



UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE

FACOLTA' DI INGEGNERIA

Corso di laurea triennale in Ingegneria Meccanica

**STUDIO DELLE PROPRIETA' MECCANICHE A COMPRESSIONE
DI COMPONENTI CILINDRICI IN MATERIALE COMPOSITO
OTTENUTI MEDIANTE PROCESSO ADDITIVO**

**STUDY OF COMPRESSIVE MECHANICAL PERPERTIES OF
CILINDRIC COMPOSITES COMPONENTS OBTAINED THROUGH
ADDITIVE MANUFACTURING PROCESS**

Relatore:

Prof.ssa Michela Simoncini

Correlatore:

Dott. Tommaso Mancia

Tesi di laurea di:

Matteo De Maggi

ANNO ACCADEMICO 2022/2023

INDICE

CAPITOLO 1: INTRODUZIONE	4
CAPITOLO 2: STAMPA 3D	6
2.1 Storia della stampa 3D.....	8
2.2 Tecnologie di stampa 3D.....	12
2.2.1 Stampa a getto di legante (Binder Jetting)	13
2.2.2 Stampa a getto di materiale (Material Jetting)	14
2.2.3 Stampa a energia diretta (Direct Energy Deposition - DED)	15
2.2.4 Stampa a fusione di polveri (Powder Bed Fusion)	16
2.2.5 Stampa a laminazione (Sheet Lamination)	19
2.2.6 Fotopolimerizzazione in vasca (Vat Photopolymerization)	20
2.2.7 Stampa a estrusione (Material Extrusion)	22
2.2.8 Tecnica di stampa FFF	23
2.3 Materiali.....	29
2.3.1 Materiali compositi	30
2.3.2 Materiali metallici	31
2.3.3 Materiali plastici	33
2.3.4 PLA	34
2.4 Campi di applicazione della stampa 3D	37
CAPITLO 3: MATERIALI E PROCEDURE SPERIMENTALI	39
3.1 PETG con fibre di carbonio	40
3.2 Tipologie di infill	42

3.3 Roboze One + 400.....	44
3.3.1 Procedura di stampa.....	45
3.4 Micrometro.....	47
3.5 Prove di compressione.....	48
3.5.1 MTS 810.....	51
CAPITOLO 4: RISULTATI	53
CAPITOLO 5: CONCLUSIONI.....	67
BIBLIOGRAFIA.....	69

1) INTRODUZIONE

Ad oggi, l'ultimo passaggio dell'industrializzazione si fonda su un mix tecnologico di automazione, digitalizzazione, connessione e programmazione, la cui conseguenza è un cambio totale dei paradigmi tecnologici e culturali. Questo concetto sta alla base dell'"Industria 4.0", definita così per la prima volta nel 2011 alla fiera di Hannover, in Germania. Nell'aprile 2013, l'Industrie 4.0 Working Group, composto dai rappresentanti di due importantissime aziende tedesche (Bosch GmbH e Acatech), ha presentato il primo report a proposito di questo processo, con il supporto del governo tedesco stesso. Così, il gruppo ha dato vita a un progetto che, negli ultimi sei anni, ha visto una crescente implementazione a livello europeo e a livello degli Stati membri dell'UE, e che non intende arrestarsi nel prossimo futuro. Sulla base di quanto emerso, è chiaro che l'Industria 4.0 ha sconvolto totalmente il modo di lavorare e di organizzarsi delle aziende. Si prevede in futuro, una serie di importanti cambiamenti nei vari settori dell'industria, come nella produzione, nei risultati, e nella gestione e nella formazione delle risorse umane. Nello specifico, le conseguenze di questa direzione presa dall'industria a livello globale comportano un'aumentata velocità con cui i prodotti vengono finalizzati, una qualità maggiore degli stessi, meno margini di errore, e una diversa modalità di business. Per comprendere come si sono ampliati gli orizzonti a cui attingere, basti pensare a quanto sia venuta meno la necessità di una vicinanza territoriale tra industria e fornitore. Inoltre, l'ampliamento dei confini non ha riguardato solo le grandi aziende, ma soprattutto le piccole e medie imprese (PMI) che hanno avuto la possibilità di affacciarsi al panorama europeo e mondiale con maggiore facilità rispetto, per esempio, a dieci anni fa. Tale rivoluzione ha avuto dei risvolti concreti su due settori, in particolare: la trasmissione di dati e informazioni (cloud, big data, analytics) e la produzione industriale (robot, interconnessione, realtà aumentata, stampante 3D).

Queste tecnologie, sono fondamentali, poiché aprono nuovi spazi di innovazione per la progettazione e produzione più sostenibile, così come per la realizzazione di processi che consentano di tracciare il consumo delle risorse e l'utilizzo dei prodotti. [1] Nel caso specifico della stampante 3D, essa gioca un ruolo di traino in questa nuova rivoluzione industriale, acquisendo una presenza sempre più importante all'interno delle fabbriche e delle aziende, seppur con delle criticità ancora da risolvere. E non si ferma solo all'interno del settore industriale, ma è una tecnologia che permette a chiunque di realizzare ciò che più desidera e utilizzarla in qualsiasi settore, come quello medico, aerospaziale, auto motive, design e molti altri ancora. [2]

Questo studio, si focalizza sui seguenti obiettivi:

- realizzare, tramite stampa 3D, più provini, con quattro differenti tipi di infill (concentrico al 100%, griglia al 50%, griglia al 100%, honeycomb al 50%) e diverso materiale;
- eseguire prove di compressione sui provini
- studiare le prestazioni ottenute

I provini, costituiti da materiale diverso, quali CarbonFil™ e PLA, dopo essere stati stampati correttamente, verranno sottoposti a prove di compressione, dalle quali si otterranno le loro prestazioni meccaniche. L'obiettivo finale è quello di ottenere prestazioni molto buone al termine delle prove.

2) STAMPA 3D

La stampa 3D è chiamata anche manifattura additiva o additive manufacturing (AM) invece dei tradizionali metodi sottrattivi, come ad esempio la fresatura. Questa tecnologia esiste da circa quattro decenni, essendo stata inventata all'inizio degli anni Ottanta. Se all'inizio la stampa 3D era una tecnica lenta e costosa, gli ampi sviluppi tecnologici hanno reso le odierne tecnologie AM più accessibili e veloci che mai. Il funzionamento della stampa 3D si basa su un modello 3D digitale che viene tagliato in centinaia di strati sottili da un software dedicato (nel nostro caso Simplify3D) per essere esportato in formato G-code. Questo formato è un linguaggio che la stampante 3D legge per sapere esattamente quando e dove depositare il materiale. Ogni strato corrisponde alla forma 2D di una sezione (o fetta) dell'oggetto, e questi strati vengono stampati uno alla volta, fino ad ottenere l'oggetto 3D desiderato [3]. Sebbene i materiali più comunemente utilizzati per la stampa 3D siano le leghe di plastica e metallo, è possibile lavorare praticamente qualsiasi tipo di materiale, dal calcestruzzo al tessuto vivente. [4] La stampa 3D offre un numero considerevole di vantaggi, il più significativo dei quali è la capacità di produrre progetti altamente complessi che sarebbero impossibili da realizzare altrimenti; un altro vantaggio è la velocità. Anche se la stampa 3D di un oggetto può richiedere ore o addirittura giorni interi, è comunque molto più veloce dei metodi di produzione tradizionali, come lo stampaggio a iniezione. Un aspetto molto importante in questo contesto è la prototipazione, uno degli utilizzi professionali più diffusi della stampa 3D, che può essere effettuata con tempi di realizzazione minimi e le iterazioni del progetto possono essere implementate e stampate sul posto. Questa tecnologia offre anche molte possibilità di materiali di stampa 3D. Chiamata anche prototipazione rapida, si progetta rapidamente un modello e si stampa in 3D poco dopo. Recentemente il mondo ha assistito a una delle dimostrazioni più impressionanti durante la pandemia globale di coronavirus.

Respiratori, tamponi e schermi facciali sono stati progettati in pochi giorni e prodotti in serie a migliaia in poche settimane. I modelli 3D si sono evoluti continuamente in base al feedback graduale di medici e ricercatori. Questa risposta immediata è stata molto efficace nella lotta contro il virus e illustra perfettamente il potenziale, l'adattabilità e la velocità (time-to-market) offerti dalla produzione additiva [3].

2.1 Storia della stampa 3D

Tutto iniziò negli anni '80 quando il Dr. Hideo Kodama sviluppò un sistema di prototipazione rapida basato sulla solidificazione di strati di resina tramite l'esposizione alla luce ultravioletta. La solidificazione dei diversi strati permetteva così di ottenere un solido 3D (Figura 1). Purtroppo, il Dr. Hideo Kodama non ebbe tutti i requisiti per depositare il suo brevetto e fu così che nel 1984 ci pensò Chuck Hall a depositare un brevetto ed inventò la parola stereolitografia, termine abbreviato in SLA. La tecnologia SLA altro non è che il processo ideato dal Dr. Hideo Kodama [5].

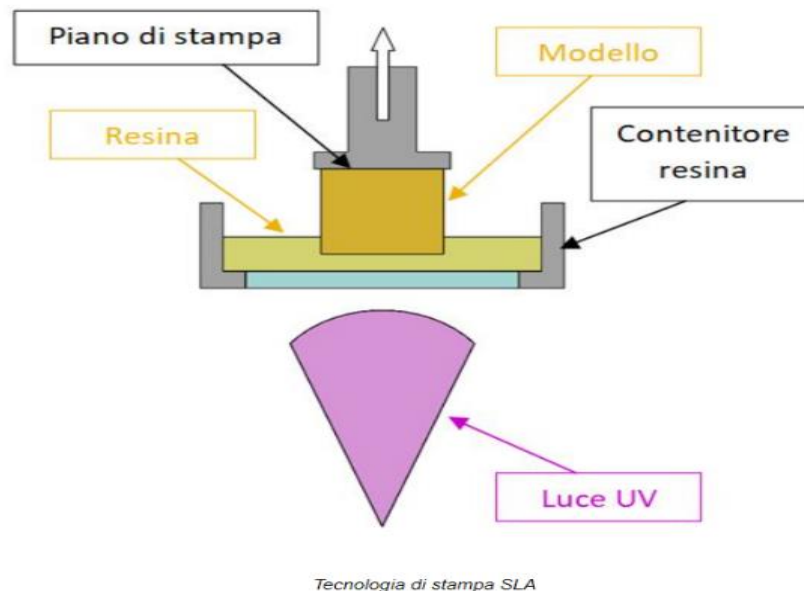


Figura [1] – Tecnologia di stampa SLA

Nel 1986 Carl Deckard, Joe Beaman e Paul Forderhase, ispirati da Hull, svilupparono la Selective Laser Sintering, ovvero la sinterizzazione: un processo molto simile a quello della stereolitografia, che impiega però il nylon al posto delle resine (Figura 2). A differenza della resina, la polvere di nylon è un solido e non ha bisogno di appositi supporti, quindi il processo di stampa in 3D è notevolmente più agevole rispetto a quello con resine [6].

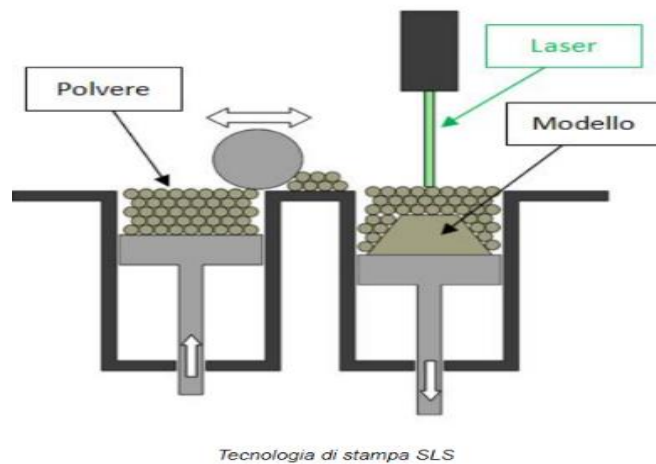


Figura [2] – Tecnologia di stampa SLS

Due anni più tardi, nel 1988, Scott Crump brevettò la stampa 3D con materiale fuso (FDM, in inglese, fused deposition modeling). Mette da parte sia il laser, sia la polvere e utilizza plastica fusa da “spalmare” strato per strato in funzione dell’oggetto. La tecnica FDM, infatti, funziona secondo la logica del principio additivo, che consiste nel posare strati di materiale l’uno sopra l’altro. I filamenti plastici o di altri materiali vanno così a formare gli oggetti layer dopo layer (Figura 3).

