



UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE

FACOLTA' DI INGEGNERIA

Corso di Laurea triennale in Ingegneria Meccanica

**Effetto dei parametri di processo sulle proprietà meccaniche di
manufatti in acciaio inossidabile ottenuti tramite fabbricazione
additiva**

***Effect of process parameters on the mechanical properties of
stainless steel products obtained by additive manufacturing***

Relatore:

Prof. Archimede Forcellese

Tesi di Laurea di:

Matteo Carboni

Correlatore:

Prof. Michela Simoncini

A.A. 2020 / 2021

INDICE

Introduzione.....	5
Capitolo 1: Stato dell'arte	7
1.1 Stato dell'arte dell'Additive Manufacturing.....	7
1.2 Materiali utilizzati.....	8
1.3 Tecnologie di fabbricazione AM per materiali non metallici	12
1.3.1 Vat Polymerization (Polimerizzazione in vasca).....	12
1.3.2 Material Extrusion	13
1.3.3 Material Jetting	15
1.3.4 Binder Jetting	16
1.4 Tecnologie di fabbricazione AM per materiali metallici	18
1.4.1 Powder Bed Fusion.....	18
1.4.2 Direct Energy Deposition.....	20
1.4.3 Sheet Lamination.....	21
Capitolo 2: Processo di Bound Metal Deposition	23
2.1 Stampaggio.....	23
2.2 Debinding	25
2.3 Sinterizzazione.....	26
2.4 Parametri di stampa	27
Capitolo 3: Materiali e procedure sperimentali	33
3.1 Obiettivi dello studio.....	33
3.1.1 Fase 1: Individuazione parametri	33
3.1.2 Fase 2: Realizzazione provini.....	33
3.1.3 Fase 3: Estrapolazione risultati	34
3.1.4 Fase 4: Osservazione complessiva del processo e confronti	34
3.2 Introduzione all'acciaio 17-4 PH.....	34
3.3 Procedure di realizzazione del provino e della prova di trazione	38
Capitolo 4: Risultati sperimentali e discussione.....	41
Conclusioni.....	48
Bibliografia.....	51

Introduzione

L'Additive Manufacturing può considerarsi come l'insieme di tutte quelle tecnologie basate sul principio di funzionamento della stratificazione progressiva di materiale su livelli sovrapposti lungo un determinato asse di crescita fino all'ottenimento di un oggetto tridimensionale. Queste tecnologie sono andate a svilupparsi ampiamente nel corso degli ultimi anni grazie principalmente alla loro elevata versatilità per quanto riguarda i materiali utilizzati e il design da realizzare. L'Additive Manufacturing è nata in seguito alla richiesta del settore industriale di ottenere prototipi, utensili ma anche prodotti personalizzati in tempi brevi. Le tecniche AM rappresentano un importante passo avanti del settore industriale tanto che esse sono destinate ad affiancare e/o sostituire le più comuni tecniche di fabbricazione industriale andando a farne un uso sempre più persuasivo e conveniente, con tempi di processo sempre più bassi. Basti pensare che negli ultimi anni si sono andate a sviluppare stampanti 3d anche ad uso domestico a prezzi non eccessivamente proibitivi e si sono andati a sviluppare software che permettono l'utilizzo anche a un operatore non esperto. Nell'ottica industriale si sono sviluppate stampanti 3d con attenzione a quelli che sono i principi dell'Industry 4.0, le macchine cioè sono in grado di comunicare tra di loro non necessitando del monitoraggio di un operatore. Tra i vari tipi di materiali che possono essere utilizzati ci sono materiali metallici, ceramici e polimerici, i primi hanno senza dubbio una notevole importanza nell'ambito industriale date le loro notevoli proprietà meccaniche. Come detto in precedenza l'Additive Manufacturing rappresenta una famiglia di lavorazioni che differiscono anche di molto tra loro poiché esse si basano a volte su principi fisici anche totalmente diversi, la scelta di un determinato processo rispetto ad un altro si basa principalmente sul tipo di materiale che vado ad utilizzare, da questo si possono ricavare tre macrocategorie che si basano sulla consistenza del materiale utilizzato nella stampa: polveri, solidi o liquidi. Le più comuni tecnologie AM per materiali metallici prevedono l'utilizzo di laser o fasci di elettroni che portano il materiale sotto forma di polvere o filamento allo stato fuso, che una volta solidificato andrà a formare uno strato. Questi procedimenti però presentano numerosi difetti, primo fra tutti la necessità di installare impianti per la sicurezza. La presenza di elevate temperature e di polveri metalliche rende necessaria, oltre l'utilizzo di dispositivi per la protezione personale, impianti per la purificazione dell'aria. Utilizzando polveri metalliche, infatti, si va incontro al rischio di provocare incendi anche a causa della elettricità statica, o in casi ancor più gravi, soprattutto in presenza di nuvole di polvere nella stanza, esplosioni [1]. Le elevate temperature fanno sì inoltre che all'interno della microstruttura possano presentarsi dei difetti, come ad esempio delle inclusioni o porosità dovute soprattutto alla presenza di ossigeno, oppure delle deformazioni termiche. Al fine di risolvere tali problematiche si è sviluppata la Bound

Metal Deposition (BMD), un processo basato sulla estrusione di particolari barre, costituite da polvere metallica tenuta insieme da un legante che può essere sia in cera che polimerico. In questo processo le barre vengono riscaldate poi estruse su una base andando a formare i vari strati, finito tale processo occorre rimuovere il materiale ceramico e polimerico attraverso un processo detto debinding, infine il materiale metallico verrà consolidato attraverso l'utilizzo di una fornace. Nella BMD, inoltre, si è in grado di andare ad ottenere un pezzo con caratteristiche diverse andando a modificare quelli che sono i parametri di stampa, che non sono altro che dei valori associati a delle variabili del processo e modificandoli si è in grado di andare a modificare sia la finitura superficiale del pezzo che le caratteristiche meccaniche. Un parametro di grande interesse è ad esempio lo spessore del layer, un layer troppo spesso, infatti, può causare il così detto effetto staircase, mentre un layer più sottile pur migliorando la finitura superficiale aumenta i tempi di lavorazione, perché occorrerà fare più strati per ottenere il pezzo. In questo studio si vuole analizzare come variano le proprietà meccaniche di un oggetto al variare dei parametri di stampa utilizzando come stampante la Studio System della Desktop Metal che si basa proprio sulla BMD. Come materiale invece utilizzeremo l'acciaio inossidabile 17-4 PH sotto forma di barre. Per fare ciò andremo a stampare dei provini e li sottoporremo alla prova di trazione, verificando poi quali sono i parametri che massimizzano le proprietà meccaniche.

Capitolo 1: Stato dell'arte

1.1 Stato dell'arte dell'Additive Manufacturing

Il termine distintivo Additive Manufacturing deriva dal fatto che rispetto alle tecnologie industriali classiche, le quali prevedono la rimozione di materiale, essa va ad aggiungere materiale per ottenere il pezzo finito, sviluppando l'oggetto strato per strato in maniera progressiva. Si è proceduto allo sviluppo di tali lavorazioni principalmente per tre necessità: rapid prototyping, rapid tooling, rapid manufacturing [2]. Il termine rapid prototyping (prototipazione rapida) sta a indicare che tali tecnologie sono andate a svilupparsi per la necessità di andare a creare prototipi in tempi brevi. Le metodologie tradizionali per la realizzazione di prototipi prevedono quasi esclusivamente l'utilizzo di lavorazioni sottrattive a macchine a controllo numerico. La realizzazione di prototipi è molto importante nell'industria poiché serve a visualizzare in maniera efficace sia come il mio oggetto si pone all'interno, ad esempio, di un sistema più grande, ad esempio un componente di un autoveicolo, sia come esso resiste alle interazioni di natura meccanica (sforzi, urti, ...). Il prototipo serve quindi primariamente a valutare il pezzo realizzato, se le valutazioni danno esito positivo, si procede a una progettazione su "grande scala" sviluppando le tecnologie per una sua più ampia produzione, come per esempio la creazione di stampi. Realizzare prototipi è molto dispendioso sia dal punto di vista di monetario, dovuti al costo di funzionamento e della macchina CNC in sé, ma anche di materiale utilizzato. Con le tecniche AM tali sprechi sono ridotti al minimo poiché vado ad eliminare quasi totalmente gli sfridi e gli scarti, poiché vado ad aggiungere materiale solo dove serve non in eccesso. Per rapid tooling si intende la capacità di queste tecnologie di andare a creare in maniera rapida strumenti adatti alle lavorazioni industriali in maniera rapida, si intende cioè utensili che servono a mitigare o risolvere problemi che si presentano durante la lavorazione industriale. Ogni qual volta si presentano dei problemi, occorrerà per l'azienda trovare una soluzione in modo rapido per evitare eventuali ritardi della produzione ma ciò comporta quasi sempre la necessità di richiedere a un'azienda esterna parti di ricambio che si presume non arrivino in tempi richiesti. Con le tecniche AM invece, sono in grado di produrre tali parti in maniera relativamente rapida e personalizzandoli a piacere, basti pensare che è possibile creare, mediante una semplice progettazione CAD, parti di ricambio temporanee, strumenti di lavoro e perfino organi filettati. Infine, per rapid manufacturing si intende produzione rapida di vari prodotti. Si intende cioè la capacità delle tecniche AM di andare a produrre oggetti su richieste specifiche e quindi personalizzati in tempi brevi. Nel mercato attuale il cliente va ricercando sempre di più prodotti personalizzati che rispecchino le proprie richieste o che siano semplicemente unici rispetto agli altri

sul mercato. Le tecnologie facenti parte della famiglia AM offrono una grande personalizzazione sia in fatto di forma che di materiale, tanto che negli ultimi anni sono andate ad essere utilizzate anche nel settore della moda. Questi tre principi sono sia il punto di partenza su cui si basano e si sono sviluppate le tecnologie AM ma anche gli scopi che tali tecnologie devono andare a migliorare. Nello stampaggio di elementi metallici non si è ancora in grado di garantire proprietà simili alla controparte tradizionale, se si riuscisse a superare tale scoglio si riuscirebbe senza dubbio ad avere una completa o quasi sostituzione delle tecniche tradizionali con le tecniche AM. Un'altra problematica delle tecniche AM che deve essere migliorata sono i tempi di lavorazione troppo lunghi che ne impediscono un uso continuativo nel settore industriale poiché ciò limiterebbe troppo la produzione. Tuttavia, come si può facilmente notare le tecniche AM godono di proprietà uniche quali la loro capacità di realizzare pezzi con geometrie molto complesse non realizzabili con tecniche tradizionali, andando perfino a modificare la struttura interna di un oggetto per limitarne il peso e il materiale utilizzato andando a creare strutture più forti ma anche più leggere. Il loro elevato grado di autonomia inoltre permette una stampa che non necessita della supervisione dell'operatore, tanto che alcune stampanti godono anche di sistemi di controllo e supervisione da remoto. Prima di procedere alla trattazione del nostro caso di studio occorre conoscere quali sono i materiali utilizzati e le tecnologie ad esse associate affinché si riesca a comprendere la vastità della tecnologia e applicazioni ma anche le problematiche di ogni tecnologia al fine di scegliere quella che maggiormente si adatta ai singoli scopi e verificarne la convenienza rispetto a una procedura industriale classica quale fonderia o rimozione di materiale.

1.2 Materiali utilizzati

Le tecnologie di produzione additiva permettono l'utilizzo di varie tipologie di materiali e i produttori spendono ingenti risorse per implementare e sviluppare nuovi materiali sempre più performanti. Principalmente i materiali che possono essere utilizzati si dividono in diverse famiglie, ma solo due risultano di grande interesse per il settore industriale: i polimeri e i metalli. I polimeri sono sicuramente i materiali che permettono la più ampia scelta dei processi di stampa, garantendo inoltre costi ridotti per il materiale stesso ma anche per le tecnologie di stampa ad esso associata. I metalli invece offrono proprietà meccaniche di gran lunga superiori rispetto ai polimeri, ma soffrono di un costo più elevato sia per le tecnologie di lavorazione e materiale utilizzato. Quasi tutti i materiali polimerici possono essere stampati, tra questi troviamo [3]:

- L'acido polilattico, comunemente noto come PLA, è uno dei materiali più utilizzati per uso dilettantistico. Risulta molto facile da stampare, infatti, viene stampato a temperature

inferiori rispetto agli altri polimeri, non richiedendo un letto riscaldato. È un materiale molto economico e crea parti che possono essere utilizzate per un'ampia varietà di applicazioni (facendo attenzione a non porlo a contatto con fonti di calore). Creato dalla lavorazione di vari prodotti vegetali, tra cui mais, patate o barbabietole da zucchero, il PLA è considerato una plastica "ecologica" ed è utilizzato principalmente in imballaggi per alimenti e contenitori. Il filamento plastico di PLA inoltre è ideale per le stampe 3D in cui l'estetica è importante grazie alla sua bassa temperatura di stampa che lo rende più adatto per parti con dettagli fini. Ha un aspetto lucido una volta stampato.

- L'ABS (acrilonitrile-butadiene-stirene), è una delle plastiche utilizzate maggiormente 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 utilizzo 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 grazie alla sua leggerezza e rigidità ma anche al fatto che può essere sia estruso che stampato ad iniezione. Possiede buone proprietà meccaniche, è meno friabile del PLA e in più sopporta temperature di stampa più elevate. Pur essendo resistente alla graffiatura, non resiste bene agli agenti atmosferici, inoltre presenta un ritiro molto elevato che deve essere controllato sia in fase di stampa che di progettazione al fine di non ritrovarsi con un pezzo di dimensioni inferiori a quelle richieste. Sarà pertanto necessario effettuare un sovradimensionamento come accade ad esempio nelle operazioni industriali di forgiatura.
- Il Nylon è una plastica sintetica, poliammidica, dotata di notevoli proprietà meccaniche. Sviluppato durante la Seconda guerra mondiale per la realizzazione di paracadute e imbragature, è 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) e della possibilità del materiale di assorbire i liquidi rendendo necessari alcuni accorgimenti per la conservazione, al fine di evitare che esso venga a contatto con l'umidità con conseguente deterioramento del materiale. Tuttavia, grazie a tale proprietà, anche detta igroscopia (capacità di assorbire molecole d'acqua presenti nell'ambiente circostante), è possibile lasciare il filamento in tinture per

tessuti liquide al fine di fargli assumere la colorazione desiderata, rendendolo quindi un materiale molto utile per la personalizzazione.

- L' HDPE (Polietilene ad alta densità) è un polimero termoplastico ricavato dal petrolio. In particolare, è un polietilene poco ramificato: questo vuol dire che possiede forze intermolecolari elevate e maggiore rigidità rispetto al polietilene a bassa densità, col risultato che la resistenza alla trazione è maggiore; rispetto a quest'ultimo, inoltre, è anche più duro e più opaco e può sopportare temperature più elevate. Si tratta di uno dei materiali più 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, oltre a essere presente anche in tubature dell'acqua 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) e 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. La sua elevata reperibilità e la capacità di essere riciclato lo rendono molto attraente per le tecnologie AM, poiché una volta trasformato in pellet può essere avvolto in una bobina per essere utilizzato come alimentazione di stampanti 3d.
- Il PVA (alcol polivinilico) è utilizzato per la creazione di supporti da eliminare per immersione in acqua, essendo questo un materiale idrosolubile ma pur resistente agli idrocarburi. Come si vedrà in seguito nella trattazione, la realizzazione di supporti risulta di vitale importanza per la riuscita della stampa. Risulta leggermente più complesso da estrarre rispetto ad altri polimeri per l'alta temperatura di stampa. Va conservato in un luogo asciutto per evitarne il degrado, in maniera simile al Nylon.

