



**UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE**

**FACOLTA' DI INGEGNERIA**

---

Corso di Laurea triennale in Ingegneria meccanica

**EFFETTO DELLA TIPOLOGIA DI INFILL SULLA RESISTENZA A  
COMPRESSIONE DI COMPONENTI IN MATERIALE COMPOSITO OTTENUTI  
TRAMITE PROCESSO FFF**

**EFFECTS OF INFILL CONFIGURATION ON COMPRESSION RESISTENCE IN  
COMPOSITE COMPONENTS OBTAINED THROUGH FFF PROCESS**

**Relatrice:**

Prof.ssa Michela Simoncini

**Correlatore:**

Dott. Tommaso Mancia

**Tesi di Laurea di:**

Matteo Farella

A.A. 2022 / 2023

## INDICE

<b>1. Introduzione</b> .....	3
<b>2. Stampa 3D</b> .....	5
2.1 Storia della stampa 3D.....	7
2.2 Tipologie di stampanti 3D .....	9
2.3 Campi di applicazione della stampa 3D .....	22
2.4 Materiali.....	24
<b>3 Materiali e procedure sperimentali</b> .....	27
3.1 PLA con fibre di carbonio .....	28
3.2 PETG con fibre di carbonio.....	30
3.3 Parametri di stampa .....	31
3.4 Roboze One <sup>+</sup> 400 <sup>TM</sup> .....	36
3.4.1 Procedura di stampa.....	38
3.5 Altri strumenti.....	39
3.6 Prova di compressione.....	40
3.6.1 MTS 810.....	44
<b>4 Risultati</b> .....	47
<b>5 Conclusioni</b> .....	60
<b>BIBLIOGRAFIA</b> .....	63

## 1. Introduzione

L'industria 4.0 è da alcuni anni al centro della trasformazione economica in Italia e nel mondo, durante la pandemia le tecnologie ad essa collegate si sono rivelate fondamentali per contrastare la crisi. L'industria 4.0 è un processo che scaturisce dalla quarta rivoluzione industriale e che sta portando alla produzione industriale del tutto automatizzata e interconnessa. Le nuove tecnologie digitali avranno un impatto profondo nell'ambito di quattro direttrici di sviluppo:

- utilizzo dei dati, potenza di calcolo e connettività: big data, open data, Internet of Things (IoT), machine-to-machine e cloud computing per la centralizzazione delle informazioni e la loro conservazione.
- analytics: una volta raccolti i dati, bisogna ricavarne valore. Oggi solo l'1% dei dati raccolti viene utilizzato dalle imprese, che potrebbero invece ottenere vantaggi a partire dal "machine learning", cioè dalle macchine che perfezionano la loro resa "imparando" dai dati via via raccolti e analizzati.
- interazione uomo-macchina: interfacce "touch", sempre più diffuse, e la realtà aumentata (AR).
- passaggio dal digitale al "reale": manifattura additiva, stampa 3D, robotica, comunicazioni, interazioni machine-to-machine e le nuove tecnologie per immagazzinare e utilizzare l'energia in modo mirato, razionalizzando i costi e ottimizzando le prestazioni.

L'espressione Industria 4.0 è stata usata per la prima volta alla Fiera di Hannover nel 2011 in Germania. A ottobre 2012 un gruppo di lavoro dedicato all'Industria 4.0, presieduto da Siegfried Dais della multinazionale di ingegneria ed elettronica Robert Bosch GmbH e da Henning Kagermann della Acatech (Accademia tedesca delle Scienze e dell'Ingegneria) presentò al governo federale tedesco una serie di raccomandazioni per la sua implementazione.<sup>[1]</sup> La stampa 3D e l'additive manufacturing (AM) possono essere annoverati quali protagonisti della quarta rivoluzione industriale. Le stampanti 3D, o tridimensionali, hanno superato il loro uso iniziale quale strumento per la produzione di prototipi per arrivare a sfornare componenti e utensili di vario tipo. Il mercato globale della

stampa e dei servizi 3D, riporta Statista, dovrebbe crescere fino a sfiorare i 50 miliardi di dollari entro il 2025. La più recente, futuristica frontiera, è quella del 3D bioprinting, usato per creare cellule umane o tessuti da usare nella medicina rigenerativa, e per produrre farmaci personalizzati.<sup>[2]</sup> Nell'ingegneria meccanica la prototipazione rapida ha assunto sempre più importanza, soprattutto grazie allo sviluppo di nuovi e avanzati materiali compositi da poter stampare in 3D, costituiti da una matrice polimerica e da un materiale di rinforzo. Questo può essere costituito da fibre continue o discontinue mentre la matrice è costituita da uno dei materiali polimerici stampabili in 3D come acido polilattico (PLA), Acrilnitrile-Butadiene Stirene (ABS), nylon, ecc. Il ruolo del materiale di rinforzo è quello di fornire resistenza e rigidità al filamento, mentre la matrice lo protegge. Il progresso di questi materiali compositi ha permesso di ottenere oggetti dall'ottima solidità adatti a creare parti completamente funzionali, ampliando così il campo di applicazione della stampa 3D per una grande varietà di esigenze industriali.<sup>[3]</sup> Una ricerca del 2015, condotta su parti stampate in materiale termoplastico rinforzato con fibre di carbonio, ha evidenziato un miglioramento delle proprietà meccaniche del materiale, quali resistenza, modulo di elasticità e tenacità, aumentate rispettivamente del 12%, del 17% e del 22%, con una percentuale di fibre di carbonio relativamente bassa, fino al 5% in peso.<sup>[4]</sup> Risulta pertanto interessante, e cruciale, l'analisi di questi materiali.

Lo studio oggetto di questa tesi si prefigge, quindi, di:

- realizzare, mediante stampa 3D, una serie di provini con diverso grado di riempimento interno (infill) e sua percentuale;
- sottoporre i provini a prove di compressione;
- studiarne le prestazioni;
- confrontare i risultati ottenuti con quelli relativi ad un altro materiale.

Grazie alla tecnica di stampa 3D vengono realizzati dei provini in PLA rinforzato con fibre di carbonio che, successivamente, sono sottoposti a prove di compressione, per caratterizzare il materiale e stabilire le sue prestazioni meccaniche. L'obiettivo finale è quello di evidenziare la possibilità di ottenere delle buone prestazioni variando la struttura interna dell'oggetto stampato e di metterlo a confronto con provini in polietilene tereftalato con glicole modificato (PETG) rinforzato anch'esso con fibre di carbonio.

## 2. Stampa 3D

La stampa 3D è il processo di creazione di oggetti depositando strati di materiale uno sull'altro. La stampa 3D è chiamata manifattura additiva invece dei tradizionali metodi sottrattivi, come la fresatura CNC (Computerized Numerical Control), quando viene utilizzata per la produzione industriale. Questa tecnologia esiste da circa quattro decenni, essendo stata inventata all'inizio degli anni Ottanta. Se all'inizio la stampa 3D era una tecnica lenta e costosa, gli ampi sviluppi tecnologici hanno reso le odierne tecnologie AM più accessibili e veloci che mai. Un modello 3D digitale, ottenuto da un programma CAD (Computer Aided Design) viene tagliato in centinaia di strati sottili da un software dedicato, per essere esportato in formato G-code. Questo formato di stampa 3D è un linguaggio che la stampante tridimensionale legge per sapere esattamente quando e dove depositare il materiale. Ogni strato corrisponde alla forma 2D esatta di una sezione o fetta dell'oggetto. Ad esempio, se si stesse stampando in 3D una piramide, il primo strato (in basso) sarebbe un quadrato piatto e l'ultimo strato (in alto) sarebbe un piccolo punto. Gli strati vengono stampati in 3D uno alla volta fino a ottenere l'oggetto completamente stampato.<sup>[5]</sup> Come tutte le tecnologie, anche la stampa 3D offre vantaggi e svantaggi.

Tra i principali vantaggi ci sono:

- 1) Riduzione dei costi di produzione;
- 2) Flessibilità di progettazione (un singolo filamento di materiale può assumere un qualsiasi numero di forme e dimensioni);
- 3) Possibilità per i progettisti di facilitare la creazione di forme complesse, molte delle quali non possono essere ottenute con metodi di produzione convenzionale;
- 4) Facile personalizzazione: basta modificare il disegno digitale per apportare modifiche senza utensili aggiuntivi o nuovi stampi;
- 5) Abbassamento dei costi fissi di fabbricazione richiesti per produrre il prodotto finale;
- 6) Limitazione degli sprechi, poiché utilizza solo la quantità di materiale necessaria per creare quel particolare prodotto. Inoltre, la maggior parte di questi materiali può essere riciclata e riusata per ottenere altri oggetti con stampa 3D;
- 7) Facile configurazione se la calibrazione è effettuata in automatico;

I principali svantaggi, invece, sono:

- 1) Produzione non ancora competitiva quando si tratta di produrre oggetti in serie;
- 2) Grado di precisione non elevato;
- 3) Rischi per chi utilizza la stampante 3D: scarica accidentale per contatto diretto/indiretto, scottatura per la presenza di materiali molto caldi, schiacciamento di parti del corpo, produzione di gas e vapori causati dalla fusione della plastica.<sup>[6]</sup>

## 2.1 Storia della stampa 3D

La tecnologia a getto d'inchiostro è stata inventata dalla Teletype Corporation negli anni '60, un metodo per "estrarre" una goccia di materiale da un ugello utilizzando l'elettronica. Ciò ha portato alla creazione di un dispositivo in grado di stampare fino a 120 caratteri al secondo e alla fine ha aperto la strada alla stampa desktop per i consumatori. Successivamente, la Teletype ha sperimentato l'uso di cera fusa, come descritto in un brevetto del 1971 di Johannes F. Gottwald, il cui concetto era quello di produrre un oggetto fatto di metallo liquefatto che si solidificava in una forma predefinita dal movimento del getto d'inchiostro su ciascuno dei nuovi strati. Questo dispositivo era il Liquid Metal Recorder, alla base della prototipazione rapida, e suggeriva che la "stampa" potesse andare oltre l'utilizzo dell'inchiostro. Questi erano i primi passi in un territorio chiamato processo di estrusione del materiale, in cui un termoplastico viene alimentato in un ugello riscaldato e depositato su un oggetto uno "strato" alla volta in sequenza, la stessa tecnica utilizzata nelle stampanti 3D desktop dei giorni nostri. Nel 1982, il produttore di elettronica e sistemi di difesa Raytheon depositò un brevetto per utilizzare metallo in polvere per aggiungere strati a un oggetto. Nel 1984, l'imprenditore Bill Masters presentò un brevetto per un processo chiamato Computer Automated Manufacturing Process and System, che menzionava per la prima volta il termine "stampa 3D". Il primo a costruire effettivamente una stampante 3D è stato Charles W. Hull, basandosi sul suo brevetto per la polimerizzazione di fotopolimeri mediante radiazioni, particelle, reazioni chimiche o laser: il suo progetto inviava i dati spaziali da un file digitale all'estrusore di una stampante 3D per costruire l'oggetto strato dopo strato. La società di Hull, la 3D Systems Corporation, ha lanciato il primo apparecchio stereolitografico (SLA) al mondo, lo SLA-1, nel 1987. Questa macchina ha reso possibile la fabbricazione di parti complesse, strato dopo strato, in una frazione del tempo normalmente richiesto. Hull ha depositato oltre 60 brevetti legati a questa tecnologia, diventando il padre del movimento della prototipazione rapida e inventando il formato di file STL (Standard Triangulation Language), ancora in uso oggi. In quel periodo, la stampa 3D era una tecnologia emergente e la scienza dei materiali non era ai livelli di oggi. Se il prodotto era fatto di polimeri comuni, questo tendeva a deformarsi durante il processo di solidificazione. Inoltre, le macchine costavano centinaia di migliaia di dollari; quindi, i dispositivi di stampa 3D erano installati solo nelle fabbriche di produzione pesante, fuori dalla portata dei consumatori. A cavallo

degli anni '90 e l'inizio del nuovo millennio la bioingegneria faceva passi da gigante: la stampa 3D medica progrediva rapidamente consentendo ai medici di costruire protesi di gamba complesse ed i primi vasi sanguigni bioingegnerizzati realizzati utilizzando cellule umane donate. Ma l'intero movimento, in particolare verso l'uso da parte dei consumatori, riceveva un grande impulso dal paradigma open-source che stava trascinando il settore delle tecnologie dell'informazione e delle comunicazioni (ICT). Nel 2005, il progetto RepRap di Adrian Bowyer ha lanciato un'iniziativa open-source per creare una stampante 3D in grado di costruirsi da sola, o almeno stampare la maggior parte delle sue parti. La macchina 1.0 Darwin è stata la prima applicazione pratica della filosofia di RepRap, e improvvisamente chiunque aveva il potere di creare ciò che poteva immaginare. Lanciato più o meno nello stesso periodo, Kickstarter ha dato un altro grande impulso alla stampa 3D domestica con progetti finanziati dal grande pubblico, che sono spuntati ovunque. La produzione stava rapidamente democratizzandosi. Oggi, la fabbricazione additiva è una tecnologia matura. L'interesse dei consumatori e la solidità delle piattaforme industriali sono cresciuti nel corso degli anni 2010 e l'industria ha trovato la sua strada. Alcuni ritengono che la fabbricazione additiva sostituirà la tradizionale produzione CNC e la fresatura in futuro, e un rapporto di ricerca del 2021 di Lux Research prevede che la stampa 3D varrà 51 miliardi di dollari entro il 2030. La gamma di materiali disponibili per la stampa 3D è cresciuta in modo esponenziale, dalla bio-stampa di tessuti umani e i primi organi su misura per i pazienti, alla creazione di prodotti in argento o oro. Le applicazioni sono altrettanto varie quanto l'immaginazione degli ingegneri. Gli scienziati dell'Università di Southampton hanno fatto volare il primo aeromobile senza equipaggio stampato in 3D, mentre una start-up specializzata nella costruzione di strutture abitative ecologiche ha ideato un habitat realizzato da un robot adatto a vivere su Marte.<sup>[7]</sup>



## 2.2 Tipologie di stampanti 3D

La categorizzazione più utilizzata nell'ambito della stampa 3D deriva da un regolamento standard istituito nel 2015. Il documento a cui fa riferimento l'industria è lo Standard ISO/ASTM 52900. Grazie ad esso è stata fatta una classificazione delle tecnologie di stampa 3D in "processi". Inoltre, è stata standardizzata anche la terminologia legata all'ambito della stampa 3D, così da semplificare la descrizione dei vari metodi di produzione.

### 1) Fotopolimerizzazione in vasca

La fotopolimerizzazione in vasca è un processo di stampa 3D in cui una sorgente di luce polimerizza in modo selettivo una resina fotopolimerica raccolta in una vasca. A livello pratico si ha a che fare con una fonte luminosa che viene diretta con precisione verso un punto specifico su un sottile strato di plastica liquida, facendola indurire. Questo processo viene ripetuto strato dopo strato fino a formare l'oggetto 3D.

