



**UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE**

**FACOLTA' DI INGEGNERIA**

---

Corso di Laurea triennale in Ingegneria Meccanica

**STUDIO DEL COMPORTAMENTO A FLESSIONE DI  
STRUTTURE SANDWICH IN MATERIALE COMPOSITO  
REALIZZATE MEDIANTE MATERIAL EXTRUSION**

**FLEXURAL BEHAVIOUR ANALYSIS OF COMPOSITE  
SANDWICH STRUCTURES REALIZED THROUGH MATERIAL  
EXTRUSION**

Relatore:

Prof.ssa Ing. Michela Simoncini

Tesi di Laurea di:

Mirco Bolletta

Correlatore:

Ing. Tommaso Mancia

A.A. 2021 / 2022

*Ai miei genitori*

# Indice

<b>Introduzione .....</b>	<b>1</b>
<b>Capitolo 1- Stampa 3D .....</b>	<b>2</b>
<b>1.1 Generalità e storia.....</b>	<b>2</b>
<b>1.2 Materiali .....</b>	<b>4</b>
<b>1.3 Tecnologie di stampa 3D .....</b>	<b>9</b>
<b>1.3.1 Tecnica FDM.....</b>	<b>16</b>
<b>1.4 Applicazioni .....</b>	<b>20</b>
<b>Capitolo 2- Materiali e procedure sperimentali .....</b>	<b>22</b>
<b>2.1 Materiale utilizzato .....</b>	<b>22</b>
<b>2.2 Procedure sperimentali .....</b>	<b>28</b>
<b>2.2.1 Stampa 3D.....</b>	<b>28</b>
<b>2.2.2 Prove di piegatura .....</b>	<b>32</b>
<b>Capitolo 3 – Risultati.....</b>	<b>36</b>
<b>Capitolo 4 – Conclusioni .....</b>	<b>49</b>
<b>Bibliografia e sitografia.....</b>	<b>51</b>

## **Introduzione**

Al giorno d'oggi, soprattutto nel settore dell'automotive dell'aerospazio e del motorsport, è sempre più indispensabile studiare e sviluppare nuove tecnologie per rendere componenti efficienti e prestazionali riducendo il peso degli stessi. Di conseguenza, è necessario ricercare materiali e tecniche di realizzazione, tali da rendere il prodotto il più performante possibile; un nuovo metodo per ottenere componenti è la manifattura additiva, nata negli anni '80 ma sviluppata esponenzialmente negli ultimi vent'anni, che consente di ottenere, mediante differenti tecniche di produzione, oggetti di qualsiasi geometria disegnati su un software CAD. Questa nuova tecnica di realizzazione è una valida alternativa alle lavorazioni per asportazione di truciolo, in quanto consente la creazione di prodotti con geometria più complesse e una migliore riuscita dei componenti con parti cave difficilmente realizzabili con le lavorazioni per asportazione di truciolo.

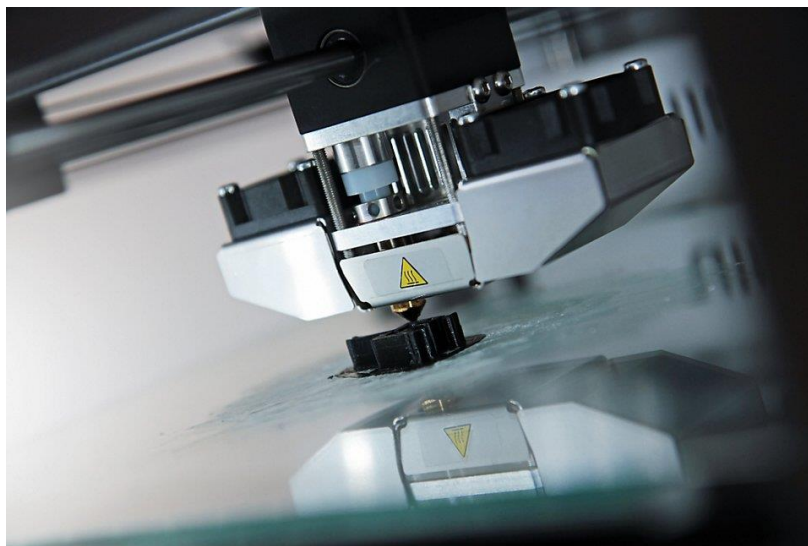
Nel presente elaborato si effettua un'analisi delle proprietà meccaniche di provini ottenuti mediante manifattura additiva e del loro comportamento a flessione. Si studiano le caratteristiche meccaniche di provini ottenuti mediante manifattura additiva, i quali sono stampati sia pieni sia a sandwich, ovvero con una parte interna con struttura a nido d'ape (honeycomb), mentre esternamente costituiti da due superfici piane. Lo studio riguarda provini in acido polilattico (PLA), provini in PLA rinforzato con polvere di grafene, provini in PLA rinforzato con fibre di carbonio e provini in PLA rinforzato con fibra di legno balza (laywood). In aggiunta, si realizzano dei provini ibridi con una struttura a sandwich, costituiti esternamente da PLA rinforzato con polvere di grafene mentre l'honeycomb è costituito da laywood. Inoltre, si ottengono ulteriori ibridi con i medesimi materiali tuttavia invertiti nella loro collocazione. Una volta stampati i provini, questi vengono sottoposti a prova di piegatura per quantificare la tensione massima e quella specifica dei vari materiali. Infine, si eseguono osservazioni allo stereomicroscopio per l'analisi delle zone di rottura dei provini.

# Capitolo 1- Stampa 3D

## 1.1 Generalità e storia

La stampa 3D è senza dubbio una delle tecnologie più rivoluzionarie e promettenti dei nostri tempi.

La figura 1. mostra un esempio di processo di stampa 3D



*Figura 1. Rappresentazione di un processo di stampa 3D*

Quando si parla di stampa 3D, si intende la realizzazione fisica di oggetti tridimensionali a partire da un modello digitale. Ciò è possibile grazie alla produzione additiva (additive manufacturing), cioè un processo industriale che serve a creare oggetti sulla base di modelli 3D computerizzati aggiungendo uno strato sopra l'altro. La produzione additiva si oppone a quella sottrattiva, usata tradizionalmente per la realizzazione di oggetti, in cui si parte da un blocco di materiale da cui si rimuovono meccanicamente le parti, come avviene ad esempio nelle lavorazioni per asportazione di truciolo.

La stampa 3D nasce negli anni '80 per merito di Chuck Hull, ingegnere statunitense, che inventò la stereolitografia, tecnica che permette di realizzare singoli oggetti tridimensionali a partire direttamente da dati digitali elaborati da un software

CAD/CAM impiegando particolari resine fotosensibili solidificate tramite una sorgente UV. La stereolitografia è il primo esempio commerciale di prototipazione rapida.

Successivamente, ispirati da Hull, Carl Deckard, Joe Beaman e Paul Forderhase svilupparono la selective laser sintering (SLS), ovvero la sinterizzazione. Questo processo è molto simile alla stereolitografia, tuttavia impiega nylon al posto delle resine.

Alla fine degli anni '90 fu brevettata la Fused deposition modeling (FDM), cioè la stampa 3D con materiale fuso, che permette ai filamenti plastici fusi di formare i vari strati.

L' FDM lavora su un principio additivo rilasciando il materiale su strati. Un filamento termoplastico è srotolato da una bobina, che fornisce il materiale ad un ugello di estrusione, con il quale è possibile gestire il flusso. L'ugello viene riscaldato per poter sciogliere il materiale all'interno e può essere guidato sia in maniera orizzontale che in verticale da un meccanismo a controllo numerico, cioè seguendo un percorso tracciato da un software di slicing. Per favorire l'adesione di alcuni materiali al piano di stampa, spesso si ricorre all'impiego di piani riscaldati, o additivi, che contrastano la compressione dovuta al raffreddamento del materiale.

Per riempire un'area sono necessari più passaggi, (in modo simile alla colorazione di una forma con un pennarello). Quando la stampante termina uno strato, la piattaforma di costruzione scende e la macchina inizia a lavorare sullo strato successivo. In alcune configurazioni della macchina, la testa di estrusione si sposta verso l'alto. Questo processo si ripete finché la parte non è finita.

Nel 1995 è la volta dei metalli: i ricercatori del Fraunhofer Institute idearono la Selective Laser Melting, che consente di produrre con stampa 3D oggetti solidi in metallo con una densità fino al 98%. È un processo di manifattura additiva di fusione a letto di polvere in base al quale un raggio laser focalizzato ad alta densità scansiona selettivamente un letto di polvere e gli strati scansionati e solidificati vengono impilati l'uno sull'altro per costruire una parte tridimensionale completamente funzionale, strumento o prototipo. Il selective laser melting è molto simile al processo di sinterizzazione laser selettiva (SLS), che utilizza un meccanismo di sinterizzazione o di fusione parziale per legare le particelle di polvere piuttosto che una fusione completa [1]. La vera rivoluzione però arriva nel 2005, con un progetto di stampante 3D conosciuto da tutti: il RepRap, una stampante che riesce a replicare sé stessa, ovvero stampare i pezzi per costruire un'altra stampante 3D

dando vita ad un processo potenzialmente infinito. Grazie al supporto di internet e ad una famosa piattaforma di condivisione chiamata Shapeway si iniziano a creare le prime comunità online di produttori che condividono i loro servizi di stampa e i loro disegni 3D con la 15 popolazione digitale. Dal 2008 è possibile addirittura acquistare stampanti 3D che possono essere utilizzate comodamente all'interno del proprio salotto di casa. Arrivando ai giorni nostri possiamo osservare che c'è un forte interessamento verso questa nuova tecnologia che gode della fiducia di moltissime imprese che stanno cercando di portare il processo di stampa 3D all'interno dei processi produttivi, attraverso le risoluzioni delle criticità che la tecnologia deve affrontare. Numerosi investimenti sono stati fatti fino a questo punto e altrettanti studi indicano che in tempi brevi questa tecnologia prenderà riuscirà a decollare modificando completamente le logiche produttive che tutti conosciamo [2].

## **1.2 Materiali**

Come detto in precedenza, la manifattura additiva consente la realizzazione di una ampia varietà di prodotti; di conseguenza si prospetta una vasta gamma di materiali, i quali sono utilizzati nella stampa 3D. Soffermendosi esclusivamente ai materiali utilizzati in campo meccanico, questi possono essere divisi in tre categorie: polimeri, metalli e altri materiali

Di polimeri ne esistono molti con proprietà e caratteristiche diverse tra loro, permettono una scelta maggiore dei processi di stampa. Hanno costi ridotti e possono essere utilizzati in ambiti differenti, dal meccanico al medico. Essi sono disponibili in tre forme diverse: filamento, resina liquida e polvere; inoltre, possono essere suddivisi in ulteriori due categorie: termoplastici e termoindurenti. I materiali termoplastici possono essere sciolti o solidificati più volte, senza perdere, per la maggior parte delle volte, le proprie qualità; Invece, quelli termoindurenti sono già allo stato liquido e vengono solidificati attraverso l'esposizione alla luce o mescolati tramite l'utilizzo di un catalizzatore; in questa categoria rientrano le resine. I materiali polimerici più utilizzati per processi di stampa sono:

- Acido polilattico: noto come PLA è un polimero termoplastico derivante da zuccheri naturali e appartenente alla famiglia dei poliesteri alifatici, con proprietà

simili al Poliestere ed al PET. La principale caratteristica del PLA è di essere biodegradabile e compostabile al 100%. Esso è un polimero trasparente, brillante, resistente meccanicamente, rigido e viene prodotto da risorse 100% rinnovabili annualmente, e quindi a zero impatto ambientale. Il PLA è assolutamente comparabile a molti tipo di plastiche in commercio ed è facilmente processabile con i normali macchinari standard per termoformatura, per estrusione mono e biassiale, per film, per iniezione e per espanso. Questo tipo di plastica infine ha ottima resistenza agli olii ed ai grassi ed a numerosi agenti chimici, offre buona barriera agli aromi e all'ossigeno, mentre una bassa barriera al vapore acqueo. Grazie alle caratteristiche elencate in precedenza, il PLA ha infiniti campi di utilizzo che vanno dal monouso, ai tessili o manufatti durevoli: esso permette infatti di produrre qualsiasi manufatto che è oggi creato con le normali plastiche in commercio e con i normali macchinari in uso [3].

- ABS (acrilonitrile-butadiene-stirene): si tratta di un materiale termoplastico amorfo che presenta un basso assorbimento di umidità. Si stampa ottimamente per iniezione, estrusione e termoformatura, si incolla e si salda bene e può essere avvitato con viti auto-maschianti. Presenta buona rigidità e tenacità a basse temperature fino a  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ , elevata durezza, resistenza agli urti e alle scalfiture. Ha un'ottima resistenza elettrica. È utilizzabile termicamente da  $-45$  a  $+85\text{ }^{\circ}\text{C}$ , ci sono tipi speciali che possono operare anche a temperature più elevate, quando brucia la fiamma è fuliginosa e non si ha sgocciolamento, presenta caratteristiche autoestinguenti migliorabili con versioni resistenti alla fiamma. Per quanto riguarda l'ambiente resiste ad acqua, soluzioni saline acquose, acidi diluiti, soluzioni alcaline, idrocarburi saturi, benzina, oli minerali, grassi animali e vegetali, e presenta una sufficiente resistenza all'invecchiamento, mentre non resiste ad acidi minerali concentrati, idrocarburi aromatici e clorurati, eteri e chetoni.
- HDPE, polietilene ad alta densità: è un polimero termoplastico ricavato dal petrolio. Per ottenere un chilogrammo di HDPE sono necessari 1,75 kg di petrolio, in termini di energia e di materia prima. Viene comunemente riciclato. L'HDPE presenta scarse ramificazioni, col risultato che le forze intermolecolari e la resistenza alla trazione sono maggiori che nelle varietà di polietilene meno

dense. Le differenze meccaniche sono più rilevanti delle differenze in densità, di modo che l'HDPE possiede una più alta forza. È anche più duro e più opaco e può sopportare temperature più elevate (120 °C / 248 °F per brevi periodi, 110 °C / 230 °F continuamente). Il polietilene ad alta densità, a differenza del polipropilene, non può sopportare le condizioni di autoclave normalmente richieste.