Per i materiali metallici i maggiori esponenti per le lavorazioni additive sono invece:

- L'alluminio, 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 metallico lo rendono un'ottima scelta per parti funzionali ad alte prestazioni che sono esposte a carichi elevati. Le leghe di alluminio sono adatte anche per parti del motore, strumenti di produzione, nonché per scambiatori di calore specifici e applicazioni esterne. Il materiale può essere utilizzato sia per la prototipazione che per la produzione. La sua elevata

malleabilità fa sì che qualità delle parti stampate in 3D in alluminio sia pari a quella delle parti prodotte con CNC.

- La superlega di cobalto-cromo è ben nota per il suo elevato rapporto resistenza-peso. Resiste molto bene alla corrosione grazie alla presenza di un tenore non indifferente di nichel al suo interno. Gode di forti legami intermolecolari che ne aumentano la resistenza allo scorrimento inoltre è possibile ottenere delle lucidature molto lisce. Il suo contenuto di nichel, tuttavia, non eccede la soglia di rischio, rendendola perciò una lega ad alta biocompatibilità che la rende ideale per applicazioni ortopediche e protesi dentali. Un esempio applicativo nel settore medico è ad esempio la creazione di supporti per le articolazioni. Tali proprietà meccaniche possono essere ancora migliorate con il crescere della temperatura mediante alcuni trattamenti termici fino ad un massimo di 500-600°C, eccedendo tale limite, le proprietà crollano e al seguito del trattamento la lega si troverà ad essere inutilizzabile.
- Il Nichel solitamente non viene mai utilizzato come materiale puro, trovando però grande applicazione all'interno delle varie leghe grazie alla sua capacità di migliorare la resistenza alla corrosione. Gli unici casi in cui viene utilizzato sono delle casistiche estreme, principalmente nel settore energetico e aerospaziale, poiché possiede una resistenza a temperature elevatissime, risulta utilizzabile fino a temperature di 1200°C. Il nichel risulta essere un materiale molto scarso in natura, questo ne limita notevolmente l'uso, tuttavia, la sua capacità di resistere alla corrosione e le sue proprietà meccaniche alle elevate temperature sono impareggiabili.
- L' Acciaio è la lega più largamente utilizzata per il suo ottimo trade-off costo e prestazioni. Ne esistono di varie tipologie che possono essere ottenute semplicemente variando la concentrazione di carbonio nel sovente ferroso oppure aggiungendo altri elementi in lega, un esempio è l'ottenimento di ghisa a partire da tenori di carbonio superiori al 6%. La possibilità di aggiungere altri elementi in lega permette l'ottenimento sia di acciai inossidabili (solitamente con l'aggiunta di cromo ed eventualmente nichel) sia idonei ai trattamenti termici (Tempra, invecchiamento...). Lo sviluppo di tecniche AM che utilizzano questo materiale è molto importante per il settore industriale e ingegneristico per i motivi detti in precedenza.
- 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.

L' ASTM (American Society for Testing and Materials) International, un organismo di normalizzazione statunitense, ha suddiviso le tecnologie di fabbricazione additiva in varie famiglie. Le 7 famiglie di lavorazioni AM sono:

- Vat Polymerization
- Material Extrusion
- Material Jetting
- Binder Jetting
- Powder Bed Fusion
- Direct Energy Deposition
- Sheet Lamination

In seguito, si propone una successiva distinzione in base alla tipologia di materiale, ovvero tra materiale metallico e non metallico. [4]

1.3 Tecnologie di fabbricazione AM per materiali non metallici

Prima di presentare le tecnologie di fabbricazione AM per materiali non metallici, occorre capire perché si vadano ad utilizzare tali tecnologie pur sapendo che ne esistono alcune che lavorano con materiali metallici, notevolmente superiori dal punto di vista delle caratteristiche meccaniche. Il motivo è molto semplice, pur non godendo di performance al pari dei metalli, i non metalli sono molto meno costosi, così come le tecnologie applicate, e risultano comunque ottime alternative per tutte le applicazioni non strutturali.

1.3.1 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) va a colpire il polimero allo stato liquido attivandone la polimerizzazione in modo selettivo facendo in modo che la resina vada ad indurirsi 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. A ogni layer ultimato il cestello presente all'interno della vasca si muove verso il

basso, facendo così anche lo strato di materiale indurito va a spostarsi 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, inoltre il processo risulta essere molto rapido e in grado di stampare pezzi con elevate aree di stampa e di peso non indifferente. Gli svantaggi principali invece prevedono un costo di impianto elevato e la poca applicabilità di tali materiali fotosensibili. La totale assenza di elementi solidi all'interno della vasca rende necessario stampare anche dei supporti, inoltre tale tecnologia prevede dei tediosi trattamenti post lavorazione quali ad esempio il passaggio del pezzo ultimato a una fonte luminosa in modo da aumentarne la durezza e consolidarne la struttura, al fine di evitare la presenza di zone non sufficientemente indurite che ne comprometterebbero la messa in uso. Le parti ottenute, una volta estratte dal bagno, devono essere asciugate o all'aria o mediante l'utilizzo di un getto d'aria da un compressore. Potrebbe inoltre essere necessaria la rimozione di materiale in eccesso mediante l'ausilio di un oggetto tagliente quale ad esempio un coltello. [5]

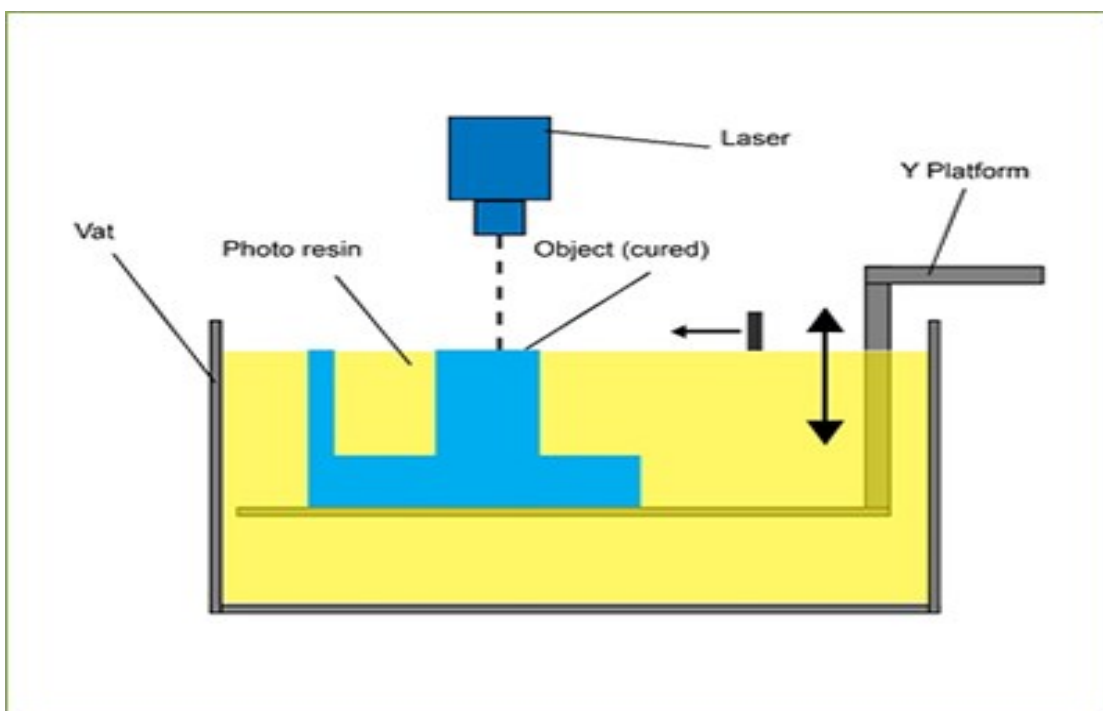


Figura 1: Schema illustrativo VAT Polymerization

1.3.2 Material Extrusion

Il principio di funzionamento sfruttato da questa tecnologia è l'estrusione. Il materiale è fatto passare attraverso un ugello che lo deforma, tale operazione è possibile solo se il materiale è stato preventivamente riscaldato dall'estrusore (mediante induzione o resistenze elettriche), poi viene depositato strato per strato. L'ugello è in grado di muoversi lungo l'orizzontale e la piattaforma si

muove in direzione verticale dopo ogni layer. Questa è la tecnologia più utilizzata per le stampanti 3D ad uso domestico data il suo costo basso. Grazie alla elevatissima resistenza e alla grande stabilità termica di materiali speciali quali ad esempio l'Ultem (tecnopolimero amorfo ad alta prestazione introdotto nel 1982), è possibile costruire prodotti e attrezzature avanzate per i settori medicale, automobilistico, aerospaziale e 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 del processo di stratificazione, per questo motivo la superficie viene sottoposta a processi di sabbiatura, abrasione chimica o verniciatura per migliorarne la finitura superficiale. 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 importanti da considerare poiché rappresentano l'evoluzione della tecnologia AM negli ultimi anni. La FDM è una tecnica di proprietà della Stratasys, Ltd. brevettata nel 1989 che 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 e ottenere prodotti con una miglior finitura. A seguito della scadenza del brevetto nel 2009 si sono andate a sviluppare dei gruppi, quali ad esempio il RepRap project, che volevano rendere tale tecnologia fruibile al maggior numero di persone senza la necessità di dispositivi industriali. Per questo hanno sviluppato la FFF, una tecnica molto simile alla precedente ma che 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 precisione di uno stampato con FDM, esso sarà soggetto infatti a deformazioni dovute al salto termico, tuttavia, tale processo è risultato così tanto economico e vantaggioso che ha portato ad una elevata diffusione delle stampanti ad estrusione, cosa che ha fatto abbassare il loro prezzo di mercato rendendo disponibile tale tecnologia a un numero sempre più grande di persone. Questa elevata diffusione è nata anche grazie alla volontà da parte di RepRap project di sviluppare una stampante che fosse open-design, ovvero con delle specifiche di design fruibili a chiunque senza alcun costo, e in grado di stampare in maniera semplice le parti in plastica che sono alla base della stessa, quasi come una specie di replicazione cellulare. Tale scelta ha permesso così la diffusione della stampante, che poteva essere realizzata con un costo bassissimo dato che le componenti principali potevano essere stampate attraverso file disponibili gratuitamente in rete. [6]

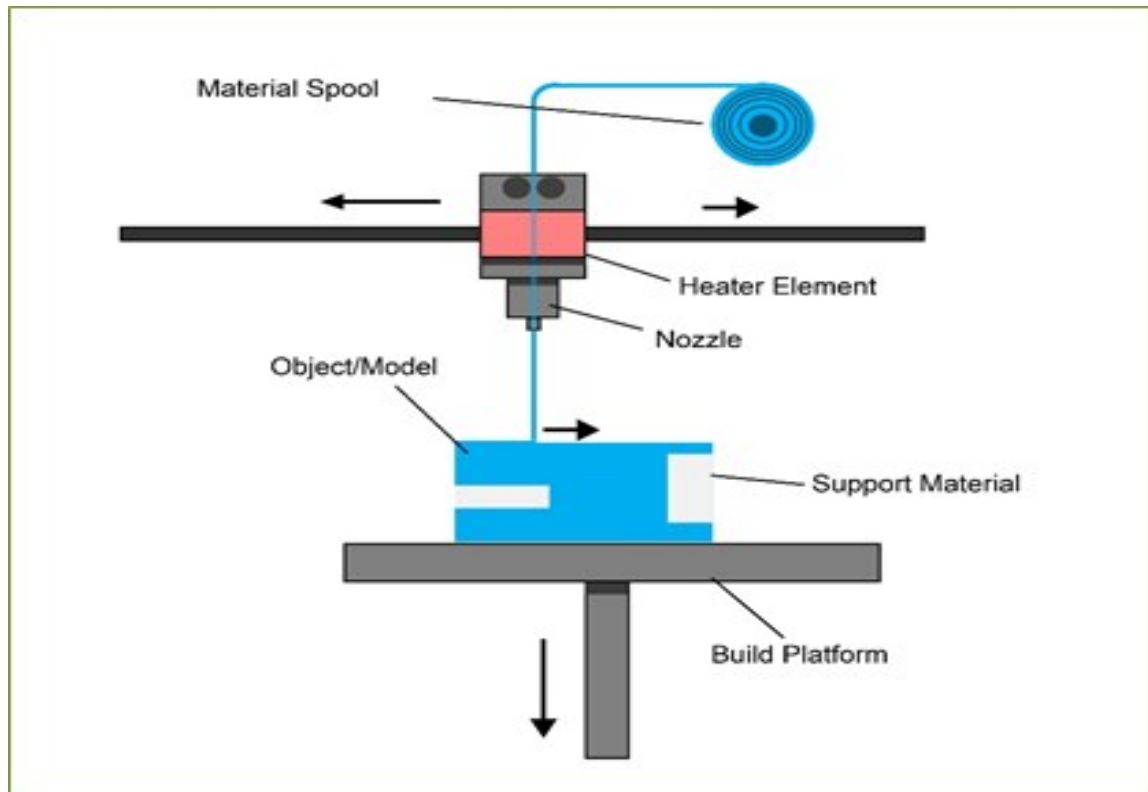


Figura 2: Schema illustrativo Material Extrusion

1.3.3 Material Jetting

Il Material jetting va a creare oggetti attraverso un procedimento che ricorda molto le stampanti a 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 abbiamo 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 una retta parallela al piano di stampa verranno immediatamente indurite. Nel caso invece della DOD, si ha una deposizione puntuale, questa tecnica è particolarmente adatta a materiale con elevata viscosità quali le cere; l'elevata viscosità rende necessaria per tale tecnica l'utilizzo di uno slicer che vada ad appiattire il layer appena depositato. Le goccioline non utilizzate vengono riciclate. La DOD va a depositare gocce di materiale in maniera singola e non per linee come detto in precedenza. Un aspetto molto importante da notare 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 materiali che può essere utilizzata. Ciò non di meno questa tecnologia permette di avere una elevata precisione nel depositare materiale e perciò si riducono gli scarti, inoltre il processo permette di intercambiare il materiale che alimenta la testina di stampa durante il processo andando a migliorare così il livello estetico dell'oggetto stampato. Al fine di comprendere meglio il funzionamento di tale processo si faccia riferimento alla figura 3 sottostante. Dall'immagine si può notare che sulla testina di stampa è montato un rullo al fine si livellare il piano sottostante prima di un nuovo strato di materiale.[7]

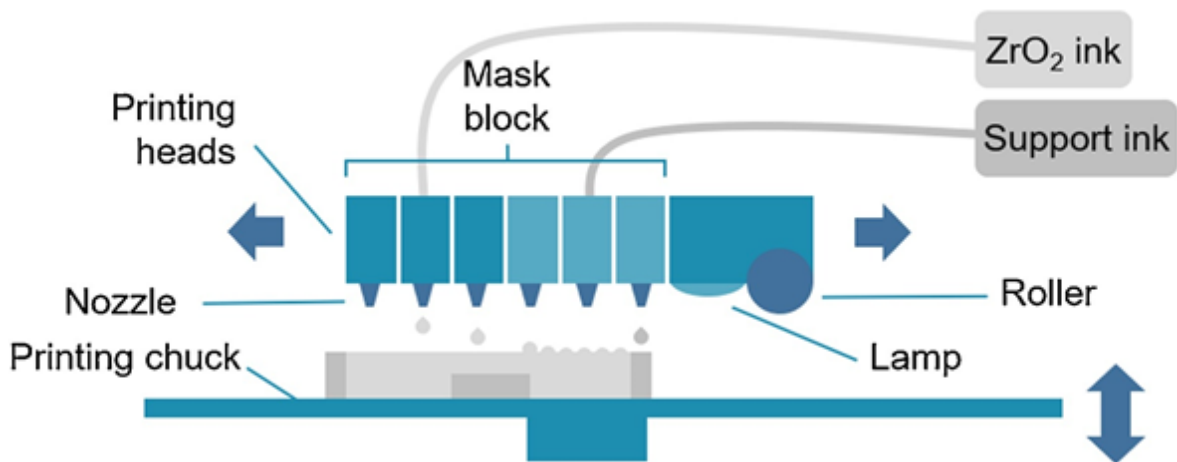


Figura 3: Schema illustrativo Material Jetting

1.3.4 Binder Jetting

La tecnica prevede l'utilizzo di due componenti fondamentali: un materiale di base sotto forma di polvere, che andrà a costituire la maggior parte dell'effettivo oggetto da stampare, ed un legante, detto in inglese binder, che viene depositato allo stato liquido per poi solidificarsi successivamente. 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 deposizione 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 lavorazioni. 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 alle 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 lavorazione. 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. In conclusione, pur essendo una tecnologia con delle difettosità non indifferenti, la possibilità di stampare oggetti in metallo senza attrezzature ausiliare la rendono una tecnologia molto appetibile.[8]

