



UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE
FACOLTA' DI INGEGNERIA

Corso di laurea triennale in Ingegneria Meccanica

**OTTIMIZZAZIONE DEI PARAMETRI DI PROCESSO PER LA
STAMPA 3D DI MANUFATTI IN COMPOSITO IN FIBRA LUNGA
DI CARBONIO DA CARATTERIZZARE MECCANICAMENTE**

**OPTIMIZATION OF PROCESS PARAMETERS FOR 3D
PRINTING OF LONG CARBON FIBER COMPOSITE PRODUCTS
TO BE CHARACTERIZED MECHANICALLY**

Relatore: Chiar.mo

Prof. Ing. Archimede Forcellese

Tesi di laurea di:

Leonardo Cerolini

Correlatore: Chiar.ma

Dott. Ing. Serena Gentili

A.A. 2022/2023

INDICE

INTRODUZIONE.....	1
Capitolo 1: Stato dell'arte.....	3
1.1 Materiali compositi.....	3
1.1.1 Introduzione e classificazione.....	3
1.1.2 Tipi di rinforzo.....	5
1.1.3 Tipi di matrice.....	11
1.1.4 Tecnologie di fabbricazione dei compositi.....	15
1.2 Additive Manufacturing.....	17
1.2.1 Applicazioni.....	18
1.2.2 Materiali.....	19
1.2.3 Tipologie.....	21
1.2.4 AD e materiali compositi.....	24
1.2.4.1 Stampa 3D a fibre continue.....	26
1.3 Tomografia industriale computerizzata.....	28
1.4 Prove di caratterizzazione meccanica.....	30
1.4.1 Prova di trazione.....	31
1.4.2 Prova di flessione.....	35
1.4.3 Prova di compressione.....	38
1.5 Isogrid.....	39
1.5.1 Cosa sono, utilizzi e vantaggi.....	40
1.5.2 Meccanica delle Isogrid.....	40
1.5.3 Modalità di rottura.....	41
1.6 Anisogrid.....	42
Capitolo 2: Procedure sperimentali.....	43
2.1 Materiali.....	43
2.2 Preparazione dei provini.....	48
2.2.1 Modellazione CAD e slicing.....	48

2.2.2 Stampa 3D Anisoprint.....	50
2.3 Test meccanici.....	53
2.3.1 Flessione.....	53
2.3.2 Trazione.....	58
2.3.3 Compressione Isogrid ed Anisogrid.....	62
Capitolo 3: Risultati.....	66
3.1 Risultati dei test di flessione.....	66
3.2 Risultati dei test di trazione.....	76
3.3 Risultati dei test di compressione di Isogrid ed Anisogrid.....	85
CONCLUSIONI.....	99
BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA.....	101
RINGRAZIAMENTI.....	103

INTRODUZIONE

I materiali compositi sono la nuova frontiera dell'ingegneria, rappresentano l'evoluzione della progettazione meccanica, la loro principale caratteristica come tali (compositi) è quella di far convivere in uno stesso materiale le migliori proprietà di due o più materiali diversi.

Permettono dunque, di spaziare in un'ampia gamma di proprietà ed esigenze specifiche pur mantenendo delle caratteristiche costanti: resistenza, leggerezza, produzione all'avanguardia.

La loro applicazione per questo si espande sempre più raggiungendo campi di grande rilevanza come l'aeronautica, l'industria automobilistica e quella navale.

La produzione per questo tipo di materiali ha una vasta scelta, ma quella che si predilige e che risulta più efficace è la manifattura additiva.

L'additive manufacturing difatti è la tecnica produttiva più conveniente e soprattutto più sostenibile, presenta molti meno scarti rispetto alle tecniche sottrattive di ogni genere, è di facile applicazione e, in molti casi, risulta anche di poco ingombro spaziale, tanto che molte aziende producono stampanti cosiddette "da scrivania".

L'unione dell'additive manufacturing e dei materiali compositi, dunque, crea un delicato accoppiamento che però garantisce prestazioni eccellenti sia dal punto di vista della produzione che del prodotto.

Questo accoppiamento sopra citato è frutto di Anisoprint, che con le tecnologie di ultima generazione che sviluppa, ha permesso la stampa 3D di oggetti in fibra lunga di carbonio.

Il materiale che l'Anisoprint Composer A3 estrude infatti, è un composito costituito da fibre lunghe ricoperte da un binder termoplastico che fungono da rinforzo e una matrice termoplastica, esso garantisce prestazioni ottime in termini di leggerezza e resistenza.

In generale, però, l'uso dei materiali compositi nell'industria è limitato dalla loro grande anisotropia: le resistenze ad un carico applicato lungo la direzione delle fibre e trasversalmente differiscono di due ordini di grandezza.

L'unico modo per oltrepassare il problema dell'anisotropia sono le strutture reticolari: esse secondo la loro costituzione delle costole permettono che i filamenti di fibra percepiscono il carico sempre lungo il proprio asse garantendo le migliori prestazioni, oltre a ciò, il loro vastissimo uso è giustificato dalla grande leggerezza, dall'ergonomia ed un'ottima flessibilità progettuale.

Pertanto, il principale scopo di questo lavoro è quello di studiare le proprietà meccaniche di compositi a fibra lunga di carbonio rinforzati con resina termoplastica stampati mediante la tecnologia Anisoprint, e per perseguire tale obiettivo sono stati realizzati e testati diversi provini sia a trazione che a flessione per la caratterizzazione preliminare del materiale.

Parte di questi provini sono stati inoltre sottoposti ad un processo di essiccazione prima del test per evitare l'eventuale assorbimento di umidità, valutandone l'effetto sulle rispettive proprietà meccaniche.

Successivamente sono state realizzate e testate a compressione le strutture reticolari Isogrid ed Anisogrid impostando la fill density del 10, 20, 35, 42 e 50% e del 10 e 20% rispettivamente. Sono state pertanto analizzate le performance meccaniche della singola struttura e confrontate quelle delle diverse geometrie a parità di infill per valutare la struttura più performante

I risultati ottenuti da ciascuna prova sono stati rielaborati e analizzati graficamente attraverso curve tensione-deformazione che mostrano il comportamento di tali campioni, da cui sono stati estrapolati i dati relativi di resistenza massima a trazione e flessione, di modulo di elasticità e di forza massima interlaminare

Tale studio è la base di un progetto più ampio che ha l'obiettivo di realizzare un componente funzionale utilizzando tali strutture reticolari.