- Nylon: il Nylon è una fibra sintetica realizzata per la prima volta negli USA dalla Dupont de Nemours e successivamente nel 1938 è stata immessa sul mercato. Si suddivide in due principali tipi secondo il polimero impiegato: il nylon 6,6 (ricavato dall'adipato di esametildiammina costruito con due monomeri ognuno dei quali ha una ossatura di sei atomi di carbonio) e nylon 6 (ricavato dal caprolattame con ossatura formata da sei atomi di carbonio). Esiste anche il nylon 11 ottenuto dall'olio di ricino. La cifra che accompagna la parola si riferisce al numero di atomi di carbonio esistenti nella molecola. Il nylon ha diversi vantaggi, tra cui la resistenza all'usura e a trazione, la leggerezza e la resistenza agli agenti chimici. È inguercibile e indeformabile, elastico e di facile manutenzione. Di contro, invece, non ha potere assorbente ed è relativamente freddo al tatto; è sensibile al calore e con poca resistenza allo snagging (fili tirati) per tessuti realizzati in filo continuo liscio (senza torsione). La leggerezza della fibra è conseguenza del suo basso peso specifico.
- Alcool polivinilico: noto come PVA, è un composto chimico ottenuto per idrolisi, di norma alcalina, degli esteri polivinilici. È solubile in acqua e insolubile nei solventi organici, non possiede permeabilità ai gas. Data la natura del composto, è utilizzato in medicina per drenaggi e tubi, in contattologia quale composto di lubrificanti per lenti a contatto, nell'industria tessile per l'incollaggio di fibre naturali. Applicato in soluzione acquosa sulla superficie di uno stampo per produzione a freddo di manufatti in vetroresina è un ottimo agente antiadesivo.
- I metalli garantiscono rispetto ai polimeri delle proprietà meccaniche maggiori ma, necessitano delle tecniche complesse e quindi più costose, contando anche il costo più elevato del materiale. Per la stampante in 3D, essi sono disponibili solo in polvere, e sono:

- Acciaio: è uno dei materiali più utilizzati al mondo grazie alle sue proprietà, tra le più importanti vi è una grande deformabilità e durezza, una buona resistenza a trazione e a snervamento, una buona conducibilità termica e una resistenza a corrosione, quest'ultima per gli acciai inossidabili. Infatti, tra gli acciai più utilizzati nella stampa 3D ci sono gli acciai inox 316L, estremamente resistente alla corrosione, e l'acciaio inossidabile 17-4 PH. I componenti della lega e il trattamento utilizzato nella produzione di acciai comportano valori differenti di proprietà e resistenza meccaniche, e devono essere eseguiti dei test in laboratorio per determinare le proprietà finali del materiale. La misurazione di snervamento, duttilità e rigidità sono determinati da prove di trazione, la tenacità è misurata tramite prove di impatto, la durezza, invece, è determinata dalla misura di penetrazione della superficie da parte di un oggetto duro. Le proprietà fisiche sono legate alla fisica dei materiali, tra cui densità, conducibilità termica, modulo elastico e coefficiente di Poisson. Questo materiale, nell'ambito delle tecniche AM, viene utilizzato nel settore industriale e ingegneristico.
- Alluminio: Si differenzia dagli altri materiali per l'aspetto, la facilità di fabbricazione, la buona resistenza a corrosione, la bassa densità, ma soprattutto, per l'alto rapporto resistenza-peso e 'alta tenacità alla frattura. Grazie a queste caratteristiche è uno dei materiali economici e strutturalmente efficaci nel mercato. Se esposto all'aria, si forma uno strato di ossido sulla superficie del materiale, il quale offre un'ottima resistenza a corrosione. L'alluminio, se non aggiunti elementi leganti come manganese, silicio, rame e magnesio, non garantisce un'elevata resistenza a trazione. Esso garantisce una conduttività termica elevata, circa tre volte superiore a quella dell'acciaio. La malleabilità dell'alluminio permette che le parti stampate con quest'ultimo siano alla pari a quelle prodotte con la Macchina a Controllo Numerico (CNC).
- Nichel: è un metallo bianco argenteo che subisce un'alta lucidatura. Appartiene al gruppo del ferro ed è duro, malleabile e duttile. Il nichel è un conduttore abbastanza buono di calore e di elettricità. La sua caratteristica principale è la sua resistenza a temperature elevatissime (utilizzabile fino a 1200°). Nei suoi composti più comuni il nichel è bivalente, anche se presuppone altre valenze. Viene impiegato principalmente nel settore aerospaziale ed energetico.

- Titanio: è un materiale che combina di alta resistenza, tenacità, rigidità, bassa densità e buona resistenza alla corrosione fornite da varie leghe di titanio a bassissime temperature o elevate temperature, che permettono un risparmio di peso nelle strutture aerospaziali. Nella manifattura additiva viene utilizzato in lega con alluminio e vanadio; la lega più utilizzata è Ti 6Al-4V, caratterizzata da un'elevatissima resistenza a trazione e tenacità e una straordinaria resistenza alla corrosione. Il punto di fusione è di 1725°, il quale rappresenta una delle proprietà più utili del titanio. Esso non è un buon conduttore di elettricità, quindi, ne consegue, una elevata resistenza elettrica. Il titanio inoltre è ideale per applicazioni biomediche, come la realizzazione di protesi.
- Superlega di cobalto-cromo: caratterizzato dal suo alto rapporto resistenza-peso, per dall'elevata resistenza alla corrosione e allo scorrimento, e per la possibilità di ottenere lucidature estremamente lisce. Queste proprietà meccanica vanno a migliorarsi al crescere della temperatura mediante alcuni trattamenti termici eseguiti ad un massimo di 500-600°C; oltrepassando tale soglia, però, le proprietà crollano e al seguito del trattamento la lega risulterà inutilizzabile.

Esistono, infine, altri materiali particolari, come la ceramica, le resine contenenti ceramica in polvere e filamenti che contengono polveri di vari materiali (metallo, marmo, legno, ecc....).

### 1.3 Tecnologie di stampa 3D

La produzione additiva, o stampa 3D, riduce i costi e i tempi e permette di superare i limiti dei processi di fabbricazione nello sviluppo dei prodotti. Da modelli concettuali e prototipi funzionali nei processi di prototipazione rapida fino a parti destinate all'utente finale nella produzione, le tecnologie di stampa 3D offrono soluzioni versatili e adatte a una vasta gamma di applicazioni.

Poiché ogni materiale e ogni stampante sono diversi, le impostazioni di stampa 3D dovranno essere regolate al fine di ottenere una buona qualità di stampa. Anche a seconda della geometria dei file 3D, alcune impostazioni dovranno essere ottimizzate.

La tecnologia da scegliere dipende da una serie di parametri:

- materiali;
- resistenza meccanica e finitura superficiale del pezzo;
- velocità di produzione;
- investimento necessario e costo finale

Si possono distinguere sette categorie di stampa 3D differenti [4]:

- Vat Polymerization: processo tramite il quale un fotopolimero liquido, contenuto in una vasca, viene solidificato da una sorgente luminosa. Un fotopolimero (detto anche resina fotoattiva) è un polimero che cambia le sue proprietà quando è esposto alla luce nella regione dell'ultravioletto, causando un collegamento e formando una catena di molecole. Per polimerizzare o indurire la resina dove richiesto, viene utilizzata una luce ultravioletta (UV), mentre una piattaforma sposta l'oggetto da realizzare verso il basso dopo che ogni nuovo strato è stato polimerizzato. Poiché il processo utilizza liquidi per

formare oggetti, non vi è alcun supporto strutturale dal materiale durante la fase di costruzione, a differenza dei metodi a base di polvere, in cui il supporto è dato dal materiale non legato. In questo caso, sarà spesso necessario aggiungere strutture di supporto. Le resine vengono polimerizzate utilizzando un processo di fotopolimerizzazione o luce UV, in cui la luce viene diretta attraverso la superficie della resina con l'uso di specchi controllati da motore. Nel punto in cui la resina entra in contatto con la luce, si indurisce.

Di seguito viene descritto il processo secondo quattro step:

1-La piattaforma di costruzione viene abbassata dalla parte superiore della vasca di resina verso il basso in base allo spessore dello strato.

2-Una luce UV indurisce la resina strato per strato. La piattaforma continua a muoversi verso il basso e vengono costruiti ulteriori livelli sopra il precedente.

3-Alcune macchine utilizzano una lama che si sposta tra gli strati per fornire una base di resina liscia su cui costruire lo strato successivo.

4-Dopo il completamento, la vasca viene drenata dalla resina e l'oggetto rimosso.

Di seguito viene illustrato nella figura 2. una rappresentazione di questa tecnologia di manifattura additiva

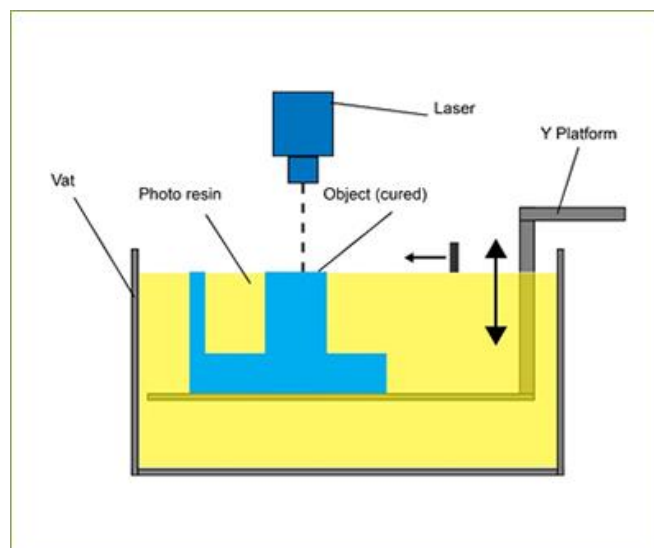


Figura 2 schematizzazione Vat polymerization

- Power Bed Fusion: processo che, come mostrato in figura 3, consiste nel creare un pezzo strato su strato in un letto di polvere. La polvere utilizzata può essere di polimeri o di metalli. Il principio di funzionamento si basa sulla fusione e, in seguito, solidificazione di un letto tramite una sorgente di energia termica. Inizialmente uno strato di materiale, in genere di 0,1 mm di spessore, viene steso sulla piattaforma di costruzione; poi un laser fonde il primo strato o la prima sezione trasversale del modello. Un nuovo strato di polvere viene steso sullo strato precedente usando un rullo, successivamente, ulteriori strati o sezioni trasversali vengono fusi e aggiunti. Infine, il processo si ripete finché non viene creato l'intero modello. La polvere sciolta e non fusa rimane in posizione ma viene rimossa durante la post-elaborazione.

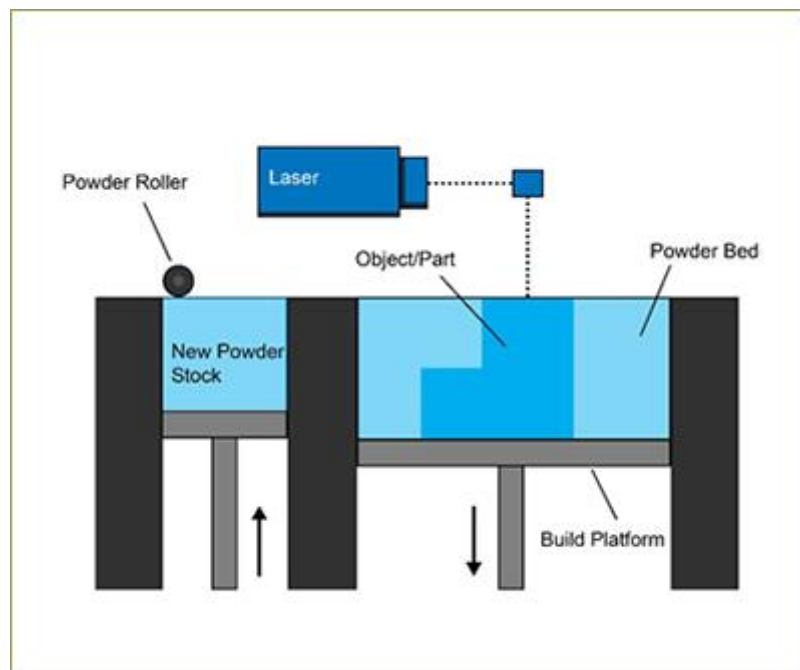


Figura 3 schematizzazione power bed fusion

- Material Jetting: nota anche come Polyjet o Colorjet è un processo in cui gocce di materiale, come ad esempio cera, fotopolimeri e metalli vengono depositate selettivamente a strati sovrapposti e solidificate tramite lampade UV o sorgenti di calore. Inizialmente, la testina di stampa è posizionata sopra la

piattaforma di stampa. Le goccioline di materiale vengono depositate dalla testina sulla superficie dove richiesto, tramite una sorgente termica o piezoelettrica. Le goccioline di materiale si solidificano e costituiscono il primo strato; successivamente ulteriori strati vengono costruiti come prima sopra il precedente. Infine, gli strati sono lasciati raffreddare e indurire o sono curati dalla luce UV. La post-elaborazione include la rimozione del materiale di supporto. Il processo viene schematizzato nella figura 4.