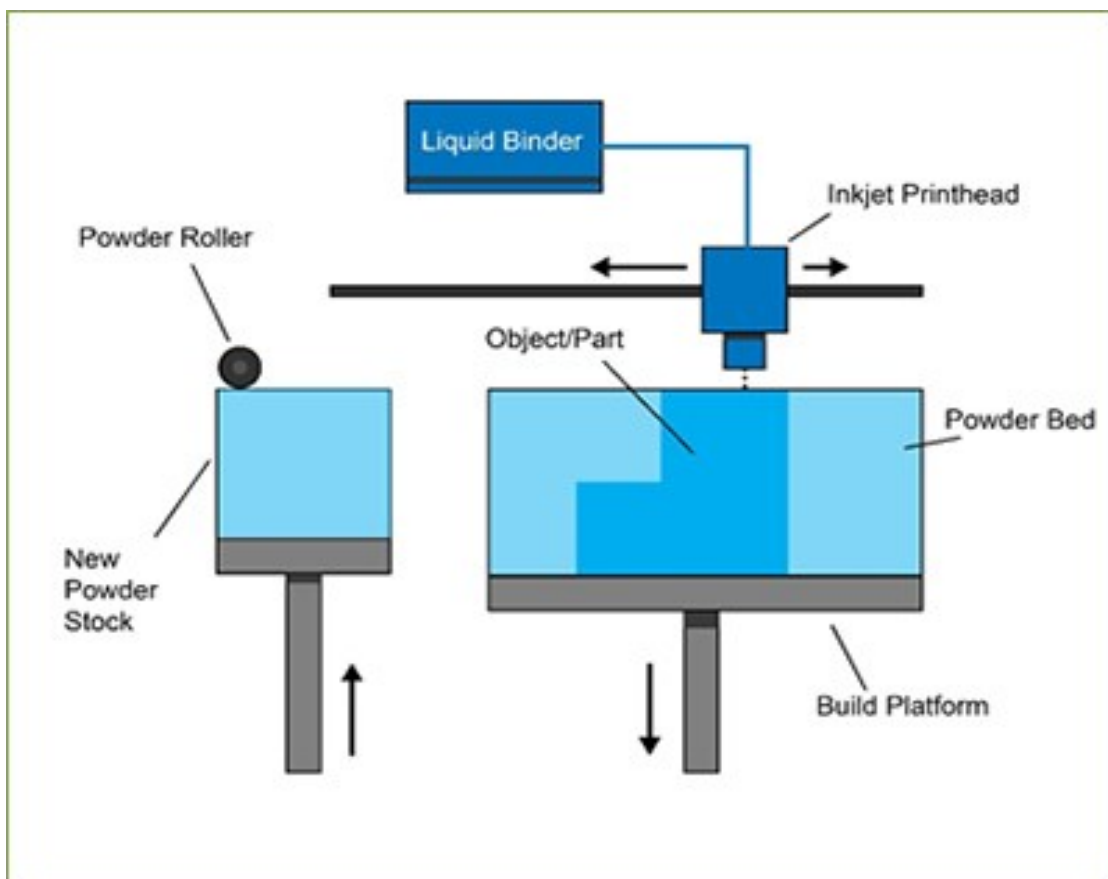


Figura 4: Schema illustrativo Binder Jetting

1.4 Tecnologie di fabbricazione AM per materiali metallici

Si procede ora a parlare di quelli che sono i materiali più interessanti per l'industria: i metalli. Pur essendo più costosi, sono insostituibili per le applicazioni ingegneristiche grazie sia alle loro caratteristiche chimico fisiche (resistenza alle alte temperature e alla corrosione) ma soprattutto alle proprietà meccaniche.

1.4.1 Powder Bed Fusion

Il processo di Powder 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)

La base di funzionamento di tali processi si basa sulla fusione e successiva solidificazione di un letto di polvere tramite una sorgente di energia termica. A ogni strato completato la piattaforma si abbassa e un nuovo strato di polvere metallica viene posizionato, il materiale non processato viene raccolto per essere riutilizzato. La tecnologia di stampa 3D SLS è nata alla fine degli anni '80 presso l'Università del Texas ad Austin. Nelle macchine che sfruttano la procedura SLS ci sono principalmente tre 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 vanno ad utilizzare o dei rulli o delle lame in movimento). Un laser fisso dirige il fascio verso uno specchio mobile che la direzione e colpisce la polvere che viene sinterizzata legandosi ai granelli circostanti con legami molecolari. 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 a 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 un azoto per prevenire fenomeni di ossidazione e aumentare la qualità finale del modello, i modelli necessitano di tempo per raffreddarsi affinché la qualità del pezzo risulti adeguata. Alcune macchine vanno a monitorare la temperatura strato per strato e adattano la potenza per migliorarne la qualità. Il prodotto finale, avvolto da polvere sciolta, viene quindi pulito con spazzole e aria compressa. I materiali principali utilizzati nel processo di stampa 3D SLS includono poliammide (nylon), alumide (una miscela di polvere di alluminio grigio e poliammide) e materiali simili alla gomma. I materiali in nylon sono forti e duri ma presentano

una certa flessibilità, che li rende eccellenti per incastri a scatto, staffe, clip e qualsivoglia applicazione in cui si necessita di elevate proprietà elastiche. I progettisti dovrebbero prendere in considerazione la suscettibilità al restringimento e alla deformazione delle parti sottili durante la fase di progettazione del pezzo. L'SLM a confronto con SLS risulta solitamente più veloce seppur con una richiesta energetica del 10-20% superiore, rispetto alla precedente i singoli granelli vanno ad essere fusi in un pezzo monolitico, inoltre, tale metodologia può essere usata su 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 tecnologia usa una testina di stampa riscaldata che va a fondere la polvere metallica insieme. L'uso di una testina riscaldata al posto del laser va a beneficio del processo poiché si riduce sia il calore che la potenza richiesta, andando però a limitarne l'uso; infatti, i materiali che possono essere utilizzati sono principalmente termoplastiche e il loro scopo è confinato alla realizzazione di prototipi. La DMLS usa lo stesso processo della SLS, ma va ad utilizzare unicamente metalli che variano su un range molto più ampio e più adatti a scopi ingegneristici, tra cui molte leghe che possono essere usate sia nel settore della gioielleria che nell'odontoiatrico. L'EBM sfrutta un fascio di elettroni come fonte di energia termica che, prima di colpire il letto di polvere, vengono direzionati lungo la traiettoria impostata facendoli passare tra due magneti rotanti ad anello, sebbene tali metodi richiedano 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 pezzi con una resistenza meccanica molto elevata grazie soprattutto a livelli di temperatura omogenei su tutto il pezzo in stampa, rendendola una tecnologia molto interessante per la realizzazione di pezzi con standard molto elevati destinati al settore aereo e medico. Un esempio applicativo di tale tecnologia può essere visto nella realizzazione di protesi all'anca, rispetto ai macchinari CNC (Controllo Numerico computerizzato) usando l'EBM con titanio e uno spessore del layer di 0,1 mm, si possono ottenere migliori risultati, in un tempo molto più rapido 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 l'utilizzo di alcun laser o fascio di elettroni bensì essa prevede l'utilizzo di agenti fondenti che vengono sparati con un getto sulla superficie del pezzo e successivamente consolidati attraverso il riscaldamento del pezzo. [9]

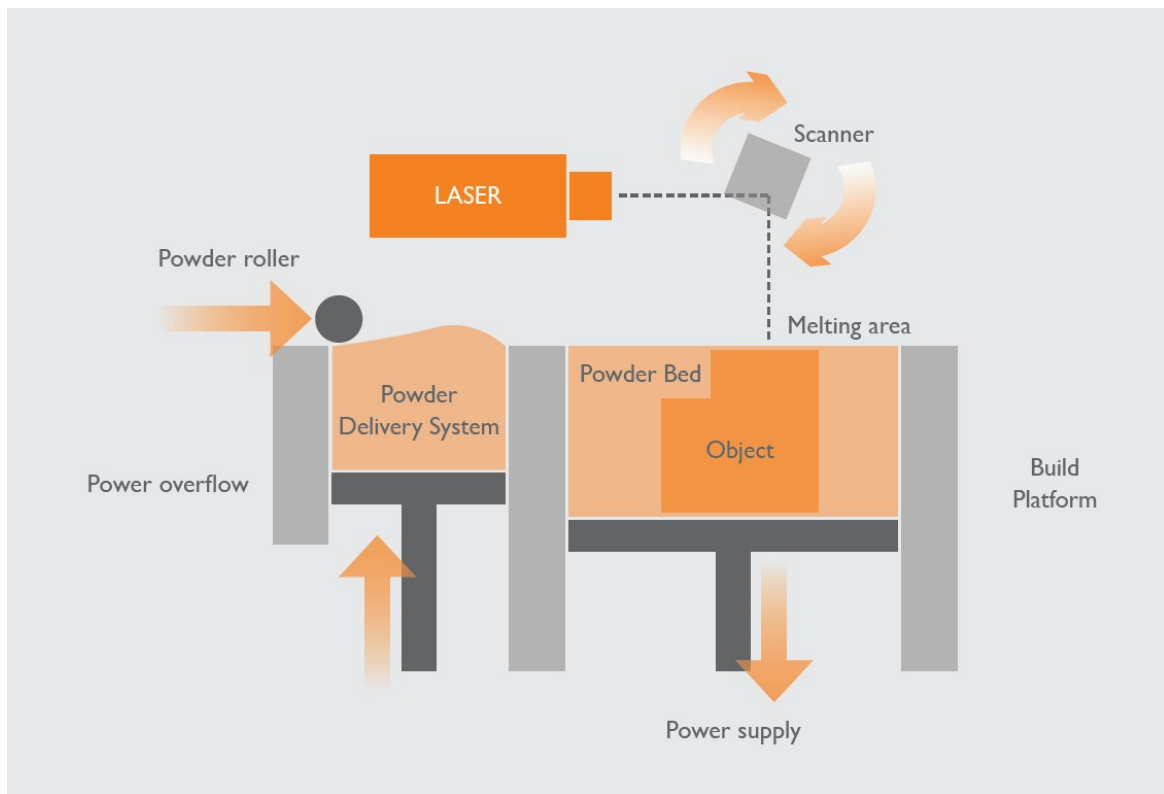


Figura 5: Schema illustrativo Power Bed Fusion

1.4.2 Direct Energy Deposition

La DED rappresenta forse il processo di stampa tridimensionale più complesso, tipicamente viene usato per eseguire operazioni di riparazione o aggiungere materiali a componenti preesistenti. Non è tuttavia impossibile creare con tale tecnica oggetti dal nulla, ma ciò è molto raro, si usa spesso nel settore industriale per la riparazione di pale nelle turbine o eliche. Come molte tecnologie della PBF, la DED sfrutta una fonte di energia termica concentrata, quali laser o fascio di elettroni, per mandare a fusione il materiale. La differenza sostanziale sta nel fatto che il materiale è fuso nel momento stesso che viene espulso dall'ugello. Si può dire che tale metodologia si trova a metà strada tra la Material Extrusion e la Power bed fusion. Si nota inoltre che a volte si fa riferimento alla DED come Laser Engineered Net Shaping (LENS), Direct Metal Deposition (DMD), Electron Beam Additive Manufacturing (EBAM), etc. a seconda della specifica applicazione o metodo. Come in ogni altra tecnologia AM si parte da un modello CAD, che viene tagliato tramite un software di slicing e la macchina inizia 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. Il materiale

che alimenta l'ugello può essere sia sotto forma di filo oppure di polvere, nel secondo 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, si usa solitamente 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 di elettroni, il processo deve essere realizzato in presenza di vuoto, per prevenire che gli elettroni interagiscano o vengano deviati dalle molecole di aria. Se si lavora invece con sistemi laser occorrerà una camera inerte per evitare reazioni di ossidazione, occorrerà quindi un'elevata quantità di gas per avere livelli di ossigeno sufficientemente bassi. Questa tecnologia è principalmente utilizzata con i metalli, tuttavia è possibile utilizzare anche polimeri e materiali ceramici; Per esempio, alcune aziende usano la DED per la fabbricazione di oggetti ultraleggeri in fibra di carbonio destinati all'uso diretto. Per quanto riguarda i materiali metallici, ogni metallo saldabile si presta alla DED.[10][11]

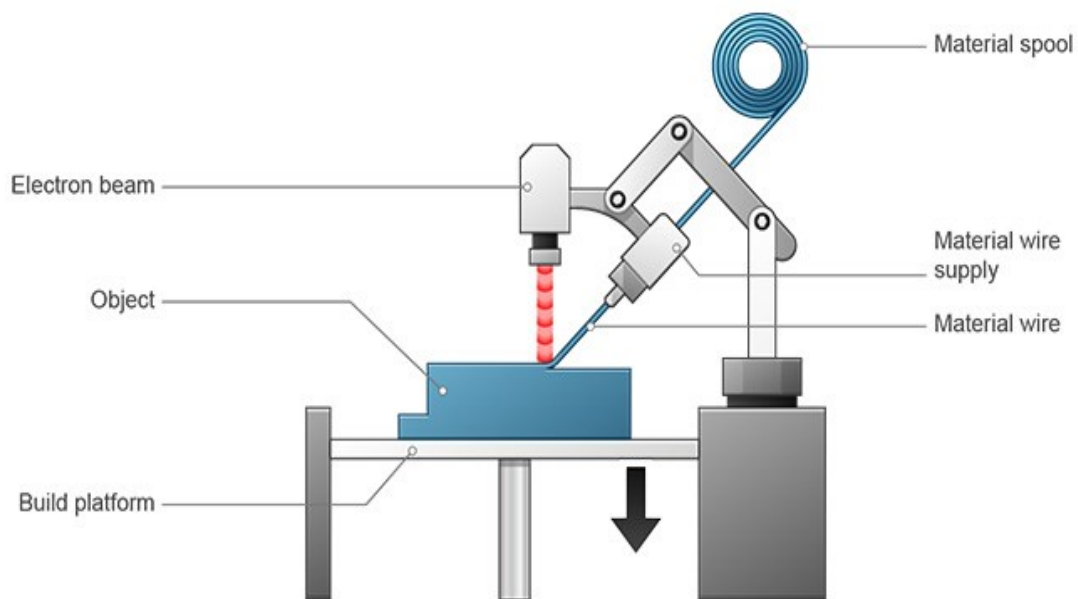


Figura 6: Schema illustrativo Direct Energy Deposition

1.4.3 Sheet Lamination

I processi di sheet lamination includono l'Ultrasonic Additive Manufacturing (UAM) and Laminated Object Manufacturing (LOM). L' UAM usa lamine o nastri di metallo che vengono legati insieme

usando la saldatura a 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 usa un approccio strato su strato simile ma usa come materiale la carta e agenti adesivi al posto della saldatura. Nella LOM viene utilizzata una deposizione a 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 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 non va a fusione. [12]