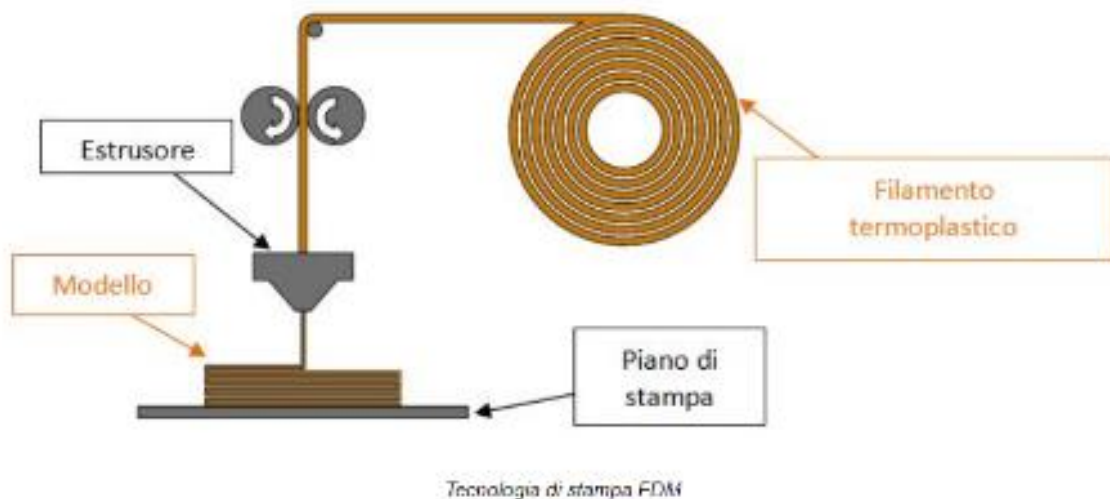


Figura [3] – Tecnologia di stampa FDM

Successivamente, 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 di circa il 98% [7]. Dopo otto anni, si passa alla fusione a fascio di elettroni, una tecnologia complessa che permette di creare oggetti del tutto simili a quelli prodotti con il metodo industriale [6]. Nel 2007 nasce Shapeways, uno spin off dell'Olandese Royal Philips electronics, come conseguenza del dilagare delle stampanti a basso costo e del crescente numero di designer 3d. Consiste in un network di stampanti 3d, a cui tutti i possessori possono affiliarsi, con il quale la società garantisce un servizio di stampa 3d e spedizione in tutto il mondo. Magari in molti ne traggono dei profitti, ma il sentimento principale è quello della condivisione. Moltissimi designer e sviluppatori mettono in rete i loro progetti o i loro software per condividere la conoscenza e favorire l'innovazione. Con il progetto RepRap (abbreviazione di Replicating Rapid Prototyper), "prototipatore rapido a replicazione", è un'iniziativa finalizzata a sviluppare una stampante 3D che produca da sé la maggior parte dei suoi stessi componenti. Tutti i lavori creati nell'ambito di questo progetto sono pubblicati con licenze open source) e grazie alla capillarità e sviluppo della rete si sono aperte completamente le frontiere. Si arriva così al 2008, in cui Bre Pettis, Adam Mayer, e Zach "Hoeken" Smith fondano la MakerBot Industries e danno inizio alla loro attività imprenditoriale. Essi sono partiti dall'inglese RepRap e l'hanno semplificata. Infatti, è vero che era riproducibile, ma i ricercatori inglesi non si erano certo curati di facilitarne il processo. Il risultato a cui giunsero fu la prima stampante acquistabile in scatola di montaggio e fu un successo incredibile. Nel 2010 si inizia a parlare di Contour crafting e di collaborazioni tra NASA e mondo delle stampe 3d. Il contour crafting è la stampa tridimensionale che utilizza il cemento come materiale di stampa. Questo significa che con i mezzi di appropriate dimensioni è possibile stampare anche delle case. La NASA ha di

conseguenza fatto capolino nella vicenda, affermando che in futuro si costruiranno case su Marte con questo sistema, perché è estremamente affidabile; infatti, se ci pensiamo, le macchine difficilmente sbagliano e soprattutto sono in grado di lavorare in continuità anche in condizioni estreme (vedi Marte). Per arrivare infine ad inizio 2019, anno in cui è stato inaugurato il ponte stampato in 3d più lungo al mondo (lungo quasi dieci metri); questo, a dimostrazione di quanti passi avanti sono stati fatti rispetto a più di quarant'anni fa [7].

2.2 Tecnologie di stampa 3D

Scegliere la tecnologia di stampa 3D a seconda dei pezzi da realizzare non è un'attività facile. I processi di fabbricazione additiva variano in precisione, resistenze meccaniche raggiungibili, materiali utilizzabili e finitura. La categorizzazione più utilizzata nell'ambito della stampa 3D deriva da un regolamento standard istituito nel 2015. Il documento a cui fa riferimento l'industria è lo Standard *ISO/ASTM 52900*. Grazie a questo standard è stata fatta una classificazione delle tecnologie di stampa 3D in "processi". Inoltre, è stata standardizzata anche la terminologia legata all'ambito della stampa 3D, così da semplificare la descrizione dei vari metodi di produzione. Questa normativa definisce sette categorie per la tecnologia additiva [8]

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

La stampa Binder Jet è una tecnica di produzione additiva che distribuisce un agente legante liquido sulla polvere per formare un motivo bidimensionale su uno strato. Gli strati vengono impilati per costruire un articolo fisico (Figura 4). Questa tecnica può essere adattata a quasi tutte le polveri con ritmi di produzione elevati e il processo BJ utilizza un'ampia gamma di tecnologie, tra cui tecniche di stampa, deposizione di polvere, interazione dinamica legante/polvere e metodi di post-elaborazione. Un'ampia varietà di materiali, inclusi polimeri, metalli e ceramiche, è stata lavorata con successo con Binder Jet. Tuttavia, lo sviluppo di metodi di stampa e post-elaborazione che massimizzino le prestazioni delle parti è una sfida ancora aperta. [9]

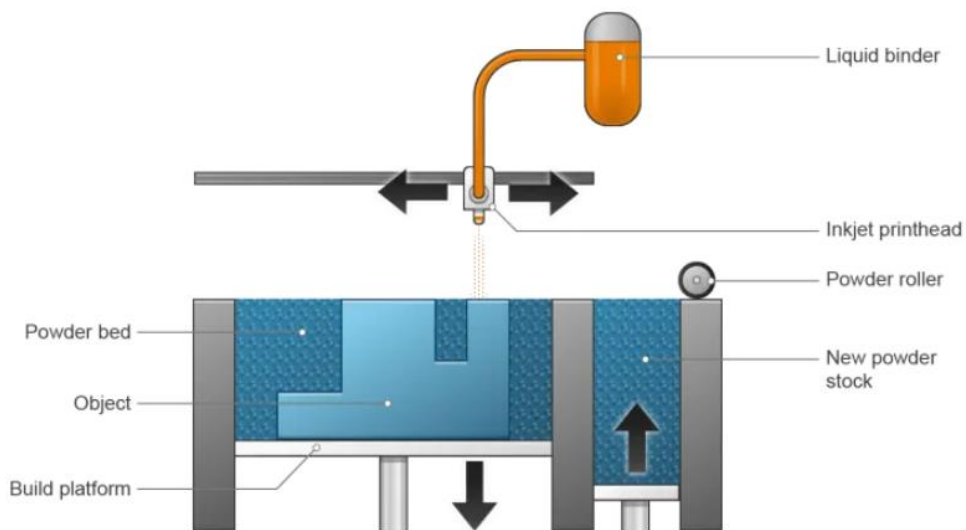


Figura [4] – Binder Jetting

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

La tecnologia Material Jetting (MJ) è un metodo di produzione additiva che polimerizza selettivamente il fotopolimero liquido per costruire parti funzionali (Figura 5). L'uso della tecnologia MJ è diventato sempre più popolare ed è stato adattato da diversi settori, dalla biomedicina all'odontoiatria, all'industria manifatturiera e all'aviazione, grazie ai suoi vantaggi nella stampa di parti con elevata precisione dimensionale e bassa rugosità superficiale. [10]

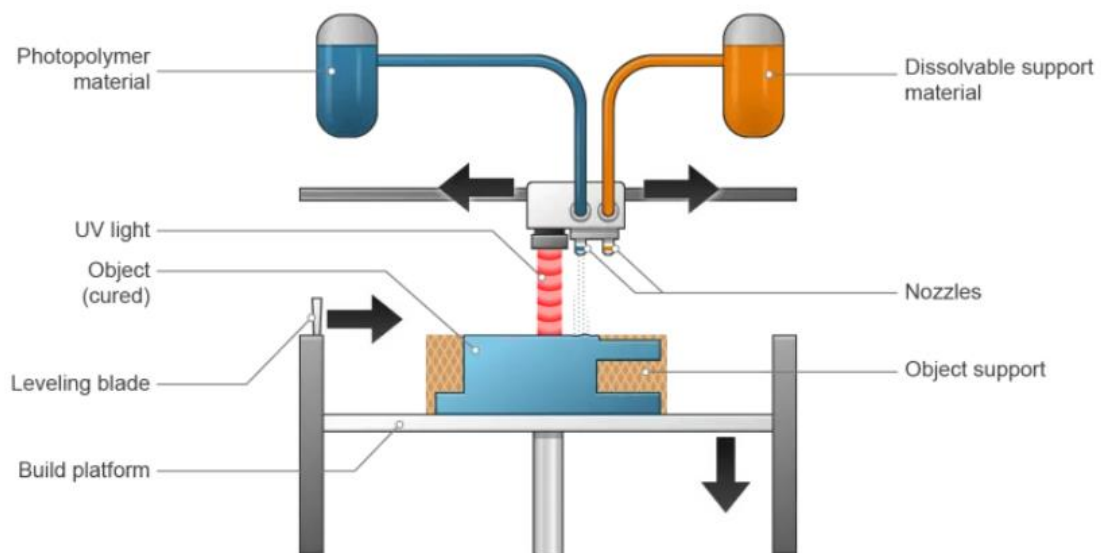


Figura [5] - Material Jetting

2.2.3 Stampa a energia diretta (Direct Energy Deposition - DED)

Il processo Directed Energy Deposition, anche noto come Laser Metal Deposition o Laser Cladding, utilizza energia termica focalizzata, generata da una sorgente laser in fibra, per fondere polvere metallica irrorata nel punto in cui deve essere depositato il materiale. In questo modo il laser fonde la polvere, che viene depositata sul componente solo dove serve (Figura 6). [11]

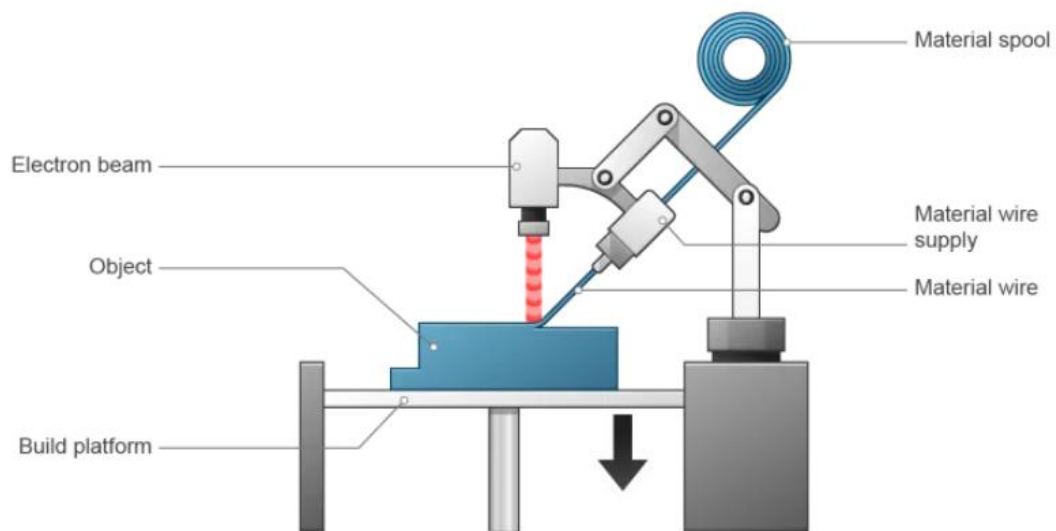


Figura [6] – Direct Energy Deposition

2.2.4 Stampa a fusione di polveri (Powder Bed Fusion)

Il PBF è un processo industriale di stampa 3D che utilizza l'energia termica del laser per fondere la sezione di un oggetto su uno strato di polvere metallica (Figura 7). È noto per la sua capacità di produrre prototipi e parti funzionali efficienti e complesse per applicazioni finali. [12]

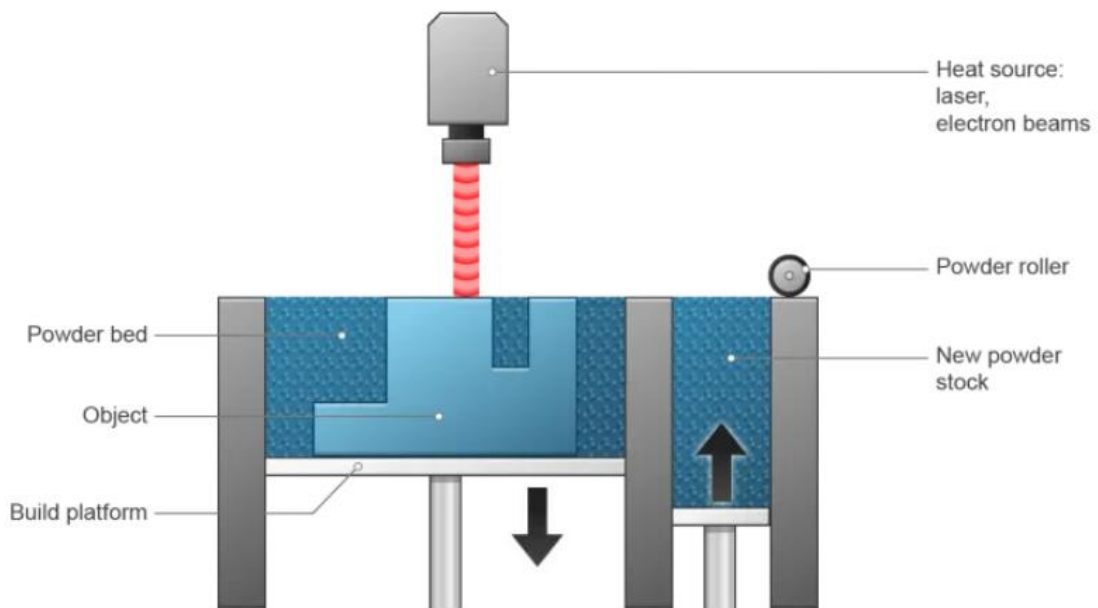


Figura [7] – Powder Bed Fusion

Esistono diverse tipologie di questa tecnica:

- Selective Laser Sintering (SLS): è una tecnica di produzione additiva in cui le particelle di polvere polimerica o composita (SLS) oppure le particelle di polvere metallica (SLM) sono sinterizzate grazie all'impiego di un raggio laser. A differenza della stampa FDM che crea oggetti utilizzando filamenti, nella stampa SLS si utilizza quindi la polvere, ad esempio di materiale termoplastico, come il nylon PA12. La polvere di nylon viene stesa all'interno di

una cabina di stampa; la macchina, con un apposito raggio laser, fonde i punti che sono indicati nel file e crea l'oggetto sull'asse z. I pregi di questa tipologia di stampa sono la qualità dimensionale ottima, la maggiore resistenza, il tempo rapido di produzione e l'invisibilità degli strati di stampa sull'oggetto. [13]

- Direct Metal Laser Sintering (DMLS): è una tecnica di stampa 3D con fusione a letto di polvere (PBF) ed è simile alla tecnologia SLS. Nel DMLS, tuttavia, vengono utilizzate polveri metalliche al posto di polveri in plastica per creare parti metalliche che possono essere utilizzate sia per prototipi funzionali che per parti di produzione. La tecnologia di sinterizzazione laser diretta dei metalli è simile alla tecnologia di fusione laser selettiva (SLM), ma la differenza tra i due processi è la temperatura utilizzata per la fusione delle polveri metalliche.

