulle caratteristiche di consistenza della materia prima utilizzata. Sarà infatti possibile trovare il materiale allo stato solido, liquido o in polvere. La tipologia di stampaggio varia in base allo stato di aggregazione della materia prima. È quindi possibile fornire una breve classificazione dei trattamenti da poter adottare in base alle varie casistiche:

- **Polveri:** solitamente si impiegano tecniche basate sulla sinterizzazione o fusione delle polveri; in alternativa è possibile ricorrere a processi che prevedono la deposizione di un legante chimico su un letto di polvere omogeneo;
- **Solidi:** si impiegano tecniche che prevedono l'incollaggio stratificato di fogli o, in alternativa, l'estrusione di un materiale solido o semisolido;
- **Liquidi:** vengono adottate tecniche di fotopolimerizzazione tramite lampade UV o di stampaggio a getto.

L'ASTM (American Society for Testing and Materials) International, un organismo di normalizzazione statunitense, suddivide le tecnologie di fabbricazione additiva in varie famiglie di processi (ognuna di queste tecniche sarà poi analizzata nello specifico). In generale è possibile affermare che la scelta di una determinata tecnologia al posto di un'altra è da svolgersi tenendo conto di vari parametri quali: la tipologia di materiale che deve essere sottoposto a lavorazione, la resistenza meccanica richiesta al pezzo, la finitura superficiale e più in generale l'estetica del pezzo,

la velocità di produzione, l'investimento iniziale da dover sostenere per l'acquisto della materia prima e dell'attrezzatura, il costo effettivo di produzione del pezzo. L'ASTM (American Society for Testing and Materials) International, un organismo di normalizzazione statunitense, suddivide le tecnologie additive in varie famiglie, di seguito vengono riportate le principali:

- VAT POLYMERIZATION;
- MATERIAL EXTRUSION;
- MATERIAL JETTING;
- BINDER JETTING;
- POWDER BED FUSION;
- DIRECT ENERGY DEPOSITION;
- SHEET LAMINATION

❖ VAT POLYMERIZATION (Polimerizzazione in vasca): Questa tecnologia, come suggerisce il nome, prevede l'utilizzo di una vasca al cui interno è presente una resina di fotopolimero. Una luce ultravioletta (UV) colpisce tale resina attivandone la polimerizzazione in maniera selettiva, facendo cioè in modo che si indurisca solo nelle zone desiderate. La fonte luminosa, infatti, è direzionata attraverso un sistema di specchi riflettenti che guidano il fascio di luce solo nelle zone da polimerizzare e quindi indurire; a loro volta gli specchi sono collegati a un sistema motorizzato guidato da un software che ne gestisce il movimento in funzione del prodotto da realizzare. Le due varianti di sorgente luminosa sono: un laser puntiforme per Stereolitografia (SLA) che foto polimerizza punto per punto la sezione, oppure un proiettore per la Digital Light Processing (DLP) che attiva il polimero su tutta la sua sezione in modo uniforme. Una volta ultimato il singolo layer, il cestello presente all'interno della vasca si muove verso il basso. A causa di questo moto, anche lo strato di materiale indurito si sposta verso il fondo della vasca, in modo tale che si crei lo spazio per il layer successivo. Tra i principali vantaggi di tale lavorazione troviamo innanzitutto la possibilità di ottenere pezzi con una risoluzione molto elevata (strati da 0,01 a 0,15 millimetri) e da una finitura superficiale molto liscia. Il processo, inoltre, risulta essere molto rapido e si è in grado di stampare pezzi con elevate aree di stampa e peso non indifferente. I principali svantaggi nell'applicazione di tale tecnica sono: un costo di impianto elevato, la poca applicabilità dei materiali fotosensibili e la totale assenza di elementi solidi all'interno della vasca (che rende necessaria la stampa anche di appositi supporti). Inoltre, tale tecnologia, prevede dei tediosi trattamenti post lavorazione, quali, ad esempio, il passaggio del pezzo ultimato sotto una fonte luminosa in modo da aumentarne la durezza e consolidarne la struttura.

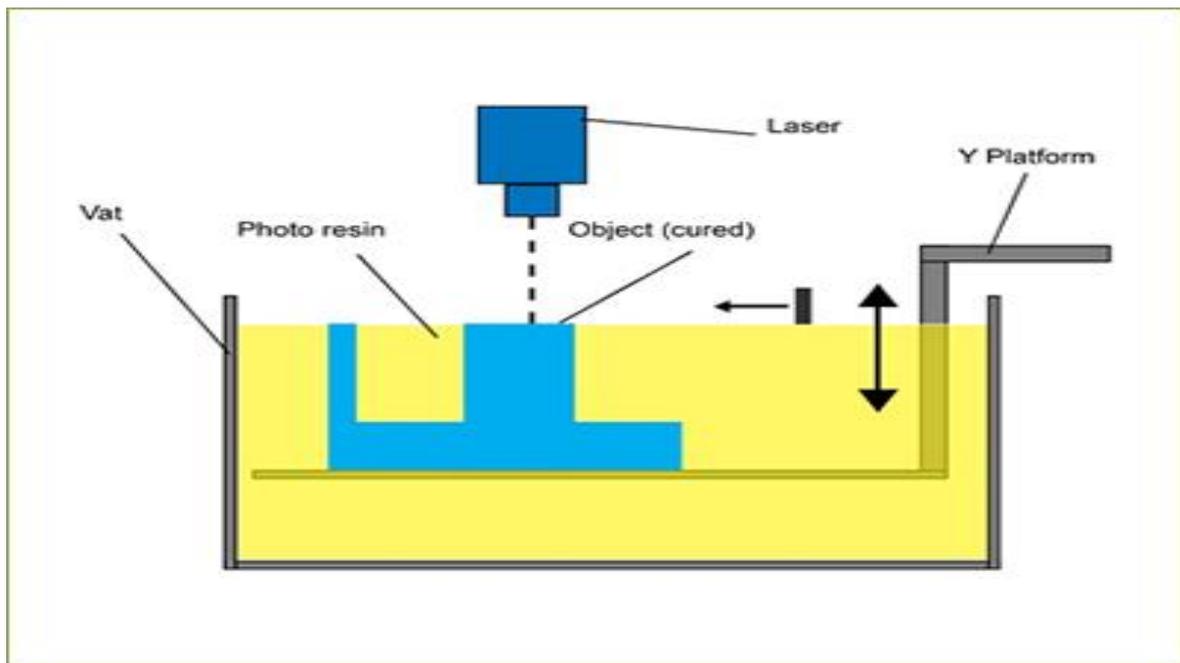


Figura 2- Schematizzazione Vat Polymerization.

❖ MATERIAL EXTRUSION (estrusione di materiale):

Il principio di funzionamento sfruttato da questa tecnologia è, come suggerisce il nome stesso, l'estrusione. Il materiale è fatto passare attraverso un ugello, all'interno del quale viene riscaldato per poi essere depositato strato per strato. L'ugello è in grado di traslare lungo un asse parallelo alla piattaforma, la quale si muove in direzione verticale dopo l'applicazione di ogni layer. Tale tecnologia risulta essere la più utilizzata per le stampanti 3D ad uso domestico, dato il suo costo contenuto. Grazie all'elevatissima resistenza a trazione e alla grande stabilità termica di materiali speciali quali ad esempio l'Ultem, è possibile costruire prodotti ed attrezzature avanzate per il settore medico, automobilistico, aerospaziale ed alimentare. A fronte di ottime proprietà chimiche e meccaniche, la finitura superficiale dei prodotti realizzati con questa tecnologia appare grezza, in quanto gli strati di filamento risultano evidenti alla fine dell'operazione di stratificazione. Per questo motivo, la superficie viene levigata mediante processi come sabbiatura, abrasione chimica o verniciatura, allo scopo di migliorare la finitura. Un altro svantaggio di tale processo riguarda la necessità, per ottenere oggetti qualitativamente apprezzabili dal punto di vista meccanico, di mantenere costanti i vari parametri di processo. Per fare ciò è necessario procedere con una stampa molto lenta, andando inoltre ad esercitare una continua pressione sul materiale da depositare. I processi più comunemente utilizzati sono: la Fuse deposition modelling (FDM) anche detta modellazione a deposizione fusa e la Fused filament fabrication (FFF). Questi due processi sono da tenere in considerazione poiché rappresentano l'evoluzione della tecnologia AM negli ultimi anni. La FDM è una tecnica di proprietà della Stratasys, Ltd. Brevettata nel 1989, prevede l'utilizzo di un

estrusore che lavora a temperature di circa 320°C e deposita il filamento all'interno di una camera isolata alla temperatura di 90°C, andando così a ridurre il salto termico, al fine di ottenere prodotti con una miglior finitura superficiale. A seguito della scadenza del brevetto nel 2009 si sono andati a sviluppare dei movimenti quali, ad esempio, il RepRap Project, che puntavano a rendere tale tecnologia fruibile a tutti, senza la necessità di dispositivi industriali. A questo scopo venne sviluppata la FFF, una tecnica molto simile alla precedente, che però non prevede l'utilizzo di una camera di stampa riscaldata e isolata dall'ambiente esterno. Sicuramente tale scelta comporta che il materiale stampato non abbia lo stesso livello di finitura di uno stampato con FDM, esso sarà soggetto, infatti, a deformazioni dovute al salto termico. Tale processo, tuttavia, è risultato così tanto economico e conveniente, da portare ad una elevata diffusione delle stampanti ad estrusione. Questa tendenza ha provocato un abbassamento del loro prezzo di mercato, rendendo disponibile tale tecnologia ad un numero sempre maggiore di persone. L'elevata diffusione è stata possibile anche grazie alla volontà da parte di RepRap project di sviluppare una stampante che fosse open-design ed in grado di autoreplicarsi, generando cioè essa stessa delle copie dei pezzi che la compongono.

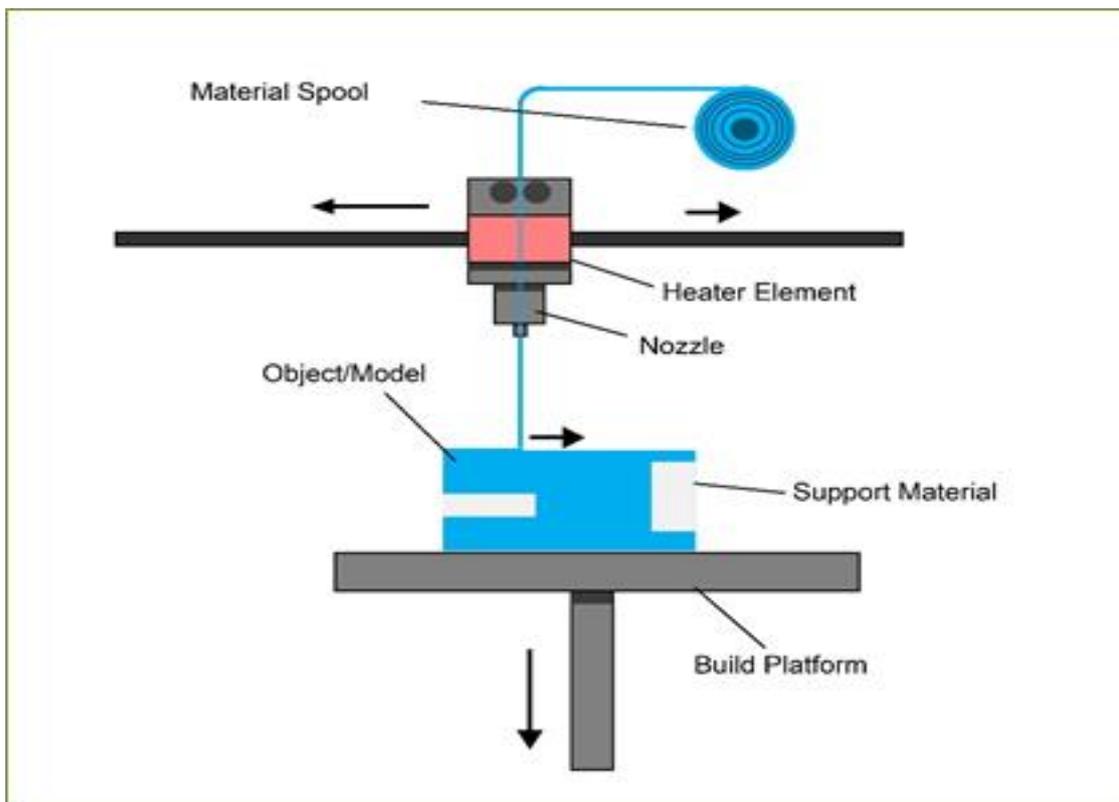


Figura 3- Schematizzazione Material Extrusion.

❖ MATERIAL JETTING:

Questa tecnica è in grado di produrre pezzi attraverso un procedimento che ricorda le stampanti ad inchiostro tradizionali. Il materiale è depositato su una piattaforma di base sotto forma di goccioline, in maniera continua oppure tramite la tecnica di Drop on Demand (DOD). Il materiale con cui si va ad alimentare la testina di stampa è allo stato liquido, a seconda del tipo di materiale si possono scegliere due diverse tecnologie: nel caso di cera e resine acriliche si usa la Multi Jet Modeling, se invece si opta per l'uso di un fotopolimero attivato da una fonte di luce UV abbiamo la Polyjet. Entrambe le tipologie di stampa sono in grado di depositare un secondo materiale, solubile, utilizzato per realizzare gli elementi di supporto a perdere. Le goccioline vengono caricate sulle punte dell'estrusore attraverso un moto oscillatorio continuo, ogni testina di stampa è dotata di centinaia di estrusori che permettono la deposizione di tali gocce. Le gocce, al passaggio della testina su un supporto rettilineo parallelo al piano di stampa, verranno immediatamente indurite. Nel caso invece della DOD, si ha una deposizione puntuale. Questa tecnologia è particolarmente adatta a materiali con elevata viscosità quali, ad esempio, le cere. L'elevata viscosità rende necessario per tale tecnica l'utilizzo di uno slicer, che vada ad appiattire il layer appena depositato. Le goccioline non utilizzate vengono riciclate, il che diminuisce al minimo gli sprechi. La DOD prevede la disposizione di gocce di materiale in maniera singola e non per linee come detto in precedenza. Un aspetto rilevante è che, in tale processo, il materiale è depositato sulla superficie di stampa sotto forma di goccioline, andando a ridurre di molto la varietà di materia prima che può essere utilizzata. Ciò non di meno questa tecnologia permette di godere di un'elevata precisione nella deposizione del materiale, riducendo gli scarti. Inoltre, il processo permette di intercambiare il materiale che alimenta la testina di stampa durante il funzionamento, andando a migliorare così il livello estetico dell'oggetto stampato.

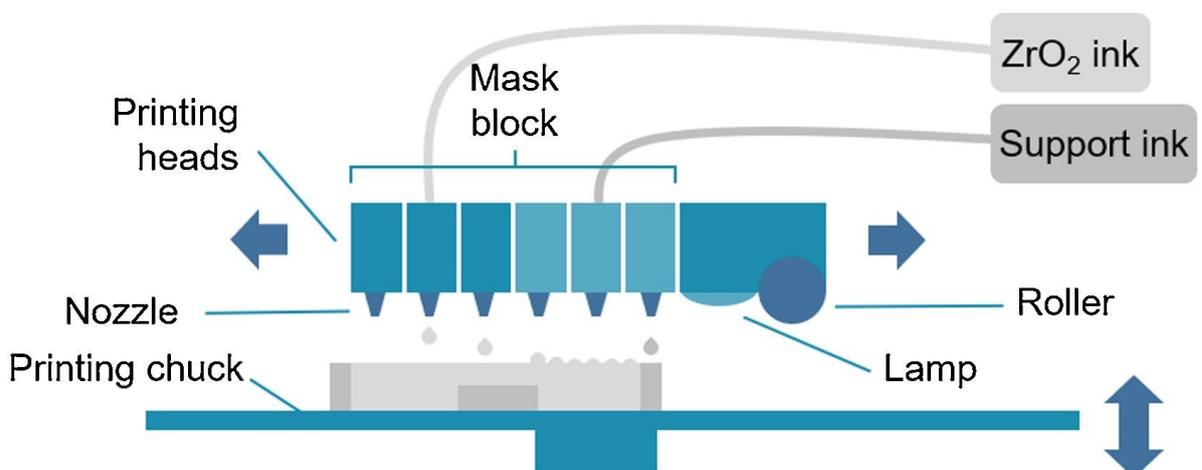


Figura 4- Schematizzazione Material Jetting.

❖ BINDER JETTING:

La tecnica prevede l'utilizzo di due componenti fondamentali: un materiale di base sotto forma di polvere, che andrà a costituire l'effettivo oggetto da stampare, ed un legante (binder), che viene depositato allo stato liquido. La testina, muovendosi lungo i due assi che descrivono il piano di appoggio della stampa, deposita in maniera alternata strati di polvere e di legante. Il legante chimico è in grado di unire in maniera puntiforme e progressiva i singoli granelli presenti in un letto omogeneo di polvere. Una volta raggiunto il completamento di uno strato, il pezzo in lavorazione si sposta verso il basso, attraverso un movimento della piattaforma di base, per permettere la posa dello strato successivo. I granelli che non entrano in contatto con il legante rimangono sospesi all'interno della camera di stampa, vengono successivamente rimossi al termine del processo (potendo quindi essere riutilizzati per future stampe). I prodotti realizzati attraverso l'utilizzo di questa tecnologia risultano generalmente molto porosi e piuttosto fragili. Non sono quindi adatti a scopi strutturali. Tale processo, tuttavia, permette di realizzare oggetti in maniera molto più rapida ed economica rispetto ai concorrenti; i prodotti sono perciò utilizzati, ad esempio, come modelli estetici a scopo dimostrativo. I materiali lavorabili con questa tecnologia sono principalmente: materie plastiche, polimeri e metalli. Il sistema di stampa basato sulla posa progressiva di strati di polvere e legante, in aggiunta alla possibilità di trattare un elevato numero di materiali, permette un ampio numero di combinazioni. A seconda della combinazione utilizzata, si verranno a riscontrare specifiche proprietà meccaniche nel prodotto. Tali proprietà possono essere ulteriormente migliorate attraverso trattamenti post stampaggio quali, ad esempio, il raffreddamento del legante all'interno della camera di stampa. L'applicazione di questa tipologia di processi aggiuntivi comporta ovviamente un aumento dei tempi di stampa. La tecnica appena analizzata, presenta alcune similarità con quella alla base del nostro studio (BMD). Tale similitudine si viene a presentare nel momento in cui si debbano realizzare prodotti in AISI 316L, un acciaio inossidabile utilizzato nell'industria alimentare, automotive ed aerospaziale che gode di elevata resistenza in ambienti corrosivi (anche in presenza di cloruri). In questo caso i pezzi devono essere sottoposti ad un processo di sinterizzazione allo scopo di eliminare il legante presente e consolidare la struttura. L'utilizzo di questo processo garantisce tempi di produzione molto più brevi rispetto a quelli che si avrebbero adottando altre tecnologie per la lavorazione di materiali metallici.