Esistono due diverse tipologie di questa tecnica:

- *Stereolithography (SLA)*: permette di realizzare oggetti partendo da una vasca contenente resine epossidiche allo stato liquido. Il processo prevede la solidificazione di uno strato di resina sopra l'altro per mezzo di un raggio laser che viene riflesso da una lente che disegna gli strati dell'oggetto interessato. Le resine utilizzate con questa tecnologia sono dei fotopolimeri, ossia materiali polimerici che si solidificano se sottoposti ad un raggio di luce avente determinate caratteristiche. Tali resine fotosensibili presentano scarse qualità meccaniche e deterioramento precoce, soprattutto se esposte a raggi solari o all'umidità. Uno svantaggio della stereolitografia è che, utilizzando un laser che "lavora per punti", il processo di stampa può richiedere molto tempo. Un esempio di stampante di tipo SLA è illustrato in Figura [1]

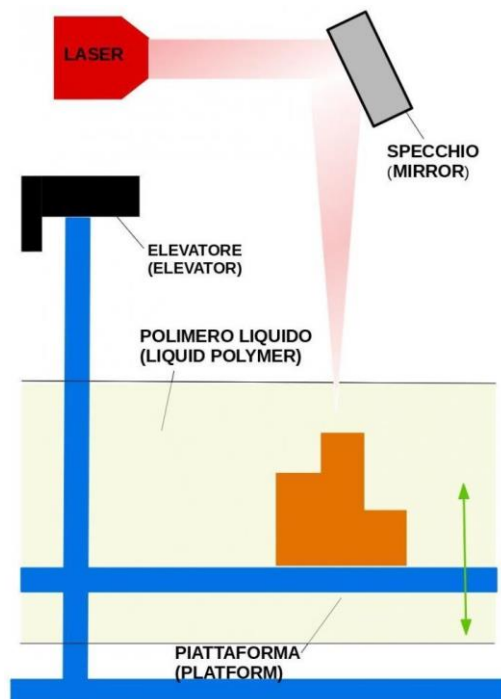


Figura [1] – Funzionamento stampante 3D di tipo SLA

- *Digital Light Processing (DLP)*: utilizza un fascio di luce proveniente da proiettori o schermi LCD. Il processo prevede anche in questo caso la fotopolimerizzazione di una resina fotosensibile, che si trova inizialmente allo stato liquido, tramite dei flash ad alta luminosità. La luce viene proiettata sulla resina utilizzando schermi a diodi a emissione di luce (LED) o una sorgente di luce ultravioletta (UV) diretta alla superficie di costruzione da un dispositivo a micro-specchi digitali (DMD); questo dispositivo corrisponde ad un meccanismo di modulazione di luce spaziale. Così facendo si riesce a coprire in modo dinamico un'ampia area di luce. La precisione del sistema di specchi permette di arrivare a qualità di stampa notevoli, pari circa a 30 micron. Lo schema di una stampante di questo tipo è raffigurato in Figura [2].

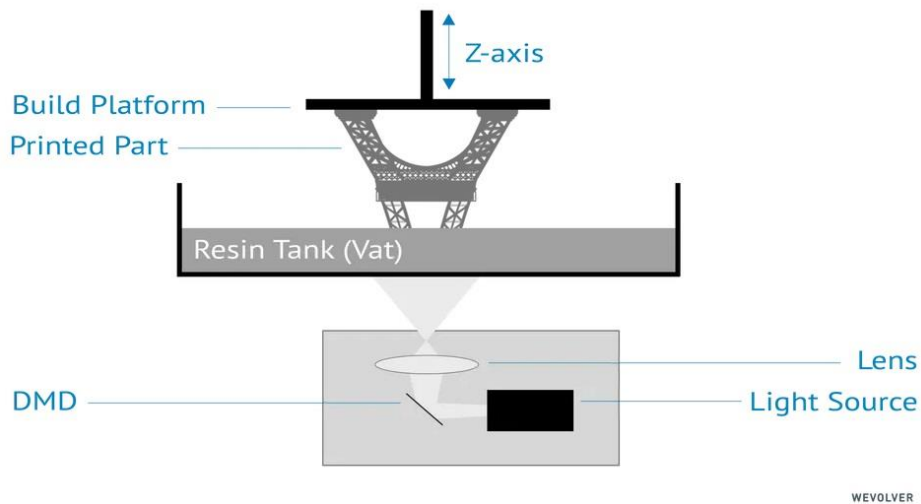


Figura [2] – Schema di una stampante 3D di tipo DLP. Immagine: Wevolver

## 2) Stampa a fusione di polveri (Powder Bed Fusion)

Processo in cui una fonte di energia termica induce selettivamente la fusione tra particelle di polvere (plastica, metallo o ceramica) all'interno di un'area di stampa, così da creare l'oggetto solido strato dopo strato. In questa metodologia, le macchine posizionano un sottile strato di materiale in polvere sul letto di stampa, in genere con una lama, su cui poi agisce la fonte di calore che fonde le particelle tra di loro. In seguito, un altro strato di materiale viene depositato e a sua volta fuso. Il processo si ripete fino a fine lavoro.

Le tipologie di questa tecnica sono:

- *Selective Laser Sintering (SLS)*: per “sinterizzazione” s’intende una lavorazione che permette di ottenere elementi compatti partendo da materiali polverulenti. Questa tecnologia sfrutta una luce laser che va a colpire uno strato di polvere, solitamente polimerica, raccolta all’interno di una vasca, e che sinterizza tra di loro le particelle interessate. La costruzione degli oggetti avviene sinterizzando uno strato di polvere sull’altro: alla fine sarà quindi necessario rimuovere l’oggetto dalla vasca in cui è stato prodotto e pulirlo dalle polveri circostanti, che non sono state colpite dal raggio laser. La Figura [3] mostra un esempio di stampante SLS.

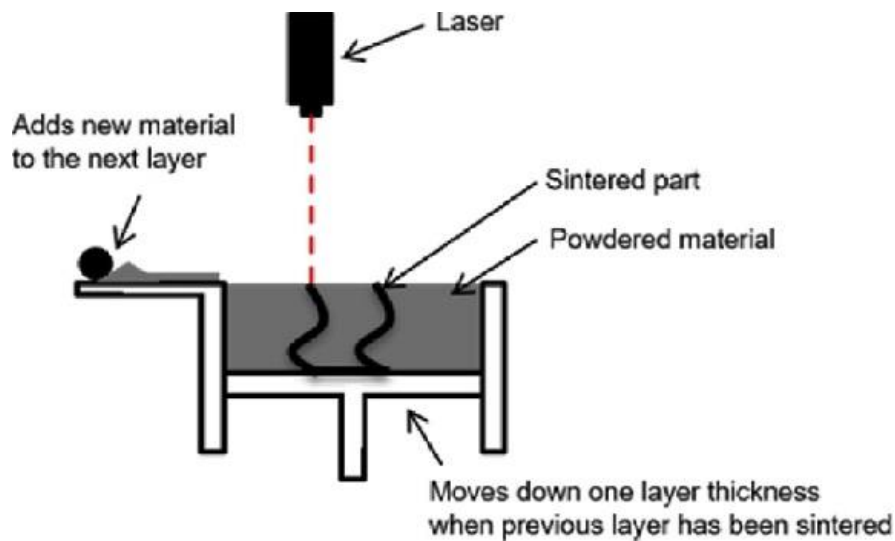


Figura [3] – Schema di una stampante SLS

- *Direct Metal Laser Sintering (DMLS) / Selective Laser Melting (SLM)*: entrambe derivano dalla tecnologia a Sinterizzazione SLS. La differenza principale è che questi tipi di tecnologia di stampa 3D vengono applicati per realizzare componenti in metallo. La tecnologia DMLS non scioglie la polvere, ma la riscalda fino a produrre una fusione a livello molecolare. In questo modo si ottiene una lega metallica. La tecnologia SLM utilizza il laser per ottenere una vera e propria fusione della polvere metallica. Con questo sistema si ottiene un materiale puro, come il titanio. Lo schema di funzionamento è illustrato nella Figura [4]

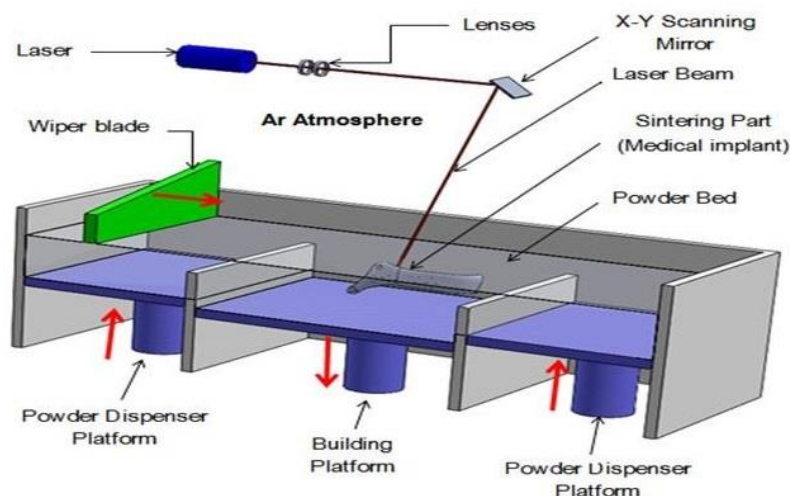


Figura [4] – Schema di una stampante DMLS

- *Electron Beam Melting (EBM)*: la fusione tramite fascio di elettroni utilizza un raggio ad alta energia, o elettroni, per indurre la fusione tra le particelle di polvere metallica. Il processo prevede il passaggio di un fascio di elettroni su un sottile strato di polvere, provocando la fusione e la solidificazione localizzate di una specifica area del piatto di stampa. Il risultato è quindi la solidificazione del singolo layer del pezzo in stampa. In questo processo le parti sono fabbricate sottovuoto, e può essere utilizzato solo con materiali conduttivi. Un esempio di questo tipo di stampanti è riportato in Figura [5].

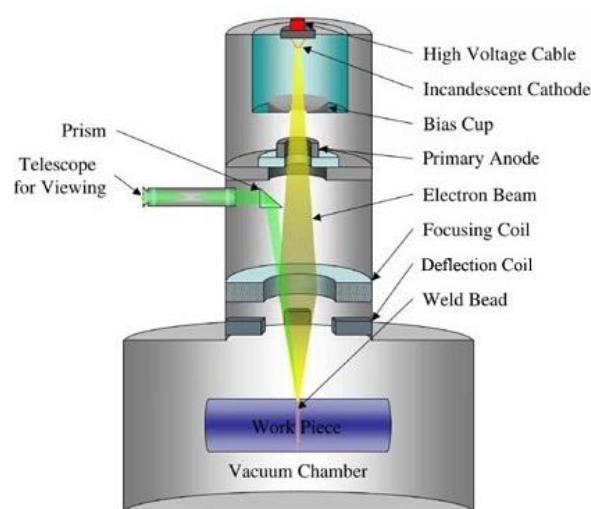


Figura [5] – Schema di una stampante EBM

- *Multi Jet Fusion (MJF)*: la stampante depone uno strato di polvere di materiale sul piano di stampa. In seguito, una testina a getto d'inchiostro attraversa la polvere e deposita su di essa sia un agente di fusione, che un agente di dettaglio. Un'unità di riscaldamento a infrarossi si sposta in seguito sullo strato di stampa. Col passaggio degli infrarossi, gli agenti reagiscono e attivano la fusione del layer con quello sottostante. Le aree dove è stato depositato l'agente di dettaglio rimangono sotto forma di polvere, in quanto hanno solo funzione di generare i dettagli della geometria. Ciò elimina la necessità di usare supporti, poiché gli strati inferiori supportano quelli stampati sopra. Le fasi del processo sono riportate in Figura [6].

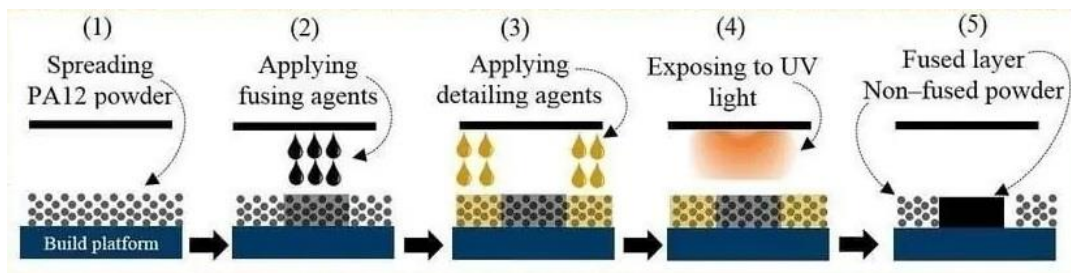


Figura [6] – Fasi del processo di stampa di tipo MJF

### 3) Stampa a getto di materiale (Material Jetting)

Si tratta di un processo in cui goccioline di materiale vengono depositate in modo controllato e polimerizzate su un piano di stampa. Solitamente si tratta di fotopolimeri o goccioline di cera che polimerizzano se esposte alla luce. Consente di stampare materiali diversi nel singolo oggetto, aggiungendo anche colori e trame. Si tratta di un processo con buona finitura superficiale ed estetica, usato per produrre prototipi a colori e multimateriale.

Ne esistono di due tipologie:

- *Material Jetting (MJ)*: funziona in modo simile a una stampante a getto d'inchiostro standard con la differenza che, invece di stampare un singolo strato di inchiostro, gli strati vengono costruiti uno sull'altro per creare un oggetto solido. La testina di stampa emette centinaia di minuscole goccioline di fotopolimero e quindi le polimerizza/solidifica utilizzando la luce UV. Quando uno strato è stato depositato e polimerizzato, la piattaforma di costruzione viene abbassata e il processo viene ripetuto per costruire un oggetto 3D. Un possibile schema di funzionamento è rappresentato in Figura [7].

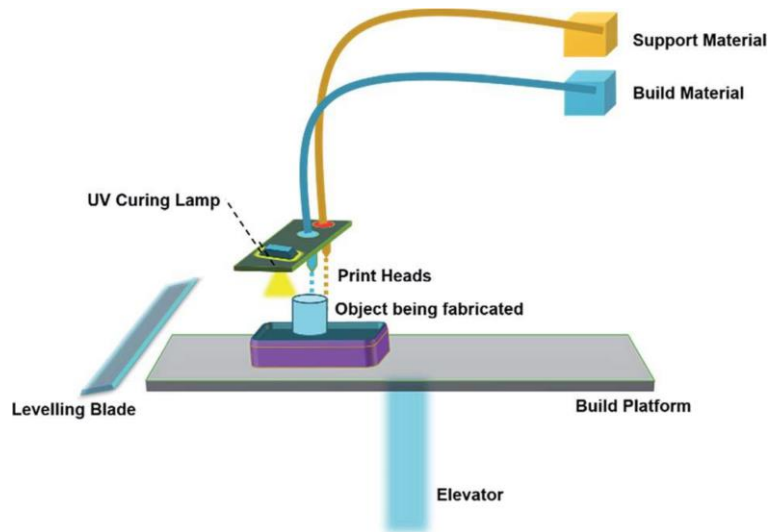


Figura [7] – Schema di funzionamento di una stampante MJ

- *Drop On Demand (DOD)*: tipo di tecnologia che utilizza una coppia di getti d'inchiostro. Il primo deposita il materiale di stampa, che in genere è un materiale simile alla cera, mentre il secondo deposita un materiale di supporto solubile. Queste stampanti vengono solitamente utilizzate per creare modelli adatti per la fusione a cera persa, la microfusione e altre applicazioni di costruzione di stampi. In Figura [8] è riportato un esempio di stampante di tipo DOD.

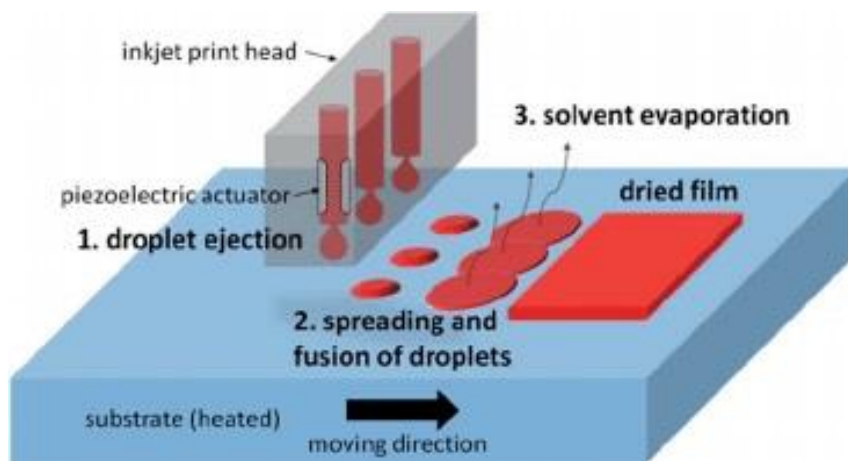


Figura [8] – Sistema di stampa DOD

#### 4) Stampa a getto di legante (Binder Jetting)

Processo di stampa 3D in cui un agente legante liquido lega aree definite di un letto di polvere. La testina di stampa si sposta sulla superficie della polvere, depositando goccioline di legante, che in genere hanno un diametro di  $80\mu\text{m}$ . Queste goccioline legano insieme le particelle di polvere, generando il layer dell'oggetto. Una volta che uno strato è stato stampato, il letto di polvere viene abbassato e un nuovo strato viene distribuito sul layer precedente. Questo processo viene ripetuto fino a formare l'oggetto completo, viene quindi lasciato nella polvere per indurire e acquisire le sue caratteristiche meccaniche. Successivamente, l'oggetto viene rimosso dal letto di polvere e quella eventualmente rimasta viene rimossa utilizzando aria compressa.