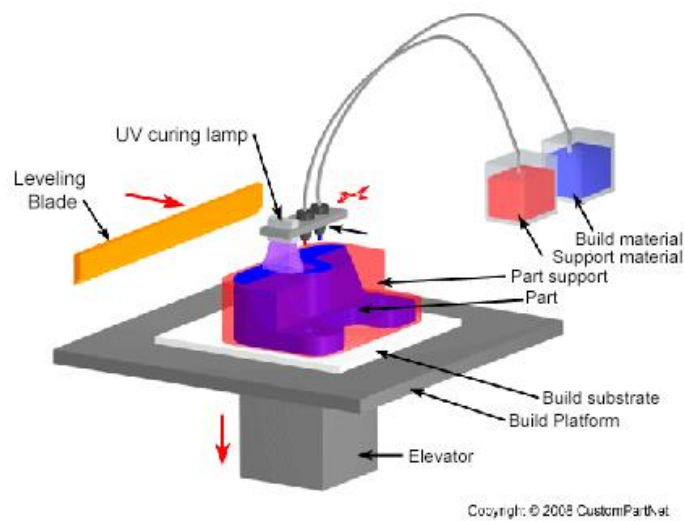
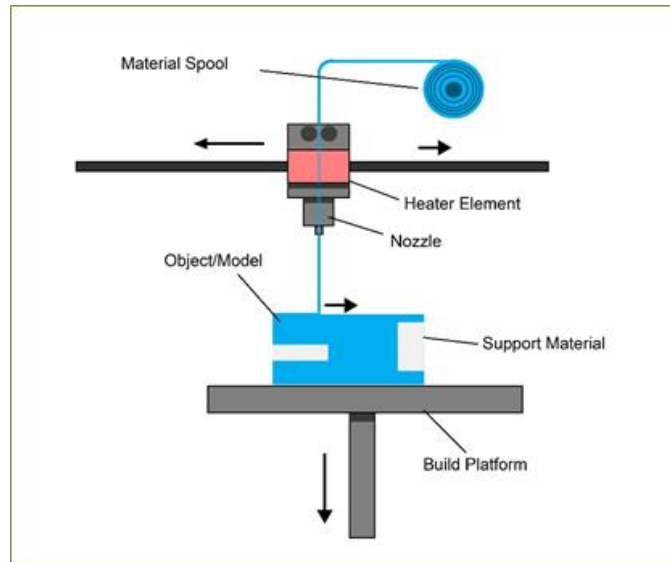


Figura 4 schematizzazione material jetting

- **Material Extrusion:** stampante che utilizza una bobina di filamento di materiale che alimenta l'estrusore attraverso un ugello riscaldato. La testa dell'estrusore riscalda e ammorbidisce il materiale e lo depone in posizioni prestabilite nel piano. L'ugello è in grado di traslare lungo il piano gli assi paralleli alla piattaforma, la quale si muove nella direzione perpendicolare dopo la deposizione di materiale in ogni strato. I processi più comunemente utilizzati sono la Fused Deposition Modeling (FDM) e la Fused Filament Fabrication (FFF), che verranno approfonditi nel paragrafo seguente (2.2.). Nel processo di stampa si ha che il primo strato viene costruito mentre l'ugello deposita il materiale dove richiesto sull'area della sezione trasversale della prima fetta

dell'oggetto. I seguenti livelli vengono aggiunti sopra i livelli precedenti. Gli strati vengono fusi insieme al momento della deposizione.

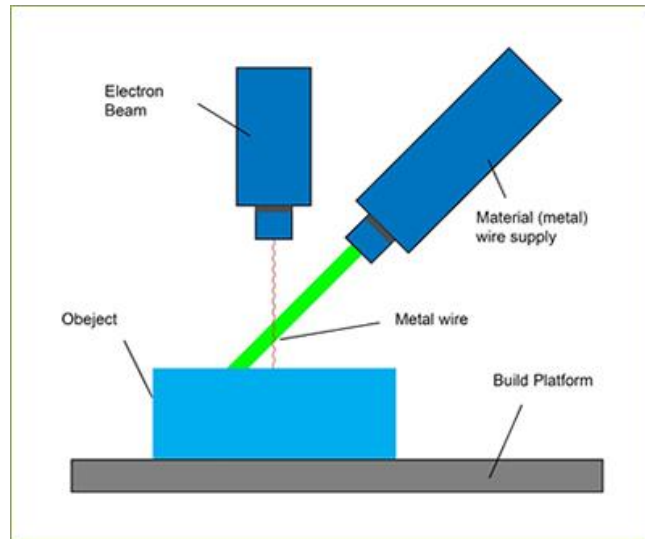
La figura 5 mostra una rappresentazione schematica del processo.



*Figura 5 schematizzazione material extrusion*

Directed Energy Deposition: processo in cui energia termica viene utilizzata per fondere e unire strati di metallo in polvere; a ciascun passaggio della testa di deposizione, tramite un ugello, si crea una traccia di materiale rapidamente solidificata; è un processo tipicamente utilizzato per riparare, o aggiungere materiale ad un componente creando un rivestimento. La macchina presenta un braccio a 4 o 5 assi che, insieme all'ugello, si muove attorno a un oggetto fisso. Il materiale, fornito in filo o in polvere, viene depositato dall'ugello sulle superfici esistenti dell'oggetto. Successivamente, il materiale viene fuso utilizzando un laser o un raggio di elettroni al momento della deposizione. Ulteriore materiale viene aggiunto strato dopo strato e si solidifica, creando o riparando nuove caratteristiche del materiale sull'oggetto esistente.

Nella figura 6 viene illustrato uno schema di questo processo.



*Figura 6 schematizzazione directed energy deposition*

- Binder Jetting: processo nel quale un legante liquido viene selettivamente rilasciato su strati di polvere di gesso o di metallo. Il processo, come illustrato nella figura 7, inizia con la distribuzione del materiale in polvere sulla piattaforma di costruzione mediante un rullo. In seguito, la testina di stampa deposita l'adesivo legante sopra la polvere dove richiesto; la piattaforma di costruzione viene abbassata dallo spessore dello strato del modello. Successivamente un altro strato di polvere viene steso sullo strato precedente: l'oggetto si forma dove la polvere è legata al liquido. La polvere non legata rimane in posizione attorno all'oggetto. Infine, il processo viene ripetuto fino a quando l'intero oggetto è stato realizzato.

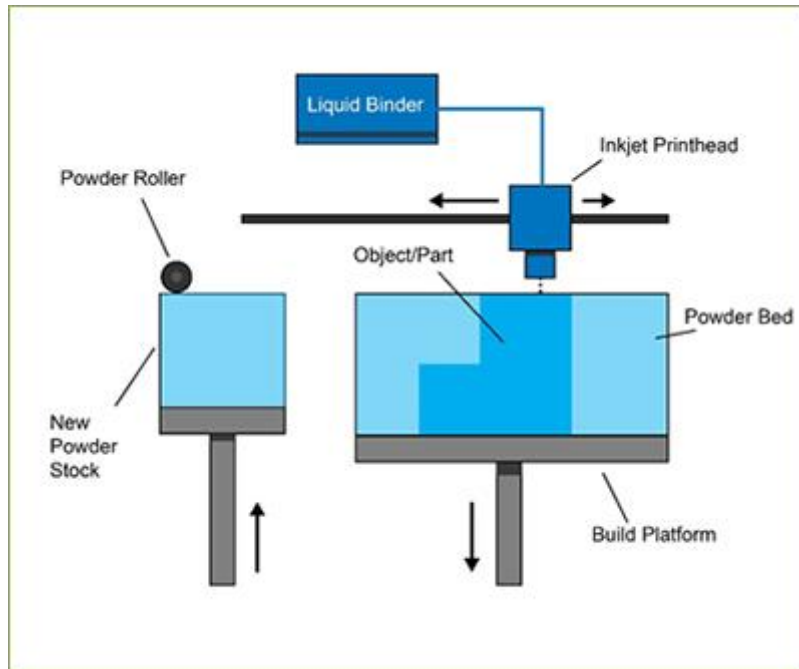


Figura 7 schematizzazione binder jetting

- Sheet Lamination: questa tecnologia include due differenti tipologie di stampa: l'ultrasonic additive manufacturing (UAM) e la laminated object manufacturing (LOM); la prima utilizza lamine o nastri di metallo legati tra loro mediante una saldatura ad ultrasuoni mentre, la seconda utilizza degli agenti adesivi. I metalli più utilizzati sono l'alluminio, il rame, l'acciaio inossidabile e il titanio. Il processo, come mostrato in figura 8, inizia posizionando il materiale sul piano di taglio; di seguito, il materiale viene incollato, sopra lo strato precedente, utilizzando l'adesivo. La forma richiesta viene quindi tagliata dallo strato, mediante laser o coltello, in alternativa, il materiale può essere tagliato prima di essere posizionato e incollato. Infine, vengono aggiunti i livelli successivi.

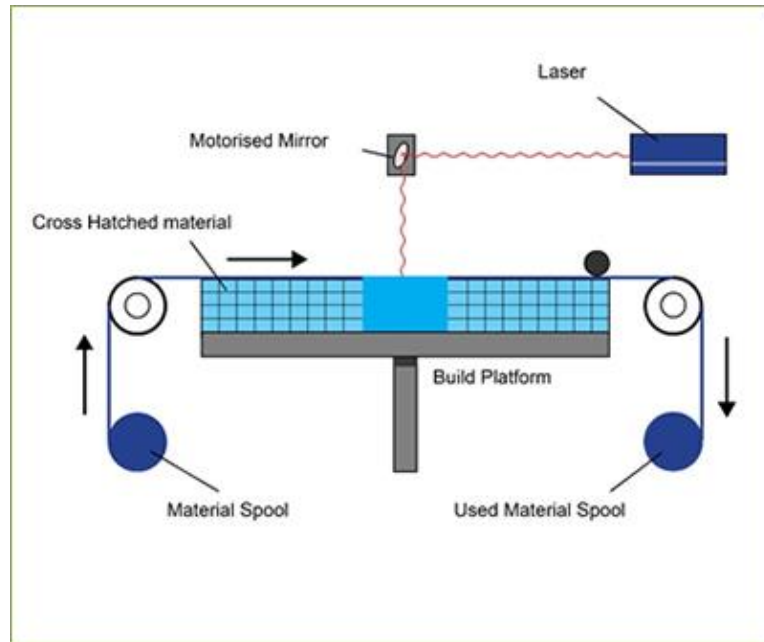


Figura 8 schematizzazione sheet lamination

### 1.3.1 Tecnica FDM

La FDM (Fused Deposition Modeling) è una tecnica di proprietà della Stratasys, Ltd. Brevettata nel 1989, prevede l'utilizzo di un estrusore che lavora a 320° e deposita filamenti all'interno di una camera isolata ad una temperatura inferiore ai 100°. Il principio di funzionamento si basa sulla deposizione, strato per strato, di una resina termoplastica malleabile in uno stato semi-solido estrusa tramite un apposito ugello di estrusione. La realizzazione di un oggetto avviene per mezzo dello srotolamento di un filamento termoplastico da una bobina, che fornisce il materiale ad un ugello di estrusione, con il quale viene gestito il flusso. L'ugello viene riscaldato con lo scopo di sciogliere il materiale, inoltre può essere guidato sia in direzione orizzontale che verticale da un meccanismo a controllo numerico, cioè seguendo un percorso tracciato da un software di slicing. Il processo inizia con l'estrusione del materiale sotto forma di filamento, mediante l'ugello riscaldato, che viene depositato nella parte inferiore della piattaforma della stampante e solidifica. In seguito, viene estruso un altro filamento di materiale che si deposita sullo strato sottostante per poi solidificare. Continuando l'estrusione strato dopo strato si va a formare l'oggetto dal basso verso l'alto.

Per favorire l'adesione di alcuni materiali al piano di stampa, si ricorre spesso all'impiego di piani riscaldati, o additivi, che contrastano la compressione dovuta al raffreddamento del materiale.

Nella figura 9. viene illustrato uno schema del processo FDM.