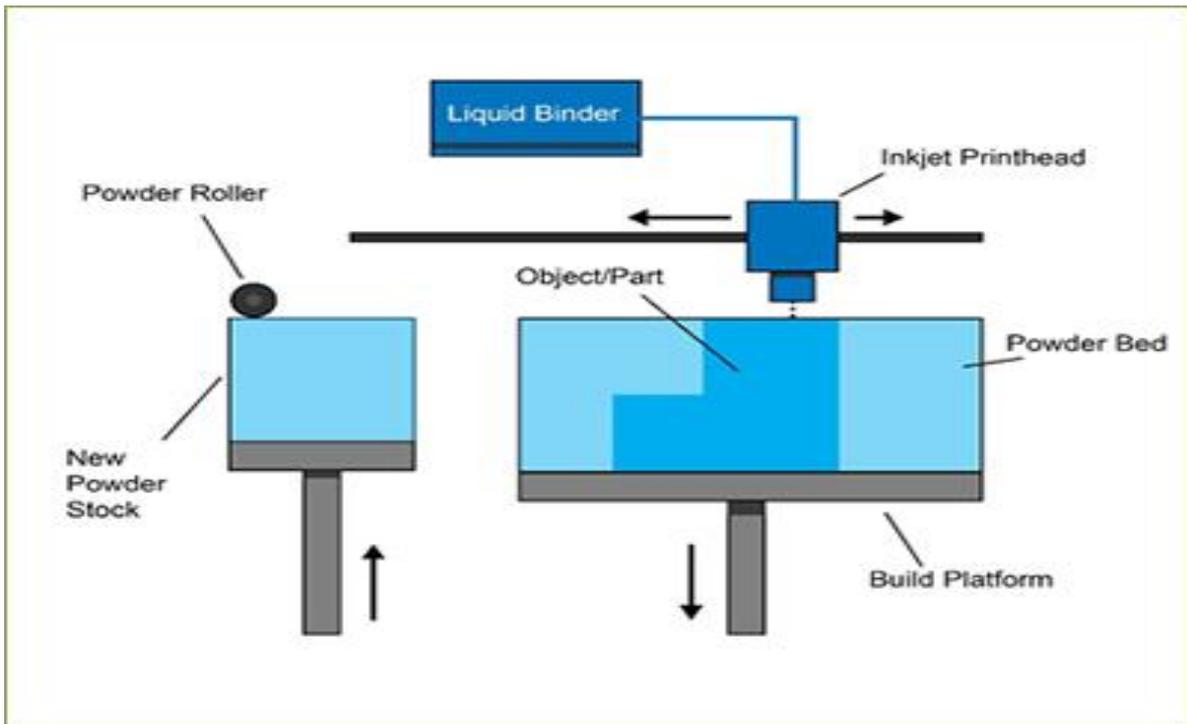


Figura 5-Schematizzazione Binder Jetting.

❖ POWDER BED FUSION (PBF):

Il processo di Power Bed Fusion prevede le seguenti tecniche di stampa:

- Selective laser sintering (SLS);
- Selective laser melting (SLM);
- Selective heat sintering (SHS);
- Direct metal laser sintering (DMLS);
- Electron beam melting (EBM).

Il principio di funzionamento di questi processi si basa sulla fusione e successiva solidificazione di un letto di polvere tramite una sorgente di energia termica. Al completamento di ogni strato la piattaforma di base si sposta verso il basso per permettere il posizionamento di un nuovo strato di polvere metallica. Il materiale non processato viene raccolto per permetterne il riutilizzo.

- La tecnologia di stampa SLS è nata alla fine degli anni '80 presso l'Università del Texas. Nelle macchine che sfruttano tale processo è possibile individuare tre principali componenti: una fonte di calore per fondere il materiale, un sistema di controllo di tale fonte e un meccanismo che aggiunge nuovo materiale sul precedente (solitamente si opta per l'utilizzo di rulli o di lame in movimento). Il fascio di un laser fisso viene direzionato attraverso uno specchio mobile, allo scopo di colpire la polvere depositata in precedenza, che subirà un processo di sinterizzazione. Durante tale processo i granelli adiacenti si legheranno attraverso interazioni molecolari, aumentando l'integrità strutturale del pezzo. Come altre tecnologie basate sulle polveri, il metodo SLS non prevede l'utilizzo di nessun supporto durante il processo. La piattaforma di base si trova ad una temperatura di pochi gradi inferiore al punto di fusione del metallo, in modo tale da facilitare la fusione dei vari layer. La camera è solitamente riempita con azoto, per prevenire fenomeni di ossidazione ed aumentare la qualità finale del pezzo. Poiché il processo si svolge a temperature elevate, al suo completamento sarà necessario attendere, anche per tempi relativamente lunghi, il completo raffreddamento del prodotto. Alcuni sensori hanno il compito di monitorare la temperatura strato per strato, allo scopo di adattare la potenza del fascio di luce che colpisce la polvere, garantendo così una migliore qualità del pezzo. Il prodotto finale, avvolto da polvere sciolta, viene quindi pulito con spazzole e aria compressa. I materiali principalmente utilizzati nel processo SLS sono: poliammide (nylon), alumide (una miscela di polvere di alluminio grigio e poliammide) e materiali simili alla gomma. I prodotti in nylon sono forti e durevoli, presentano, inoltre, una certa flessibilità, il che li rende eccellenti per incastri a scatto, staffe, clip e qualsivoglia applicazione in cui si necessita di elevate proprietà elastiche. Durante la fase di progettazione, a causa di tali proprietà, sarà necessario tenere in considerazione la suscettibilità al restringimento ed alla deformazione delle parti sottili.
- La tecnologia SLM, a confronto con SLS, risulta solitamente più veloce, seppur possieda una richiesta energetica del 10-20% superiore. Rispetto alla tecnica precedente, i singoli granelli vanno ad essere fusi in un pezzo monolitico. Inoltre, questa metodologia può essere usata solo su metalli puri (mentre la SLS è applicabile a diverse famiglie di materiali, tra cui anche alcune leghe metalliche).

- La SHS è la tecnologia che forse si discosta maggiormente rispetto alle precedenti. Infatti, tale tecnica, utilizza una testina di stampa riscaldata che va a fondere la polvere metallica, generando legami molecolari. L'uso di una testina riscaldata al posto del laser va a ridurre sia il calore che la potenza richiesta per la realizzazione del processo. Questa caratteristica, tuttavia, limita le possibilità di applicazione di tale tecnologia, vista ad esempio l'impossibilità da parte del materiale della testina di raggiungere temperature elevate. Infatti, i materiali che possono essere utilizzati sono principalmente termoplastici, ed il loro scopo è confinato alla sola realizzazione di prototipi.
- La DMLS sfrutta lo stesso processo della SLS, ma può essere impiegata unicamente per i metalli. Sarà dunque possibile lavorare materiali che trovano ampio spazio nelle applicazioni ingegneristiche, quali, ad esempio, le leghe metalliche.
- L'EBM è una tecnologia additiva che sfrutta un fascio di elettroni come fonte di energia termica. Il fascio, prima di colpire il letto di polvere, viene direzionato lungo la traiettoria impostata attraverso il passaggio fra due magneti rotanti ad anello. Sebbene tale metodologia richieda la creazione del vuoto all'interno della camera di stampa, l'EBM è in grado di produrre pezzi che possono essere messi da subito in funzione, siano essi in metalli puri o leghe. L'uso di questa tecnologia permette di ottenere prodotti con una resistenza meccanica molto elevata, grazie soprattutto a livelli di temperatura omogenei su tutto il pezzo durante il processo di stampa. Proprio questa caratteristica rende l'EBM una delle migliori tecniche da utilizzare per la realizzazione di componenti con proprietà e finitura molto elevate, destinati al settore aeronautico e medico. Un esempio applicativo di tale tecnologia può essere visto nella realizzazione di protesi all'anca. Rispetto alle lavorazioni che prevedono macchinari CNC (Controllo Numerico Computerizzato), usando l'EBM con il titanio ed uno spessore del layer di 0,1 mm, si possono ottenere migliori risultati, in un tempo molto più breve e con una riduzione dei costi fino al 35%. Per migliorare la finitura superficiale dei pezzi stampati è possibile utilizzare la Multi Jet Fusion (MJF). Tale tecnica non prevede alcun laser o fascio di elettroni, bensì l'utilizzo di agenti fondenti che vengono sparati con un getto sulla superficie del pezzo e successivamente consolidati attraverso il riscaldamento.

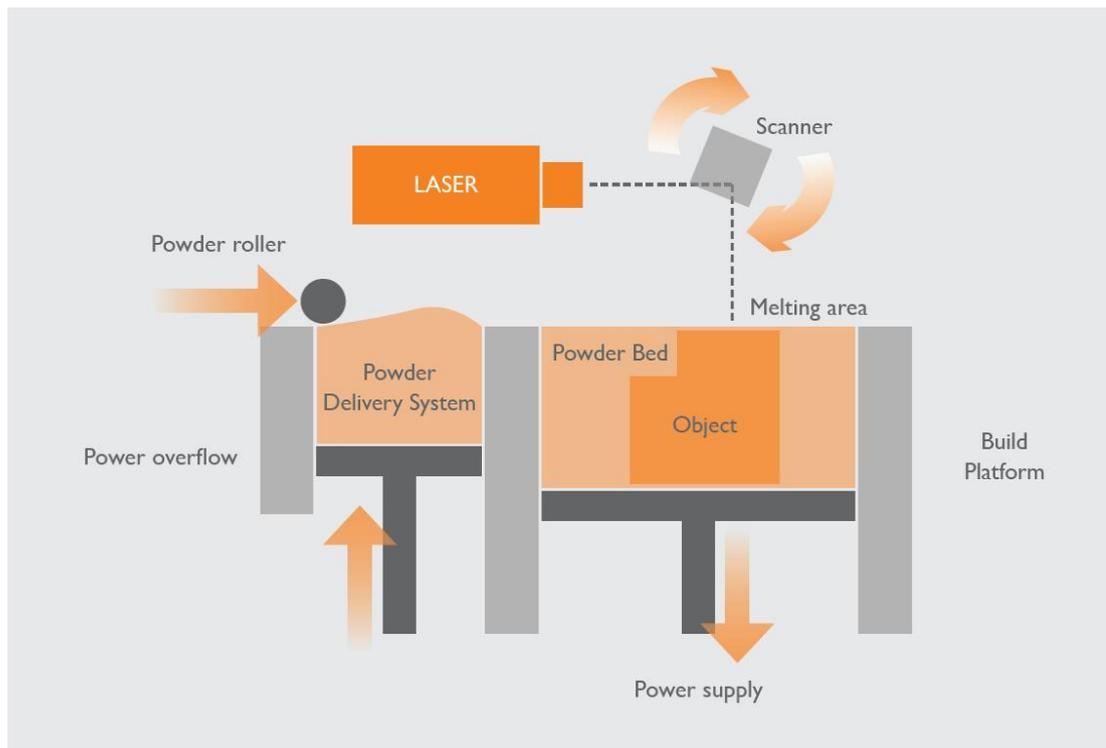


Figura 6- Schematizzazione Powder Bed Fusion.

❖ DIRECT ENERGY DEPOSITION:

La DED è considerata una dei processi di stampaggio tridimensionale più complessi. Tipicamente viene sfruttata per eseguire operazioni di riparazione o di aggiunta di materiale su componenti preesistenti; si usa molto spesso, ad esempio, nel settore industriale per la riparazione delle pale nelle turbine o nelle eliche. Non è tuttavia impossibile creare con tale tecnica componenti completi, alcune aziende, infatti, utilizzano la DED per la fabbricazione di prodotti ultraleggeri in fibra di carbonio (ma questa procedura avviene di rado). Come molte tecnologie della PBF, la DED sfrutta una fonte di energia termica concentrata, quali ad esempio laser o fascio elettronico, per far raggiungere la temperatura di fusione al materiale. La differenza sostanziale sta nel fatto che la materia prima raggiunge la condizione di fusione nel momento stesso in cui viene espulsa dall'ugello. Si può dunque asserire che, tale metodologia, rappresenta una via di mezzo tra la Material Extrusion e la Powder bed fusion. È possibile notare, inoltre, che a volte ci si riferisce alla DED come Laser Engineered Net Shaping (LENS), Direct Metal Deposition (DMD), Electron Beam Additive Manufacturing (EBAM), etc. a seconda della specifica applicazione. Come in ogni altra tecnologia AM si parte da un modello CAD realizzato dal progettista che successivamente viene tagliato tramite un software di slicing, permettendo così alla macchina di leggere il file ed iniziare la lavorazione. Il materiale metallico è depositato sulla base o sulla superficie da riparare attraverso

un ugello, a sua volta montato su un braccio meccanico multi-asse. La materia prima che alimenta l'ugello può essere fornita sia sotto forma di filamento che di polvere (in questo caso si avranno sprechi maggiori e occorrerà un gas inerte in pressione affinché esca dall'ugello). Appena il materiale è depositato, una fonte di calore lo manda immediatamente a fusione; solitamente si opta per un laser, un fascio di elettroni o un arco al plasma. Tale procedura è effettuata in maniera continuativa fino al completamento della riparazione. Nel caso venga utilizzato un fascio elettronico, il processo deve essere realizzato generando il vuoto all'interno della camera di stampa, allo scopo di prevenire che gli elettroni interagiscano o vengano deviati dalle molecole presenti nell'aria. Se si lavora invece con sistemi laser occorrerà una camera inerte per evitare reazioni di ossidazione, si necessiterà quindi di un'elevata quantità di gas per avere livelli di ossigeno sufficientemente bassi. Questa tecnologia è principalmente utilizzata con i metalli (infatti, ogni metallo saldabile si presta alla DED), tuttavia è possibile lavorare anche polimeri e materiali ceramici.

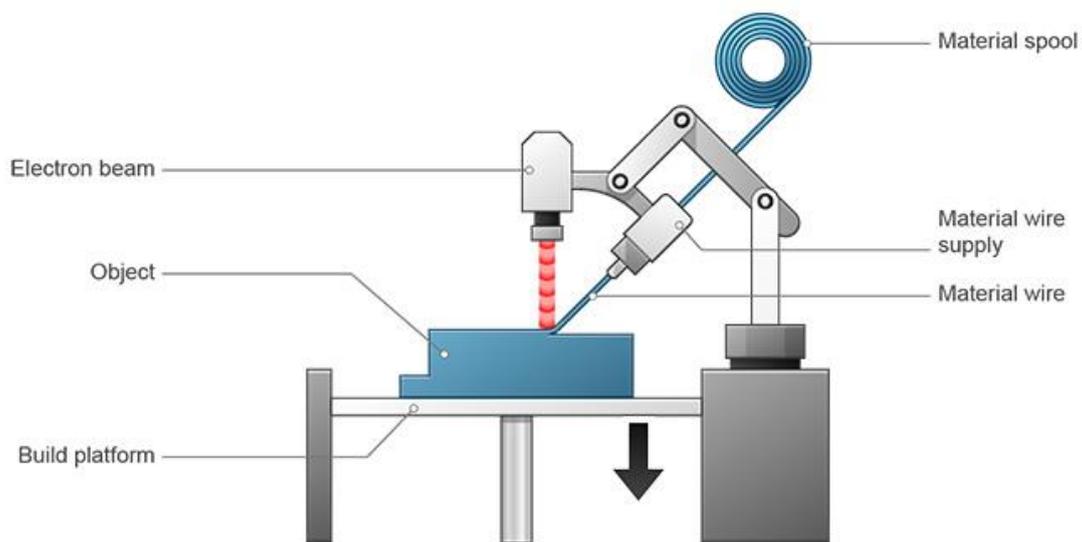


Figura 7-Schematizzazione Direct Energy 2Deposition.

❖ SHEET LAMINATION:

I processi di sheet lamination includono: l'ultrasonic additive manufacturing (UAM) e la laminated object manufacturing (LOM). L' UAM usa lamine o nastri di metallo che vengono legati tra loro usando una saldatura ad ultrasuoni. Il processo richiede successive lavorazioni alle macchine a controllo numerico e la rimozione del materiale non legato. Spesso tale processo è effettuato contemporaneamente alla saldatura. La LOM adotta un approccio strato su strato simile a quello dell'UAM, ma usa come materiale di base la carta, e agenti adesivi al posto della saldatura. La LOM prevede una deposizione ad incrocio, al fine di facilitare la rimozione. Gli oggetti ottenuti sono spesso utilizzati come modelli visivi ed estetici, non destinati quindi ad un uso strutturale. I metalli usati nella UAM includono: alluminio, rame, acciaio inossidabile e titanio. Il processo di stampa si svolge a basse temperature e permette la creazione di particolari geometrie interne, tagliando lamine prima che esse vengano posizionate attraverso lame o laser. Si possono saldare materiali differenti e l'energia richiesta non è elevata, il metallo dunque non raggiunge la condizione di fusione.

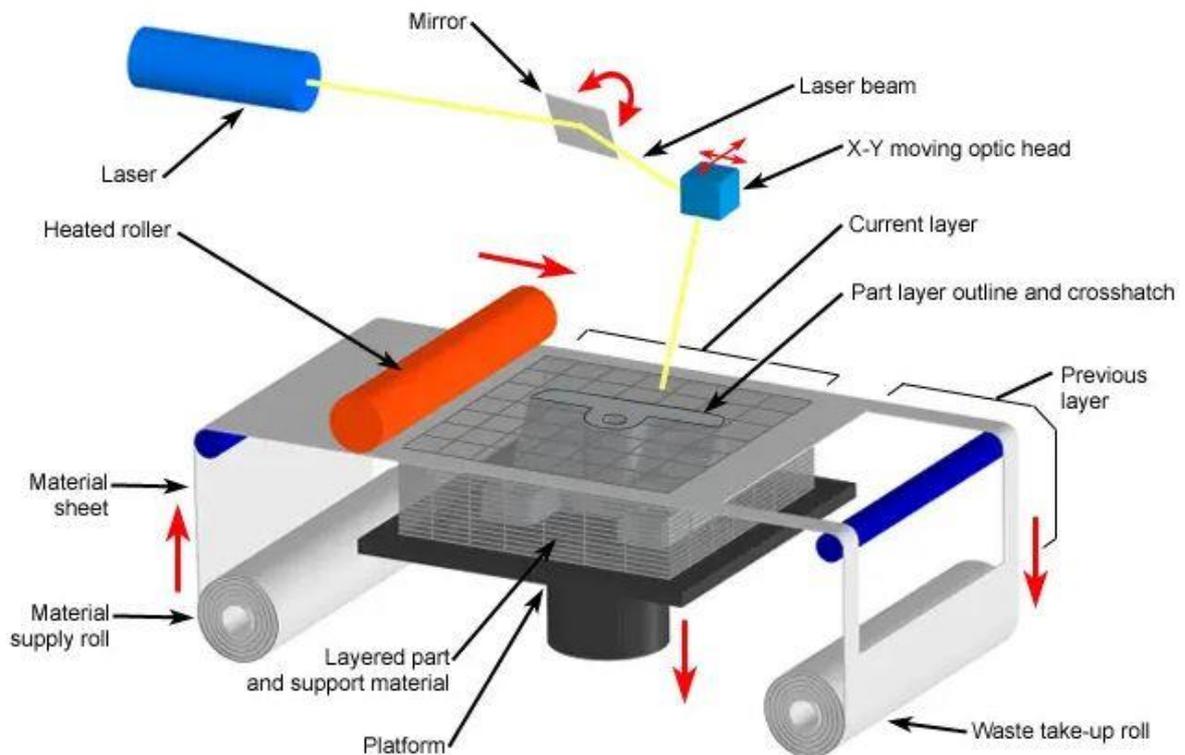


Figura 8-Schematizzazione Sheet Lamination.