- Selective Laser Melting (SLM): si basa sullo stesso principio della SLS realizzando pezzi in metallo puro, grazie alla fusione effettiva della polvere metallica.

- Electron Beam Melting (EBM): utilizza un fascio di elettroni per fondere le particelle di metallo e creare, strato dopo strato, il pezzo desiderato. Inoltre, questo processo permette la creazione di strutture complesse e altamente resistenti.

- Multi Jet Fusion (MJF): la stampa è effettuata su un letto di polvere di nylon, ma a differenza della SLS, in cui i diversi punti sono fusi grazie a un raggio laser, nella MJF si sfrutta la tecnologia di stampa a getto di inchiostro. La stampante colora di nero i vari punti che servono per creare l'oggetto, poi le lampade alogene portano la temperatura fino a 180 °C e fondono i punti colorati. Le parti non colorate non vengono stampate e saranno poi scartate. Il processo di stampa è supervisionato da telecamere sensibili al calore che mantengono la

temperatura della cabina di stampa sempre omogenea.

I pregi di questo tipo di stampa sono l'ottima precisione e in aggiunta una tempistica di stampa di circa dieci volte superiore alla sinterizzazione laser. [13]

2.2.5 Stampa a laminazione (Sheet Lamination)

È un processo che prevede l'incollaggio di strati di materiali per creare un oggetto 3D (Figura 8).



Figura [8] – Sheet Lamination

I processi di laminazione più importanti sono:

- Laminated Object Manufacturing (LOM): utilizzano come materiale dei laminati, che costituiscono lo strato che viene processato con sistemi di taglio tangenziale o laser per separare la sezione che interessa il modello dal materiale di scarto. Quest'ultimo a sua volta costituisce un valido materiale di supporto, che verrà rimosso a stampa finita.
- Ultrasonic Consolidation (UC): utilizza vibrazioni e pressioni ultrasoniche per fondere sottili fogli di metallo a bassa temperatura. A causa delle basse temperature usate, le lamiere non vengono fuse insieme, ma semplicemente legate insieme a causa della rottura degli ossidi sulla superficie dei metalli.

2.2.6 Fotopolimerizzazione in vasca (Vat Photopolymerization)

La tecnologia di stampa 3D a fotopolimerizzazione comprende diversi processi che si basano sulla stessa strategia di base: un fotopolimero liquido contenuto in una vasca (o serbatoio) viene indurito selettivamente da una fonte di calore. Strato dopo strato, viene costruito un oggetto fisico 3D fino al suo completamento (Figura 9).

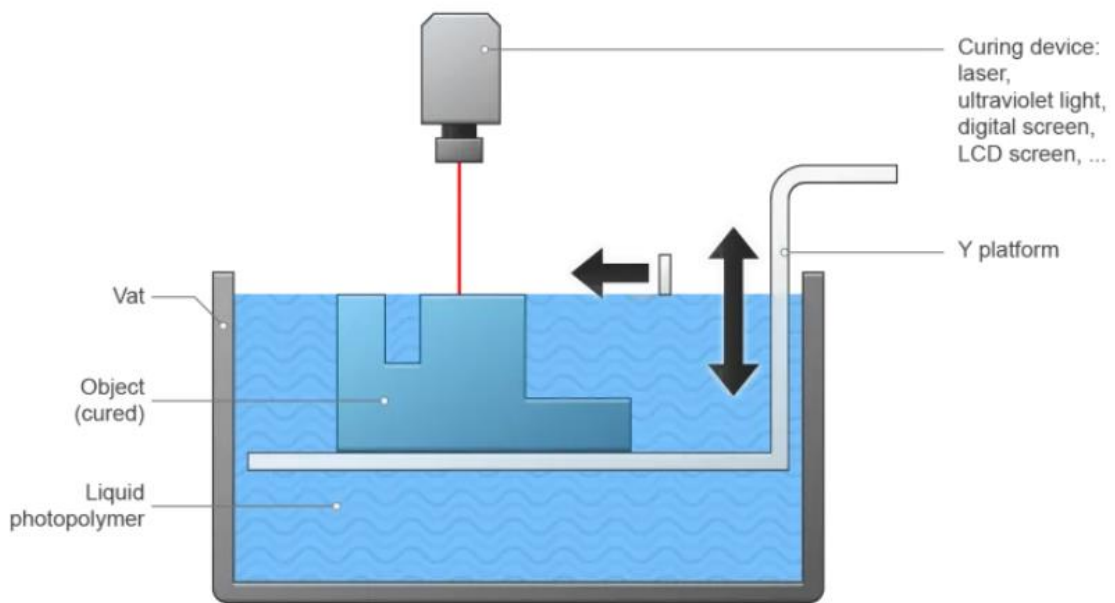


Figura [9] – Vat Photopolymerization

Le tecnologie più comuni sono:

- Stereolithography (SLA): anche conosciuta come fotopolimerizzazione in vasca. Questi apparecchi sono costruiti in base allo stesso principio usando una fonte di luce (un fascio laser o un proiettore) per polimerizzare la resina liquida e trasformarla in plastica dura. La principale differenza fisica consiste nella disposizione dei componenti principali quali la fonte di luce, la piattaforma di stampa e il serbatoio resina.

- Digital Light Processing (DLP): utilizzata per produrre rapidamente parti in fotopolimero. È molto simile alla SLA con una differenza significativa: mentre le macchine SLA utilizzano un laser che traccia uno strato, le macchine DLP utilizzano una sorgente di luce proiettata per polimerizzare l'intero strato in una sola volta. La parte viene formata strato per strato. La stampa DLP può essere utilizzata per stampare oggetti di design in resina estremamente intricati, come giocattoli, stampi per gioielli, stampi dentali, statuette e altri oggetti dai dettagli raffinati.

2.2.7 Stampa a estrusione (Material Extrusion)

Il materiale viene selezionato e distribuito passando attraverso un ugello; questo processo può avvenire sia a caldo che a freddo (Figura 10) e i materiali usati possono essere filamenti (polimeri, polimeri composti), paste fluido-dense (argilla, ceramiche, polimeri in pasta, idrogel, alimenti) o liquidi (bioprinting).

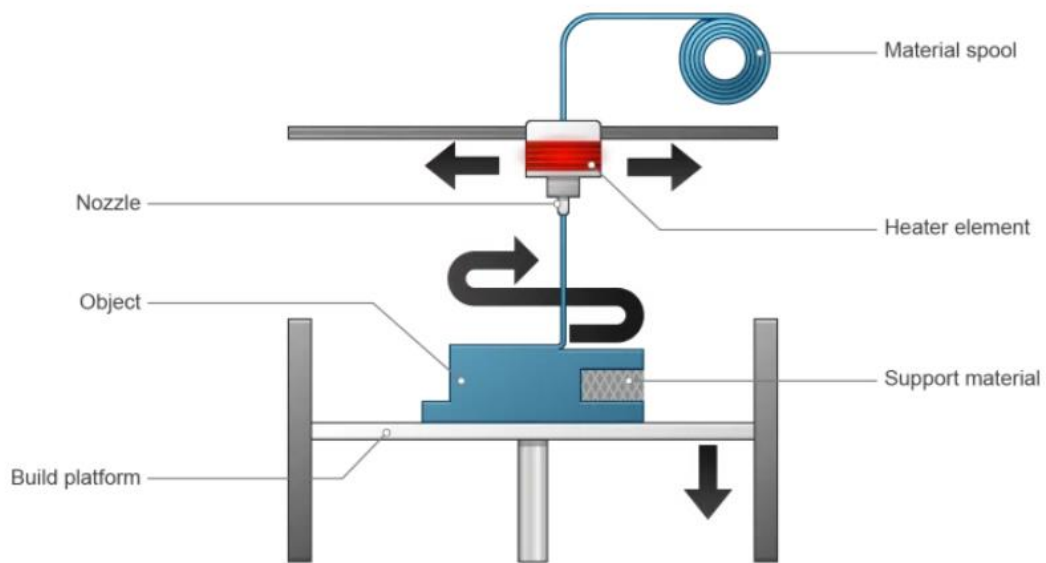


Figura [10] – Material Extrusion

2.2.8 **Tecnica di stampa FFF**

La stampa 3D FFF, conosciuta anche con il nome di stampa FDM, è un processo di stampa 3D basato sull' "estrusione di materiale". Un filamento termoplastico proveniente da una bobina passa attraverso un estrusore che riscalda, fonde ed estrude la plastica attraverso un ugello sottile. L'estrusore e l'ugello formano la testina di stampa, che si muove lungo il piano di lavoro per disegnare ogni strato, uno dopo l'altro (Figura 11). La stampante segue una serie di istruzioni a partire da uno specifico file, di solito in formato GCODE, che contiene una versione "a fette" di un modello 3D. Ogni "fetta" corrisponde a un unico strato. Più alto è l'oggetto, più "fette" ci saranno, e quindi maggiore sarà il tempo di stampa. Quando la testina di stampa deposita il filamento, la plastica si fonde sullo strato precedente per poi indurirsi con l'aiuto delle ventole di raffreddamento montate sulla testina di stampa e/o all'interno della camera di stampa. Mentre in passato la stampa 3D FDM prevedeva una curva di apprendimento relativamente ripida, ora questa tecnologia è diventata molto più facile da gestire grazie alla standardizzazione di funzionalità come il livellamento automatico del letto, le camere di stampa chiuse e il ripristino in caso di interruzione dell'alimentazione. Inoltre, gli sviluppi avvenuti nel campo dei software e dei materiali hanno reso questo progresso tecnologico accessibile e adatto agli uffici, tanto che la FFF è ormai uno strumento diffuso per la prototipazione rapida e per la produzione a basso volume. Tuttavia, la stampa 3D a filamento presenta anche degli inconvenienti. Le parti stampate in FDM sono anisotrope, ossia sono più robuste in una direzione rispetto all'altra. I loro strati sono spesso visibili ad occhio nudo, con finiture superficiali ruvide che possono richiedere fasi di post-lavorazione come sabbiatura e burattatura. Esistono però le stampanti 3D a doppio estrusore, che possono stampare in 3D contemporaneamente plastica e materiale di supporto solubile. Il materiale di supporto solubile è facile da risciacquare e richiede una

minore finitura superficiale. Le parti stampate in 3D con il sistema FDM tendono a essere meno precise e meno durature rispetto alle parti create con altri metodi di produzione additiva come la SLS o la MJF. Tuttavia, le innovazioni nei materiali e nei metodi di stampa, come la stampa 3D a fibra continua, stanno cambiando la situazione. Le stampanti 3D FDM utilizzano una serie di termoplastiche. La più comune e più facile da stampare è il PLA (acido polilattico), termoplastica biodegradabile rapida ed economica, ma poco resistente e poco duratura. Altrettanto comune ma più duratura, sebbene più difficile da stampare, è l'ABS (acrilonitrile butadiene stirene), una plastica utilizzata in numerosi articoli molto diffusi, dai tasti dei computer ai Lego. Il filamento di nylon (poliammide, PA) è diventato un'alternativa popolare al PLA e all'ABS perché permette di creare parti FDM durature, con utilizzi che vanno dalle protesi fino agli involucri e agli alloggiamenti. È inoltre possibile stampare in 3D termoplastici versatili come il PETG (polietilene tereftalato con aggiunta di glicole), che presenta applicazioni 3D pratiche per la prototipazione degli imballaggi dei prodotti di consumo. Altre innovazioni esplorano l'integrazione dell'elettronica nelle parti stampate in FDM, utilizzando paste riempite di metallo per realizzare circuiti integrati, batterie e conduttori. Ne è un esempio The Virtual Foundry, società con sede nel Wisconsin che produce filamenti FDM contenenti metallo, vetro e ceramica. [14]