Questa tecnica presenta tre tipologie:

- *Sand Binder Jetting (SBJ)*: processo a basso costo usato per la produzione di parti da sabbia, ad esempio arenaria o gesso. Dopo la stampa, gli oggetti prodotti vengono rimossi dal volume di costruzione e puliti per rimuovere la sabbia rimasta in superficie. Gli stampi sono in genere immediatamente pronti per la colata in metallo fuso, dopo di che vengono rotti e il componente metallico finale viene rimosso.
- *Metal Binder Jetting (MBJ)*: in questo processo viene utilizzata polvere di metallo che viene legata grazie all'azione di un agente legante polimerico. Una stampante di tipo MBJ è riportata in Figura [9].

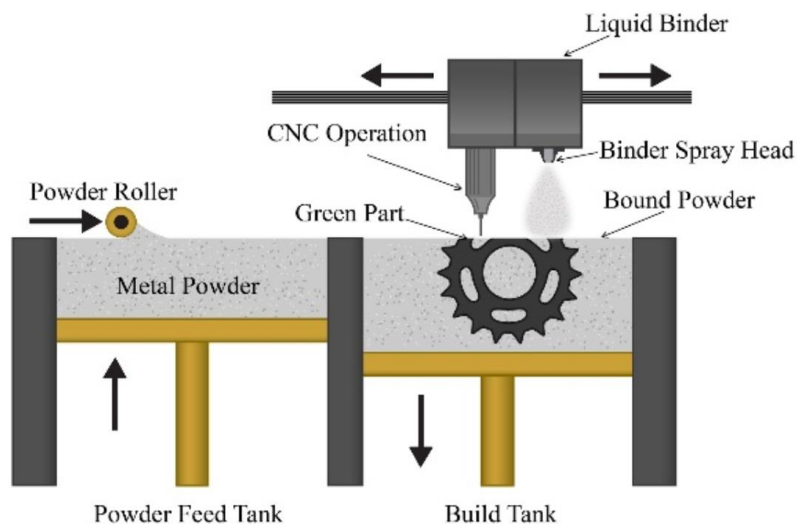


Figura [9] – Schema stampante di tipo MBJ



- *Plastic Binder Jetting (PBJ)*: molto simile ai sistemi visti in precedenza, si tratta di polvere di plastica su cui agisce un legante liquido.

### 5) Stampa ad energia diretta (Direct Energy Deposition)

Si tratta di processo di stampa 3D dove il materiale viene depositato e contemporaneamente fuso da una sorgente di energia termica. La fonte di energia in questione è solitamente un raggio di elettroni, un laser o un plasma, mentre il materiale viene fornito sotto forma di filo o polvere. Questa tecnologia può essere usata strato su strato, per realizzare nuovi oggetti, ma anche per riparare componenti. Quando il materiale utilizzato in questo metodo di stampa è in polvere, quest'ultima viene spruzzata insieme a un gas inerte per ridurre o eliminare la possibilità di ossidazione. Si possono utilizzare più polveri per mescolare i materiali e ottenere risultati diversi.

La tecnica di stampa appena illustrata presenta tre tipologie:

- *Electron Beam Additive Manufacturing (EBAM)*: si utilizza un raggio di elettroni come fonte di energia su di polvere o filamento; viene spesso eseguito sottovuoto, riducendo la possibilità che venga contaminato il prodotto finale. Gli strati vengono costruiti uno alla volta, con il fascio di elettroni che crea una vasca di fusione e aggiunge il materiale dove richiesto. In Figura [10] viene presentato un esempio di funzionamento di questo tipo di stampante.

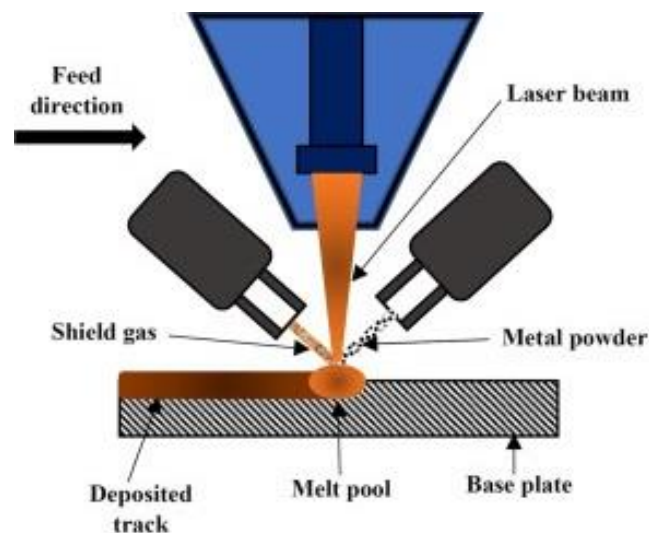


Figura [10] – Schema di funzionamento stampante EBAM

- *Laser Engineered Net Shaping (LENS)*: viene effettuata all'interno di una camera ermeticamente sigillata, poiché una polvere di metallo viene alimentata attraverso uno o più ugelli e fusa in modo specifico tramite un potente laser. L'oggetto viene quindi costruito strato dopo strato mentre l'ugello e il laser si muovono, a volte anche su più assi. Questo metodo di stampa viene spesso utilizzato per riparare componenti aerospaziali e automobilistici di fascia alta, ma può anche essere utilizzato per produrre componenti interi.
- *Cold Spray*: invece di utilizzare una fonte di energia esterna come un raggio di elettroni o un laser, il sistema funziona solo in base alla velocità delle molecole di metallo. Si tratta di una tecnologia di produzione che spruzza polveri metalliche a velocità supersoniche per legarle senza fonderle, il che non produce quasi alcuno stress termico.

#### **6) Stampa a laminazione (Sheet Lamination)**

Si tratta di una forma di stampa 3D che prevede il posizionamento di fogli di materiale molto sottili uno sopra l'altro, che vengono tagliati uno alla volta per produrre un oggetto 3D. Gli strati di materiale possono essere fusi insieme utilizzando calore o leganti in base al materiale laminato usato. Questa tecnologia è una delle meno accurate: le parti prodotte con questo metodo richiedono molte rifiniture di post-produzione. Il sistema porta inevitabilmente a più sprechi rispetto ad altre tecnologie di stampa 3D. Viene usata per produrre prototipi economici e non funzionali a una velocità relativamente elevata o per produrre articoli compositi, poiché i materiali utilizzati possono essere scambiati durante il processo di stampa. Presenta due diverse tipologie:

- *Laminated Object Manufacturing (LOM)*: si tratta della tecnica più comune. Molto apprezzata per i risultati estetici e il relativo basso costo dei materiali di consumo, la tecnica per laminazione produce oggetti incollando strato su strato il materiale impiegato, si otterrà quindi una risma di fogli con una sequenza ben definita, ognuno dei quali sarà tagliato secondo la forma che dovrà avere lo strato e incollati uno sopra l'altro. La Figura [11] illustra una stampante di tipo LOM.

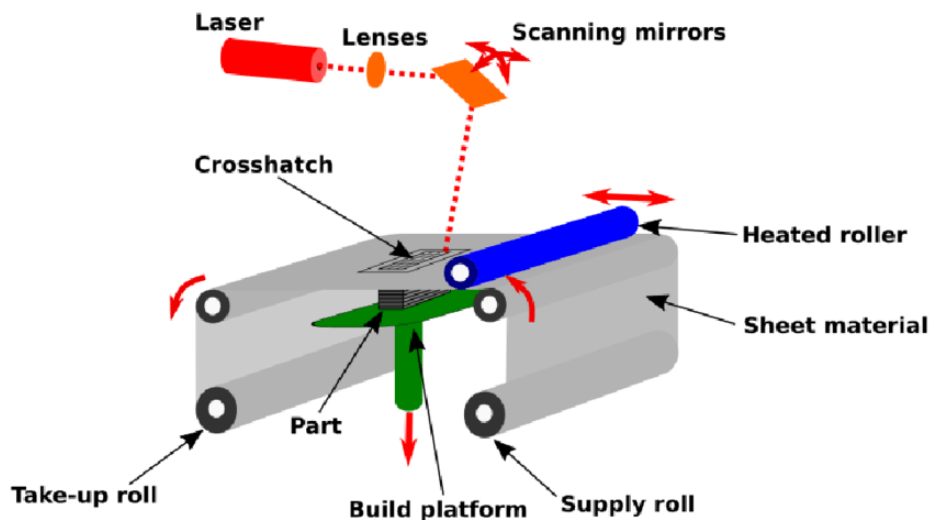


Figura [11] – Schema di funzionamento stampante LOM

- *Ultrasonic Consolidation (UC)*: chiamato anche Ultrasonic Additive Manufacturing (UAM), questo metodo utilizza vibrazioni e pressioni ultrasoniche per fondere sottili fogli di metallo a bassa temperatura. A causa di ciò, le lamiere non vengono fuse insieme ma semplicemente legate tra loro a causa della rottura degli ossidi sulla superficie dei metalli. Si possono legare insieme diversi tipi di metallo, producendo parti multimateriale senza che questi si mescolino.

## 7) Stampa ad estrusione di materiale (Material Extrusion)

Si tratta del processo più conosciuto, nel quale il materiale viene estruso attraverso un ugello. Il più delle volte si tratta di un filamento di plastica spinto attraverso un ugello riscaldato, che lo scioglie e lo deposita su di un piano. La stampante deposita il materiale su una piattaforma di costruzione lungo un percorso predeterminato, dove il filamento si raffredda e si solidifica per formare un oggetto solido. In questo processo sono usati anche materiali compositi.<sup>[8]</sup>

L'unica tecnica presente è la seguente:

- *Fused Filament Fabrication (FFF)*: questa tecnica, conosciuta anche come Fused Deposition Modeling (FDM), prevede un'estremità calda (hot-end) in cui il filamento di materiale viene fuso e poi estruso attraverso un ugello, il tutto posizionato in corrispondenza della testina di stampa, che segue un percorso pre-programmato (codificato nel file di stampa 3D) per costruire il modello strato per strato. In sintesi, una bobina di filamento viene caricata nella stampante 3D e inviata a un ugello nella

testa di estrusione. L'ugello della stampante viene riscaldato alla temperatura desiderata, porta il materiale fino al suo punto di fusione e lo estrude attraverso l'ugello su un piano di stampa secondo un modello 3D predeterminato dal software Slicer, in esecuzione sul computer collegato alla stampante 3D, che traduce le misurazioni di un oggetto in coordinate X, Y e Z e controlla l'ugello in modo che durante la stampa venga seguito il percorso calcolato. La stampante quindi sposta la testa di estrusione seguendo coordinate specifiche, depositando il materiale fuso sul piano di stampa, dove si raffredda e si solidifica. Una volta completato un livello, la stampante procede a deporre quello successivo. Questo processo di stampa delle sezioni trasversali viene ripetuto, costruendo strato su strato, fino a quando l'oggetto non è completamente formato. Alcune stampanti FDM hanno la capacità di stampare utilizzando due o più materiali contemporaneamente, in modo da costruire oggetti con diverse regioni funzionali. Queste macchine sono disponibili in due forme: la prima in cui la stampante ha due hot-end e ugelli, uno per ogni filamento; la seconda taglia i diversi filamenti in lunghezze precise e li alimenta sequenzialmente in un hot-end e ugello. Il primo metodo solitamente consente di stampare solo due tipi di filamento, ma a causa delle estremità calde completamente separate, questi due filamenti possono avere temperature di estrusione diverse. Ciò consente di stampare più tipi di filamento contemporaneamente. Tuttavia, poiché passano attraverso lo stesso hot-end, devono essere materiali simili per temperatura di estrusione.<sup>[9]</sup> I materiali più comuni per la stampa FFF sono i polimeri termoplastici come PLA, ABS, PET/PETG, mentre per la ricerca scientifica si usano comunemente il PTFE (Politetrafluoroetilene) e il PEEK (Polietere Etere Chetone). In Figura [12] è rappresentato il funzionamento di una stampante di tipo FFF.

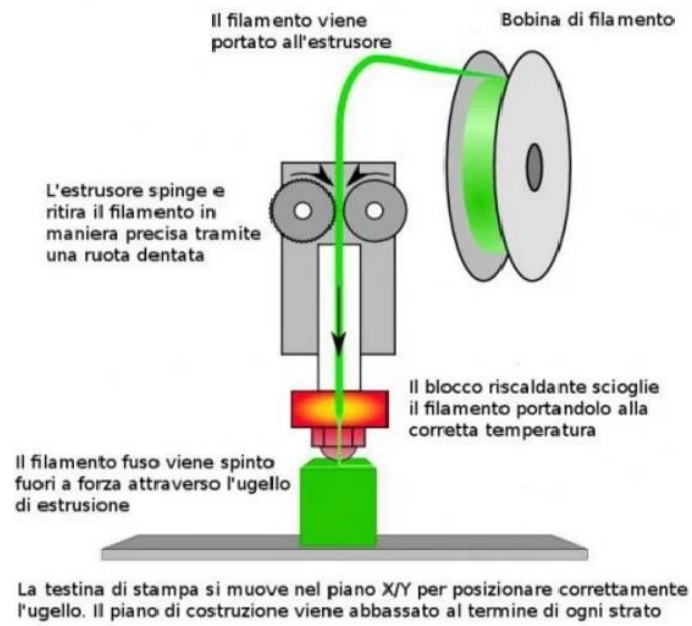


Figura [12] – Funzionamento di una stampante FFF

### **2.3 Campi di applicazione della stampa 3D**

La stampa 3D ha fatto molta strada: dai suoi primi giorni come concetto futuristico per la creazione di giocattoli e modelli semplici in plastica, le possibilità sembrano ora illimitate. La stampa 3D di metallo è una realtà, e non è solo il metallo a piegarsi alle richieste della stampante 3D. Il materiale più duro al mondo, il diamante, può ora essere stampato in forme altamente complesse. Quello che una volta si pensava fosse un "traguardo impossibile" è stato reso reale dal gruppo di ingegneria globale Sandvik, che ora può formare compositi di diamante in praticamente qualsiasi forma utilizzando la produzione additiva e un metodo di post-elaborazione proprietario adattato a questo scopo. Parlando di materiali duri, la fibra di carbonio e la plastica possono ora formare compositi più facili da lavorare rispetto all'alluminio, pur essendo altrettanto resistenti come l'acciaio.<sup>[10]</sup> La manifattura additiva riceve costantemente molta attenzione a causa del suo potenziale applicativo in quasi ogni settore del mondo e in molti concordano sul fatto che non si è ancora visto il suo pieno potenziale. I medici stanno utilizzando la tecnologia di stampa 3D per produrre protesi personalizzate per i pazienti, repliche specifiche di ossa, organi e vasi sanguigni. Poiché l'assistenza sanitaria è estremamente individuale per ciascun paziente, ciò contribuisce significativamente a ridurre i costi e i tempi delle procedure. I ricercatori dell'Università di Tel Aviv sono addirittura riusciti a stampare un cuore umano utilizzando tessuti che comprendono vasi sanguigni, collagene e molecole biologiche. Organi stampati in 3D porterebbero a trapianti più veloci, salvando così innumerevoli vite. La stampa 3D sta cambiando il mondo dell'edilizia: ci sono molte aziende in tutto il mondo che utilizzano tecnologie di stampa 3D per costruire complessi commerciali e abitazioni. Uno dei maggiori vantaggi dell'AM è che si tratta di uno strumento potente per la prototipazione rapida, ciò aiuta i produttori di auto a creare parti su misura, complesse e ad alte prestazioni. Anche nel campo della moda ha iniziato a suscitare interesse il potere della stampa 3D. I designer affermati possono progettare le proprie creazioni uniche e all'avanguardia, le aziende di calzature sfruttano la tecnologia di stampa 3D per progettare scarpe migliori e più confortevoli per i consumatori, aprendo la strada alla hyper-personalizzazione. La stampa 3D sta inoltre cambiando il modo in cui mangiamo: esistono delle aziende in grado di stampare del cibo gustoso: con la tecnologia attuale è possibile stampare pizza, pasta e sandwich contribuendo potenzialmente a sfamare i senzاتetto. La possibilità di stampare in 3D forniture

alimentari per gli astronauti potrebbe rendere i lunghi viaggi molto più gestibili, inoltre la NASA sta rivoluzionando il modo in cui vengono prodotti i motori a razzo a propellente liquido.<sup>[11]</sup> Con tutti questi campi di applicazione è interessante osservare la situazione della stampa 3D in Italia. Secondo uno studio svolto dall'Istat nel 2018, aggiornato poi nel 2020, la stampa 3D in Italia veniva prevalentemente utilizzata nelle aziende manifatturiere e nella fabbricazione di prodotti di elettronica. Come è possibile osservare dalla Tabella [1], la stampa 3D è maggiormente utilizzata dall'industria elettronica, in quanto si tratta di un settore con una certa familiarità con questa tecnologia. Negli altri campi è ancora in via di sviluppo e verrà probabilmente adottata in modo più ampio negli anni a venire, anche se rimane qualche dubbio sul suo utilizzo in campo alimentare.