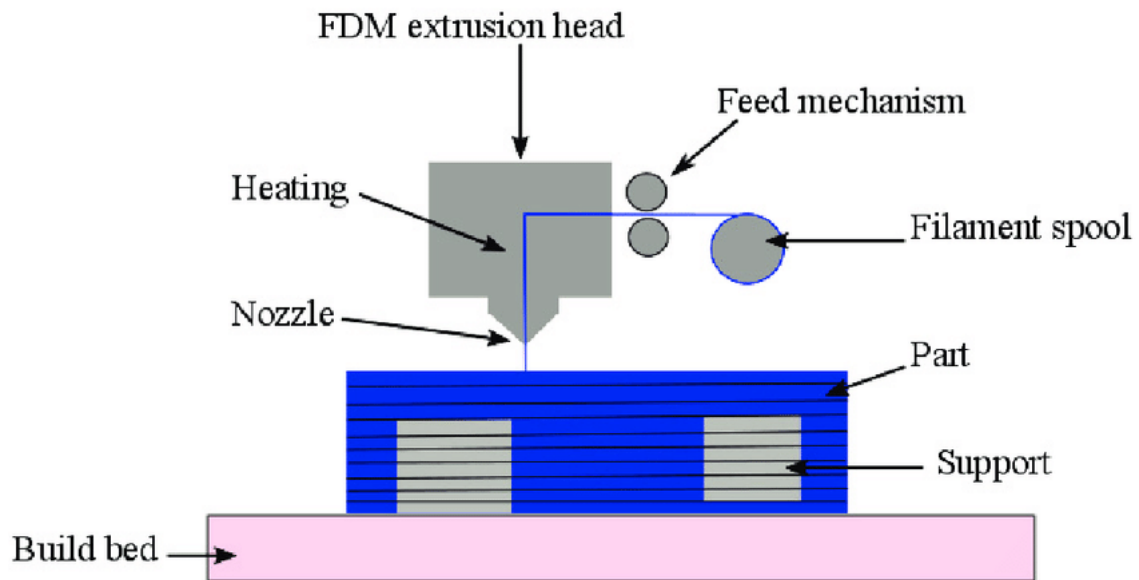


Figura 9 Schematizzazione processo FDM

Con la tecnologia FDM è possibile lavorare un'ampia gamma di polimeri termoplastici, tra cui i più comuni sono il PLA, ABS, NYLON o PET. Materiali come il TPU (poliuretano termoplastico) hanno caratteristiche elastomeriche che permettono di stampare parti flessibili. Sulle macchine più performanti è possibile stampare anche polimeri di tipo ingegneristico come PEEK e PEI. Inoltre, possono essere utilizzati materiali di supporto idrosolubili come il PVA. Esistono alcuni filamenti in materiale composito, costituiti da una matrice polimerica e caricati con fibre, come ad esempio il Nylon caricato con fibre di carbonio o fibre di vetro oppure il PLA caricato con polvere di fibre di carbonio o polvere di grafene; tra le caratteristiche della fibra di carbonio e di grafene spiccano l'elevata resistenza meccanica, la bassa densità, la capacità di isolamento termico, resistenza a variazioni di temperatura e all'effetto di agenti chimici, buone proprietà ignifughe.

Tra i parametri per FDM che possono essere impostati in un software di slicing ci sono:

- Diametro del nozzle;
- Altezza del layer;
- Numero di perimetri;
- Percentuale di riempimento (infill);
- informazioni sul materiale (temperatura della camera, temperatura dell'estrusore ecc...)

il nozzle della stampa 3D è la punta dell'estrusore da cui il fluido polimerico fuso fuoriesce per formare una parte solida. Più piccolo è il diametro del nozzle, meno materiale verrà depositato e maggiore sarà il tempo di stampa. Dunque, bisogna trovare un compromesso tra risoluzione e velocità. Inoltre, il diametro del nozzle ha un'influenza sull'altezza layer. Difatti, questa deve essere regolata in base al rapporto con il diametro dell'ugello. Questo perché, subito dopo l'estrusione, la parte piatta nella punta del nozzle preme delicatamente sul filamento fuso allo scopo di fondere meglio gli strati. Di conseguenza, l'altezza layer non può essere superiore al diametro del nozzle.

Il valore consigliato per l'altezza layer nella stampa 3D generalmente si aggira tra il 15% e il 75% del diametro del nozzle:

- Al di sotto del 15% il tip potrebbe ostruirsi poiché il materiale non viene tirato con forza sufficiente dal motore;
- Intorno al 15% il processo diventa più lento e non ci sono vantaggi significativi in termini di qualità;
- Con valori intorno al 75% la qualità superficiale inizia a peggiorare;
- Oltre il 75% il foro di estrusione potrebbe ostruirsi a causa dell'alta pressione e dell'alta viscosità del polimero che inizia ad espandersi, portando aria all'interno.

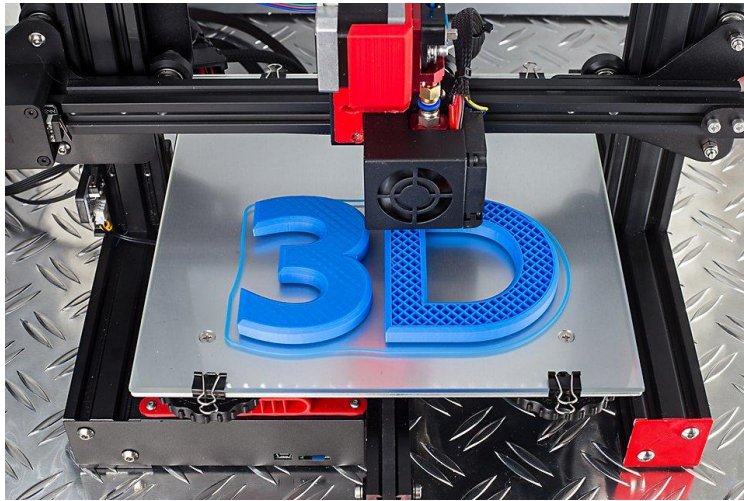
Dunque, l'altezza layer ottimale è generalmente attorno al centro di questo intervallo.

I nozzle di una stampante possono avere diverse dimensioni, determinate dal diametro del nozzle stesso. Il diametro del nozzle più utilizzato è lo 0,4 mm, in quanto permette un buon livello di dettaglio senza compromettere la velocità di stampa. Tuttavia, alcune stampanti sono dotate di quattro diversi diametri di nozzle: 0,25mm, 0,4mm, 0,6mm, 0,8mm, in base alla necessità di stampa.

Un ulteriore parametro di stampa è la percentuale di riempimento (infill). Esso determina la quantità di materiale che l'utente vuole avere all'interno della parte, sapendo che i perimetri di contorno, che formano l'esterno dell'oggetto 3D, verranno comunque stampati all'esterno dell'infill. All'interno di ogni oggetto fabbricato con questa tecnologia, si trova una sorta di reticolato stampato strato per strato. Esistono diversi tipi di infill, differenziati in base alla loro forma: il più scelto è il rectilinear, formato da una serie di quadratini posti uno vicino all'altro, ma c'è anche quello a nido d'ape, come illustrato nella figura 10. Al di là della forma, l'infill è importante perché determina la robustezza di un oggetto ottenuto con stampa in 3D: più l'oggetto sarà pieno, e quindi maggiore sarà la percentuale di infill, più sarà robusto, e viceversa. Ovviamente riempire un oggetto comporta una spesa in termini di materiali e tempo; quindi, l'infill va valutato in base al progetto e al budget stanziato.

Questo riempimento può assumere diverse forme, come ad esempio:

- A Griglia;
- Triangolare;
- Esagonale;
- Concentrica;
- Alternato



*Figura 10. Esempio di infill*

La temperatura è una delle impostazioni più importanti da regolare durante la stampa. Generalmente dipende dal materiale da stampare.

La temperatura di estrusione per la stampa deve essere superiore alla temperatura di fusione per avere un materiale fluido che possa modellarsi nella forma desiderata. Allo stesso tempo, la temperatura di estrusione non dovrebbe essere troppo alta: in tal caso, può degradare i componenti dell'estrusore e il polimero estruso potrebbe diventare troppo fluido per essere gestibile, portando a una scarsa qualità delle parti.

## **1.4 Applicazioni**

Tramite la manifattura additiva si possono realizzare infiniti prodotti e di qualsiasi tipo, in quanto le potenzialità della macchina sono infinite; ovviamente tutto dipende dalla qualità della macchina, dal budget a disposizione e dalle abilità del progettista.

Tra i principali campi di applicazione si ha:

- Il settore alimentare: sono state progettate stampanti 3D in grado di produrre pasta di ogni forma, pizze, zollette di zucchero e prodotti vegetali
- Lo spazio: da anni si studiano tecnologie in grado di stampare pezzi di ricambio metallici nello spazio, ma non si è ancora arrivati a risultati del tutto soddisfacenti.

Nel 2014, però, l'astronauta Samantha Cristoforetti ha trasportato nella Stazione spaziale internazionale una stampante 3D, diventando la prima persona a stampare un oggetto nello spazio

- La medicina: questo è uno dei campi in cui si sono raggiunti risultati davvero promettenti. Combinando la stampa in 3D alle tecniche di imaging come la TAC, è possibile infatti creare protesi e pezzi di organo personalizzati al 100%. Ad oggi, sono stati impiantati crani stampati in 3D, vertebre e ossa varie, e sono state create protesi avanzate. Non solo: la stampa 3D permette di riprodurre esattamente l'organo di un paziente per poter individuare eventuali malformazioni in modo meno invasivo e studiare interventi chirurgici ad hoc.
- L'edilizia: alcuni ricercatori sono riusciti a stampare in 3D la pietra. La stampa 3D consente di realizzare prefabbricati e piccole case pieghevoli, ma anche case in calcestruzzo, grazie ai notevoli passi avanti della ricerca in ambito cementizio.
- L'arte e la conservazione dei beni culturali: grazie alla stampa in 3D è possibile creare riproduzioni tridimensionali di opere d'arte e cimeli, da utilizzare ad esempio in campo museale per creare esperienze interattive senza compromettere l'originale.

## Capitolo 2- Materiali e procedure sperimentali

### 2.1 Materiale utilizzato

- **PLA:** noto come acido polilattico, viene fornito come filamento avvolto attorno ad una bobina e, mediante un processo FDM, viene estruso e successivamente depositato strato dopo strato per formare il provino. Presenta buone proprietà elastiche e meccaniche. Di seguito, nella Tabella 1, viene illustrata una tabella referente alle proprietà del PLA ricavata dal sito del fornitore del materiale per la stampa (Filoprint).

PROPRIETÀ	VALORI
Resistenza all'impatto	6,0 KJ/m <sup>2</sup>
Resistenza a trazione	105Mpa
Modulo di elasticità	3154 Mpa
Deformazione a rottura	175%
Modulo di elasticità flessionale	2364.3 Mpa
Resistenza a flessione	54.4 Mpa

Tabella 1. Tabella valori PLA

- **PLA rinforzato con polvere di fibre di carbonio:** filamento resistente al calore fino a 115 °C. Altamente rigido e incredibilmente resistente, il materiale mantiene efficacemente la sua forma in condizioni di calore elevato. Ideale per il processo di termoformatura per la produzione di modelli e stampi. È forabile, filettabile, carteggiabile per una post-lavorazione meccanica. Resistente al calore e ai raggi UV, ideale anche per applicazioni funzionali per esterni. Nella Tabella 2 viene mostrata una tabella con le proprietà di questo materiale.

PROPRIETÀ	VALORI
Modulo di elasticità	7000 Mpa
Resistenza a trazione	65 Mpa
Resistenza all'impatto	4,5 KJ/m <sup>2</sup>
Densità	1,20 g/cm <sup>3</sup>

Tabella 2. Tabella proprietà PLA rinforzato con fibre di carbonio

- **PLA rinforzato con polvere di grafene:** filamento di PLA caricato con grafene, adatto per offrire ottime prestazioni meccaniche ed estetiche. Rispetto ad un PLA tradizionale, come mostrato nella Tabella, il PLA rinforzato con polvere di grafene è in grado di offrire un'eccellente adesione del primo strato e una resistenza superiore su asse z. Inoltre, apporta un notevole miglioramento della resistenza e della rigidità di pezzi con grandi dimensioni.

PROPRIETÀ	VALORI
Modulo di elasticità	+ 34%
Resistenza a trazione	+23%
Deformazione a rottura	+28%

Tabella 3. Valori delle proprietà meccaniche del PLA rinforzato con polvere di grafene rispetto alle proprietà del PLA basic

- **Laywood Meta5 legno balza:** trattasi di un PLA caricato con fibre a struttura micellare in legno, isolante, idrofugo e così leggero da galleggiare sull'acqua, biologico, biosostenibile, biocompostabile. Ha una superficie ruvida, è termicamente isolante, rendendolo un materiale ideale per tazze, contenitori. È uno dei materiali più ecologici, per una risposta bio-sostenibile al clima. Il materiale può cambiare la sua dimensione se viene messo in acqua [5].
- **Stampante 3D:** i provini sono stati realizzati tramite stampa 3D e la stampante utilizzata è una Makerbot Replicator 2x (Figura 11). Si tratta di una stampante professionale di altissimo livello con un design modernissimo e un sistema di alimentazione a filo costante. Si tratta di una macchina di medio-grande dimensioni, che implica una vasta

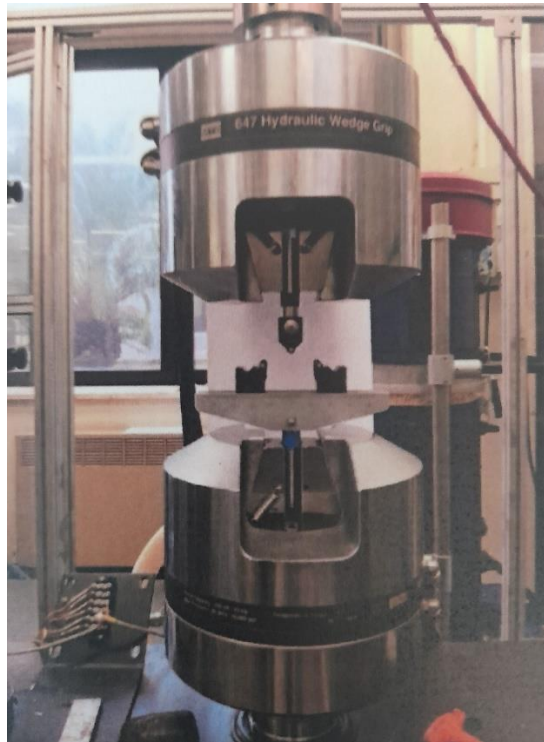
area di stampa. La macchina presenta un piccolo ma pratico menu LCD dal quale si possono scegliere le numerose funzioni di cui dispone:

- Build from SD per stampare un file X3G da una scheda SD;
- Preheat ossia la funzione di preriscaldamento che riduce il tempo di preparazione per la stampa di piastra ed estrusori;
- Utilities che rappresenta una voce del menu per avviare il procedimento di caricamento del filamento e il livellamento della piastra di costruzione;
- Menu informazioni e impostazioni per visualizzare ogni dato riferito alla stampante o per modificare le varie impostazioni;



*Figura 11. Stampante 3D Makerbot replicator 2x*

- **Macchina di prova universale MTS 810:** macchina allestita per le prove di piegatura dei provini. Come è possibile vedere nella Figura 12, la macchina è costituita da una struttura fissa ed una mobile: due cilindri vengono attaccati alla matrice (struttura inferiore mobile) in corrispondenza della parte superiore, mentre in corrispondenza della parte inferiore della struttura superiore è attaccato un solo cilindro posto a metà tra gli altri due: questi tre cilindri rappresentano il tre punti della piegatura, i quali danno il nome alla tipologia della piegatura. L'oggetto che si vuole testare viene appoggiato sui due cilindri nella parte inferiore, mentre il cilindro superiore entra in contatto con l'oggetto esercitando una forza sempre maggiore fino a verificarsi della rottura. La macchina è collegata ad un computer che tramite un software elabora i dati ricavati dalla prova e consente di ottenere le curve approssimative di rottura.