1.4. Bound Metal Deposition:

La bound metal deposition (BMD) è una tecnica ad estrusione di materiale che permette la generazione di prodotti metallici. La sua paternità è da attribuirsi all'azienda statunitense Desktop Metal; la quale, nel 2015, ha immesso sul mercato la stampante Studio System (che utilizza per la lavorazione proprio la tecnica in questione). La BMD è definibile come un processo multistadio, composto da tre fasi successive:

- 1) STAMPA;
- 2) DEBINDING;
- 3) SINTERIZZAZIONE.

Si procede ora ad un'analisi dettagliata delle varie fasi del processo.

Il processo di stampa parte con la generazione di un modello CAD raffigurante la geometria del prodotto da realizzare. Successivamente, il file tridimensionale viene convertito in un modello mesh del tipo .STL, all'interno del quale il pezzo viene visto come un insieme di superfici chiuse. Questa trasformazione si rende necessaria poiché, in questo modo, il file può essere utilizzato come input da inviare attraverso un cloud al software di gestione del processo di stampa fornito dalla Desktop Metal. Il software in questione è chiamato DM Fabricate. Questo programma permette all'operatore di variare i parametri di stampa, come, ad esempio, l'orientazione del filamento e l'altezza del layer, in base alle specifiche richieste da progetto. Una volta definiti tutti i valori desiderati dei parametri, il software traduce le informazioni geometriche in istruzioni da fornire alla macchina in formato .gcode. DM Fabricate è l'elemento di maggiore importanza in tutto il processo, infatti, permette la comunicazione fra tutti i macchinari che compongono la stampante Studio System. È inoltre in grado di fornire delle previsioni riguardanti le tempistiche di processo a seconda del prodotto da realizzare e dei parametri di stampa scelti. Una volta terminato il processo di conversione e definizione dei parametri, il file viene trasferito attraverso cloud alla stampante, che lo metterà in coda. Sarà poi compito dell'operatore selezionare lo specifico "job" da mettere in lavorazione.

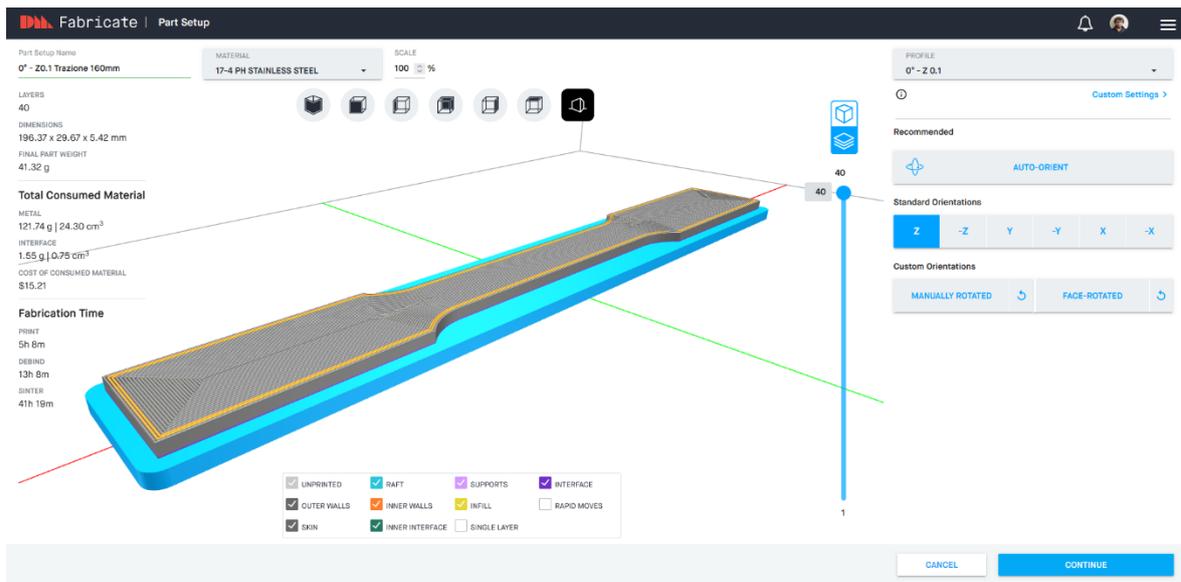


Figura 9- Schermata Fabricate per la generazione di provini per prova di trazione.

Prima dell'effettivo inizio del processo di stampa sarà necessario effettuare dei controlli, allo scopo di garantire un corretto svolgimento della lavorazione. Come esempio è possibile annoverare il controllo delle cartucce, che devono essere inserite all'interno di appositi alloggiamenti situati sulla parte superiore della stampante. Le cartucce vengono fornite direttamente dall'azienda; al loro interno sono presenti barrette costituite da polvere di materiale metallico in sospensione all'interno di un legante di natura ceramica e/o polimerica (nel nostro caso di studio si avrà polvere di 17-4 PH in sospensione all'interno di un legante). Risulterà in aggiunta necessario controllare le cartucce con all'interno materiale ceramico, le quali riforniranno un secondo estrusore. Questo materiale verrà impiegato per la generazione di un'interfaccia di separazione tra il primo layer ed il supporto metallico, allo scopo di facilitare il distacco del pezzo al termine del processo di sinterizzazione. Il processo di sostituzione delle cartucce risulta rapido ed agevole, può anche essere svolto durante la lavorazione, il che rappresenta un'innovazione rispetto alle altre tecnologie presenti. L'operatore dovrà inoltre selezionare e montare estrusori della dimensione adeguata, a seconda delle specifiche di progetto. Ad ogni specifico estrusore è infatti associata una determinata larghezza del layer, che è uno dei parametri di stampa fondamentali da tenere sotto controllo durante il processo. Nel caso in cui la dimensione dell'estrusore non garantisca la larghezza richiesta, la macchina segnalerà tempestivamente un'anomalia, rendendo impossibile procedere con la lavorazione. Prima di procedere con l'effettivo processo di stampa, il macchinario provvederà autonomamente alla pulizia delle punte degli estrusori, mediante delle setole posizionate ai lati della camera. Sarà necessario, inoltre, svolgere un processo di calibrazione della macchina, con stampaggio di scale graduate necessarie per il livellamento del piano di stampa. Per quanto riguarda

l'effettiva meccanica di funzionamento della macchina, gli estrusori traslano all' interno della camera di stampa attraverso un sistema a vite senza fine, messo in movimento da un sistema elettrico. Le punte degli stessi vengono riscaldate per induzione, fino al raggiungimento della temperatura di stampa prevista da progetto. Per ogni lavorazione (anche per il processo di calibrazione) sarà necessario disporre sulla piattaforma di base un apposito supporto (solitamente viene utilizzato un piano di materiale polimerico), il quale corrisponderà all'effettivo letto di stampa su cui verrà depositato il materiale. Verrà inoltre generato il vuoto, fra il letto di stampa e la piattaforma di base, prima dell'inizio del processo. La stampa inizia con la deposizione di uno o più strati di materiale metallico sul letto di stampa da parte del primo estrusore; questo processo mi permette di generare l'effettivo supporto su cui verrà stampato il pezzo. Successivamente entra in gioco il secondo estrusore, il quale deposita uno strato di materiale ceramico sul supporto metallico, allo scopo di facilitare il distacco del pezzo dal supporto stesso dopo il processo di sinterizzazione. Una volta completata questa fase, si procede con la posa del primo layer di materiale metallico. Al completamento del processo viene eliminato il vuoto, rendendo così possibile la separazione del letto dalla piattaforma di base. Una volta estratto dalla camera di stampa, sarà necessario distaccare il prodotto (unito al supporto metallico) dal letto di stampa. Questa operazione deve essere svolta con la massima cura, un distacco svolto in maniera approssimativa potrebbe portare allo sviluppo di una superficie non omogenea sul pezzo. Tali irregolarità verranno ancor più accentuate dopo il processo di sinterizzazione e potrebbero comportare un peggioramento, oltre che della finitura superficiale, anche delle proprietà meccaniche del prodotto.

Completata questa fase, si procede con dei trattamenti post-stampa quali pulitura superficiale mediante carta abrasiva o sabbiatura, a seconda della finitura superficiale richiesta da progetto. Lo scopo di queste lavorazioni è quello di andare ad eliminare l'impronta del filamento al fine di rendere la superficie il più omogenea possibile. Risulta necessario svolgerle a questo punto del processo di lavorazione poiché il materiale metallico si trova ancora sotto forma di polvere, non gode quindi di proprietà meccaniche e strutturali elevate (il pezzo, infatti, dovrà essere maneggiato con molta cura per prevenire fratture o scheggiature). Se si decidesse di svolgere tali trattamenti di finitura al termine del processo di sinterizzazione la lavorazione risulterebbe molto più lunga e dispendiosa.

Completata la fase di stampa, con annesse operazioni post-stampaggio, il pezzo viene adagiato all'interno di un apposito cestello per essere sottoposto al processo di debinding. Il macchinario

destinato allo svolgimento di tale lavorazione viene denominato “debinder”, risulta avere una struttura simile ad una vasca ed è in grado di essere chiuso ermeticamente. Il cestello viene inserito all’interno del macchinario e si procede con il trattamento (una volta isolato il sistema). La camera principale viene riempita, partendo dal basso, da un particolare solvente, avente lo scopo di sciogliere il legante che tiene aggregate le polveri. Il fine ultimo di questa lavorazione è, dunque, quello di rimuovere il più possibile la componente formata da resina, lasciando solamente la polvere metallica. Il processo di debinding può avere una durata variabile, in base alla quantità di materiale che viene inserito all’interno della macchina. Il cestello, infatti, permette di caricare più componenti alla volta, molti più di quelli che la stampante è in grado di realizzare contemporaneamente. Per questo studio, basato sull’utilizzo di provini da sottoporre a prova di trazione, il ciclo di debinding, infatti, è stato effettuato una sola volta per ogni lotto di provini realizzati in differenti cicli di stampa. Sono state necessarie diverse operazioni di stampaggio a causa della discrepanza dei parametri di processo impostati. Al termine del processo di debinding, i pezzi risultano ancora particolarmente fragili e devono essere maneggiati con cura. La lavorazione non è in grado di andare ad eliminare completamente la resina presente nel pezzo, sarà dunque necessario sottoporre il prodotto ad un trattamento di sinterizzazione.

I pezzi debinderizzati vengono accuratamente rimossi dal cestello e posizionati su ripiani sovrapposti in carbonio, prima di essere inseriti nel forno di sinterizzazione. Il processo di sinterizzazione garantisce il consolidamento delle polveri metalliche, con conseguente aumento di proprietà meccaniche e strutturali. La durata del processo di cottura e la temperatura da mantenere all’interno del forno variano al variare del materiale trattato e del numero di pezzi posizionati, nel nostro caso si raggiungerà la temperatura di 1400°C per una durata di circa 40 ore. Una volta che il forno viene richiuso, avendo cura che i diversi ripiani non siano in contatto con le resistenze, viene generato il vuoto all’interno della camera; in quanto il processo di sinterizzazione deve avvenire in un ambiente controllato. Proprio a questo scopo, viene fatto circolare un gas inerte, nel nostro caso Argon al 97%. Al termine del trattamento, i pezzi vengono rimossi dal forno e si provvede alla separazione degli stessi dal supporto metallico che era stato generato in fase di stampa. Questa procedura risulta semplificata grazie alla preventiva disposizione di uno strato di materiale ceramico fra modello e supporto, allo scopo di favorire il distacco fra le due sezioni al termine della sinterizzazione.



Figura 10- Macchinari componenti la Studio System, in ordine: Stampante, Debinder, Forno per la Sinterizzazione.

La tecnologia Studio System rappresenta quindi una grande innovazione nel campo delle lavorazioni additive. All'interno del programma Fabricate è possibile reperire già in partenza un ampio catalogo di file pronti per la stampa, sarà inoltre possibile aggiungerne dei nuovi o modificare i parametri di quelli presenti. Il processo di debinding non richiede di essere svolto in ambienti ventilati, vista la ricerca della Desktop Metal di un design che limiti le emissioni di sostanza nocive per gli operatori. Il refill del solvente al termine di ogni ciclo non risulta essere necessario poiché la macchina è dotata di un sistema per la distillazione ed il riciclo dello stesso. Al termine del trattamento, il debinder procede all'asciugatura del pezzo. Ciò garantisce la completa sicurezza dell'operatore, che dunque non entrerà mai in contatto con il liquido. Tutte le peculiarità sopra indicate, unite alle dimensioni ridotte dei macchinari, rendono questa tecnologia fruibile ad un gran numero di possibili utilizzatori. La nuova frontiera di questa tecnica sta proprio nel fatto di andare a scegliere dei parametri di stampa tali da garantire delle proprietà meccaniche paragonabili a quelle possedute da componenti, aventi la stessa geometria o la stessa destinazione finale, generati con le tecniche tradizionali.

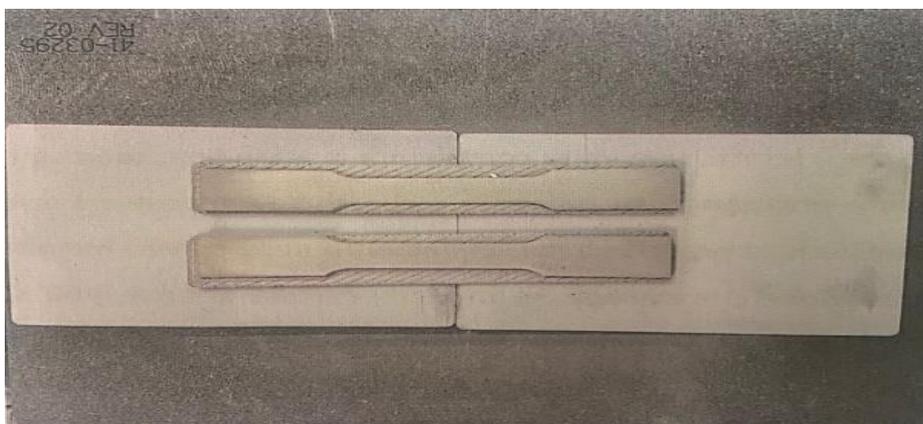


Figura 11- provini per prova di trazione prodotti attraverso BMD.

CAPITOLO 2

Parametri di stampa nella BMD:

Nel precedente capitolo, attraverso l'analisi delle varie tecnologie AM, ci si è limitati a definire come mutano le caratteristiche di un prodotto al variare del processo adottato (siano esse proprietà meccaniche/strutturali o anche la finitura superficiale). Tuttavia, si nota, che tali caratteristiche possono subire enormi variazioni anche andando ad usufruire della stessa tipologia di lavorazione; basterà andare a variare adeguatamente i parametri di stampa. In questo studio ci si concentrerà maggiormente sull'effetto che la variazione dei parametri di stampa provoca sulle proprietà meccaniche del materiale. Si ricorda infatti l'obiettivo della trattazione: verificare la possibilità che componenti (nel caso specifico provini da sottoporre a prova di trazione) generati con la tecnica della Bound Metal Deposition garantiscano proprietà meccaniche simili a quelle degli stessi prodotti realizzati con tecniche tradizionali. Risulta dunque necessario andare a definire i principali parametri di stampa nella BMD, per essere in grado di comprendere e prevedere i mutamenti, a livello di proprietà meccaniche, che la variazione degli stessi provocherà sui componenti in studio.

Si fornisce ora un elenco dei principali parametri di processo che possono subire variazioni nella Bound Metal Deposition:

- LARGHEZZA DEL FILAMENTO;
- ORIENTAZIONE DEL FILAMENTO;
- DIREZIONE DI CRESCITA NEL PIANO;
- SPESSORE DEL LAYER;
- AIR GAP;
- TEMPERATURA DI ESTRUSIONE E DEL LETTO DI STAMPA;
- VELOCITA' DI ESTRUSIONE;

Nella figura seguente sono presentati alcuni dei parametri di stampa sopra elencati, allo scopo di facilitarne la comprensione. Si procederà successivamente con una specifica trattazione dei singoli parametri, analizzando gli effetti che una loro variazione genera sulle proprietà, meccaniche e non, del prodotto stampato.

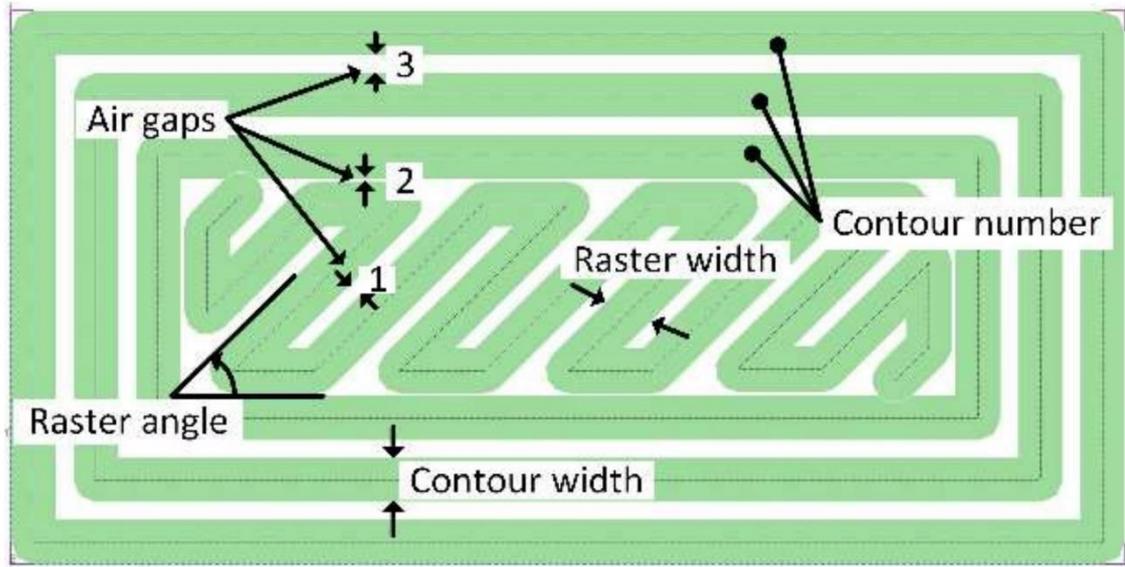


Figura 12-Esempi di parametri di stampa in un processo di Additive Manufacturing.

2.1. Larghezza del filamento:

La larghezza del filamento che viene depositato durante il processo di stampa, raster width, dipende dalle dimensioni della testa dell'estrusore. In particolare, tale parametro risulta legato al diametro del foro attraverso il quale avviene l'estrusione del materiale, e dal numero di passate necessarie per il completamento del processo. La larghezza del filamento non risulta godere di una particolare influenza sulle proprietà meccaniche possedute dal pezzo; al contrario è determinante per quanto riguarda la qualità estetica ed i tempi di processo. È facile notare che filamenti più sottili portino ad una migliore qualità superficiale del pezzo. Tuttavia, i tempi di lavorazione saranno considerevolmente più elevati poiché, a parità di superficie da coprire, l'ugello dovrà compiere più passate.