1. Capitolo: Stato dell'arte

1.1.Materiali compositi

I materiali compositi rappresentano l'evoluzione della scienza e delle tecnologie dei materiali, il principio è quello di unire due o più materiali diversi per poterne sfruttare le caratteristiche migliori in un unico composto, nel quale si potranno distinguere matrice e rinforzo: la matrice è ciò che tiene distanziate le fibre tra loro e alle quali distribuisce i carichi e le sollecitazioni, le fibre (rinforzo) come si intuisce invece è la parte di materiale col compito di resistere alle sollecitazioni. A seconda del tipo di rinforzo i materiali si suddividono in compositi particellari, compositi rinforzati con fibre, compositi strutturati, i tipi di rinforzo verranno approfonditi nel capitolo 1.1.2. [1]

1.1.1.Introduzione e classificazione

In natura esistono molti esempi di materiali compositi, le proprietà fisiche di questi sistemi biologici, come le prestazioni meccaniche, sono tipicamente di gran lunga migliori di quelle dei materiali sintetici equivalenti, con composizioni simili e lavorati con le attuali tecnologie.

Il legno è un chiaro esempio di essi presentando come matrice la lignina e come fibre la cellulosa.[1]



Figura 1.1: Tronchi di legno

E' proprio per questo che la natura è un'affascinante fonte di ispirazione per scienziati e ingegneri, essa progetta, elabora e assembla/disassembla blocchi molecolari per fabbricare composti a base di polimeri duri ad alte prestazioni (ad es. gusci di molluschi, ossa, denti) (Fig. 1.2) e/o materiali morbidi (ad esempio, pelle, cartilagine, tendini).[2]



Figura 1.2: Esempio di gusci di molluschi (cozze)

Le prime tracce di questi materiali compaiono nell'epoca egizia nella quale i primi mattoni erano proprio costituiti da paglia e fango (Fig. 1.3) rispettivamente col ruolo di rinforzo e matrice.



Figura 1.3: Mattoni di fango e paglia

1.1.2 Tipi di rinforzo

Come già accennato i materiali compositi sono generalmente costituiti da rinforzo e matrice, in questo capitolo si elencheranno i vari tipi di rinforzo e se ne studieranno le proprietà.

Il rinforzo in sé è costituito da una fase dispersa, che si può trovare collocata in vari modi dentro alla matrice, il suo compito è quello di conferire resistenza meccanica e rigidità, è la porzione di materiale che effettivamente funge da sezione resistente.

Come accennato nell'introduzione sui materiali compositi, essi si classificano in base alla disposizione del rinforzo: particellare, fibroso, e compositi strutturati.

Nel primo caso il rinforzo è propriamente formato da particelle, esse influenzano le proprietà chimico-fisiche dei materiali compositi al variare di forma e dimensione, e al variare ovviamente della concentrazione nella matrice e dell'orientamento, un esempio di ciò è quello di un acciaio al carbonio ipoeutetoidico a solidificazione avvenuta, nel quale si presentano due fasi distinte: perlite (Fe_3C) e fase α .

Il secondo caso, che invece è quello di maggiore attenzione per quanto riguarda questa trattazione è quello di un rinforzo fibroso, questo tipo di compositi si suddivide a sua volta in 3 sottotipi: fibre lunghe (a) (o continue), fibre corte (b) (o discontinue) allineate tra loro ed infine fibre corte disposte in maniera casuale (c).

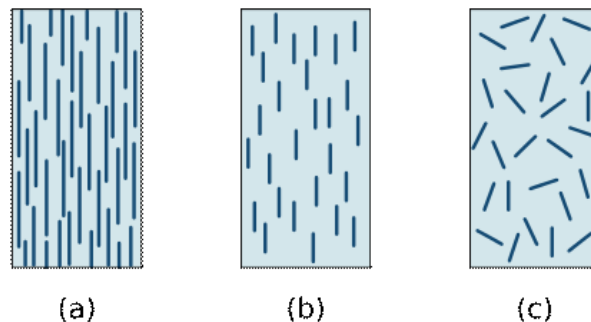


Figura 1.4: Tipi di disposizione del rinforzo

Questa classe di rinforzi (fibrosi) è causa di grande anisotropia: la risposta del materiale cambia notevolmente a seconda della direzione della sollecitazione.

Ciò significa che sollecitando il materiale lungo la disposizione delle fibre esso presenterà una resistenza notevolmente maggiore rispetto al caso di una sollecitazione lungo un'altra direzione.

I tipi di fibre che vengono utilizzate comunemente sono:

- fibra di vetro
- fibra di carbonio
- fibre Aramidiche (per esempio carburo di silicio o allumina)
- fibre di basalto.

La fibra di vetro è un materiale altamente prestante, fu prodotta per la prima volta nel 1893 dall'americano Edward D. Libbey, che riuscì a trasformare il vetro fuso in fili sottili.

Così facendo riuscì a superare la fragilità del vetro monolitico e a produrre filamenti dal diametro inferiore al decimo di millimetro, ottenendo così un'ottima resistenza meccanica.



Figura 1.5: Fibra di vetro

Le fibre di vetro permettono la produzione di materiali compositi che trovano utilizzo in diversi settori, tra cui aerospaziale, nautico e automobilistico.

Al loro interno le fibre di vetro sono associate a matrici diverse, principalmente resine sintetiche, poliammidiche o epossidiche. Dalla fibra di vetro si ottiene ad esempio la vetroresina: composito ultraleggero con ottima resistenza meccanica, resistenza e durabilità.

La stessa fibra però può essere utilizzata per produrre tessuti in fibra di vetro, e fibra di vetro isolante (lana di vetro). [3]



Figura 1.6: Pannelli in lana di vetro

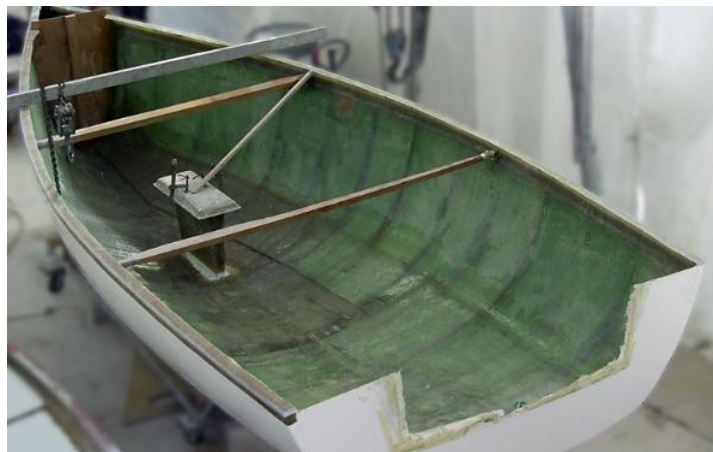


Figura 1.7: Imbarcazione in vetroresina



Figura 1.8 : Rotolo di tessuto in fibra di vetro

Passiamo ora al secondo tipo di rinforzo: la fibra di carbonio.