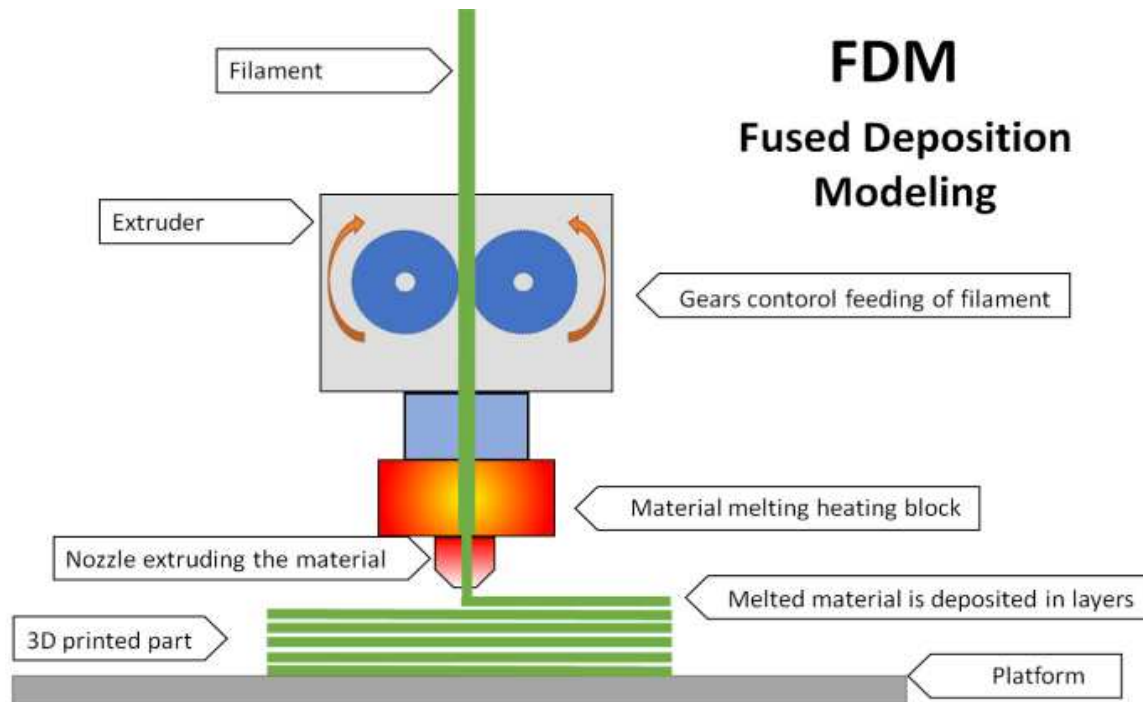


Figura [11] – Tecnica FFF

I principali parametri di processo per la tecnologia FDM sono:

- **Diametro del filamento:** ogni bobina potrebbe presentare leggere variazioni nel diametro del filamento; talvolta anche da lotto a lotto dello stesso produttore. L'importante è che il diametro resti costante per tutta la durata della bobina, altrimenti potrebbero esserci delle problematiche principalmente legate all'estetica e accuratezza dimensionale del pezzo.
- **Posizionamento del pezzo:** non è un vero e proprio "parametro" di stampa, ma è un aspetto da tenere in seria considerazione, poiché a seconda di come viene disegnato il modello nel CAD, questo verrà poi esportato in 3D con il medesimo orientamento. Dopo le prime stampe, il pezzo potrebbe risultare più o meno fragile (a parità di materiale) a

seconda di come è stato orientato: questo è un problema che accomuna quasi tutte le tecnologie di stampa 3D dato che lavorano a strati sovrapposti; si parla infatti di anisotropia, cioè quando la resistenza di un pezzo è fortemente condizionata dall'andamento dei layers e dalla direzione in cui questi vengono sollecitati. L'obiettivo, quindi, è quello di massimizzare, se possibile, l'area di contatto tra piano di stampa e pezzo: più superficie si fa aderire al piano e minori saranno le probabilità che il pezzo possa staccarsi durante la stampa. Di certo, non esiste l'orientamento perfetto per tutti i pezzi, quindi spesso bisognerà scegliere se dare priorità all'estetica del pezzo o alla resistenza meccanica.

- **Altezza layer/strato:** selezionare altezze di strato molto sottili, può portare a pensare di ottenere un oggetto con una maggior accuratezza dimensionale. In realtà non è così, questo valore non influisce minimamente su quanto un oggetto è più “preciso” o meno quando lo si misura, ma interviene solo sull'aspetto estetico (Figura 12). Inoltre, bisogna considerare che la durata della stampa cresce notevolmente al diminuire dell'altezza dello strato.

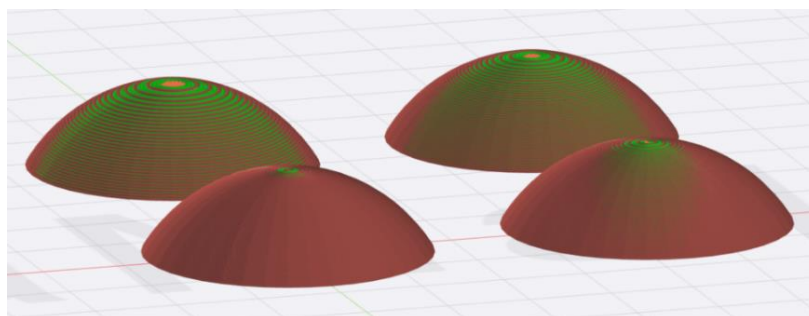


Figura [12] - L'altezza del layer ci permette di controllare quanto “liscio” può venire un oggetto

- **Riempimento o infill:** è uno dei parametri che più verrà modificato da una stampa all'altra e determina quanto un oggetto sarà più o meno resistente (Figura 13). Molte volte, non serve realizzare oggetti 100% pieni se si vuole la massima resistenza, ma basterà anche un solo 30% per creare un oggetto davvero solido e difficile da rompere. La stampa 3D nasce per ottimizzare i processi e i consumi dei materiali creando pezzi molto leggeri ma altrettanto funzionali rispetto alle classiche tecniche di stampa ad iniezione o fresatura.

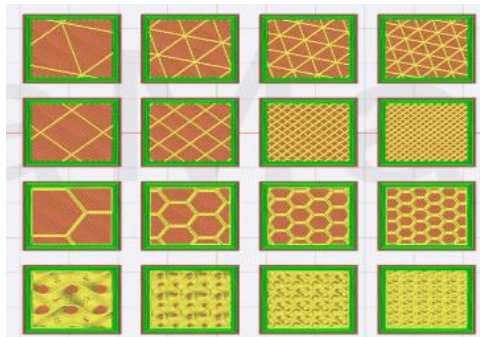


Figura [13] – Struttura infill

- **Perimetri di stampa (shells):** se il riempimento possiamo considerarlo l'ossatura del nostro oggetto, i perimetri di stampa (che si dividono in esterni e interni) li identifichiamo come la "pelle" che separa il riempimento dall'esterno. La larghezza della pelle dipende da quanti perimetri andremo ad inserire nello slicer, (teoricamente si potrebbe mettere un numero molto alto tanto lo slicer ne creerà finché ci sarà lo spazio per farli stare). Una parete o loop o perimetro, non è altro che un offset verso l'interno del perimetro più esterno (Figura 14).

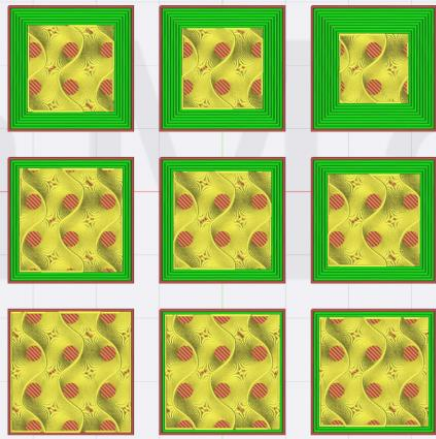


Figura [14] – Perimetro di stampa

- **Strati pieni superiori e inferiori (top e bottom layers):** la pelle dell'oggetto è formata anche da quest'altro parametro che gestisce il numero di strati pieni che vengono fatti alla base dell'oggetto e poi poco prima di chiuderlo nella sommità (Figura 15). Vengono espressi generalmente come numero intero e il loro spessore è direttamente legato all'altezza layer in z che si sta utilizzando; questo valore influenza fortemente la resa meccanica dell'oggetto stampato e deve essere scelto in base all'altezza layer del profilo.

[15]

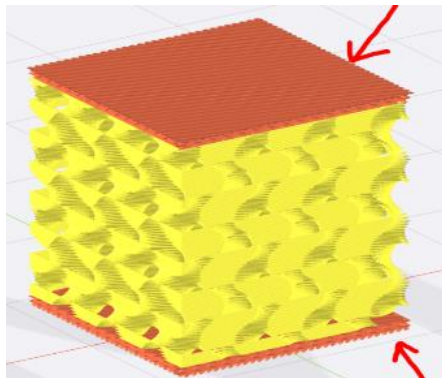


Figura [15] – Top e bottom layers

2.3 Materiali

La scelta dei materiali per la stampa 3D è di fondamentale importanza, poiché scegliere correttamente il materiale più adatto, ci permette di ottenere il miglior risultato possibile dalla stampante. Va tenuto conto che i materiali disponibili variano in funzione della tecnologia della stampante. La stampa 3D si presta a diversi tipi di materiali, svariando dalla plastica ai metalli, dal cemento alla ceramica, dalla carta al vetro e in alcuni casi anche su materiali commestibili. I più utilizzati sono principalmente tre: materiali compositi, metallici e plastici (come ad esempio il PLA).

2.3.1 Materiali compositi

L'uso di materiali compositi aumenta le proprietà specifiche delle parti tradizionali stampate in 3D come forza, rigidità, resistenza al calore e resistenza meccanica. Questo dà loro un vantaggio di resistenza rispetto ai materiali termoplastici tradizionali utilizzati nella stampa 3D come l'ABS o il PLA, ampliandone le potenzialità. Mentre i termoplastici sono materie plastiche che possono cambiare stato senza un mutamento delle proprietà chimiche (e ciò li rende materiali molto utilizzati per la stampa 3D perché possono essere facilmente estrusi strato per strato), i materiali compositi sono costituiti da più materiali che, quando combinati, offrono proprietà diverse rispetto ai materiali standard. Ad esempio, materiali come il calcestruzzo e i pannelli di truciolato possono essere considerati compositi, perché sono miscele di una varietà di materiali. Tuttavia, quando si parla di compositi da un punto di vista ingegneristico, si fa riferimento ai compositi con fibre di rinforzo. La fibra di carbonio, la fibra di vetro e il Kevlar sono tre dei materiali disponibili in fibra più comunemente usati per i compositi nell'industria. Queste fibre non sono quasi mai usate da sole e vengono intrecciate in fogli, per poi essere formate utilizzando stampi in alluminio con l'aiuto di un materiale per indurire le fibre nella forma desiderata. Quando le fibre sono legate insieme per creare elementi strutturali le forze vengono distribuite e i carichi si disperdono lungo le lunghezze di tutte le fibre. In questo studio, ci si sofferma sulla fibra di carbonio, che avendo uno dei più alti rapporti forza-peso, è molto preziosa per la creazione di parti leggere e molto resistenti. Le fibre stesse sono composte da atomi di carbonio la cui struttura cristallina è sotto forma di filamenti, rendendole incredibilmente forti se sottoposte a tensione. Tradizionalmente, le resine termoindurenti sono usate come agente legante per fissare queste fibre in una forma desiderata e polimerizzate su di una matrice. [16]

2.3.2 Materiali metallici

Materiali metallici come alluminio, cobalto, acciaio, titanio, oro e argento sono tra i materiali più utilizzati nella stampa 3D industriale, soprattutto nei settori aeronautico, automobilistico e bio-medico. Le tecnologie additive a metallo più importanti sono sicuramente la Laser Powder Bed Fusion (LPBF) e l'Electron Beam Melting (EBM, fusione a fascio di elettroni) o Directed Energy Deposition (DED). Tuttavia, per quanto riguarda i metalli, occorre sottolineare la crescita della tecnologia FDM nota anche come fabbricazione a fusione di filamento (FFF), ovvero la tecnologia principale e più nota nella stampa 3D, ispirata allo stampaggio a iniezione dei metalli (MIM). Il vantaggio principale di questo processo, che permette di fabbricare una parte metallica con fasi di stampa come sformatura e sinterizzazione, è il suo basso costo rispetto alle soluzioni di fusione laser a letto di polvere dotate di uno o più laser, o anche di un fascio di elettroni. Le innovazioni sui materiali per la stampa 3D, però, non si limitano ai polimeri e ai metalli, ma riguardano anche soluzioni più rare come il silicone o la ceramica. Grazie a queste novità, è possibile progettare pezzi più resistenti, più leggeri, talvolta flessibili o addirittura più durevoli. Il silicone, ad esempio, è un materiale sempre più popolare nel mercato della produzione additiva, con proprietà interessanti per molti settori. Sul mercato sono presenti siliconi per i processi basati sul Liquid Deposition Modeling (LDM) e nuovi materiali di supporto idrosolubile che consentiranno agli utenti di immaginare geometrie ancora più complesse, così come stampanti 3D con le quali stampare pezzi con diversi siliconi contemporaneamente. Al giorno d'oggi, sono in corso delle ricerche scientifiche sulla possibilità di utilizzare materiali bio per la stampa di applicazioni mediche, come ad esempio la stampa di organi umani per

il trapianto o di tessuti esterni per la sostituzione di parti del corpo. Materiali bio che vengono utilizzati anche sullo sviluppo di alimenti.[17]

2.3.3 Materiali plastici

Spuntano fra tutti il nylon e la poliammide; parliamo di materiali forti, ma al tempo stesso flessibili e durevoli nel tempo, molto affidabili per la stampa 3D e disponibili in tantissime colorazioni differenti. Inoltre, l'evoluzione delle tecnologie di stampa 3D ha portato a un ampio lavoro di ricerca sui materiali di stampa, che ha permesso lo sviluppo di una gamma completa di filamenti dalle elevate prestazioni con caratteristiche meccaniche simili a quelle dei metalli. Ci sono numerosi tipi di plastiche per stampa 3D dalle alte prestazioni come PEEK, PEKK o ULTEM, i quali sono distinti per famiglia come poliarileterchetoni (PAEK) o polieterimmidi (PEI). Questi filamenti hanno un'elevatissima resistenza termica e meccanica, sono molto robusti e allo stesso tempo molto più leggeri di alcuni metalli. Queste proprietà li rendono molto interessanti nei settori aerospaziale, automobilistico e medico. Oltre ad essi, troviamo anche l'ABS, resistente ma poco eco-compatibile, e il PLA, biodegradabile perché di derivazione vegetale.

