



UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE
FACOLTA' DI INGEGNERIA
Corso di laurea triennale in Ingegneria meccanica

**STUDIO DELLE PROPRIETA' MECCANICHE A FLESSIONE DI
STRUTTURE SANDWICH IN MATERIALE COMPOSITO FIBRO-
RINFORZATO OTTENUTE MEDIANTE PROCESSO DI FABBRICAZIONE
ADDITIVA**

**FLEXURAL BEHAVIOUR OF SANDWICH STRUCTURES IN FIBER-
REINFORCED COMPOSITE MATERIAL OBTAINED THROUGH ADDITIVE
MANUFACTURING TECHNOLOGY**

Relatore:

Prof. Archimede Forcellese

Tesi di laurea di:

Sara Gallipoli

Correlatori:

Prof.ssa Michela Simoncini

Dott. Tommaso Mancina

Anno Accademico 2022/2023



INDICE

1.INTRODUZIONE.....	4
2.STAMPA 3D.....	7
2.1 Storia stampa 3D.....	13
2.2 Additive Manufacturing (AM).....	15
2.3 Fused Deposition Modeling (FDM).....	17
2.3.1 Parametri di processo.....	19
2.4 Materiali.....	23
2.5 Campi di applicazione della stampa 3D.....	26
3.MATERIALI E PROCEDURE SPERIMENTALI.....	28
3.1 Materiali compositi.....	28
3.1.1 PLA.....	30
3.1.2 PLA con fibre di carbonio.....	32
3.1.3 PLA con fibre di grafene.....	33
3.1.4 PLA con fibre di legno balsa.....	34
3.1.5 Provini ibridi con struttura a sandwich.....	35
3.2 Makerbot Replicator 2X.....	40
3.3 Prove di piegatura.....	45
3.3.1 MTS 810.....	47
3.4 Stereomicroscopio.....	50
4.RISULTATI.....	51
5.CONCLUSIONI.....	67
BIBLIOGRAFIA.....	69

1. INTRODUZIONE

Al giorno d'oggi la discussione globale, sia a livello politico che tecnologico, è interessata fortemente dal concetto di sostenibilità da intendersi come un processo che si basa su tre dimensioni fondamentali tra loro concatenate:

- *sostenibilità sociale*: capacità di garantire i diritti ed eque condizioni di benessere alle generazioni attuali e future;
- *sostenibilità economica*: capacità delle organizzazioni di generare reddito fornendo allo stesso tempo un posto di lavoro alle comunità in cui sono inserite;
- *sostenibilità ambientale*: capacità di mantenere nel tempo qualità e riproducibilità delle risorse naturali, di preservare la diversità biologica e di garantire l'integrità degli ecosistemi.

L'inquinamento ambientale, il riscaldamento globale e i cambiamenti climatici, stanno assumendo grande importanza e, pertanto, vi è una maggiore necessità di sostenibilità ambientale. Le Nazioni Unite hanno proposto 17 Obiettivi di Sviluppo Sostenibile (SDG) da raggiungere entro il 2030 che comprendono le questioni relative alla povertà, l'uguaglianza di genere, alle città sostenibili, alla generazione di energia e alla sostenibilità della produzione. [1] “Garantire modelli sostenibili di produzione e consumo” è l'obiettivo numero 12 dei Sustainable Development Goals introdotti dall'ONU nel 2015 e, per affrontare le tematiche legate allo sviluppo sostenibile, il concetto di economia circolare sta guadagnando terreno ed è sempre più visto come una soluzione completa o parziale a queste sfide (Geissdoerfer et al., 2017). Si spera, infatti, che un sistema economico che riduca al minimo l'estrazione di risorse e gli sprechi, le emissioni nocive antropogeniche e il consumo di energia del sistema produttivo, ne mitighi gli impatti negativi senza mettere a repentaglio la crescita economica e il benessere della popolazione (Geissdoerfer et al., 2018). Anche la Commissione Europea ha introdotto un'ambiziosa agenda per trasformare l'economia dell'Unione Europea in una circolare, con vantaggi in termini di crescita, innovazione, occupazione ma, soprattutto, per contribuire alla neutralità climatica sfruttando il potenziale della ricerca, dell'innovazione e della digitalizzazione (Commissione Europea, 2020). La transizione verso modelli orientati all'economia circolare richiede, infatti, un cambiamento rilevante nelle pratiche e strategie aziendali (Lacy e altri, 2015; Creazza e altri, 2021) e può essere facilmente favorita dallo sviluppo delle tecnologie digitali connesse all'Industria 4.0. Come riportato (da Stock et al. 2018), negli ultimi 250 anni ci sono stati grandi cambiamenti con le rivoluzioni industriali e, a partire dagli ultimi anni, si può osservare un'ulteriore evoluzione tecnologica dei sistemi di produzione con la quarta rivoluzione industriale, la cosiddetta Industria 4.0. [2] Questa nasce come sinergia tra la disponibilità

di tecnologie digitali innovative e la domanda da parte dei consumatori di prodotti di qualità e personalizzati, e può offrire un'enorme opportunità per allineare gli obiettivi di uno sviluppo sostenibile con la trasformazione digitale che è in corso. È sostenuta dal progresso delle tecnologie dell'informazione e della comunicazione (ICT), dall'archiviazione dei dati ma anche dall'Internet of Things ovvero dall'estensione dei vantaggi legati all'uso di Internet agli oggetti che interagiscono con altri oggetti e le persone in modo digitale, permettendo l'uso dei dati ottenuti per estrapolare informazioni necessarie per i processi decisionali. Ci sono molte tecnologie che caratterizzano l'Industria 4.0: manifattura additiva, robotica avanzata, realtà aumentata, cloud, big data, cybersecurity.... Le tecnologie possono consentire l'allocazione efficiente di risorse come materiali, energia, acqua, prodotti, utilizzando dati in tempo reale dai sistemi di produzione e dai partner della catena di fornitura, e tutto si traduce in decisioni di produzioni più sostenibili. Pertanto, la raccolta di dati, gli indicatori di tracciamento e monitoraggio, la condivisione delle informazioni, il processo decisionale, il coordinamento tra le aree organizzative e i partner della catena di fornitura, costituiscono tutti i fattori tecnici organizzativi che possono influenzare l'integrazione dell'Industria 4.0 e il processo decisionale di produzione sostenibile dal punto di vista ambientale. [3] Inoltre, l'Industria 4.0 può promuovere la produzione sostenibile, consentendo lo sviluppo di prodotti verdi, processi di produzione verdi e una gestione della catena di approvvigionamento verde come mai prima d'ora. Particolare attenzione sta suscitando la stampa 3D o produzione additiva, una tecnica di fabbricazione che sta trasformando le industrie, soprattutto manifatturiere, grazie ai suoi numerosi vantaggi quali la libertà di progettazione, la personalizzazione di massa, la capacità di creare assieme complicati, nonché la prototipazione rapida. [4] La produzione additiva è un metodo di fabbricazione tramite deposizione strato per strato di quantificabile. Grazie a tecnologie molto diverse tra loro si possono realizzare oggetti generando o sommando strati successivi di materiale (Additive Manufacturing), anziché per sottrazione dal pieno (Subtractive Manufacturing), così come accade in molte tecniche della produzione tradizionale quali tornitura, fresatura....

Questo studio si concentra sui seguenti obiettivi:

- ❖ realizzare, mediante stampa 3D, una serie di provini, pieni e a sandwich, in materiali diversi;
- ❖ sottoporre i provini a prove di piegatura;
- ❖ studiare le prestazioni.

Grazie alla tecnica di stampa 3D vengono realizzati dei provini di materiali diversi quali PLA, PLA con fibre di carbonio, PLA con fibre di grafene e PLA con fibre di legno balsa che, successivamente, sono sottoposti a prove di piegatura (in questo caso soprattutto di flessione), per caratterizzare i materiali e stabilire le loro prestazioni meccaniche. L'obiettivo finale è quello di evidenziare la

possibilità di ottenere delle buone prestazioni, avendo a disposizione materiali sempre più leggeri e biodegradabili.

2. STAMPA 3D

Nell'industria 4.0 un ruolo rilevante è dato dalla stampa 3D e quello della produzione additiva è un settore in grande ascesa quasi quanto l'invenzione del personal computer, uno sviluppo tanto potente quanto la diffusione di internet. La stampa 3D è un processo di produzione di oggetti tridimensionali partendo da un modello digitale che permette di realizzare oggetti completi o parti di oggetti e di macchine attraverso un sistema di stratificazione sequenziale: la produzione dell'oggetto avviene per strati, posizionando uno strato di materiale sopra l'altro. È comunemente nota come “manifattura additiva” proprio dal fatto che realizza gli oggetti aggiungendo materiale invece di asportarlo come fanno le tradizionali macchine utensili.

La normativa *ISO/ASTM 52900:2021* definisce sette categorie per la tecnologia additiva [5]:

1) Stampa a getto di legante (*Binder Jetting*)

Il legante liquido viene gettato attraverso ugelli sul letto di polvere in un modello che rappresenta la parte desiderata. Il legante aiuta gli strati di polvere ad aderire l'uno all'altro, di solito senza bisogno di calore. Mentre la macchina sparge un nuovo strato di polvere sul vecchio, gli ugelli gettano un altro strato di legante e questo processo si ripete fino a quando l'oggetto non viene costruito. Il materiale in polvere può essere metallo, sabbia o ceramica. Dato che non si usa calore per legare i materiali, questa tecnica è vantaggiosa dal punto di vista energetico e rende possibile riciclare tutta la polvere in eccesso. [6]

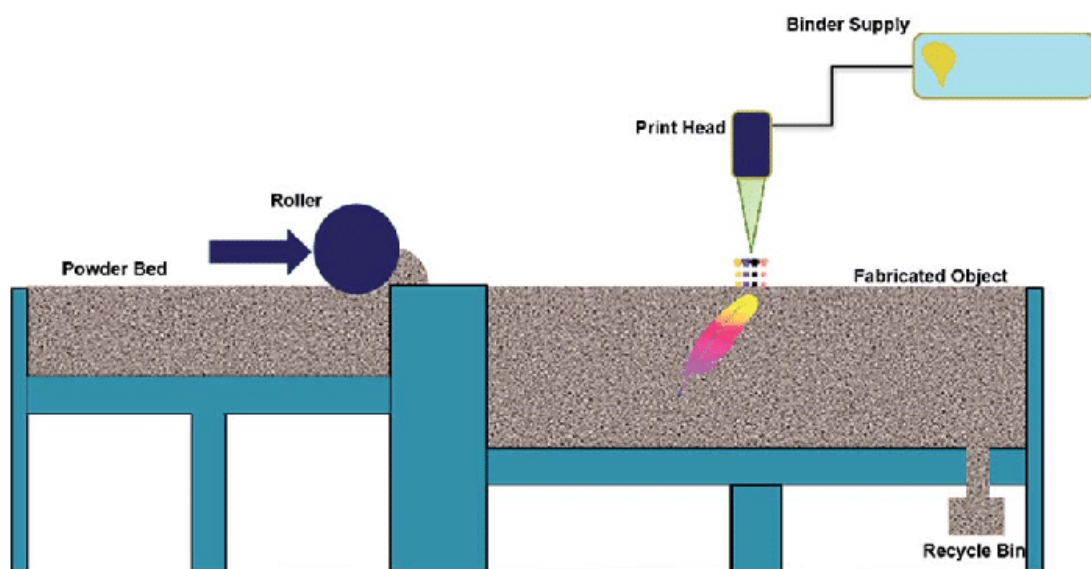


Figura [1] Binder Jetting

2) Stampa a energia diretta (*Direct Energy Deposition - DED*)

È un processo in cui i materiali vengono fusi durante la deposizione utilizzando energia termica focalizzata. La fonte di energia può essere un raggio laser, un fascio di elettroni o un arco di plasma. I materiali depositati sono sotto forma di filo o polvere e sono principalmente metalli. [7]

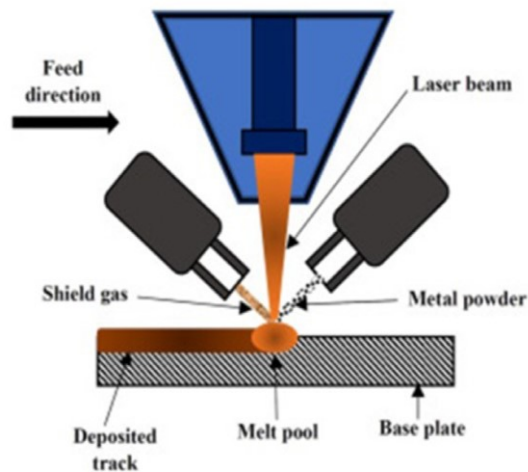


Figura [2] Direct Energy Deposition

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

I serbatoi di esclusione dell'aria vengono utilizzati per immagazzinare materiali fotopolimerici e questi vengono depositati come goccioline formando uno strato molto sottile sulla piattaforma di costruzione, dopo aver riscaldato il fotopolimero. La luce ultravioletta (UV) viene emessa sul materiale fuso sulla piattaforma di costruzione per l'indurimento. [8]

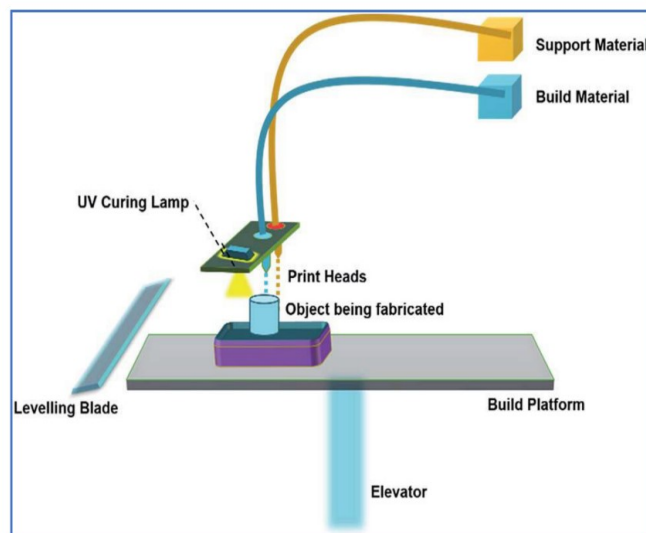


Figura [3] Material Jetting

4) Stampa a fusione di polveri (*Powder Bed Fusion*)

Le particelle di materiale da costruzione vengono fuse insieme mediante l'applicazione di calore o fascio di elettroni. [9]

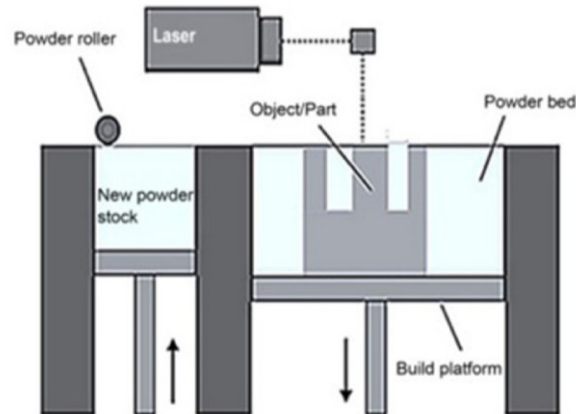


Figura [4] Powder Bed Fusion

Esistono diverse tipologie di questa tecnica:

- *Selective Laser Sintering (SLS)*: utilizza un raggio laser come fonte di energia che va a sinterizzare selettivamente le particelle di polvere che si fondono fino a creare oggetti 3D solidi. Durante la fase di stampa, il prototipo è costantemente immerso nella polvere non ancora sinterizzata. La tecnologia SLS consente l'impiego di una varietà di materiali che vanno dal nylon, al vetro e alla ceramica, all'alluminio, all'argento e persino all'acciaio. I vantaggi più evidenti sono la mancata necessità di fare uso di strutture di supporto, in quanto essa è completamente autoportante, una riduzione dei costi del materiale, la possibilità di gestire con più facilità geometrie ad alta complessità, rapidità nella stampa e produzione di parti considerate tra le più forti e rigide, con una buona resistenza chimica. La precisione è un altro importante vantaggio anche se i prodotti stampati presentano una certa porosità sulla superficie richiedendo, così, una fase di post lavorazione.
- *Direct Metal Laser Sintering (DMLS)*: utilizza una testa laser ad alta potenza ma l'alimentazione è sempre una polvere di metallo o un materiale conduttivo.
- *Selective Laser Melting (SLM)*: utilizza lo stesso principio della SLS realizzando pezzi in metallo puro, grazie alla fusione effettiva della polvere metallica.
- *Electron Beam Melting (EBM)*: utilizza un proiettore a fascio di elettroni per irradiare fasci di elettroni ad alta potenza sulla polvere metallica e fondere, così, le particelle metalliche.

Viene solitamente eseguita in una camera a vuoto, tranne nel caso in cui vengano utilizzati metalli e leghe per creare un modello 3D funzionale.

- Multi Jet Fusion (MJF): si deposita sullo strato di polvere, sul piano di stampa, sia un agente di fusione che un agente di dettaglio. Al passaggio dei raggi infrarossi, gli agenti di fusione reagiscono e inducono la fusione di due strati consecutivi, mentre nelle aree con l'agente di dettaglio rimane la polvere.

5) Stampa a laminazione (*Sheet Lamination*)

È un processo che prevede l'incollaggio di strati di materiali come carta, plastica e metallo, per creare un oggetto 3D.

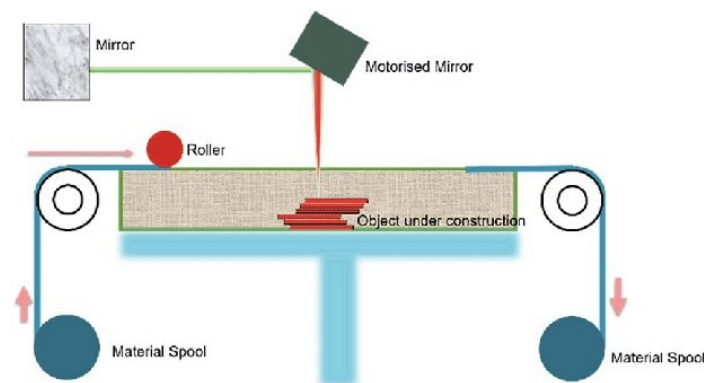


Figura [5] Sheet Lamination

I processi di laminazione più comuni sono:

- Laminated Object Manufacturing (LOM): consiste nel tagliare con un laser o un coltello fogli di materiale, solitamente carta o plastica, stratificati tra loro e legati con un sottile strato di adesivo;
- Ultrasonic Consolidation (UC): utilizza vibrazioni e pressioni ultrasoniche, generate da un sonotrodo, per creare attrito tra gli strati di metallo facendoli legare insieme.