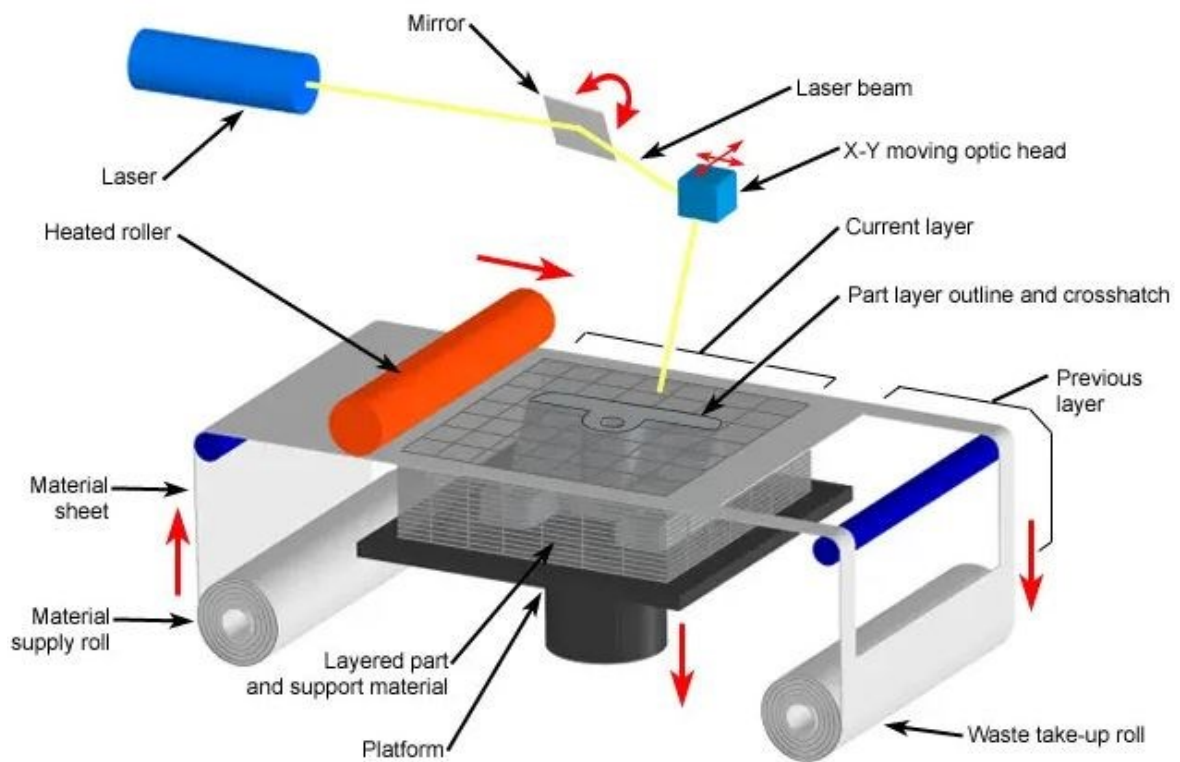


Figura 7: Schema illustrativo Sheet Lamination

Capitolo 2: Processo di Bound Metal Deposition

In questo studio si andrà ad analizzare il processo di Bound Metal Deposition (BMD). Tale tecnica appartiene, secondo la ASTM, alla famiglia di lavorazioni della Material extrusion, pertanto, come è facile intuire, si basa sulla estrusione e permette la produzione di prodotti metallici. La BMD è un processo multistadio che si divide in tre step:

- Stampaggio
- Debinding
- Sinterizzazione

2.1 Stampaggio

Si procede ora alla analisi di questi tre passaggi con l'utilizzo della Studio system™ della Desktop Metal, un sistema sviluppato nel 2015 costituito da tre macchinari complementari che si occupano ognuno di una fase del processo. Prima dell'inizio vero e proprio della stampa occorrerà procedere, come in ogni tecnologia AM, alla realizzazione di un modello CAD raffigurante la geometria del pezzo da realizzare. Tale modello verrà poi convertito mediante un software di slicing in un file .STL, il modello è ridotto a un insieme di superfici chiuse che vanno a formare il modello tridimensionale, in modo quindi da poter suddividere l'immagine nei vari layer da realizzare. L'informazione viene poi trasmessa al software DM Fabricate, programma ufficiale della Desktop Metal, il quale permette il monitoraggio e il controllo delle fasi di processo. Il programma permette all'operatore di andare a modificare ogni aspetto della lavorazione, primi fra tutti i parametri di stampa. Una volta che si saranno scelti i vari set di valori da utilizzare, il software permette la visualizzazione del modello da stampare e permette il processo di sezionamento della figura in direzione parallela o trasversale al layer, in modo che l'operatore riesca a visualizzare in maniera efficace se ci sono errore di input come, ad esempio, nello spessore del layer o nell'angolazione del filamento. Una volta verificato che non ci siano errori, il programma converte il file .STL, in un file .gcode, una serie di istruzioni da dare alla macchina per la realizzazione del pezzo. Contemporaneamente il DM Fabricate fornisce all'operatore i vari tempi di lavorazione, sia quello totale che dei singoli passaggi, ciò è possibile poiché le tre macchine sono interconnesse tramite cloud; da, inoltre, una stima della quantità di materiale utilizzato e il suo costo monetario. Si osservi la Figura 8 come esempio. Una funzionalità che non può essere trascurata del software DM Fabricate è sicuramente il suo archivio di modelli.

Nel programma sono precaricati modelli 3d di oggetti che sono stati realizzati in precedenza dalla Desktop Metal. È inoltre possibile per l'operatore, una volta settati i parametri di stampa, il materiale da utilizzare e il modello di riferimento, salvare tutte queste impostazioni e caricarle nell'archivio, affinché esse siano immediatamente disponibili per essere mandate in stampa senza dover di nuovo controllare i valori.

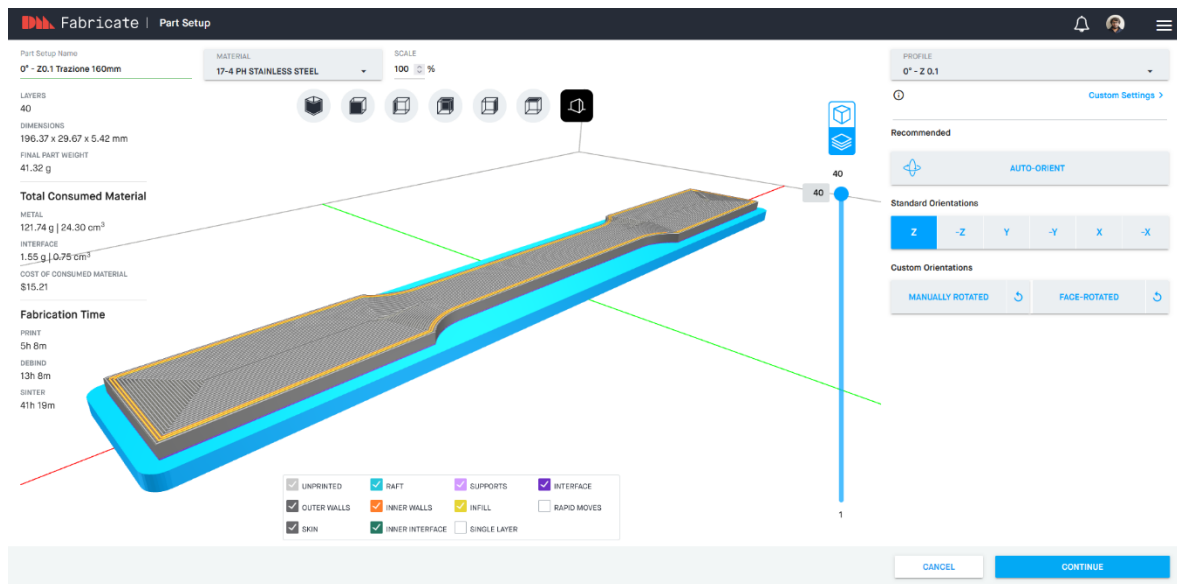


Figura 8: Interfaccia DM Fabricate usata per la realizzazione di un provino di trazione secondo la normativa ASTM E8

Il file viene inviato dunque alla stampante e verrà messo nella coda di stampa, sarà l'operatore a selezionare lo specifico job da avviare dall'interfaccia touch presente sulla macchina. Prima di ciò è buona norma, se si tratta della prima stampa dopo tanto tempo, eseguire un livellamento del letto di deposizione, ciò si realizza mediante la stampa di alcune scale graduate dalle quali l'operatore ricava le informazioni per la calibrazione tramite istruzioni fornite dalla stessa stampante, inserendole infine nella stessa. La macchina procede ora a tre check prima di iniziare la lavorazione. Il primo check riguarda il controllo del materiale caricato nella macchina, si verifica cioè che le cartucce del materiale di base e del materiale di interfaccia, situate in un alloggiamento posto sulla parte superiore della stampante, abbiano barrette sufficienti per lo svolgimento dell'intera operazione. Il secondo check serve a verificare se i due estrusori montati sulla stampante siano compatibili con la lavorazione. Nel DM Fabricate l'operatore avrà selezionato una specifica larghezza del layer o tipo di materiale, a cui sarà quindi associato uno specifico estrusore. Se l'estrusore montato sulla stampante non è compatibile verrà visualizzato un messaggio di errore che blocca la lavorazione finché l'operatore non lo sostituisce. L'ultimo check prevede il controllo di eventuali ostruzioni sulla punta degli estrusori, che vengono rimosse facendo passare la punta su alcune spazzole all'interno della camera di stampa, facendo contemporaneamente uscire una piccola quantità di materiale.

Conclusi questi check può iniziare la vera e propria stampa, una volta che gli estrusori avranno raggiunto la temperatura di estrusione. Il processo di stampa si svolge similmente a quanto visto in precedenza nella Material Extrusion, i due estrusori si muovono su delle guide parallele al piano di stampa, mediante dei meccanismi a vite senza fine messo in movimento da un sistema elettrico. Il piano di stampa invece si muove in verso l'alto o verso il basso tramite un sistema a fisarmonica, il foglio su cui si va a depositare il getto è tenuto fermo durante il processo mediante la creazione di vuoto. In primis si stampa il supporto della figura e lo si separa dalla stesa con il materiale di interfaccia al fine di facilitarne il distacco dall'oggetto finale, poi il pezzo vero e proprio partendo prima dalla definizione dei bordi, per evitare fuoriuscite, poi della parte interna, procedendo strato per strato fino all'ottenimento del manufatto tridimensionale. Una importante novità della studio system™ è che la presenza di parti modulari quale ad esempio gli estrusori e le cartucce che permettono rispettivamente la sostituzione della parte e la ricarica di materiale istantanea (anche quando la macchina è in fase di run) rispetto alle altre stampanti che usano la stessa tecnologia. Una volta completata la stampa e rimossi i provini dalla macchina, si procede con i trattamenti post-stampa di pulitura superficiale mediante carta abrasiva o sabbiatrice, a seconda della finitura superficiale che si vuole ottenere, onde rimuovere l'impronta del filamento e rendere la superficie più omogenea possibile. L'operazione va effettuata in questa fase poiché il materiale è ancora sotto forma di polvere, se si procedesse con la sinterizzazione la rimozione del materiale superficiale sarebbe molto più ardua perché il metallo si è consolidato.

2.2 Debinding

Finita tale operazione i manufatti vengono accuratamente rimossi dal foglio di stampa, che è a sua volta distaccato dalla base ed appoggiati su un cestello. Il cestello verrà poi alloggiato all'interno della macchina chiamata debinder, ovvero la macchina che si occupa del secondo step del processo. Il debinder può essere considerato come una vasca che viene riempita da un particolare fluido solvente con lo scopo di dissolvere il legante che tiene aggregate le polveri, al fine di rimuovere il più possibile la componente di resina e lasciare solo la polvere metallica. La restante resina verrà eliminata nello step successivo attraverso la cottura del pezzo in fornace, l'operatore deve inoltre tenere in considerazione che questi due processi portano ad un restringimento del pezzo pari a circa il 20 % e quindi in fase di progettazione occorrerà effettuare un sovradimensionamento. Una volta collocato quindi il cestello al suo interno e chiusa ermeticamente la camera principale, l'operazione di debinding può iniziare. Il processo di debinding è un processo abbastanza lungo, può essere necessario anche più di un giorno, a seconda della quantità di materiale a bagno. Nel

cestello di immersione possono essere alloggiati anche più parti realizzate con parametri di stampa diversi e perciò provenienti da diversi cicli di stampaggio. È buona norma riempire al massimo il cestello affinché si riduca il numero dei bagni e quindi il tempo di lavorazione. Nel nostro studio si è proceduto a stampare prima tutti i provini con i diversi parametri di stampa, per poi andare ad eseguire un unico bagno, al fine di ottimizzare i tempi di lavorazione. Nella realizzazione di questa macchina la Desktop Metal ha focalizzato la sua attenzione al rispetto dell'ambiente. Il debinder è infatti dotato di un design volto a limitare le emissioni che si sviluppano nel processo. Non è pertanto necessario l'utilizzo di dispositivi per il ricircolo dell'aria, cosa che rende il debinder della studio system™ adatto anche agli uffici. Grazie anche al sistema di filtraggio e riciclo del fluido solvente di cui è dotata non è necessario il refill di liquido dopo ogni ciclo. La macchina inoltre procede all'asciugatura del pezzo in maniera tale che l'operatore non entri mai in contatto con il liquido di debind, non devono cioè essere dotati di oggetti per la protezione personale quali guanti o maschere. Concluso quello che è il processo di debinding, i pezzi si trovano ad essere in uno stato molto fragile, avendo rimosso l'elemento che teneva unite le polveri, per questo devono essere maneggiati con estrema attenzione, poiché anche una lieve pressione potrebbe comportare la loro rottura.

2.3 Sinterizzazione

Estratto il pezzo debinderizzato dal cestello esso viene posto sopra un ripiano in carbonio affinché esso subisca l'ultimo processo in un forno di sinterizzazione. All'interno del forno sono posti vari ripiani in modo da massimizzare i pezzi che possono subire tale trattamento, bisogna fare però attenzione che nel collocarli, non devono andare a contatto con le resistenze elettriche presenti all'interno. Questa fase prevede la fusione e successivo consolidamento delle polveri metalliche attraverso il processo che prende il nome di sinterizzazione. Tale stadio avviene a temperature elevatissime che vengono mantenute per moltissime ore, ma, come in precedenza, il tempo effettivo dipende dalla quantità di pezzi all'interno del forno ed il calcolo effettivo come detto viene effettuato dal software DM Fabricate che gestisce tramite cloud tutti i processi. Nel nostro studio, utilizzando provini in 17-4 PH, il forno raggiunge temperature di circa 1400°C e il processo ha una durata che si attesta sulle 40 ore. Una volta che il forno viene chiuso, viene introdotto all'interno dei vari ripiani argon al 97% (gas inerte) al fine di andare a ridurre i livelli di ossigeno, limitando il fenomeno di ossidazione. Al termine della sinterizzazione i pezzi vengono estratti e si può procedere con la separazione dell'oggetto vero e proprio dal suo supporto. Tale operazione può essere svolta anche a mano, nel forno il materiale di interfaccia si è seccato, assumendo una

consistenza simile al gesso, per si sgretola facilmente, l'oggetto e il supporto possono essere quindi rimossi mediante una semplice azione di torsione. Successivamente alla sinterizzazione il pezzo si trova ad avere una densità che varia dal 96% al 99,8% rendendo di fatto l'oggetto di per sé già pronto all'uso con una forma molto simile a quella finale. In alternativa il forno potrebbe essere utilizzato per dei trattamenti termici post-stampa, volti a migliorare le caratteristiche meccaniche degli oggetti metallici. Come si vedrà in seguito, utilizzeremo il forno per il trattamento di invecchiamento dei nostri provini in 17-4 PH. In conclusione, si procede a una analisi accurata di quelli che sono i vantaggi offerti dalla Studio system™ rispetto a un altro sistema per AM. I tre macchinari AM prevedono come detto una elevata riduzione delle emissioni, mettendo le basi per lo sviluppo sempre più ecosostenibile delle stampanti 3d. Le loro dimensioni ridotte permettono inoltre la possibilità di collocarle in qualsiasi zona di lavoro, basti pensare che il forno di sinterizzazione, pur essendo l'elemento con le maggiori dimensioni, ha uno spessore e una altezza tali da permetterne il passaggio anche da una porta d'ufficio. [13]



Figura 9: Macchine costitutive della studio system da sinistra: Stampante, Debinder e forno di sinterizzazione

2.4 Parametri di stampa

Fin ora ci siamo limitati a definire come variano le caratteristiche di un oggetto, siano esse le proprietà meccaniche o la finitura superficiale, a seconda del procedimento di stampa scelto. Le caratteristiche meccaniche, che sono quelle che più ci interessano, possono essere modificate anche all'interno di uno stesso processo mediante la variazione di quelli che sono i parametri di stampa della lavorazione. Occorrerà quindi ai fini del nostro studio andare a definire i parametri di

stampa della Bound Metal Deposition (BMD), per essere in grado di comprendere e prevenire come variano le proprietà meccaniche al variare di questi. I parametri principali di processo per la tecnologia BMD sono:

- La larghezza del filamento
- L'orientazione del filamento
- La direzione di crescita dei provini nel piano
- Lo spessore del layer
- L'air gap
- La temperatura di estrusione del letto di stampa
- La velocità di estrusione

Al fine di comprendere meglio tali parametri si faccia riferimento alla figura 10, dove sono illustrati solo alcuni dei parametri sopra elencati. In seguito, si procederà a una loro trattazione più specifica al fine di capire quale sia la loro combinazione migliore per migliorare le proprietà meccaniche.