Settore	Incidenza % utilizzo stampa 3D
Industrie alimentari	1,6
Industrie tessili	2,4
Industria dei prodotti in legno, carta	2,3
Industrie petrolchimica	8,2
Metallurgia	11,9
Elettronica	40

Tabella [1] – Incidenza % della stampa 3D nelle principali industrie in Italia

## 2.4 Materiali

Come qualsiasi processo di produzione, la stampa 3D richiede materiali di alta qualità che rispettino determinate specifiche. Per garantire ciò, vengono stabilite procedure, requisiti e accordi di controllo tra i fornitori, gli acquirenti e gli utenti finali del materiale. La tecnologia di stampa 3D è in grado di produrre parti completamente funzionali in una vasta gamma di materiali, tra cui ceramica, metallo, resine, polimeri e le loro combinazioni sotto forma di materiali ibridi o compositi.<sup>[12]</sup>

I principali polimeri utilizzati nella stampa 3D sono:

- **ABS:** è caratterizzato da un'alta resistenza meccanica e al graffio e da una buona resistenza al calore, è inoltre molto rigido e può essere lucidato e verniciato facilmente. Durante la progettazione è necessario però tenere conto del suo elevato ritiro. Le sue proprietà meccaniche lo rendono adatto a quelle applicazioni dove il particolare è sottoposto a sforzi rilevanti
- **HDPE (High-Density Polyethylene):** è uno dei materiali plastici più diffusi, può essere utilizzato per la produzione additiva senza particolari accorgimenti. È atossico e ha un basso assorbimento d'acqua, per questo viene utilizzato in applicazioni alimentari; tuttavia, la sua più interessante caratteristica è la grande resistenza agli agenti chimici, il che lo rende ideale in applicazioni per l'industria chimica ed elettrica.
- **HIPS (High Impact PolyStyrene):** può presentarsi in due modi, ovvero come materiale per supporti poiché solubile in D-Limonene (un idrocarburo), oppure come un polimero dalle buone caratteristiche meccaniche, quasi come quelle dell'ABS ma stampabile con più facilità, a temperatura ridotta e a un costo inferiore, inoltre è opaco riducendo così la visibilità dei gradini tipici della produzione per strati.
- **Nylon:** presenta delle proprietà meccaniche molto interessanti, si salda bene su sé stesso rendendo meno visibili gli "strati" della produzione additiva sulla superficie e si può stampare senza necessità di un piano riscaldato. Necessita, però, di alte temperature di stampaggio, superiori a 250°, ed è inoltre molto sensibile all'umidità e quindi va trattato con maggior attenzione rispetto agli altri polimeri.
- **PC (Policarbonato):** è molto trasparente, non è tossico ma soprattutto ha un'alta temperatura di deformazione, è quindi adatto alla creazione di tutti i manufatti



stampati in 3D, bisogna però considerare che ha un costo mediamente superiore rispetto agli altri polimeri.

- PCL (Policaprolattone): questo particolare polimero ha un basso punto di fusione ed è quindi facilmente utilizzabile nella stampa, presenta una buona stabilità termica e buona biocompatibilità, caratteristica che lo rende comune nell'ambito biomedico.
- PET: non crea odore né fumi tossici quando viene stampato, assorbe pochissima acqua e presenta una buona trasparenza e lucidità; per queste proprietà è spesso usato per la creazione di giocattoli, parti per elettronica e cosmetica.
- PLA: presenta una buona stabilità coniugata ad un ritiro ridotto e a buone caratteristiche meccaniche. Si stampa a temperature inferiori a quelle degli altri polimeri, risulta quindi essere un materiale molto flessibile e adatto a un innumerevole numero di applicazioni.
- PVA (Alcol Polivinilico): è un materiale idrosolubile ma resistente agli idrocarburi; per le sue proprietà nel mondo additivo è utilizzato per la creazione di supporti da eliminare mediante immersione in acqua. Il PVA è leggermente più complesso da estrarre rispetto ad altri polimeri, anche per via dell'alta temperatura di stampa; a causa delle sue proprietà va inoltre conservato in un luogo asciutto per evitarne il degrado.

I metalli più usati, invece, sono:

- Acciaio: ne esistono numerose tipologie per AM che ripropongono tutte le caratteristiche che possiedono i normali acciai forgiati. Per il suo rapporto costo-prestazioni è la lega più utilizzata, anche perché presenta una notevole flessibilità applicativa.
- Alluminio: molto leggero e per questo adatto ad applicazioni che richiedono un buon compromesso fra capacità termiche e peso contenuto. Tipicamente, infatti, lo si utilizza nei settori automotive e aeronautico.
- Cobalto-Cromo: queste leghe offrono proprietà meccaniche e termiche elevatissime, le prime addirittura migliorano col salire della temperatura fino a 500°-600°. Oltre a questo, offrono un'ottima resistenza alla corrosione, per questo motivo vengono utilizzate in applicazioni ingegneristiche ad alta temperatura come i motori degli aerei, e in ambito biomedico.

- Nichel: le leghe di Nichel resistono a temperature elevatissime e presentano un'ottima resistenza meccanica e all'ossidazione, vengono spesso utilizzate a temperature fino a 1200°. Aerospaziale ed energia sono i due settori dove viene più utilizzato.
- Titanio: famoso per essere una lega dalla bassa densità con notevoli proprietà meccaniche e resistenza alla corrosione. Queste caratteristiche lo rendono adatto a molte applicazioni in ambito motoristico e aerospaziale, infine la purezza ottenibile in alcune polveri sommata alle sue proprietà lo rendono ideale per applicazioni biomediche. Presenta, inoltre, un'ottima biocompatibilità.<sup>[13]</sup>

Per quanto concerne le resine, termine generico usato per indicare i fotopolimeri, esse trovano largo impiego nelle stampanti a fotopolimerizzazione in vasca. Si tratta di plastiche liquide che si induriscono quando esposte alla luce UV: sono un'ottima scelta per modelli con un elevato grado di dettaglio, alcune sono addirittura sufficientemente robuste da poter essere lavorate meccanicamente dopo la polimerizzazione. I materiali ceramici, invece, hanno proprietà uniche che sono estremamente importanti nella produzione di semiconduttori, impianti ossei, motori a razzo e di utensili da taglio. Le ceramiche industriali, o ingegneristiche, sono disponibili in forma di polveri, sospensioni viscosi, resine e filamenti. Sono sicuramente tra i materiali più costosi per la stampa 3D, proprio per le loro caratteristiche.<sup>[14]</sup> Molto meno diffusi, ma comunque utilizzati come materiali per l'AM, troviamo le argille, cemento e materiali da costruzione e, infine, biomateriali usati soprattutto in ambito medico.

### 3 Materiali e procedure sperimentali

Nello studio trattato è stato impiegato del PLA rinforzato con fibre di carbonio (15%), stampato tramite processo FFF, in provini di forma cilindrica (Figura [13]), impostando determinati parametri di stampa e variandone l'infill (concentrico al 100%, griglia al 100% e al 50%, honeycomb al 50%). Una volta ottenuto il numero di provini necessari, questi sono stati sottoposti a compressione e i risultati ottenuti sono stati messi a confronto con quelli relativi a provini, delle stesse dimensioni e con stessa tipologia di infill, in PETG, rinforzato anch'esso con fibre di carbonio (20%), ottenuti con la medesima tecnica di stampa 3D.

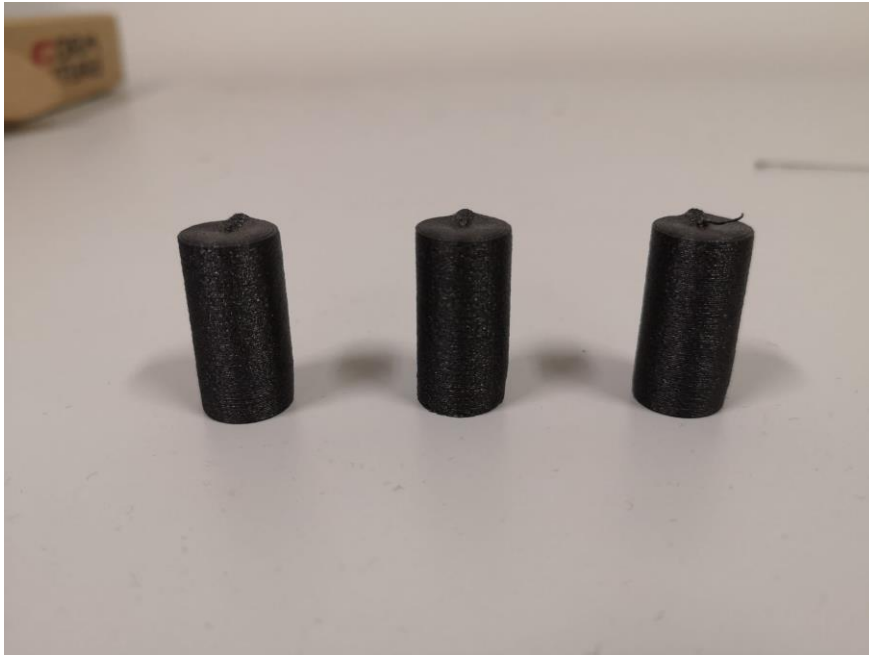


Figura [13] – Provini in PLA

### 3.1 PLA con fibre di carbonio

Il PLA, o acido polilattico, è una delle materie plastiche più utilizzate nella produzione additiva. Si ottiene da risorse organiche e rinnovabili come l'amido di mais, o altre fonti di carboidrati: infatti, la produzione del polimero è possibile grazie alla fermentazione di queste fonti. Più precisamente, il prodotto naturale viene macinato per separare l'amido dal mais, mescolandolo con monomeri acidi o lattici. Con questa miscela l'amido viene scisso in destrosio (D-glucosio) o zucchero di mais. Infine, la fermentazione del glucosio produce l'acido L-lattico, il componente base del PLA. Il risultato è un materiale ecologico e rinnovabile che, a seconda delle condizioni di temperatura e umidità, può diventare biodegradabile. Si tratta di un polimero molto facile da stampare, adatto a chi è alle prime armi con la stampa 3D di tipo FFF; si trova generalmente sotto forma di filamento, ma anche in pellet o granuli. Anche se la fonte di alimentazione del materiale e il sistema di fusione cambiano a seconda del formato di PLA (attraverso un estrusore per i filamenti o un serbatoio per i pellet), le sue caratteristiche e quelle delle parti finali non variano da un tipo all'altro. Questo materiale è un polimero semi-cristallino con una temperatura di fusione tra 170-180°C, ciò significa che quando si stampa con il PLA, non è necessario riscaldare il piano di stampa o avere una camera di stampa chiusa. Allo stesso tempo, il filamento offre buone prestazioni, combinando un'elevata velocità di stampa con bordi abbastanza nitidi, a condizione che il materiale sia adeguatamente raffreddato. Inoltre, i pezzi ottenuti tendono ad avere una deformabilità molto bassa. L'unico svantaggio è che il filamento di PLA ha una viscosità più elevata rispetto ad altre termoplastiche standard che può portare all'intasamento della testina di stampa.<sup>[15]</sup> Il PLA con fibre di carbonio è un materiale composito più rigido che fornisce una maggiore resistenza strutturale, l'aumento della rigidità comporta una diminuzione della flessibilità, rendendolo un materiale ideale per telai e supporti che non dovrebbe flettersi. In genere, il PLA con fibre di carbonio presenta le stesse proprietà di stampa del PLA "normale", sebbene con un lieve aumento della temperatura a seconda del composito. Tuttavia, nel tempo, le fibre di carbonio possono danneggiare la punta dell'ugello, specie se in ottone, è quindi consigliato l'uso di un ugello in acciaio temprato con un diametro di almeno 0,4 mm. Inoltre, è più fragile rispetto al PLA standard nella sua forma di filamento; quindi, occorre manipolarlo con attenzione per evitarne la rottura.<sup>[16]</sup> Il PLA con fibre di carbonio utilizzato in questo studio è stato acquistato dal produttore Reprapper® sottoforma di

filamento dal diametro di 1,75 mm, avvolto su una bobina, per un totale di 1 kg di materiale. Il produttore consiglia una temperatura di stampa tra 190-240° C, mentre non fornisce alcuna indicazione particolare sugli altri parametri da adottare nella stampa, come ad esempio la velocità di deposizione dello strato, sulla velocità delle ventole di raffreddamento o la temperatura del letto di stampa. In Figura [14] è riportata una foto del materiale utilizzato.



Figura [14] – Bobina di PLA con fibre di carbonio

### 3.2 PETG con fibre di carbonio

Il PETG, o polietilene tereftalato con glicole, è una plastica amorfa che può essere riciclata al 100%, con la stessa composizione chimica del polietilene tereftalato (PET). Il glicole viene aggiunto per rendere la plastica più resistente e aumentarne la durata. Tra le principali caratteristiche del PETG troviamo durezza, resistenza agli urti e alle sostanze chimiche, trasparenza e duttilità. È particolarmente apprezzato per la sua compatibilità alimentare. Lo svantaggio è che richiede una piastra riscaldante per evitare l'effetto di deformazione, è anche più soggetto a graffi rispetto al PLA. Il PETG è spesso rinforzato con fibre di carbonio, cosa che fa aumentare la rigidità del pezzo ottimizzandone al tempo stesso il peso finale.<sup>[17]</sup> Il PETG con fibre di carbonio oggetto del confronto col PLA precedentemente descritto, è stato acquistato dalla Formfutura®, la quale lo commercializza col nome di CarbonFil™, sottoforma di filamento dal diametro di 1,75 mm. Il produttore consiglia di stampare il materiale ad una temperatura compresa tra 230-265° C, impostando una temperatura del letto di stampa di massimo 85° C, con ventole di raffreddamento tra il 20-50% della loro potenza. In Figura [15] è riportata la bobina di materiale.