6) Fotopolimerizzazione in vasca (*Vat Photopolymerization*)

È un tipo di tecnologia di stampa 3D che utilizza una resina liquida che si indurisce quando è esposta alla luce ultravioletta tramite un processo di fotopolimerizzazione. Tale processo prevede l'utilizzo di una resina fotopolimerizzabile, chiamata fotopolimero, che viene immagazzinata in una vasca ed esposta alla luce visibile o UV. Quando la luce di polimerizzazione colpisce la resina, innesca una

reazione di polimerizzazione che provoca la formazione di catene di polimeri o reticoli, portando alla formazione di una resina solida, ripetendo l'operazione strato dopo strato. [10]

Le tecnologie più comuni sono:

- Stereolithography (SLA): è il primo metodo di polimerizzazione in vasca; consiste in una resina liquida indurente laminata che utilizza luce laser a bassa potenza. I materiali usati sono resina fotopolimerizzabile, acrilica ed epossidica. Il processo prevede l'uso di un macchinario chiamato "apparato stereo litografico"; dopo ogni strato, il serbatoio di resina si distacca dal piano di lavoro e rilascia il materiale indurito. La piattaforma di costruzione si sposta di un livello che va dai 25 ai 200 micron, secondo lo spessore del livello scelto, al fine di favorire la solidificazione dello strato successivo. I vantaggi di tale processo sono l'elevata precisione e qualità superficiale del modello, mentre gli svantaggi sono: costi elevati dei materiali fotopolimerici e una fase di post-lavorazione.
- Digital Light Processing (DLP): è un processo che sfrutta l'ottica di proiezione e una maschera digitale (dispositivo a microspecchio digitale DMD o un display a cristalli liquidi LCD) per inviare luce LED modellata sulla superficie della resina, indurendo, così, un intero strato in una sola volta. [11]

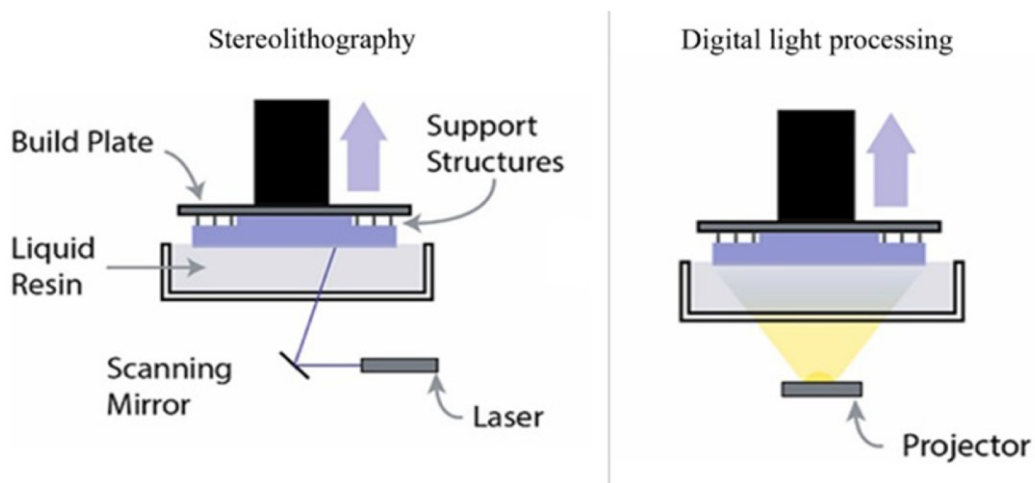


Figura [6] Vat Photopolymerization

7) Stampa a estrusione (*Material Extrusion*)

Questa tecnica utilizza una testina di stampa riscaldata in cui i filamenti termoplastici vengono fusi ed estrusi attraverso l'ugello e costruiscono la parte in uno schema strato per strato. Di questa categoria fa parte la tecnologia additiva più comune ed utilizzata, ovvero la *Fused Deposition Modeling (FDM)* che permette di ottenere un largo volume di produzione a basso costo. [12]

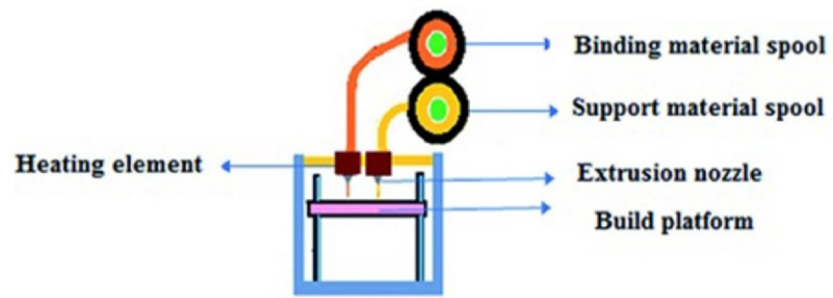


Figura [7] Material Extrusion

2.1 Storia stampa 3D

Le prime tracce dello studio di una tecnologia che ha reso possibile la prototipazione meccanica rapida si possono trovare nella topografia. La prima rudimentale macchina in grado di riprodurre oggetti per strati successivi fu ideata e costruita nel 1892 da Joseph E. Blather. Lo scopo di questa apparecchiatura era quello di costruire stampi destinati a realizzare mappe topografiche in rilievo. Tale metodo di produzione consisteva nell'incidere le linee di livello del terreno su determinate lastre di plastica, ritagliarle lungo queste linee e sovrapporle una sull'altra formando un modello fisico tridimensionale del terreno attraverso una cottura adeguata. Inventata da François Willème, anche la fotoscultura, ovvero l'arte di realizzare delle sculture attraverso fotografie che rappresentano i contorni e le caratteristiche dell'oggetto da riprodurre, diede importanti spunti per la nascita della prima stampante 3D.

Il 3D printing nasce grazie all'ingegnere americano Hull che brevettò la stereolitografia, ovvero un metodo per creare oggetti solidi da strati successivi solidificati di resina sensibile alla luce ultravioletta. Fondò nel 1986 l'azienda 3DSystems, azienda che diede vita al primo esempio commerciale di rapid prototyping, e del formato STL (formato di file ancora usato nella stampa 3D). Negli anni successivi Carl Deckard, Joe Beaman and Paul Forderhase (e diversi altri ricercatori) svilupparono la Selective Laser Sintering (SLS), stampa 3D a fusione selettiva laser, che apportò un'importante modifica: fu, infatti, sostituita la resina con il Nylon, ovvero un liquido con una polvere di materiale. La distribuzione di stampanti 3D dagli anni Novanta la si deve all'invenzione e deposizione del brevetto della tecnologia Fused Deposition Modeling (FDM) da parte di Crump, fondatore dell'azienda Stratasys. L'FDM lavora in maniera additiva, ovvero l'oggetto viene realizzato strato su strato da un filamento di plastica fuso rilasciato secondo precisi parametri ricavati tramite il programma di slicing. Verso la metà degli anni Novanta, fu il turno del MIT l'istituto di tecnologia di Boston che inventò una stampa 3D più sofisticata, in grado di riprodurre fedelmente oggetti della vita reale con maggior cromaticità: si riuscì a stampare per la prima volta al massimo con 28 colori. Questa tecnologia complessa costituì la base per l'attuale stampa 3D a colori. Il 2002 fu l'anno dell'Electron Beam Melting, ovvero fusione a fascio di elettroni, una tecnologia mediante la quale una sorgente di elevata energia, composta da un fascio opportunamente concentrato e accelerato di elettroni, colpisce un materiale in forma "microgranulometrica" provocandone la fusione completa. Nel 2005, grazie al principio del Self Replicating Rapid Prototyper, si ebbe la vera e propria svolta: fu creata una stampante 3D in grado di riprodurre sé stessa. Grazie alle piattaforme di Crowdfunding nacque il RepRap project, attivo ancora oggi, completamente open source, ovvero gratuito e scaricabile per chiunque volesse cimentarsi nel ricostruire la propria stampante 3D. L'aspetto

fondamentale dell'Open source è il sentimento della condivisione: moltissimi designer e sviluppatori, infatti, cominciarono a caricare in rete i loro progetti o i loro software per il semplice desiderio di condividere la conoscenza e favorire l'innovazione. Nel 2008 Bre Pettis, Adam Mayer, e Zach Hoeken Smith fondarono la MakerBot Industries e diedero inizio alla loro fiorente attività imprenditoriale che ci ha consegnato le stampanti più belle (almeno esteticamente) in circolazione tuttora. Partiti dal progetto inglese RepRap il risultato cui la MakerBot giunse fu la prima stampante acquistabile in scatola di montaggio e fu un successo incredibile. Dal 2008 è possibile addirittura acquistare stampanti 3D che possono essere utilizzate comodamente all'interno della propria casa. Ci sono diverse tecnologie per la stampa 3D ognuna delle quali si differenzia per il modo in cui si costruiscono gli strati. Alcune tecnologie utilizzano materiali in polvere o materiali liquidi, altre lavorano con una modellazione a deposizione fusa, e altre ancora utilizzano un sistema a laminazione (Magnaghi, 2015, 11). Ogni metodo offre vantaggi e svantaggi in base alle esigenze che devono soddisfare i produttori che utilizzano queste tecnologie. Le principali considerazioni da analizzare per effettuare la scelta di una stampante 3D sono relative alla velocità di produzione, i materiali che si possono utilizzare nella stampa, la dimensione e il costo. I prezzi delle stampanti 3D si sono ridotti di molto negli ultimi anni, ma ricordiamo che insieme alla stampante 3D vanno acquisiti anche i software che servono per la creazione di modelli 3D in modo digitale.

Secondo molte ricerche di mercato, la stampa 3D è la più diffusa tra le principali tecnologie emergenti della manifattura 4.0, godendo della fiducia di tante imprese che stanno cercando di portare il processo di stampa 3D all'interno dei processi produttivi, attraverso le risoluzioni delle criticità che la tecnologia stessa deve affrontare.

2.2 Additive Manufacturing (AM)

L'Additive Manufacturing, più comunemente chiamata stampa 3D nel mercato del consumo o "prototipazione rapida" nel mercato industriale, è una tecnica di fabbricazione utilizzata per produrre un oggetto tramite l'aggiunta progressiva di un materiale, con la realizzazione del pezzo che procede sezione per sezione sulla base di un modello CAD tridimensionale. A differenza dei metodi tradizionali sottrattivi, come fresatura e tornitura, in cui il processo inizia con un blocco di materiale dal quale vengono rimossi meccanicamente trucioli, la stampa 3D parte da un materiale grezzo non formato e da lì costruisce la parte sovrapponendo il materiale strato per strato. La stampa 3D parte, dunque, dal nulla e termina con la parte finita, con il minimo spreco di materiale nel processo di creazione. [13]

La produzione mediante tale tecnologia si sviluppa in varie fasi:

- Creazione del modello tridimensionale: il modello tridimensionale di partenza viene realizzato tramite sistemi CAD (Computer Aided Design) che permettono di trasformare dei disegni bidimensionali in oggetti tridimensionali;
- Generazione del file STL: un file di tipo STL (Standard Triangulation Language) è un formato usato per la stampa 3D che utilizza piccoli triangoli collegati tra loro per ricreare la superficie del modello solido. Il livello di complessità del modello determina la quantità di triangoli necessari e la loro dimensione; ogni triangolo è definito da una serie di parametri. Il formato STL serve da interfaccia tra il modello CAD ed il software della stampante 3D;
- Esecuzione dello slicing: suddivisione in strati operata da un software apposito dove poter regolare i diversi parametri di stampa. Lo slicing è un'operazione critica perché condiziona in modo determinante la precisione del componente da realizzare;
- Traduzione del modello suddiviso in strati nel linguaggio macchina col formato .gcode;
- Invio del file alla stampante 3D che realizza il modello secondo la procedura indicata.

I vantaggi principali della produzione additiva sono:

1. Realizzazione di forme complesse e dettagliate senza l'ausilio di stampi o attrezzature (con la produzione sottrattiva non è possibile);
2. Ecosostenibilità del processo in quanto lo scarto del materiale è minimo, con conseguente minor spreco e costi inferiori;
3. Assorbimento di minor energia rispetto alla produzione sottrattiva;
4. Uso di diversi materiali che vanno dal metallo alla ceramica, dalla plastica alla sabbia;

5. Utilizzo della produzione additiva principalmente nella prototipazione rapida per produrre modelli e avere un'idea realistica dell'oggetto che si sta progettando prima della sua produzione in serie;
6. Elevato grado di personalizzazione del prodotto;
7. Realizzazione di strutture leggere mediante l'ottimizzazione topologica.

I principali svantaggi della tecnologia additiva, invece, sono:

1. Realizzazione di piccole quantità di prodotti;
2. La superficie delle parti realizzate presentano una scarsa finitura superficiale e, dunque, necessitano spesso di trattamenti finali che comportano automaticamente costi e tempi aggiuntivi.

Oggigiorno sono presenti moltissime tecniche che si differenziano tra loro per le modalità di stampa, velocità di stampa, materiali utilizzati, qualità superficiale ottenibile e volumi massimi di stampaggio. Tra tutte le tecniche disponibili, quella più semplice è la FDM (Fused Deposition Modeling).

2.3 Fused Deposition Modeling (FDM)

È un processo di produzione additiva appartenente alla famiglia di estrusione del materiale. Questa tecnica di stampa 3D permette di realizzare oggetti a partire da un filamento solido che viene poi fuso e depositato strato per strato dalla testina della stampante. [14] Il filamento di materiale, generalmente termoplastico, viene srotolato da una bobina e successivamente riscaldato ed estruso attraverso un ugello, che lo deposita a strati sul letto di stampa seguendo il modello digitalizzato, fino ad ottenere la parte desiderata. (Figura 8) L'estrusore è costituito da un motore che richiama il filamento, un elemento riscaldante ed una termocoppia che controlla la temperatura; è in grado di muoversi nel piano XY. Una volta che uno strato è stato completato, la piattaforma di stampa si abbassa, in direzione Z, per consentire l'esecuzione dello strato successivo.

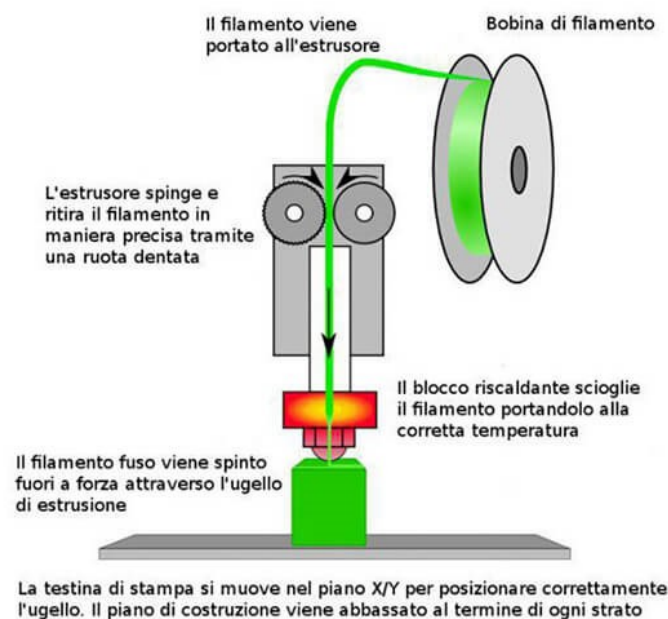


Figura [8] – Descrizione FDM

Possono essere lavorati sia polimeri termoplastici, che mantengono le loro proprietà anche ad elevate temperature e sono rifondibili, e sia polimeri termoindurenti che, però, non sono rifondibili in quanto le alte temperature possono degradarlo.

I materiali più utilizzati con il metodo FDM sono in realtà i polimeri termoplastici come PLA (Acido Polilattico), ABS (Acrilonitrile-Butadiene Stirene), PC (Policarbonato).

Per scegliere la tipologia di polimero adatto per tale tecnologia, bisogna tener conto di alcune proprietà:

- *Adesione fra gli strati*: una misura della bontà dell'adesione fra differenti strati di stampa;
- *Allungamento a rottura*: massimo allungamento che il materiale presenta prima di rompersi;
- *Facilità di stampa*: misura delle difficoltà incontrate stampando il materiale (adesione col piano di stampa, velocità massima di stampaggio, accuratezza, facilità di carico...);
- *Qualità visiva*: legata alla finitura superficiale e all'accuratezza di stampa;
- *Resistenza meccanica*: carico massimo che il materiale è in grado di sopportare prima di rompersi;
- *Resistenza al calore*: temperatura massima che l'oggetto è in grado di sostenere prima di rammollirsi;
- *Resistenza all'impatto*: energia necessaria per rompere un oggetto con un impatto improvviso.

2.3.1 Parametri di processo

I principali parametri di processo per la tecnologia FDM sono: [15]

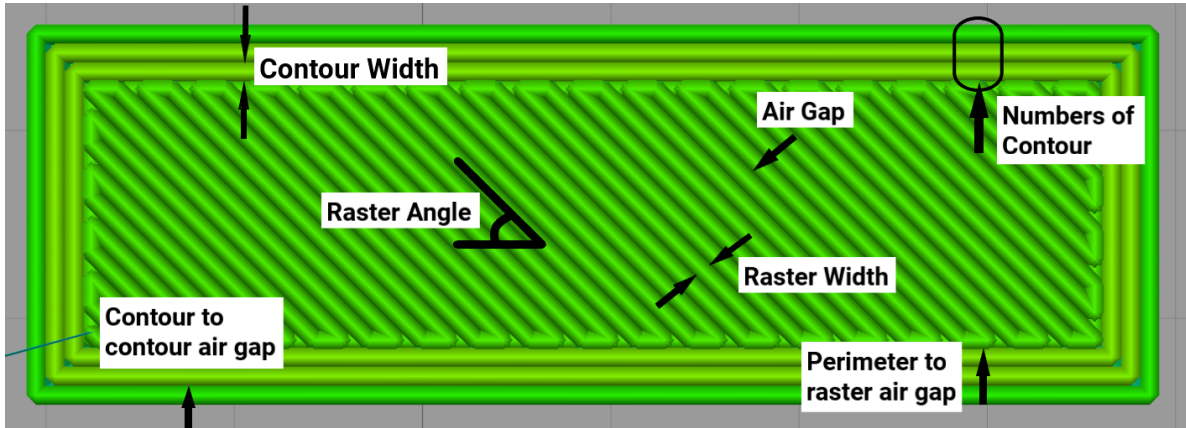


Figura [9] – Insieme dei parametri di processo

- **Larghezza del filamento (raster width)**: tale parametro 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.