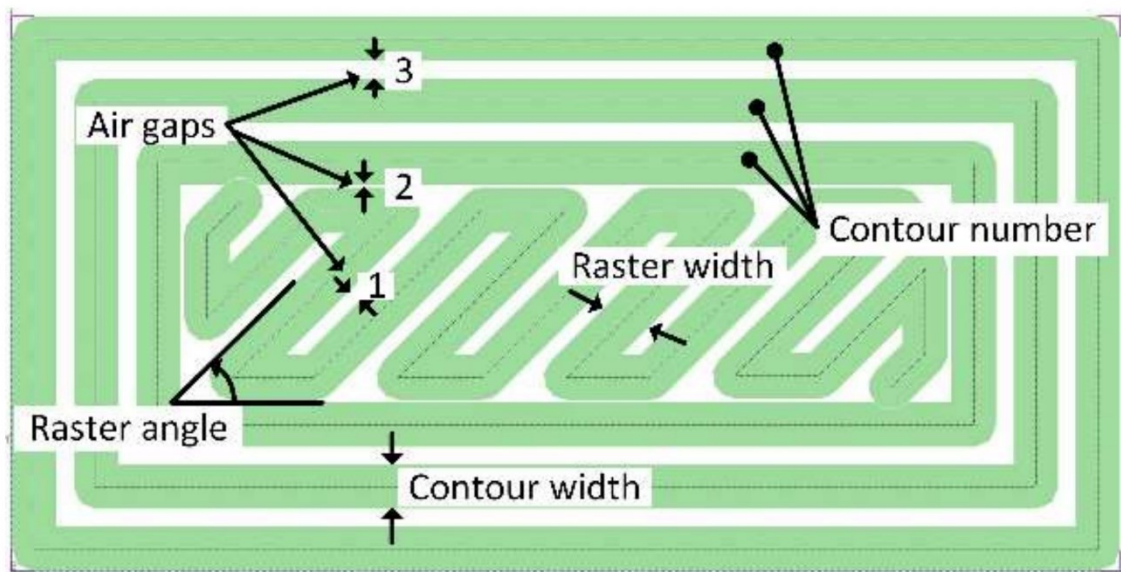


Figura 10: Esempi di parametri del processo di Additive Manufacturing

La larghezza del filamento depositato, raster width, dipende in maniera stretta dalle dimensioni della testa dell'estrusore, i più precisamente dipende dal diametro del foro attraverso il quale il materiale viene estruso, e dal numero di passate necessarie per completare il processo. Seppur questo parametro non sia causa di variazione delle proprietà meccaniche di un oggetto stampato, esso va ad influire in maniera positiva o negativa sulla generale qualità estetica del prodotto

stampato, e sui tempi necessari per produrre tale pezzo. Si può facilmente immaginare come dei filamenti più sottili portino ad una qualità superficiale maggiore, ma tempi di costruzione considerevolmente più lunghi. Per la realizzazione di prodotti con raster width minore occorreranno tempi di produzione più lunghi perché, a parità di superficie coperta, l'ugello dovrà compiere più passate.

Come accennato in precedenza le prime zone su cui viene depositata la resina sono quelle zone che costituiscono il bordo del pezzo nel piano di deposizione, in modo da evitare eventuali fuoriuscite di materiale depositato al suo interno. Completato il bordo, si procede al riempimento seguendo l'architettura definita dall'utente in fase di progettazione del processo, mediante DM Fabricate, strato dopo strato. Tale architettura interna è definita mediante il parametro di stampa detto raster angle, orientazione del filamento, che rappresenta l'angolo che il filo estruso forma rispetto all'asse di riferimento, assumendo valori compresi tra 0° e 90° , intervallati tra di loro solitamente ogni 15° . Si adopera di norma una architettura regolare, ad esempio alternando strati a $+45^\circ/-45^\circ$. Tale parametro influenza in maniera elevata quella che è la resistenza a trazione dell'oggetto, in quanto la direzionalità del processo di deposizione e crescita tipico di questa tecnologia non fa altro che causare anisotropia nelle proprietà meccaniche del manufatto stampato, ovvero le proprietà meccaniche del pezzo vanno a variare rispetto alla direzione nella quale esse vengono misurate. La resistenza di un oggetto stampato risulta altamente influenzata dalla struttura interna del pezzo, poiché con una particolare struttura rispetto ad un'altra posso ottenere dei legami interi tra i diversi layer che dissipano in maniera migliore o peggiore la sollecitazione. Solitamente si ottengono valori più alti di resistenza con angoli di 0° rispetto alla direzione di carico. Il motivo sta nel fatto che la sollecitazione deve vincere le forze di adesione tra i vari layer, lo scollamento pertanto reso più difficoltoso poiché ci sono più legami. Mentre una angolazione di 90° rispetto alla direzione di carico è inefficiente poiché i legami sono ridotti al minimo, creando così peggiori proprietà meccaniche. Nella pratica si preferisce adottare una soluzione con angolazioni alternate $+45^\circ/-45^\circ$ al fine di massimizzare l'isotropia del pezzo, migliorando non solo la resistenza a trazione ma anche la resistenza all'usura, alla fatica e all'impatto. Per concludere è opportuno analizzare la superficie di frattura di un pezzo realizzato con vari raster angle. La frattura si verifica lungo l'interfaccia tra una sezione e l'altra del pezzo, oppure per rottura dei filamenti stessi.

In una tecnica come la BMD che realizza pezzi tramite la deposizione di un filamento, le modalità con le quali è possibile costruire lo stesso pezzo sono molteplici, quindi il risultato finale in termini di performance meccaniche, qualità superficiale ed altre caratteristiche può essere differente. È pertanto importante tener presente, oltre al contributo del raster angle, anche quello della building orientation e molto spesso questi due parametri vengono considerati contemporaneamente. Per

building orientation si intende come il pezzo è posizionato sulla piattaforma durante il processo e quindi la modalità con il quale esso viene costituito in riferimento ad un ipotetico sistema di assi cartesiani X, Y, Z. Solitamente una metodologia usata per distinguere le varie build orientation è quella di utilizzare una coppia di lettere tra X, Y, Z. In cui 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, che solitamente coincide con il piano di stampa, e indicare l'angolo che l'asse del provino forma col piano di riferimento. In figura 11 si riportano tutte le possibili combinazioni tenendo conto sia il raster angle sia la build orientation.

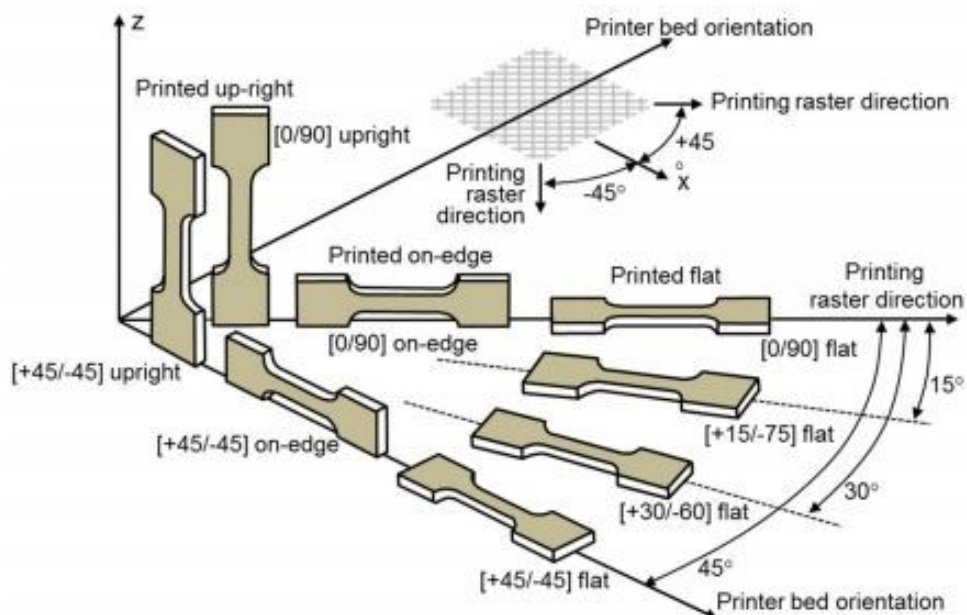


Figura 11: Rappresentazione dell'orientazione di crescita (flat, on-edge, up-right)

Lo spessore dei layer rappresenta il principale responsabile della qualità estetica e della rugosità superficiale del pezzo. 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 stampaggio del singolo layer. Tanto minore è lo spessore del singolo layer e tanto più omogenea risulta la superficie laterale del pezzo, limitando lo staircase effect, ovvero l'incorretta riproduzione di una superficie piana o conica dovuta al fatto che il processo di stampa è a strati successivi; pertanto, l'oggetto assume una superficie a scalino, come mostrato in figura 12.

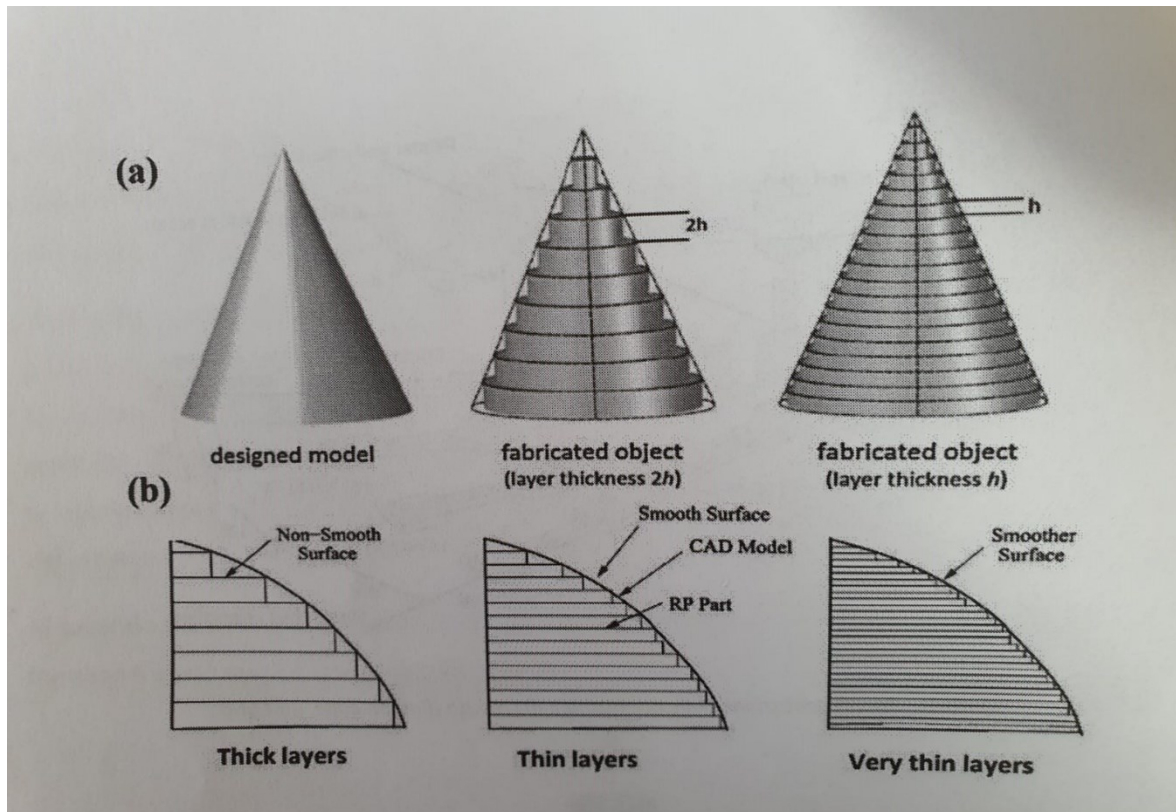


Figura 12: Effetto del numero di strati depositati e del layer thickness sulla riproducibilità di superfici coniche (a) e curve (b)

Per altezze del layer minori, la superficie è in grado di riprodurre al meglio il disegno CAD, d'altra parte, uno spessore minore comporta un incremento nei 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 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 e viceversa più spesse per quelle più planari). Queste considerazioni permettono di capire 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 e quindi 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 l'oggetto in maniera ottimale durante la fabbricazione. L'effetto staircase potrebbe condurre sia ad un eccesso di materiale depositato sia 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 gli strati. L'aumento del numero degli 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, permettendo 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.

L'air gap, cioè la distanza fra due filamenti adiacenti in uno stesso layer, è il parametro che incide maggiormente sulle porosità interne e sulle proprietà meccaniche del pezzo. Essa può essere controllata per ottenere una struttura più densa a discapito però della velocità di produzione. L'air gap, insieme al raster angle ed al layer thickness, ha effetti sulle proprietà meccaniche e sulla velocità d'usura (wear rate) del manufatto stampato. L'air gap è comunque un parametro che dipende in maniera diretta da altri aspetti quali il modello 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, resistenza da raggiungere e decorazioni (ove previste). In generale, maggiore è la percentuale di riempimento, maggiore sarà la resistenza meccanica del pezzo, ma più lunghi saranno i tempi di stampa. Tra i modelli di riempimento maggiormente utilizzati c'è sicuramente la struttura a honeycomb (alveare) che garantisce al contempo leggerezza e ottima resistenza, soprattutto a carichi di compressione in direzione ortogonale al piano.

Senza dubbio i parametri citati in precedenza non rappresentano la totalità delle variabili presenti all'interno del processo. Per la BMD sicuramente tali parametri risultano i più influenti e significativi per quando riguarda le proprietà meccaniche e la finitura. Parametri come velocità di stampa e temperatura del letto di estrusione sono da considerare, ma il loro range di variazione risulta talmente piccolo che vengono considerati a volte come delle vere e proprie costanti del materiale stampato. In conclusione, si può notare come l'influenza di alcuni parametri vari a seconda del materiale utilizzato, ad esempio per alcuni materiali la variazione di un determinato parametro comporta una importante variazione delle proprietà, mentre per un altro, tale variazione risulta del tutto indifferente.