Figura [15] - CarbonFil™ della Formfutura®

### 3.3 Parametri di stampa

Per ottenere i provini da sottoporre a compressione si è partiti dalla normativa D695-23 della American Society for Testing and Materials International (ASTM), che definisce come procedere per determinare le proprietà meccaniche di vari tipi di materiali plastici, inclusi quelli oggetto di questo studio. In particolare, la normativa prevede che vengano sottoposti a prove meccaniche dei provini di forma cilindrica aventi un diametro pari a 12,7 mm ed un'altezza di 25,4 mm. Dovendo studiare come la tipologia di infill incide sulla resistenza a compressione, sono stati stampati, tramite processo additivo di tipo FFF, tre provini per ogni tipologia di infill, sia per il PLA che per il PETG.

Per procedere all'effettivo ottenimento di questi provini, sono stati analizzati i principali parametri di processo tipici della tecnologia di stampa FFF, illustrati in Figura [16]:

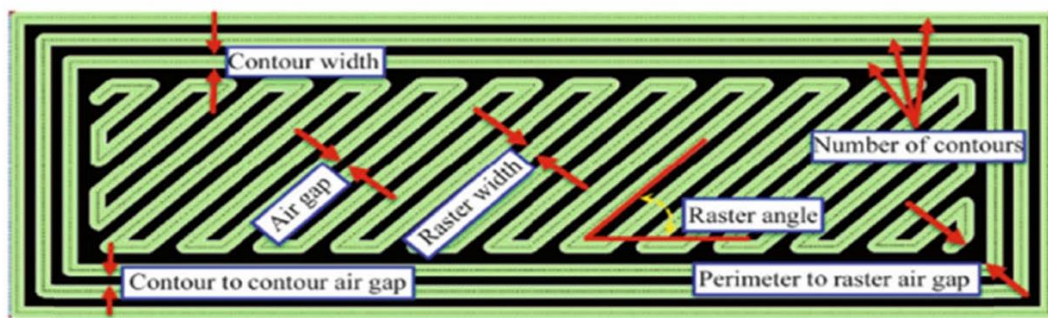


Figura [16] – Insieme dei parametri di processo

- Larghezza del filamento (raster width): dipende dalle dimensioni della testa dell'estrusore, in particolare dal diametro del foro attraverso il quale il materiale viene estruso, e dal numero di passate necessarie per completare il processo. Questo parametro non influenza tanto le proprietà meccaniche del componente, quanto più la qualità estetica e i tempi di processo;
- Posizionamento e crescita del pezzo (building orientation): non si tratta di un vero e proprio parametro, ma occorre tenerlo in considerazione, dato che a seconda di come viene disegnato il modello nel CAD, questo verrà esportato in 3D con lo stesso orientamento. Ciò significa che gli oggetti ottenuti tramite processo FFF sono anisotropi, cioè la loro resistenza è fortemente condizionata dall'andamento dei vari strati e dalla direzione in cui questi vengono sollecitati. Quindi, se possibile, occorre

massimizzare l'area di contatto tra il piano di stampa ed il pezzo, affinché quest'ultimo non si stacchi durante il processo;

- Altezza dello strato (layer thickness): questo parametro influenza solo l'aspetto estetico del pezzo, non la sua accuratezza dimensionale, come mostrato in Figura [17]. Inoltre, la durata della stampa aumenta se si riduce l'altezza dello strato;

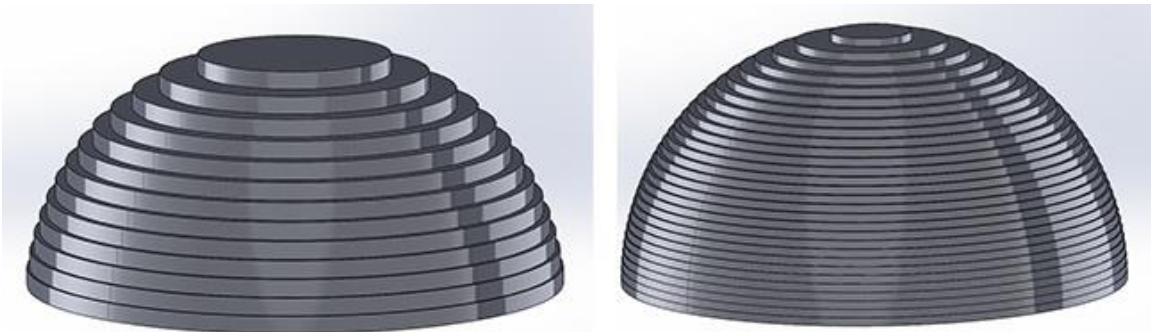


Figura [17] – Esempi di altezza dello strato depositato differenti

- Riempimento (infill): determina la “struttura” dei vari strati all'interno dell'oggetto che si vuole ottenere. Il processo di stampa 3D nasce dall'esigenza di ottimizzare i processi e i consumi di materiale per la creazione di oggetti leggeri e funzionali, ecco perché nella maggior parte dei casi può bastare un grado di riempimento del 30%. La Figura [18] riporta un esempio di diverse percentuali di riempimento;

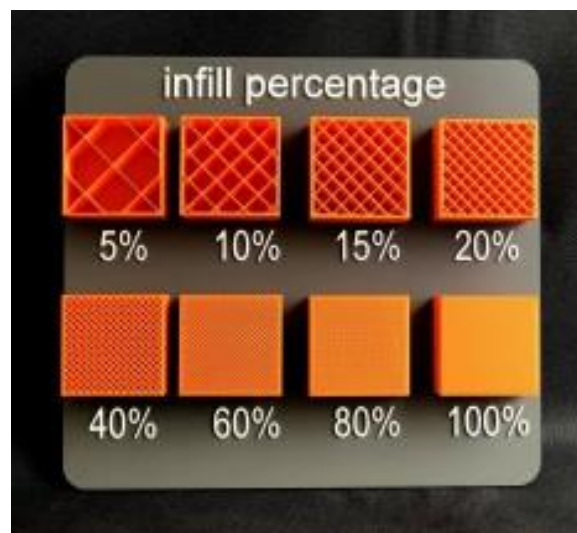


Figura [18] – Diverse percentuali di infill



- Perimetri di stampa (shells): si dividono in interni ed esterni, e rappresentano la “pelle” che separa il riempimento dall’esterno. La larghezza di questa “pelle” dipende da quanti perimetri si inseriscono nel software slicer;
- Orientamento del filamento (raster angle): angolo che il filo depositato forma rispetto ad un asse di riferimento e può assumere valori compresi tra  $0^\circ$  e  $90^\circ$ , come indicato in Figura [19];

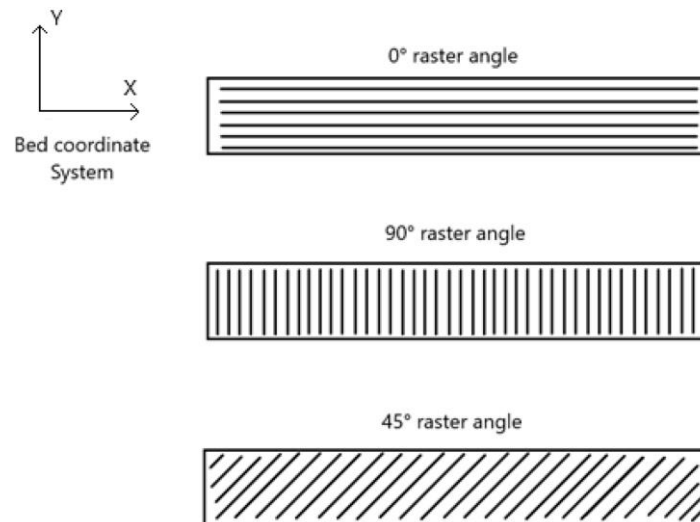


Figura [19] – Angoli di orientamento del filamento

- Strato superiore/inferiore (top/bottom layer): sono gli strati pieni che vengono fatti alla base e sulla sommità dell’oggetto da stampare. La loro altezza è legata a quella dei singoli layer, e va ad influenzare la resa meccanica del pezzo stampato;
- Temperatura di estrusione (extrusion temperature): deve essere maggiore della temperatura di fusione del materiale per favorire la fuoriuscita del filamento dall’ugello. Se questo parametro è troppo basso il flusso e la velocità di stampa diminuiscono ed il legame tra i vari strati viene meno. Al contrario, una temperatura troppo elevata danneggia l’accuratezza dell’oggetto stampato;
- Temperatura del letto di stampa (bed temperature): è importante scaldare adeguatamente il letto di stampa, dove il materiale andrà a depositarsi, affinché si crei una opportuna differenza di temperatura che favorisca l’adesione tra i due. Una differenza troppo ampia rischia di far raffreddare troppo velocemente il materiale depositato, intaccando l’adesione interfacciale; una differenza modesta porta ad un

raffreddamento lento che potrebbe causare una diffusione del materiale, riducendo la qualità superficiale del pezzo;

- Velocità di estrusione (extrusion rate): dipende dal materiale che si sta stampando, se troppo elevata il legame tra i filamenti si riduce perché il polimero non ha il tempo per plasticizzarsi.

Le tipologie di infill studiate sono:

- ❖ Concentrico al 100%: ogni strato è costituito da una serie di cerchi concentrici che a mano a mano riempiono il layer, per poi passare a quello successivo;
- ❖ Griglia al 100%: si tratta di uno dei riempimenti più comuni, dove il materiale è disposto, appunto, in uno schema a griglia cubica che si interseca su se stessa con angoli di 90°. Questo tipo di infill, però, può portare all'ostruzione dell'ugello, in quanto le linee si incrociano tra loro sullo stesso layer;
- ❖ Griglia al 50%: come nel riempimento al 100%, ma in questo caso il pezzo è riempito solo a metà, lasciando quindi dei piccoli vuoti all'interno dell'oggetto ottenuto;
- ❖ Honeycomb al 50%: si tratta di un infill dalla trama a nido d'ape che conferisce buona robustezza all'oggetto ottenuto. (Figura [20])



Figura [20] – Fase di stampa di un provino in PLA con infill di tipo honeycomb

I provini oggetto di studio sono stati ottenuti impostando i seguenti parametri di stampa:

- Temperatura di stampa: 240° C (CarbonFil™) – 190° C (PLA)
- Temperatura del letto: 60° C (CarbonFil™) – 55° C (PLA)
- Velocità di stampa: 60 mm/s (CarbonFil™) – 80 mm/s (PLA)
- Velocità ventole di raffreddamento: 30% (CarbonFil™) – 50% (PLA)
- Altezza layer: 0,25 mm per entrambi i materiali
- Retraction distance: 2 mm per entrambi i materiali
- Numero di strati alla base e alla sommità: 2 per entrambi i materiali

### 3.4 Roboze One<sup>+</sup> 400<sup>TM</sup>

La stampante di tipo FFF utilizzata per ottenere i provini da testare è la Roboze One<sup>+</sup> 400<sup>TM</sup> (Figura [21]) presente nel nostro Ateneo presso il Laboratorio B+, istituito appositamente per diventare un centro di eccellenza nell'ambito della produzione additiva. Si tratta di una stampante ad uso professionale/industriale la cui meccanica si basa su di un sistema senza cinghie, il quale permette di stampare oggetti di alta qualità e con tolleranze dell'ordine dei micron. La stampante è dotata di due estrusori che possono raggiungere la temperatura di 450° C, potendo così lavorare materiali termoplastici ad alte prestazioni (come il PEEK) ed ottenere oggetti dalla geometria complessa grazie al materiale di supporto; inoltre, per permettere un'ottima adesione tra materiale e piano di stampa, quest'ultimo può essere portato alla temperatura di 150° C. La macchina dispone di uno schermo touchscreen a colori da 5 pollici che consente di impostare i parametri desiderati direttamente dalla macchina, l'interfaccia è molto semplice e intuitiva<sup>[18]</sup> (Figura [22]).

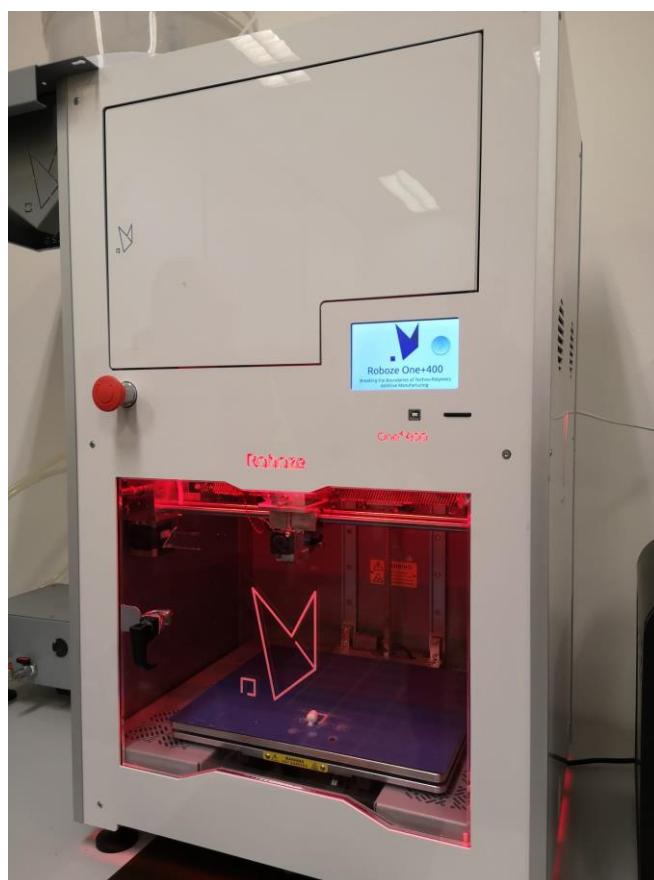


Figura [21] – Roboze One<sup>+</sup> 400<sup>TM</sup>



Figura [22] – Dettaglio del display touchscreen

### 3.4.1 Procedura di stampa

Prima di procedere alla stampa vera e propria si è reso necessario importare il file CAD del provino in un software slicer, Simplify3D™, per poter settare tutti i parametri di stampa ed avere una preview dell'oggetto finito; il file, da questo programma, è stato poi salvato su di una scheda SD. L'utilizzo di quest'ultima si è reso necessario in quanto è proprio dalla scheda SD che la stampante 3D, leggendo il file salvato, ricava tutte le informazioni per procedere alla stampa dell'oggetto. Preliminarmente è stata effettuata la calibrazione del letto di stampa per assicurarsi che fosse in piano, è stata poi posizionata la bobina di materiale nel suo alloggio (sul “tetto” della stampante) e, contemporaneamente, impostato il preheat affinché estrusore e letto di stampa raggiungessero il prima possibile le temperature desiderate. Appena prima di incominciare il processo di stampa il filamento di materiale è stato inserito nell'estrusore. Dal display è stato selezionato il file desiderato e così la stampa ha avuto inizio. Durante il processo, sempre grazie al display touchscreen, è possibile apportare eventuali modifiche ai parametri di stampa, quali temperatura di estrusione e del letto di stampa (Figura [23]); è inoltre visibile il tempo di stampa e la relativa percentuale di completamento del pezzo. Terminato il processo, si lascia raffreddare il provino per qualche secondo, onde evitare di danneggiarlo o deformarlo.