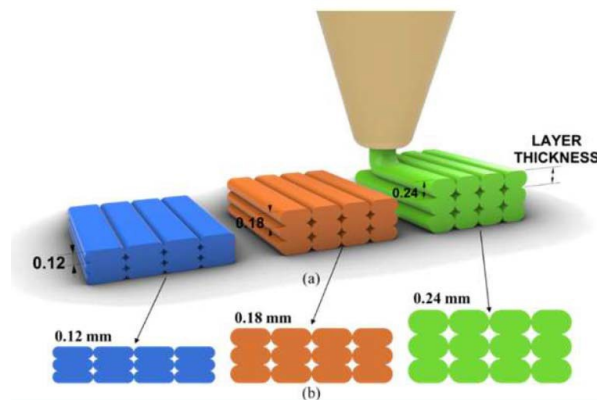


Figura [10] - Larghezza del filamento depositato

- **Orientamento del filamento (raster angle)**: le prime zone in cui viene depositato il materiale sono quelle che costituiscono il bordo del pezzo facendo sì che il materiale depositato non possa fuoriuscire. Completato il bordo, si procede con il riempimento della sezione e, infine,

si passa alla realizzazione dello strato successivo. L'orientamento del filamento viene definito dal "raster angle" ossia l'angolo che il filo depositato forma rispetto ad un asse di riferimento e può assumere valori compresi tra 0° e 90° . Questo parametro influenza la resistenza a trazione ed anche la topologia della superficie di frattura del componente.

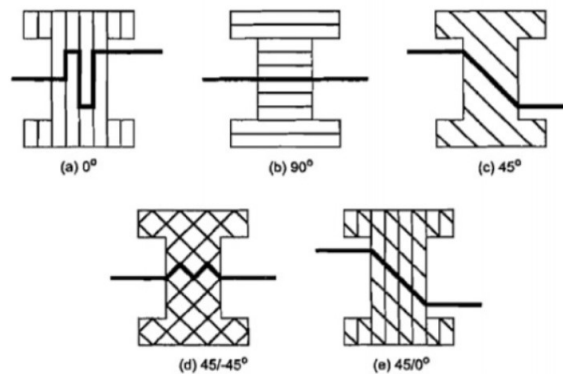


Figura [11] - Possibili orientazioni con le quali può essere depositato il filamento

- **Direzione di crescita del pezzo nel piano (Building orientation):** questo parametro indica la direzione sulla quale viene costruito man mano il pezzo in riferimento ai tre assi X, Y e Z.

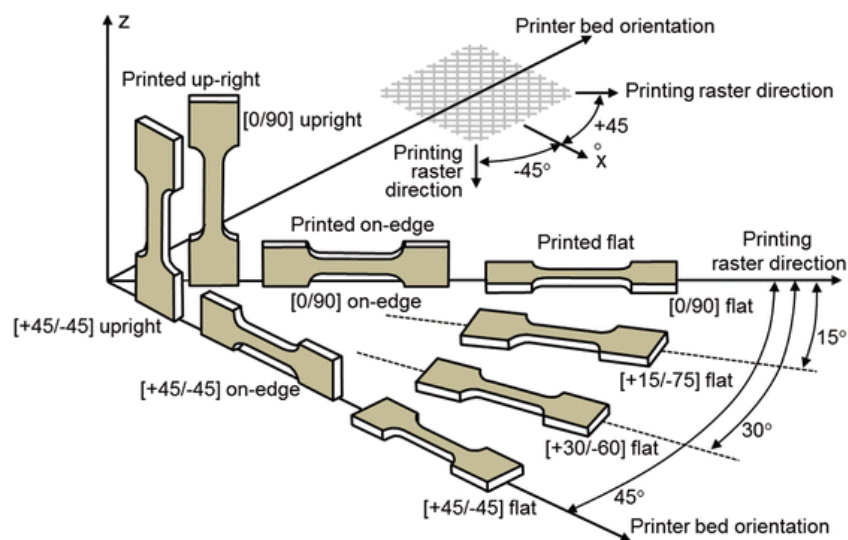


Figura [12] - Possibili direzioni di crescita del pezzo nel piano con le quali può essere stampato

- **Spessore dello strato depositato (Layer Thickness):** questo parametro definisce la qualità estetica e la rugosità superficiale del pezzo; dipende dalle dimensioni della testa dell'estrusore e dal tipo di materiale. Tanto più piccolo è lo spessore del singolo strato tanto più omogenea è la superficie laterale del pezzo, mentre tanto maggiore è lo spessore tanto più la superficie diventa discontinua e a gradini.

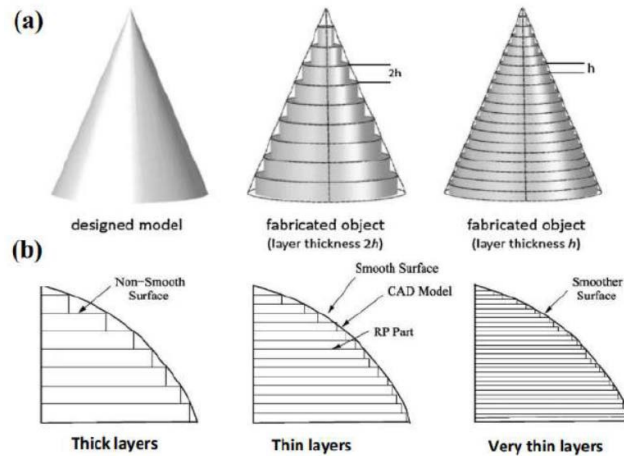


Figura [13] - Possibili spessori dello strato depositato, con effetto della loro riduzione

- **Air Gap:** indica la distanza fra due filamenti adiacenti in uno stesso strato. Questo è un parametro che incide sulla porosità interna, velocità d'usura del pezzo stampato, proprietà meccaniche e densità di riempimento. Maggiore è la percentuale di riempimento maggiore sarà la resistenza meccanica del pezzo, anche se ciò comporta tempi di stampa più lunghi.



Figura [14] - Provini con diversa percentuale di riempimento

- **Temperatura di estrusione e del letto di stampa (Extrusion and Bed Temperature):** la temperatura di estrusione e quella del letto di stampa hanno particolare influenza sull'adesione tra gli strati. Infatti, all'aumentare della temperatura di estrusione, che deve essere maggiore

della temperatura di fusione del materiale termoplastico, risulta più facile la fuoriuscita del filamento dall'ugello estrusore. Se la temperatura dell'estrusore è troppo bassa, il flusso e la velocità di stampa diminuiscono e il legame tra gli strati risulta debole. Una temperatura troppo alta, invece, danneggia l'accuratezza delle dimensioni dello stampato in quanto si rende più facile il flusso del polimero che risulta fuso. È importante scaldare anche la piattaforma di stampa per creare un gradiente termico opportuno che riesca a garantire una buona forza di adesione tra il primo strato e la superficie del letto di stampa. La differenza di temperatura tra il filamento appena estruso e il letto non deve essere troppo ampia per evitare di avere una velocità di raffreddamento troppo elevata che potrebbe causare danni all'adesione interfacciale. Al contrario, un raffreddamento troppo lento potrebbe causare una diffusione eccessiva del fuso e, quindi, una riduzione della qualità superficiale.

- **Velocità di estrusione (Extrusion Rate):** la velocità di estrusione ottimale dipende dal tipo di materiale che si sta trattando. All'aumentare della velocità di stampa, il legame tra i filamenti si riduce e ciò è dovuto alla mancanza di tempo per la plastificazione del polimero.

2.4 Materiali

Quando si parla di stampa 3D, la scelta dei materiali è di cruciale importanza. Oggi il mercato offre una grande varietà nella scelta dei materiali: dai polimeri (PLA, PET, PC, ABS, PVA...) e i metalli (Alluminio, Rame, Argento, Nichel, Acciaio, Titanio, Cobalto-Cromo...), passando per le ceramiche e i materiali compositi.

I metalli più usati sono: [16]

- **ALLUMINIO:** offre un eccellente compromesso tra leggerezza e solidità, è resistente alla corrosione e si trova frequentemente sotto forma di lega con metalli che ne migliorano le proprietà fisiche e meccaniche; viene usato molto nel settore automotive e nell'aeronautica;
- **COBALTO-CROMO:** tali leghe presentano elevate proprietà meccaniche e termiche; sono resistenti alla corrosione e, dunque, vengono usate in applicazioni ingegneristiche ad alta temperatura, come i motori degli aerei e in ambito biomedico;
- **NICHEL:** resiste a temperature elevate e presenta un'ottima resistenza meccanica e all'ossidazione. È molto usato in ambito aerospaziale;
- **ACCIAIO:** è la lega più usata in quanto presenta una notevole flessibilità applicativa;
- **TITANIO:** presenta notevoli proprietà meccaniche e resistenza alla corrosione, una buona biocompatibilità e viene molto usato in campo medico e aerospaziale.

I materiali polimerici più utilizzati, invece, sono: [17]

- **ABS:** può essere usato sia a iniezione sia ad estrusione. È un materiale non biodegradabile e richiede temperature di estrusione di circa 240°; è molto deformabile, non semplice da stampare perché durante la fase di raffreddamento subisce notevoli deformazioni e necessita anche di rifiniture attraverso l'uso di solventi come acetone. È molto usato per realizzare parti piccole o prodotti resistenti agli urti e all'usura;
- **PLA:** è un polimero completamente biodegradabile, composto da amido di mais o da altri prodotti di origine vegetale. Si estrude a temperature di circa 200°C, mentre rammollisce a circa 60°C. Presenta buone caratteristiche meccaniche;
- **NYLON:** fa parte della famiglia delle poliammidi sintetiche; è un materiale resistente all'usura e ai solventi, è elastico e quando viene stampato è anche flessibile. Viene lavorato a temperature di circa 260°C e necessita di un piano di lavoro riscaldato. È il materiale più usato

nella Sinterizzazione Laser Selettiva (SLS) e, in fase di post-lavorazione, può essere soggetto a svariate modalità di lucidatura, tintura o pittura;

- PET (Polietilene Tereftalato): viene trattato a temperature di circa 230°C con un piano di lavoro riscaldato; è molto usato nelle industrie perché adatto al contatto con gli alimenti e, presentando una buona trasparenza e lucidità, viene anche usato per la creazione di giocattoli, parti per elettronica e cosmetica;
- PVA (Alcool Polivinilico): è un composto chimico idrosolubile; è leggermente più complesso da estrarre rispetto agli altri polimeri a causa dell'alta temperatura di stampa;
- HIPS (High Impact PolyStyrene): è presente in due modalità, ovvero come materiale usato per supporti, in quanto rimovibile attraverso un liquido chiamato limonene, oppure come polimero dalle buone caratteristiche meccaniche.

I materiali che si possono utilizzare nella stampa 3D sono stati un problema non di poco conto negli ultimi anni: inizialmente era possibile stampare oggetti principalmente in plastica e poi, con l'evoluzione della tecnologia, si è arrivati a poter utilizzare metalli, argilla, sabbia, vetro, carta fino ad arrivare a materiali utilizzati nel food come cioccolato, zucchero, amido e persino cellule viventi nel bio-printing. Sono stati fatti passi in avanti sotto questo punto di vista riuscendo a stampare anche con leghe metalliche, necessità primaria per l'industria manifatturiera.

Secondo un report globale sulla stampa 3D condotto nel 2016, che ha permesso di raccogliere informazioni da parte di aziende che fanno uso di più tecnologie, i materiali polimerici e i metalli erano, infatti, già in testa alla classifica.

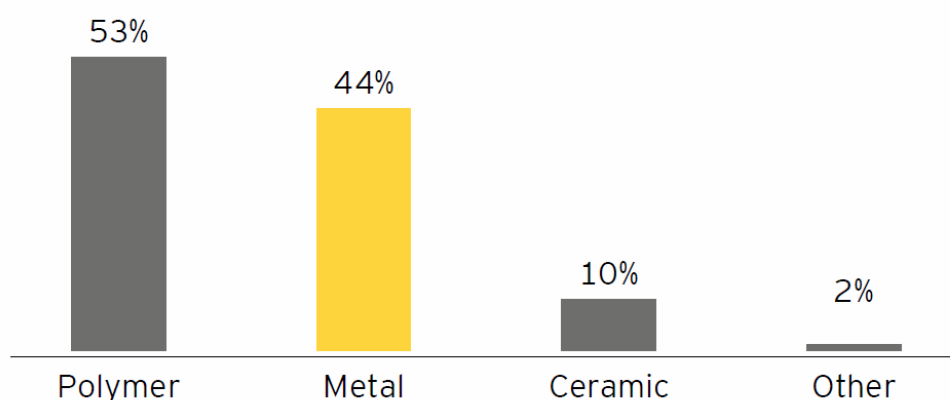


Figura [15] - Materiali impiegati nella stampa 3D (%)

L'uso della ceramica era di gran lunga inferiore in quanto solo il 10% delle aziende ne faceva uso, e questo era probabilmente dovuto alla sua durabilità e alla poca flessibilità.

Alla fine del 2017, è stato stimato che i materiali PLA erano in cima alla classifica con un 32% dell'ammontare complessivo, seguiti con un lieve distacco dai filamenti ABS (14%), mentre al terzo posto si trovavano le resine standard (8%).

Da un'indagine condotta nel 2020 su un campione di 250 aziende italiane è emerso, invece, che l'82% degli intervistati ha dichiarato di avvalersi principalmente di filamenti plastici come ABS, PLA o PETG per la stampa 3D e, molto diffusi, sono anche i materiali compositi, utilizzati da più del 57% delle aziende italiane.

La Stereolitografia, ad esempio, fa ampio uso di materiali plastici e resine, di cui il mercato offre una vasta gamma: monomeri lunghi e corti, oligomeri, fotoiniziatori e additivi. Le resine si presentano sotto forma di materiale fotopolimerico liquido, trattato e indurito attraverso l'energia ultravioletta (UV). Sono considerate molto versatili, e per questo, tutte le tecnologie sviluppatasi attorno all'uso delle resine sono quelle che offrono la qualità più elevata. Tra i numerosi vantaggi che l'uso delle resine comporta troviamo: alta risoluzione, superficie liscia (anche senza rifinitura), un'ampia varietà di colori e proprietà, tra cui la trasparenza e la traslucidità.

Uno dei più grandi svantaggi, invece, è rappresentato dal livello di irritabilità e tossicità delle resine. Per evitare di correre dei rischi è necessario trattarle utilizzando un'attrezzatura adeguata.

Per quanto riguarda la Sinterizzazione Laser Selettiva (SLS) i materiali più diffusi sono le poliammidi; ne è un esempio il Nylon, un materiale rigido, resistente e capace di flettersi anche sotto carichi elevati. In fase di post-lavorazione, può essere soggetto a svariate modalità di lucidatura, tintura o pittura. Le poliammidi, però, assorbono rapidamente l'umidità e devono, quindi, essere conservate in modo appropriato.

2.5 Campi di applicazione della stampa 3D

Ingegneri e designer hanno utilizzato la stampante 3D per più di un decennio limitatamente alla produzione di prototipi, modelli funzionali e modelli di presentazione. Nel corso del tempo, però, questa tecnologia ha subito dei miglioramenti permettendo di stampare molti più oggetti come prodotti finali e non come prototipi. Secondo uno studio svolto dall'Istat nel 2018, la stampante 3D in Italia veniva prevalentemente utilizzata nelle aziende manifatturiere, nella fabbricazione di prodotti di elettronica e di mezzi di trasporto.

ITALIA	2018
Settori	Incidenza % di utilizzo della stampa 3D
Attività manifatturiere	9.1
Industrie alimentari	1.6
Industrie tessili	1.7
Industrie dei prodotti in legno, carta	2.4
Industria chimica e petrolifera	9.2
Industria metallurgica	9.1
Industria elettronica	30.3
Industria dei mezzi di trasporto	25.4

Tabella [1] - Incidenza della stampa 3D nei principali settori industriali italiani

Come si può notare dalla tabella [1], la stampa 3D trovava maggiori applicazioni in determinati settori, mentre in altri era poco considerata. L'industria elettronica e quella dei mezzi di trasporto avevano già familiarità con questa nuova tecnologia, mentre negli altri settori si stava iniziando a diffondere. Attualmente molti sono i campi che sono stati rivoluzionati dall'uso della stampa 3D come l'aerospaziale, l'automotive, il biomedicale, il packaging, la gioielleria, la moda e lo sport. [18] Nel settore automotive il team McLaren impiega, già da diversi anni, componentistica concepita e prodotta tramite la stampa 3D in quanto garantisce una leggerezza e una forma/reticolo dei pezzi che sarebbero irraggiungibili con le tecnologie convenzionali (un esempio è l'utilizzo delle celle a nido d'ape, strutture con un rapporto peso/resistenza impareggiabili).

Nel campo dello sport, invece, la stampa 3D viene utilizzata per realizzare attrezzature o componenti per articoli sportivi con prestazioni ottimali ed elevata resistenza meccanica utilizzando la fibra di carbonio, come tavole da surf, telai per biciclette, bastoni da hockey ma anche elementi per la protezione della persona come parastinchi, facciali, paraspalle, caschi...

Quadpack Industries progetta e produce a livello mondiale soluzioni di confezionamento personalizzate per il settore della cosmetica, inclusi il make-up, i profumi e i prodotti per la cura della pelle. L'azienda ha potenziato, infatti, il team di progettazione creando il reparto di Design e tecnologie avanzate dopo aver adottato, qualche anno fa, la stampa 3D con la serie J di Stratasys.

La stampa 3D sta aprendo infinite possibilità in moltissimi campi: dal food al packaging per prodotti accattivanti e funzionali, fino all'architettura soprattutto nella fase di progettazione con la realizzazione di plastici completi o particolari, e dimostrandosi uno strumento fondamentale per il rilievo, la catalogazione e il recupero del patrimonio artistico e culturale.

Nell'industria cinematografica le tecnologie 3D vengono utilizzate sui set di vari film, da quelli di animazione, ad Avatar e ai film Marvel per realizzare oggetti di scena, prototipi di pezzi dal design unico, costumi, maschere e gioielli. Il personaggio di Hela, sorellastra di Thor, ad esempio, indossa un copricapo stampato in 3D dopo aver scansionato la testa dell'attrice che ne ha interpretato il ruolo. È stata utilizzata la tecnologia SLS e una polvere composita rinforzata con fibre di carbonio che offre leggerezza e buona stabilità. [19]

Nel settore dell'abbigliamento sono già stati realizzati capi stampati in 3D e marchi importanti, come Adidas e New Balance, hanno realizzato delle scarpe con questa tecnologia perché consente di ottimizzare le strutture interne ed inserire il materiale dove si desidera, il che significa offrire ai progettisti il potere di creare nuove e più precise geometrie. Alcuni stilisti di moda hanno a disposizione modelli di body 3D con cui possono verificare rapidamente i problemi relativi al drappaggio dei tessuti e valutare la vestibilità del capo. Addirittura, la società statunitense Intel ha realizzato un capo con la stampa 3D che, interagendo con le onde cerebrali di chi lo indossa, cambia colore.

Considerando, dunque, la capacità della stampa 3D di aumentare la complessità geometrica e ridurre il time to market come vantaggi aziendali chiave, seguita da una riduzione dei costi di utensili e assemblaggio, e la riduzione degli inventari dei pezzi di ricambio, la produzione additiva sembra destinata a cambiare il modo in cui le aziende introducono i loro prodotti sul mercato e rispondono alle esigenze dei clienti.