2.3.4 PLA

Il PLA (Acido Polilattico) è un'innovativa bioplastica prodotta dalla NatureWorks Ingeo (Figura 18). È un materiale derivato dalla trasformazione degli zuccheri presenti in mais, barbabietola, canna da zucchero e altri materiali naturali e rinnovabili e non derivati dal petrolio (a differenza della plastica tradizionale) (Figura 19). Questa bioplastica è biodegradabile e compostabile quindi si degrada rapidamente nel terreno una volta raggiunte le condizioni di temperatura e umidità necessarie. [18]

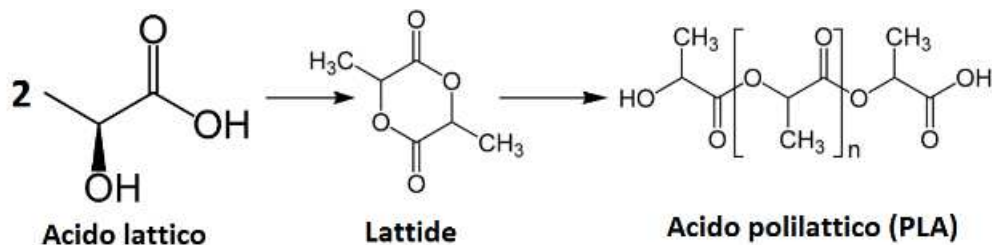


Figura [18] – Composizione chimica del PLA

Il filamento in PLA è tra i primi filamenti utilizzati e tra i più diffusi filamenti nella comunità di stampa 3D, principalmente grazie ai suoi vantaggi di termoplastica versatile e rispettosa dell'ambiente. Sia biologico che biodegradabile, il PLA viene facilmente miscelato con altri ingredienti per influenzare le sue proprietà finali, come la flessibilità e il colore metallico. La forma non colorata di PLA è di un colore biancastro traslucido con temperatura di stampa tra i 195 e 205 gradi (a seconda delle caratteristiche dell'hot end). Il PLA è più denso e resistente dell'ABS, ma più friabile e suscettibile alla rottura. Inoltre, è meno resistente agli elementi esterni (UV e acqua) rispetto alle altre termoplastiche più comuni (come Nylon, ABS e PET-G).

Vantaggi dell'utilizzo del filamento in PLA:

- Facile da gestire, stampe inodori
- Scarso restringimento, quindi scarsa piegatura
- Si può stampare senza piatto riscaldato
- Bassa viscosità, scorre meglio e si stampa più velocemente
- Disponibile in un'ampia gamma di colori e con diverse caratteristiche
- Si può stampare senza piatto riscaldato

Svantaggi dell'utilizzo del filamento in PLA:

- Materiale piuttosto duro
- Non va molto d'accordo con il calore
- Non va d'accordo nemmeno con l'acqua, si degrada velocemente all'esterno [19]

Il filamento PLA viene comunemente utilizzato per creare parti e dettagli complessi, inclusi angoli, parti affilate e pezzi estremamente piccoli. Questo è il motivo per cui viene spesso utilizzato per creare modelli architettonici, modelli estetici e concettuali e stampi da fusione. A seconda delle impostazioni di qualità della stampa, i livelli potrebbero essere ancora visibili dopo ogni stampa. In generale, questo materiale è molto popolare per la prototipazione. Poiché ha un prezzo inferiore rispetto alla maggior parte degli altri filamenti, i produttori e gli sviluppatori sono in grado di testare prototipi diversi senza ingenti investimenti. [20]

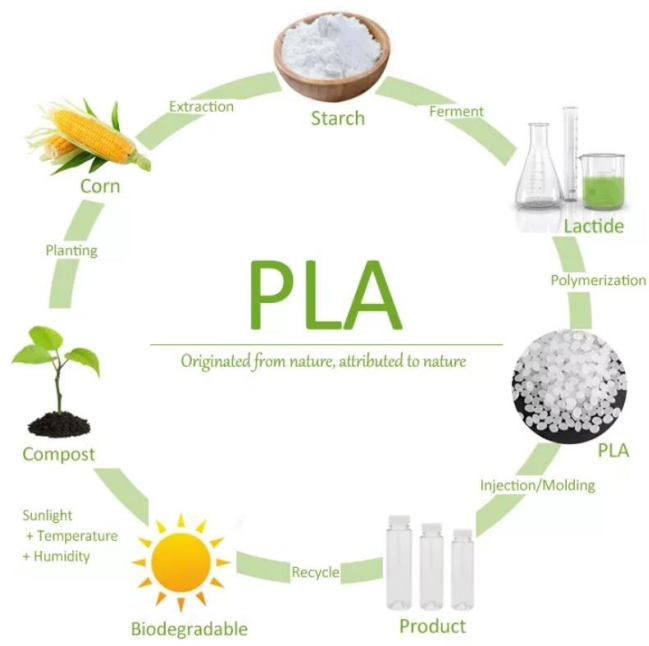


Figura [19] – Ciclo di produzione del PLA

2.4 Campi di applicazione della stampa 3D

Il numero di organizzazioni che utilizzano la stampa 3D è aumentato notevolmente, infatti, le aziende stanno sviluppando nuovi modelli di business e opportunità. Molti settori utilizzano la produzione additiva, come:

- **AEROSPAZIO E DIFESA:** Le aziende del settore aerospaziale e della difesa (A&D) sono state tra le prime a adottare la produzione additiva. Molti marchi importanti traggono vantaggio dalla stampa 3D, come GE, Airbus, Boeing e Safran, poiché il principale vantaggio di questa tecnologia nell'industria aerospaziale è la riduzione del peso, che ha un notevole impatto positivo sul carico utile, sull'efficienza del carburante e sulle emissioni di anidride carbonica. In più, i progettisti possono creare materiali robusti e componenti consolidati, il che è particolarmente importante nel settore aerospaziale.
- **SETTORE AUTOMOBILISTICO:** l'industria automobilistica ha bisogno di componenti leggeri e resistenti agli ambienti difficili per migliorare il comfort di guida e far sopravvivere i veicoli alle diverse condizioni ambientali. Ad esempio, Porsche progetta un'innovativa tecnologia di stampa 3D per sedili avvolgenti che consente ai clienti di scegliere tra tre livelli di solidità per il livello di comfort durante la guida. Oltre alla vestibilità ergonomica, i sedili offrono un peso ridotto, un design unico, un comfort migliorato e un controllo passivo del clima, poiché il "sedile full-bucket stampato in 3D" si basa su una struttura leggera. La produzione additiva offre un'ampia gamma di materiali robusti e ad alta temperatura, con metodi e capacità di costruire forme

estremamente complicate; non a caso, le organizzazioni la utilizzano per testare diverse opzioni di progettazione e per produrre parti customizzate.

- **SETTORE MEDICO E SANITARIO:** è molto utilizzata nelle applicazioni mediche e odontoiatriche, come la creazione di tessuti e organi in bioprinting di modelli anatomici per la preparazione chirurgica e di modelli di arcate o corone e ponti in odontoiatria. È possibile che la stampa 3D diventi la tecnologia principale nella produzione dentale. I produttori del settore medicale utilizzano una varietà di materiali di stampa 3D rigidi, flessibili, opachi e trasparenti per creare progetti più personalizzabili rispetto al passato. Soprattutto, gli impianti e gli apparecchi dentali possono essere realizzati con la stampa 3D in base alle esigenze specifiche del paziente.

- **SETTORE DEI PRODOTTI DI CONSUMO:** per applicazioni riguardanti lo sport, il tempo libero e lo stile di vita, come calzature e occhiali. Altre riguardano piccoli oggetti come gioielli, giocattoli per bambini e riparazioni per tutto ciò che può rompersi. [21]

3) MATERIALI E PROCEDURE SPERIMENTALI

In questo studio è stato impiegato come materiale, il PET-G (sigla di polietilene tereftalato con glicole) rinforzato con fibre di carbonio; ed è questo il motivo per cui è considerato un “materiale composito”.

3.1 PET-G con fibre di carbonio

Il PET-G è un capoliestere di polietilene tereftalato trasparente: è una versione modificata di PET. La “G” sta per “glicole modificato”, che viene aggiunto alla composizione del materiale durante la polimerizzazione. Il risultato è un filamento più chiaro, meno fragile e più facile da usare rispetto alla sua forma base di PET. È un materiale estremamente resistente che permette di ottenere stampe robuste e durature. Grazie al basso coefficiente di ritiro rende questo materiale ottimo per stampe 3D che hanno superfici piane di grandi dimensioni. Viene utilizzato generalmente nel settore dell’arredamento, per quanto riguarda ad esempio la pensiline/lucernari, ma anche contenitori per alimenti (anche a basse temperature), espositori e protezioni per macchinari. [22]

Mentre, il PET-G CF (PET-G Carbon Fiber) utilizzato in questo studio (Figura 16), conosciuto anche con il nome di CarbonFil™, è stato prodotto da FormFutura ed è un filamento incredibilmente resistente, leggero e rigido perché basato su una miscela unica di HD Glass™ (Heavy Duty – PETG modificato) rinforzato con il 20% di fibre di carbonio. Grazie alla presenza delle fibre di carbonio ultraleggere e relativamente lunghe si è riusciti a rendere il filamento CarbonFil™ leggero e due volte più rigido dell’HD Glass e ad aumentare contemporaneamente la sua resistenza all’impatto di oltre il 10%. Gli oggetti stampati in CarbonFil™ hanno finitura semi ruvida e grezza di colore tendente al nero-carbone. Ha una grande stabilità termica, è inodore, e presenta un ottimo comportamento di scorrevolezza e un’adesione interstrato del primo layer con i successivi.



Figura [16] – Bobina CarbonFil™ da 0,5 Kg

Il fornitore (FormFutura) consiglia i seguenti parametri:

- Temperatura di stampa: 230 °C – 265 °C
- Temperatura del piatto: 0 °C – 85 °C
- Velocità della ventola: 20% - 50%

3.2 Tipologie di infill

Sono stati stampati tre provini per ogni tipologia di infill. Le tipologie sono:

- ❖ Concentrico al 100%: è uno dei modelli di infill più rapidi da stampare e utilizza meno materiale; tuttavia, ciò comporta una ridotta resistenza della parte. Il modello concentrico non è forte come gli altri tipi di riempimento, soprattutto se la parte deve sopportare carichi negli assi x o y.
- ❖ Griglia al 50% e griglia al 100%: la differenza sta nel fatto che la prima non riempie completamente il provino, bensì la metà. La griglia è uno dei tipi di riempimento più comuni e dispone la plastica in uno schema a griglia cubica che si interseca su sé stessa con angoli di 90°, ideale per stampe con superfici ampie e piatte. Questa trama però, può provocare l'ostruzione dell'ugello, in quanto le linee si incrociano l'una sull'altra sullo stesso layer.
- ❖ Honeycomb al 50%: è tra gli infill che conferisce maggiore robustezza all'oggetto 3D.

I parametri di stampa con cui sono stati ottenuti i provini CarbonFil™ (Figura 17), sono i seguenti:

- Temperatura di stampa: 240 °C
- Temperatura del piatto: 55 °C
- Velocità di stampa: 80 mm/s
- Velocità delle ventole di raffreddamento: 50%
- Altezza layer: 0,25 mm

- Retraction distance: 2 mm

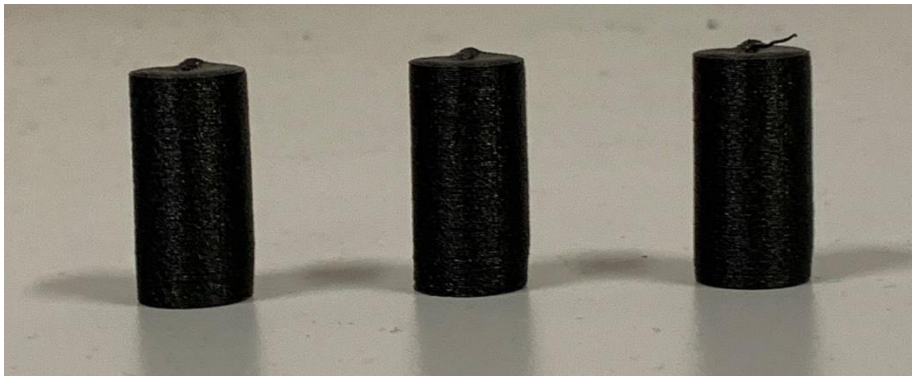


Figura [17] – I tre provini CarbonFil™

Provini, che stando alla normativa ASTM D695-23, sono caratterizzati da un diametro di 12,7 mm ed un'altezza pari a 25,4 mm.

3.3 Roboze One + 400

La Roboze One + 400, è una stampante progettata per la stampa di materiali termoplastici ad alta prestazione (Figura 18) e (Figura 19). La meccanica si basa su un sistema senza cinghie, che consente di stampare oggetti di alta qualità e con tolleranze di lavoro di circa 50 micron. Grazie alla presenza di due estrusori, è capace di raggiungere temperature di 400 ° C, rendendo possibile la stampa di 12 diversi tipi di materiali, tra cui Peek, Pei e Carbon PA. Con il secondo estrusore, inoltre, è possibile stampare anche geometrie e forme più complesse grazie al materiale di supporto.