2.2. Orientazione del filamento:

Nel processo di stampa mediante tecnologia BMD, le prime zone in cui viene depositato il filamento (che si ricorda essere composto da una resina formata da polvere metallica in sospensione all'

interno di un legante) sono quelle che costituiscono il bordo del pezzo nel piano di deposizione. Tale procedura viene attuata allo scopo di evitare eventuali fuoriuscite di materiale una volta depositato all'interno della figura. Completato il bordo, si procede con il riempimento della sezione secondo l'architettura definita dall'utente in fase di progettazione, attraverso il software Fabricate. Infine, una volta terminata questa fase di lavorazione, si passerà alla realizzazione dello strato successivo. Il procedimento sopra descritto viene rappresentato in maniera schematica dalla seguente figura.

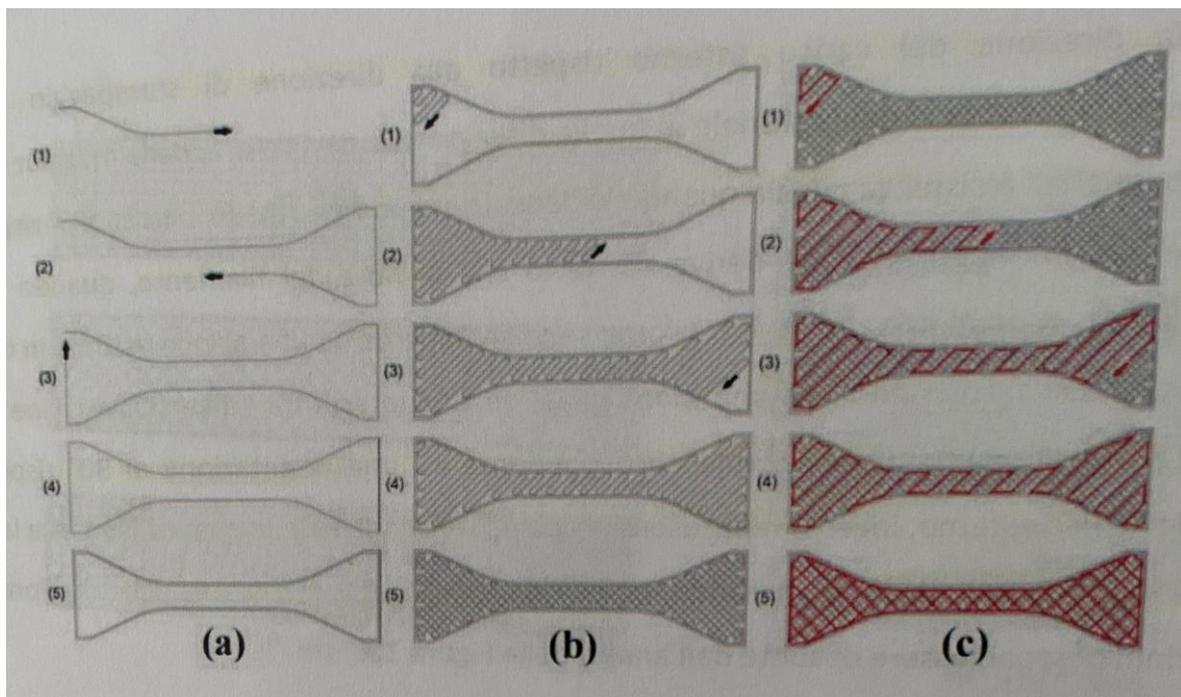


Figura 13-Rappresentazione dei passaggi essenziali della disposizione di materiale durante il processo di stampa: deposizione del contorno (a), riempimento del contorno (b), deposizione degli strati successivi (c).

L'architettura interna del prodotto viene definita mediante l'orientazione del filamento depositato, raster angle, un parametro che rappresenta l'angolo che il filo estruso forma rispetto ad un asse di riferimento. Generalmente può assumere valori compresi fra 0° e 90° . Nella pratica comune il pezzo viene prodotto con un'architettura regolare, ad esempio andando ad alternare strati a $+45^\circ/-45^\circ$. Questo parametro influenza in maniera significativa la resistenza a trazione del prodotto, in quanto la direzionalità del processo di deposizione e crescita tipico di questa tecnologia non fa altro che causare anisotropia nelle proprietà meccaniche del pezzo stampato. Per anisotropia si intende una caratteristica, posseduta da alcuni enti fisici, secondo cui il valore di determinate proprietà (come

ad esempio durezza, resistenza a fatica, resistenza a trazione/compressione...) varia a seconda della direzione lungo la quale vengono misurate.

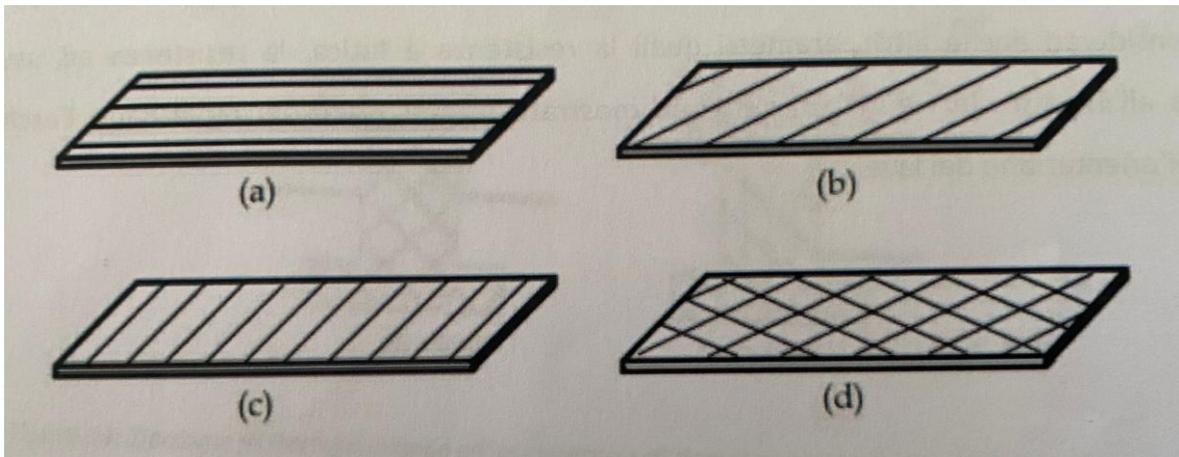


Figura 14-Illustrazione delle possibili orientazioni: orientazione di 0° (a), di 45° (b), di 90° (c), di $+45^\circ/-45^\circ$ (d).

È possibile infatti verificare, che la direzione di applicazione del carico esterno, rispetto a quella utilizzata per lo stampaggio, influenza particolarmente la resistenza del materiale. Nello specifico, nella maggior parte dei casi, è possibile riscontrare valori di resistenza più alti quando la deposizione avviene ad un angolo di 0° rispetto alla direzione di carico. La spiegazione deriva dal fatto che le fibre del filamento, quando vengono ad esempio sottoposte ad una prova di trazione, risultano soggette ad un'azione esterna in direzione longitudinale; ciò fa sì che non si pervenga ad una modifica dei legami interni fra i diversi layer, non si verificherà quindi una condizione di scollamento. La situazione corrispondente ad un'orientazione di 90° rispetto alla direzione del carico esterno rappresenta, invece, la peggiore condizione possibile, in quanto favorisce la rottura dei legami fra i singoli layer. Ciò comporterà un netto peggioramento delle proprietà meccaniche. È possibile verificare la validità delle precedenti considerazioni con l'analisi della seguente schematizzazione.

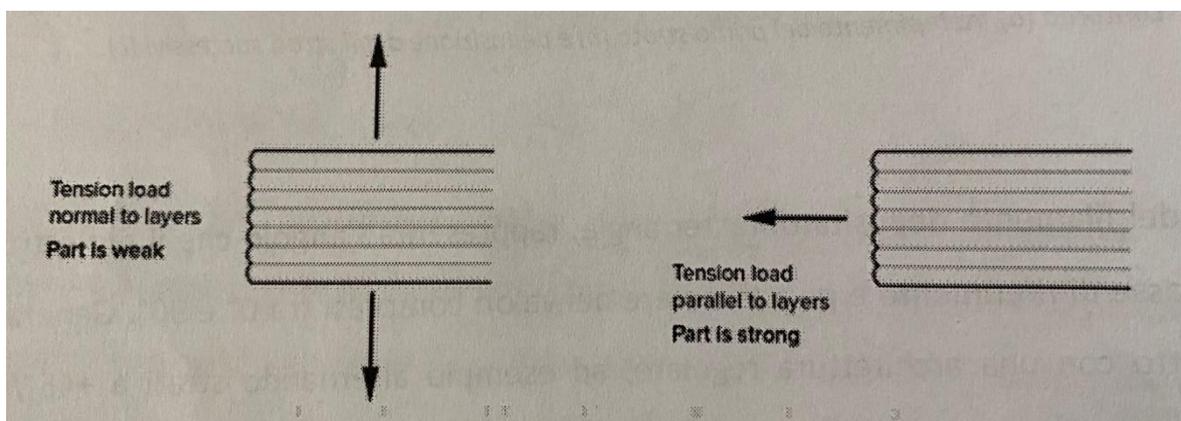


Figura 15-Direzioni del carico esterno rispetto all'orientazione del layer.

Nella pratica costruttiva si preferisce solitamente adottare l'orientazione $+45^\circ/-45^\circ$, allo scopo di garantire al materiale un comportamento più isotropo possibile, in quanto, oltre alla resistenza meccanica, devono essere considerati anche altri parametri, quali: resistenza a fatica, resistenza ad usura e resistenza all'impatto.

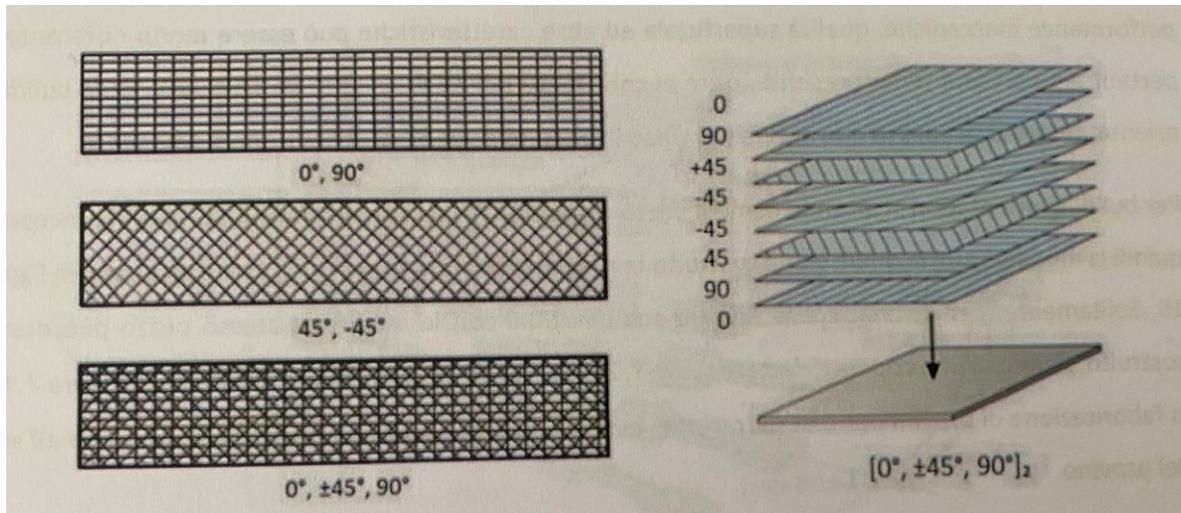


Figura 16-Diverse architetture di riempimento ottenute alternando strati con valore diverso di raster angle.

È opportuno, infine, specificare che la scelta dell'orientazione del filamento influenza anche la tipologia di superficie di frattura del componente, la quale si verrà a verificare lungo l'interfaccia fra due sezioni del pezzo, oppure per rottura dei filamenti stessi. Di quest'ultimo aspetto sarà svolta un'analisi più approfondita nel successivo capitolo, dedicato ai materiali e procedure sperimentali.

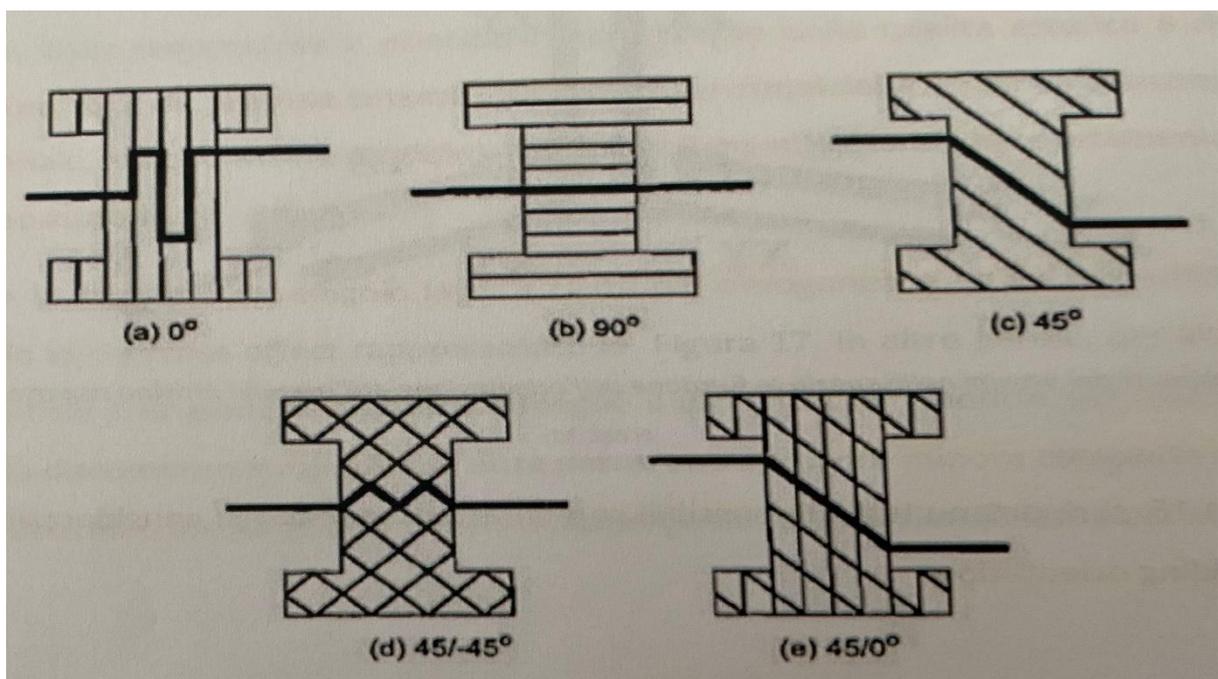


Figura 17-Tipologie di frattura in base all'architettura di riempimento ed ai valori del raster angle.

2.3. Direzione di crescita nel piano:

In una tecnica come la BMD, che realizza prodotti mediante la deposizione di un filamento, le modalità attraverso cui generare lo stesso pezzo sono molteplici. Dunque, il risultato finale, in termini di performance meccaniche, finitura superficiale ed altre caratteristiche, può essere molto differente. Risulta pertanto fondamentale tenere presente, oltre al contributo del raster angle, anche quello della direzione di crescita nel piano del prodotto (building orientation). È consuetudine, infatti, andare a considerare questi parametri contemporaneamente in fase di progettazione. Con il termine building orientation si intende la modalità con cui il pezzo viene posizionato sulla piattaforma durante il processo di stampa; quindi, la modalità con la quale viene costruito in riferimento ai tre assi cartesiani X, Y, Z. Solitamente, per distinguere le diverse combinazioni con le quali uno stesso pezzo può essere costruito, si utilizza una coppia di lettere fra X, Y, Z. Seguendo tale nomenclatura, la prima lettera rappresenta la retta cartesiana con direzione parallela all'asse del provino, mentre la seconda identifica, insieme al primo carattere, il piano in cui è contenuto il provino. In alternativa si potrebbe optare per la scelta di un piano di riferimento, solitamente coincidente con il piano di stampa, ed indicare l'angolo che l'asse del provino forma col piano di riferimento. In figura si riportano tutte le possibili combinazioni, tenendo conto sia del raster angle che della build orientation.

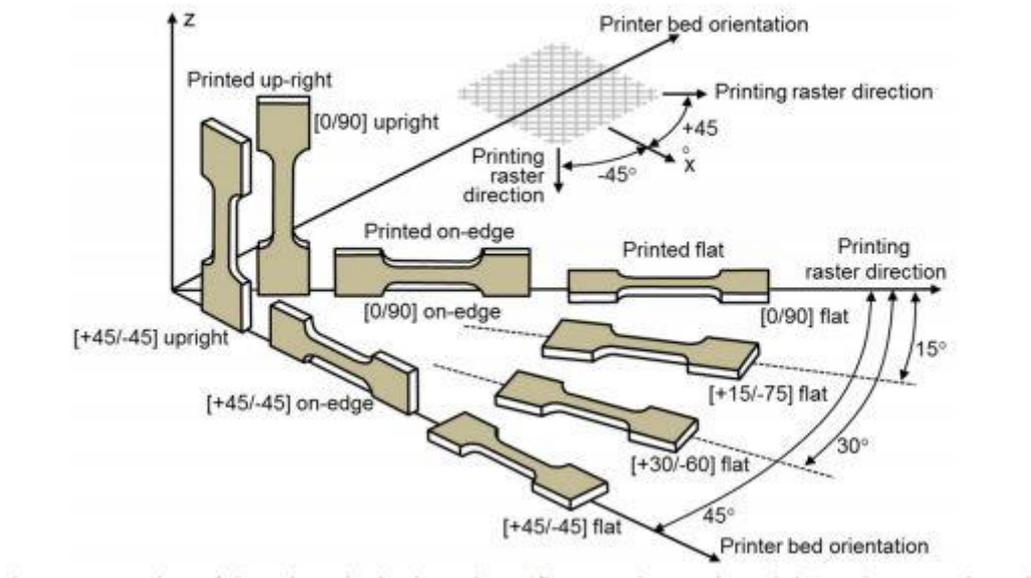


Figura 18-Rappresentazione delle orientazioni di crescita.

2.4. Spessore del layer:

Lo spessore dei layer, o layer thickness, rappresenta il parametro principale che influenza la qualità estetica e la finitura superficiale del prodotto. Esso dipende innanzitutto dalle dimensioni della testa dell'estrusore ed in parte dal tipo di materiale, ma può essere parzialmente controllato impostando lo spostamento in direzione Z del letto di deposizione in fase di stampa. Tanto minore è lo spessore del singolo layer, tanto più omogenea risulta la superficie laterale del pezzo, limitando lo staircase effect. Per staircase effect, si intende la riproduzione scorretta di una superficie piana o conica, dovuta al fatto che il processo di stampa è basato sulla posa di strati successivi di materiale. Pertanto, la superficie esterna del pezzo presenterà una struttura a scalini, come mostrato in figura.