*Figura 12. Macchina di prova universale MTS 810 in dotazione al laboratorio dell'UNIVPM*

- **Stereomicroscopio:** strumento che consente una visione stereoscopica di un oggetto. In generale viene utilizzato per individuare e analizzare le superfici di un campione di studio, la microstruttura, la composizione granulometrica del materiale, le cricche e le zone di rottura. Lo stereomicroscopio utilizzato è un Leica EZ4 D (Figura 13), si tratta di un microscopio che offre uno zoom ad elevata qualità, una brillante illuminazione a LED, della durata di oltre vent'anni, che fornisce una luce sia incidente che obliqua e un contrasto di elevata qualità. La fotocamera digitale integrata 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 delle foto è il Leica LAS EZ; quest'ultimo 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 13. Stereomicroscopio Leica EZ4D*

- **Bilancia elettronica:** strumento utilizzato per misurare 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. Esso è in grado di effettuare misure di esterni, interni e profondità, ma per ciascuna di tali misure esiste una forma specifica e anche nell'ambito della stessa tipologia ciascuno strumento ha un campo di misura limitato (Figura 14). 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.



Figura 14. Micrometro

## 2.2 Procedure sperimentali

### 2.2.1 Stampa 3D

Per la realizzazione dei provini mediante manifattura additiva, in primo luogo è necessario eseguirne un disegno in un software associato alla stampante. Successivamente viene salvato un una scheda SD e inserita nell'apposita entrata della macchina. Il disegno è una rappresentazione tridimensionale del provino del quale vengono definite la lunghezza, la larghezza e lo spessore. Le prime due dimensioni corrispondono a quelle che il provino avrà una volta ottenuto mentre lo spessore varia in ogni provino in quanto la sua dimensione è definita dagli strati depositati; la variazione è dovuta a diversi fattori: l'otturazione dell'ugello, la temperatura dell'estrusore e del piano di stampa, l'avvolgimento del filamento di materiale attorno la bobina, l'abilità del lavoratore, le condizioni ambientali. Di seguito sono elencati i parametri utilizzati per la stampa:

- Temperatura dell'estrusore: 220°C
- Temperatura del piano: 60°C
- Diametro del nozzle: 0,4 mm
- Velocità di stampa: 60 mm/s
- Densità dell'infill: 100% per i provini pieni e superfici esterne dei provini sandwich;
- Altezza layer: 0,25 mm

Una volta ottenuti i provini sono state effettuali misurazioni relative alle loro grandezze utilizzando come strumento, il micrometro.

I materiali in cui sono stati realizzati i provini sono:

- PLA;
- PLA caricato con polvere di fibre di carbonio;
- PLA caricato con polvere di grafene;
- Laywood M5 legno balza

La Figura 15 e la Figura 16 mostrano alcuni provini realizzati.



Figura15. Immagine di alcuni provini Laywood realizzati mediante stampa 3D

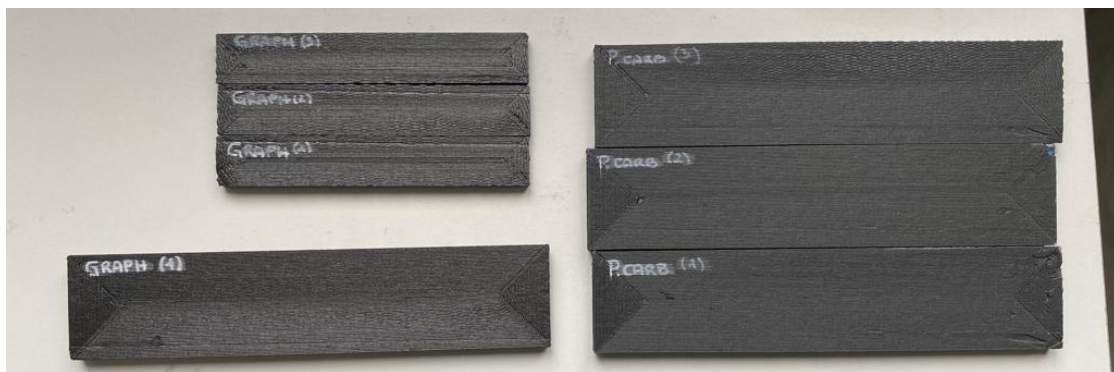


Figura 16. immagine di alcuni provini in PLA rinforzato ottenuti mediante stampa 3D

Per ogni materiale, escluso il PLA, sono stati realizzati tre provini pieni e tre provini sandwich ovvero all'estremità due superfici piane mentre all'interno una struttura ad honeycomb. Inoltre, sono stati realizzati due tipologie di provini ibridi (due materiali diversi) solo a sandwich:

- Ibrido A con superfici esterne in PLA caricato con polvere di grafene e honeycomb in laywood M5 legno balza;
- Ibrido B con superfici esterne in laywood M5 legno balza e honeycomb in PLA caricato con polvere di grafene

Di seguito vengono illustrate le tabelle relative alle dimensioni di tutti provini.

La tabella 4 riporta i valori delle dimensioni dei provini in PLA.

*Tabella 4. Valori delle dimensioni dei provini in PLA*

	<b>Spessore [mm]</b>	<b>Larghezza [mm]</b>	<b>Lunghezza [mm]</b>
<b>Provino pieno 1</b>	4,01	12,7	80
<b>Provino pieno 2</b>	3,86	12,7	80
<b>Provino pieno 3</b>	4	12,7	80

La tabella 5 riporta i valori delle dimensioni dei provini in PLA caricato con polvere di fibre di carbonio

*Tabella 5. Valori delle dimensioni dei provini in PLA caricati con polvere di fibre di carbonio*

	<b>Spessore [mm]</b>	<b>Larghezza [mm]</b>	<b>Lunghezza [mm]</b>
<b>Provino pieno 1</b>	3,85	12,7	80
<b>Provino pieno 2</b>	3,97	12,7	80
<b>Provino pieno 3</b>	3,96	12,7	80
<b>Provino sandwich 1</b>	4,94	26,4	122
<b>Provino sandwich 2</b>	4,95	26,4	122
<b>Provino sandwich 3</b>	4,84	26,4	122

La tabella 6 riporta i valori delle dimensioni dei provini in PLA caricato con polvere di grafene

Tabella 6. Valori delle dimensioni dei provini in PLA caricati con polvere di grafene

	<b>Spessore [mm]</b>	<b>Larghezza [mm]</b>	<b>Lunghezza [mm]</b>
<b>Provino pieno 1</b>	3,95	12,7	80
<b>Provino pieno 2</b>	3,98	12,7	80
<b>Provino pieno 3</b>	3,94	12,7	80
<b>Provino sandwich 1</b>	4,91	26,6	122
<b>Provino sandwich 2</b>	4,86	26,6	122
<b>Provino sandwich 3</b>	4,95	26,6	122

La tabella 7 riporta i valori delle dimensioni dei provini in Laywood M5, legno balza

Tabella 7. Valori delle dimensioni dei provini in Laywood M5 legno balza

	<b>Spessore [mm]</b>	<b>Larghezza [mm]</b>	<b>Lunghezza [mm]</b>
<b>Provino pieno 1</b>	3,48	12,7	80
<b>Provino pieno 2</b>	3,98	12,7	80
<b>Provino pieno 3</b>	3,85	12,7	80
<b>Provino sandwich 1</b>	5,05	26,4	122
<b>Provino sandwich 2</b>	5,04	26,4	122
<b>Provino sandwich 3</b>	5,14	26,4	122

Di seguito vengono riportati i valori dimensionali che descrivono i provini ibridi: la tabella 8 mostra i valori relativi ai provini caratterizzati esternamente da due superfici piane esterne in PLA rinforzato con polvere di grafene e struttura honeycomb interna in Laywood, mentre la tabella 9 presenta i valori dei provini ibridi con le superfici piane esterne in Laywood e struttura honeycomb interna in PLA caricato con polvere di grafene

Tabella 8. Valori dimensionali dei provini ibridi con superfici esterne in PLA caricato con polvere di grafene e struttura interna in Laywood

	<b>Spessore [mm]</b>	<b>Larghezza [mm]</b>	<b>Lunghezza [mm]</b>
<b>Provino sandwich 1</b>	4,95	26,6	122
<b>Provino sandwich 2</b>	5,01	26,6	122
<b>Provino sandwich 3</b>	4,95	26,6	122

Tabella 9. Valori dimensionali dei provini ibridi con superfici esterne in Laywood e struttura interna in PLA caricato con polvere di grafene

	<b>Spessore [mm]</b>	<b>Larghezza [mm]</b>	<b>Lunghezza [mm]</b>
<b>provino sandwich 1</b>	5,04	26,5	122
<b>provino sandwich 2</b>	5,06	26,5	122

## 2.2.2 Prove di piegatura

La piegatura è uno dei processi più comuni e maggiormente utilizzati per ottenere delle variazioni di forma e di geometria soprattutto nei materiali metallici. Questa modifica avviene tramite l'azione di un punzone che preme su una lamiera e provoca la flessione di quest'ultima che origina deformazioni permanenti. Si tratta di un processo realizzabile su lamiere di materiali che presentano un comportamento plastico tale da non determinare evidenti rotture in corrispondenza della piega. Questo processo si basa su una teoria che prevede la presenza di una fibra neutra all'interno del materiale metallico che si deforma senza allungarsi né contrarsi.

Il processo di piegatura a V, schematizzato nella figura 17, in particolare, prevede l'utilizzo di una matrice e di un punzone: la lamiera viene appoggiata sulla matrice che

presenta un'apposita cavità all'interno della quale sarà costretta ad entrare la lamiera nel momento in cui si verifica la corsa del punzone. Durante la piegatura si verificano due fasi: la piegatura in aria che termina nel momento in cui le ali della lamiera sono tangenti alle facce della matrice e la coniatura dove si verifica il contatto tra il punzone la lamiera e la matrice esteso a tutta la superficie esterna e interna della lamiera. Questo processo nonostante la sua semplicità potrebbe riservare diversi problemi come il ritorno elastico, l'angolo finale di piegatura, i limiti di formabilità del materiale, l'influenza delle lavorazioni effettuate in precedenza per deformazione plastica.

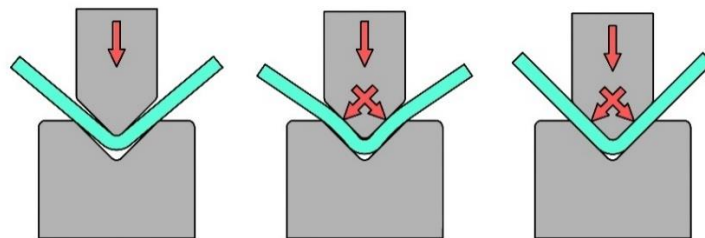


Figura 17. Schematizzazione processo di piegatura a V

Tuttavia, le prove di piegatura sono delle prove sperimentali effettuate con la stessa procedura della piegatura con lo scopo di studiare la duttilità e la resistenza di un materiale e come i parametri di processo influiscano su di essa.

Nel caso specifico di studio del comportamento meccanico di provini in materiale composito, sono state effettuate prove di piegatura “a tre punti”. Per effettuare questa tipologia di prove è necessario l'utilizzo di una macchina di prova universale MTS 810 allestita per verifiche a piegatura. I due cilindri di larghezza 10 mm posizionati sulla matrice hanno uno span, ovvero una distanza, di 68 mm; su di essi sono posizionati i provini in maniera simmetrica rispetto il loro asse centrale. In seguito, mantenendo il punzone fisso ad una determinata altezza viene fatta traslare la matrice verso l'alto e raggiunta una certa altezza si nota che il provino si trova compreso tra tre cilindri; successivamente viene fatta traslare ulteriormente la matrice ottenendo prima la piegatura

e poi la rottura del provino. Una volta che si verifica la rottura parziale o totale del provino la prova viene interrotta e si analizzano i risultati attraverso un apposito software, per poi riportare in valori in un software Excel. I parametri che vengono monitorati possono essere variabili o fissi: i parametri variabili ovvero quelli che cambiano istantaneamente sono lo spostamento, la forza, la deformazione e ovviamente la tensione; mentre quelli che rimangono fissi sono:

- Velocità di prova: 0,0166 mm/s;
- Frequenza: 5 Hz.