Capitolo 3: Materiali e procedure sperimentali

3.1 Obiettivi dello studio

Lo studio si svilupperà utilizzando come detto i tre macchinari costituenti la Studio System della Desktop Metal. La stampante, più precisamente, verrà sfruttata per la realizzazione di provini ad osso da sottoporre a prova di trazione secondo la normativa di riferimento ASTM E8, garantendo uno stretto controllo dei parametri di processo che influenzano le proprietà meccaniche e la finitura superficiale del materiale. La misurazione delle proprietà tensili avverrà mediante l'utilizzo della macchina di prova universale MTS 810. L'attività di ricerca può dunque essere divisa in quattro distinte fasi.

3.1.1 Fase 1: Individuazione parametri

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, in primis, sulle caratteristiche meccaniche e secondariamente altre, come ad esempio la resistenza a corrosione. In questo specifico caso di studio saranno scelti tre parametri fondamentali, per aiutarci nelle fasi dello studio sarà utile la creazione di una tabella che indichi i parametri che variamo e la loro eventuale combinazione. I risultati attesi dalla Fase 1 sono: individuazione dei parametri fondamentali per la stampa tridimensionale dei provini, creazione della tabella, programmazione del processo.

3.1.2 Fase 2: Realizzazione provini

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 nel caso di BMD al processo di debinding, con la rimozione del materiale resinoso di supporto, e sinterizzazione, svolta in un forno a temperatura elevata per portare a fusione le polveri e consolidarle poi mediante un raffreddamento ad aria. 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.

3.1.3 Fase 3: Estrapolazione risultati

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 normativa di riferimento, 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.

3.1.4 Fase 4: Osservazione complessiva del processo e confronti

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.

3.2 Introduzione all'acciaio 17-4 PH

Il materiale che andremo ad utilizzare per la realizzazione dei nostri provini da sottoporre a prova di trazione, va sotto il nome di 17-4 PH. Questo materiale è un acciaio inossidabile martensitico per indurimento. Andiamo ora a dare una definizione dei termini che ne costituiscono il nome. Per acciaio inossidabile si intende un acciaio resistente alla corrosione, tale peculiarità è dovuta ad un alto tenore di cromo (si faccia riferimento alla tabella 1 per la sua composizione percentuale) che

permette la creazione di uno strato superficiale (fenomeno di passivazione) che impedisce l'ossidazione da parte di agenti chimici esterni, ad esempio l'ossigeno. La martensite è una fase microstrutturale che si sviluppa nell'acciaio a seguito di una deformazione di quella che era la sua struttura iniziale. Questa deformazione microstrutturale è ottenuta nel nostro caso attraverso il processo di indurimento/precipitazione. La sigla PH sta per "precipitation hardening", tale acciaio inossidabile è cioè rinforzato dalla formazione di precipitati di rame che rendono possibile la formazione di una matrice martensitica, ostacolando il movimento delle dislocazioni. In genere gli acciai inossidabili induriti tramite PH hanno una temperatura M_f (martensite finish) maggiore della temperatura ambiente, il che permette la trasformazione completa di austenite in martensite anche a temperatura ambiente senza la necessità di sotto-raffreddamento. I valori di M_s e M_f per il 17-4 PH sono rispettivamente 132 °C e 32 °C. Il processo di precipitazione avviene mediante il trattamento di invecchiamento, a seconda delle necessità il trattamento varia dai 428 °C ai 620 °C. I trattamenti di invecchiamento maggiormente utilizzati sono H900 (482 °C per 1 ora) e H1100 (593 °C per 4 ore). Le proprietà meccaniche con il trattamento di invecchiamento variano secondo due variabili: la temperatura e il tempo. La resistenza incrementa con la temperatura fino a un picco per poi decrescere. Il picco si raggiunge con il trattamento H900, ovvero quando si ha la formazione di cluster di rame a CCC in una matrice di alfa martensite CCC. Se si prosegue con il trattamento di aging sopra a 540 °C, i cluster di precipitati di rame assumono la conformazione cubico a facce centrate (CFC), trovando quello che è il minimo della resistenza a fatica e di resistenza a rottura del materiale. Nel caso invece in cui si procedesse a temperature superiori di 580 °C si potrebbe incorrere nel ritorno della fase austenitica, che va a rendere il materiale più morbido, perciò più duttile e con una maggiore resistenza a fatica. [14]

Il 17-4 PH è uno degli acciai inossidabili induriti per PH più largamente utilizzati, grazie alla sua elevata resistenza alla corrosione, ed alla sua resistenza e durezza, proprietà per il quale lo rendono molto appetibile per soluzioni aeronautiche, nucleari e dell'industria chimica. Il 17-4 PH è utilizzato in queste industrie soprattutto con tecniche di Metal Injection Molding (MIM), insieme ad altri acciai inossidabili quali 304 L e il 316 L. Lo stampaggio a iniezione di metalli o MIM (Metal Injection Molding) è un processo produttivo che combina la versatilità dello stampaggio a iniezione plastica con la resistenza e l'integrità di parti metalliche piccole e complesse, pressate o altrimenti fabbricate. Più piccolo e complesso è il pezzo da produrre, più è ampio il risparmio ottenuto con il MIM rispetto ad altri sistemi di produzione convenzionali che potrebbero addirittura renderne inefficiente o impossibile la produzione. Il processo comprende: injection molding, debinding, sintering, CNC moulding. È una tecnica equivalente alla microfusione a cera persa, ma più efficiente quando si tratta di geometrie complesse. Per esempio, è particolarmente conveniente quando si vogliono ottenere filettature, profili elicoidali, sottosquadra, scritte o altro. MIM, utilizza 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 voluta. Dopo un trattamento di separazione dei polimeri dal metallo (debinding), avviene la sinterizzazione in atmosfera controllata ad una temperatura inferiore a quella di fusione. Dopo la sinterizzazione la densità ottenuta garantirà equivalenti caratteristiche meccaniche di particolari microfusi in cera persa o stampati. [15][16][17]

Nella figura 13 sottostante è possibile osservare lo schema di una classica operazione di iniezione. Nella tabella 1 è presentata la composizione chimica del 17-4 PH con le percentuali in peso. Nelle tabelle 2 e 3 i valori tipici delle lavorazioni MIM molto utili per la trattazione successiva.

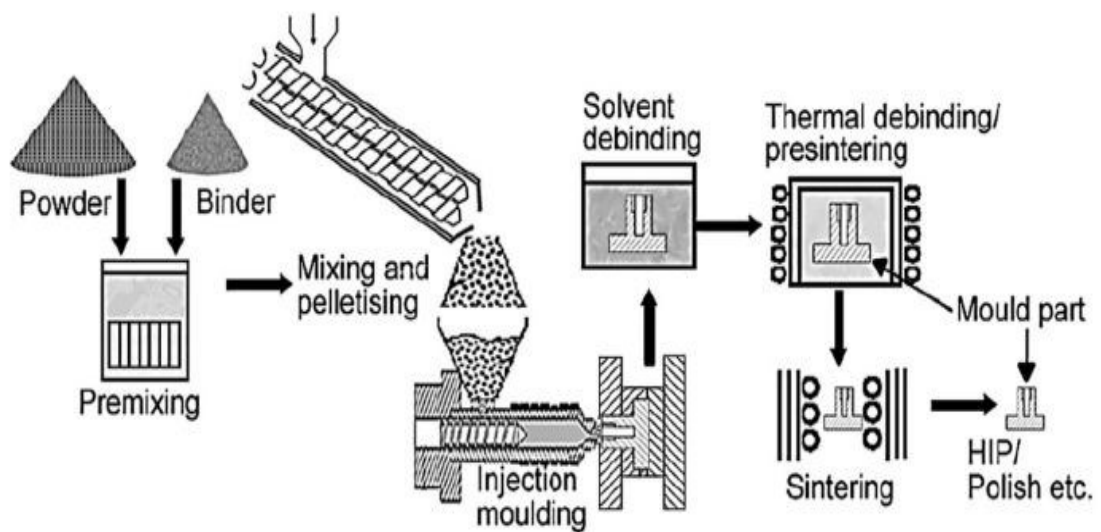


Figura 13: Schema Illustrativo tecnica MIM

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 17-4PH in riferimento alla MPIF Standard 35

Resistenza allo Snervamento (MPa)	650
Carico di rottura (MPa)	790
Allungamento a Rottura (%)	4
Modulo di Young (GPa)	193
Durezza (HRC)	27
Densità (g/cc)	7.5

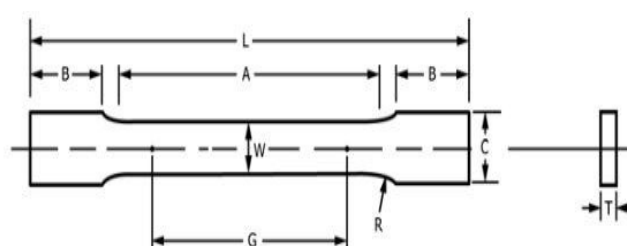
Tabella 3: Tabella dei valori minimi e tipici per lavorazioni MIM del 17-4 PH

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

* Le parti realizzate con MIM-17-4 PH hanno subito il trattamento termico H900 (482°C per 1 ora e raffreddamento in aria)

3.3 Procedure di realizzazione del provino e della prova di trazione

Ora si procede ad analizzare come realmente verrà realizzato il nostro studio, analizzando precisamente ogni singola azione svolta nella realizzazione di questo studio, per poi esporre i dati trovati e commentarli. Nella realizzazione dei provini in 17-4 PH occorre seguire la normativa ASTM E8. La normativa permette la realizzazione di provini standardizzati con specifiche dimensioni, ciò consente la realizzazione di prove di trazione univoche, permettendo quindi la ripetibilità della prova e la sua validità a livello internazionale. Per le prove di trazione si sono dunque utilizzati provini a sezione rettangolare, più precisamente Sheet-Type di 12,5 mm di larghezza. Si osservi la figura 14 per maggiori informazioni sulla forma del provino ad osso e le sue dimensioni.



	Dimensions		
	Standard Specimens		Subsize Specimen
	Plate-Type, 40 mm [1.500 in.] Wide	Sheet-Type, 12.5 mm [0.500 in.] Wide	6 mm [0.250 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 14: Rappresentazione grafica provino di trazione con annessa tabella valori geometrici

Oltre alle informazioni geometriche dei provini, la normativa presenta inoltre una elevata letteratura per quanto riguarda le modalità di realizzazione della prova; Ad esempio, si danno istruzioni sulla velocità con cui deve essere impartita la deformazione, oppure le modalità con le quali devono essere fissate le tenaglie che tengono il provino durante la prova. La realizzazione di tali provini parte, come sempre, dal DM Fabricate. Al fine di ottenere un provino che rispecchi le richieste della normativa si rende necessaria la creazione di una struttura interna totalmente priva di air gap. Questo si fa per rendere i provini generati in AM simili ad una tecnologia classica al fine di poterne effettuare un confronto delle proprietà meccaniche più veritiero. Il programma ha un piccolo deficit per quanto riguarda questo tipo di realizzazione, non essendo in grado di ottenerla

in modo diretto, pertanto, sarà necessario un exploit. 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 si può effettuare, tramite l'apposita funzione del programma, la sezione del pezzo, sia in direzione longitudinale e trasversale, e verificare che all'interno della figura 3d generata dal software non ci siano gap o si ha una particolare orientazione del layer indesiderata, per una maggiore comprensione si faccia riferimento alla figura 8. Una volta fatto ciò è possibile andare a scegliere i parametri di stampa del provino che andrà in stampa. Occorre prima di procedere con la trattazione fare una importante precisazione. Nello studio ivi presentato si analizzerà l'effetto della variazione di soli tre parametri di stampa: direzione di crescita, spessore del layer e larghezza del filamento (diametro del nozzle). Si è giunti a questa scelta al fine di non appesantire troppo la trattazione. Se si fosse aumentato il numero di variabili non si sarebbe stati in grado di 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 di proprietà meccaniche, ed essendo la BMD una tecnologia abbastanza nuova non abbiamo tanti dati sperimentali su cui poter fare affidamento per cui dobbiamo procedere a piccoli step. Detto ciò, si andrà ad impostare i parametri di stampa fissi all'interno del software di gestione, tenendo anche conto di quelle che sono le incertezze di lavorazione. Si faccia riferimento alle tabelle 4 e 5 per, rispettivamente, i valori dei parametri mantenuti costanti e il range di valori dei parametri variabili. La stampa verrà avviata stampando il maggior numero di provini con un determinato set di valori, andando a gestire accuratamente la loro disposizione sul letto di deposizione tramite software DM Fabricate. Fatto ciò, si procede all'ottenimento di tutti i provini destinati alla prova di trazione. Si è provveduto a stamparne un numero superiore al necessario sia per tutelarsi in caso di rotture o errori durante la prova di trazione, sia per poter sottoporre i nostri provini ad eventuali trattamenti termici post-lavorazione. Dopo la stampa, ovviamente, si procede sia alla rimozione della resina tramite debinder, sia alla sinterizzazione tramite forno, ottimizzando i tempi sia per il numero di bagni sia per le varie cotture. Ultimate le varie fasi possiamo procedere a quelli che sono i test di trazione effettuati con una macchina di prova universale MTS 810. L'elevata flessibilità applicativa di tale macchina permette all'operatore di effettuare vari test, non solo prove di trazione o compressione ma anche test di resistenza a fatica, alla corrosione sotto sforzo e prove di resistenza ad alta temperatura.

Tabella 4: Parametri di processo mantenuti costanti

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

Tabella 5: Parametri di processo scelti per il confronto

Parametro	Range di valori
Altezza 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

Le modalità di esecuzione della prova vengono controllate mediante un computer collegato alla macchina tramite un programma LabVIEW. Tramite il software l'operatore è in grado di inserire le modalità con le quali viene eseguita la prova di trazione, ad esempio la velocità di spostamento della traversa, nel nostro caso tale parametro assume un valore di 0.1 m/s. Prima di posizionare i provini sulla macchina occorre misurare i provini tramite un micrometro (più precisamente un Micrometro Mitutoyo per esterni 25-50mm con risoluzione di 0,01mm), per due motivi principali. I trattamenti subiti dal provino non sono deterministici pertanto si potrebbe incappare in deformazioni, causate a volte da un raffreddamento del pezzo troppo veloce, che rendono il pezzo non idoneo alla prova; il secondo motivo è invece pratico, infatti occorre andare ad ottenere dei dati che non siano influenzati dalla geometria del pezzo, per questo motivo i dati riferenti allo spessore e alla larghezza del provino devono essere inseriti in LabVIEW, tali dati sono necessari al sistema di acquisizione per restituire i valori di tensione e deformazione. Misurati i vari provini e annotate le loro dimensioni, si procede alla apertura delle ganasce tramite un sistema idraulico azionato da valvole. Inseriamo il provino nelle due ganasce facendo in modo che queste stringano solo sulle teste, in modo tale che la prova influisca solo sul corpo del nostro provino ad osso. Avviata la procedura tramite programma il provino viene deformato, il computer misura la forza esercitata dalla macchina e la deformazione subita da un provino sia mediante l'utilizzo di un estensometro monoassiale, montato direttamente sulle provini, che di un LVDT. I dati ottenuti dalla prova sono poi convertiti in un file Excel e normalizzati rispetto allo zero, per essere quindi analizzati e confrontati, badando bene di andare ad eliminare tutti i dati che sono stati forniti dalla macchina in seguito alla rottura del provino, essendo essi privi di senso. [18][19][20]

Capitolo 4: Risultati sperimentali e discussione

Saranno analizzati e commentati in seguito alcuni grafici di confronto dei vari provini testati. L'analisi volgerà principalmente su una serie di provini stampati con larghezza layer 0.25mm, spessore 0.10mm e orientati con le tre angolazioni 0°-90°-45°, osservando inoltre l'importanza del trattamento termico.