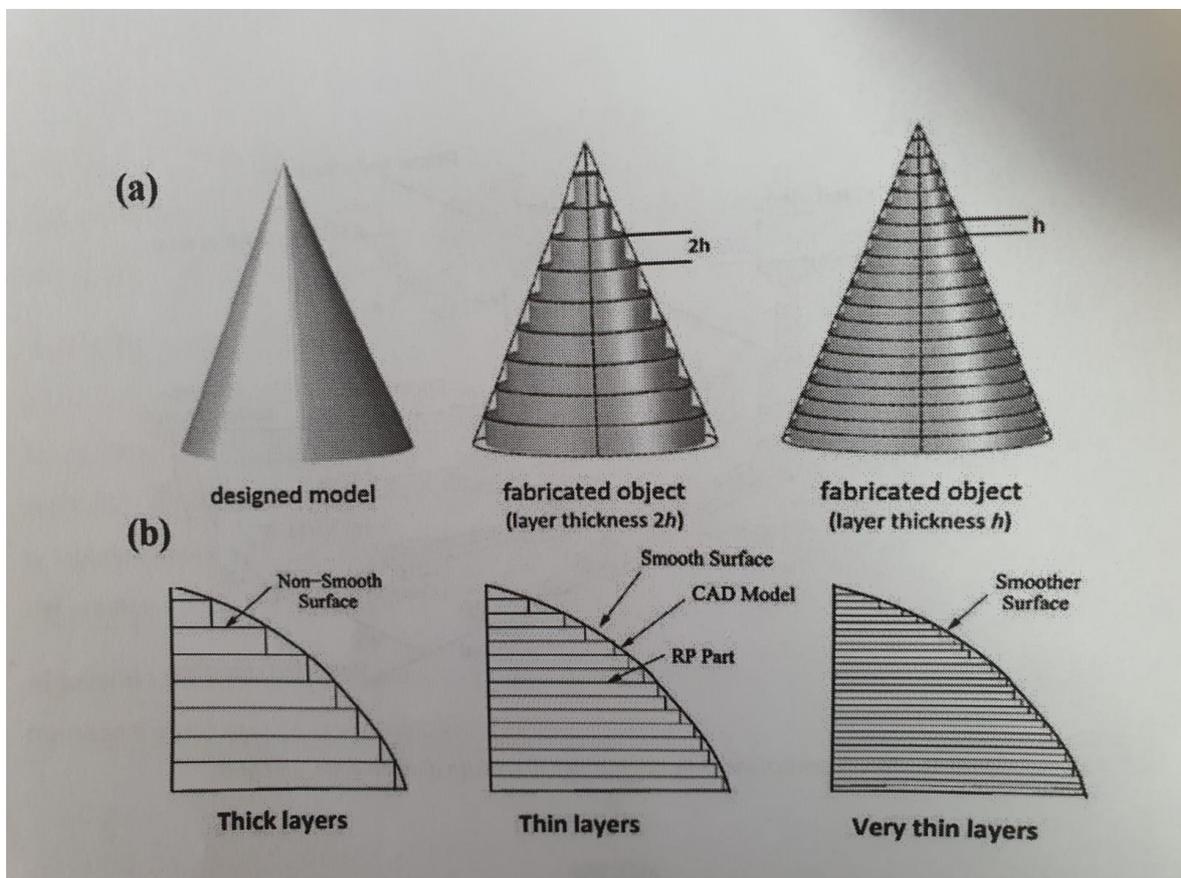


Figura 19-Effetto del numero di strati depositati e del layer thickness sulla riproducibilità di superfici piane (b) e curve (a).

Riassumendo quindi: per altezze del layer minori, la stampante è in grado di riprodurre superfici che si avvicinano il più possibile al modello CAD, mentre per altezze maggiori la superficie risulta discontinua e a gradini. D'altra parte, uno spessore minore comporta un incremento dei tempi di costruzione (building time), che risultano quindi proporzionalmente più elevati. Nel caso di geometrie più complesse di quelle planari, un giusto compromesso per evitare questi difetti, ed

avere comunque dei building time accettabili, è adottare un approccio definito come adaptive slicing. Esso consiste nell'utilizzo di layer thickness variabili con la curvatura (solitamente si utilizzano strati più sottili nelle zone più curve, viceversa strati più spessi saranno utilizzati per quelle più planari). Queste considerazioni permettono di capire, quindi, come l'ottimizzazione dei parametri di processo necessiti di un giusto compromesso delle variabili in gioco, in questo caso tra building time e qualità del pezzo. L'effetto dello staircase può verificarsi, tuttavia, anche durante il processo di conversione del file CAD in STL, cioè durante l'operazione di tessellation (meshatura durante la creazione del file STL). L'approssimazione del modello CAD durante la tessellation può condurre ad allontanamenti di forma dal modello originale ed all'effetto staircase, il quale può essere compensato solo correggendo il layer thickness ed orientando il prodotto in maniera ottimale durante la fabbricazione. L'effetto staircase potrebbe condurre sia ad un eccesso di materiale depositato, che ad una quantità in difetto rispetto al pezzo progettato in origine. Oltre ai motivi estetici, la qualità superficiale e la rugosità influenzano direttamente le proprietà ad usura dell'oggetto. L'aumentare del layer thickness riduce inevitabilmente la resistenza ad usura, non solo perché si osserva un aumento della rugosità ma anche perché, un minor numero di strati, comporta un numero minore di step di rifusione. Nel momento in cui uno strato è depositato, si verifica infatti una rifusione locale dello strato inferiore, che favorisce un'unione più solida ed intima tra i vari layer. L'aumento del numero di strati comporta la formazione, lungo la direzione di crescita del pezzo, di un maggior numero di solidi legami interfacciali e favorisce la riduzione dei vuoti tra uno strato e l'altro. Ciò permette di ottenere un pezzo denso e coeso. Il risultato è un prodotto con migliori proprietà meccaniche ed un'interfaccia più dura e resistente all'usura. All'aumentare dello spessore degli strati, si vanno ad accentuare maggiormente i fenomeni di distorsione termica a discapito dei fenomeni sopra descritti, con una tendenza maggiore alla presenza dei vuoti, a legami interfacciali deboli e quindi ad una minore resistenza all'usura. Tutte le precedenti considerazioni permettono di concludere che layer più sottili portano all'ottenimento di migliori proprietà meccaniche grazie alla diminuzione del numero delle porosità.

2.5. Air gap:

Per air gap si intende la distanza fra due filamenti adiacenti in uno stesso layer; è il parametro che incide maggiormente sulle proprietà meccaniche e la porosità interna del pezzo. Quest'ultima caratteristica può essere tenuta sotto controllo, al fine di ottenere una struttura più densa, a discapito però della velocità di produzione. L'air gap, insieme al raster angle ed al layer thickness, come sopra indicato, ha effetti sulle proprietà meccaniche e sulla velocità d'usura (wear rate) del manufatto stampato. Tali considerazioni sono riportate nella figura sottostante.

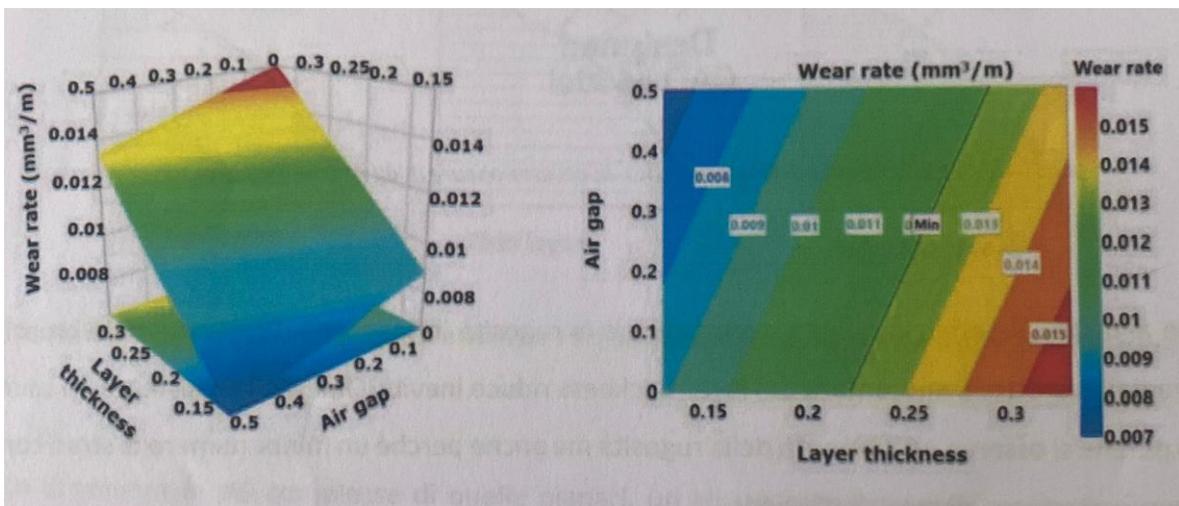


Figura 20- Dipendenza della velocità di usura dal layer thickness e dall'air gap.

L'air gap risulta comunque essere un parametro che dipende in maniera diretta da altri aspetti quali, ad esempio, il modello del pezzo e la densità di riempimento. La percentuale e la forma del riempimento saranno scelte in base a diversi aspetti: peso totale del pezzo, materiale utilizzato per la stampa, resistenza meccanica richiesta ed eventuali decorazioni (ove previste). In generale è possibile affermare che, maggiore è la percentuale di riempimento (infill), maggiore sarà la resistenza meccanica del pezzo. Non sarà tuttavia da trascurare l'aumento della durata dei tempi di lavorazione. Nella pratica costruttiva è possibile ricorrere a diversi modelli di riempimento, utilizzati per l'appunto come forme riempitive delle parti interne del manufatto. Tra quelle che trovano maggior applicazione si annovera la riempitura ad honeycomb, che garantisce allo stesso tempo leggerezza ed un'ottima resistenza, soprattutto a carichi di compressione in direzione ortogonale al piano.

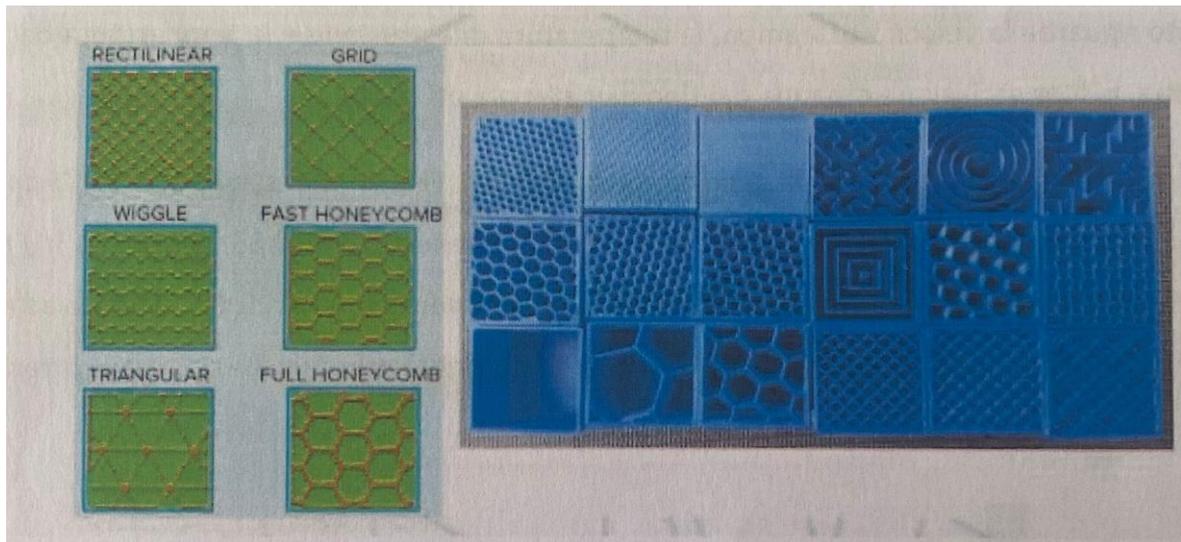


Figura 21-Differenti modelli di riempimento.

2.6. Ulteriori parametri di processo:

Senza dubbio i parametri fin qui citati non rappresentano la totalità delle variabili presenti all'interno del processo di stampa. Tuttavia, ai fini dello studio della tecnologia BMD, risultano i più influenti e significativi per quanto riguarda le proprietà meccaniche e la finitura superficiale. Parametri quali velocità di stampa, temperatura di estrusione e quella del letto di deposizione, sono comunque da considerare, ma il loro range di variazione è talmente piccolo da considerarli, nella maggior parte dei casi, come delle vere e proprie costanti del processo.

CAPITOLO 3

Materiali e procedure sperimentali:

All'interno di questo capitolo si andranno ad analizzare nello specifico, oltre che il materiale utilizzato, le procedure sperimentali che lo stesso subisce. Si comincerà col presentare le proprietà e le caratteristiche peculiari del 17-4 PH, per poi procedere con la presentazione di tutti i trattamenti e le lavorazioni a cui i pezzi generati vengono sottoposti, allo scopo di ricavare dati utilizzabili ai fini dello studio.

3.1. Acciaio inossidabile 17-4 PH:

Per la realizzazione dei provini da sottoporre a prova di trazione, verrà utilizzato, come esposto nel precedente capitolo, l'acciaio inossidabile 17-4 PH. Per acciaio inossidabile si intende un acciaio in grado di resistere alla corrosione; tale caratteristica è dovuta ad un alto tenore di cromo (si faccia riferimento alla tabella 1 per la sua composizione percentuale), grazie al quale è resa possibile la generazione di uno strato protettivo superficiale (fenomeno di passivazione) che impedisce l'ossidazione da parte di agenti esterni, come, ad esempio, l'ossigeno. Il materiale per la stampa viene fornito sotto forma di barrette, composte da polvere metallica (di 17-4 PH) in sospensione all'interno di un legante ceramico e/o polimerico. Le barrette si trovano all'interno di apposite cartucce, fornite direttamente dalla Desktop Metal, che dovranno essere inserite all'interno di appositi alloggiamenti posti sulla parte superiore della stampante. La sigla PH posta alla fine del nome corrisponde a "Precipitation hardening", sta ad indicare un processo subito dal materiale per migliorarne le proprietà. Il precipitation hardening prevede un aumento della durezza del materiale, dovuto alla formazione di precipitati di rame all'interno della matrice martensitica, che ostacola il movimento delle dislocazioni presenti nella struttura cristallina. Solitamente gli acciai inossidabili induriti mediante PH presentano una temperatura M_f (martensite finish) maggiore di quella ambiente, il che permette la completa trasformazione dell'austenite in martensite anche a temperatura atmosferica, senza quindi necessità di sotto-raffreddamento. I valori delle temperature M_s (martensite start) e M_f per il 17-4 PH risultano, rispettivamente, 132°C e 32°C. Il processo di precipitazione si sviluppa attraverso un trattamento di invecchiamento, il quale può essere svolto a differenti temperature a seconda dei casi, solitamente comprese fra i 428°C ed i 620°C. I trattamenti di invecchiamento maggiormente impiegati sono: H900 (svolto a 482 °C per 1

ora) e H1100 (svolto a 593 °C per 4 ore). Le proprietà meccaniche assunte dal pezzo in seguito al trattamento variano in base a due parametri fondamentali: la temperatura raggiunta durante il processo e la durata stessa del processo. Per quanto riguarda la resistenza meccanica (sempre nel 17-4 PH), subirà un incremento con l'aumento della temperatura fino al raggiungimento di un picco, per poi decrescere. Tale picco si raggiungerà attraverso l'applicazione del trattamento H900, dove si verifica la formazione di cluster di rame con struttura CCC (cubica a corpo centrato) in una matrice di martensite alfa, anch'essa CCC.

Se si procedesse con l'invecchiamento (aging) fino al raggiungimento di una temperatura superiore ai 540°C, i cluster di precipitati di rame assumerebbero la configurazione CFC (cubica a facce centrate). In tale situazione ci si verrebbe a trovare nella condizione di minimo della resistenza a rottura ed a fatica del materiale. Nel caso in cui si raggiungessero temperature superiori ai 580°C, si potrebbe incappare nella ricomparsa della fase austenitica, la quale conferirebbe al materiale una maggiore morbidezza, aumentando quindi duttilità e resistenza a fatica. Nelle seguenti tabelle sono riportate la composizione chimica dell'acciaio e le sue proprietà meccaniche.

Tabella 1-Composizione chimica del 17-4 PH.

C	Cr	Ni	Cu	Mn	Si	Nb	Fe
<0.07	15.9	4.0	4.1	0.8	0.4	0.3	Balance

Tabella 2-Proprietà meccaniche del 17-4 PH in riferimento alla MPIF Standard 35.

Resistenza allo snervamento (Mpa)	650
Carico di rottura (Mpa)	790
Allungamento a rottura (Mpa)	4
Modulo di Young (GPa)	196
Durezza (HRC)	27
Densità (g/cc)	7.5

Il 17-4 PH rappresenta uno degli acciai inossidabili, induriti per precipitation hardening, maggiormente utilizzati in ambito ingegneristico, viene sfruttato ad esempio per soluzioni aeronautiche, nucleari e nell'industria chimica. Ciò è dovuto alla sua elevata resistenza a corrosione, coadiuvata da un'elevata durezza e resistenza a trazione. Viene principalmente lavorato attraverso tecniche MIM (Metal Injection Molding), insieme ad altri acciai inossidabili quali il 304 L ed il 316 L. Lo stampaggio ad iniezione di metalli, anche noto come MIM (Metal Injection Molding), è un processo produttivo che combina la versatilità dello stampaggio ad iniezione plastica con la resistenza e l'integrità di parti metalliche piccole e complesse. Più piccolo e complesso risulta il pezzo da produrre, più sarà ampio il risparmio ottenuto adottando tecniche MIM rispetto ad altri sistemi di produzione convenzionali, che potrebbero addirittura renderne inefficiente o impossibile la produzione. Il processo comprende: injection moulding, debinding, sintering, CNC moulding. Si tratta di una tecnica equivalente alla microfusione a cera persa; tuttavia, risulta più efficiente quando vi è la necessità di generare geometrie complesse. Per esempio, è particolarmente conveniente quando si vogliono ottenere filettature, profili elicoidali, sottosquadri, scritte o altro. Nella MIM, vengono utilizzate polveri selezionate di metalli mescolate a leganti polimeri (binders) fino a formare un unico impasto chiamato feedstock. Il feedstock viene iniettato in uno stampo allo scopo di ottenere la forma desiderata. Dopo un trattamento di separazione dei polimeri dal metallo (debinding), si procede alla sinterizzazione in atmosfera controllata, ad una temperatura inferiore a quella di fusione. Dopo la sinterizzazione, la densità del pezzo ottenuta, garantirà caratteristiche meccaniche equivalenti a quelle di particolari microfusi in cera persa o stampati.

3.2.1. Obiettivo dello studio:

Dopo aver riportato le caratteristiche peculiari del materiale utilizzato risulta doveroso ribadire l'obiettivo dello studio. La trattazione si basa sulla valutazione delle proprietà meccaniche di provini in 17-4 PH, ottenuti tramite la tecnologia di additive manufacturing definita come Bound Metal Deposition. I campioni saranno realizzati secondo specifici parametri del processo additivo e se ne misureranno le proprietà attraverso prove di trazione. Il fine ultimo dello studio è quello di valutare quale combinazione dei parametri di stampa sia in grado di garantire proprietà meccaniche soddisfacenti, paragonabili cioè a quelle possedute dagli stessi provini realizzati però con tecnologie tradizionali. Sarà analizzato l'effetto della variazione di soli tre parametri: direzione di crescita, spessore del layer e larghezza del filamento (diametro del nozzle). Si è deciso di adottare questa strategia al fine di non appesantire in maniera eccessiva la trattazione. Se si fosse aumentato il

numero di variabili non sarebbe risultato possibile processare correttamente i dati ottenuti. Troppe variabili avrebbero impedito di esporre in modo corretto la correlazione tra la variazione di un singolo parametro e la variazione delle proprietà meccaniche.