In Excel, i parametri variabili hanno valori diversi per ogni istante di acquisizione e messi in successione di tempo in una colonna. Quando si ha un notevole scostamento tra i valori dello spostamento vuol dire che la prova inizia in quel determinato tempo di acquisizione, perciò, si considerano tutte le misure di tensione e deformazione successive a quell'istante di tempo. Di seguito, viene calcolato il modulo di elasticità flessionale tramite l'utilizzo di un grafico: si considerano i valori fino lo 0,2% della curva caratteristica del provino, e da questi si ottiene un'altra curva, successivamente viene calcolata la retta che approssima la curva e tramite le funzioni del software Excel si estrapola la funzione della retta. Il modulo di elasticità flessionale è il coefficiente angolare della retta calcolata. Infine, viene ricavata la curva  $\sigma$ - $\epsilon$  reale e quella approssimata. La curva approssimata si ricava andando a sostituire la curva reale con un una polinomiale che la simula perfettamente. Viene effettuata questa sostituzione in quanto la curva reale non presenta un andamento delineato a causa delle imperfezioni dovute alle acquisizioni. Infine, dopo aver misurato la massa di ogni singolo provino, si calcola la densità e successivamente si ricava la curva  $\sigma_s$ - $\epsilon_s$ , ovvero il grafico relativo alla tensione specifica calcolato per unità di volume. Ciò accade in quanto non solo si vuole confrontare la tensione massima di due provini di materiale diverso, ma si vuole anche confrontare la tensione massima tra due provini costituiti dallo stesso materiale ma con una struttura diversa. I valori di tensione ( $\sigma$ ) e deformazione ( $\epsilon$ ) sono ricavati dalla normativa ASTM D790 per prove standard che verificano le proprietà flessionali dei materiali plastici [7]:

$$\theta_f = \frac{3PL}{2bd^2}$$

$$\varepsilon_f = \frac{6Dd}{L^2}$$

Per concludere, vengono effettuate delle osservazioni allo stereomicroscopio: si posiziona il provino sotto la lente del microscopio e tramite la fotocamera digitale integrata che consente la ripresa rapida di un video in tempo reale su uno schermo vengono acquisite le foto che caratterizzano la frattura del provino. Con in vari ingrandimenti del microscopio si possono visualizzare dettagliatamente tutte le zone del provino, in particolare le fratture, rendendo nitidi i dettagli che lo caratterizzano.

## Capitolo 3 – Risultati

Una volta effettuate le prove di piegatura, si mettono a confronto le curve  $\sigma$ - $\varepsilon$  ricavate, e quindi i valori di massima tensione; questa procedura viene eseguita con lo scopo di comparare tra loro tutti provini pieni, e in seguito, i provini sandwich. Successivamente viene calcolata la tensione specifica calcolata come il rapporto tra la tensione e la densità nominale ed effettiva, affinché si possano raffrontare le curve e i valori di tensione specifica massima tra due provini costituiti dallo stesso materiale ma con struttura diversa.

Si possono confrontare tutte le curve  $\sigma$ - $\varepsilon$  relative ai provini pieni nel Grafico 1.

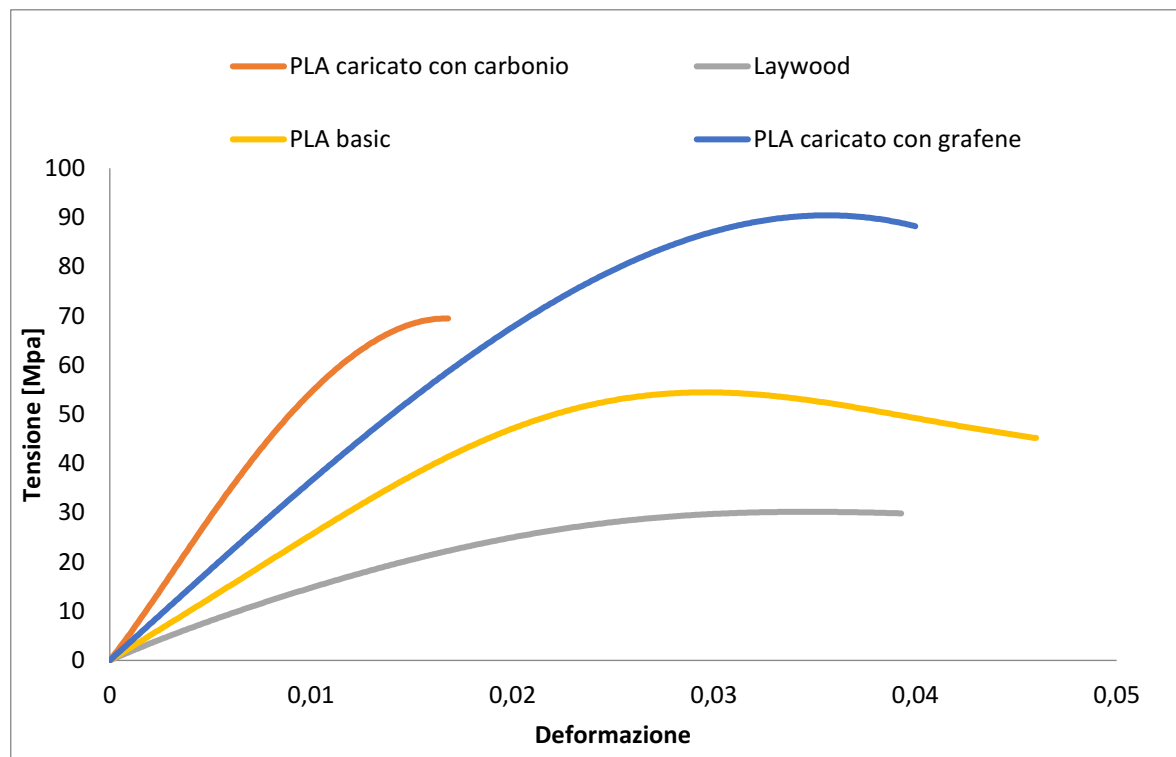


Grafico 1. Confronto delle curve  $\sigma$ - $\varepsilon$  relative ai provini pieni

Dal Grafico 1, si deduce che, per quanto concerne i provini pieni, il PLA caricato con polvere di grafene raggiunge una tensione massima a rottura maggiore rispetto agli altri materiali, ciò implica una maggiore resistenza alle sollecitazioni e ai carichi imposti su di esso; inoltre, il PLA caricato con polvere di grafene riesce ad ottenere un ottimo compromesso tra deformazione e modulo di elasticità flessionale garantendo una buona durezza e tenacità.

Il PLA caricato con polvere di fibre di carbonio presenta un modulo di elasticità flessionale maggiore di tutti gli altri materiali, in quanto è caratterizzato da una curva con una pendenza molto più accentuata rispetto agli altri materiali. Questo garantisce un'elevata durezza al materiale. Tuttavia, presenta una bassa deformazione, infatti la curva si interrompe a valori di deformazione molto più bassi rispetto agli altri materiali; questo consente di affermare che il PLA caricato con polvere di fibre di carbonio è caratterizzato da una alta fragilità.

Il PLA basic presenta, come si attendeva, una resistenza massima a rottura molto inferiore rispetto ai PLA rinforzati. La polvere di fibre di carbonio e la polvere di grafene aggiunte, effettivamente contribuiscono ad un sostanziale aumento della resistenza meccanica e della durezza. Ciò nonostante, il PLA basic presenta un'elevata tenacità; infatti, dalla curva si nota come questo materiale ha come caratteristica principale l'elevata deformazione.

Il laywood si presenta come un materiale meno prestazionale rispetto agli altri tre precedentemente descritti, infatti dal grafico si può osservare che sia la pendenza che l'altezza della curva siano inferiori sia a quelle del PLA basic che rinforzato, non raggiungendo valori di resistenza e deformazioni elevate. D'altra parte, questo materiale viene utilizzato non tanto per la sua efficienza prestazionale, ma per via della sua leggerezza consentendo di abbassare notevolmente il peso garantendo buone prestazioni soprattutto per quanto riguarda i provini ibridi.

La tabella 10. mostra i valori di massima tensione

*Tabella 10. Valori di massima tensione e valori del modulo di elasticità flessionale dei provini pieni*

	<b>Massima tensione [Mpa]</b>	<b>Modulo di elasticità flessionale [Mpa]</b>
<b>PLA con grafene</b>	90,04	2711,8
<b>PLA con carbonio</b>	70,04	6185,3
<b>Pla Basic</b>	55,94	2449,1
<b>Laywood</b>	31,09	1410,5

Nel grafico 2. sono rappresentate le curve che caratterizzano i provini con una struttura a sandwich, in più sono inserite le curve dei provini ibridi.

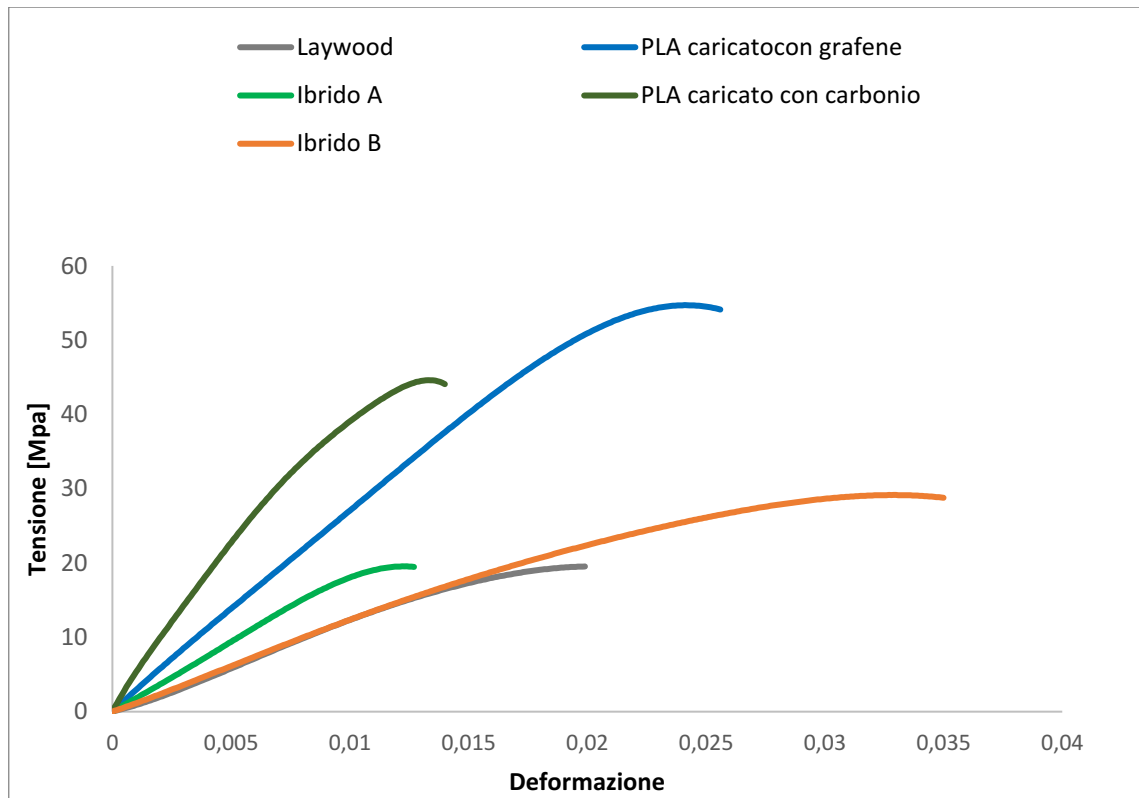


Grafico 2. Confronto delle curve  $\sigma$ - $\epsilon$  dei provini sandwich

Dal Grafico 2. Si ottengono curve con un andamento simile a quelle che caratterizzano i provini pieni. Sicuramente è presente una differenza tra i valori delle tensioni massime raggiunte dai provini (Tabella 11); ciò è dovuto al fatto che i provini sandwich hanno una densità e un peso inferiori a quelli pieni; dunque, la resistenza massima a rottura è più bassa.

Un importante risultato ottenuto, riscontrabile in questo grafico, riguarda i due provini ibridi: si nota che le loro curve compaiono nelle zone intermedie rispetto le curve caratteristiche dei singoli materiali che li costituiscono. Ovviamente la curva del provino ibrido costituito da una superficie esterna in PLA caricato con polvere di grafene avrà un

modulo di elasticità flessionale maggiore in quanto conferisce maggiore durezza alle superfici esterne che sono le parti più sollecitate nella prova; tuttavia, questo materiale risulta più prestazionale se costituisce la struttura honeycomb del provino; nonostante in questo caso la curva abbia una pendenza minore e quindi un minore modulo di elasticità flessionale, questa la struttura interna in PLA rinforzato con polvere di grafene garantisce una resistenza a rottura molto maggiore rispetto alla struttura honeycomb in Laywood.

Tabella 11. Valori di massima tensione e modulo di elasticità flessionale dei provini sandwich

	<b>Massima tensione [Mpa]</b>	<b>Modulo di elasticità flessionale [Mpa]</b>
<b>Laywood</b>	19,85	926,68
<b>PLA con carbonio</b>	44,10	4749,7
<b>PLA con grafene</b>	54,60	2598,6
<b>Ibrido A</b>	19,12	1653,2
<b>Ibrido: B</b>	29,37	1018,7

Di seguito, viene effettuato un confronto tra provini costituiti dallo stesso materiale però stampati nelle due maniere differenti: si vuole valutare quale delle due tecniche di stampa risulta più efficiente per garantire una migliore resistenza meccanica. Ovviamente come spiegato in precedenza, la massima tensione a rottura raggiunta dai provini pieni risulta molto superiore a quella dei provini sandwich; pertanto, per confrontarle è necessario introdurre la tensione specifica poiché le due tipologie di provini hanno massa e densità differenti.