Il carbonio si trova puro in natura in solo due forme cristalline: la grafite e il diamante, mentre in combinazione ad altri elementi è presente nell'anidride carbonica e nelle rocce calcaree.

I primi materiali compositi che utilizzano come rinforzo la fibra di carbonio sono stati scoperti negli anni 50.

Le sue caratteristiche eccelse in termini di leggerezza e resistenza meccanica gli hanno permesso di sostituire i materiali metallici in molti campi di applicazione come l'automotive, il settore nautico, quello aerospaziale e nel settore sportivo.



Figura 1.9: Cerchione in fibra di carbonio

Per produrre dei filamenti si procede all'ossidazione e alla pirolisi termica di molecole organiche a catena lunga di diversi tipi. Tale materiale di partenza, in forma di filamenti sottili, subisce un complesso processo di ossidazione in atmosfera inerte, fino al raggiungimento di temperature elevatissime intorno ai 2000°C.

L'effetto del calore innesca la grafittizzazione, il cui risultato è l'eliminazione della gran parte degli atomi diversi da quelli di carbonio: le molecole organiche si trasformano quindi in grafite (carbonio al 92-96%).

Le catene organiche grafitizzate infine, grazie alla temperatura elevata, si fondono generando un singolo filamento dalle elevatissime proprietà meccaniche[4]



Figura 1.10: Fogli in fibra di carbonio

Procediamo la trattazione con le fibre aramidiche:

Sono fibre ottenute per lavorazione di poliammidi aromatiche, da cui deriva il nome (*ARomatic polyAMIDES*)

Il tipo di fibra aramidica più noto e diffuso è il Kevlar, brevettato nel 1971 dalla DuPont. Queste fibre sono caratterizzate da una elevata resistenza a trazione (3600 MPa, paragonabile a quella delle fibre di carbonio e circa 10 volte superiore a quella dell'acciaio), da un basso peso specifico e soprattutto da un'elevata resistenza a taglio e agli impatti (non a caso sono usate nei giubbotti antiproiettile).



Figura 1.11: Fibre aramidiche

Questo tipo di fibre è gran parte delle volte accoppiato con resine epossidiche, che fungono da matrice.

Le applicazioni, oltre alla produzione di dispositivi salva vita contro le armi da fuoco come accennato prima, si concentrano nel campo dell'edilizia come rinforzo alle murature e al legno, e nel campo medico.

1.1.3 Tipi di matrice

Come già accennato precedentemente, la matrice è ciò che nel materiale composito deve tenere unite le fibre del rinforzo; dunque, non ha proprietà riguardanti l'interazione con sollecitazioni esterne, ma riguardo l'integrità del composito, e la protezione delle fibre che esso contiene.

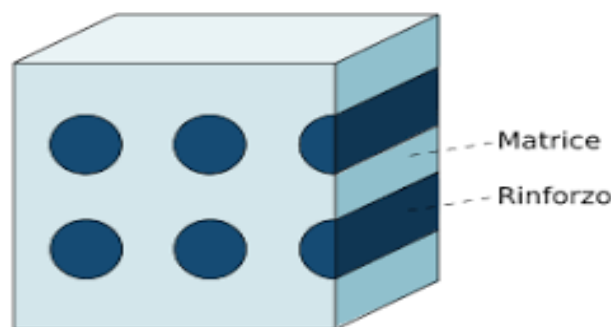


Figura 1.12: Matrice e rinforzo

Le matrici possono essere di vari materiali, che siano metallici, ceramici o plastici, le matrici più utilizzate però sono quelle di materiale plastico o, meglio, "polimerico".

I materiali polimerici si suddividono in 2 grandi classi: termoplastici e termoindurenti, queste due classificazioni indicano, come si intuisce anche dal nome, il tipo di comportamenti che essi hanno a contatto con il calore, i materiali termoplastici sono materiali che, quando sottoposti ad una fonte di calore, diventano malleabili e lavorabili, è chiaro dunque che siano materiali da poter

riutilizzare e adatti al riciclo, visto che il cambiamento di forma è dettato semplicemente dall'apporto di calore.

È una classe di materiali in cui è possibile spaziare tra le caratteristiche che si necessitano, ma necessita di particolare attenzione riguardo le temperature usate durante il riscaldamento: superando la T_g “Temperatura di transizione vetrosa” passano dallo stato solido ad uno viscoso, è necessario dunque conoscere questa temperatura per essere certi di lavorare con il polimero nello stato della materia desiderato.[5]

Questo tipo di materiali è molto utilizzato nella stampa 3D vista la capacità, come già detto, di essere fusi e ri-solidificati senza perdere le caratteristiche.

Di seguito si elencano alcuni di questi materiali e le rispettive caratteristiche che li contraddistinguono:

- ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene): è un materiale resistente agli urti, con una buona resistenza meccanica, elevata tenacità e buona resistenza chimica.
- PLA (Polylactic Acid): Biodegradabile e sostenibile è ottimo per applicazioni di ultima generazione proiettando la produzione verso l'uso di materiali riciclabili e meno inquinanti, è inoltre molto facile da stampare, quindi ottimo per utilizzi in Additive Manufacturing.
- PETG (Polyethylene Terephthalate Glycol): è un termoplastico appartenente alla famiglia del poliestere, anch'esso resistente agli urti, con resistenza chimica notevole, e facile da stampare; è ottimo nel caso si voglia personalizzare il pezzo prodotto poiché essendo trasparente può essere colorato a piacimento. Dunque, questo materiale, per quanto versatile, non è il più adatto alla produzione di parti che debbano resistere a sollecitazioni; ma a differenza di altri materiali presenta una bassa igroscopia: assorbe meno l'umidità ambientale.

Anch'esso soffre, come molti dei termoplastici, del fenomeno del “warping”, si distacca facilmente dal letto di stampa, imponendo l'uso di letto riscaldato o colle apposite per stampa 3D.[6]

- Nylon (Poliammide): uno dei migliori materiali quando si parla di prestazioni meccaniche, è molto utilizzato in applicazioni che richiedano componenti robusti, difatti presenta un'ottima resistenza meccanica, e all'abrasione, buona resistenza chimica, e basso coefficiente d'attrito. Rispetto agli altri materiali polimerici inoltre presenta una bassa densità il che la rende leggera.