Essendo la BMD una tecnologia relativamente nuova non si ha a disposizione un gran numero di dati sperimentali, per cui risulta necessario procedere in maniera controllata. In funzione dell'obiettivo preposto, il progetto verrà suddiviso in fasi, da ognuna delle quali saranno ricavati degli output che verranno impiegati come input per le fasi successive.

3.2.2. Fasi del progetto:

Lo studio sarà portato avanti grazie all'utilizzo della stampante Studio System della Desktop Metal. Il macchinario verrà sfruttato per la realizzazione di provini ad osso da sottoporre a prova di trazione secondo la normativa ASTM E8, garantendo uno stretto controllo dei parametri di processo che influenzano le proprietà meccaniche e la finitura superficiale del materiale. La misurazione di tali proprietà avverrà mediante l'utilizzo di una macchina di prova universale MTS 810. L'attività di ricerca può dunque essere divisa in quattro distinte fasi:

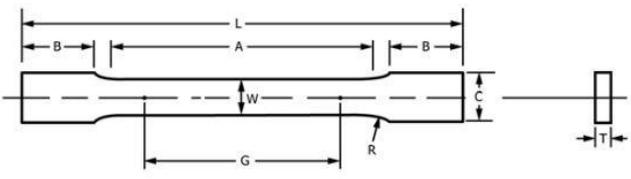
- **Fase 1:** in questa fase si procederà all'individuazione dei parametri di processo che dovranno essere variati durante la realizzazione dei provini, allo scopo di valutarne l'influenza sulle caratteristiche meccaniche e di resistenza a corrosione. In questo specifico caso di studio saranno scelti tre parametri fondamentali, al fine di generare una tabella che permetta di impostare il processo di stampa incrociando i valori scelti per i suddetti parametri di processo. I risultati attesi dalla Fase 1 sono: individuazione dei parametri fondamentali per la stampa tridimensionale dei provini, creazione della tabella, programmazione del processo.
- **Fase 2:** questa fase si propone di realizzare i provini di trazione secondo i parametri scelti nella fase precedente. Si procederà alla generazione dei provini tramite processo di additive manufacturing e verranno svolte, inoltre, tutte le successive attività necessarie all'ottenimento dei pezzi finiti. Le attività sopra citate si riferiscono al processo di debinding,

rimozione del legante, e sinterizzazione, svolta in un forno alla temperatura di circa 1400°C. I provini potranno subire un ulteriore trattamento di invecchiamento o essere catalogati ed inviati in laboratorio per i test. I risultati attesi dalla Fase 2 sono: Realizzazione dei provini di trazione secondo le caratteristiche di processo scelte nella fase precedente, generazione di campioni per attacchi di corrosione con caratteristiche di stampa uguali a quelle dei provini da trazione.

- **Fase 3:** l'obiettivo sarà quello di testare e analizzare i provini realizzati nella fase precedente. I campioni, che sono stati generati seguendo le disposizioni geometriche secondo la norma ASTM E8, verranno testati a trazione mediante una macchina di prova universale dalla quale si ricaveranno i dati relativi alle proprietà meccaniche. Tali dati saranno successivamente rielaborati, rendendo così possibile effettuare i dovuti confronti tra le diverse configurazioni di stampa scelte nella Fase 1. Infine, verranno individuati i parametri di processo che conferiscono ai manufatti le migliori proprietà meccaniche. Risultati attesi dalla fase 3: valori delle caratteristiche meccaniche del materiale derivanti dalle prove di trazione, individuazione dei parametri di stampa che garantiscono le migliori proprietà meccaniche.
- **Fase 4:** utilizzando come parametri gli input forniti dalla fase precedente (ovvero i parametri di processo, da impostare all'interno del software Fabricate della stampante, che conferiscono al materiale le migliori proprietà meccaniche) saranno realizzati provini che verranno successivamente sottoposti al processo termico di invecchiamento, come riportato nella normativa MPIF Standard 35. I campioni, una volta concluso il trattamento, verranno nuovamente testati a trazione ed i risultati saranno analizzati, confrontandoli con quelli ricavati in precedenza, allo scopo di valutare sia quantitativamente che qualitativamente come il processo termico incrementi le caratteristiche meccaniche del materiale. Sulla base di questi risultati, sarà poi effettuato un confronto con i dati ottenuti da provini analoghi realizzati attraverso altre tipologie di processo, come forgiatura e fucinatura. I risultati attesi dalla Fase 4 sono: Provini di trazione realizzati secondo i parametri di processo che conferiscono al materiale migliori proprietà meccaniche, curve e valori delle proprietà meccaniche da confrontare con quelle dei provini che non hanno subito trattamento di invecchiamento, confronti in termine di caratteristiche meccaniche del 17-4 PH ottenuto con tecniche BMD e tramite tecnologie tradizionali.

3.3. Procedure sperimentali:

In questo paragrafo ci si concentrerà sulle prove a cui il materiale è stato sottoposto. Per la realizzazione dei provini da sottoporre a prova di trazione risulta necessario rispettare le linee guida riportate nella normativa ASTM E8. La norma permette di generare provini con dimensioni standardizzate, il che garantisce prove di trazione univoche, ripetibili e con validità a livello internazionale; è in grado, inoltre, di fornire informazioni riguardo alle modalità di svolgimento della prova (come, ad esempio, la velocità di deformazione). Al suo interno vengono anche riportate indicazioni riguardanti aspetti prettamente relativi alla macchina (come la forza di serraggio) e alla misurazione (modalità di installazione degli estensometri per la misurazione della deformazione). I provini testati avranno sezione rettangolare, per la precisione Sheet-Type di 12,5 mm di larghezza e verranno progettati attraverso l'ausilio del software DM Fabricate. Si osservi la figura 22 per maggiori informazioni sulla forma del provino e le sue dimensioni:



	Dimensions		
	Standard Specimens	Sheet-Type, 12.5 mm [0.500 in.] Wide	Subsize Specimen 6 mm [0.250 in.] Wide
	Plate-Type, 40 mm [1.500 in.] Wide		
	mm [in.]	mm [in.]	mm [in.]
G—Gauge length	200.0 ± 0.2 [8.00 ± 0.01]	50.0 ± 0.1 [2.000 ± 0.005]	25.0 ± 0.1 [1.000 ± 0.003]
W—Width	40.0 ± 2.0 [1.500 ± 0.125, -0.250]	12.5 ± 0.2 [0.500 ± 0.010]	6.0 ± 0.1 [0.250 ± 0.005]
T—Thickness		thickness of material	
R—Radius of fillet, min	25 [1]	12.5 [0.500]	6 [0.250]
L—Overall length, min	450 [18]	200 [8]	100 [4]
A—Length of reduced parallel section, min	225 [9]	57 [2.25]	32 [1.25]
B—Length of grip section, min	75 [3]	50 [2]	30 [1.25]
C—Width of grip section, approximate	50 [2]	20 [0.750]	10 [0.375]

Figura 22-Provino da sottoporre a prova di trazione secondo ASTM E8.

Allo scopo di ottenere dei campioni che rispettino completamente le linee guida riportate nella normativa sarà necessaria la creazione di una struttura interna totalmente priva di air gap. Si adotta tale strategia per rendere i provini generati mediante tecniche AM il più simile possibile (a livello strutturale) a quelli realizzati con tecnologie tradizionali, al fine di poterne effettuare un confronto delle proprietà meccaniche più accurato e veritiero. Il software DM Fabricate, tuttavia, non risulta essere in grado di ottenere la struttura interna richiesta in maniera diretta, per questo motivo sarà

necessario adottare una strategia alternativa. Solitamente si procede ad impostare nel programma dei bordi che abbiano grandezza maggiore dell'intero pezzo da realizzare, rendendo così l'oggetto costituito unicamente da "bordi" e quindi pieno. Per verificare che tale procedura abbia dato un esito positivo sarà possibile effettuare una sezione del pezzo attraverso le funzionalità del software Fabricate. Una volta completata questa operazione, si procederà con la scelta dei parametri di stampa del provino. Come esposto in precedenza, per non appesantire la trattazione, all'interno di questo studio sono stati variati soltanto tre parametri di processo: direzione di crescita, spessore del layer e larghezza del filamento. Tutti gli altri vengono mantenuti costanti, risulterà comunque necessario andare a definirne i valori tenendo anche conto di quelle che sono le incertezze di lavorazione. Si faccia riferimento alla tabella 3 per conoscere i valori dei parametri mantenuti costanti e alla tabella 4 per visualizzare il range di variazione dei parametri variabili.

Tabella 3-Parametri di processo mantenuti costanti.

Parametro	Valore
Percentuale di riempimento	100%
Temperatura di estrusione	175°C
Temperatura letto di stampa	65°C

Tabella 4-Parametri di processo scelti per il confronto, variabili.

Parametro	Range di valori
Altezza del layer	0.1-0.15mm
Angolo di direzione di crescita dei provini rispetto al piano XY	0°-45°-90°
Larghezza del filamento (diametro del nozzle)	0.25-0.40mm

I provini, realizzati attraverso la tecnologia BMD, vengono sottoposti a test di trazione con l'ausilio di una macchina di prova universale MTS 810, le cui condizioni di prova sono in accordo con la normativa ASTM E8. Le modalità di esecuzione del test vengono controllate mediante un programma LabVIEW installato su un computer collegato alla macchina. Tramite il software l'operatore è in grado di stabilire i valori dei vari parametri di prova come, ad esempio, la velocità di spostamento della traversa (nel caso in studio si è optato per una velocità di 0.1 mm/s). Prima

dell'effettivo posizionamento dei provini sulla macchina, sarà necessario numerarli e misurarli accuratamente. La misurazione viene svolta attraverso l'ausilio di un micrometro (nel caso in studio è stato utilizzato un Micrometro Mitutoyo per esterni 25-50mm con risoluzione di 0,01mm) e riveste un ruolo fondamentale per due ragioni: i trattamenti subiti dal provino non sono deterministici; pertanto, si potrebbe incappare in deformazioni causate, ad esempio, da un raffreddamento troppo veloce del pezzo. La presenza di tali fenomeni renderebbe il provino non idoneo alla prova, quindi da scartare. La seconda motivazione è invece di natura pratica, occorre infatti andare ad ottenere dei dati che non siano influenzati dalla geometria del pezzo, per questo motivo i valori relativi allo spessore e alla larghezza del provino devono essere inseriti nel programma LabVIEW allo scopo di rendere i risultati della prova adimensionali. Completata la procedura di misurazione, si procede all'apertura delle ganasce della macchina attraverso un sistema idraulico azionato da valvole. Il provino da testare verrà inserito nell'apposito alloggiamento prestando attenzione al fatto che le ganasce applichino l'azione di serraggio soltanto sulle teste. Una collocazione scorretta comporterebbe l'inquinamento dei dati rilevati durante la prova e il suo invalidamento. L'acquisizione dei dati durante il processo avviene sia mediante un sensore LDVT di cui la macchina è equipaggiata, sia attraverso un estensometro monoassiale posizionato direttamente sul provino. I dati acquisiti saranno successivamente convertiti in un file Excel e normalizzati rispetto allo zero, per facilitarne l'analisi ed il confronto.

3.4. Processo di generazione di provini con spessore del layer di 0.10mm:

Allo scopo di trattare in maniera specifica il processo di realizzazione, attraverso BMD, di provini in 17-4PH da sottoporre a prova di trazione, viene riportato come esempio il caso seguente, nel quale si desidera generare dei provini con spessore del layer pari a 0.10mm utilizzando un ugello da 0.4mm. Come già espresso nei precedenti capitoli, la prima fase del processo realizzativo consiste nella generazione di un file (il quale verrà utilizzato come input dalla stampante) attraverso l'ausilio del software Fabricate. Quest'ultimo, che si ricorda essere fornito direttamente dalla Desktop Metal, permette di variare i parametri di stampa in funzione delle specifiche richieste. Nel caso in studio si desiderava generare un campione con profilo standard, stile concentrico, spessore del layer di 0.1mm, top-bottom thickness di 2.5mm, utilizzando un estrusore con ugello da 0.4mm. Nonostante il software permetta di variare ogni singolo parametro di processo, il progettista ne

manterrà la maggior parte costanti, inquanto, come visto in precedenza, solo alcuni di essi variando comportano un mutamento delle proprietà del pezzo. Come esempio è possibile citare l’infill overlap, il quale rappresenta la quantità di sovrapposizione tra infill e muro che si avrà durante il processo di stampa; solitamente si opta per una sovrapposizione del 10% o 20% ma sarebbe possibile spingersi fino ad un massimo del 30%. Oltre che variare i parametri di processo, attraverso il Fabricate è possibile modificare il piatto d’adesione (variandone le dimensioni ed il raggio di spigolo) ed il supporto che separa il pezzo dalla parte di adesione al piatto (solitamente vengono utilizzati due strati). L’unico elemento che è consigliabile non variare in fase progettuale sono le impostazioni relative al processo di sinterizzazione, ciò è dovuto al fatto che durante tale processo il pezzo risulta soggetto ad un effetto di scala che incrementa le sue dimensioni circa del 20% in condizioni standard (quelle fornite di default dal software). Una variazione delle impostazioni porterebbe alla generazione di una condizione in cui il progettista, non conoscendo l’effettiva entità della variazione dimensionale, non possa generare prodotti della dimensione desiderata.

Solitamente per la generazione di provini da sottoporre a prova di trazione, in accordo con la normativa di riferimento (ASTM E8), si opta per la posa di 40 strati di materiale: 12 costituiranno il supporto metallico, 2 saranno di materiale ceramico per facilitare la separazione del pezzo dal supporto ed infine il pezzo effettivo risulterà composto da 26 strati di materiale metallico. La tabella riassume i principali parametri posseduti dai provini, ovviamente durante lo studio sono stati stampati e testati campioni con direzione di crescita dei provini nel piano a 90°, 45° e 0°.

Tabella 5-Parametri di stampa dei provini in 17-4 PH.

Parametro	Valore
Profilo standard	
Diametro dell’ugello	0.4mm
Spessore del layer	0.1mm
Top-Bottom thickness	2.5mm
Infill overlap	10%/20%
Stile concentrico	
Orientazione del layer	+45°/-45°
Direzione di crescita	90° 45° 0°

Completata la fase progettuale si procede al trasferimento del file, attraverso cloud, dal computer dell'operatore alla stampante Studio System. Quest'ultima, dopo aver effettuato la calibrazione, procederà alla realizzazione del provino rispettando i parametri di stampa impostati in precedenza dal progettista. I provini realizzati, una volta completato il processo di stampa ed estratti dalla macchina, vengono sottoposti a trattamenti di pulitura allo scopo di rendere le superfici il più uniformi possibile, eliminando cioè l'impronta generata dal filamento depositato. Come riportato in precedenza, tale operazione viene effettuata in questa fase del processo poiché la polvere metallica, non essendo ancora sinterizzata, può essere facilmente rimossa levigando il legante sulle pareti. Una volta levigate le superfici, i provini vengono alloggiati sui ripiani di un apposito cestello che sarà inserito all'interno del debinder, il quale, successivamente, verrà chiuso ermeticamente per permettere il riempimento della camera principale. La camera viene riempita da un particolare fluido avente lo scopo di sciogliere il legante che tiene aggregate le polveri così da rimuovere il più possibile la componente di resina e lasciare solamente la polvere metallica. Il processo di debinding ha una durata variabile, solitamente dalle 20 alle 28 ore, a seconda della quantità di materiale che viene inserita al suo interno. Il ciclo, infatti, verrà effettuato una sola volta per tutti i provini di trazione che invece sono stati realizzati in differenti processi di stampa (a causa dei differenti parametri di processo impostati). Al completamento del processo, i pezzi risultano particolarmente delicati e devono essere maneggiati con cura. Vengono accuratamente rimossi dal cestello e posizionati su ripiani in carbonio sovrapposti, i quali saranno inseriti in un forno per la sinterizzazione. In questa fase è previsto il consolidamento delle polveri metalliche attraverso il processo di sinterizzazione, il quale si verifica ad una temperatura di circa 1400°C e solitamente richiede intorno alle 40 ore (il tempo effettivo dipende ovviamente dalla quantità di pezzi che vengono posizionati nel forno, il calcolo, come visto in precedenza, viene effettuato direttamente dal software Fabricate in fase di progettazione). Una volta che il forno viene chiuso, avendo cura che i diversi piani non siano in contatto con le resistenze, viene generato il vuoto all'interno della camera facendo circolare tra i diversi piani del gas inerte, in questo caso Argon al 97% (perché, come visto in precedenza, la sinterizzazione deve avvenire in un ambiente controllato). Terminata la sinterizzazione e rimossi i provini dal forno, si provvede alla separazione degli stessi dal supporto metallico che era stato generato in fase di stampa. Questa procedura risulta notevolmente facilitata vista la preventiva deposizione di uno o due strati di materiale ceramico tra modello e supporto. Il provino a questo punto può considerarsi completo e può essere trattato termicamente (invecchiamento H900) o sottoposto direttamente a prova di trazione secondo la normativa di riferimento. Ultimamente si sta pensando di inserire un trattamento di solubilizzazione ad una temperatura di 1200°C fra la sinterizzazione e l'invecchiamento. Il processo di solubilizzazione è un trattamento termico per precipitazione, solitamente destinato agli acciai austenitici, eseguito a

temperature elevate. Il raggiungimento di temperature comprese fra i 1000°C ed i 1200°C garantisce la solubilizzazione degli elementi di lega all'interno dei grani austenitici. Il mantenimento alla temperatura di riscaldamento deve durare il tempo necessario affinché questa raggiunga anche il cuore del pezzo in acciaio. Solo grazie a questa stasi è possibile eliminare le alterazioni strutturali che sono state provocate dalle lavorazioni precedenti (in caso di tecniche differenti dalle AM). Successivamente, è previsto un rapido raffreddamento del pezzo, in aria o acqua, proprio per impedire la precipitazione dei carburi di cromo che avviene di norma tra i 450°C e gli 850°C. L'applicazione di tale trattamento termico consente di migliorare le caratteristiche del materiale quali la resistenza meccanica (sia a temperatura ambiente che alle alte temperature) e la resistenza a corrosione.

CAPITOLO 4

Analisi dei risultati ottenuti dalla prova di trazione:

Nel presente capitolo saranno esposti ed analizzati i dati derivanti dalle prove di trazione svolte sui provini in 17-4 PH. Come esposto in precedenza, i componenti testati presentavano, in partenza, una diversa combinazione dei parametri di stampa, perciò, i risultati ottenuti varieranno a seconda dello specifico caso. Risulterà infine inevitabile confrontare i dati relativi alle singole prove allo scopo di determinare la migliore combinazione dei parametri di processo, ossia quella in grado di conferire le migliori proprietà meccaniche al pezzo. Nel presente studio ci si concentrerà sui risultati derivanti da due tipologie di lotti di provini:

- Provini realizzati in 17-4 PH con larghezza del filamento standard (0.40mm), spessore del layer pari a 0.10mm e angolo di orientazione di crescita rispettivamente pari a 0°,45° o 90°.
- Provini in 17-4 PH con larghezza del filamento ultra-fine (0.25mm), spessore del layer pari a 0.10mm e angolo di orientazione di crescita rispettivamente pari a 0°,45° o 90°.