La tensione specifica viene calcolata dividendo la tensione reale e la densità del materiale:

$$\theta_s = \theta \cdot \frac{V}{m}$$

Nel Grafico 3. sono descritte le curve della tensione specifica dei provini in Laywood.

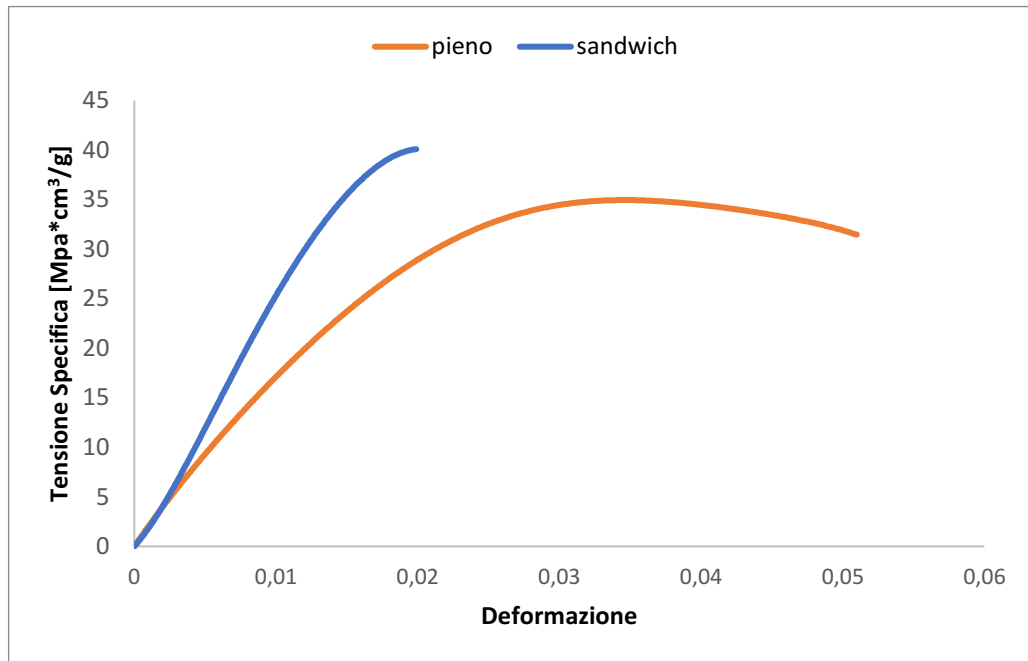


Grafico 3. Curve che descrivono la tensione specifica del Laywood

Come si può intuire dal Grafico 3. il provino sandwich raggiunge una tensione specifica maggiore rispetto al provino pieno nonostante una deformazione molto più limitata. Per di più il provino sandwich ha un maggiore modulo di elasticità flessionale. Di seguito, la Tabella 12. mostra i valori delle tensioni specifiche massime

Tabella 12. Valori delle tensioni specifiche massime dei provini in Laywood

	Tensione specifica [Mpa*g/cm <sup>3</sup> ]
<b>Sandwich</b>	40,73
<b>Pieno</b>	35,99

Il risultato emerso evidenzia che la tensione a rottura dei provini con struttura a sandwich è più alta rispetto a quella della dei provini pieni del 13,3%, ciò ne consegue che la struttura a sandwich comporta un aumento delle prestazioni meccaniche.

Nel grafico 4. sono riportate le curve caratteristiche della tensione specifica dei provini in PLA caricati con polvere di grafene. Anche per questo materiale si ha un comportamento simile a quello descritto in precedenza ovvero il Laywood: il provino sandwich presenta una curva con un picco e una pendenza maggiore rispetto a quella dei provini pieni.

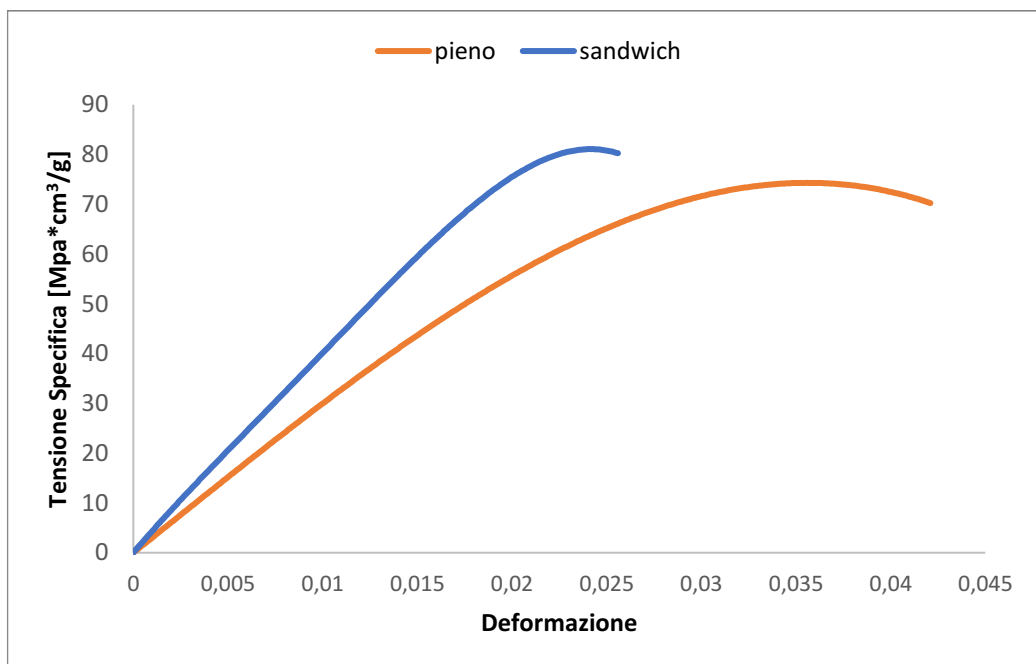


Grafico 4. Curve che descrivono la tensione specifica del PLA caricato con grafene

La tabella 13. illustra i valori del massimo delle due curve relative ai provini in PLA caricati con polvere di grafene.

Tabella 13. Valori delle tensioni specifiche massime dei provini in PLA caricati con polvere di grafene

Tensione specifica [Mpa*g/cm <sup>3</sup> ]	
<b>Sandwich</b>	80,93
<b>Pieno</b>	74,00

Dalla precedente tabella si nota che la tensione specifica massima del provino a sandwich è maggiore di quella del provino pieno. La differenza percentuale tra le due tensioni è del 9,37%, di conseguenza si ha un aumento delle performance nel caso in cui si adotta una tecnica di stampa a sandwich piuttosto che un utilizzo di provini pieni.

Di seguito vengono riportate le curve delle tensioni specifiche dei provini in PLA caricati con polvere di fibre di carbonio (Grafico 5.)

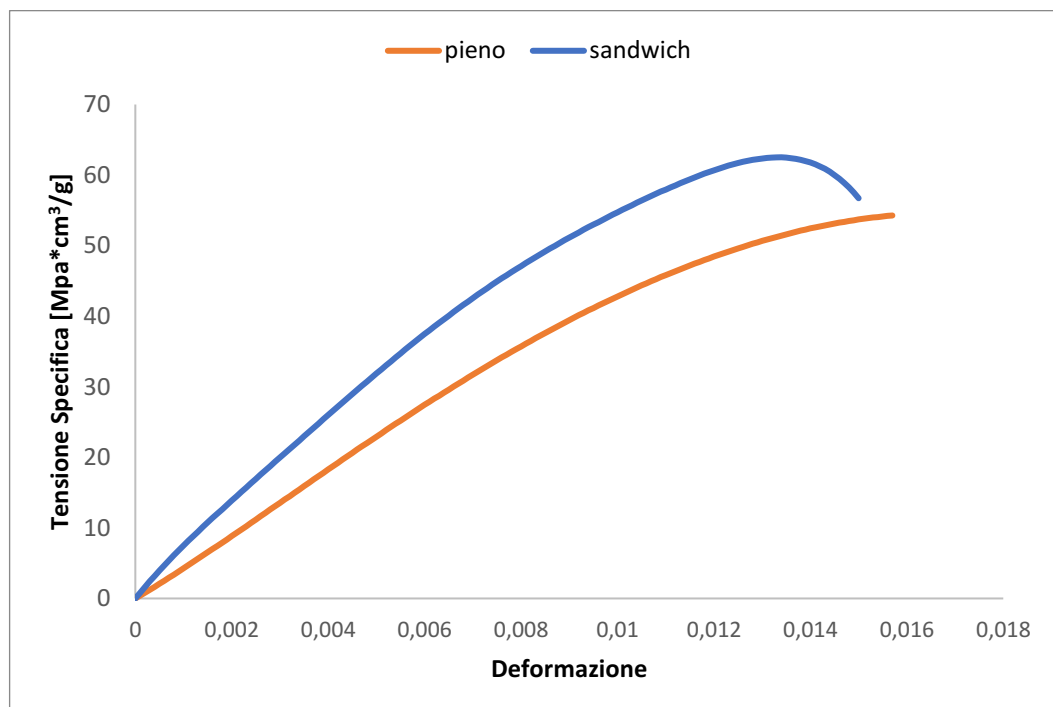


Grafico 5. Curve che descrivono la tensione specifica del PLA caricato con carbonio

Anche nel caso dei provini in PLA caricati con polvere di fibre di carbonio si ripresentano le stesse caratteristiche delle curve delle tensioni specifiche descritte in precedenza: la curva del provino a sandwich presenta una pendenza e un picco maggiori rispetto alla curva relativa ai provini pieni che nel caso di questo materiale non hanno neanche una così elevata deformazione rispetto ai provini sandwich.

Nella Tabella 14. Sono esplicitati i valori di tensione specifica massima dei provini.

*Tabella 14. valori delle tensioni specifiche massime dei provini in PLA caricati con polvere di fibre di carbonio*

<b>Tensione specifica [Mpa*g/cm<sup>3</sup>]</b>	
<b>Sandwich</b>	61,78
<b>Pieno</b>	55,01

I provini a sandwich presentano un aumento percentuale della tensione specifica del 12,3% rispetto ai provini pieni; dunque, anche per quanto concerne questo materiale i provini con struttura a sandwich sono più prestazionali rispetto a quelli pieni.

Infine, viene fatto un raffronto tra le due tipologie di provini ibridi (Grafico 6.): anche per questa tipologia di provini viene calcolata la tensione specifica nella medesima maniera con la quale sono state calcolate le altre tensioni specifiche.

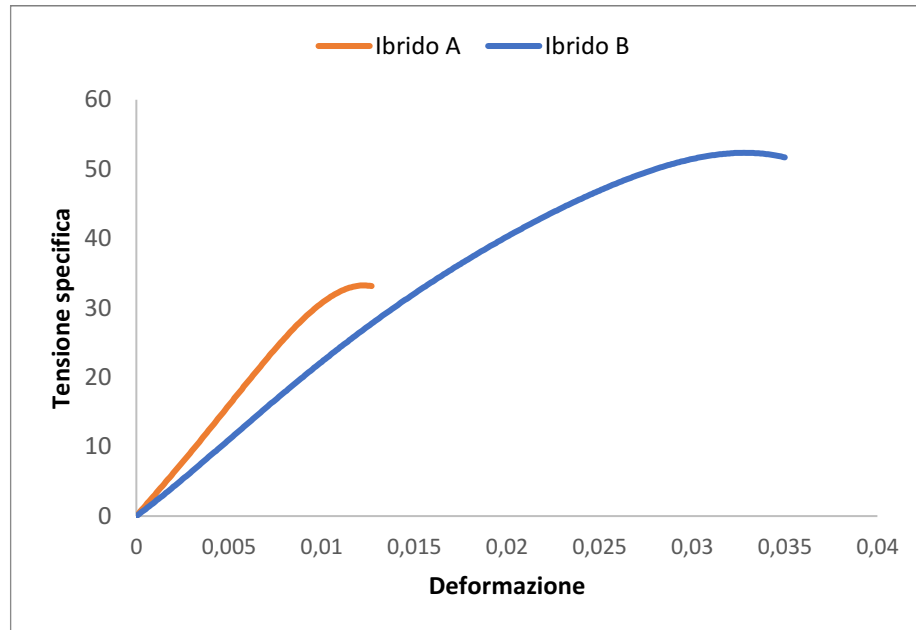


Grafico 6. Curve che descrivono la tensione specifica dei provini ibridi

Le due curve hanno andamenti completamente diversi: per quanto riguarda il provino in cui si ha esternamente il PLA caricato con polvere di grafene ed internamente il Laywood non si sono ottenuti risultati prestazionali per quanto riguarda la tensione specifica a rottura, è possibile siano stati commessi degli errori durante la stampa oppure la disposizione dei materiali non consente di ottenere performance elevate. Questa tipologia di provini ibridi non conferisce un'elevata resistenza a rottura e addirittura, rispetto ad un provino semplicemente in Laywood ha una tensione specifica massima più bassa.

Tuttavia, l'altra tipologia di ibrido fornisce dei risultati buoni, quanto meno molto migliori di quella descritta in precedenza. La curva evidenzia un tratto con una pendenza inferiore rispetto al provino costituito da PLA caricato con polvere di grafene, tuttavia, prevedibile in quanto il Laywood non garantisce durezza e rigidità. Nonostante un basso modulo di elasticità flessionale il provino ibrido con le superfici esterne costituite da Laywood assicura una buona tensione specifica a rottura e una elevata deformazione. Questa tipologia ibrida di provino può sostituire in maniera eccellente un provino costituito solamente dal Laywood in quanto si mantiene l'andamento della curva con un modulo d'elasticità flessionale pressoché identico, la leggerezza del provino caratteristica principale del Laywood, ed inoltre garantisce un aumento del 15% della tensione specifica a rottura.