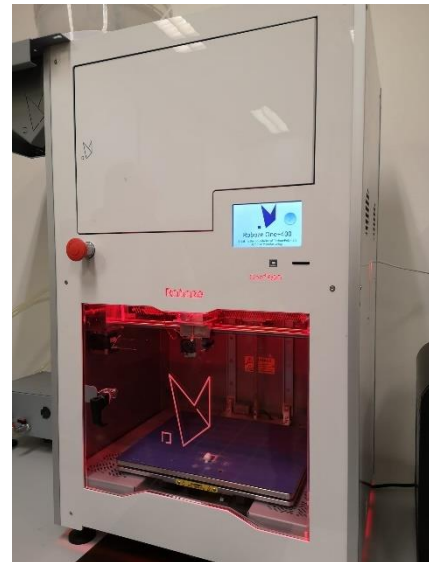


Figura [18] e Figura [19] – Stampante Robone One + 400

3.3.1 Procedura di stampa

Nel nostro studio, abbiamo utilizzato un software chiamato Simplify3D, che ci ha permesso, lavorando con i parametri di stampa, di sviluppare un provino tridimensionale virtuale; una volta fatto ciò, abbiamo salvato il tutto su una scheda SD. Dopodiché, ci siamo spostati sulla stampante e abbiamo inserito la bobina di filamento all'interno di uno sportello, situato in alto nella parte anteriore della stampante stessa ed abbiamo eseguito una calibrazione del piatto (Figura 20), per assicurarci che fosse in piano. Successivamente, abbiamo fatto partire il preheat, così da portare in temperatura la stampante e prepararla per il suo lavoro. A questo punto, una volta pronta, abbiamo inserito la scheda SD nella Roboze One + 400; il ruolo della scheda SD è di fondamentale importanza, poiché grazie ad essa, la stampante 3D leggendo, sa esattamente come lavorare per realizzare il provino. Grazie ad un display touch screen (Figura 21) situato nella parte anteriore della stampante, è possibile variare durante la stampa, alcuni parametri, come ad esempio la temperatura dell'estrusore e la temperatura del piatto, qualora ci accorgessimo che il provino non sta venendo esattamente come vorremmo. Inoltre, sempre su questo display, vengono riportati anche il tempo e la percentuale di stampa, utili per rendersi conto di quanto manchi al termine del lavoro.

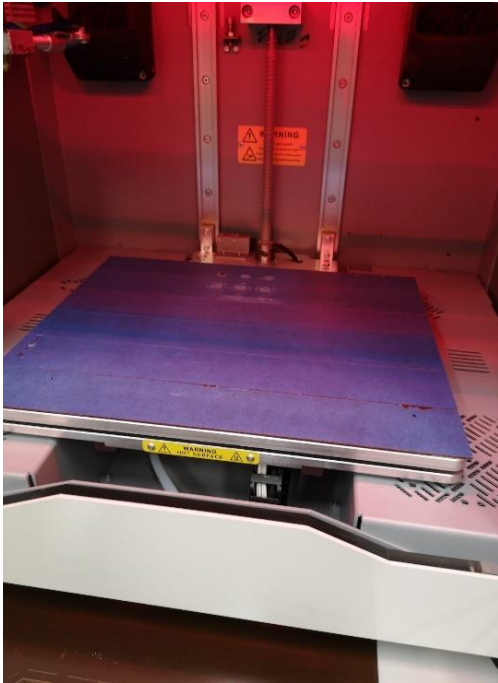


Figura [20] e Figura [21] – Piatto della Roboze One + 400 e il suo display touch screen

Terminata la stampa, attendiamo qualche secondo per far raffreddare il provino, poiché quest'ultimo, se toccato si potrebbe danneggiare e deformare.

3.4 Micrometro

A questo punto, una volta ottenuti i provini dalla stampante 3D, prima di sottoporli alle prove di compressione, abbiamo come prima cosa, migliorato la loro qualità superficiale grazie a delle carte abrasive e abbiamo misurato per ciascun provino di ogni infill, tre grandezze fondamentali: la lunghezza del tratto utile (L_0), il diametro (D_0) e il peso. Gli strumenti che abbiamo utilizzato per le misurazioni sono:

- Bilancia elettronica: per misurare il peso in grammi.
- Micrometro: utilizzato per misurare in millimetri, la lunghezza del tratto utile e il diametro del provino; il micrometro è un calibro ad alta precisione, con sensibilità 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 (Figura 22).



Figura [22] – Micrometro

3.5 Prove di compressione

La prova di compressione è un test meccanico che viene utilizzato per misurare la resistenza di un materiale alla compressione, ovvero la capacità del materiale di resistere a una forza che tende a comprimerlo (situazione comune in molte applicazioni industriali e ingegneristiche). Questo tipo di prova viene effettuato su una vasta gamma di materiali, tra cui metalli, leghe, materiali compositi, polimeri e molti altri ancora. In particolare, la prova di compressione fornisce informazioni essenziali sul comportamento del materiale, consentendo di determinare alcune proprietà meccaniche importanti, come: la resistenza alla compressione, la deformazione, la resistenza alla deformazione plastica, la rigidità, la tenacità e la resilienza del materiale. Il campione di materiale viene posizionato tra due piatti piani, lisci e paralleli; durante la prova, viene applicata una forza in modo unidirezionale, lungo l'asse di compressione, generando in una situazione ideale (assenza di attrito tra la superficie inferiore e superiore del provino con le facce dei dischi della macchina di compressione), una riduzione dell'altezza del provino cilindrico con corrispondente aumento del diametro (Figura 23).

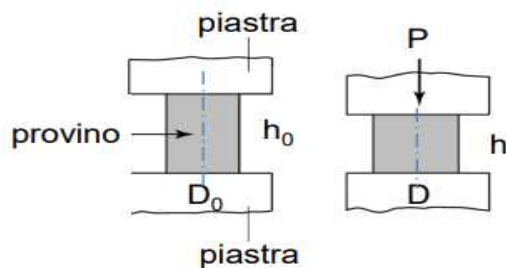


Figura [23] – Rappresentazione ideale di come cambia il profilo del provino durante la prova

Durante la prova, la forza aumenta gradualmente, causando, questa volta in una situazione reale e quindi in presenza di attrito, un flusso del materiale ostacolato dall'azione delle forze

di attrito a contatto con le piastre (vi è una disuniformità della deformazione con formazione di zone a forma di cono interne al provino, in cui il materiale non si è deformato) e un flusso indisturbato a metà altezza del provino. Ciò comporta un profilo del provino a forma di “botte”, con diametro massimo nel piano di metà altezza e minimo a contatto con le piastre (Figura 24) e (Figura 25).

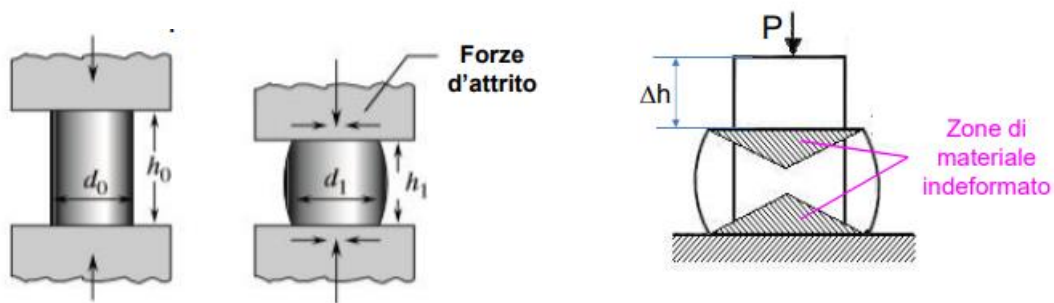


Figura [24] e Figura [25] – Rappresentazione reale di come cambia il profilo del provino durante la prova

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



Figura [26] – Disposizione fibre nel provino

Si osservano:

- zone scarsamente deformate (ϵ basse)
- zone mediamente deformate (ϵ medie)
- zone fortemente deformate (ϵ alte)

Nel nostro caso, i provini post-compressione hanno subito come deformazione un inarcamento della parte centrale (Figura 27), con una disposizione delle fibre corrispondente ad una ϵ media.



Figura [27] – Provini CarbonFil™ deformati post-compressione

3.5.1 MTS 810

In questo studio ci si concentra sulle prove di compressione dei provini, eseguita utilizzando la macchina universale MTS 810. Si tratta di un sistema servoidraulico, da 25kN-250 kN, costituito da una struttura fissa nella parte inferiore e una struttura mobile nella parte superiore. Entrambe le parti, presentano una sporgenza a forma di disco di uno spessore relativamente piccolo (Figura 28); su quella inferiore, viene collocato il provino cilindrico, mentre quella superiore esercita una forza di compressione, via via crescente durante la prova, sulla testa del provino stesso (Figura 29).



Figura [28] - Macchina MTS 810



Figura [29] - provino tra le due sporgenze

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

4) RISULTATI

Nelle seguenti tabelle, vengono riportate le dimensioni misurate in termini di lunghezza del tratto utile (L_0), diametro (D_0) e massa (m), 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 due provini CarbonFil™, concentrici al 100%:

	Lunghezza tratto utile L_0 [mm]	Diametro D_0 [mm]	Massa [g]
Provino 1	25,4	13,12	4,00
Provino 2	25,12	13,1	4,02

Tabella [1] – Dimensioni misurate dei provini in CarbonFil™, concentrici al 100%

Per i provini realizzati in CarbonFil™, con griglia al 50%:

	Lunghezza tratto utile L_0 [mm]	Diametro D_0 [mm]	Massa [g]
Provino 1	25,08	12,32	2,99
Provino 2	25,07	12,29	2,98

Tabella [2] - Dimensioni misurate dei provini in CarbonFil™, con griglia al 50%

Per i provini realizzati in CarbonFil™, con griglia al 100%:

	Lunghezza tratto utile L_0 [mm]	Diametro D_0 [mm]	Massa [g]
Provino 1	25,03	13,56	4,39
Provino 2	25,11	13,55	4,34

Tabella [3] - Dimensioni misurate dei provini in CarbonFil™, con griglia al 100%

Per i provini realizzati in CarbonFil™, honeycomb al 50%:

	Lunghezza tratto utile L_0 [mm]	Diametro D_0 [mm]	Massa [g]
Provino 1	25,45	12,39	2,82
Provino 2	25,22	12,43	2,80

Tabella [4] - Dimensioni misurate dei provini in CarbonFil™, honeycomb al 50%

La prova di compressione fornisce i valori per il modulo di elasticità a compressione, la sollecitazione a compressione, la deformazione dovuta alla compressione e la risposta sollecitazione-deformazione a compressione del materiale. Pertanto, mediante le diverse curve tensione-deformazione e tensione specifica-deformazione, ottenute per i provini CarbonFil™, si riportano e si confrontano i valori delle principali grandezze a compressione.

Per quanto riguarda l'andamento tensione-deformazione del provino concentrico al 100%, si ha:

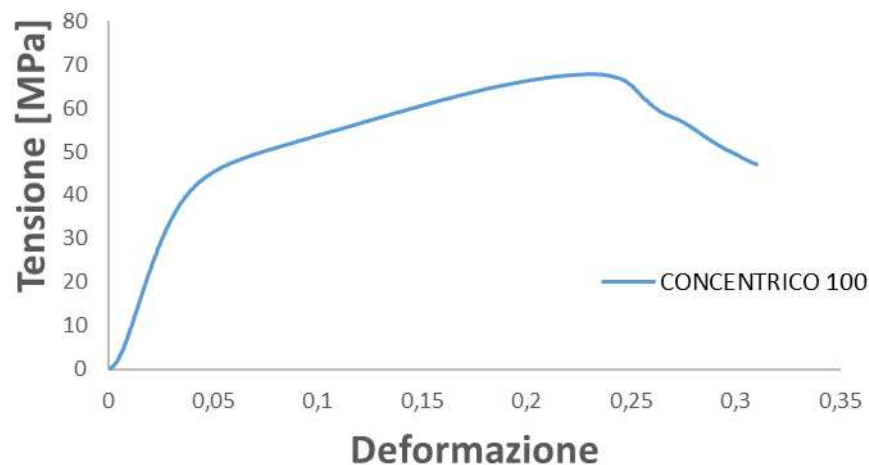


Grafico [1] – Andamento tensione-deformazione per il provino concentrico al 100%

	Massima tensione [MPa]	Massima deformazione	Modulo di elasticità [MPa]
Provino 1	67,97	0,31	1449,6

Tabella [5] – Grandezze principali del provino concentrico al 100%

Mentre per l'andamento tensione specifica-deformazione:

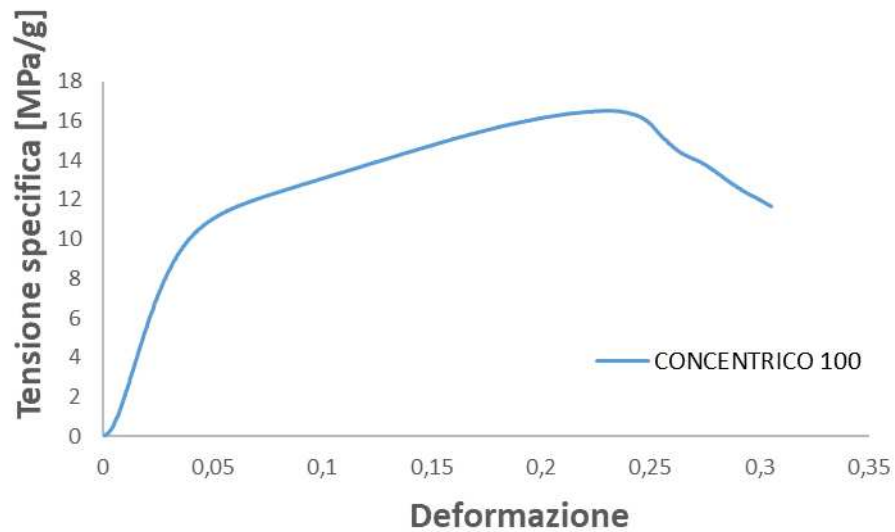


Grafico [2] - Andamento tensione specifica-deformazione per il provino concentrico al 100%

	Massima tensione specifica [MPa/g]	Massima deformazione	Modulo di elasticità specifico [MPa/g]
Provino 1	16,54	0,31	353,67

Tabella [6] – Altre grandezze principali del provino concentrico al 100%

Dal Grafico [1] e Grafico [2], si osserva che l'andamento del provino concentrico al 100%, sia per tensione-deformazione che per tensione specifica-deformazione, è

caratterizzato da un forte aumento della tensione per bassi valori di deformazione nella parte iniziale, dopodiché, all'aumentare della deformazione, la tensione continua a salire, ma lo fa in maniera molto più dolce rispetto a prima, fino a raggiungere il suo valore massimo (67,97 [MPa] di tensione e 16,54 [MPa/g] di tensione specifica, come riportato nella Tabella [5] e Tabella [6]); per arrivare poi nella parte finale, in cui si nota, sempre al crescere della deformazione, un andamento decrescente della tensione fino al punto in cui viene interrotta la prova di compressione.