3.MATERIALI E PROCEDURE SPERIMENTALI

In questo studio è stato impiegato prevalentemente un materiale termoplastico detto comunemente PLA. Si tratta di acido lattico, un materiale che è stato processato tramite stampa 3D, attraverso la tecnica dell'estrusione da filamento. Il PLA, che verrà descritto nei paragrafi successivi, è stato utilizzato per realizzare dei provini sia in PLA standard e sia con l'aggiunta di fibre (materiali compositi).

3.1Materiali Compositi

I materiali compositi sono costituiti da una sostanza presente in quantità maggiore, detta matrice, e da altri costituenti, chiamati additivi che servono per migliorare alcune specifiche proprietà della matrice. È importante studiare questi additivi perché permettono di capire come i materiali compositi siano differenti dai singoli componenti. L'unione tra matrice base, generalmente polimerica, e additivi può essere svolta con vari processi che si differenziano tra loro a seconda delle caratteristiche del composito che si vuole ottenere. I processi più usati sono:

- *Solvent processing*: è un procedimento finalizzato ad unire le molecole del polimero, sciolte in un solvente, con l'additivo. È organizzato in tre fasi e seguito poi da un lavaggio in acqua distillata e asciugatura;
- *In situ polymerisation*: è un procedimento nel quale l'additivo si mescola con il monomero del polimero e, dopo la loro unione, si attiva la reazione di polimerizzazione;
- *Met processing*: è un metodo che consiste nel disperdere meccanicamente gli additivi nel materiale base; si riscalda il polimero sino alla temperatura di fusione e, poi, si inserisce l'additivo nel fluido. I due componenti si mescolano con un'apparecchiatura meccanica;
- *Electrospinning*: il polimero e l'additivo sono disciolti in un solvente e inseriti in una siringa. Si applica una differenza di potenziale elettrico tra l'ago della siringa e una piastra metallica immersa in una seconda soluzione; le forze repulsive tra i due fluidi spingono il polimero dalla siringa alla seconda miscela;
- *Electro-deposition*: è un procedimento che consiste nel disciogliere il monomero del polimero in una soluzione acquosa assieme all'additivo; si inserisce la soluzione in una cella, dotata di elettrodi, dove avviene la reazione di polimerizzazione.

I composti più diffusi sono rinforzati con fibre; ad esempio, alcuni polimeri sono combinati con additivi derivati dal vetro, dal carbonio, dalla ceramica o da composti di origine naturale.

In questo elaborato si analizzeranno provini con matrice in PLA e fibre di carbonio, grafene e legno balsa.

3.1.1 PLA

Negli ultimi vent'anni i materiali polimerici e i compositi ecocompatibili caratterizzati da fibre naturali e matrici bioplastiche sono considerati molto attraenti per la combinazione di interessanti proprietà meccaniche e fisiche correlate soprattutto alla sostenibilità. [20]

Come mostra la figura [16], relativa alla quota di mercato del 2021 associata ai principali biopolimeri, la porzione maggiore del mercato (circa il 65%) è occupata da polimeri biodegradabili mentre il restante 35% è composto da tradizionali polimeri non biodegradabili.

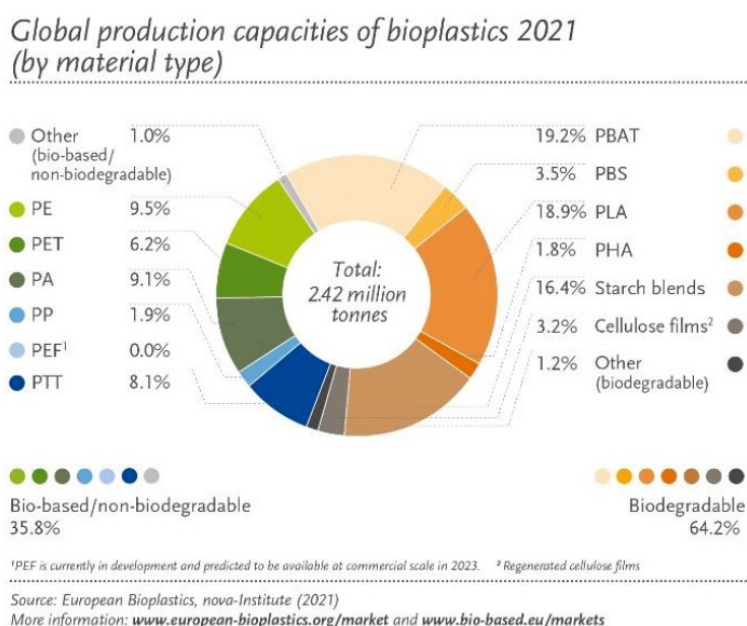


Figura [16] – Produzione globale di materiali bioplastici nel 2021

Sono le normative a stabilire la biodegradabilità di un materiale, ovvero se può subire biodegradazione in un ambiente microbiologicamente attivo, se non rilascia sostanze tossiche nell'ambiente e se non presenta una concentrazione di metalli pesanti superiore alla metà del valore limite permesso per il compost dalla legislazione vigente.

I polimeri bio-based, invece, sono plastiche che derivano interamente o parzialmente da materie prime rinnovabili; la maggior parte di questi deriva da materie prime dette “di prima generazione” che includono biomasse edibili come mais, canna da zucchero, patate, grano e oli vegetali.

Tra i non-biodegradabili fanno parte quei polimeri che si distinguono dalle plastiche tradizionali per la materia prima da cui derivano. Alcuni esempi di questa categoria sono il bio-PE, il bio-PET e le biopoliammidi.

L'acido polilattico, conosciuto come PLA, è il polimero bio-based, biodegradabile e biocompatibile più studiato ed utilizzato sia in ambito industriale che biomedico. È facilmente processabile con le tradizionali tecniche di lavorazione delle materie plastiche (stampaggio, filmatura, estrusione, filatura). [21] Nella figura [17] è mostrata la sua struttura chimica:

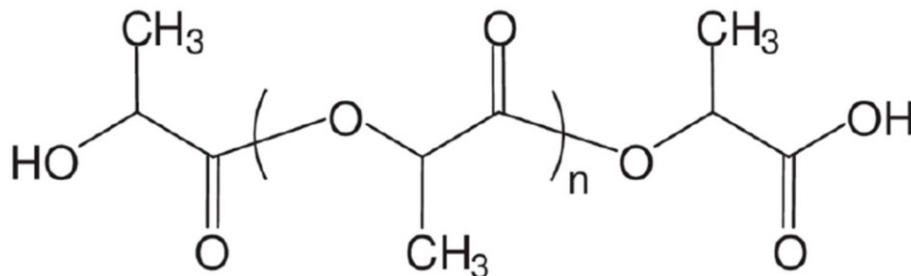


Figura [17] – Struttura chimica PLA

L'unità costituente il PLA è l'acido lattico, una molecola chirale che consiste di due enantiomeri; si ottiene dalla fermentazione di zuccheri (ad esempio glucosio o disaccaridi) derivanti da fonti naturali rinnovabili, come la canna da zucchero e l'amido di mais. Il processo metabolico di determinati batteri, in ambiente anaerobico, converte gli zuccheri in energia e acido lattico.

Le proprietà del PLA dipendono dalla sua stereochimica, dalla temperatura a cui viene lavorato, dal tempo di ricottura e dal peso molecolare. [22] A livello industriale, il PLA è sintetizzato a partire da acido L-lattico, pertanto è in prevalenza PLLA. La cristallinità del polimero è governata dal contenuto di forma L del polimero: il PLA con un contenuto di PLLA superiore al 90% presenta fase cristallina, mentre al di sotto di questa quantità è amorfo. La temperatura di transizione vetrosa è compresa tra i 50°C e 60°C, mentre quella di fusione varia tra i 140 e i 180°C.

Le principali aree di impiego di questo materiale sono il settore medico (suture chirurgiche, chiodi e viti per il fissaggio di ossa e legamenti), settore tessile (abbigliamento sportivo, tappezzeria e strutture per applicazioni geotessili) e ambito del food-packaging.

I parametri consigliati dal fornitore (Filoprint) sono:

- ❖ Temperatura di stampa: 200°C-230°C
- ❖ Temperatura del letto di stampa: 0°C-60°C
- ❖ Velocità di stampa: 30 mm/s-80 mm/s

3.1.2 PLA con fibre di carbonio

Il composito HTPLA-CARBONIO è realizzato con una quantità altissima di PLA, caricato con solo il 15% di fibre di carbonio finemente polverizzate. Questi due materiali, insieme, determinano prestazioni molto avanzate e una notevole facilità di stampa. Grazie alla sua carica di polveri di carbonio, questo PLA risulta particolarmente rigido, resistente soprattutto ai raggi UV e riesce a mantenere la sua dimensionalità e le caratteristiche tecniche anche in condizioni di calore elevato (fino a 115°C). Il fornitore (Filoprint) consiglia i seguenti parametri:

- ❖ Temperatura di stampa: 200°C-250°C
- ❖ Temperatura del letto: >60°C
- ❖ Velocità di stampa: >40 mm/s

Questo filamento, per l'eccellente combinazione di resistenza al calore e ai raggi UV, viene impiegato nel settore automobilistico o nell'automazione.

Con questo materiale sono stati stampati tre provini sia a struttura a sandwich e sia pieni, con i seguenti parametri di stampa:

- ❖ Extruder Temperature: 50°C
- ❖ Extruder Temperature Left: 230°C
- ❖ Platform Temperature: 60°C
- ❖ Print Speed: 20 mm/s
- ❖ Infill Density: 25%
- ❖ Infill Layer Height: 0.25 mm
- ❖ Retraction Distance 1.5 mm



Figura [18] – Provini pieni in PLA con polvere di carbonio

3.1.3 PLA con fibre di grafene

Il grafene, un reticolo a nido d'ape fatto di atomi di carbonio, è uno dei nuovi materiali di stampa 3D più promettenti. PLA GRAFENE GRAFYLON è adatto alle più diffuse stampanti in commercio, è completamente atossico e inodore fino ad alte temperature.

È un filamento speciale dalle eccezionali caratteristiche fisiche di resistenza meccanica e conducibilità termica, associate ad una finitura superficiale altamente definita con una semplicità di stampa impagabile. Le proprietà meccaniche, elettriche, termiche e fisiche del grafene sono tali da soddisfare le esigenze di innumerevoli e diverse applicazioni. I benefici maggiori del grafene si hanno durante la stampa 3D, con eccellenti aderenze del primo strato e un significativo aumento della velocità di elaborazione della stampa.

Il fornitore (Filoprint) consiglia i seguenti parametri:

- ❖ Temperatura stampa: 220°C-230 °C
- ❖ Temperatura letto di stampa: 0°C-50 °C (suggerito 40°C)
- ❖ Riempimento infill: 100%

Con questo materiale sono stati stampati tre provini sia a struttura a sandwich e sia pieni, con i seguenti parametri di stampa:

- ❖ Extruder Temperature: 50°C
- ❖ Extruder Temperature Left: 230°C
- ❖ Platform Temperature: 60°C
- ❖ Print Speed: 20 mm/s
- ❖ Infill Density: 25%
- ❖ Infill Layer Height: 0.25 mm
- ❖ Retraction Distance 1.5 mm



Figura [19] – Provini pieni in PLA con grafene

3.1.4 PLA con fibre di legno balsa

Questo filamento è composto da circa il 70% da PLA e 30% da fibra di legno e ciò significa che, in generale, è necessario stampare questo materiale alle stesse temperature del PLA.

Il filamento caricato con fibre di legno può essere stampato con ugelli standard di 0,4 mm, anche se è consigliabile stamparlo con ugelli di 0,6 mm e meglio ancora di 0,8 mm.

Il fornitore (Filoprint) consiglia i seguenti parametri:

- ❖ Temperatura stampa: 195°C-220 °C
- ❖ Temperatura letto di stampa: 50°C-60 °C
- ❖ Velocità di stampa: 40 mm/s-100 mm/s

Con questo materiale sono stati stampati tre provini sia a struttura a sandwich e sia pieni, con i seguenti parametri di stampa:

- ❖ Extruder Temperature: 220°C
- ❖ Platform Temperature: 60°C
- ❖ Print Speed: 50 mm/s
- ❖ Infill Density: 100%
- ❖ Infill Layer Height: 0.25 mm
- ❖ Retraction Distance 1.3 mm

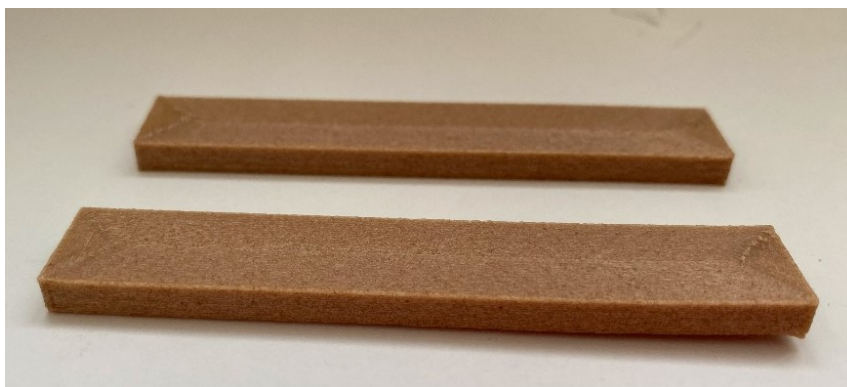


Figura [20] – Provini pieni Laywood

3.1.5 Provini ibridi con struttura a sandwich

I composti ibridi sono nuove tecnologie di materiali creati grazie alla stampa 3D e costituiti dall'unione di materiali diversi tra loro. Possono essere caratterizzati da strutture diverse ma la ricerca pone l'attenzione sulla struttura "Sandwich" costituita da due basi esterne (Skins) e una parte interna (Core) che può assumere diverse geometrie. Di maggiore interesse sono quelli in cui la parte interna è formata da celle vuote; infatti, le proprietà meccaniche di un sandwich non dipendono solo dai materiali da cui è costituito, ma anche dalla forma delle celle del nucleo. Autori di diversi articoli hanno sottolineato come sandwich con celle a rombo consentano di ottenere proprietà meccaniche elevate, ma la forma esagonale delle celle è quella più comunemente usata e dà origine a strutture a nido d'ape, ovvero l'Honeycomb.

Per il dimensionamento delle strutture Sandwich è stata presa in riferimento la normativa ASTM C393-20:

- Spessore totale (t): 5 mm (1 mm per le basi e 3 mm per il nucleo a honeycomb)
- Lunghezza dello span di supporto (s): 68 mm
- Lunghezza totale (l): 122,17 mm
- Larghezza (w): 26,4 mm
- Spessore dei lati delle celle: 0,8 mm

Queste dimensioni sono state attribuite in modo da avere $2t < w < 6t$, $w < s/2$, $l = s + 50$ mm.

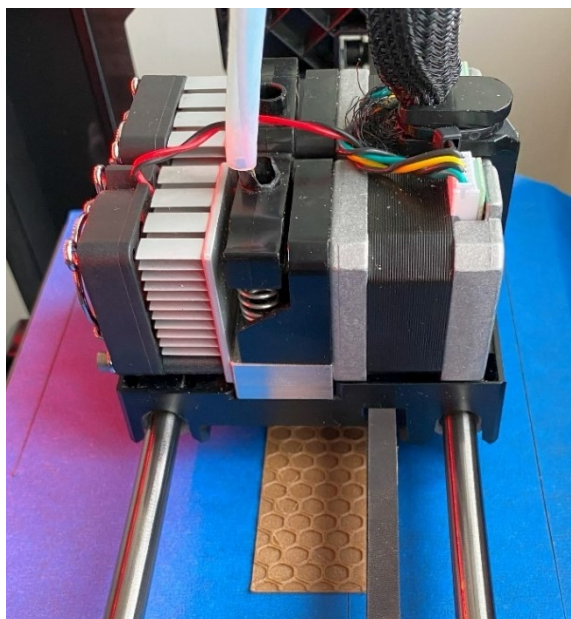


Figura [21] – Honeycomb provino sandwich

La forma esagonale delle celle è stata utilizzata per stampare i provini ibridi: lo strato inferiore è costituito da tre strati di PLA con grafene e uno strato di PLA con legno balsa, l'honeycomb in PLA con legno balsa e lo strato superiore è realizzato con uno strato di PLA con legno balsa e tre strati in PLA con grafene. Figura [27] Per stampare tali provini, infatti, l'estrusore destro della stampante 3D è stato caricato con PLA con polvere di grafene per ottenere il primo e l'ultimo strato, mentre l'estrusore sinistro è stato caricato con PLA con legno balsa per realizzare gli strati di honeycomb.



Figura [22] – Filamenti caricati nella stampante

I parametri di stampa sono:

- ❖ Temperatura estrusore destro: 220°C
- ❖ Temperatura estrusore sinistro: 220°C
- ❖ Outlines: 70 mm/s
- ❖ First Layer: 40 mm/s
- ❖ Retraction Distance: 0 mm

I provini ibridi, inizialmente, sono stati stampati in PLA con fibre di legno unito al PLA con polvere di carbonio, ma hanno subito evidenziato il problema dello scollamento, portando a dedurre che i due materiali non fossero compatibili tra loro.

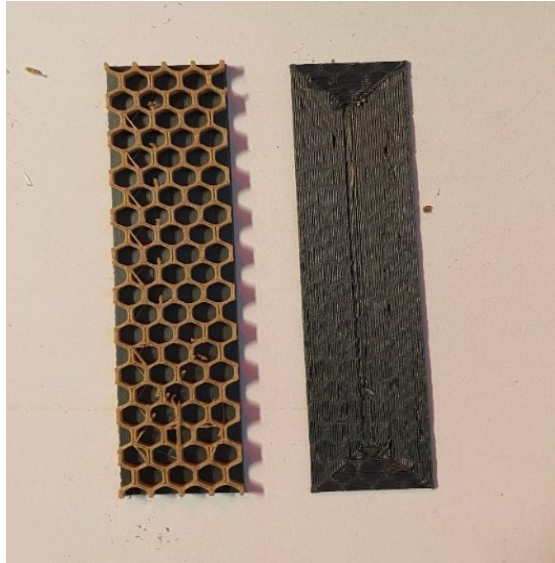


Figura [23] – Scollamento del provino ibrido a sandwich

Nel caso dei provini sandwich è importante calcolare il volume nominale e non quello effettivo, in quanto l'obiettivo è quello di ottenere strutture interne leggere con un livello di volume utilizzato maggiore. Perciò si sfrutta l'idea di un volume pieno rispetto ad un volume vuoto, in modo tale che quello vuoto possa conferire maggiore resistenza specifica.

Una volta determinato il volume nominale e misurato il peso di ciascun provino sandwich, è possibile determinare la densità apparente:

$$\rho = \frac{V}{m}$$

Questo parametro sarà utile nel calcolo della tensione specifica.