Per ogni differente combinazione dei parametri di stampa sono stati generati tre provini, due dei quali (una volta numerati e misurati) saranno subito sottoposti a prova di trazione, mentre l'ultimo subirà prima il trattamento di invecchiamento (H900). I valori dei dati ottenuti dalle prove saranno confrontati con quelli riportati sulla norma MPIF Standard 35 conosciuta anche come Material Standards for Metal Injectio Molded Parts.

4.1. Analisi dei dati relativi a provini con larghezza del filamento di 0.40mm:

Di seguito saranno riportate le curve, derivanti dalla prova di trazione, relative a provini realizzati in 17-4 PH con larghezza del filamento standard (0.40mm), spessore del layer pari a 0.10mm e angolo di orientazione di crescita rispettivamente pari a 0°,45° e 90°.

4.1.1. Confronto provini con larghezza del filamento di 0.40mm:

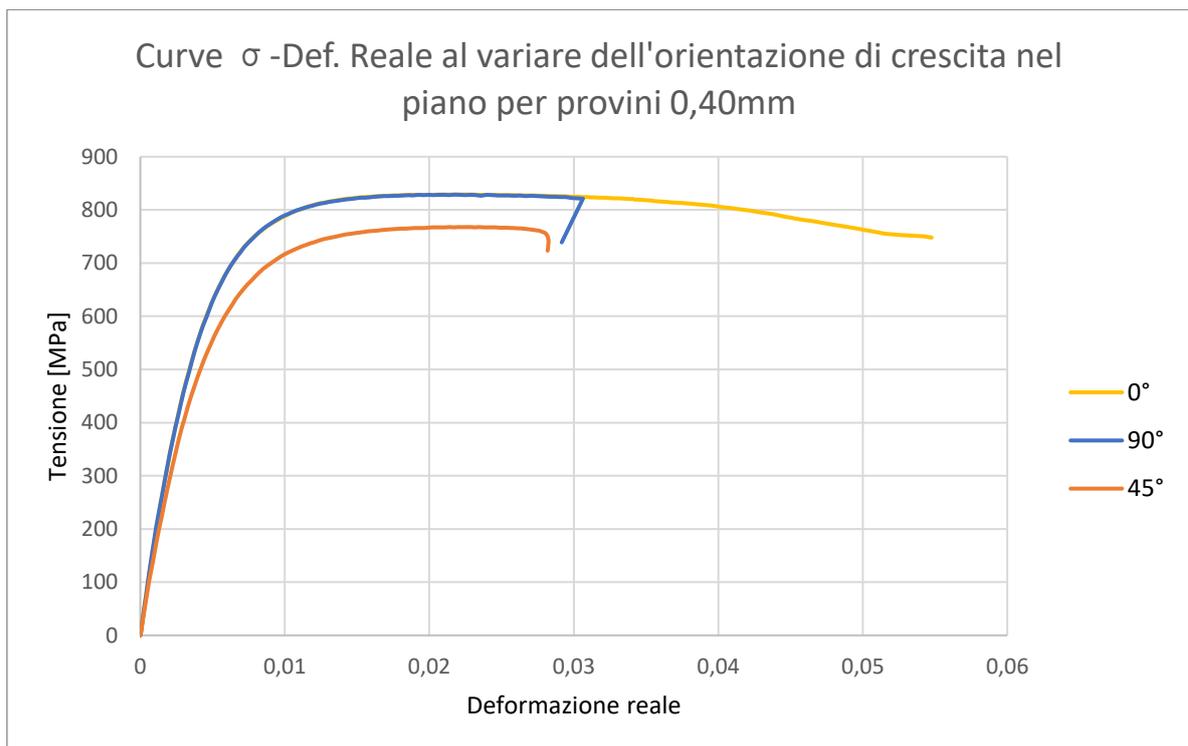


Tabella 6-Confronto delle curve tensione-deformazione dei provini 0.40mm con diverse orientazioni.

Per alleggerire la trattazione si è optato per andare a confrontare direttamente i provini che presentavano una maggiore resistenza a trazione. Dalla semplice visualizzazione delle curve σ - ϵ è facile notare che i provini 0.40mm con miglior comportamento a trazione risultano essere quelli con orientazione di crescita nel piano a 90° e 0°. Si nota inoltre che tali provini presentano un

comportamento (curva σ - ε) praticamente identico, dimostrato anche dall'uguaglianza dei valori numerici delle caratteristiche meccaniche nei due casi. Come accennato in precedenza, è interessante valutare i risultati ottenuti andandoli a confrontare con quelli della normativa di riferimento, ovvero la MPIF Standard 35. Si nota come le configurazioni con angolazione di crescita dei provini a 90° e 0° mostrino un comportamento in perfetto accordo con quanto riportato dalla normativa, la quale contiene al suo interno i valori minimi delle caratteristiche di questo materiale (17-4 PH) ed i risultati ottenuti dalle prove di trazione rispettando perfettamente tali valori. L'unica configurazione che non raggiunge gli standard per il 17-4PH è quella con angolazione di crescita a 45°, essa infatti risulta essere al di sotto della soglia minima per le grandezze relative alla tensione massima a rottura ed allungamento percentuale a rottura (non graficato). Nella tabella seguente vengono riportati i valori effettivi della resistenza a trazione per i vari campioni:

Tabella 7-Tabella riassuntiva dei valori di σ_{max} per provini 0.40mm.

Tipologia di provino	Resistenza a trazione (MPa)
0°	828.89
90°	828.734
45°	767.618

4.2. Analisi dei dati relativi a provini con larghezza del filamento di 0.25mm:

Di seguito saranno riportate le curve, derivanti dalla prova di trazione, relative a provini realizzati in 17-4 PH con larghezza del filamento ultra-fine (0.25mm), spessore del layer pari a 0.10mm e angolo di orientazione di crescita rispettivamente pari a 0°,45° e 90°. Anche in questo caso si seguirà la procedura utilizzata per i campioni con larghezza del filamento pari a 0.40mm. A differenza del caso precedente, alcuni provini 0.25mm sono stati soggetti a trattamento termico di invecchiamento H900 con conseguente variazione delle proprietà meccaniche. Anche con questa tipologia di campioni sarà possibile riscontrare caratteristiche differenti in provini aventi la stessa combinazione dei parametri di stampa. Nella seguente trattazione si considereranno i dati relativi ai provini che non hanno subito trattamento termico, per tenere in considerazione anche quest'ultimo fattore, verrà riportato un grafico riassuntivo contenente il confronto tra le differenti orientazioni.



Figura 23-Provini con larghezza del filamento di 0.25mm e orientazioni differenti dopo essere stati sottoposti a trattamento termico H900.

4.2.1. Confronto provini con larghezza del filamento di 0.25mm:

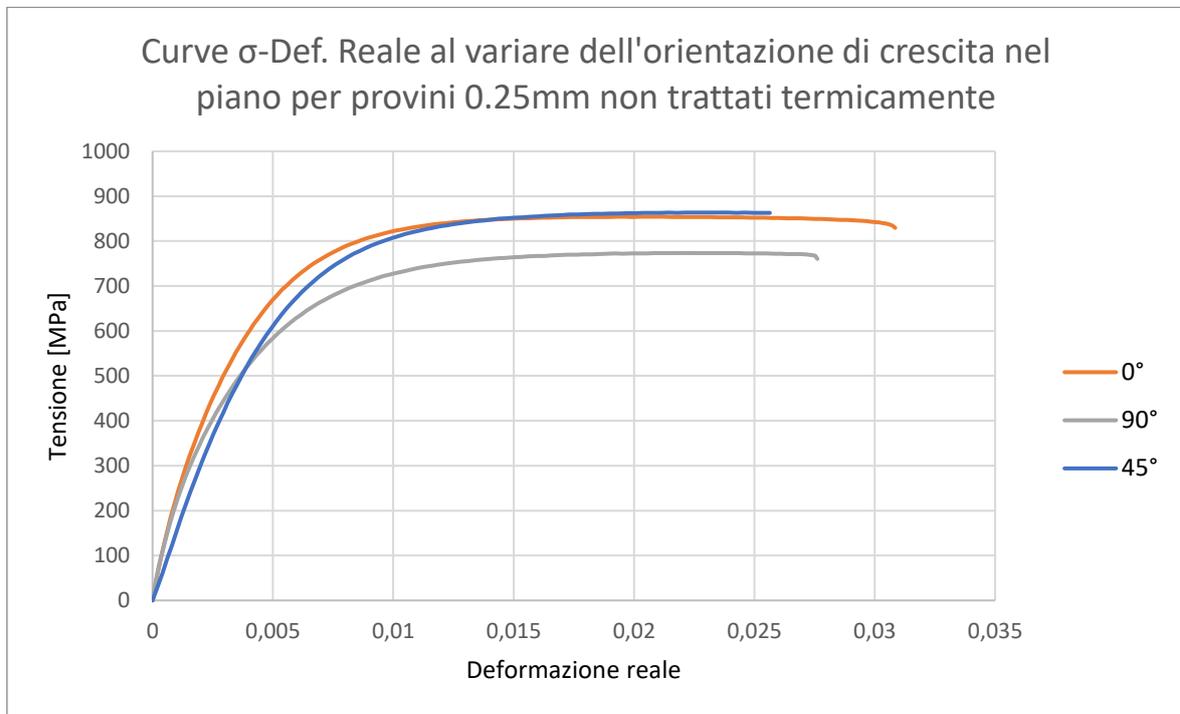


Tabella 8-Confronto delle curve tensione-deformazione dei provini 0.25mm con diverse orientazioni.

Per alleggerire la trattazione, anche in questo caso, si è optato per andare a confrontare direttamente i provini che presentavano una maggiore resistenza a trazione. Dalla semplice visualizzazione delle curve σ - ε è facile notare che i provini 0.25mm con miglior comportamento a trazione risultano essere quelli con orientazione di crescita nel piano a 45° e 0°. Si nota inoltre che tali provini presentano un comportamento (curva σ - ε) molto simile nel tratto plastico, tale affermazione trova riscontro pratico andando ad analizzare i valori della σ_{max} nei due casi. Come accennato in precedenza, è interessante valutare i risultati ottenuti andandoli a confrontare con quelli della normativa di riferimento, ovvero la MPIF Standard 35. Si nota come le configurazioni con angolazione di crescita dei provini a 45° e 0° mostrino un comportamento in perfetto accordo con quanto riportato dalla normativa, la quale contiene al suo interno i valori minimi delle caratteristiche di questo materiale (17-4 PH) ed i risultati ottenuti dalle prove di trazione rispettando perfettamente tali valori. L'unica configurazione che non raggiunge gli standard per il 17-4PH è quella con angolazione di crescita a 90°, essa infatti risulta essere al di sotto della soglia

minima per le grandezze relative alla tensione massima a rottura ed allungamento percentuale a rottura (non graficato). Nella tabella seguente vengono riportati i valori effettivi della resistenza a trazione per i vari campioni:

Tabella 9-Tabella riassuntiva dei valori di σ_{max} per provini 0.25mm non trattati termicamente.

Tipologia di provino	Resistenza a trazione (MPa)
0°	854.39
90°	773,43
45°	863,64

4.2.2. Confronto provini con larghezza del filamento di 0.25mm trattati termicamente attraverso H900:

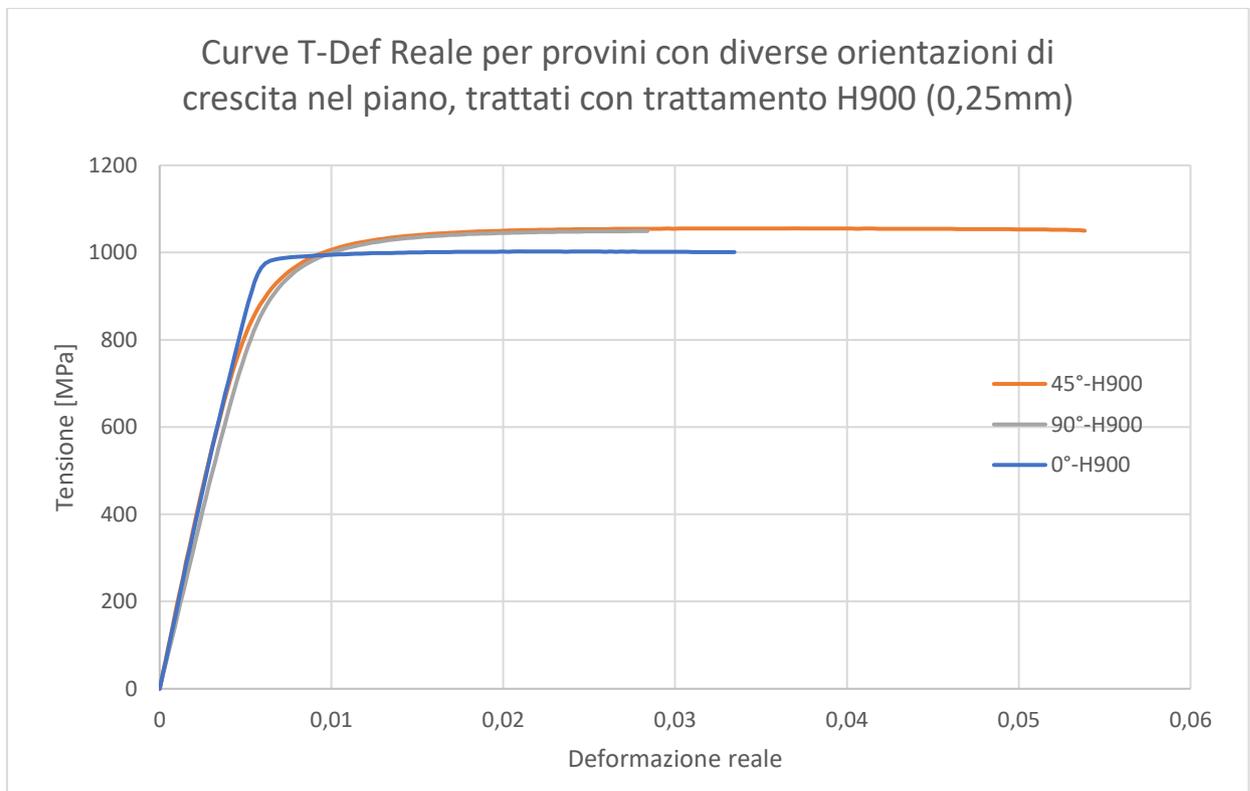


Tabella 10-Confronto delle curve tensione-deformazione dei provini 0.25mm con diverse orientazioni, trattati termicamente.

Dal grafico precedente è subito possibile notare un comportamento molto simile, per certi aspetti uguale, dei provini con orientazione a 90° e 0°. Il provino a 45° invece presenta un comportamento peculiare: dopo lo snervamento, cioè la conclusione del tratto elastico, la curva assume un andamento a tensione quasi costante, avvicinandosi molto ad una condizione di perfetta plasticità. In tale condizione il pezzo continua a deformarsi anche senza un aumento del carico esterno fornito dalla macchina. Si tratta di una condizione ideale poiché, nel caso reale, all'aumentare della deformazione nel materiale si sviluppa un fenomeno noto come incrudimento che diminuisce la deformabilità del componente (sarà quindi necessario applicare un maggiore sforzo dall'esterno, ciò comporterà un aumento della pendenza della curva). Confrontando i valori relativi alla resistenza a trazione dei provini trattati termicamente e di quelli non trattati è subito possibile notare la presenza di una grande differenza tra i due casi. I campioni che sono stati sottoposti a trattamento H900 presentano una σ_{max} molto più elevata, lo scopo dell'applicazione del processo, infatti, è proprio quello di incrementare la resistenza a trazione del materiale. Confrontando la tabella sottostante con la tabella 26 sarà possibile quantificare l'effettivo valore di tale differenza.

Tabella 11-Tabella riassuntiva dei valori di σ_{max} per provini 0.25mm trattati termicamente.

Tipologia di provino	Resistenza a trazione (MPa)
0°-H900	1055.44
90°-H900	1049.25
45°-H900	1002.63

4.3.1. Confronto tra i provini con orientazione 0° e larghezza del filamento di 0.25mm e 0.40mm:

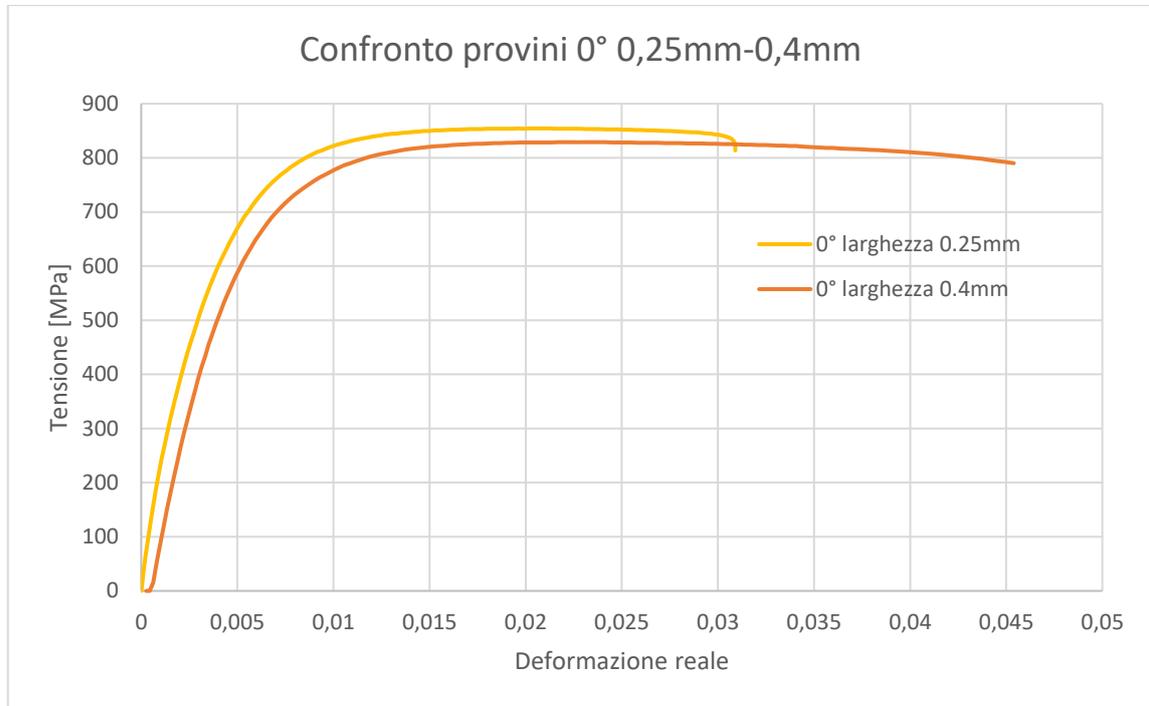


Tabella 12-Confronto delle curve tensione-deformazione per provini con larghezza del filamento di 0.25mm e 0.40mm inclinate a 0°.

Il provino con larghezza del filamento di 0.25mm presenta una maggiore resistenza a trazione, tuttavia la differenza risulta comunque contenuta. Entrambi i campioni risultano in accordo con i valori riportati nella normativa MPIF Standard 35.

Tabella 13-Tabella riassuntiva dei valori di σ_{max} per provini con larghezza di 0.25mm e 0.40mm a 0°.