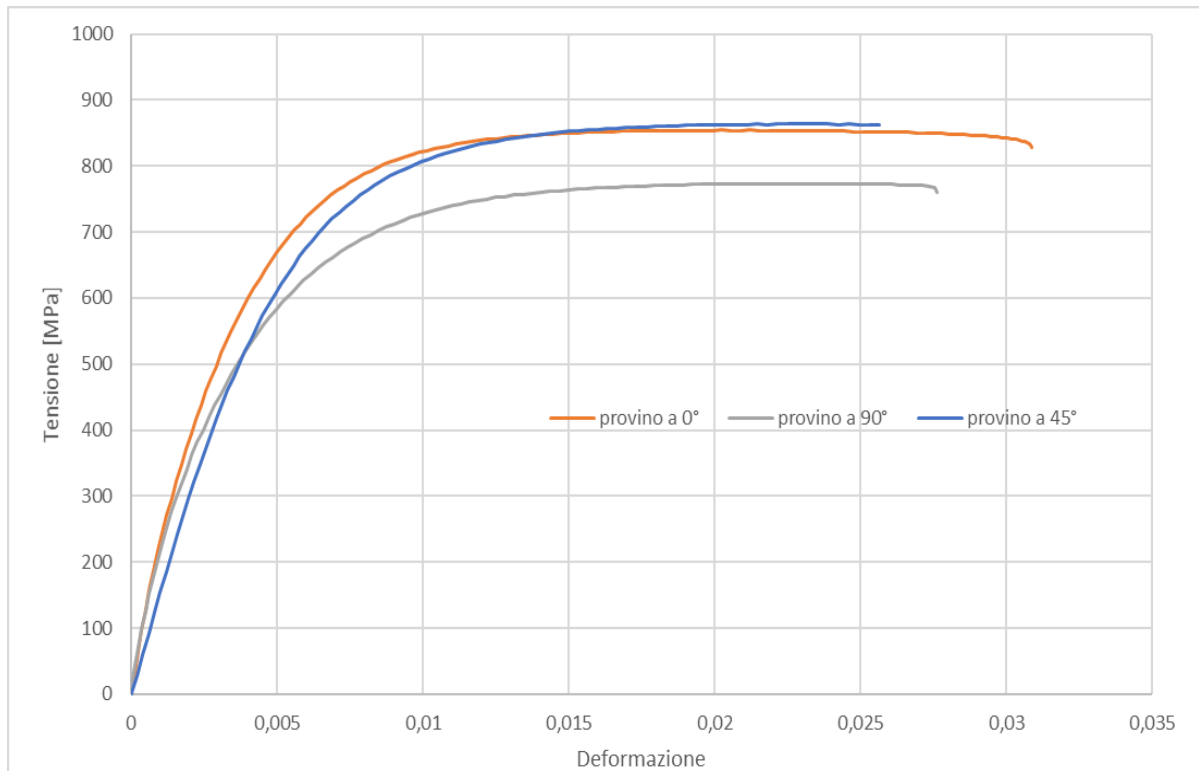


Grafico 1: Curve tensione-deformazione dei provini più rappresentativi stampati con diversa angolazione di crescita

I provini stampati sono stati classificati indicando l'orientazione di crescita e un numero da 1 a 3. I provini con la stessa angolazione e contraddistinti dal numero 1 o 2 sono praticamente uguali e la numerazione è semplicemente usata per distinguerli. Dalle curve di trazione è possibile osservare come provini con stesse caratteristiche possano avere proprietà meccaniche diverse. Questo fenomeno non deve stupire poiché all'interno di una lavorazione AM, in questo caso BMD, alcuni fattori non possono essere controllati alla perfezione per cui si possono avere delle proprietà leggermente differenti. Ad esempio, analizzando la tensione massima a trazione, si osserva:

Tabella 6: Valori di massima resistenza a trazione e modulo di Young di tutti i provini testati ma non trattati termicamente

Tensione massima (σ_{max})	Provini del set 1	Provini del set 2
0°	798,28 MPa	854,39 MPa
45°	863,64 MPa	828,79 MPa
90°	767,79 MPa	773,43 MPa
Modulo di Young (E)	//	//
0°	149,34 GPa	178,80 GPa
45°	148,84 GPa	157,96 GPa
90°	125,54 GPa	155,38 GPa

Come si può notare dalla tabella 6, le differenze tra due provini uguali possono essere più o meno severe ma comunque non a livelli tali da compromettere l'applicabilità del materiale in impieghi strutturali. Dal grafico 1, tuttavia, risulta evidente come le orientazioni migliori siano di 0° e 45°, mentre la configurazione a 90°, risulta inefficiente in entrambi i provini testati. Un importante step di questo studio è, come detto più volte, quello di confrontare i dati ottenuti dalle prove con i dati forniti dalla MPIF Standard 35 anche detta Material Standards for Metal Injection Molded Parts. In tale normativa vengono elencate le caratteristiche meccaniche richieste per gli oggetti realizzati tramite MIM. Poiché la MIM è di gran lunga la tecnologia più utilizzata con l'acciaio inossidabile 17-4 PH, un confronto con i nostri risultati ci permetterà di capire se il nostro provino stampato con la BMD ha caratteristiche meccaniche superiori o inferiori alla normativa, andando di conseguenza a valutare quale sia il processo migliore. Nella normativa oltre alle proprietà meccaniche dei materiali as-sintered, ovvero che non hanno subito nessun trattamento termico a seguito della sinterizzazione, sono presenti le caratteristiche che il materiale deve avere a seguito di alcuni tipi di trattamento termico, come ad esempio H900 e H1100. In questa trattazione analizzeremo principalmente la prima, osservando come variano le proprietà meccaniche dei provini trattati rispetto alla controparte non trattata. Per effettuare tali considerazioni si procederà a trattare termicamente tre provini realizzate con le tre orientazioni viste in precedenza. Il trattamento che si è effettuato, è bene ricordarlo, prevede il riscaldamento del provino nel forno di sinterizzazione fino a 482°C per un'ora e il successivo raffreddamento in aria. Come si può facilmente notare dalla figura 15 sottostante, a seguito del trattamento i provini assumono una colorazione marrone,

dovuta ai precipitati di rame che si vanno a depositare all'interno del reticolo cristallino, costituendo la matrice martensitica.

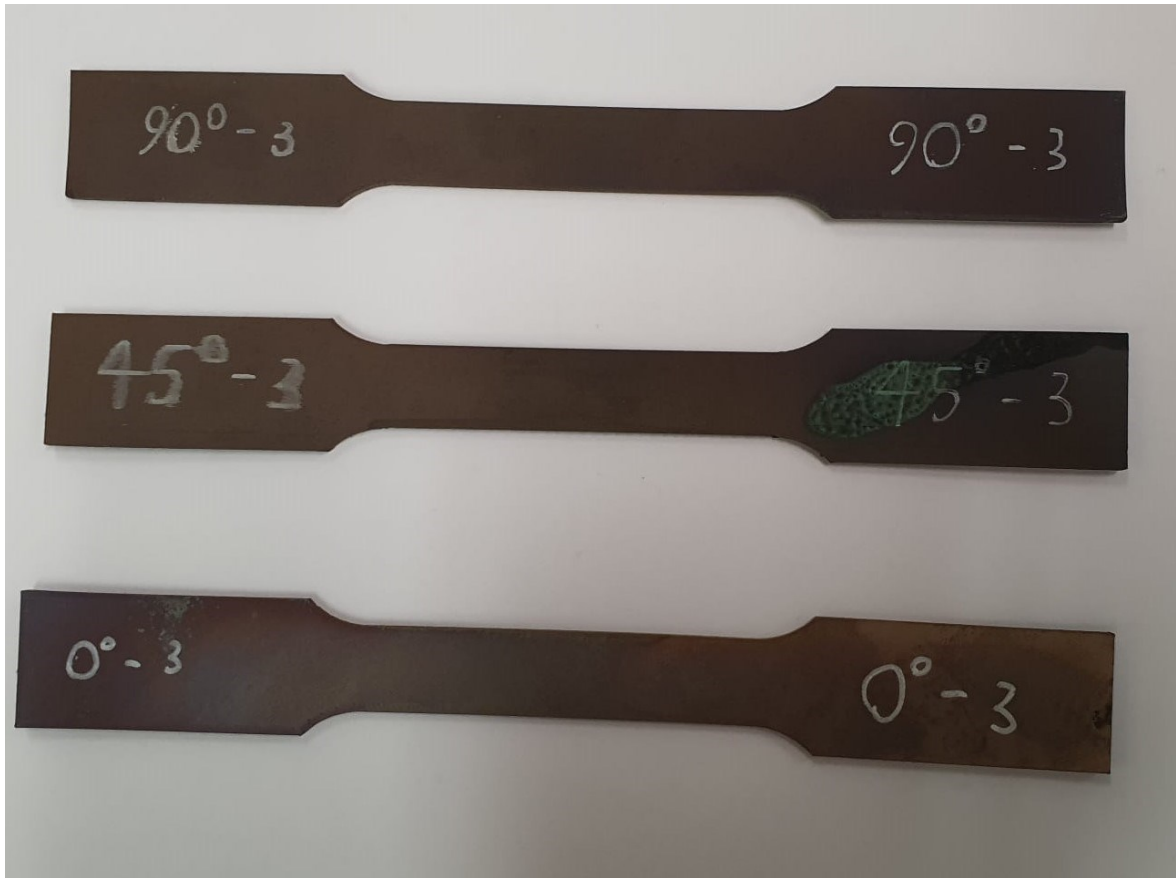


Figura 15: Provini di trazione che hanno subito il trattamento termico H900.

Per semplicità di distinzione si è andati a catalogare i provini trattati termicamente con il numero 3 sulla testa dello stesso. Ora saranno esaminate le performance meccaniche dei provini a seguito del trattamento subito rispetto a quelli non trattati con stessa orientazione. Per farlo si utilizzeranno come in precedenza i grafici tensione-deformazione che sono stati elaborati dalle prove di trazione. Nei grafici presentati di seguito si sono graficate la curva del provino più rappresentativo ad una data angolazione e il corrispettivo provino alla stessa angolazione che ha subito invece il trattamento termico H900.

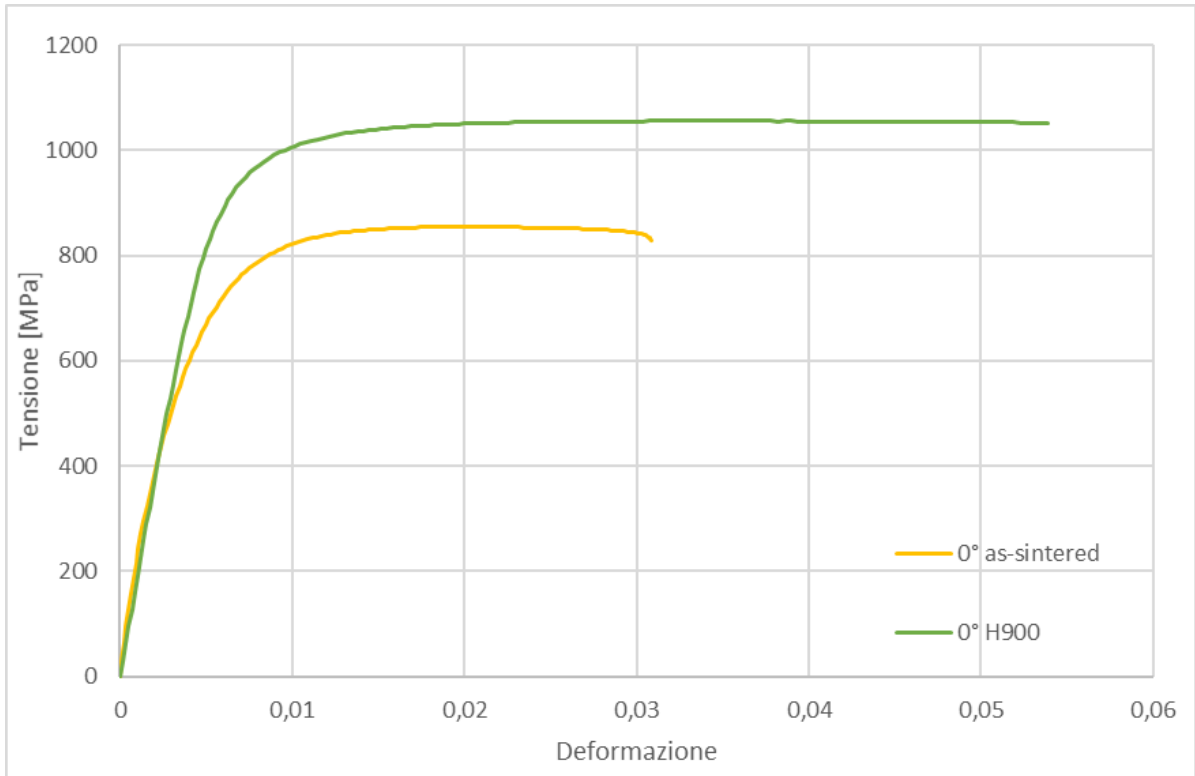


Grafico 2: Curve tensione-deformazione per provini con angolazione di crescita a 0° (0.25mm)

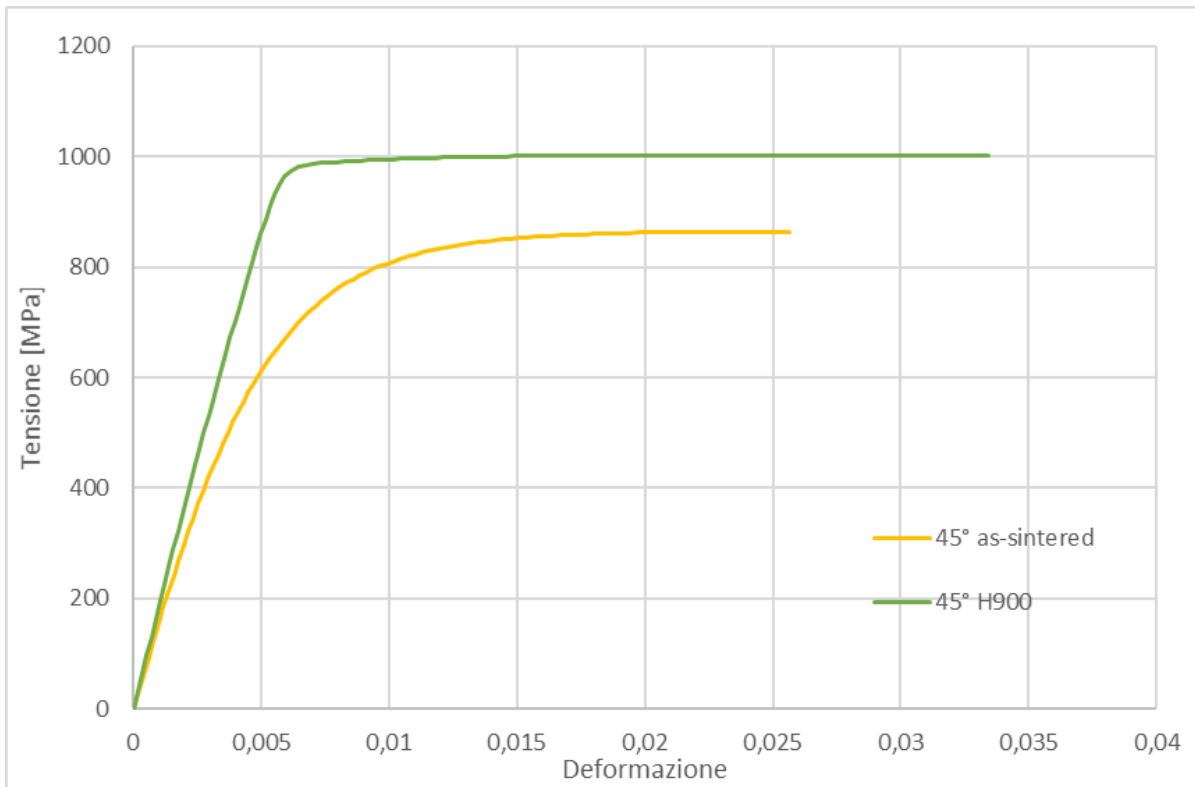


Grafico 3: Curve tensione-deformazione per provini con angolazione di crescita a 45° (0.25mm)