Questo materiale eccellente, però, presenta anche alcuni svantaggi che di devono tenere in considerazione quando ne si pianifica l'utilizzo: è un materiale che presenta un alto grado di igroscopia, ovvero assorbe facilmente umidità dall'ambiente circostante, il che impone processi di essiccazione per evitare cali nelle prestazioni meccaniche e cambiamenti dimensionali.

In ambito di Additive Manufacturing invece bisogna tener conto, oltre all'igroscopia, anche della non corretta adesione al piatto di stampa e della deformazione durante il raffreddamento.[7]



Figura 1.13: fili da cucito in Nylon

I materiali termoindurenti invece sono polimeri che una volta induriti non possono essere ri-ammorbidenti o fusi. Gli utilizzi spaziano dai rivestimenti alle resine per creare materiali compositi ad alte prestazioni, sono materiali con un'eccellente resistenza meccanica e chimica.

La lavorazione di questi materiali avviene tramite calore o agenti chimici che facciano da catalizzatore così da avere le proprietà desiderate.

Elenco di seguito i tipi di matrice che vengono comunemente utilizzati per produrre materiali compositi di ultima generazione:

- Resine epossidiche: Le resine epossidiche sono di colore trasparente ambrato, quasi inodore. Utilizzate in applicazioni critiche, in abbinamento con fibra di vetro, di carbonio e aramidiche.
Sono resine dalle alte proprietà adesive, perfette per incollaggi sia di materiali semplici (legno e carta...) che di materiali più duri (acciaio e leghe di

alluminio), dunque ottime a svolgere i compiti di protezione e integrità delle fibre del composito.

Assicurano ottima resistenza chimica, eccellente resistenza alla corrosione, isolamento elettrico e ottima resistenza meccanica al calore.

Una volta polimerizzate, garantiscono minimo ritiro e buone stabilità dimensionale e comportamento alla fatica, sono ideali per prestazioni gravose, ove richieste elevate di rigidità e forza.

Grazie alle loro caratteristiche meccaniche, le resine epossidiche sono ampiamente utilizzate nell'industria aerospaziale.



Figura 1.14: Resina epossidica utilizzata per l'incollaggio del legno nei prodotti di design

- Resine poliestere: La resina poliestere si presenta come una colata trasparente dal forte odore dato dalla presenza dallo stirene.

Presentano buona resistenza meccanica e chimica, discrete proprietà elettriche e buona stabilità dimensionale. Le resine in poliestere trovano applicazione principalmente nel settore edile e nel settore industriale, per la produzione di componenti di veicoli e mezzi di trasporto, nella costruzione di imbarcazioni.

Ma grazie alle loro elevate proprietà di penetrazione, le resine poliestere sono anche particolarmente adatte per l'incollaggio con le fibre di vetro. Una volta induriti, i pezzi sono particolarmente resistenti alle intemperie ed all'acqua. Inoltre, resistono discretamente agli acidi diluiti, non ossidanti e alle soluzioni saline acquose.

- Resine vinilestere: in termini di qualità di applicazione le resine vinilestere sono una via di mezzo tra le resine epossidiche e quelle poliestere. Garantiscono sempre elevate prestazioni ottime proprietà meccaniche paragonabili a quelle delle resine epossidiche, elevata resistenza all'idrolisi, eccellente resistenza chimica ed alle alte temperature (fino ai 200°C), ottima resistenza all'abrasione e shock termici.

La resina vinilestere assicura un'ottima resistenza ai raggi UV, eccellente resistenza all'acqua, ai solventi organici e agli alcali. Grazie all'ottima resistenza agli ambienti difficili, la resina vinilestere è ideale per applicazioni nel settore nautico e nel settore industriale nella realizzazione di rivestimenti.

Inoltre, l'eccellente adesione alle fibre di rinforzo la rendono facilmente abbinabile sia alle fibre di vetro che a quelle di carbonio e aramidica.

Per queste sue caratteristiche (simili ad una epossidica) e per la facilità di utilizzo (simile ad una resina poliestere), la resina vinilestere si posiziona come la soluzione migliore per ottenere un composito sia rigido, che resistente agli ambienti difficili. [8]

1.1.4 Tecnologie di fabbricazione dei materiali compositi

Esistono varie tecniche e metodi di produzione dei materiali compositi che si differenziano tra loro in tempo di produzione del materiale, integrità del materiale, numero di processi da eseguire e soprattutto costi di produzione e dei macchinari stessi.

Il primo di questi metodi che si analizza è la Pultrusione: è uno dei metodi più utilizzati a livello industriale, si caratterizza per una particolare facilità di realizzazione: consiste nell'immergere le fibre soggette a trazione in un bagno di resina impregnandole, successivamente vengono compresse senza utilizzare calore per rendere il materiale il più possibile compatto e uniforme, e di nuovo inserite in stampi riscaldati per dare la forma al prodotto finale.

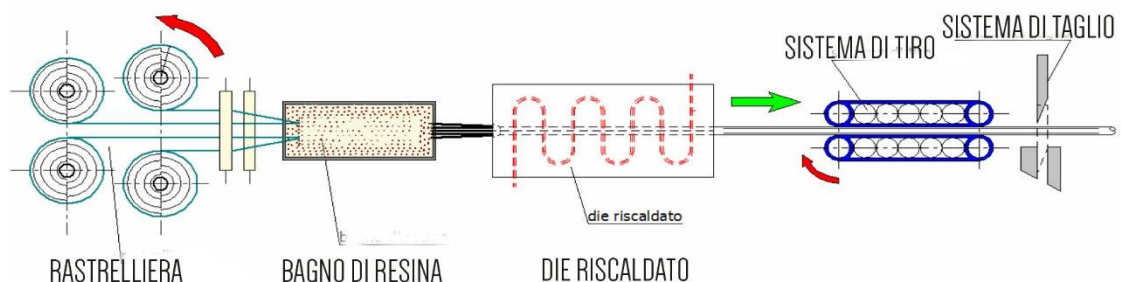


Figura 1.14 processo di pultrusione

Si procede ora con l'analisi di un processo molto utilizzato soprattutto in ambito automobilistico: l'RTM (Resin Transfer Moulding), consiste nel posizionare le fibre di rinforzo in degli stampi che vengono sigillati, la matrice polimerica viene inserita poi sfruttando l'alta pressione.