Le figure seguenti mostrano i vari provini sandwich stampati nei diversi materiali:



Figura [24] – Provini sandwich in PLA con fibre di grafene



Figura [25] – Provini sandwich realizzati in PLA con fibre di carbonio

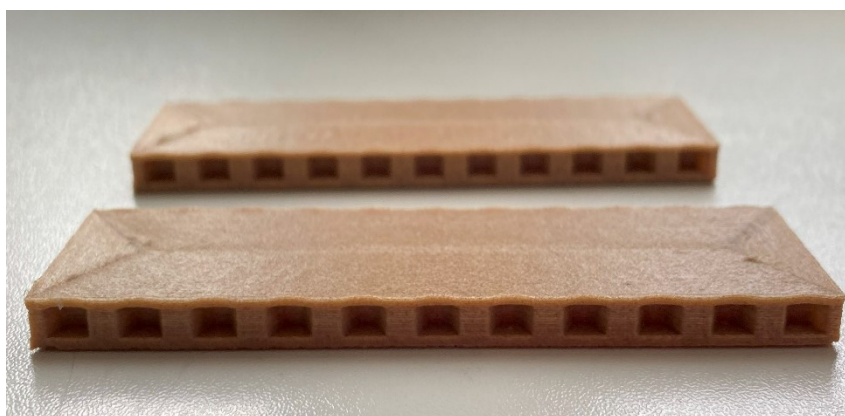


Figura [26] – Provini sandwich realizzati in PLA con fibre di legno balsa



Figura [27] – Provini ibridi sandwich

Per determinare la misura delle grandezze (lunghezza, spessore, peso, densità...) relative a tutti i provini stampati, si sono utilizzati vari strumenti:

- Bilancia elettronica: misura il peso dei provini con il fine di calcolare la densità di ogni provino stampato.
- Micrometro: è un calibro ad alta precisione, con sensibilità tipica del centesimo di millimetro. Il principio di funzionamento è basato sull'avanzamento di una vite che spinge un cilindro mobile contro uno fisso, tra cui 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. Se per esempio la vite avanza di un millimetro ad ogni giro e la scala è suddivisa in cento parti, la sensibilità dello strumento sarà di un centesimo di millimetro. Una seconda scala solidale all'albero fisso rispetto alla vite consente di determinare i multipli di passo e, quindi, la misura macroscopica.



- Calibro: misura la larghezza di un oggetto, la distanza tra due facce piane in una concavità, la profondità di un solco o foro. È diviso in tre parti: una fissa, una mobile e un'asticina. Nella parte fissa troviamo un becco verso l'alto e un becco verso il basso e i corrispondenti si trovano nella parte mobile. I beccucci, che sono smussati alle estremità per misurare gli spazi più piccoli, servono per misurare la lunghezza o il diametro, mentre l'asticina misura la profondità.



3.2 MakerBot Replicator 2X

La stampante 3D MakerBot Replicator 2X realizza oggetti solidi tridimensionali dal filamento fuso. I file di progettazione 3D vengono tradotti in istruzioni per la stampante e letti dalla macchina tramite la scheda SD.

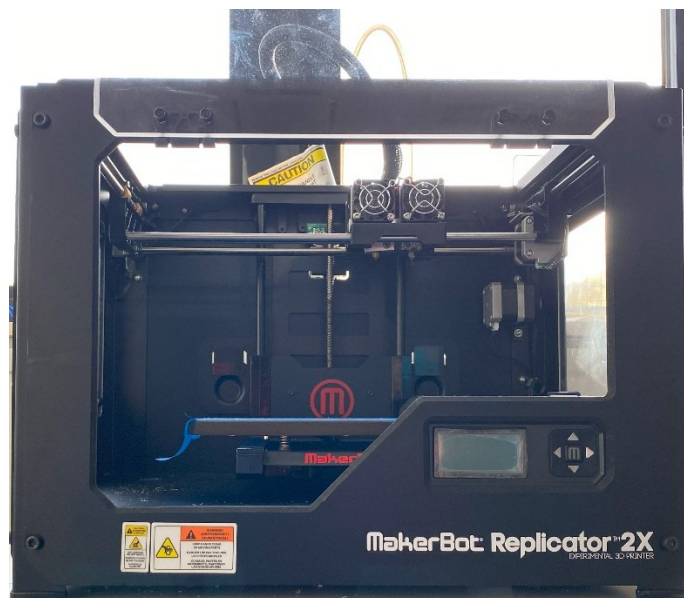
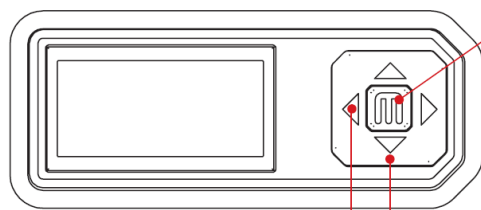


Figura [28] – Stampante MakerBot Replicator 2X

Dopo aver collegato il cavo di alimentazione a una presa elettrica, la MakerBot sul pannello LCD visualizzerà il messaggio che costituisce l'inizio dello script di avvio e che guiderà l'utente nel processo di livellamento della piastra di costruzione, caricamento del filamento e creazione della prima stampa 3D.

TASTIERINO LCD



La freccia sinistra spesso consente di tornare indietro o annullare un'operazione.

- Una M di colore rosso fisso indica che MakerBot Replicator 2X è in funzione.
- Una M di colore rosso lampeggiante indica che MakerBot Replicator 2X è in attesa di input da parte dell'utente.

Quattro pulsanti freccia circondano il pulsante M centrale. Utilizzare le frecce per navigare tra i menu LCD e il pulsante M per effettuare le selezioni.

Figura [29] – Tastierino LCD della stampante MakerBot Replicator 2X

I comandi principali che è possibile selezionare tramite il tastierino LCD sono:

- *Build from SD (Costruisci da SD)*: si utilizzano i tasti freccia su e giù per scorrere l'elenco dei file presenti sulla scheda SD e, per avviare una stampa, si preme M.
- *Preheat (Preriscaldamento)*: permette di eseguire il preriscaldamento della stampante e modificare le temperature sia degli estrusori e sia del piano di costruzione.
- *Utilities (Utilità)*: in questo menù si trovano i comandi e gli script per procedimenti quali, il caricamento del filamento e il livellamento della piastra di costruzione.
- *Change Filament*: consente di avviare gli script che guidano l'utente nel processo di caricamento e scaricamento del filamento.
- *Level Build Plate (Livello piastra di costruzione)*: questa voce guida l'utente nel processo di livellamento della piastra di costruzione che è importante perché, se la piastra fosse troppo lontana potrebbe causare una non perfetta adesione della stampa alla piastra stessa, mentre se fosse troppo vicina agli ugelli estrusori potrebbe bloccare l'estrusione del filamento. La piastra viene abbassata o sollevata tramite tre manopole; si utilizza un foglio di carta sottile che deve scivolare, ma non troppo, tra gli ugelli e la piastra di costruzione.
- *Menù Info and Settings (Informazioni e impostazioni)*: consente di visualizzare informazioni e modificare le impostazioni.
- *Pause (Pausa)*: consente di interrompere momentaneamente una stampa; durante tale fase, gli estrusori e la piattaforma di costruzione non si sposteranno dalle posizioni occupate al momento.
- *Resume Build (Riprendi costruzione)*: consente di riprendere la stampa dopo averla bloccata momentaneamente.
- *Cancel Build (Annulla costruzione)*: consente di interrompere definitivamente la stampa.

Dopo aver creato il file del provino in un programma CAD e averlo poi convertito in un formato STL, lo si inserisce all'interno del programma MakerBot MakerWare che metterà a disposizione, in maniera virtuale, il modello del provino che è posizionato su una superficie che, idealmente, è lo stesso piano di stampa della Makerbot Replicator.

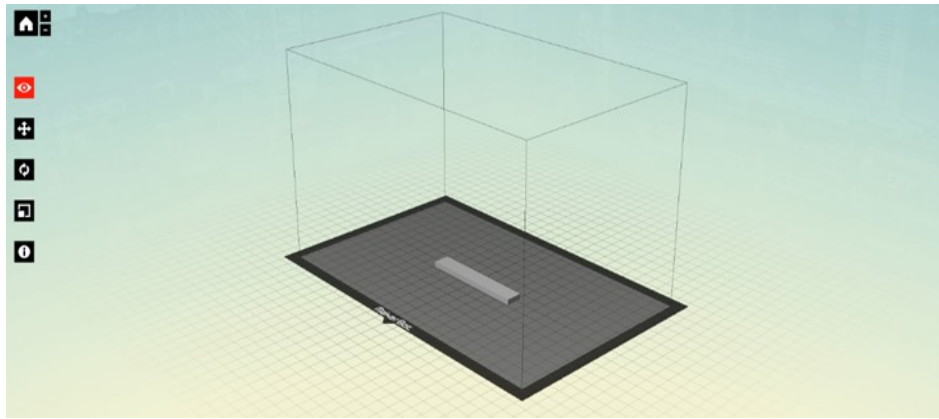


Figura [30] – Schermata software MakerBot MakerWare

Nella sezione “settings” di questo software vi sono tutti i parametri di stampa come, ad esempio, le temperature di stampaggio, ovvero le temperature raggiunte dagli estrusori e dalla superficie di stampa, le velocità come la velocità con cui il materiale esce dal foro dell’ugello (generalmente viene impostata una velocità di 25 mm/s) oppure quella per ogni estrusore. Un altro parametro da considerare è l’infill che permette di diversificare i provini per ampliare lo studio delle caratteristiche, soprattutto quando si ha intenzione di realizzare su di essi delle prove meccaniche di resistenza a deformazione o anche taglio.

Nella Figura [31] si può osservare la sezione “settings” con i vari parametri di stampa:

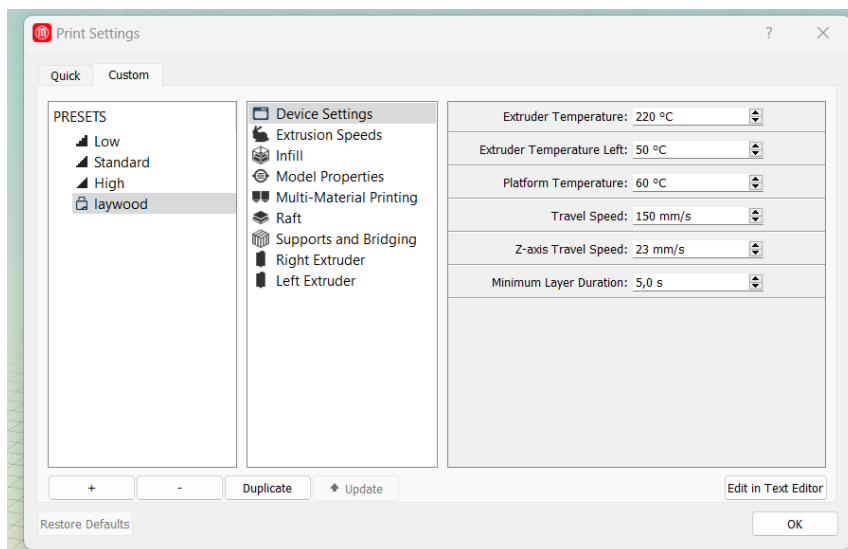


Figura [31] – Sezione settings con elenco parametri di stampa

Il file viene salvato sulla scheda SD che viene poi inserita nella porta dietro l'interfaccia LCD della stampante stessa. Mediante i tasti freccia del tastierino dell'interfaccia LCD si accede a “Build from

SD” (Costruisci da SD) e, premendo il pulsante M che consente di visualizzare l'elenco dei file disponibili sulla scheda, si seleziona il file del provino che si vuole stampare.

Il filamento, avvolto a bobina, viene fatto passare attraverso tubi di guida affinché abbia un percorso obbligato, attraversa poi un ugello (diametro \varnothing 0.4 mm), che è riscaldato ad una temperatura tale da provocare la fusione del filamento stesso, e che si muove secondo le istruzioni dettate dal software.

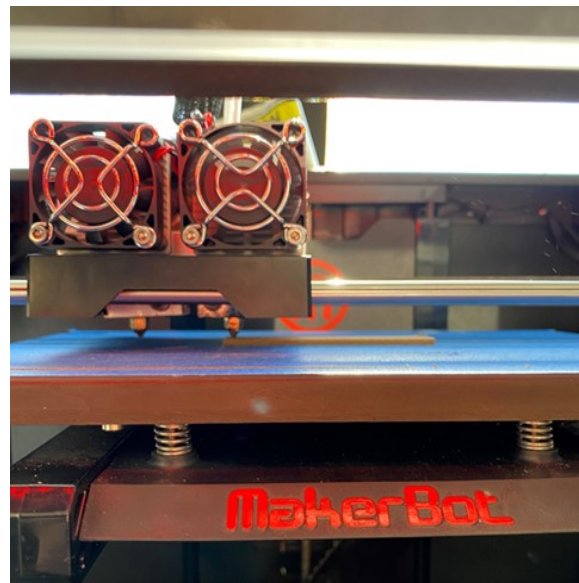
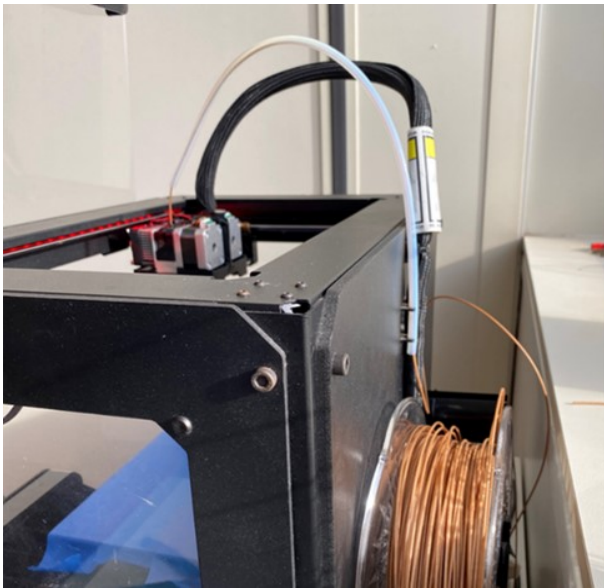


Figura [32] e Figura [33] – Funzionamento MakerBot

Il filamento fuso viene spinto fuori dall'ugello su una superficie riscaldata e ricoperta con del nastro “blu tape” che ha lo scopo di evitare di danneggiare il piano e permettere una maggiore adesione del filamento. Si costruisce, così, strato dopo strato, l'oggetto solido desiderato.



Figura [34] – Provino pieno stampato

Il provino, una volta stampato, deve essere lasciato raffreddare perché, in caso contrario, si potrebbe danneggiare e deformare.

Tutti i provini, infine, vengono sottoposti a prove di piegatura e, dopo aver raccolto ed elaborato i dati, si analizzano le superfici di rottura mediante stereomicroscopio.

3.3 Prove di piegatura

Il processo di piegatura rappresenta uno dei più comuni e diffusi metodi di lavorazione delle lamiere. La piegatura è un'operazione per deformazione plastica che modifica la forma di una lamiera mediante un'azione di flessione e che, generalmente, produce deformazioni permanenti in zone relativamente limitate della lamiera stessa. Questo processo permette di realizzare sia forme molto semplici che geometrie estremamente complesse ed è applicabile a tutti i materiali sufficientemente plastici da non determinare rotture in corrispondenza della piega. [23] Tale operazione può essere utilizzata sia come processo a sé stante (anche ripetendola più volte) che in combinazione con altre operazioni, quali imbutitura e stampaggio. L'operazione di piegatura può essere applicata anche ad altri semilavorati come tubi, fili, nastri e barre di varie sezioni. Le operazioni di piegatura vengono nella maggior parte dei casi eseguite a temperatura ambiente (condizione più comune), oppure a caldo se si è in presenza di spessori elevati, raggi di curvatura piccoli o se si ha la necessità di ridurre il ritorno elastico.

La piegatura viene suddivisa fondamentalmente in: [24]

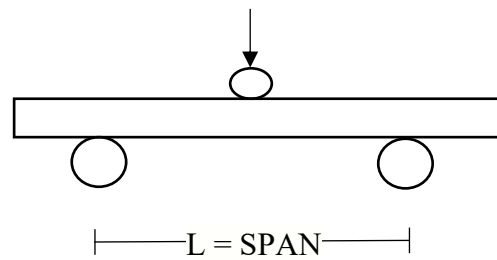
1. Piegatura con lamiera ferma: la zona di deformazione riguarda solo una porzione della lamiera, di cui una parte sarà soggetta a trazione mentre l'altra zona a compressione. Lungo l'asse neutro non si hanno deformazioni; l'angolo di piegatura è l'angolo compreso tra le due ali. La piegatura può essere a V, ad U, a L.



Figura [35] – Figura [36] – Descrizione piegatura con lamiera ferma

2. Piegatura con lamiera in movimento: calandratura (piegatura a rulli) e profilatura mediante rulli.

Il processo più diffuso e comune di piegatura è la piegatura a V detta anche PIEGATURA A TRE PUNTI che schematicamente si può rappresentare:



Tale processo è costituito da due fasi:

- Piegatura in aria: si posa una lamiera su una matrice e si porta il punzone in contatto con la lamiera stessa e inizia il processo di piegatura. All'inizio avviene in aria e termina quando le ali della lamiera diventano tangenti alle facce della matrice. Se il processo si arrestasse durante questa fase si potrebbero ottenere angoli di piegatura diversi agendo solo sulla corsa del punzone, ritorno elastico elevato il che comporta una grossa perdita di precisione e un'incertezza nella geometria e forza di piegatura bassa.
- Coniatura: inizia quando termina la piegatura in aria e consiste nel forzare la lamiera tra il punzone e la matrice. Il processo si conclude quando tutta la porzione di lamiera viene schiacciata tra punzone e matrice stessa; ciò permette di eliminare l'incertezza nella geometria e avere un notevole aumento della forza di piegatura e una riduzione del ritorno elastico.

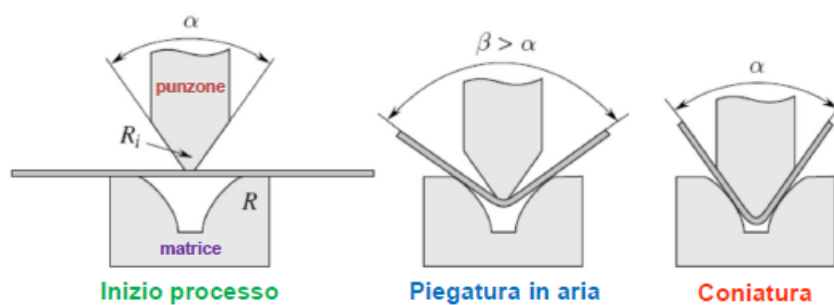


Figura [37] – Descrizione piegatura a V

Per la corretta esecuzione del processo, il raggio di piegatura deve essere compreso all'interno di un intervallo delimitato dai seguenti valori: raggio massimo di piegatura (R_{\max}) e raggio minimo di piegatura (R_{\min}). I valori del raggio di piegatura vengono calcolati applicando la teoria della flessione della trave rettilinea.