Figura [23] – Settaggio delle temperature tramite il display touchscreen

### 3.5 Altri strumenti

Una volta ottenuti i provini dalla stampante 3D, prima di sottoporli alle prove di compressione, come prima cosa, è stata levigata la loro superficie superiore, grazie a della carta abrasiva, per assicurare che questa andasse in contatto il più possibile con la macchina per la compressione. Per ciascun provino di ogni infill sono state misurate tre grandezze fondamentali: la lunghezza del tratto utile ( $L_0$ ), il diametro ( $D_0$ ) e la massa. Gli strumenti utilizzati per questo scopo sono stati:

- Bilancia elettronica: per misurare la massa, in grammi, dei provini; si tratta di uno strumento molto semplice, che una volta acceso mostra su di un piccolo display a cristalli liquidi (LCD) il valore della massa dell'oggetto posto su di esso.
- Micrometro: utilizzato per misurare, in millimetri, la lunghezza del tratto utile e il diametro del provino; il micrometro è un calibro ad alta precisione, con sensibilità dell'ordine del centesimo di millimetro. Il principio di funzionamento è basato sull'avanzamento di una vite che spinge un cilindro mobile contro uno fisso, tra i quali viene posto l'oggetto da misurare. Una scala graduata solidale alla vite è suddivisa in tacche, in modo che si possano apprezzare le frazioni di passo della vite stessa ed avere così una misurazione molto precisa.

### 3.6 Prova di compressione

La prova di compressione è un test meccanico che viene eseguito per misurare la resistenza di un materiale alla compressione, ovvero la sua capacità di resistere a una forza che tende a comprimerlo (situazione comune in molte applicazioni industriali e ingegneristiche). Questo tipo di prova viene effettuato su una vasta gamma di materiali, tra cui metalli, leghe, materiali compositi, polimeri e molti altri ancora. In particolare, la prova di compressione fornisce informazioni essenziali sul comportamento del materiale, consentendo di determinare alcune proprietà meccaniche importanti, come la resistenza alla compressione, la deformazione, la resistenza alla deformazione plastica, la rigidità, la tenacità e la resilienza del materiale. Il campione da analizzare viene posizionato tra due piatti piani, lisci e paralleli: durante la prova viene applicata una forza in modo unidirezionale lungo l'asse di compressione, generando in una situazione ideale (assenza di attrito tra la superficie inferiore e superiore del provino con le facce dei dischi della macchina di compressione), una riduzione dell'altezza del provino cilindrico con corrispondente aumento del diametro (Figura [24]).

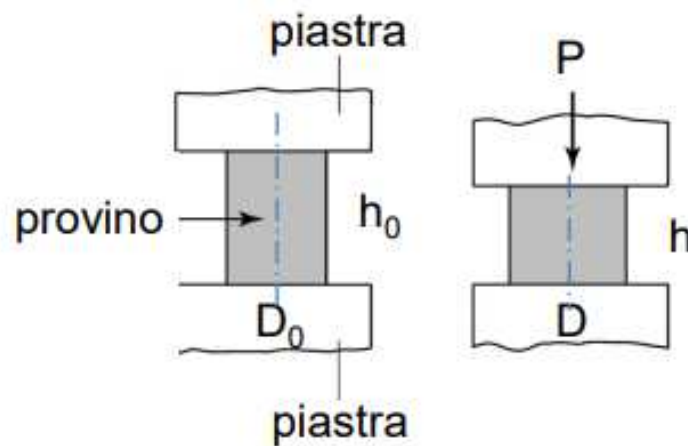


Figura [24] – Rappresentazione di una prova di compressione ideale

Durante la prova la forza aumenta gradualmente causando, questa volta in una situazione reale, un flusso del materiale ostacolato dall'azione delle forze di attrito a contatto con le piastre (vi è una disuniformità della deformazione con formazione di zone a forma di cono interne al provino, in cui il materiale non si è deformato) e un flusso indisturbato a metà altezza del provino. Ciò comporta un profilo del provino a forma di “botte”, con diametro



massimo nel piano di metà altezza e minimo a contatto con le piastre, come illustrato in Figura [25].

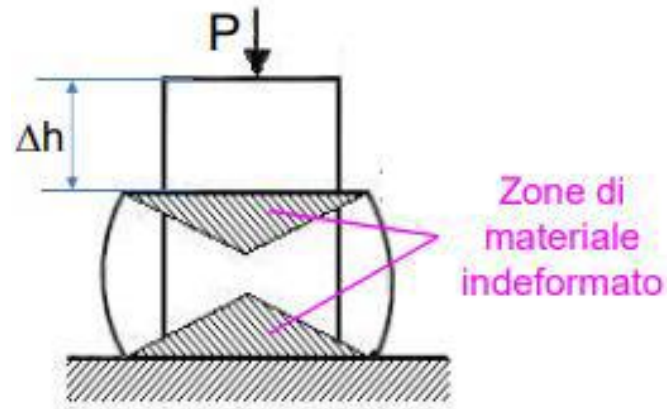


Figura [25] – Rappresentazione reale del profilo del provino durante la prova

Internamente al provino, invece, la disposizione delle fibre, in base all'entità della deformazione  $\epsilon$  subita, è la seguente (Figura [26]):



Figura [26] – Disposizione delle fibre

Si possono osservare:

- zone scarsamente deformate ( $\epsilon$  basse)
- zone mediamente deformate ( $\epsilon$  medie)
- zone fortemente deformate ( $\epsilon$  elevate)<sup>[19]</sup>

Nel caso in esame, i provini dopo la prova di compressione, presentano una deformazione molto marcata con un disallineamento tra le superfici superiore e inferiore (griglia al 100%) o una marcata forma “a botte” (griglia al 50%) con una disposizione delle fibre corrispondente ad una  $\epsilon$  media, come osservabile in Figura [27]; i provini di CarbonFil™, invece, hanno subito un inarcamento della parte centrale (Figura [28]). Anche questo tipo di deformazione è dovuto ad una disposizione delle fibre corrispondente ad una  $\epsilon$  media.



Figura [27] – Provini in PLA deformati dopo la prova di compressione



Figura [28] – Provini in CarbonFil™ dopo la prova di compressione

### 3.6.1 MTS 810

Per eseguire le prove di compressione sui vari provini è stata utilizzata la macchina universale MTS 810 (Figura [28]): offre un'ampia gamma di capacità di prova sia per prove statiche che dinamiche a bassa e alta forza. Il sistema può essere facilmente configurato per soddisfare le specifiche esigenze di prova del materiale o del componente. Il range di forza varia tra 25 kN e 500 kN, può testare la resistenza di una vasta tipologia di materiali, offre uno spazio di prova ampio per ospitare campioni di diverse dimensioni, può eseguire varie prove meccaniche come: trazione, compressione, fatica ad alta frequenza e durabilità dei componenti<sup>[20]</sup>. Si tratta di un sistema servo-idraulico costituito da una struttura fissa nella parte inferiore e una struttura mobile nella parte superiore. Entrambe le parti presentano una sporgenza a forma di disco di uno spessore relativamente piccolo; su quella inferiore, viene collocato il provino cilindrico, mentre quella superiore esercita una forza di compressione, via via crescente durante la prova, sulla testa del provino stesso (Figura [29]).



Figura [28] – Macchina universale MTS 810



Figura [29] - Posizionamento del provino sulla macchina

Quando la forza, una volta raggiunto il suo valore massimo, torna a diminuire, la prova viene interrotta. La macchina, essendo collegata al computer tramite il software LVDT, acquisisce ed elabora i dati ricavati dalla prova; i parametri che vengono monitorati possono essere variabili (tendono istantaneamente a cambiare) come spostamento, forza, deformazione e tensione, o fissi come la velocità di prova (pari a 0.025 mm/s) e la frequenza (pari a 5 Hz). Successivamente tali parametri vengono riportati in un file Excel in cui si osservano i diversi valori che questi assumono per ogni istante di acquisizione. Quando si nota un notevole scostamento tra i valori della forza, si determina l'inizio della prova di compressione e, di conseguenza, si prendono a riferimento tutte quelle misure di tensione e deformazione successive a quell'istante di tempo. Per determinare, invece, il valore del modulo di elasticità a compressione, si possono considerare i valori di deformazione fino a circa lo 0,2% della curva caratteristica del provino e, a partire da questi punti, si grafica un'altra curva. Utilizzando dei comandi Excel, si ricava la retta che meglio approssima la curva con la sua

relativa equazione (del tipo:  $y = mx + q$ ). Il modulo di elasticità a compressione è proprio il coefficiente angolare della retta calcolata.

## 4 Risultati

Nella Tabella [2] sono riportate la lunghezza, il diametro e la massa di ciascun provino realizzato in PLA. Lunghezza e diametro sono state inserite nel software di acquisizione della macchina MTS810 e utilizzati, in seguito, per il calcolo della tensione specifica.

	Lunghezza $L_0$ [mm]	Diametro $D_0$ [mm]	Massa $m$ [g]
Concentrico 100%	25,7	12,9	4,1
Griglia 100%	25,7	13,2	4,45
Griglia 50%	25,7	12,4	2,95
Honeycomb 50%	25,9	12,4	2,69

Tabella [2] – Caratteristiche dei provini in PLA

La prova di compressione definisce i valori per il modulo di elasticità a compressione, la sollecitazione a compressione, la deformazione a compressione e la conseguente risposta del materiale. Pertanto, con le diverse curve tensione-deformazione e tensione specifica-deformazione, rispettivamente nel Grafico [1] e nel Grafico [2], ottenute per i provini con infill concentrico 100%, griglia 100%, griglia 50% e honeycomb 50%, si confrontano le resistenze a compressione ottenute. La Tabella [3] raccoglie le caratteristiche meccaniche dei provini, ricavate dalle prove di compressione effettuate. Da segnalare, inoltre, che le curve ottenute sono state “tagliate” una volta raggiunta una deformazione di 0,4 in quanto è al di sotto di questo valore che si trovano le informazioni di interesse per questo studio.

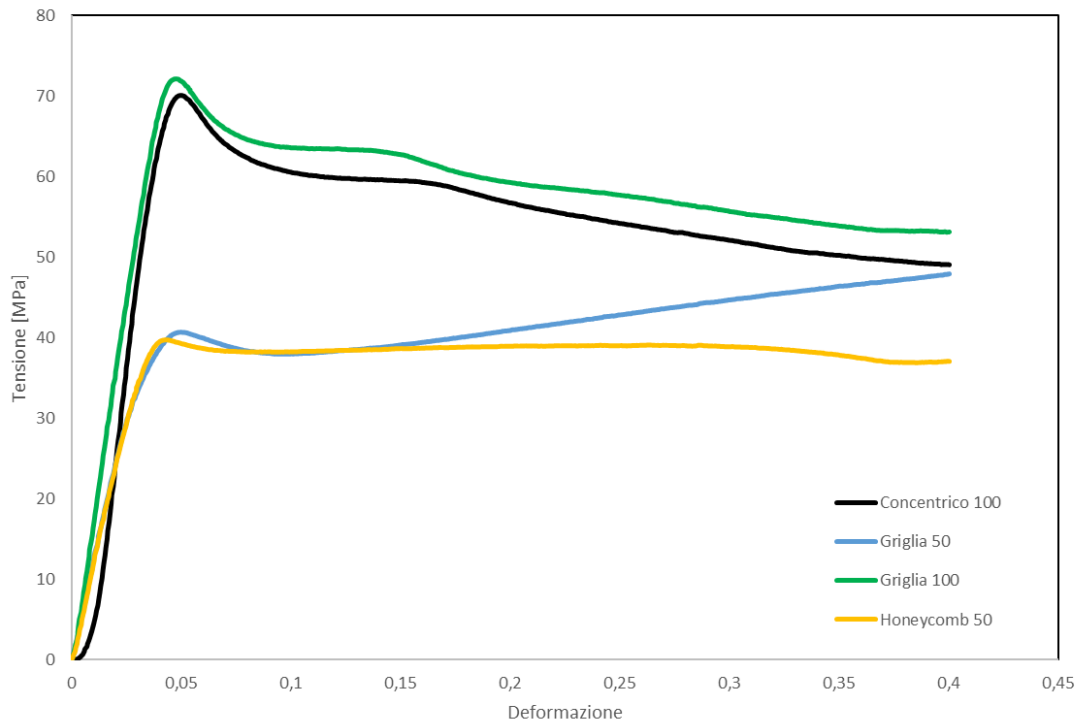


Grafico [1] – Andamento tensione-deformazione al variare dell'infill

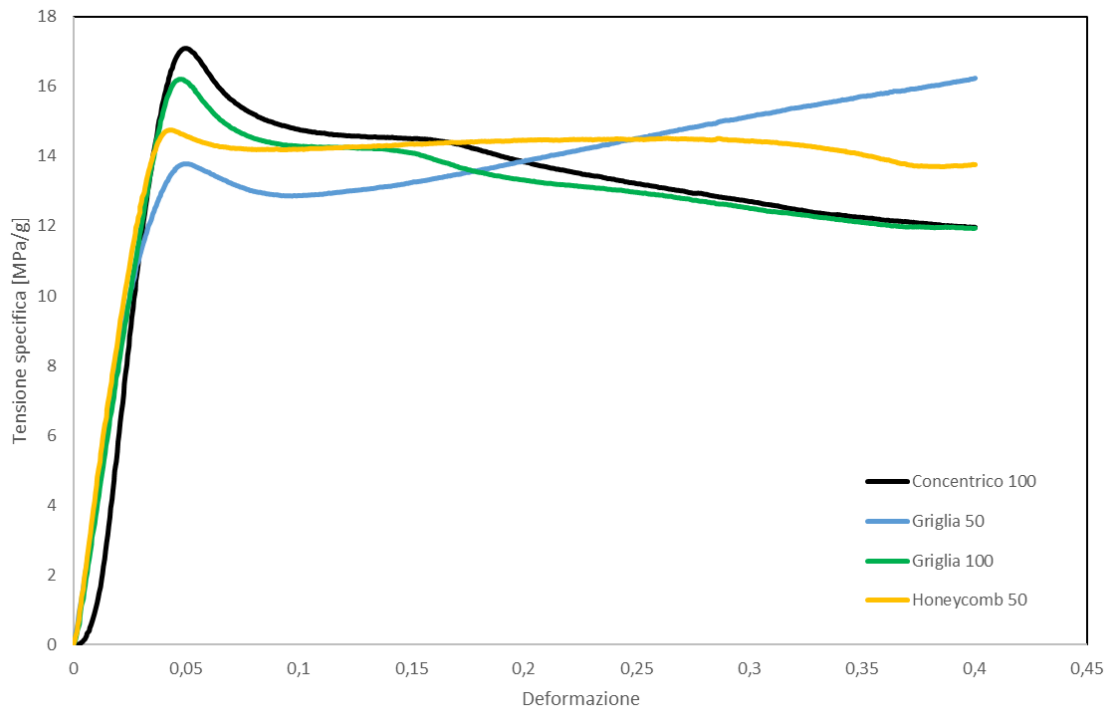


Grafico [2] – Andamento tensione specifica-deformazione al variare dell'infill



	Tensione Massima [MPa]	Tensione specifica Massima [MPa/g]	Modulo di Elasticità [MPa]	Modulo di Elasticità specifico [MPa/g]
Concentrico 100%	70,12	17,1	2339,5	570,61
Griglia 100%	72,19	16,22	1845,1	409,9
Griglia 50%	40,68	13,79	1228,1	416,31
Honeycomb 50%	39,69	14,75	1165,8	433,39

Tabella [3] – Caratteristiche meccaniche dei provini in base al tipo di infill

In riferimento al Grafico [1] e alla Tabella [3], si osserva che:

- il provino con infill a griglia al 100% raggiunge una tensione massima maggiore rispetto agli altri, ciò comporta un'elevata resistenza alle sollecitazioni e ai carichi imposti su di esso;
- il provino con infill concentrico al 100%, invece, presenta una tensione massima inferiore del 3% al solo provino con infill a griglia al 100%, e ciò garantisce un'elevata resistenza e presenta, inoltre, un modulo di elasticità maggiore;
- il provino con griglia al 50% descrive una curva con pendenza inferiore rispetto a quelle degli infill al 100%, tanto da non riuscire a raggiungere alti valori di resistenza, la risalita della curva non viene considerata;
- il provino con infill a honeycomb al 50% presenta un comportamento simile a quello con griglia al 50%, con una deformazione leggermente inferiore;
- come prevedibile i provini con riempimento del 100% offrono una resistenza a compressione maggiore rispetto a quelli con riempimento del 50%.