Un'altra tecnica da prendere in considerazione viste le altissime prestazioni del materiale che viene prodotto è la laminazione, essa può avvenire in autoclave o a mano.

La laminazione in autoclave è un processo molto costoso e lento, consiste nel posizionare in autoclave appunto blocchi di materiale costituiti da pannelli pre-impregnati disposti uno sull'altro, il prodotto finale è omogeneo e garantisce delle proprietà meccaniche elevatissime, per questo è una tecnica molto utilizzata in campo aerospaziale.

La laminazione a mano invece è un processo meno costoso, il procedimento è simile: i fogli di fibre vengono impregnati a mano con resina talvolta riscaldata, vengono poi posizionati uno sull'altro orizzontalmente, il tutto viene fatto passare sotto dei rulli così da rendere il materiale più omogeneo possibile.

La laminazione a mano invece è un processo meno costoso, il procedimento è simile: i fogli di fibre vengono impregnati a mano con resina talvolta riscaldata, vengono poi posizionati uno sull'altro orizzontalmente, il tutto viene fatto passare sotto dei rulli così da rendere il materiale più omogeneo possibile.[9]

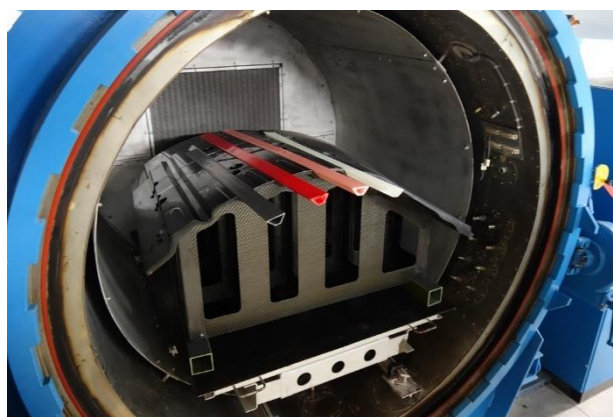


Figura 1.15 laminazione in autoclave

Un'altra soluzione sempre più all'avanguardia nella produzione dei materiali compositi, è l'additive manufacturing.

Come suggerisce il nome si tratta di tecnologia capace di aggiungere materiale, addizionarlo, per creare un oggetto in 3D.

Questo tipo di tecnologia negli ultimi anni si è espansa moltissimo, esistono molteplici tipi di dispositivi che in questo caso vengono chiamati, perché lo sono a tutti gli effetti stampanti. A livello industriale, queste attrezzature sono molto costose, ed il tempo di stampa è elevato.

Nonostante ciò, la convenienza, in questa modalità di produzione, è che il flusso di lavoro è suddiviso tra software che permette di scegliere quali parametri di stampa variare e di quanto variarli, e la stampante stessa nella quale si introduce il file tramite scheda SD, dunque questo tipo di produzione è molto utilizzata per la facilità e i pochi passaggi da dover seguire.

Oltre ciò si menzionano anche i molto minori materiali di scarto rispetto agli altri tipi di produzione.[10]

1.2 Additive Manufacturing

L'Additive Manufacturing o produzione additiva, è un processo industriale impiegato per fabbricare oggetti partendo da modelli 3D computerizzati, aggiungendo uno strato sopra l'altro.

Con il termine produzione additiva ci si riferisce non solo alla specifica tecnologia di fabbricazione, ma per estensione a tutte le implicazioni aziendali legate a questo tipo di manifattura che ricadono su aspetti economici, finanziari, logistici, strategici.

La stampa 3D nasce nel 1986 con la pubblicazione del brevetto di Chuck Hull che inventa la Stereolitografia: “Un sistema per generare oggetti tridimensionali basato sulla creazione di un modello trasversale dell'oggetto da costruire...”.

Dal 1986 la stampa 3D si evolve e cambia con l'introduzione di nuove tecniche e nuovi materiali.[8]

Il processo di stampa 3D come citato sopra, non è un processo assistente, è necessario l'ausilio di software che innanzitutto creino il modello in 3 dimensioni del pezzo da stampare (un esempio chiaro e molto utilizzato a livello didattico è Solid Edge), e successivamente un ulteriore software in grado di creare un file “G-Code”: unico formato di file che le stampanti 3D possono decodificare; il linguaggio GCODE, infatti, contiene tutti i comandi che la stampante 3D deve

eseguire a partire dai movimenti del blocco estrusore nelle tre direzioni principali: X,Y,Z.

Il trasferimento del file GCODE dal PC alla macchina avviene tramite qualsiasi dispositivo di trasferimento dati: porta USB, scheda SD ecc...

Fatto ciò basta verificare, ma è facoltativo, che la stampante funzioni come deve, di solito è possibile farlo dal pannello di controllo della stessa, comandando l'estrusione del materiale e verificando appunto che non ci siano problemi nella sua uscita dall'ugello; a questo punto non resta altro che far partire la stampa e attendere la fine del processo.

1.2.1 Applicazioni dell'additive manufacturing

La stampa 3D si usa ormai molto comunemente in vari campi: nell'industria, nell'automotive e aerospace, nella medicina, per la ricostruzione di ossa e in moltissimi altri campi. Ciò non toglie che la stampa 3D possa essere utilizzata anche in ambito artistico.

Come già accennato è un tipo di produzione molto aperta, i campi di applicazione come si può capire sono molteplici, inoltre, è un tipo di produzione che rispetta i canoni di un mondo che si avvia verso una produzione sempre più sostenibile, poiché rispetto agli altri tipi di produzione come le tecniche sottrattive, o la fonderia, permette di creare molti meno materiali di scarto e conseguentemente meno spreco.

Nello specifico i campi di applicazione sono molteplici, già in ambito aerospaziale, navale e dei trasporti la produzione è immersa nel campo dell'additive manufacturing. Il motivo di ciò è la possibilità di diminuire il peso mantenendo forma e prestazioni meccaniche invariate; ciò viene definito ottimizzazione topologica.

L'ottimizzazione topologica è infatti un metodo di progettazione digitale che permette di trovare, mediante formule matematiche, la distribuzione ottimale del materiale in un dato volume soggetto a vincoli meccanici più o meno importanti, dunque di togliere materiale nelle parti meno soggette a sollecitazioni.[9]

Altri campi di applicazione sempre più in via di sviluppo sono l'edilizia attraverso sistemi che depositano il cemento, nella gioielleria e nella moda, dove la richiesta ricade sulle geometrie complesse e la possibilità di spaziare: entrambe caratteristiche di rilievo dell'Additive Manufacturing.