3.3.1 MTS 810

In questo studio ci si concentra sulle prove di piegatura dei provini eseguita utilizzando la macchina universale MTS 810. Si tratta di un sistema servoidraulico costituito da una struttura fissa ed una mobile. Presenta due cilindri (struttura fissa inferiore) di larghezza 10 mm e posti ad una certa distanza L , detta span, pari a 68 mm e un terzo cilindro (struttura mobile superiore) posto a metà tra gli altri due. Questi cilindri rappresentano i tre punti che danno il nome alla tipologia della piegatura. Il provino da testare viene appoggiato sui due cilindri inferiori.

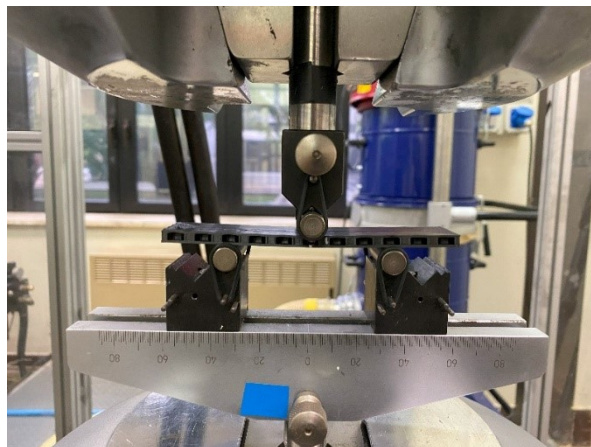


Figura [38] – Posizione provino rispetto ai tre rulli

Il cilindro superiore viene utilizzato per esercitare una forza sulla metà del campione, di entità sempre maggiore. Tali forze possono arrivare a causare la deformazione o la rottura del provino stesso.



Figura [39] – Forza esercitata dal cilindro superiore in corrispondenza della metà del provino

Una volta che si verifica la rottura parziale o totale del provino, la prova viene interrotta. La macchina, essendo collegata al computer, tramite il software LVDT, acquisisce ed elabora i dati ricavati dalla prova, consentendo, così, di ottenere le curve approssimative di rottura.

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 0.0166 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 i parametri variabili assumono per ogni istante di acquisizione. Quando si nota un notevole scostamento tra i valori dello spostamento, si determina l'inizio della prova di piegatura e, di conseguenza, si prendono a riferimento tutte quelle misure di tensione e deformazione successive a quell'istante di tempo.

Si calcolano, pertanto, i valori di tensione flessionale (σ_f) e deformazione flessionale (ε_f), a partire dalla normativa ASTM D790-17 relativa a prove standard che verificano le proprietà flessionali dei materiali plastici:

$$\sigma_f = \frac{3PL}{2bd^2} ; \varepsilon_f = \frac{6Dd}{L^2}$$

con:

- L: distanza tra i due cilindri
- d: spessore dei provini
- b: larghezza del provino
- P: forza esercitata dal cilindro superiore sul provino
- D: massima deflessione del centro del provino

Dai valori ricavati si determina il grafico tensione-deformazione e il valore massimo di tensione raggiunto. La curva reale non presenta, però, un andamento delineato a causa delle imperfezioni dovute alle acquisizioni. Si ricava, perciò, la curva approssimata, ossia una polinomiale che simula perfettamente l'andamento della curva reale.

Per determinare, invece, il valore del modulo di elasticità flessionale si può:

- utilizzare la normativa ASTM D790-17 applicando la seguente formula:

$$E_f = \frac{L^3 m}{4bd^3}$$

- considerare i valori di deformazione fino allo 0,2% della curva caratteristica del provino e, a partire da questi punti, si grafica un'altra curva. Tramite 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 flessionale è proprio il coefficiente angolare della retta calcolata.

Dopo aver determinato la massa, il volume e, quindi, la densità (ρ) di ogni singolo provino, si calcola il coefficiente di tensione specifica (σ_{fs}):

$$\sigma_{fs} = \frac{\sigma_f}{\rho}$$

Questo parametro viene introdotto per due motivi principali:

1. Eseguire un confronto tra i provini pieni e quelli con struttura a sandwich che altrimenti non si sarebbe potuto fare in quanto ciò che distingue i provini pieni da quelli a sandwich è che questi ultimi presentano l'honeycomb;
2. Poter dimostrare che, a parità di materiale, qualora la tensione specifica dei provini pieni fosse inferiore alla tensione specifica dei provini con struttura a sandwich, si avrebbe un guadagno al livello di prestazioni!

Una volta calcolata la tensione specifica sono stati realizzati i grafici tensione specifica-deformazione specifica.

3.4 Stereomicroscopio

Dopo aver effettuato delle prove di piegatura, i provini sono stati osservati ed analizzati allo stereomicroscopio per notarne al meglio tutte le caratteristiche superficiali e strutturali, soprattutto in corrispondenza dei punti di rottura. Lo stereomicroscopio utilizzato è un Leica EZ4 D che offre uno zoom ad elevata qualità e una brillante illuminazione a LED. I 7 LED forniscono una luce sia incidente sia obliqua trasmessa per illuminazione e contrasto di elevata qualità. Una fotocamera digitale consente la ripresa rapida di un video in tempo reale su uno schermo di computer e permette l'acquisizione di foto. Il software utilizzato per l'acquisizione è il Leica LAS EZ che guida l'utente attraverso le impostazioni della fotocamera allo scopo di acquisire immagini di elevata qualità e per una migliore misurazione di base e delle eventuali annotazioni.

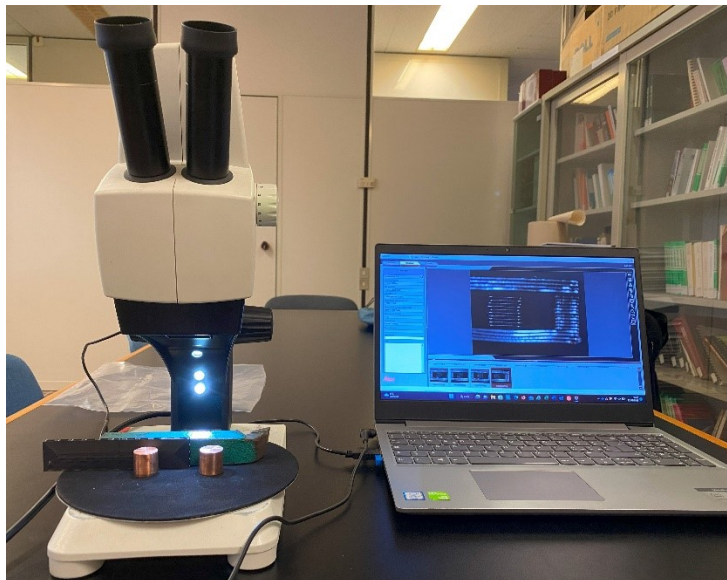


Figura [40] – Stereomicroscopio

Il provino viene posizionato sotto la lente e la fotocamera integrata scatta delle foto con ingrandimenti 8x e 12.5x; quest'ultimo ingrandimento mostra in maniera più dettagliata le zone esterne e, soprattutto, quelle interne dei provini a sandwich.

Tutte le foto di ciascuna parte del provino vengono inserite su Power Point, eseguendo un "collage" che ricrei il provino nella sua interezza.

4. RISULTATI

Nelle seguenti tabelle vengono riportate le dimensioni misurate in termini di lunghezza, peso e densità riferite a ciascun provino realizzato. Tali grandezze sono state inserite nel software di acquisizione della macchina MTS810 e utilizzate, successivamente, per il calcolo della tensione specifica.

Per quanto riguarda i tre provini pieni in PLA standard:

	Spessore d [mm]	Larghezza b [mm]	Lunghezza L [mm]	Massa m [g]	Volume [mm³]	Densità [g/cm³]
Provino pieno 1	4,01	12,7	80	4,81	4074,16	1,180611
Provino pieno 2	3,86	12,7	80	4,7	3921,76	1,198442
Provino pieno 3	4	12,7	80	4,81	4064	1,183563

Tabella [2] – Dimensioni misurate dei provini pieni in PLA standard

Per i provini pieni realizzati in PLA con fibre di carbonio:

	Spessore d [mm]	Larghezza b [mm]	Lunghezza L [mm]	Massa m [g]	Volume [mm³]	Densità [g/cm³]
Provino pieno 1	3,85	12,7	80	4,98	3911,6	1,273136
Provino pieno 2	3,97	12,7	80	5,09	4033,52	1,261925
Provino pieno 3	3,96	12,7	80	5,13	4023,36	1,275054

Tabella [3] – Dimensioni misurate dei provini pieni in PLA con fibre di carbonio

La tabella [4] riporta i valori delle dimensioni misurate per i provini sandwich realizzati in PLA con fibre di carbonio:

	Spessore d [mm]	Larghezza b [mm]	Lunghezza L [mm]	Massa m [g]	Volume [mm³]	Densità [g/cm³]
Provino sandwich 1	4,94	26,4	122	11,34	15910,752	0,712726
Provino sandwich 2	4,95	26,4	122	11,38	15942,96	0,713795
Provino sandwich 3	4,84	26,4	122	11,3	15588,672	0,724885

Tabella [4] – Dimensioni misurate dei provini sandwich in PLA con fibre di carbonio

Per quanto attiene i provini pieni realizzati in PLA con fibre di grafene:

	Spessore d [mm]	Larghezza b [mm]	Lunghezza L [mm]	Massa m [g]	Volume [mm³]	Densità [g/cm³]
Provino pieno 1	3,95	12,7	80	4,84	4013,2	1,20602
Provino pieno 2	3,98	12,7	80	4,92	4043,68	1,216713
Provino pieno 3	3,94	12,7	80	4,87	4003,04	1,216575

Tabella [5] – Dimensioni misurate dei provini pieni in PLA con fibre di grafene

La tabella [6] riporta i valori delle dimensioni dei provini con struttura a sandwich realizzati in PLA con fibre di grafene:

	Spessore d [mm]	Larghezza b [mm]	Lunghezza L [mm]	Massa m [g]	Volume [mm³]	Densità [g/cm³]
Provino sandwich 1	4,91	26,6	122	10,72	15933,932	0,672778
Provino sandwich 2	4,86	26,6	122	10,64	15771,672	0,674627
Provino sandwich 3	4,95	26,6	122	10,57	16063,74	0,658004

Tabella [6] – Dimensioni misurate dei provini sandwich in PLA con fibre di grafene

La tabella [7] mostra i valori delle dimensioni dei provini pieni realizzati in PLA con fibre di legno balsa:

	Spessore d [mm]	Larghezza b [mm]	Lunghezza L [mm]	Massa m [g]	Volume [mm³]	Densità [g/cm³]
Provino pieno 1	3,48	12,7	80	3,18	3535,68	0,899403
Provino pieno 2	3,98	12,7	80	3,59	4043,68	0,887805
Provino pieno 3	3,85	12,7	80	3,38	3911,6	0,864097

Tabella [7] – Dimensioni misurate dei provini pieni in PLA con fibre di legno balsa

La tabella [8] evidenzia i valori delle dimensioni dei provini con struttura a sandwich realizzati in PLA con fibre di legno balsa:

	Spessore d [mm]	Larghezza b [mm]	Lunghezza L [mm]	Massa m [g]	Volume [mm³]	Densità [g/cm³]
Provino sandwich 1	5,05	26,4	122	8,02	16265,04	0,493082
Provino sandwich 2	5,04	26,4	122	8,01	16232,832	0,493444
Provino sandwich 3	5,14	26,4	122	8,07	16554,912	0,487469

Tabella [8] - Dimensioni misurate dei provini sandwich in PLA con fibre di legno balsa

La tabella [9] riporta i valori delle grandezze principali di provini ibridi a struttura a sandwich:

	Spessore d [mm]	Larghezza b [mm]	Lunghezza L [mm]	Massa m [g]	Volume [mm³]	Densità [g/cm³]
Provino sandwich 1	4,95	26,6	122	9,45	16063,74	0,588281
Provino sandwich 2	5,01	26,6	122	9,44	16258,452	0,580621
Provino sandwich 3	4,95	26,6	122	9,52	16063,74	0,592639

Tabella [9] - Dimensioni misurate dei provini ibridi sandwich

La prova di flessione a tre punti fornisce i valori per il modulo di elasticità a flessione, la sollecitazione flessionale, la deformazione flessionale e la risposta sollecitazione-deformazione flessionale del materiale. Pertanto, mediante le diverse curve tensione-deformazione ottenute per i provini pieni e per i provini con struttura a sandwich, si confrontano i valori delle principali grandezze flessionali.

Per quanto attiene i provini pieni dei diversi materiali:

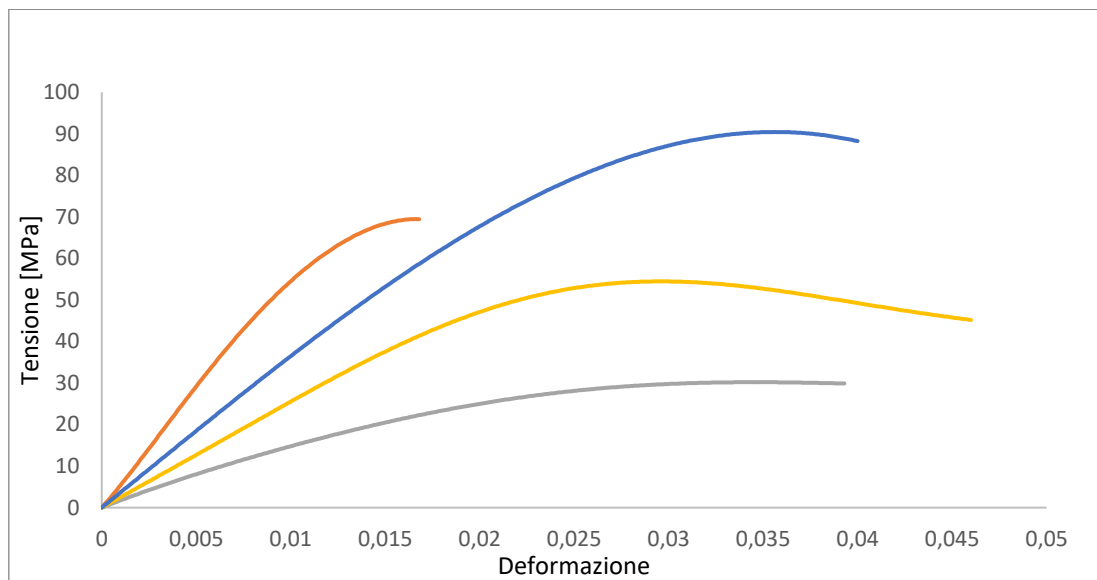


Grafico [1] – Andamento tensione-deformazione per provini pieni

	Massima tensione	Modulo di elasticità flessionale	Massima deformazione	Densità	Tensione specifica
Pieni Graph	90,040675	2711,8	0,038977	1,216713	74,00321604
Pieni Carbon	70,04755	6185,3	0,016018	1,273136	55,01969153
Pieni Pla Basic	55,94432	2449,1	0,04752	1,183563	47,26771621
Pieni Laywood	31,09886	1410,5	0,05	0,864097	35,99001038

Tabella [10] – Grandezze principali dei provini pieni

Dal Grafico [1] e dalla Tabella [10], si può osservare:

- I provini pieni in PLA caricato con polvere di grafene raggiungono una tensione massima a rottura maggiore rispetto agli altri materiali e ciò comporta un'elevata resistenza alle sollecitazioni e ai carichi imposti su di esso. Si ha, inoltre, un ottimo compromesso tra deformazione e modulo di elasticità flessionale garantendo così una buona durezza e tenacità.
- I provini pieni in PLA caricato con polvere di fibre di carbonio presentano un modulo di elasticità flessionale maggiore di tutti gli altri materiali, in quanto la curva presenta una pendenza molto più accentuata e ciò garantisce al materiale stesso un'elevata durezza. La curva, però, si interrompe a valori di deformazione molto più bassi rispetto agli altri materiali, evidenziando l'alta fragilità di questo PLA.
- I provini pieni in PLA basic presentano elevata tenacità ed elevata deformazione, come si può notare dalla curva ma, soprattutto, una resistenza massima a rottura molto più bassa rispetto ai provini realizzati in PLA rinforzato con fibre. Questo aspetto evidenzia il contributo delle fibre di carbonio e di grafene ad un sostanziale aumento della resistenza meccanica e della durezza.
- I provini pieni realizzati in PLA con fibre di legno balsa sono descritti da una curva meno pendente e meno alta rispetto alle altre, tanto da non riuscire a raggiungere alti valori di resistenza e deformazione. Questo materiale, quindi, viene usato non tanto per la sua efficienza a livello di prestazioni, quanto più per la sua leggerezza; infatti, abbassando notevolmente il peso, riesce a garantire buone prestazioni, soprattutto nel caso di provini ibridi.

Per quanto riguarda i provini con struttura a sandwich:

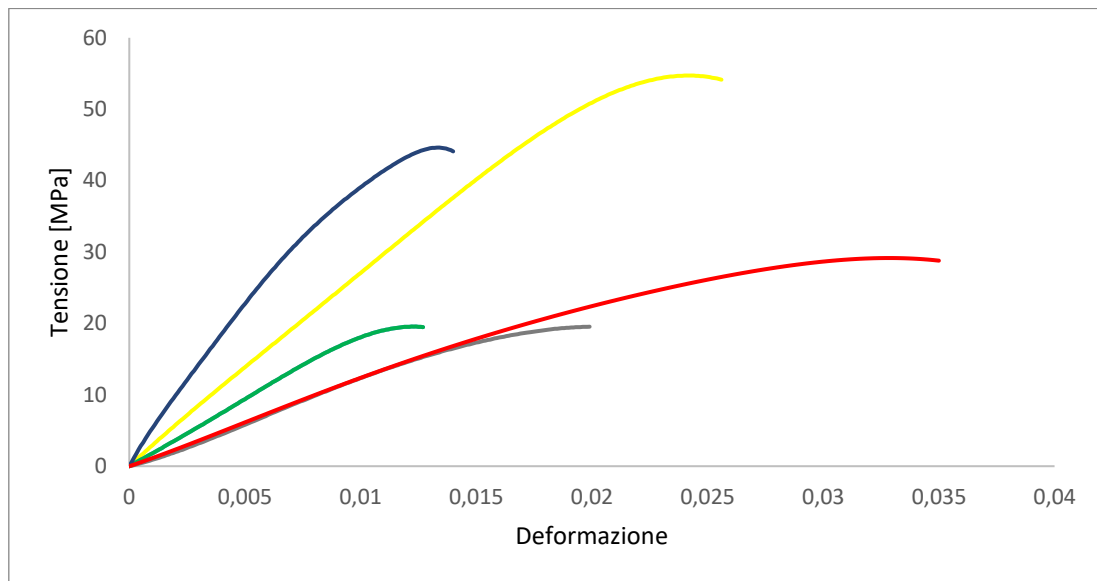


Grafico [2] - Andamento tensione-deformazione per provini sandwich

	Massima tensione	Modulo di elasticità flessionale	Massima deformazione	Densità	Tensione specifica
Sandwich Laywood	19,855045	926,68	0,019971	0,487469	40,7308875
Sandwich Carbon	44,100258	4749,7	0,015168	0,713795	61,78280599
Sandwich Graph	54,602582	2598,6	0,025461	0,674627	80,9374395
Sandwich Hybrid A	19,12849	1653,2	0,011349	0,588281	32,51590651
Sandwich Hybrid B	29,37341	1018,7	0,037423		52.74

Tabella [11] - Grandezze principali dei provini sandwich

- **Ibrido A:** provino a sandwich con PLA con grafene negli strati inferiore e superiore e Laywood nell'honeycom

- **Ibrido B:** provino a sandwich con Laywood negli strati inferiore e superiore e PLA con grafene nell'honeycomb.