Si sposti ora l'attenzione al Grafico [2], tenendo sempre in considerazione la Tabella [3], è possibile osservare che:

- le varie tipologie di infill presentano comportamenti a compressione simili tra loro, seppur gli infill al 100% risultino ancora una volta più resistenti rispetto a quelli al 50%;
- il provino con infill di tipo concentrico al 100%, stavolta, risulta più resistente rispetto a quello con griglia al 100%;
- anche in questo caso i provini con griglia al 50% e honeycomb al 50% hanno un comportamento simile;
- i moduli di elasticità specifici dei provini a griglia al 100%, a griglia al 50% e honeycomb al 50% sono tra loro equiparabili, mentre quello relativo al provino con infill concentrico al 100% risulta mediamente il 25% maggiore degli altri.

Diventa ora interessante mettere a confronto la resistenza a compressione dei due materiali, PLA e PETG, a parità di infill. I dati relativi al secondo materiale sono presi dal lavoro svolto da De Maggi Matteo in “Studio delle proprietà meccaniche a compressione di componenti cilindrici in materiale composito ottenuti mediante processo additivo”.

Nel Grafico [3] sono riportate le curve dei due materiali sul piano tensione-deformazione, nel Grafico [4], invece, i materiali vengono confrontati considerando le tensioni specifiche; i valori sono indicati nella Tabella [4]:

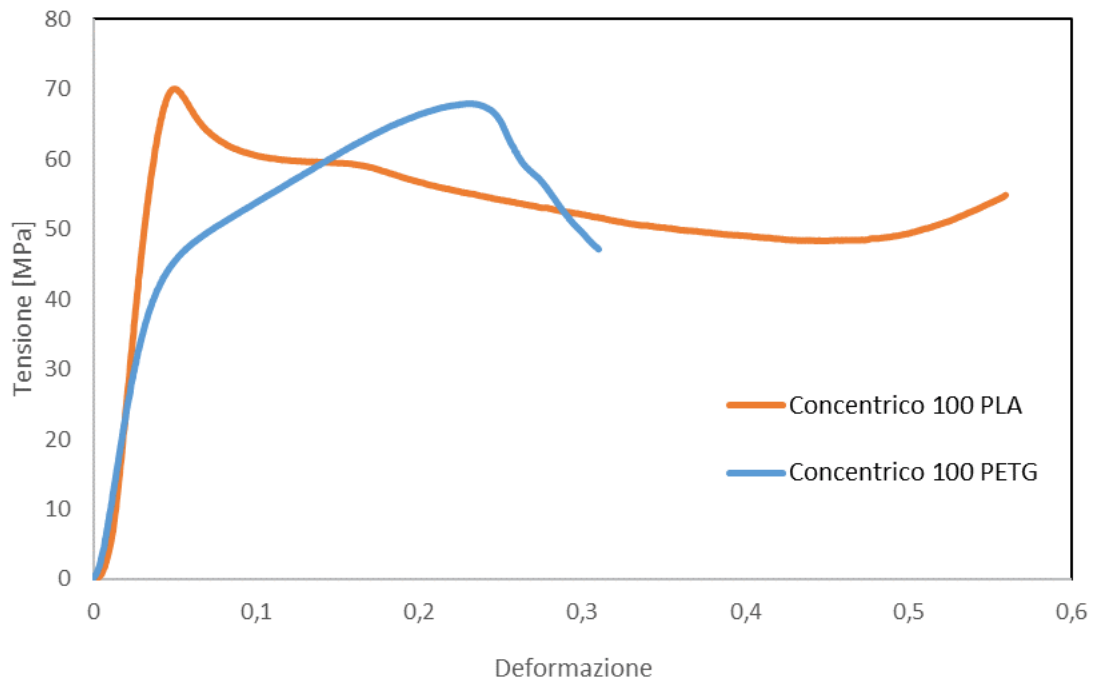


Grafico [3] – Andamento tensione-deformazione di provini concentrici in PLA e PETG

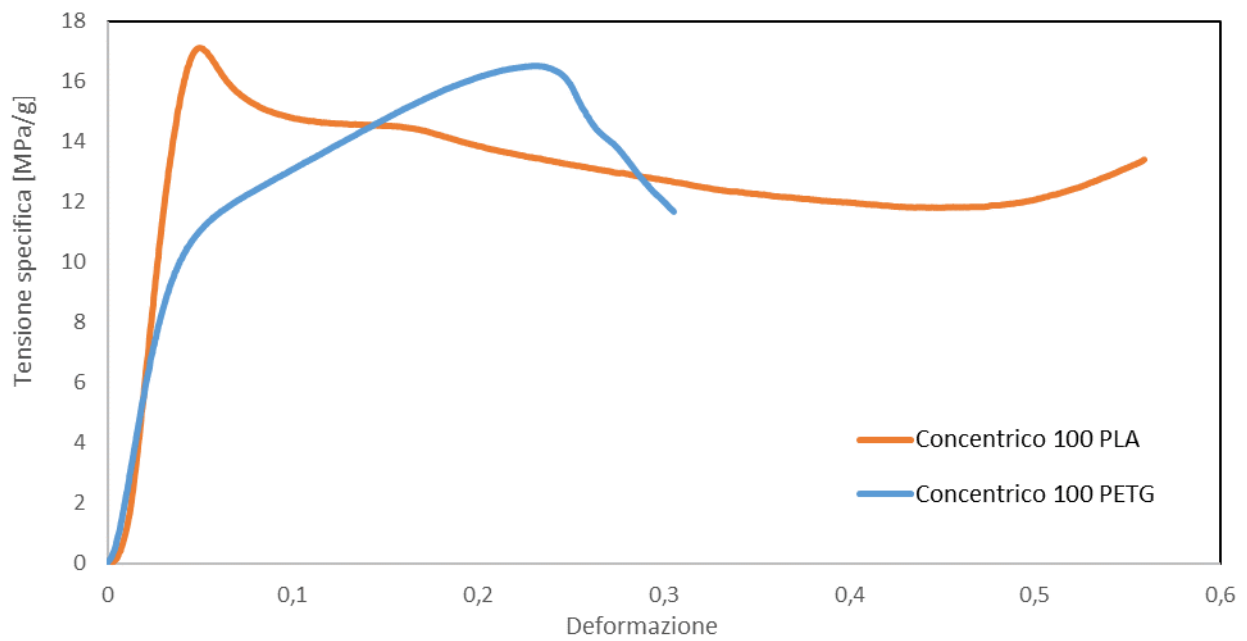


Grafico [4] – Andamento tensione specifica-deformazione di provini concentrici in PLA e PETG

Concentrico 100%	Tensione Massima [MPa]	Tensione specifica Massima [MPa/g]	Modulo di Elasticità [MPa]	Modulo di Elasticità specifico [MPa/g]
PLA	70,12	17,1	2339,5	570,61
PETG	67,97	16,54	1449,6	353,67

Tabella [4] – Caratteristiche meccaniche di provini concentrici in PLA e PETG

Per quanto riguarda i provini con infill a griglia al 100%, possiamo osservare il Grafico [5] ed il Grafico [6], accompagnati dalla Tabella [5]:

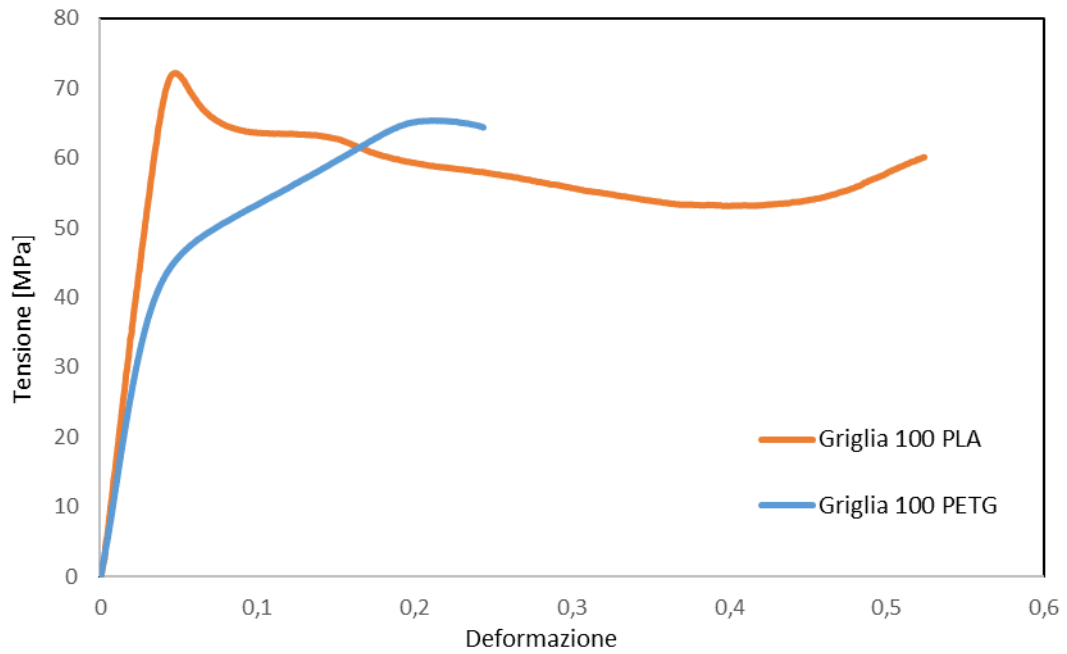


Grafico [5] – Andamento tensione-deformazione di provini a griglia al 100% in PLA e PETG

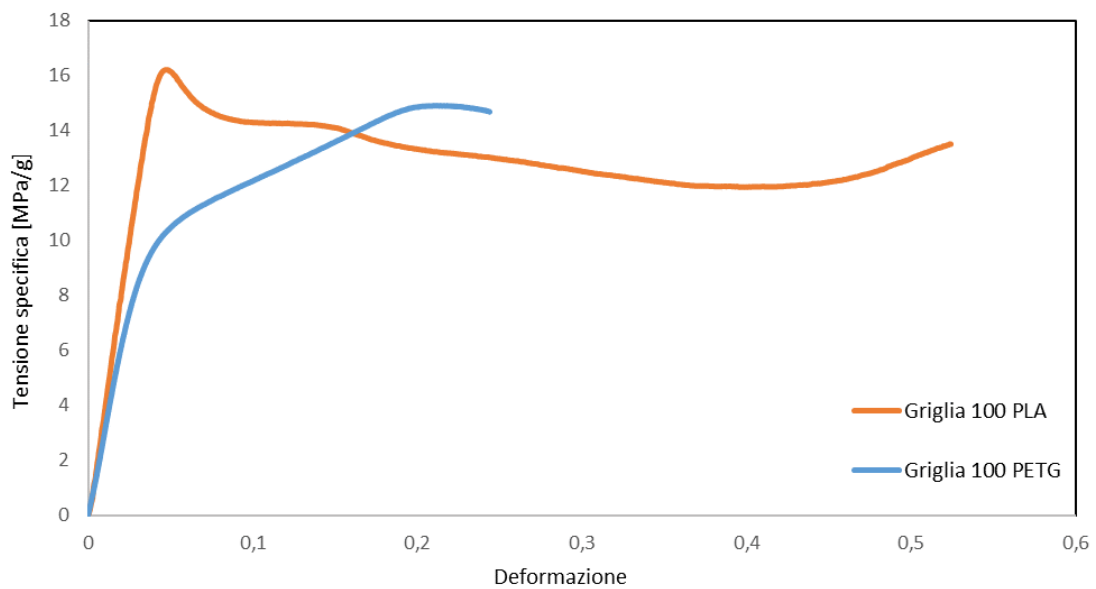


Grafico [6] – Andamento tensione specifica-deformazione di provini a griglia al 100% in PLA e PETG

Griglia 100%	Tensione Massima [MPa]	Tensione specifica Massima [MPa/g]	Modulo di Elasticità [MPa]	Modulo di Elasticità specifico [MPa/g]
PLA	72,19	16,22	1845,1	409,9
PETG	65,44	14,9	1428,7	324,91

Tabella [5] – Caratteristiche meccaniche di provini a griglia al 100% in PLA e PETG

Dalle tabelle risulta che i provini in CarbonFil™ con infill del 100% presentano una resistenza alla sollecitazione di compressione minore dei corrispettivi in PLA, risultando al tempo stesso più fragili, e la situazione rimane la stessa anche se si considerano le tensioni specifiche. La deformazione che subisce il PLA è maggiore rispetto a quella del CarbonFil™, denotando un comportamento plastico più marcato. Il PLA, inoltre, presenta sia un modulo di elasticità che un modulo di elasticità specifico maggiori del PETG.

In merito ai provini con infill a griglia al 50% possiamo osservare il Grafico [7], per la tensione, ed il Grafico [8], per la tensione specifica, e la Tabella [6]:

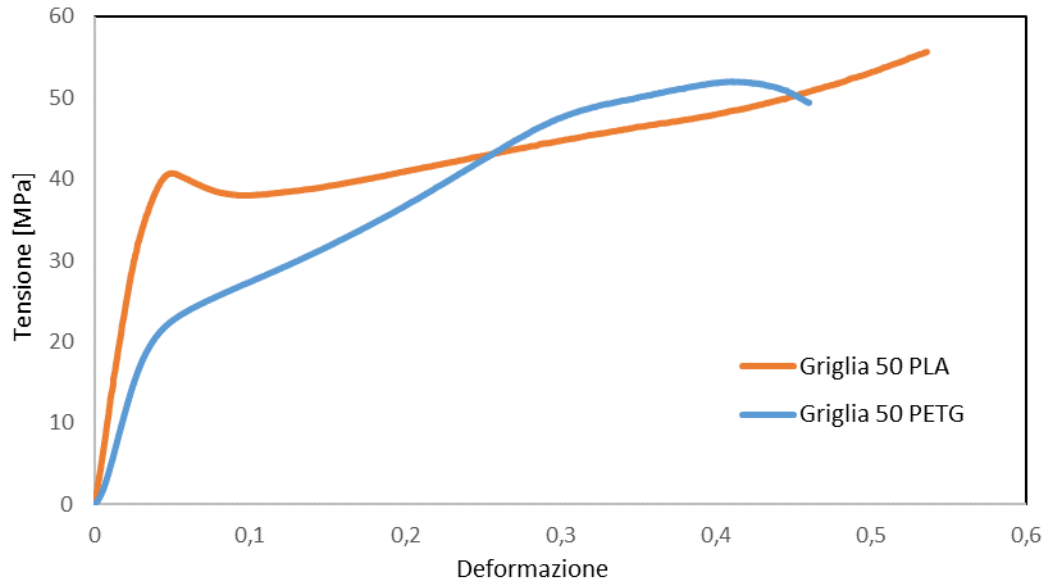


Grafico [7] – Andamento tensione-deformazione di provini a griglia al 50% in PLA e PETG

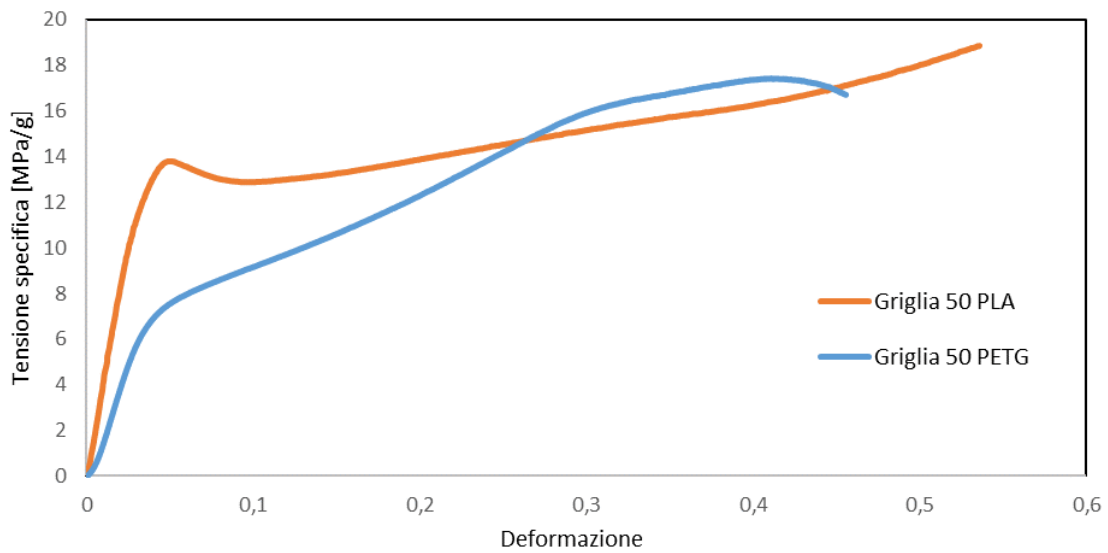


Grafico [8] – Andamento tensione specifica-deformazione di provini a griglia al 50% in PLA e PETG