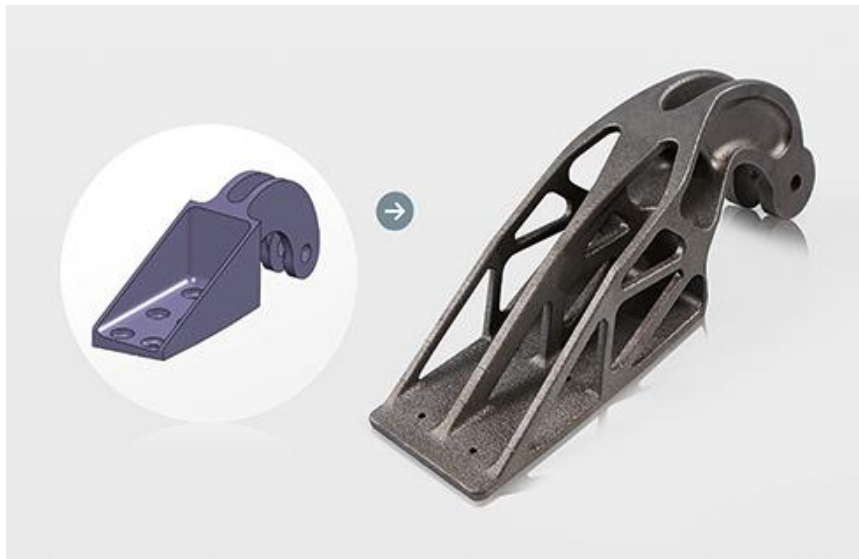


Figura 1.16: Ottimizzazione topologica

1.2.2 Materiali per la stampa 3D

La stampa 3D vede l'uso di molti materiali di tipo polimerico, essendo i primi e più facili ad essere stampati, ce ne sono molti, ma, quelli più usati, sono:

- ABS
- ASA
- PLA
- PETG
- PP
- NYLON

Alcuni di essi sono già stati ampiamente analizzati precedentemente (cap. 1.1.3) studiando i vari tipi di matrice per i materiali compositi, verranno dunque descritti i restanti non analizzati in precedenza.

L'ASA (acrilonitrile stirene acrilato) è un polimero molto simile all'ABS, ma con aggiunta, una capacità migliore di resistere ai raggi UV e all'acqua; perciò, non assume il classico colore giallastro con il passare del tempo.

Il polipropilene: PP è una delle plastiche più usate, le sue caratteristiche sono da tenere in considerazione nel caso si necessiti la produzione di pezzi con buone proprietà meccaniche: resiste agli sforzi senza rompersi e resiste agli agenti chimici, è inoltre adatto al contatto con la pelle. La difficoltà in questo caso è di tipo tecnologico, impone un calcolo accurato delle dimensioni del modello visto il suo enorme ritiro volumetrico durante la stampa.



Figura 1.17: Pannelli di polipropilene alveolare

La stampa 3D però è oramai abilitata da tempo anche alla stampa di materiali compositi, quali la poliammide con fibra di vetro o il filamento in nylon carbonio, ed altri ancora, è chiaro dunque che in questo caso le prestazioni aumentano di gran lunga, ma lo fanno di pari passo con i costi e il tempo di produzione.[10]

L'Additive Manufacturing però non si limita alla stampa di materiali polimerici, negli ultimi anni sono state sviluppate tecniche di stampa 3D anche per altri materiali e per altre applicazioni.

Anche i metalli ora possono essere stampati con la manifattura additiva:

La stampa diretta in metallo (DMP), detta anche sinterizzazione laser diretta in metallo (DMLS), è una tecnologia di produzione additiva che consente di costruire parti in metallo complesse di alta qualità. Nella macchina, un laser a elevata precisione viene direzionato verso le particelle di polvere di metallo per costruire strati metallici orizzontali uno dopo l'altro. Questa tecnologia d'avanguardia consente la produzione di parti metalliche con geometrie complesse, altrimenti impossibile con le tecnologie di fusione o sottrazione tradizionali. È disponibile una vasta gamma di metalli funzionali per la stampa di progetti. [12]

Si possono elencare brevemente i metalli utilizzati maggiormente in queste applicazioni:

- Alluminio (AlSi10Mg) presenta una buona forza e proprietà termiche, è un materiale leggero utilizzato molto nel campo automobilistico e aerospaziale.
- Titanio (Ti6Al4V): è una lega di titanio leggera con eccellente forza meccanica e ottima resistenza alla corrosione, è ideale per oggetti ad alte prestazioni.
- Acciaio inossidabile (SS316L): è una lega di acciaio inossidabile a basso contenuto di carbonio ("L"), garantisce ottima robustezza, e come da nome una buona resistenza alla corrosione.
- Acciaio inossidabile (C465): è una tipologia di inox induribile per invecchiamento, offre una forza e tenacità eccellenti alle fratture, e anch'esso come ricorda il suo nome è resistente alla corrosione; queste caratteristiche lo rendono ottimo per la realizzazione di pezzi con alte prestazioni e una via di mezzo dal punto di vista del costo.[11]

La grande innovazione tecnologica della manifattura additiva, come già accennato è nel campo dell'edilizia, è proprio per questo che anche il cemento può prendere il nome di materiale adatto per la stampa 3D.

1.2.3 Tipologie di stampanti 3D

Esistono diversi tipi di stampanti 3D, che si differenziano tra loro principalmente a seconda del materiale, e dalla modalità con cui lo depositano.

La prima tecnica di stampa 3D sviluppata è stata la Stereolitografia (SLA) il principio di funzionamento è quello di esporre la resina liquida fotosensibile ad un raggio laser, l'oggetto viene costruito a strati e la resina si solidifica.

In generale, però, l'additive manufacturing ad oggi è molto diffuso, e l'accesso alla stampa 3D è alla portata di tutti, in genere le stampanti cosiddette "da scrivania" (ma non solo esse) sono stampanti FDM: Fused Deposition Modeling o anche FFF (Fig. 1.17) (Fused Filament Fabrication), il cui principio è il deposito di filamento riscaldato dal basso verso l'alto creando i vari strati. Questo è il tipo di stampa 3D più diffusa anche nelle aziende e nelle scuole vista la sua facilità di applicazione, e soprattutto viste le dimensioni che le più piccole di esse hanno.