Di seguito è presente la tabella 15. nel quale sono presenti i valori di tensione specifica massima dei due provini ibridi.

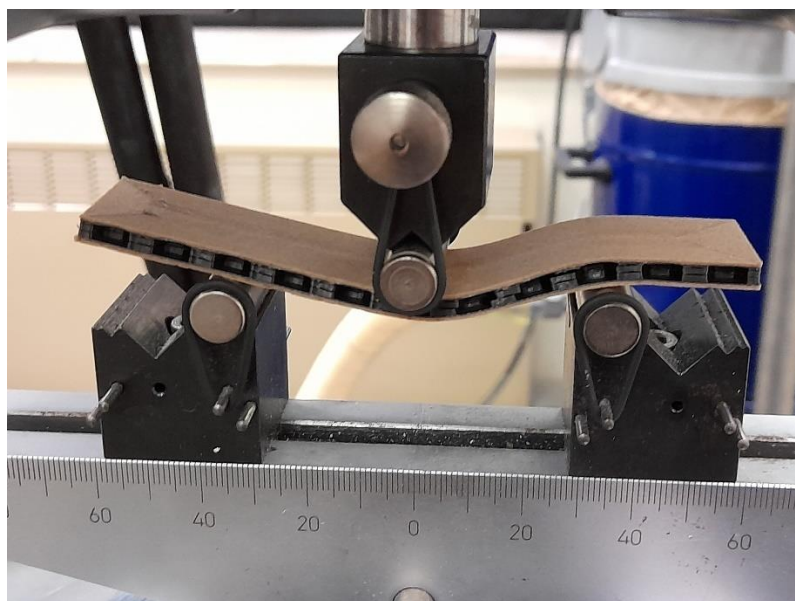
Tabella 15. Valori delle tensioni specifiche massime dei provini ibridi

	<b>Tensione specifica [Mpa*g/cm<sup>3</sup>]</b>
<b>Ibrido A</b>	32,51
<b>Ibrido B</b>	52,74

Si riscontra una notevole differenza tra le due tensioni specifiche massime relative ai provini ibridi: il provino con superfici piane esterne il Laywood e honeycomb in PLA caricato con polvere di grafene risulta molto più performante rispetto al provino costituito dagli stessi materiali ma con occupazioni opposte. L' aumento prestazionale che si riscontra è del 62,21%, percentuale ragguardevolmente elevata che garantisce con assoluta certezza la più performante tipologia di ibrido.

Una delle cause della più bassa performance dei provini ibridi con superfici esterne in PLA caricato con polvere di grafene e struttura interna in Laywood è dovuta al fatto che la rottura non avviene in superficie ma internamente, per delaminazione. Infatti, anche per quanto riguarda l'altra tipologia dei provini ibridi un provino ha riscontrato questo tipo di rottura così che non è stato considerato (Figura 18.).

La delaminazione è un processo di rottura proprio dei laminati in materiale composito. Tale fenomeno è costituito dalla separazione delle lamine e si riscontra nelle prossimità dei bordi liberi dei pezzi, dove sono presenti elevati picchi di tensione. Come conseguenza di questo processo, si ha uno "sfilacciamento" dei pezzi, con conseguente perdita delle proprietà meccaniche del laminato.



*Figura 18. Immagine della de laminazione della struttura interna del provino*

Per concludere vengono effettuate osservazioni allo stereomicroscopio: dopo la prova di piegatura il provino presenta una rottura, generalmente nella zona centrale, che viene evidenziata da questo strumento. Si posiziona il provino sotto la lente e tramite la fotocamera integrata, vengono scattate foto dell'intero provino con ingrandimenti 8x e, aumentando lo zoom fino a 12,5x, si mostrano in maniera più dettagliata gli interni del sandwich.

Successivamente tutte le foto di ogni parte del provino vengono inserite in un software Power Point e viene fatto un collage per ricrearlo. Inoltre, viene evidenziata la zona di rottura con un ingrandimento specifico. Di seguito, nella figura 19, viene mostrato l'ingrandimento del provino ibrido costituito esternamente dal Laywood ed internamente dal PLA caricato con polvere di grafene, ed evidenziata la rottura che avviene nella superficie esterna del pezzo.

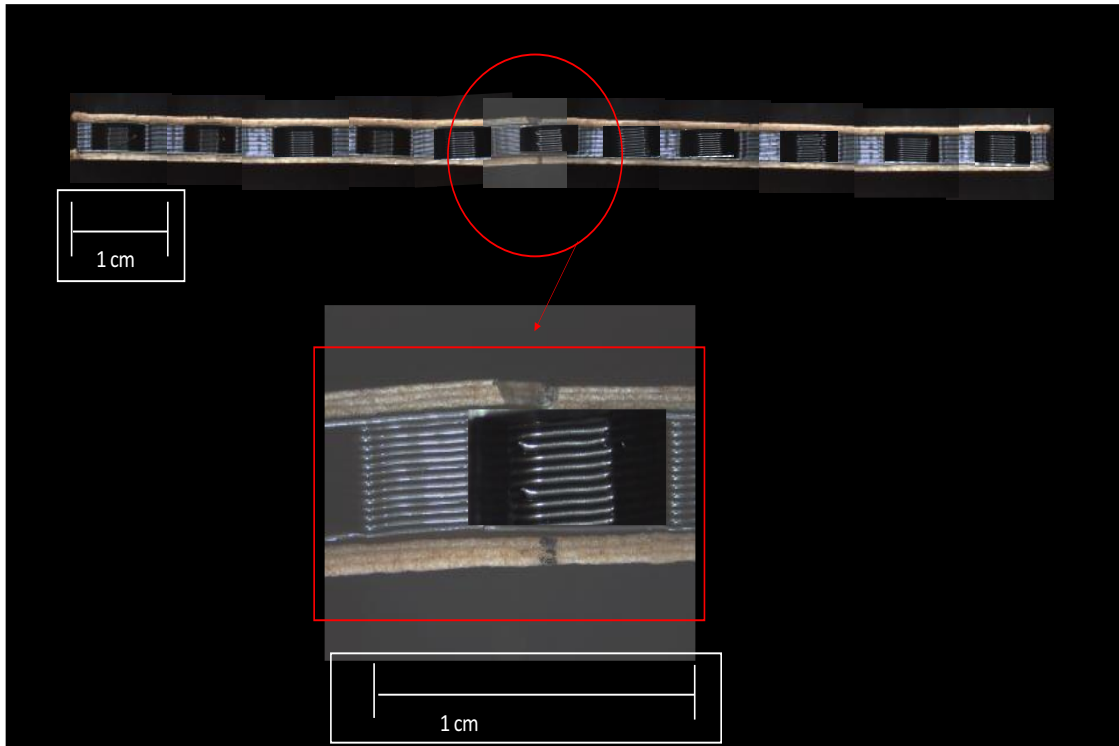


Figura 19. Immagine del provino ibrido con superficie esterna in Laywood e struttura interna in PLA caricato con polvere di grafene

In figura 20 invece, è illustrato l'ingrandimento della rottura dell'altra tipologia di provini ibridi.

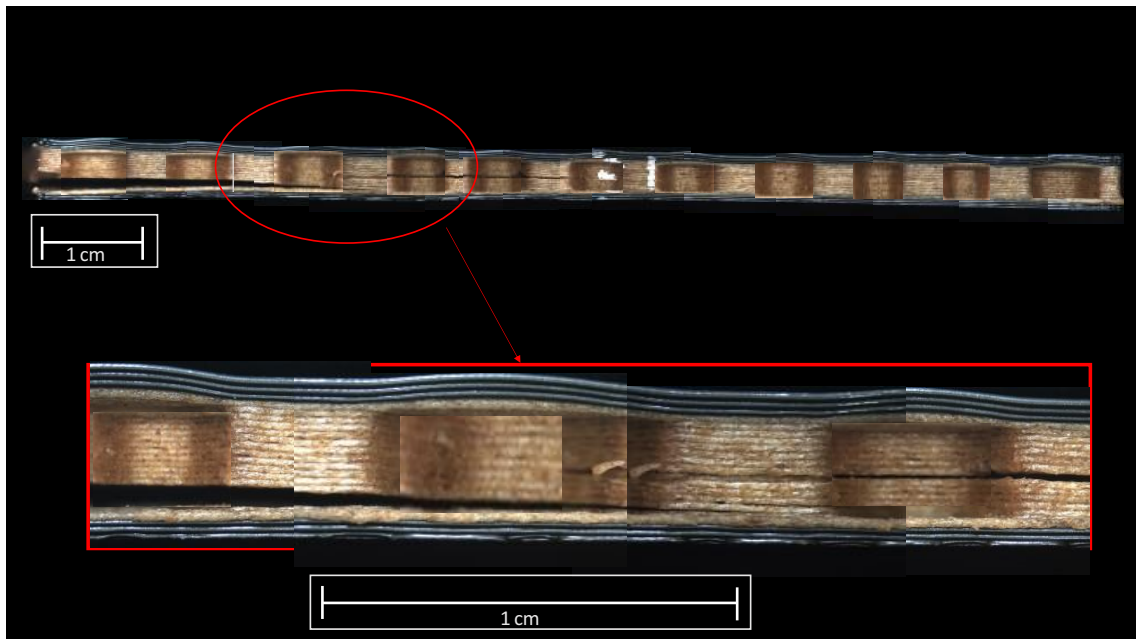


Figura 20. Immagine del provino ibrido con superficie esterna in PLA caricato con polvere di grafene e struttura interna in Laywood

Se si esegue un confronto tra la Figura 19 e la Figura 20 si nota con immediatezza la differenza delle due tipologie di rottura: per quanto riguarda il provino in Figura 19 si osserva che la rottura avviene in superficie, difatti dall'ingrandimento si nota anche la forma arrotondata causata dalla frattura; mentre l'altra tipologia di ibrido presente in Figura 20 non presenta alcuna rottura superficiale ed è evidente il distacco tra la superficie piana esterna e la struttura honeycomb interna causa della delaminazione.

## Capitolo 4 – Conclusioni

Lo scopo di questa tesi è quello di valutare e confrontare provini in materiale composito ottenuti mediante manifattura additiva, successivamente testati a piegatura per valutare la loro tensione flessionale a rottura e il modulo di elasticità flessionale. Il confronto è stato effettuato sia tra provini sandwich aventi stessa struttura, ma diverso materiale che tra provini realizzati con lo stesso materiale ma con struttura diversa. Un ulteriore obiettivo è quello di confrontare provini ibridi, ovvero costituiti da due materiali, con i provini monomateriale per valutare se la combinazione di due materiali potesse presentare un aumento prestazionale attraverso il calcolo della resistenza specifica. Infine, le zone di rotture dei provini sono state analizzate allo stereomicroscopio.

Dagli studi effettuati e dai risultati ottenuti è possibile affermare che:

- I provini costituiti da PLA caricato con polvere di grafene hanno una maggiore resistenza a rottura rispetto agli altri provini testati (PLA basic, PLA caricato con polvere di fibre di carbonio, Laywood).
- I provini a sandwich in PLA caricato con polvere di fibre di carbonio garantiscono una maggiore tensione specifica a rottura rispetto ai provini pieni con lo stesso materiale
- I provini a sandwich in PLA caricato con polvere di grafene garantiscono una maggiore tensione specifica a rottura rispetto ai provini pieni con lo stesso materiale
- I provini a sandwich in Laywood garantiscono una maggiore tensione specifica a rottura rispetto ai provini pieni con lo stesso materiale
- I provini ibridi più efficienti sono quelli costituiti da superfici esterni piane in Laywood e struttura interna in PLA caricato con polvere di grafene sia per la loro buona tensione specifica a rottura che per la compatibilità del materiale.

Affinché si abbiano riscontri definitivi più importanti, è necessario continuare ad effettuare studi in cui si tiene conto di altri parametri di stampa ma anche di altri materiali su cui concentrarsi. Ad esempio, come descritto nell'elaborato durante le prove di piegatura, per quanto concerne i provini ibridi, si è presentato il fenomeno della delaminazione che compromette la prova. Questo fenomeno può essere approfondito ed

evitato andando ad utilizzare materiali diversi come, ad esempio, PLA caricato con fibre di canapa al posto del Laywood, materiale più resistente. Inoltre, i provini si potrebbero testare a trazione per analizzare e confrontare i risultati con quelli ottenuti dalla prova a flessione.

Il settore dell'automotive e dell'aerospazio, è alla continua ricerca di nuove tecnologie che consentono di aumentare le performance diminuendo il peso dei materiali rendendo il prodotto allo stesso tempo leggero e performante, di conseguenza, è fondamentale continuare a progettare e sviluppare provini affinché non si ottenga la migliore combinazione tra materiali e le varie tipologie di strutture

## **Bibliografia e sitografia**

[1] <https://www.hubs.com/knowledge-base/what-is-fdm-3d-printing/>

[2] Lorenzo Di Lorenzo, la stampa 3d al servizio dell'industria 4.0: dinamiche innovative e impatto sui processi produttivi, 2022

[3] <https://industry.masterphil.it/>

[4] Dr Daniel Engstrøm et al. Loughborough Universities Additive Manufacturing Research Group (AMRG): The 7 Categories of Additive Manufacturing

[5] <https://www.filoprint.it/>

[6] <https://www.leica-microsystems.com/>

[7] <https://www.astm.org>