Riguardo i due provini CarbonFil™, con griglia al 50%, si ha:

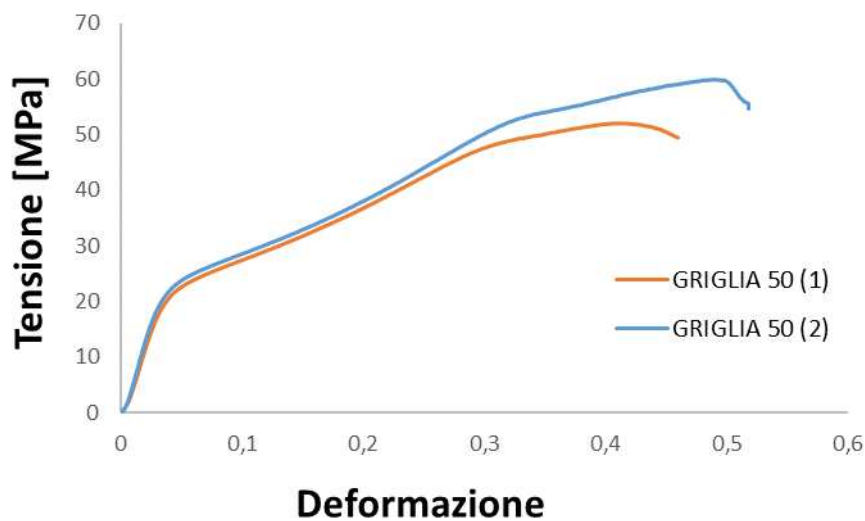


Grafico [3] - Andamento tensione-deformazione per il provino con griglia al 50%

	Massima tensione [MPa]	Massima deformazione	Modulo di elasticità [MPa]
Provino 1	52,04	0,46	711,27
Provino 2	59,88	0,52	785,71

Tabella [7] - Grandezze principali del provino con griglia al 50%

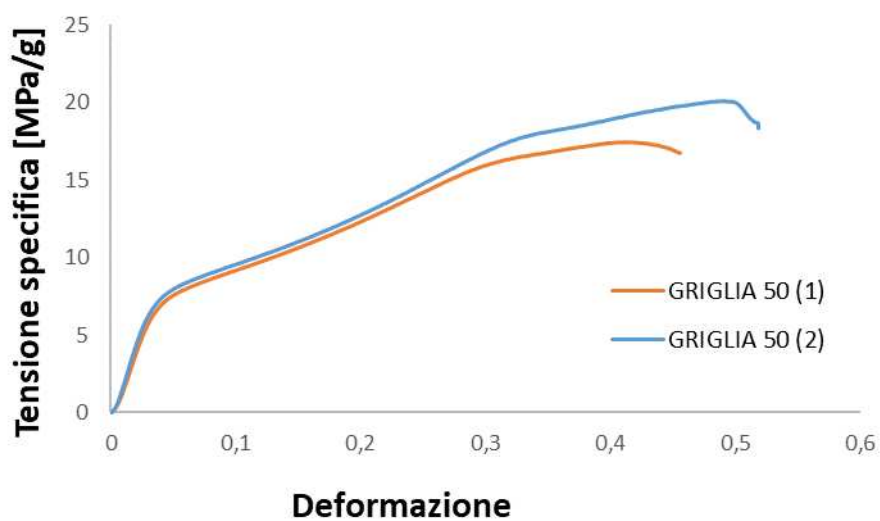


Grafico [4] - Andamento tensione specifica -deformazione per il provino con griglia al 50%

	Massima tensione specifica [MPa/g]	Massima deformazione	Modulo di elasticità specifico [MPa/g]
Provino 1	17,42	0,455	234,71
Provino 2	20,09	0,52	263,46

Tabella [8] – Altre grandezze principali del provino con griglia al 50%

Riguardo i due provini CarbonFil™, con griglia al 100%, si ha:

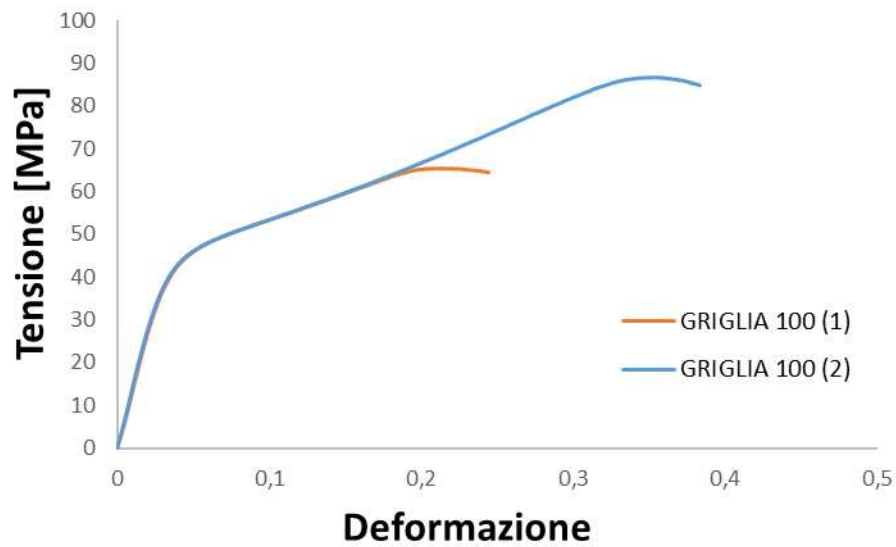


Grafico [5] - Andamento tensione-deformazione per il provino con griglia al 100%

	Massima tensione [MPa]	Massima deformazione	Modulo di elasticità [MPa]
Provino 1	65,44	0,24	1428,7
Provino 2	86,64	0,38	1473,2

Tabella [9] - Grandezze principali del provino con griglia al 100%

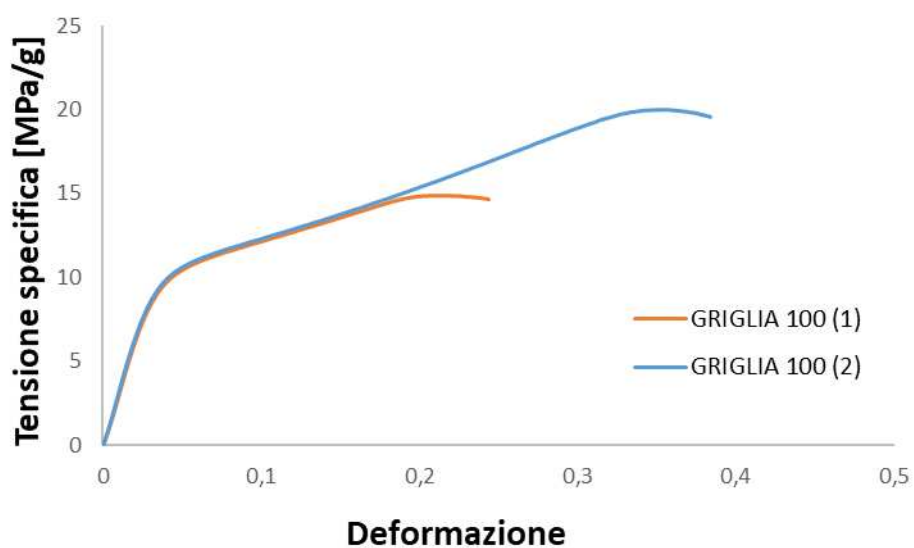


Grafico [6] - Andamento tensione specifica-deformazione per il provino con griglia al 100%

	Massima tensione specifica [MPa/g]	Massima deformazione	Modulo di elasticità specifico [MPa/g]
Provino 1	14,90	0,24	324,91
Provino 2	19,96	0,38	333,96

Tabella [10] – Altre grandezze principali del provino con griglia al 100%

Riguardo i due provini CarbonFil™, honeycomb al 50%, si ha:

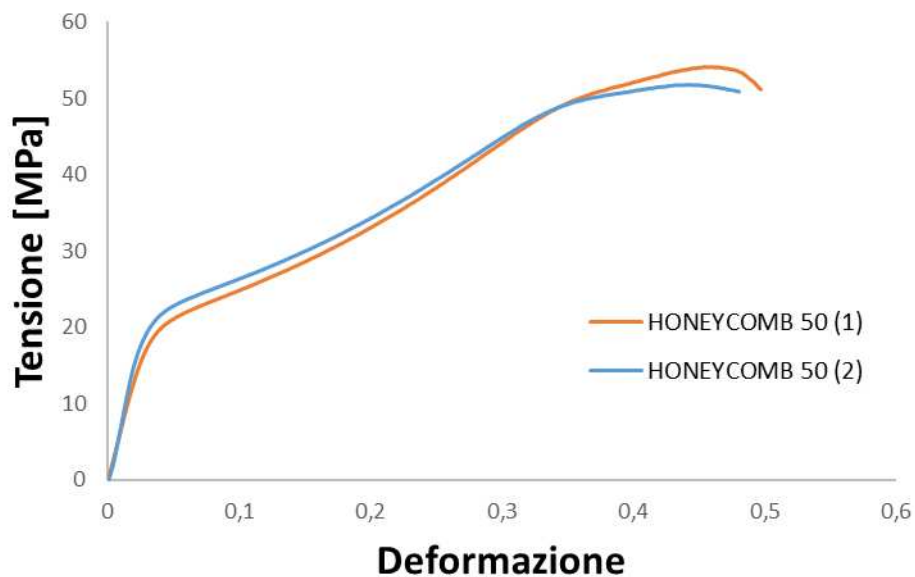


Grafico [7] - Andamento tensione-deformazione per il provino honeycomb al 50%

	Massima tensione [MPa]	Massima deformazione	Modulo di elasticità [MPa]
Provino 1	54,15	0,496	670,21
Provino 2	51,84	0,48	827,77

Tabella [11] - Grandezze principali del provino honeycomb al 50%

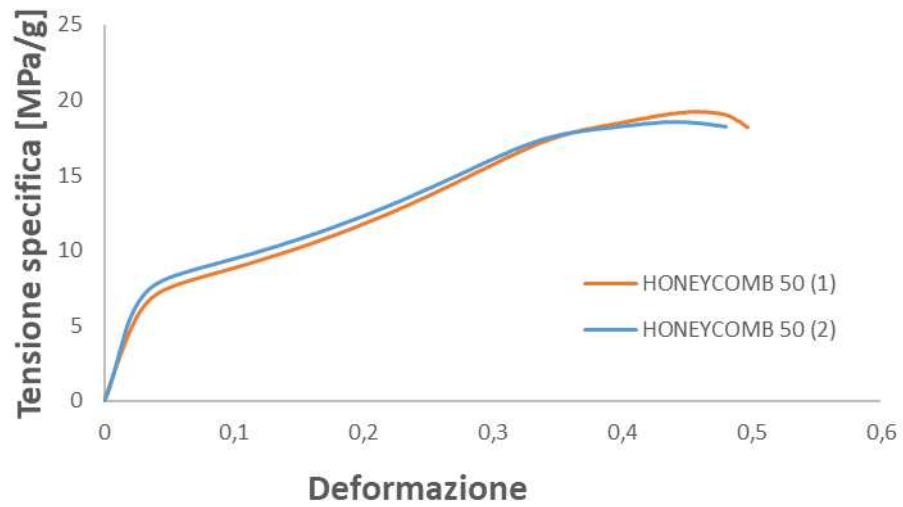


Grafico [8] - Andamento tensione specifica -deformazione per il provino honeycomb al 50%

	Massima tensione specifica [MPa/g]	Massima deformazione	Modulo di elasticità specifico [MPa/g]
Provino 1	19,20	0,496	237,14
Provino 2	18,51	0,48	312,06

Tabella [12] – Altre grandezze principali del provino honeycomb al 50%

Dopo aver relazionato tra loro i provini con stesso infill, di seguito viene riportato un confronto tra le diverse tipologie di infill, sia per quanto riguarda l'andamento tensione - deformazione che per l'andamento tensione specifica- deformazione.