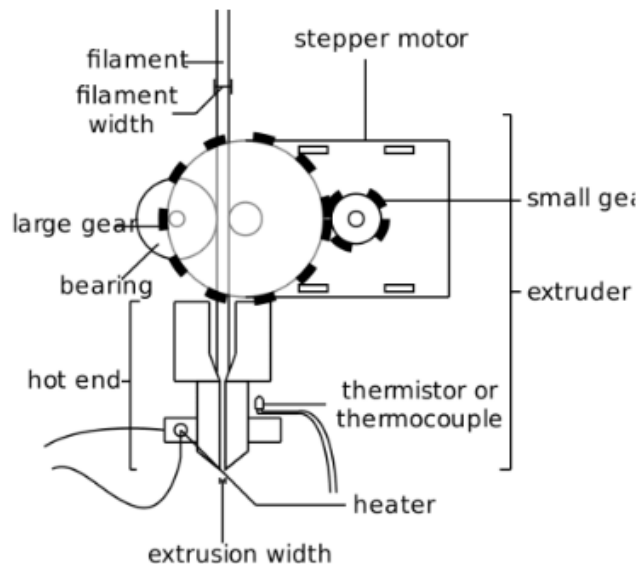


Figura 1.10. Schema di funzionamento di una stampante FFF

I punti di forza della stampa di tipo FFF (o FDM) sono: una grande gamma di materiali da poter utilizzare, la possibilità di colorarli e una buona finitura superficiale, ma i manufatti terminati sono fragili, non adatti per le parti meccaniche.

Il funzionamento è basato sul passaggio del filamento di plastica attraverso un estrusore, esso ha la possibilità di riscaldarsi alla temperatura desiderata, il materiale termoplastico, successivamente, fonde ed esce dall'ugello.

Ogni stampante ovviamente è dotata di un sistema di spostamento lungo X Y Z, che sia dell'estrusore o del piatto (o piastra di costruzione) per poter creare il manufatto.

Le stampanti FDM esistono anche in una variante a doppio estrusore, il che significa poter stampare due materiali contemporaneamente, scegliendo dove depositare l'uno e l'altro, il vantaggio in questo caso è chiaro: poter scegliere di depositare il materiale più resistente nelle zone sollecitate del pezzo, o il materiale dal carattere estetico desiderato nella zona per l'appunto desiderata.

Un'altra applicazione derivata dalla presenza del doppio estrusore è la stampa di materiali compositi, ovvero, depositare un materiale che funga da matrice, e uno che funga da rinforzo stratificandoli; la stampa 3D di materiali compositi verrà approfondita nel prossimo capitolo.

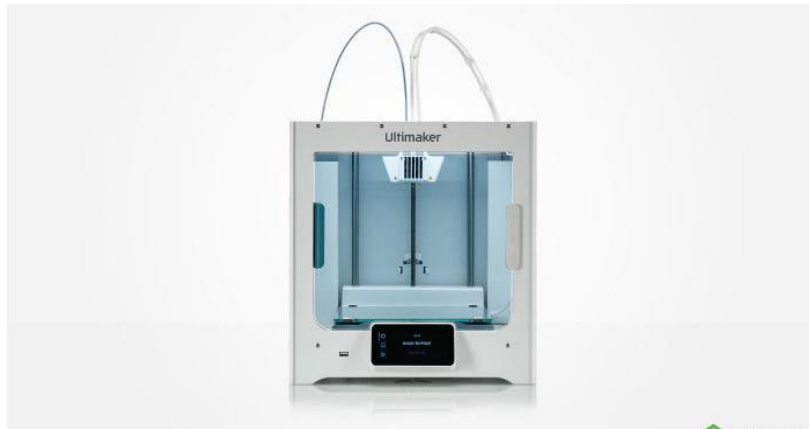


Figura 1.19: Stampante FDM

Per la stampa di oggetti nell'ordine del millimetro, per i quali le stampanti FDM non sono abbastanza efficienti, è frequente, invece, l'uso della stampa "VP" o Polimerizzazione in Vasca, i tipi più diffusi sono la SLA e la DLP. Il processo consiste nell'uso di una sorgente di luce per polimerizzare la resina utilizzata, la quale diventando solida crea l'oggetto desiderato.

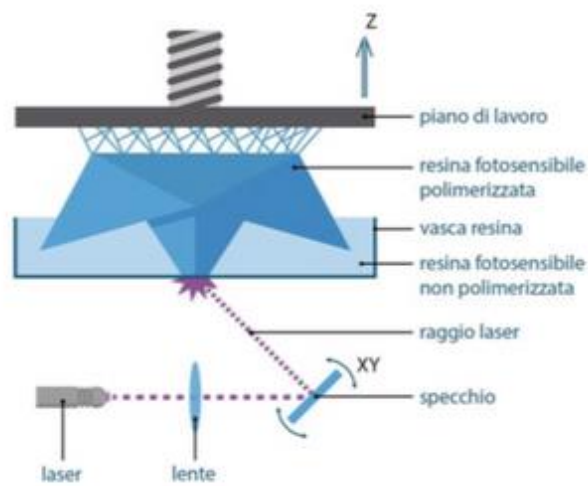


Figura 1.20: Schema di stampa SLA

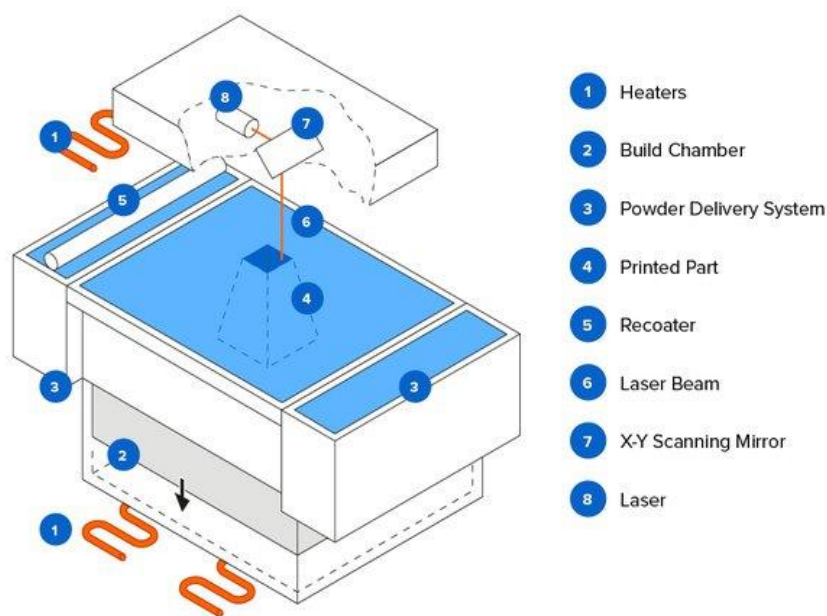
Il problema principale in questo tipo di stampa però è la quantità di post-elaborazione richiesta: mentre in una "semplice" FDM l'oggetto può essere usato immediatamente dopo la stampa, o comunque l'unico passaggio necessario è la rimozione delle strutture di supporto.