Tipologia di provino	Resistenza a trazione (MPa)
0°- Φ 0.40mm	828.89
0°- Φ 0.25mm	854.386

4.3.2. Confronto tra i provini con orientazione 90° e larghezza del filamento di 0.25mm e 0.40mm:

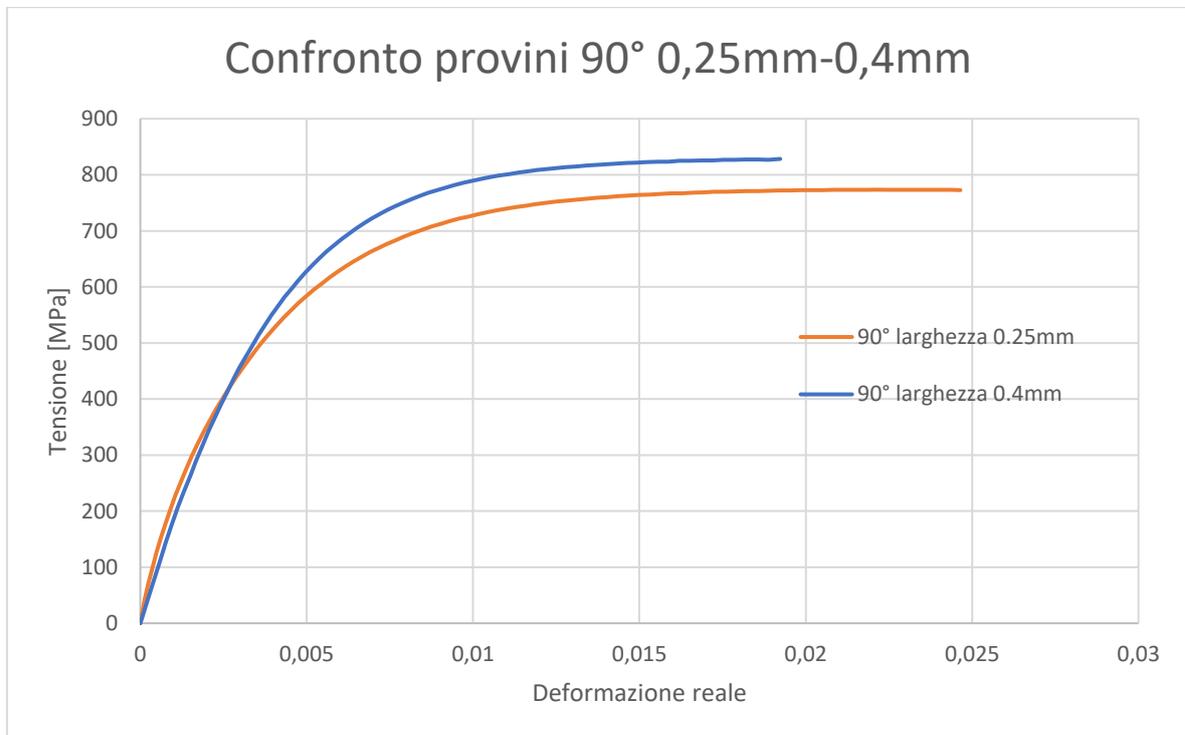


Tabella 14- Confronto delle curve tensione-deformazione per provini con larghezza del filamento di 0.25mm e 0.40mm inclinate a 90°.

In questo caso i provini presentano un comportamento elastico inizialmente molto simile, quasi identico; non si può dire lo stesso per il tratto plastico, infatti il provino con larghezza 0.25mm sarà caratterizzato da una resistenza a trazione molto più bassa rispetto a quello con larghezza 0.40mm.

Tabella 15-Tabella riassuntiva dei valori di σ_{max} per provini con larghezza di 0.25mm e 0.40mm a 90°.

Tipologia di provino	Resistenza a trazione (MPa)
90°- Φ 0.40mm	828.734
90°- Φ 0.25mm	773.43

4.3.3. Confronto tra i provini con orientazione 45° e larghezza del filamento di 0.25mm e 0.40mm:

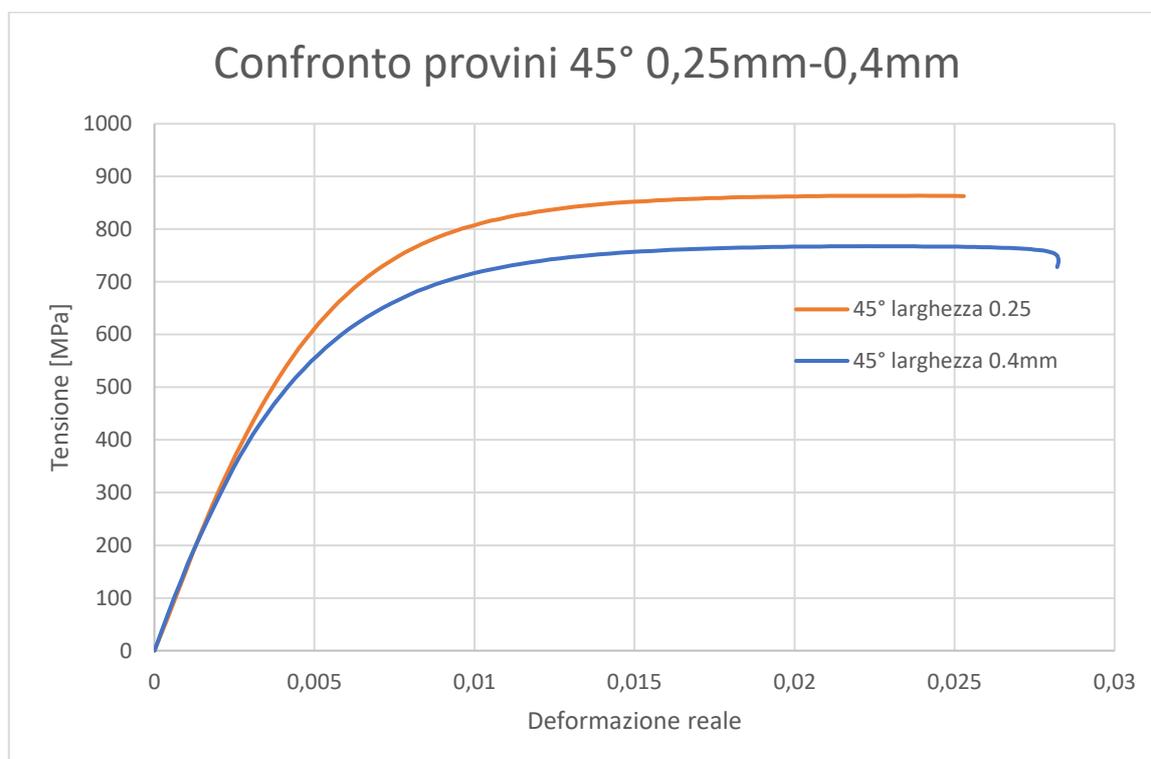


Tabella 16- Confronto delle curve tensione-deformazione per provini con larghezza del filamento di 0.25mm e 0.40mm inclinate a 45°.

Dal confronto delle due curve è possibile visualizzare come la variazione della larghezza del filamento abbia determinato una sensibile differenza della resistenza meccanica nei due casi. Il provino con larghezza pari a 0.25mm risulta possedere una σ_{max} molto maggiore rispetto al suo corrispettivo di 0.40mm. Quest'ultimo, infatti, non raggiunge neanche i valori minimi per il 17-4 PH riportati nella normativa, è dunque lecito asserire che la configurazione a 45° con larghezza 0.40mm risulta essere al di sotto della soglia per le grandezze relative alla massima tensione di rottura. Nella tabella sottostante sono riportati valori relativi ai campioni:

Tabella 17-Tabella riassuntiva dei valori di σ_{max} per provini con larghezza di 0.25mm e 0.40mm a 45°.

Tipologia di provino	Resistenza a trazione (MPa)
45° - Φ 0.40mm	767.618
45° - Φ 0.25mm	863.64

4.4. Confronto dei valori ricavati dalle prove di trazione con la normativa di riferimento MPIF Standard 35:

Tabella 18-Tabella riassuntiva dei valori delle proprietà meccaniche secondo la normativa MPIF Standard 35.

Codice identificativo del materiale	Valori minimi accettabili		Valori tipici rilevati	
	Resistenza massima a trazione	Resistenza allo snervamento (0.2%)	Resistenza massima a trazione	Resistenza allo snervamento (0.2%)
	MPa	MPa	MPa	MPa
MIM 17-4 PH (as-sintered)	790	650	896	730
MIM 17-4 PH (trattato termicamente) *	1068	965	1186	1089

I dati relativi alla massima tensione a rottura registrati durante le prove di trazione per ogni campione devono essere messi in relazione con quelli descritti nella tabella sovrastante. In essa sono riportati i valori tipici ed i valori minimi accettabili delle proprietà a trazione. Un campione con tensione di rottura a trazione minore del valore minimo accettabile dalla normativa non potrà essere utilizzato in ambito industriale, sarà dunque necessario sostituirlo con un altro avente differente combinazione dei parametri di stampa. Di seguito sono riassunti i valori delle σ_{max} e del modulo di elasticità relative ai vari provini testati:

Tabella 19-Tabella riassuntiva della σ_{max} e dei provini sottoposti a prova di trazione.

Tipologia di provino	Resistenza a trazione (MPa)	Modulo di Young (GPa)
0°- Φ 0.40mm	828.89	176.13
0°- Φ 0.25mm	854.386	179.62
90°- Φ 0.40mm	828.734	185.64
90°- Φ 0.25mm	773.43	178.13
45°- Φ 0.40mm	767.618	156.07
45°- Φ 0.25mm	863.64	148.84
0°-H900- Φ 0.25mm- H900	1055.44	184.9
90°-H900- Φ 0.25mm-H900	1049.25	163.1
45°-H900- Φ 0.25mm-H900	1002.63	184.12

CONCLUSIONI:

Lo studio sopra presentato si è basato sulla valutazione delle proprietà meccaniche, in particolare la resistenza a trazione, dell'acciaio inossidabile 17-4 PH. I provini da sottoporre a prova di trazione sono stati ottenuti tramite la tecnologia di additive manufacturing conosciuta come Bound Metal Deposition, sviluppata dall'azienda statunitense Desktop Metal, seguendo le linee guida fornite alla normativa ASTM E8. Per l'analisi delle proprietà sono stati scelti specifici parametri del processo additivo, i quali sono stati fatti variare all'interno di determinati range di valori. Nello specifico, per non appesantire troppo la trattazione, si è deciso di far variare solamente tre parametri: larghezza del filamento, direzione di crescita dei provini nel piano e spessore/altezza del layer. Alcuni provini, dopo l'effettiva stampa, sono stati sottoposti al trattamento termico di invecchiamento H900, al fine di poter verificare come l'applicazione di quest'ultimo possa influire sulle caratteristiche del materiale. Lo scopo ultimo dello studio è quello di andare a verificare quale configurazione dei parametri di stampa sia in grado di conferire le migliori e le peggiori proprietà meccaniche al materiale. Ricordiamo infatti che la nuova frontiera per le lavorazioni additive è andare a concorrere (o addirittura sostituire) con le tecniche tradizionali (ad esempio lavorazioni sottrattive) per la generazione di componenti nell'industria manifatturiera. Di seguito viene riportata una sintesi dei principali risultati scaturiti dall'analisi dei dati:

- I provini realizzati con un'orientazione di crescita nel piano di stampa pari a 90° e 0°, con identica larghezza del filamento (0.40mm), hanno mostrato le stesse caratteristiche di resistenza a trazione.
- Nei provini realizzati con un'angolazione di 45° rispetto al piano di stampa si è riscontrato un peggioramento delle proprietà meccaniche del 8% in resistenza a trazione rispetto a quelli realizzati con un'angolazione di 0° e 90° (ovviamente tutti i provini avevano la stessa larghezza del filamento, 0.40mm).
- Le configurazioni con orientazione di crescita dei provini di 0° e 90°, con larghezza del filamento pari a 0.40mm, mostrano un comportamento in perfetto accordo con quanto riportato nella normativa.

- L'unica configurazione, con larghezza del filamento di 0.40mm, che non raggiunge i valori della normativa per le grandezze relative alla tensione massima a rottura è quella con angolazione di crescita pari a 45°.
- L'applicazione di un trattamento termico dopo la sinterizzazione, nel caso specifico H900, provoca un sensibile innalzamento della tensione massima a rottura del materiale rispetto a quella che si avrebbe testando il provino subito dopo la sinterizzazione.
- Tra i provini realizzati con una larghezza del filamento pari a 0.25mm, non trattati termicamente, quelli che godono della migliore resistenza a trazione sono rispettivamente il campione con direzione di crescita a 45° e quello a 0°.
- Il provino con larghezza del filamento di 0.25mm e orientazione di crescita di 90° non trattato termicamente risulta essere caratterizzato dalla più bassa tensione di rottura fra i campioni con la stessa larghezza.
- Il provino 0.25mm con orientazione a 90° non soddisfa i requisiti espressi nella normativa, trovandosi infatti al di sotto della soglia per le grandezze relative alla massima resistenza a trazione.
- I provini 0.25mm con angolazione di 0° e 45° mostrano un comportamento a trazione in perfetto accordo con quanto riportato nella normativa.
- I provini 0.25mm che sono stati sottoposti a trattamento termico soddisfano in media i requisiti, in termini di massima tensione a rottura, riportati nella normativa di riferimento. Solo il campione orientato a 45° presenta una σ_{max} moderatamente più bassa rispetto a quella tabulata.

- Fra i campioni 0.25mm che hanno subito invecchiamento H900 è possibile notare un comportamento a trazione molto simile fra quello orientato a 90° e quello a 0°, sia nel tratto elastico che in quello plastico.
- Il provino trattato termicamente, con larghezza pari a 0.25mm, che gode della più alta tensione a rottura è quello con angolazione di 0°. Il campione a 45° invece è caratterizzato dal valore più basso di σ_{max} .
- Mantenendo costante la direzione di crescita nel piano, il provino a 0° che presenta la migliore tensione massima a rottura è quello con larghezza del filamento pari a 0.25mm.
- Mantenendo costante la direzione di crescita nel piano, il provino a 90° che presenta la migliore tensione massima a rottura è quello con larghezza del filamento pari a 0.40mm.
- Mantenendo costante la direzione di crescita nel piano, il provino a 45° che presenta la migliore tensione massima a rottura è quello con larghezza del filamento pari a 0.25mm.
- Il campione non trattato termicamente che presenta la σ_{max} più alta è quello con larghezza del filamento di 0.25mm e una direzione di crescita nel piano pari a 45°.

I dati registrati durante lo studio possono considerarsi soddisfacenti in quanto è stato dimostrato che, attraverso una precisa combinazione dei parametri di processo, risulta possibile riscontrare in provini generati mediante tecnologie additive, proprietà meccaniche confrontabili con quelle possedute dagli stessi campioni realizzati con tecniche tradizionali. Nelle prove sviluppate in laboratorio, tuttavia, sono stati modificati soltanto due parametri di stampa, ossia larghezza del filamento e direzione di crescita dei provini nel piano; sarà dunque possibile, in futuro, andarne a modificare degli altri quali, ad esempio, lo spessore/altezza del layer. Un ulteriore elemento che potrebbe essere alla base di successivi studi è l'effetto che l'applicazione di un trattamento di solubilizzazione, posto tra sinterizzazione e invecchiamento, avrà sulle proprietà meccaniche del materiale. Infine, è consigliabile ripetere le prove su campioni, generati mediante BMD, costituiti

da materiali metallici differenti dal 17-4 PH, allo scopo di confrontare i dati ottenuti nei diversi studi e trovare la combinazione migliore fra parametri di stampa, materiale e proprietà meccaniche.

Bibliografia:

- [1] DHRUV BHRATE, PH.D., SENIOR TECHNOLOGIST, PHOENIX ANALYSIS & DESIGN TECHNOLOGIES (PADT) (2017) Installing a Metal 3D Printer, Part 3: Safety Risks
- [2] Archimede Forcellese, professore di ruolo presso UNIVPM, Dispense del corso tecnologia meccanica A.A. 2020/21. PRINCIPI DI FABBRICAZIONE ADDITIVA (ADDITIVE MANUFACTURING)
- [3] Catalogo materiali azienda Felfil <https://felfil.com/it/materiali/>
- [4] Dr Daniel Engstrøm et al. Loughborough Universities Additive Manufacturing Research Group (AMRG): The 7 Categories of Additive Manufacturing <https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/>
- [5] Wenceslao Piedra-Cascon´ et al. 3D printing parameters, supporting structures, slicing, and post-processing procedures of vat-polymerization additive manufacturing technologies: A narrative review
- [6] Jones, R., Haufe, P., Sells, E., Iravani, P., Olliver, V., Palmer, C., & Bowyer, A. (2011). RepRap – the replicating rapid prototyper.
- [7] E. Willems, M. Turon-Vinas, B. Camargo dos Santos, B. Van Hooreweder, F. Zhang, B. Van Meerbeek, J. Vleugels, Additive manufacturing of zirconia ceramics by material jetting, Journal of the European Ceramic Society, Volume 41, Issue 10, 2021, Pages 5292-5306.
- [8] Thomas Tancogne-Dejean, Christian C. Roth, Dirk Mohr, Department of Mechanical and Process Engineering, ETH Zurich, Switzerland: Rate-dependent strength and ductility of binder jetting 3D-printed stainless steel 316L: Experiments and modeling
- [9] 3DExperience Marketplace | Make Powder bed fusion - DMLS, SLS, SLM, MJF, EBM <https://make.3dexperience.3ds.com/processes/powder-bed-fusion>
- [10] Carlota Valdivieso, 3dnatives.com, (2019) The Complete Guide to Directed Energy Deposition (DED) in 3D Printing
- [11] Wook Jin Oh, Wook Jin Lee, Min Seob Kim, Jong Bae Jeon, Do Sik Shim, Repairing additive-manufactured 316L stainless steel using direct energy deposition, Optics & Laser Technology, Volume 117, 2019, Pages 6-17.

- [12] Gibson I., Rosen D., Stucker B. (2010) Sheet Lamination Processes. In: Additive Manufacturing Technologies. Springer, Boston, MA.
- [13] Come funziona la stampante 3D Desktop Metal Studio System video di Energy Group 3D Printing and Digital Manufacturing
- [14] Q. Campbell et al., mechanical engineering technology, University of Maine, Design and Manufacture of a Functional 3D-Printed Stirling Engine: A Case Study Involving Bound Metal Deposition of 17-4 PH
- [15] Luiz Carneiro, Behrooz Jalalahmadi, Ankur Ashtekar, Yanyao Jiang, Department of Mechanical Engineering, University of Nevada (2019) Cyclic deformation and fatigue behavior of additively manufactured 17-4 PH stainless steel
- [16] Gurminder Singh, Jean-Michel Missiaen, Didier Bouvard, Jean-Marc Chaix, Additive manufacturing of 17–4 PH steel using metal injection molding feedstock: Analysis of 3D extrusion printing, debinding and sintering.
- [17] Catalogo materiali della Desktop Metal 17-4 PH stainless steel
<https://www.desktopmetal.com/uploads/Studio-MDS-17-4-PH-stainless-steel.pdf>
- [18] Catalogo MTS: MTS 810 & 858 Material Testing Systems <https://www.upc.edu/sct/documents equipament/d 77 id-412.pdf>
- [19] Normativa ASTM E8/E8M-21 Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials
- [20] Catalogo prodotti Mitutoyo 2017 pagina 47
- [21] Normativa MPIF Standard 35