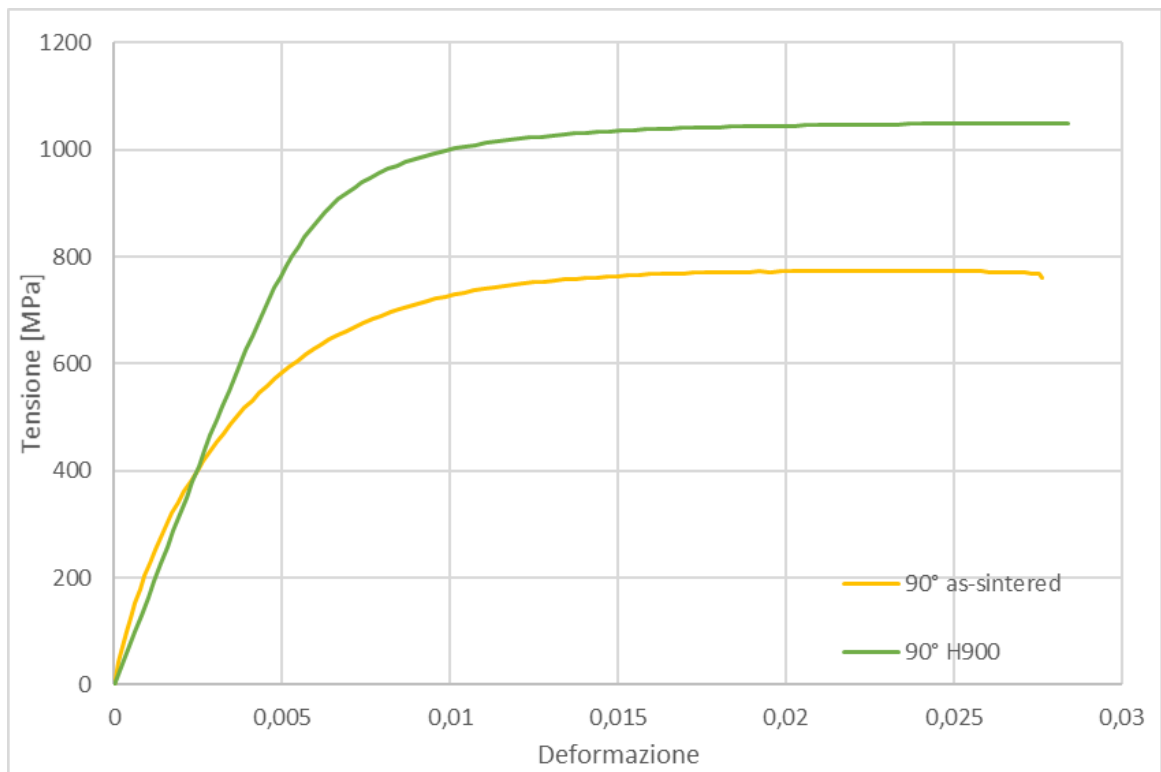


Grafico 4: Curve tensione-deformazione per provini con angolazione di crescita a 90° (0.25mm)

Dai grafici 2, 3 e 4 sovrastanti si può notare come il trattamento termico H900 va a migliorare le proprietà meccaniche dei provini testati. Si nota infatti che i provini trattati raggiungono lo snervamento a sollecitazioni molto più elevate rispetto alla controparte non trattata, le curve non trattate infatti si trovano al di sotto della curva trattata termicamente. Dal grafico, tuttavia, non si è in grado di apprezzare a pieno la potenzialità dei trattamenti termici post-sinterizzazione, per questo motivo è necessario andare a fornire dei valori ben precisi. Come fatto in precedenza per le orientazioni si va a valutare la massima tensione di trazione misurata nella prova di trazione e la si confronta. Per il confronto si sceglie il provino, tra i due non trattati, che ha la migliore resistenza a trazione massima e lo si confronta con il provino trattato termicamente con la stessa orientazione di crescita.

- Nell'orientazione 0° il provino "migliore" è il numero 2, con un valore di massima trazione pari a $\sigma_{0^{\circ}-2} \max = 854,39 \text{ MPa}$, invece con il trattamento termico il provino 3, $\sigma_{0^{\circ}-3} \max = 1055,45 \text{ MPa}$. La differenza di performance è $\Delta\sigma=201,06 \text{ Mpa}$.
- Nell'orientazione 90° il provino "migliore" è il numero 2, con un valore di massima trazione pari a $\sigma_{90^{\circ}-2} \max = 773,43 \text{ MPa}$, invece con il trattamento termico il provino 3, $\sigma_{90^{\circ}-3} \max = 1049,26 \text{ MPa}$. La differenza di performance è $\Delta\sigma=275,82 \text{ Mpa}$.

- Nell'orientazione 45° il provino "migliore" è il numero 1, con un valore di massima trazione pari a $\sigma_{45^\circ-1 \max} = 863,64 \text{ MPa}$, invece con il trattamento termico il provino 3, $\sigma_{45^\circ-3 \max} = 1002,63 \text{ MPa}$. La differenza di performance è $\Delta\sigma=139 \text{ Mpa}$.

Dai calcoli si può facilmente comprendere come i trattamenti termici siano di fondamentale importanza per migliorare le caratteristiche meccaniche. Si deve notare infatti che i tempi necessari per il completamento del trattamento e l'eventuale raffreddamento del pezzo sono molto bassi rispetto ai tempi necessari allo stampaggio del provino. Pertanto, questi processi non sono da considerarsi semplicemente opzionali bensì strettamente necessari se si vogliono ottenere dei manufatti con elevate caratteristiche meccaniche. Si può inoltre effettuare un confronto tra i vari provini trattati termicamente con diversa angolazione di crescita.

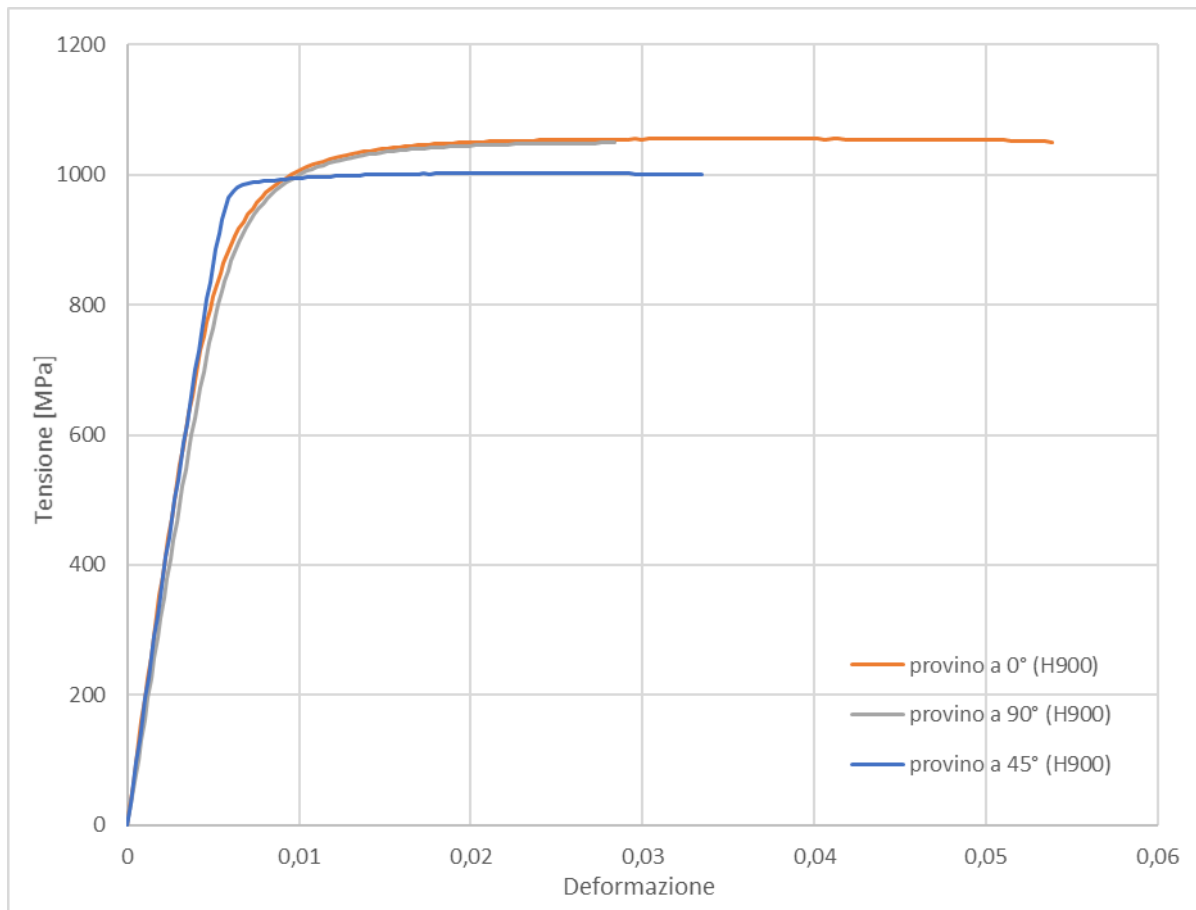


Grafico 5: Curve tensione-deformazione dei provini trattati termicamente stampati con diverse angolazioni di crescita

Dal grafico 5 si può facilmente notare un'altra importante proprietà dei trattamenti termici. Infatti, sia osservando il grafico che i valori fornito in precedenza, si può notare come i trattamenti termici vadano a rendere omogenee le caratteristiche meccaniche dei provini. Dal grafico sovrastante, infatti, si può notare come la curva del provino 0°e del provino 90° vadano quasi ad essere perfettamente coincidenti. Inoltre, dal grafico si può comprendere come il provino 45° non si

discosti più di tanto dagli altri due e l'angolazione del suo tratto elastico è anche molto simile, ciò suggerisce che il modulo di Young molto simile in tutti e tre i casi, permettendo quindi delle deformazioni elastiche quasi coincidenti. Concluse le varie considerazioni sui vari provini stampati, è possibile fare un confronto dei risultati ricavati in questo studio con quelli che sono i valori richiesti dalla normativa MPIF Standard 35. Per osservare i valori minimi e attesi si faccia riferimento alla Tabella 5 nel Capitolo 3.2. [21]

Tabella 7: Tabella riassuntiva di confronto

Provini	Tensione massima (σ_{max}) [MPa]	Modulo di Young (E) [GPa]	Tensione massima da normativa [MPa]	Modulo di Young da normativa [GPa]
0° as-sintered	854,39	178,80	790	193
45° as-sintered	863,64	157,96		
90° as-sintered	773,43	155,38		
0° (H900)	1055,45	184,89	1068	193
45° (H900)	1002,63	182,84		
90° (H900)	1049,26	163,21		

Si può notare come tutti i provini, sia della serie 1 che della serie 2 (ovvero quelli non trattati termicamente), con angolazione di 0° e 45°, si trovano al di sopra dei valori minimi accettabili dalla normativa, per quanto riguarda ovviamente la resistenza massima a trazione. Il valore di tipico invece non è raggiunto a pieno da nessuno dei provini analizzati, ma comunque si tratta di un distacco di 30-40 MPa per i provini 0° e 45°, mentre per l'orientazione di 90° i provini non sono all'altezza delle specifiche richieste non superando neanche i livelli minimi accettabile, sconsigliandone di fatto l'utilizzo con tale orientazione. Se si guarda invece ai provini che hanno subito il trattamento termico H900, troveremo che tali provini non sono stati in grado di soddisfare le richieste minime della normativa. Di fatto i provini con angolazioni di crescita di 0° e 90° possono considerarsi, per così dire, i migliori non riuscendo tuttavia a superare il valore di minimo per poche decine di MPa. La configurazione a 45° in questo caso risulta essere la peggiore essendo di gran lunga al di sotto dei valori di minimo. Per quanto riguarda il modulo di Young si può osservare come, attraverso il trattamento termico, si avvicina molto al valore di normativa. Inoltre, i tre valori del modulo di Young risultano molto vicini gli uni agli altri, omogeneizzando quelle che sono le proprietà nel tratto elastico. Si faccia riferimento alla tabella 7 sovrastante per osservare tali condizioni.

Conclusioni

Il seguente elaborato si è presupposto l'obiettivo di studiare come variano le performance meccaniche dell'acciaio inossidabile 17-4 PH, ottenuto tramite lavorazioni di Additive Manufacturing con la BMD, tramite prove alla macchina di trazione che sono state effettuate su particolari provini. I provini sono stati accuratamente realizzati mediante la predisposizione di alcuni parametri di stampa, che sono stati fatti variare all'interno di range specifici. Attraverso tali prove si è stato in grado di determinare quale configurazione di parametri conferisse le migliori e le peggiori proprietà meccaniche al materiale. I dati e le prove che sono state effettuate in questo studio possono essere così sintetizzati:

- I provini realizzati con un'orientazione di crescita a 0° e 45° rispetto al letto di deposizione hanno mostrato le migliori caratteristiche meccaniche, mostrando rispettivamente un incremento della resistenza a trazione in media pari al 7% e 10% rispetto i provini con angolazione a 90°.
- Le configurazioni a 0° e 45° sono state inoltre in grado di superare i valori minimi ammessi dalla normativa, andando a migliorare il valore della massima resistenza a trazione rispettivamente del 5% e del 7%. Si ricorda che tali valori sono ottenuti facendo la media dei valori ottenuti dai vari provini testati.
- Per quanto riguarda invece i valori tipici delle lavorazioni MIM, i risultati dei provini a 0° e 45° ricadono leggermente al di sotto del valore indicato. Il provino con angolazione a 0° si troverà ad essere al di sotto dell'8% mentre il provino inclinato a 45° si trova al di sotto del 6%. I provini inclinati a 90° invece non sono neanche in grado di superare il valore minimo.
- Un importante informazione ricavata da tale studio è quella che riguarda il trattamento termico H900, che ha permesso l'elevato miglioramento delle proprietà meccaniche in tutti i provini testati. Nelle tre casistiche di orientazione, infatti, si è rilevato un miglioramento delle proprietà pari a circa il 21%. Rendendo di fatto il trattamento termico una scelta non solo consigliabile ma di fatto obbligatoria se si desidera ottenere delle proprietà meccaniche più elevate.
- I provini trattati termicamente non sono stati in grado di superare quelli che erano i valori minimi della normativa MIM anche se di pochissimo. In media i valori di resistenza a trazione risultano essere il 3% inferiori rispetto al valore minimo di resistenza, e 13% inferiori rispetto al valore tipico. Si può notare inoltre che i provini 0°, 90° e 45° trattati hanno un comportamento a trazione quasi identico, rendendo di fatto il trattamento

termico in grado di omogeneizzare i risultati per renderli quasi totalmente indipendenti dall'orientazione di crescita.

- Un altro effetto molto importante del trattamento termico è la sua capacità di rendere omogeneo quello che è il comportamento elastico del materiale. Si nota infatti che il modulo di Young (E) nei tre provini trattati termicamente è quasi uguale; pertanto, avremo che per piccole deformazioni l'angolazione di crescita con cui è creato l'oggetto risulta quasi del tutto indifferente.

Attraverso tale studio si sono andate a dimostrare le capacità realizzative della Bound Metal Deposition. I risultati ottenuti sono da ritenersi più che soddisfacenti essendo questa una tecnologia quasi del tutto inesplorata, i dati forniti in questo studio saranno infatti la base per successive sperimentazioni che andranno senz'altro a migliorare ancora questo processo, andando ad esempio a migliorare ancora quelli che sono i risultati dei trattamenti termici.

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_equipment/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