Osservando il Grafico [2] e la Tabella [11] si evidenzia che nel caso dei provini con struttura a sandwich le curve abbiano un andamento simile a quello dei provini pieni, ma la principale differenza tra le due tipologie sta nei valori delle tensioni massime raggiunte. Questa distinzione è dovuta al fatto che i provini sandwich presentano una densità e un peso inferiori a quelli dei provini pieni. La resistenza massima a rottura risulta essere più bassa.

Per quanto attiene i due provini ibridi si può notare come le loro curve si trovino nella zona delimitata dalle curve caratteristiche dei singoli materiali che li costituiscono. La curva del provino ibrido A ha una maggiore pendenza e, quindi, il modulo di elasticità flessionale è superiore rispetto all'ibrido B. Le superfici esterne, ossia le parti più sollecitate nella prova, sono realizzate in PLA con polvere di grafene e questo materiale dona maggiore durezza alle superfici esterne stesse. A livello di prestazioni, però, l'ibrido A non è ottimale in quanto “scadente” risulta essere il Laywood che costituisce l'honeycomb.

Per poter eseguire un vero e proprio confronto tra i provini pieni e quelli con struttura a sandwich, è necessario introdurre il parametro tensione specifica σ_{fs} .

Per quanto riguarda i provini in PLA con fibre di carbonio:

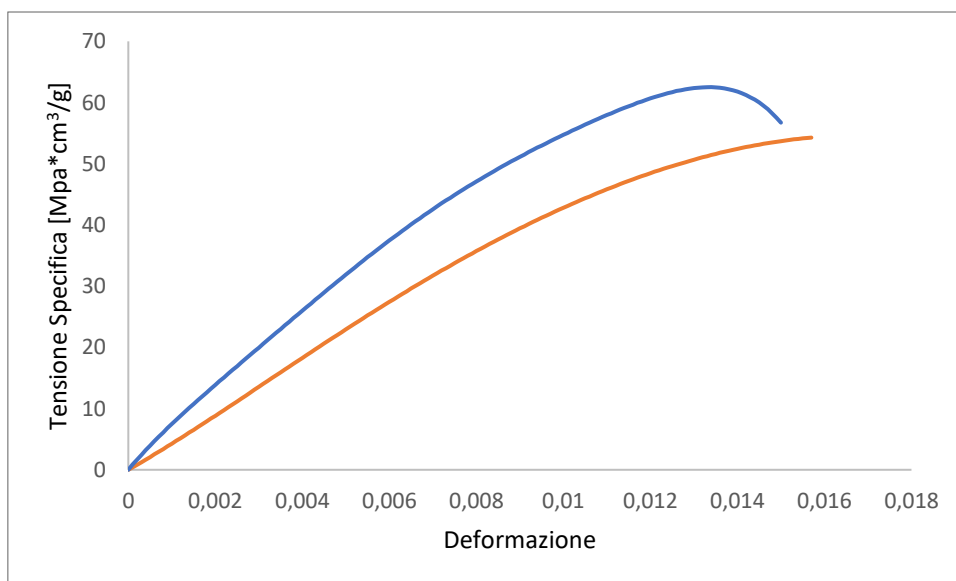


Grafico [3] – Andamento tensione specifica-deformazione per i provini pieni e sandwich

Il provino a sandwich raggiunge una tensione specifica e un modulo di elasticità flessionale maggiore rispetto al provino pieno, ma la deformazione è molto più limitata.

	Tensione specifica [Mpa*g/cm ³]
Sandwich	61,78280599
Pieno	55,01969153

Tabella [12] - Valori tensione specifica per i provini pieni e sandwich

La tensione dei provini a sandwich è più alta rispetto ai provini pieni del 12,3%; quindi si ha un aumento delle prestazioni.

Riguardo i provini realizzati in PLA con fibre di grafene:

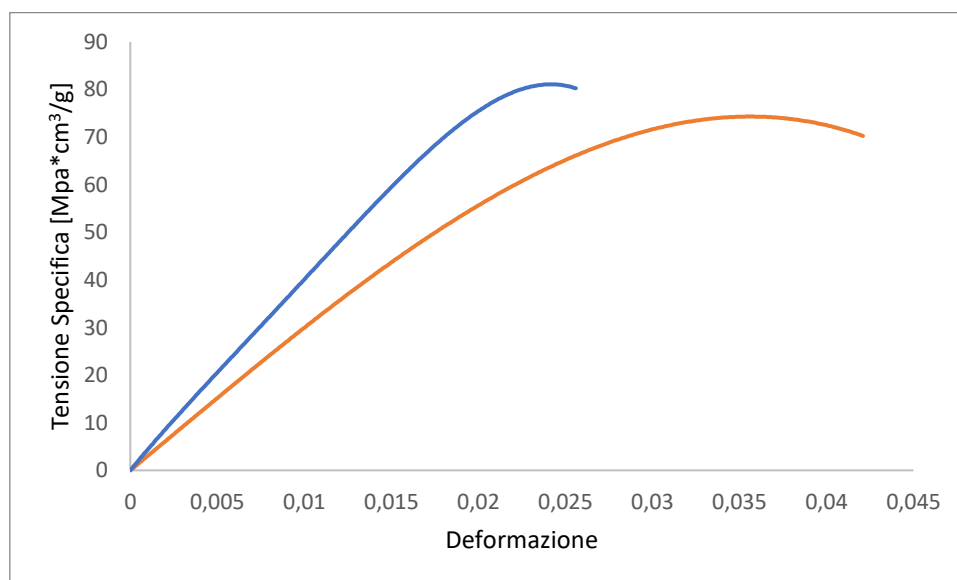


Grafico [4] - Andamento tensione specifica-deformazione per i provini pieni e sandwich

Il provino a sandwich raggiunge una tensione specifica e un modulo di elasticità flessionale maggiore rispetto al provino pieno, ma la deformazione è molto più limitata.

	Tensione specifica [Mpa*g/cm ³]
Sandwich	80,9374395
Pieno	74,00321604

Tabella [13] – Valori tensione specifica per i provini pieni e sandwich

La tensione dei provini sandwich è più alta rispetto ai provini pieni del 9,4% che determina un aumento delle prestazioni.

Per quanto riguarda i provini realizzati in PLA con fibre di legno balsa:

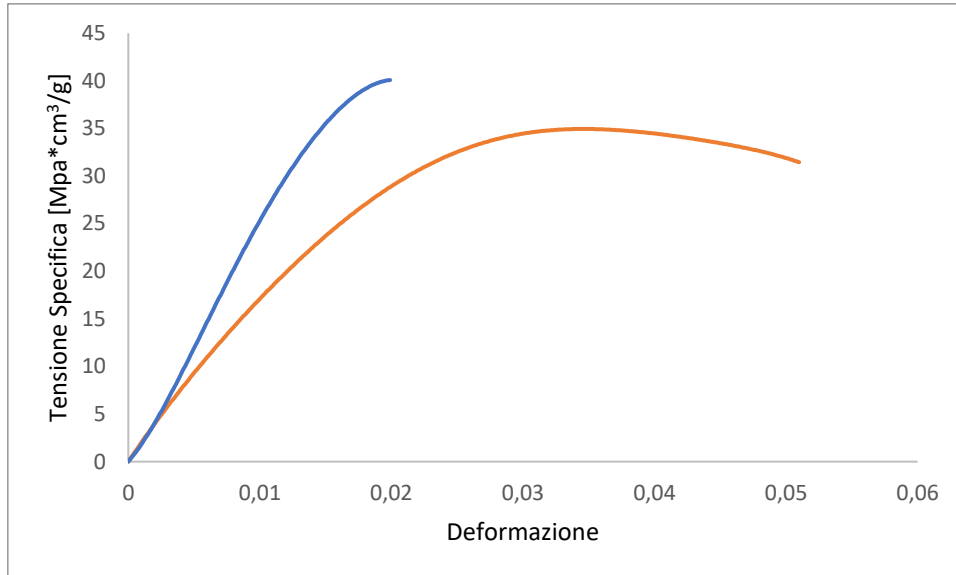


Grafico [5] - Andamento tensione specifica-deformazione per i provini pieni e sandwich

Il provino a sandwich raggiunge una tensione specifica e un modulo di elasticità flessionale maggiore rispetto al provino pieno, ma la deformazione è molto più limitata.

	Tensione specifica [Mpa*g/cm ³]
Sandwich	40,7308875
Pieno	35,99001038

Tabella [14] - Valori tensione specifica per i provini pieni e sandwich

La tensione dei sandwich è più alta rispetto ai pieni del 13,2%; pertanto si ha un aumento delle prestazioni.

Nel caso dei provini ibridi:

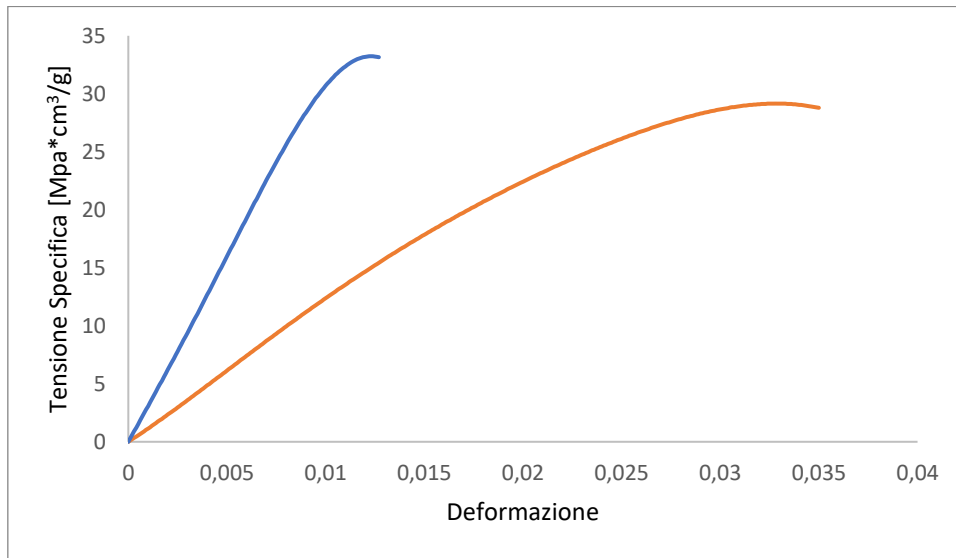


Grafico [6] - Andamento tensione specifica-deformazione per i provini ibridi sandwich

	Tensione specifica [Mpa*g/cm ³]
Ibrido A	32,52
Ibrido B	52,74

Tabella [15] - Valori tensione specifica per i provini ibridi sandwich

Il provino ibrido A non possiede un'elevata resistenza a rottura e, rispetto ad un provino interamente in Laywood, ha una tensione specifica massima più bassa.

Il provino ibrido B, invece, evidenzia nella curva un tratto con una pendenza inferiore e, quindi, modulo di elasticità flessionale più basso in quanto il Laywood che costituisce le zone esterne non garantisce durezza e rigidità. Nonostante questo basso parametro, il provino possiede una buona tensione specifica a rottura e un'elevata deformazione. Rispetto ad un provino interamente in Laywood ha una tensione specifica massima più alta del 15%.

Pertanto, dal Grafico [6] e dalla Tabella [15], si evince una differenza di tensioni specifiche massime del 62.21% che sta a significare che il provino ibrido B risulta essere più performante rispetto al provino ibrido A. Una delle cause della più bassa performance del provino ibrido A è dovuta al fatto che la rottura non avviene in superficie ma internamente, per delaminazione.

Dopo aver effettuato le prove di piegatura sui provini, si osserva:

- I provini pieni in PLA basic hanno subito piegatura senza mai arrivare alla rottura.

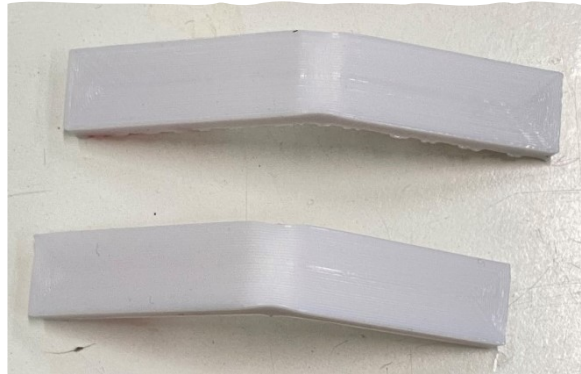


Figura [41] – Piegatura subita dai provini pieni in PLA basic

- I provini pieni in PLA con legno balsa hanno subito piegatura e rottura in prossimità della metà.

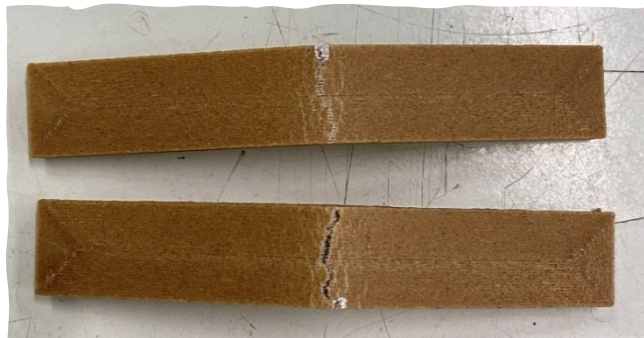


Figura [42] - Piegatura e rottura subita dai provini pieni in Laywood

- I provini pieni in PLA con polvere di carbonio hanno subito rottura in corrispondenza della metà.

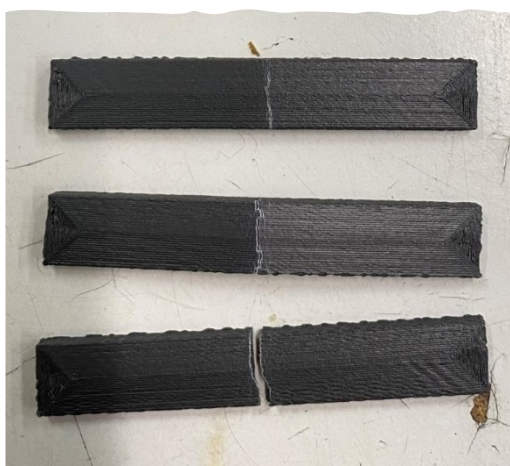


Figura [43] – Rottura dei provini in PLA con fibre di carbonio

- I provini in PLA con legno balsa e quelli ibridi, non hanno subito rottura bensì una delaminazione.



Figura [44] - Delaminazione dei provini sandwich ibridi e in Laywood

La delaminazione subita dalle due tipologie di provini la si può osservare meglio tramite gli ingrandimenti che sono stati ottenuti mediante lo stereomicroscopio:



Figura [45] – Provino in PLA con legno balsa (ingrandimento 8x)

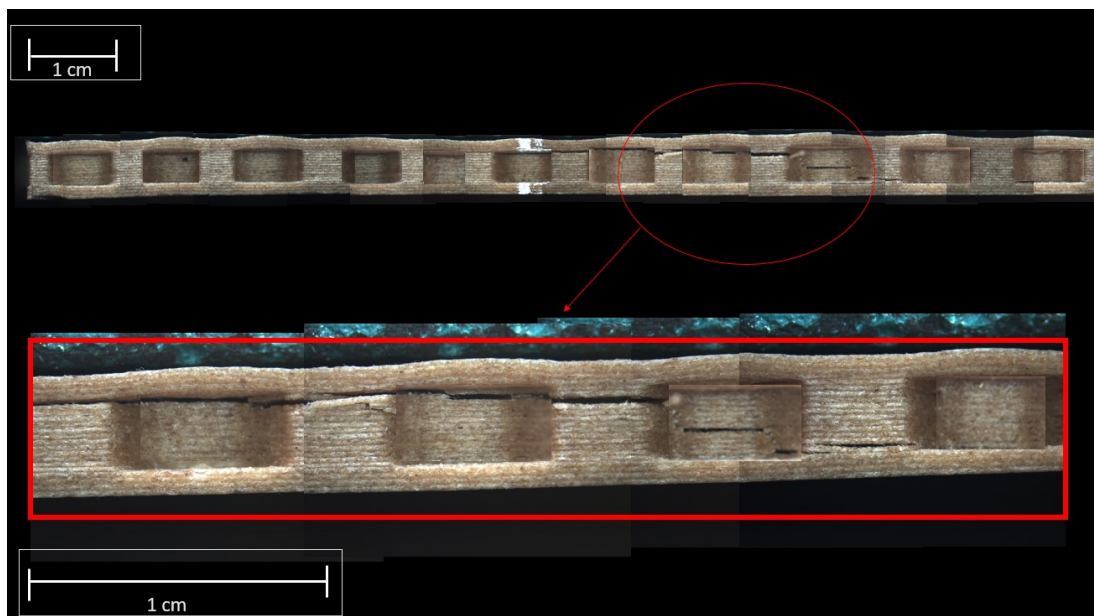


Figura [46] – Provino in PLA con legno balsa (ingrandimento 12.5x)

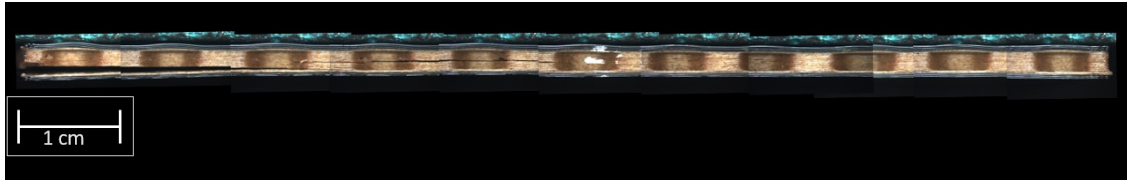


Figura [47] – Provino ibrido (ingrandimento 8x)