Rispetto all'andamento tensione- deformazione, si ha:

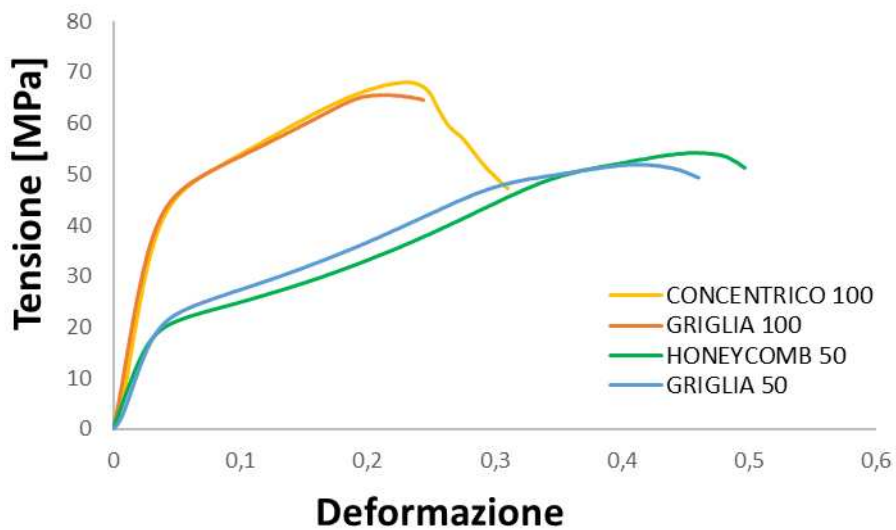


Grafico [9] - Andamenti tensione- deformazione delle diverse tipologie di infill

	Massima tensione [MPa]	Massima deformazione	Modulo di elasticità [MPa]
CONCENTRICO 100	67,97	0,31	1449,6
GRIGLIA 100	65,44	0,24	1428,7
HONEYCOMB 50	54,15	0,496	670,21
GRIGLIA 50	52,04	0,46	711,27

Tabella [13] - Grandezze fondamentali delle diverse tipologie di infill

In riferimento al Grafico [9] e alla Tabella [13], si osserva che:

- i provini concentrici al 100% raggiungono una tensione massima maggiore rispetto agli altri e ciò comporta un'elevata resistenza alle sollecitazioni e ai carichi imposti su di essi;
- i provini, invece, con griglia al 100% presentano una tensione massima e un modulo di elasticità, inferiori solo ai provini concentrici al 100% e ciò garantisce un'elevata durezza. La curva, però, si interrompe a valori di deformazione più bassi rispetto agli altri, evidenziando la loro fragilità con questa tipologia di infill;
- i provini honeycomb al 50%, presentano un'elevata tenacità ed elevata deformazione, come si può notare dalla curva, ma soprattutto, una resistenza massima più bassa rispetto ai provini concentrici al 100% e con griglia al 100%. Questo aspetto evidenzia un aumento della resistenza meccanica e della durezza;
- i provini con griglia al 50% sono descritti da una curva con pendenza maggiore rispetto all' honeycomb al 50% e meno alta rispetto alle altre, tanto da non riuscire a raggiungere alti valori di resistenza, bensì una buona deformazione.

Mentre, riguardo gli andamenti tensione specifica- deformazione:

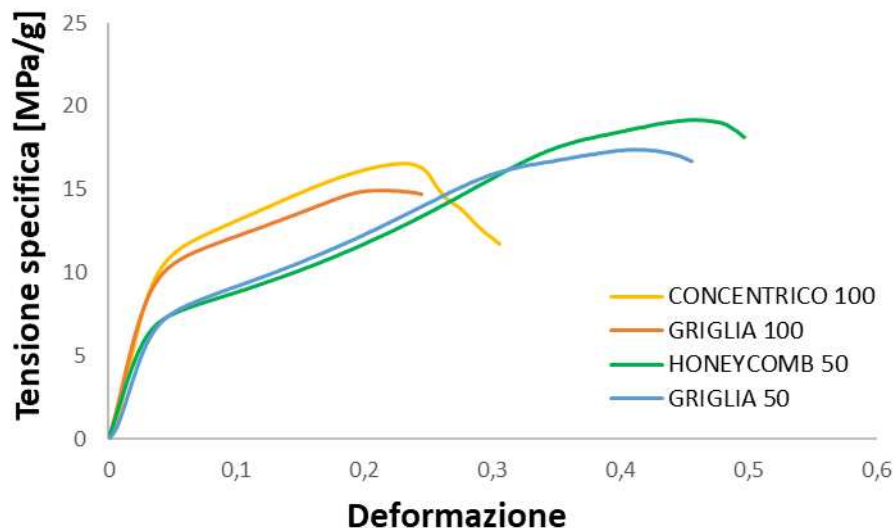


Grafico [10] - Andamenti tensione specifica- deformazione delle diverse tipologie di infill

	Massima tensione specifica [MPa/g]	Massima deformazione	Modulo di elasticità specifico [MPa/g]
CONCENTRICO 100	16,54	0,31	353,67
GRIGLIA 100	14,90	0,24	324,91
HONEYCOMB 50	19,20	0,496	237,14
GRIGLIA 50	17,42	0,455	234,71

Tabella [14] – Altre grandezze fondamentali delle diverse tipologie di infill

In riferimento al Grafico [10] e alla Tabella [14], emerge che:

- i provini concentrici al 100%, presentano una tensione massima e deformazione massima inferiore rispetto ai provini con griglia al 50% e honeycomb al 50%. Questo sottolinea, rispetto agli altri due, una fragilità più elevata dovuta ad un maggior riempimento del provino;
- i provini con griglia al 100% sono caratterizzati dall'aver, sia una tensione che una deformazione, minore rispetto a tutti gli altri, ma un modulo di elasticità specifico, inferiore solo ai provini concentrici al 100%. Ne risulta, che sono insieme a quest'ultimi i provini più fragili;
- a differenza di tutti gli altri provini, gli honeycomb al 50% sono caratterizzati da una tensione specifica e una deformazione più elevata, ma da un modulo di elasticità specifico, superiore anche se di poco, solo ai provini con griglia al 50%. Quest'ultimo aspetto ci fa capire che sono provini meno fragili rispetto a quelli concentrici al 100% e con griglia al 100%, ma più fragili rispetto ai provini con griglia al 50%;
- I provini con griglia al 50%, infatti, sono i provini più duttili e sono caratterizzati da valori di tensione specifica e deformazione massima, inferiori solo ai provini honeycomb al 50%.

5) CONCLUSIONI

Questo studio si concentra sulla realizzazione, mediante stampa 3D, di una serie di provini CarbonFil™ con diverse tipologie di infill: concentrico al 100%, griglia al 50%, griglia al 100% e honeycomb al 50%. I provini così ottenuti sono stati poi sottoposti a prove di compressione, mediante la macchina MTS810, in cui si è evidenziato quali sono gli infill che conferiscono al provino una maggior resistenza alla compressione stessa. Dopo aver acquisito ed elaborato i dati ottenuti da queste prove, è stato effettuato un confronto sia tra i provini dello stesso infill che tra i provini con infill diversi, sulla base dei grafici tensione-deformazione e tensione specifica-deformazione. Dal grafico tensione-deformazione è emerso che:

- i provini concentrici al 100% sono caratterizzati da un'elevata resistenza alle sollecitazioni e ai carichi imposti su di essi;
- i provini con griglia al 100% possiedono un'elevata durezza, ma una maggior fragilità rispetto agli altri provini con un infill differente;
- i provini honeycomb al 50%, presentano un'elevata tenacità ed elevata deformazione;
- i provini con griglia al 50% non raggiungono alti valori di resistenza, bensì una buona deformazione.

Mentre dagli andamenti tensione specifica-deformazione delle diverse tipologie di infill, risulta che:

- i provini concentrici al 100% sono caratterizzati da una fragilità più elevata rispetto ai provini con griglia al 50% e honeycomb al 50%, dovuta ad un maggior riempimento del provino;

- i provini con griglia al 100% sono, insieme a quelli concentrici al 100%, i provini con maggiore fragilità e questo lo si nota dal loro modulo di elasticità specifico elevato;
- i provini honeycomb al 50% possiedono un valore di fragilità non troppo basso, ma nemmeno troppo elevato rispetto agli altri provini, poiché sono meno fragili rispetto ai concentrici al 100% e a quelli con griglia al 100%, ma più fragili rispetto ai provini con griglia al 50%;
- i provini con griglia al 50% sono meno fragili degli honeycomb al 50% e quindi sono fra tutti i provini, quelli più duttili.

L'obiettivo finale di questo elaborato è determinare quale tipologia di infill conferisce, ai provini realizzati in CarbonFil™, una maggiore resistenza alla prova di compressione. Possiamo quindi affermare, che i provini concentrici al 100% e quelli con griglia al 100%, sono coloro che resistono meglio se sottoposti a prove di compressione, nonostante entrambi avessero una deformazione massima, minore rispetto ai provini honeycomb al 50% e griglia al 50%. La differenza tra un provino concentrico al 100% e uno con griglia al 100%, sta nella presenza di “spazi vuoti” che ritroviamo all'interno del provino; i concentrici al 100% essendo però più pieni, rispetto a quelli con griglia al 100%, risultano essere fra tutti i provini analizzati, coloro che resistono meglio alla prova di compressione, e quindi i più prestazionali. Queste considerazioni costituiscono la base di partenza per ricerche future che possono essere svolte utilizzando materiali diversi da quello esaminato, cambiando la tipologia di infill, oppure modificando alcuni parametri di stampa. L'obiettivo che si vuole raggiungere al giorno d'oggi e negli anni a venire, è quello di ottenere prestazioni elevate riducendo sempre di più il peso dei materiali utilizzati.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Di Maria, E., De Marchi, V., Blasi, S., Mancini, M., & Zampetti–Legambiente, G. (2018). L'economia circolare nelle imprese italiane e il contributo di industria 4.0. Dipartimento di Scienze Economiche e Aziendali "Marco Fanno". Legambiente.
- [2] "La stampa 3D al servizio dell'industria 4.0: dinamiche innovative e impatto sui processi produttivi." (2018).
- [3] (<https://www.3ds.com/it/make/guide/process/3d-printing>)
- [4] "Che cos'è la stampa 3D?" (<https://www.autodesk.it/solutions/3d-printing>)
- [5] "Breve storia della stampa 3D", autore: FEDERICO CERESOLI
(<https://tecnobrixialab.com/breve-storia-della-stampa-3d/>)
- [6] "Tutto sulla stampa 3D: dalla storia agli utilizzi"
(<https://www.adobe.com/it/products/substance3d/discover/3d-printing>)
- [7] "STORIA DELLA STAMPA 3D" (<https://www2.dentalclub.it/storia-della-stampa-3d/>)
- [8] "Tecnologie di stampa 3D", autore: ALESSANDRO TASSINARI
(<https://www.stampa3d-forum.it/articoli/guide/tecnologie-stampa-3d/>)
- [9] Ziaee, Mohsen e Nathan B. Crane. "Binder jetting: una revisione di processi, materiali e metodi." *Produzione additiva* 28 (2019): 781-801.
- [10] Gülcan, Orhan, Kadir Günaydın e Aykut Tamer. "Lo stato dell'arte del material jetting: una revisione critica." *Polimeri* 13.16 (2021): 2829.
- [11] "Ripara, rivesti e aggiungi con il potere della DED"
(<https://www.primaadditive.com/it/tecnologie/direct-energy-deposition>)

- [12] “PBF VS DED: quale processo di stampa 3D in metallo scegliere?”, autore: Nunzia A. (<https://www.3dnatives.com/it/powder-bed-fusion-vs-direct-energy-deposition>)
- [13] “MJF, FDM O SLS. I CONSIGLI DI POLYD PER LA TUA STAMPA 3D” (https://polyd.com/it/blog/stampa_3d_fdm_sls_mjf?gclid=CjwKCAiAmZGrBhAnEiwAo9qHiVmNWzF4MUBLji5aDUUBY31GIYcHmA1W_koy7B0rztJvbeP1A0g3uhoCqiAQAvD_BwE)
- [14] “FDM - Fused Deposition Modeling” (<https://www.3ds.com/it/make/service/3d-printing-service/fdm-fused-deposition-modeling>)
- [15] “QUALI SONO I PARAMETRI FONDAMENTALI DI STAMPA?” (<https://help3d.it/lezione-4-quali-sono-i-parametri-fondamentali-di-stampa/>)
- [16] “Materiali per la Stampa 3D: i vantaggi dei Materiali Compositi”, autore: SIMONE AZZELLINI (<https://www.nuovamacut.it/blog/materiali-per-la-stampa-3d-i-materiali-compositi/>)
- [17] autore: PATRIZI RICCI (<https://www.rivistainnovare.com/innovazioni-tecnologie/stampa-3d-materiali-trattamenti-e-finiture/>)
- [18] “Materiali: la bioplastica PLA” (<https://www.ecotogo.it/post/58c7da4affe48e975936b84a/materiali-la-bioplastica-pla.html>)
- [19] “Cos'è il filamento in PLA?” (https://reapworld.it/filament/information/pla_filament/#:~:text=Il%20PLA%20%C3%A8%20pi%C3%B9%20denso,ABS%20e%20PET%2DG)
- [20] “Filamento PLA: resistenza, temperatura e vantaggi” (<https://3dpworld.it/filamento-pla-resistenza-temperatura-e-vantaggi/>)

[21] “Scopri le applicazioni industriali della stampa 3D”, autore: Justyna Matuszak
(<https://knowhow.distrelec.com/it/stem-e-istruzione/scopri-le-applicazioni-industriali-della-stampa-3d/>)

[22] “PETG: mini guida del filamento plastico per stampanti 3D”
(<https://felfil.com/it/petg-filamento-plastico/?v=5ea34fa833a1>)

[23] Appunti del professor Forcellese

RINGRAZIAMENTI

Un sentito ringraziamento va alla mia relatrice, Prof.ssa Michela Simoncini, per essere stata sempre gentile e disponibile durante il tirocinio e il correlatore Dott. Tommaso Mancia, per avermi seguito con molta attenzione in questa attività e durante la stesura della tesi, ma soprattutto per avermi trasmesso la passione per l'argomento trattato.

Ci tengo a ringraziare i miei compagni di studio Marco, Pietro e Giuseppe per essere stati sempre disponibili durante questo percorso.

Un ringraziamento speciale va ad Andrea, per avermi dato una grandissima mano e un supporto morale non indifferente in questa avventura. Sapevo che su di te potevo contare sempre perché ero sicuro che non mi avresti mai deluso. Sei stato come un fratello per me in questo viaggio e non smetterò mai di ringraziarti, lo sai benissimo!

In ultimo, ma non per importanza, ringrazio i miei amici e tutta la mia famiglia, soprattutto mio padre, per essermi stati accanto in questi tre anni.