Griglia 50%	Tensione Massima [MPa]	Tensione specifica Massima [MPa/g]	Modulo di Elasticità [MPa]	Modulo di Elasticità specifico [MPa/g]
PLA	40,68	13,79	1228,1	416,31
PETG	52,04	17,42	711,27	234,71

Tabella [6] – Caratteristiche meccaniche di provini a griglia al 50% in PLA e PETG



Infine, per quanto riguarda i provini con infill a honeycomb al 50%, possiamo osservare l'andamento della tensione e della tensione specifica rispettivamente nel Grafico [9] e nel Grafico [10], con i dati raccolti nella Tabella [7]:

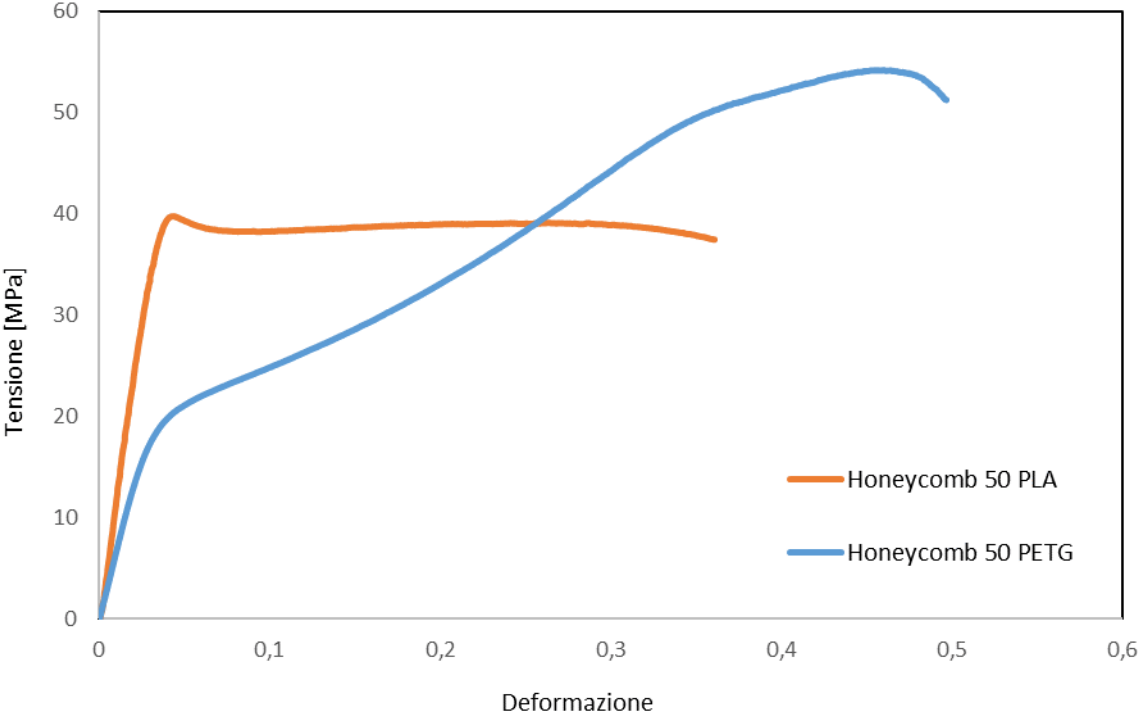


Grafico [9] – Andamento tensione-deformazione di provini a honeycomb al 50% in PLA e PETG

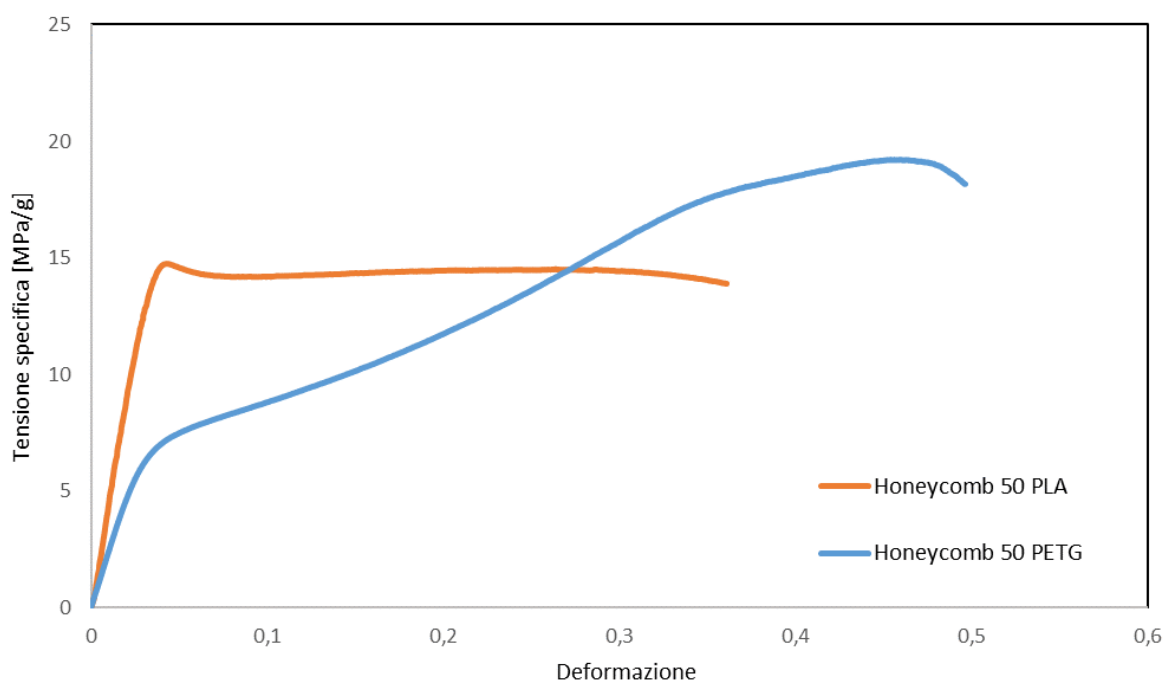


Gráfico [10] – Andamento tensione specifica-deformazione di provini a honeycomb al 50% in PLA e PETG

Honeycomb 50%	Tensione Massima [MPa]	Tensione specifica Massima [MPa/g]	Modulo di Elasticità [MPa]	Modulo di Elasticità specifico [MPa/g]
PLA	39,69	14,75	1165,8	433,39
PETG	54,15	19,2	670,21	237,14

Tabella [7] – Caratteristiche meccaniche di provini a honeycomb al 50% in PLA e PETG

Come ci si poteva aspettare, i provini in CarbonFil™ con infill al 50% offrono una resistenza a compressione minore rispetto a quelli con infill al 100%, dell'ordine del 20%, ma questa resistenza è maggiore di quella dei corrispettivi in PLA della stessa percentuale circa, denotando inoltre, una duttilità simile; lo stesso discorso vale se si considerano le tensioni specifiche. Proseguendo con l'analisi si nota che i provini in PLA risultano avere, ancora una

volta, un comportamento plastico più marcato rispetto ai provini in PETG, ed anche i moduli di elasticità sono maggiori, determinando quindi un limite elastico maggiore.

## 5 Conclusioni

Questo studio si concentra sulla realizzazione, mediante stampa 3D di tipo FFF, di una serie di provini in PLA, rinforzato con fibra di carbonio, con differente tipologia di infill: concentrico al 100%, griglia al 100%, griglia al 50% e honeycomb al 50%. I provini così ottenuti sono stati poi sottoposti a prove di compressione, mediante la macchina MTS810, in cui si è evidenziato quali sono gli infill che conferiscono al provino una maggior resistenza alla compressione stessa. Dopo aver acquisito ed elaborato i dati ottenuti da queste prove, è stato effettuato un confronto sia tra i provini stessi, che con i risultati ottenuti con i provini in CarbonFil™.

Dal grafico tensione-deformazione, per il PLA, è emerso che:

- il provino con infill di tipo griglia al 100% è caratterizzato da una resistenza alle sollecitazioni e ai carichi imposti su di esso maggiore rispetto agli altri infill, presentando una tensione massima di 72,19 MPa;
- il provino con infill concentrico al 100% presenta una resistenza inferiore al solo provino con infill concentrico, pari a circa il 3%;
- i provini con infill al 50% offrono una resistenza a compressione decisamente minore rispetto ai provini con infill al 100%: in particolare, rispetto al provino più resistente, i provini con infill a griglia al 50% e honeycomb al 50% risultano meno resistenti rispettivamente del 77% e del 82%;
- il provino con infill a griglia al 50% presenta una resistenza a compressione pari a 40,68 MPa, equiparabile a quella del provino con infill a honeycomb al 50% pari a 39,69 MPa;
- il modulo di elasticità del provino con infill concentrico al 100% risulta maggiore, rispetto a quello dei provini a griglia al 100% e 50% e honeycomb al 50%, rispettivamente del 21%, del 47% e del 50%, determinando un comportamento un po' più fragile dello stesso.

Analizzando gli andamenti tensione specifica-deformazione delle diverse tipologie di infill risulta che:

- i provini mostrano una resistenza alla sollecitazione di compressione equiparabile, con quelli con infill al 100%, comunque, più resistenti rispetto a quelli con infill al 50%;
- il provino con infill concentrico al 100% risulta, questa volta, il più resistente con i suoi 17,1 MPa/g di tensione specifica, ed il più fragile dato il suo elevato modulo di elasticità specifico pari a 570,61 MPa/g;
- sia all'inizio che alla fine della prova, l'andamento delle tensioni specifiche all'interno del provino a griglia al 100% è in linea con quello con infill concentrico al 100%;
- i provini con infill al 50% tendono ad avere un andamento più in linea con quelli ad infill al 100% all'inizio della prova, determinando moduli di elasticità specifici simili tra loro: in particolare il modulo di elasticità specifico del provino a griglia risulta inferiore a quello di riferimento del 27%, mentre quello del provino a honeycomb del 24%.

Dal confronto fra i provini in PLA con i corrispettivi in CarbonFil™ emerge che:

- i provini con infill al 100% in PLA resistono maggiormente a compressione rispetto a quelli in CarbonFil™, nello specifico il provino con infill concentrico in PLA risulta più resistente del 3% rispetto a quello in PETG e la percentuale sale al 10% passando all'infill a griglia al 100%;
- la situazione esposta al punto precedente si ripresenta quando si vanno a confrontare le tensioni specifiche;
- i provini con infill al 50% in CarbonFil™ risultano più resistenti alla sollecitazione di compressione rispetto a quelli in PLA: il provino con infill a griglia al 50% in PETG è del 22% più resistente del corrispettivo in PLA, il provino con infill a honeycomb in PETG è più resistente del 27% rispetto a quello in PLA;
- sia il modulo di elasticità che il modulo di elasticità specifico, del PLA, risultano maggiori del 61% rispetto a quelli del CarbonFil™ considerando i provini con infill concentrico al 100%, il valore si abbassa al 27% circa prendendo in esame i provini con infill a griglia al 100%;

- il modulo di elasticità del PLA risulta del 73% maggiore rispetto a quello del PETG quando si vanno ad analizzare i provini con infill a griglia al 50%, la percentuale sale al 77% tra i moduli di elasticità specifici;
- nel confronto tra i provini con infill a honeycomb il PLA risulta avere un modulo di elasticità del 74% maggiore rispetto al PETG, addirittura del 83% considerando il modulo di elasticità specifico;
- nonostante quanto esposto precedentemente, il PLA si deforma maggiormente sotto sforzo, andando a delineare una maggiore duttilità rispetto al CarbonFil™.

Questi risultati costituiscono la base di partenza per ricerche future che possono essere svolte utilizzando materiali diversi da quelli analizzati, cambiando la tipologia di infill, oppure ottimizzando alcuni parametri di stampa, al fine di ottenere oggetti stampati in 3D dalle caratteristiche meccaniche migliori. L'obiettivo che si vuole raggiungere al giorno d'oggi, e negli anni a venire, è quello di ottenere prestazioni sempre più elevate, andando a rendere ottimale la quantità di materiale utilizzato nella realizzazione di oggetti tramite produzione additiva.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Luciana Maci “Che cos’è l’Industria 4.0 e perché è importante saperla affrontare” (economyup.it)
- [2] Laura Loguercio “Stampa 3D: cos’è, come funziona, i migliori modelli di stampanti 2021” (economyup.it)
- [3] O. Sai Saran, A. Prudhvidhar Reddy, L. Chaturya, M. Pavan Kumar “3D printing of composite materials: A short review”
- [4] Fuda Ning, Weilong Cong, Jingjing Qiu, Junhua Wei, Shiren Wang “Additive manufacturing of carbon fiber reinforced thermoplastic composites using fused deposition modeling”
- [5] “Stampa 3D, cos’è e come funziona?” (3ds.com)
- [6] M. Gabbari, R. Gagliardi, A. Gaetano, D. Sacchi “Classroom 3D Printing – Processo creativo e didattica attiva con la stampa 3D”
- [7] Drew Turney “History of 3D Printing: It’s Older Than You Think” (autodesk.com)
- [8] Tecnologie di stampa 3D – Guida completa e aggiornata al 2023 (<https://www.stampa3d-forum.it/>)
- [9] Guida completa alla stampa 3D (<https://it.rs-online.com/web/>)
- [10] “3D printing is becoming unstoppable” (interestingengineering.com)
- [11] Donovan Alexander “7 Exciting Ways 3D Printing Is Changing the World Around Us in 2020” (interestingengineering.com)

- [12] N. Shahrubudina, T. C. Leea, R. Ramlana “An Overview on 3D Printing Technology: Technological, Materials, and Applications” (sciencedirect.com)
- [13] “Tutto sull’Additive Manufacturing: una risorsa anche in produzione” (meccanicaneews.com)
- [14] “3D Printing Materials – The Ultimate Guide” (all3DP.com)
- [15] “Tutto quello che c’è da sapere sul PLA per la stampa 3D” (3dnatives.com)
- [16] “The Best PLA Filament Special Types of 2023” (all3DP.com)
- [17] “Tutto quello che c’è da sapere sul PETG nella stampa 3D” (3dnatives.com)
- [18] “Roboze One Plus 400 3D Printer In-Depth Review” (pick3dprinter.com)
- [19] Dispense del corso di “Tecnologia meccanica” del Professore Archimede Forcellese
- [20] (<https://rihof.org/wp-content/uploads/2019/11/MTS-810-Brochure.pdf>)



## **Ringraziamenti**

Ringrazio la mia relatrice, nonché tutor del mio tirocinio, la Professoressa Michela Simoncini insieme al correlatore Tommaso Mancia, il quale mi ha assistito durante il periodo di tirocinio e la stesura di questo elaborato. Grazie alla sua dedizione al lavoro, ho appreso con molto interesse ciò che ha da offrire all'ingegneria il mondo della manifattura additiva. Ci tengo, inoltre, a ringraziare il mio collega Matteo De Maggi il quale ha svolto il tirocinio insieme a me e che ha condiviso i dati del suo lavoro.