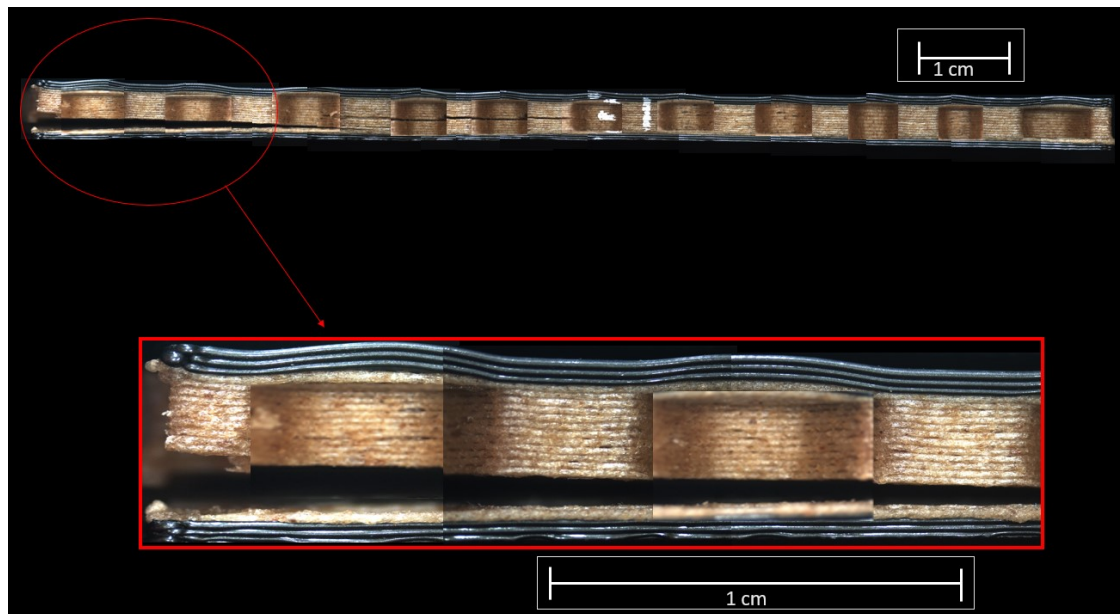
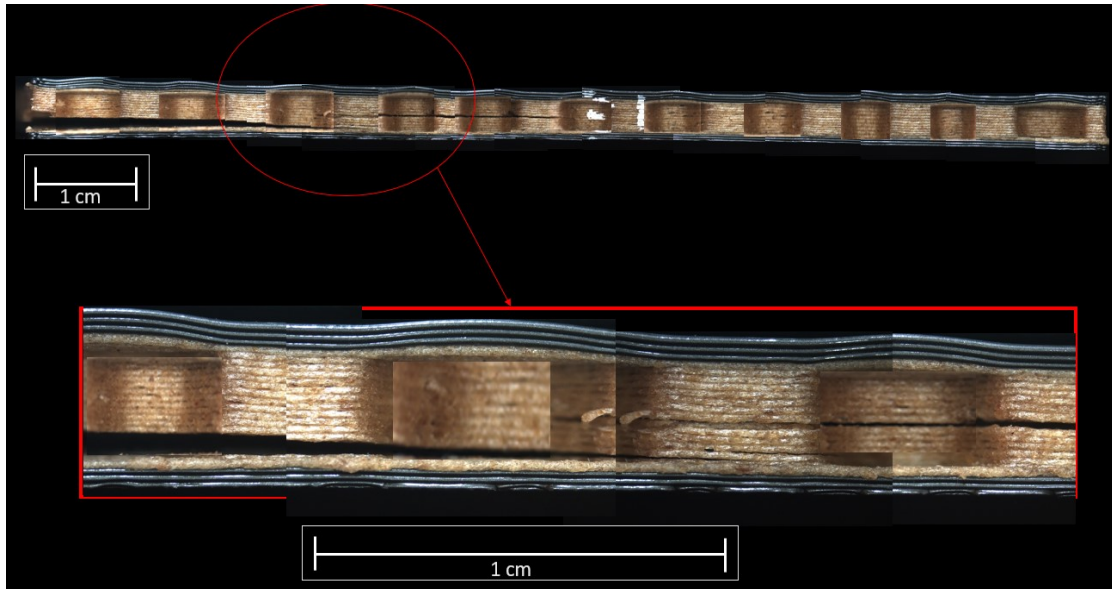


Figura [48] – Figura [49] – Provino ibrido (ingrandimento 12.5x)

- I provini in PLA con polvere di carbonio e grafene hanno, invece, subito rottura.

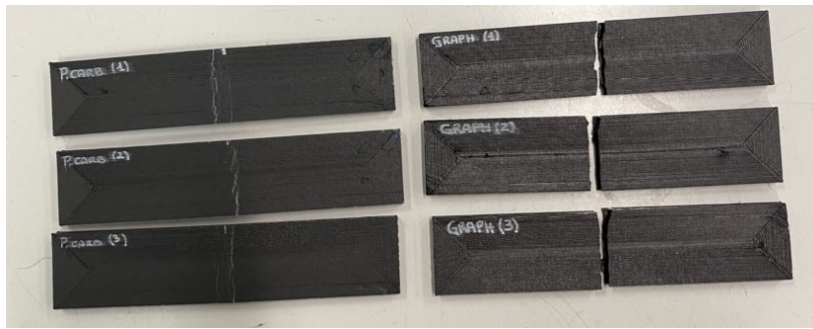


Figura [50] – Rottura subita dei provini sandwich in PLA con fibre di carbonio e grafene

Tale rottura si può osservare meglio tramite gli ingrandimenti che sono stati ottenuti mediante lo stereomicroscopio:



Figura [51] – Provino in PLA con polvere di grafene (ingrandimento 8x)

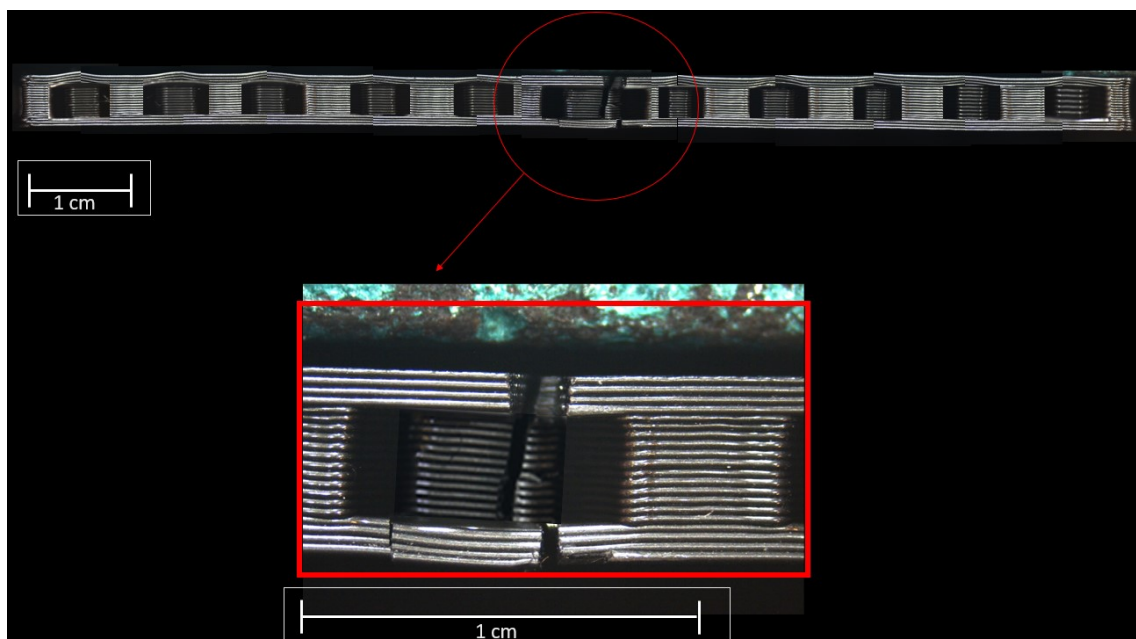


Figura [52] – Provino in PLA con grafene (ingrandimento 12.5x)

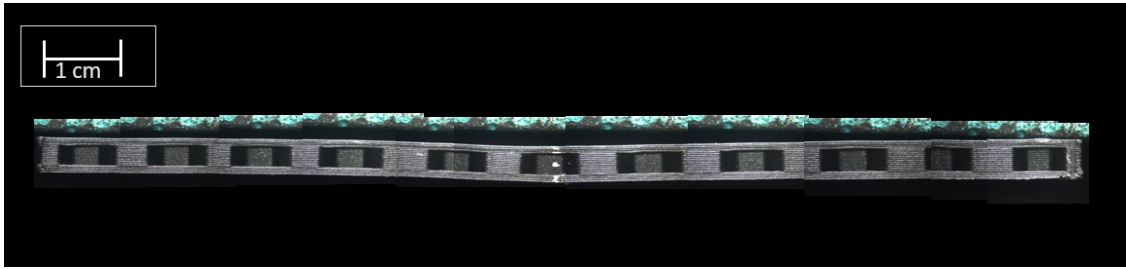


Figura [53] – Provino in PLA con polvere di carbonio (ingrandimento 8x)

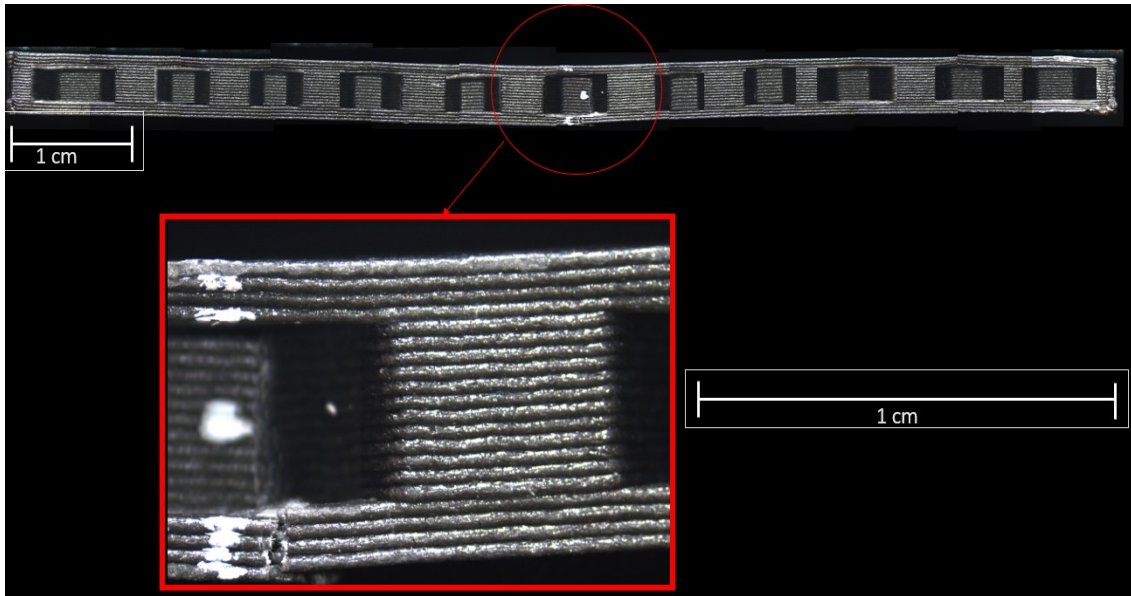


Figura [54] – Provino in PLA con polvere di carbonio (ingrandimento 12.5x)

5.CONCLUSIONI

Questo studio si concentra sulla realizzazione, mediante stampa 3D, di una serie di provini pieni e con una struttura a sandwich, in materiali diversi quali PLA basic e materiali compositi (matrice polimerica in PLA e aggiunta di fibre di carbonio, grafene e legno balsa). I provini così ottenuti sono stati sottoposti a prove di piegatura a tre punti, mediante la macchina MTS810, che hanno evidenziato quali provini hanno subito una piegatura senza arrivare mai alla rottura e quali una rottura o una delaminazione. Dopo aver acquisito ed elaborato i dati ottenuti da queste prove, è stato effettuato un confronto tra i vari materiali, sulla base dei grafici tensione-deformazione da cui è emerso che:

- I provini pieni in PLA caricato con polvere di grafene possiedono buona durezza e tenacità ed anche una tensione massima a rottura maggiore rispetto agli altri materiali; ciò comporta un'elevata resistenza alle sollecitazioni e ai carichi imposti;
- I provini pieni in PLA caricato con fibre di carbonio presentano un modulo di elasticità flessionale maggiore di tutti gli altri materiali e ciò garantisce al materiale stesso un'elevata durezza, ma alta fragilità;
- I provini pieni in PLA basic sono caratterizzati da un'elevata tenacità, elevata deformazione ed una resistenza massima a rottura molto più bassa rispetto ai provini realizzati in PLA rinforzato con fibre;
- I provini pieni realizzati in PLA con fibre di legno balsa non riescono a raggiungere alti valori di resistenza e deformazione. Questo materiale, quindi, viene usato non tanto per la sua efficienza a livello di prestazioni, quanto più per la sua leggerezza.
- I provini con struttura a sandwich presentano una densità, un peso e una resistenza massima a rottura inferiori a quelli dei provini pieni;
- Il provino ibrido A (PLA con grafene per le basi superiore e inferiore mentre Laywood per l'honeycomb) ha un modulo di elasticità maggiore di quello B (Laywood per le basi mentre PLA con polvere di grafene per l'honeycomb), ma non è così ottimale a livello di prestazioni.

Per poter eseguire un vero e proprio confronto tra i provini pieni e quelli con struttura a sandwich, è necessario, però, introdurre il parametro tensione specifica σ_{fs} .

I risultati ottenuti per tutti i provini hanno messo in evidenza che la tensione specifica dei provini a sandwich risulta essere maggiore rispetto a quella dei provini pieni determinando, così, un aumento delle prestazioni.

La notevole differenza di tensioni specifiche massime che si viene ad avere tra i due provini ibridi, inoltre, sta a significare che il provino ibrido B risulta essere più performante rispetto al provino ibrido A e ciò è causato dal fatto che la rottura non avviene in superficie ma internamente, per delaminazione.

Infatti:

- Il provino ibrido A non possiede un'elevata resistenza a rottura e, rispetto ad un provino interamente in Laywood, ha una tensione specifica massima più bassa;
- Il provino ibrido B ha modulo di elasticità flessionale più basso ma una buona tensione specifica a rottura e un'elevata deformazione; rispetto ad un provino interamente in Laywood ha una tensione specifica massima più alta.

L'obiettivo finale di questo elaborato è determinare le proprietà meccaniche del materiale ibrido e capire se questo possiede delle buone proprietà intermedie tra quelle dei due materiali costituenti, presi singolarmente. Si è, quindi, evidenziato che è possibile ottenere buone prestazioni avendo a disposizione materiali sempre più leggeri e biodegradabili.

Queste considerazioni costituiscono la base di partenza per ricerche future che possono essere svolte utilizzando materiali diversi da quelli esaminati, cambiando la forma della struttura dell'honeycomb nel caso di provini a struttura a sandwich, oppure modificando alcuni parametri di stampa. L'obiettivo sarà sempre quello di ottenere prestazioni elevate riducendo sempre più il peso dei materiali utilizzati, aspetto importante in diversi settori quali l'aerospaziale e l'automotive.

BIBLIOGRAFIA

- [1] “Economia circolare e industria 4.0: il futuro del made in Italy”
(<https://economiamarche.univpm.it>)
- [2] “Economia circolare e industria 4.0: verso la sostenibilità ambientale” (circularmobility.it)
- [3] Andersen, M.S., 2007 “An introductory note on the environmental economics of the circular economy”
- [4] Acerbi, F., Taisch, M., 2020 “A literature review on circular economy adoption in the manufacturing sector”
- [5] Lakshmi Priya Muthe, Kim Pickering, Christian Gauss: “A Review of 3D/4D Printing of Poly-Lactic Acid Composites with Bio-Derived Reinforcements”. Composites part C: Open Access 8 (2022)
- [6] “Quali sono i vantaggi del binder jetting nella stampa 3D?” (www.makepartsfast.com)
- [7] Direct energy deposition- an overview
- [8] “Lo stato dell’arte del getto di materiale: una revisione critica” (www.mdpi.com)
- [9] Aspetti metodologici per la qualifica del processo di fusione laser selettiva a letto di polvere per componenti metallici
(www.engineersgarage.com/3D-printing-processes-powder-bed-fusion-part-5/8)
- [10] “3D/4D printing of polyurethanes by Vat Photopolimerization” (<https://onlinelibrary.wiley.com>)
- [11] Digital Light Processing – an overview
- [12] Material Extrusion – an overview
- [13] Ngo, T.D., Kashani, A., Imbalzano, G., Nguyen, K. T., & Hui, D. 2018 “Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges”

- [14] Dey A. & Yodo N., *A Systematic Survey of FDM Process Parameter Optimization and Their Influence on Part Characteristics*, Journal of Manufacturing and Materials Processing, 2019
- [15] Appunti dell'Ing. Tommaso Mancia: Parametri del processo di stampa della tecnologia BMD
- [16] “Guida ai materiali per la stampa 3D: metalli”
(<https://www.meccanicaneews.com> + www.3dnatives.com)
- [17] European Bioplastics, What are bioplastics?
(https://docs.europeanbioplastics.org/2016/publications/fs/EUBP_fs_what_are_bioplastics.pdf)
- [18] Stampa 3D: settori di applicazione - Energy Group (<https://www.energygroup.it/settori-stampa-3d>)
- [19] Magnaghi G., “Stampa 3D: Applicazioni di un’idea innovativa”, Libri Este
- [20] Stefaniak K., Masek A., *Green Copolymers Based on Poly (Lactic Acid)-Short Review*, Materials
- [21] Pretula J., Slomkowski S., Penczek S., *Poly lactides – Methods of synthesis and characterization*, Advanced Drug Delivery Reviews
- [22] Farah, Shady, et al., *Physical and Mechanical Properties of PLA, and Their Functions in Widespread Applications — A Comprehensive Review*, Advanced Drug Delivery Reviews
- [23] “Realizzazione di una pressa “intelligente” per il controllo del ritorno elastico nel processo di piegatura” (<https://aisberg.unibg.it>)
- [24] Appunti del professor Forcellese

RINGRAZIAMENTI

Ringrazio il mio relatore Prof. Archimede Forcellese e i correlatori: Prof.ssa Michela Simoncini per essere stata sempre disponibile durante il tirocinio; Dott. Tommaso Mancina per avermi dedicato molto del suo tempo nella fase del tirocinio e avermi seguita, con grande attenzione, durante la stesura della tesi. Grazie alla sua passione e dedizione al lavoro, mi ha invogliato a continuare questo percorso nell'ambito dei sistemi produttivi e tecnologie innovative.