Con la stampa VP invece c'è la necessità di lavare il manufatto in alcool per sciogliere la resina non polimerizzata, e procedere poi all'esposizione del pezzo ai raggi UV per dare luogo ad una seconda polimerizzazione; è chiaro dunque che il limite di questa applicazione è il tempo impiegato per ottenere il manufatto pronto all'uso.

SLS invece sta per Sinterizzazione Laser Selettiva, ciò significa che sottili "perle" di materiale vengono incollate tra loro una volta sottoposte ad un raggio laser, si utilizza nel caso di materiali plastici o metallici.

In questo caso le proprietà meccaniche del pezzo, che esce già finito dalla stampa, sono eccellenti.

Come suggerisce il nome, questo tipo di stampa comporta l'uso di un laser per riscaldare selettivamente un serbatoio di materiale polverizzato ad una temperatura che consenta alle particelle di aderire tra loro, ciò viene fatto strato per strato per creare il manufatto che si desidera. [13]



1.2.4 Additive Manufacturing e materiali Compositi

L'uso di materiali compositi nell'Additive Manufacturing è necessario nel caso in cui si vogliano creare pezzi che abbiano proprietà meccaniche più elevate rispetto ai pezzi stampati "semplicemente" in materiali polimerici.

Le tecnologie utilizzate per produrre materiali compositi tramite tecniche di Additive Manufacturing sono principalmente la FFF, la SLS, la SLA e la AFP, mentre le prime tre sono tecniche utilizzate normalmente nell'AM e quindi già citate precedentemente, la terza invece è maggiormente usata per la produzione di compositi: consiste nel tirare strisce di nastro unidirezionalmente lungo una superficie, i nastri possono essere impregnati di resina o asciutti, e successivamente riscaldati e pressati nello stampo (Fig.1.21) ; è un tipo di stampa che non permette di spaziare molto con le forme del pezzo da fare, ma consente di usare resine termoplastiche o termoindurenti.



Figura 1.22: Stampa AFP, deposito del materiale

Il rinforzo, come citato nel capitolo primo, può essere inserito nella matrice in varie forme: a fibre corte e a fibre lunghe. Il processo a fibre corte richiede l'uso in primis di un frullatore meccanico col quale si possa mischiare la resina con le fibre, mentre quello a fibre lunghe non richiede passaggi preliminari oltre all'impregnazione del filamento di rinforzo in un bagno di resina; il tutto prosegue, nel caso di stampa FFF, con l'estrusione del filamento dall'ugello, così da essere depositato.

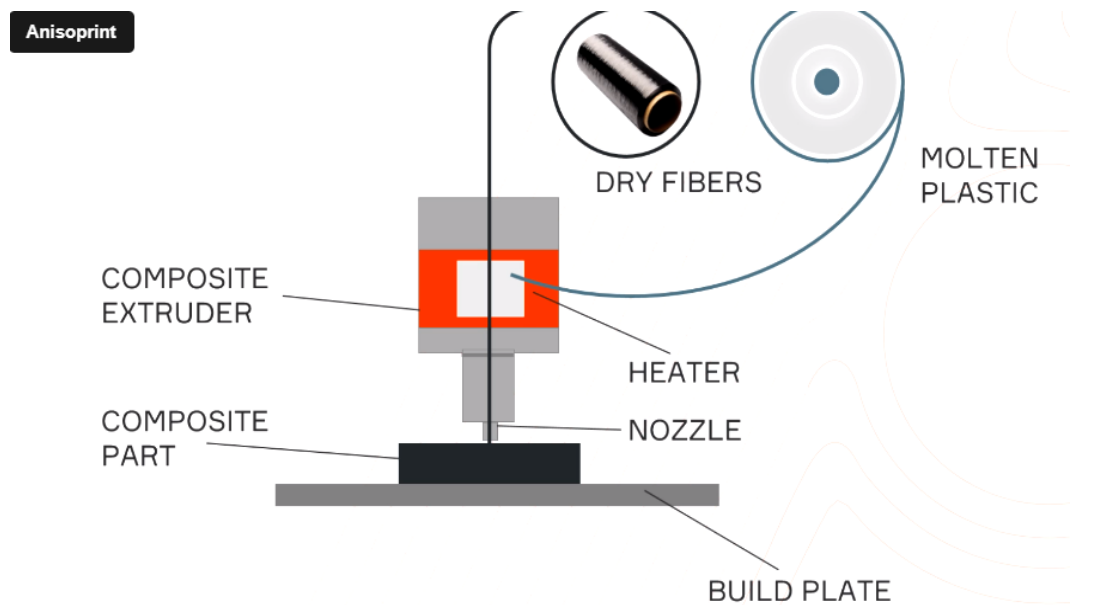


Figura 1.23: Schema di una stampante FFF per fibra lunga di Anisoprint

1.2.4.1 Stampa 3D a fibre continue

Questo tipo di processo implica l'uso di una stampante abilitata della funzione di co-estrusione, ovvero la possibilità di estrudere contemporaneamente due materiali. (Fig. 1.22)

In termini di resistenza le parti in fibra di carbonio stampate mediante questa tecnologia si avvicinano molto alle parti in fibra di carbonio tradizionali. Come già accennato, i filamenti di fibra lunga di carbonio vengono impregnati con un binder di resina epossidica e combinati con materiale plastico per rafforzare in maniera selettiva piani o assi di pressione.



Figura 1.24: Bobina di fibra lunga di carbonio

Alcune stampanti, inoltre, avendo due ugelli di estrusione, permettono la stampa delle fibre continue e la plastica insieme ad un materiale puramente termoplastico.

Chiaramente il limite rispetto alla tradizionale produzione di parti in fibra di carbonio è la minore libertà di design, le parti prodotte resistono maggiormente lungo la direzione principale della fibra, è bene dunque orientare correttamente la direzione di stampa lungo quella prevista e designata per la resistenza alla sollecitazione.[11]

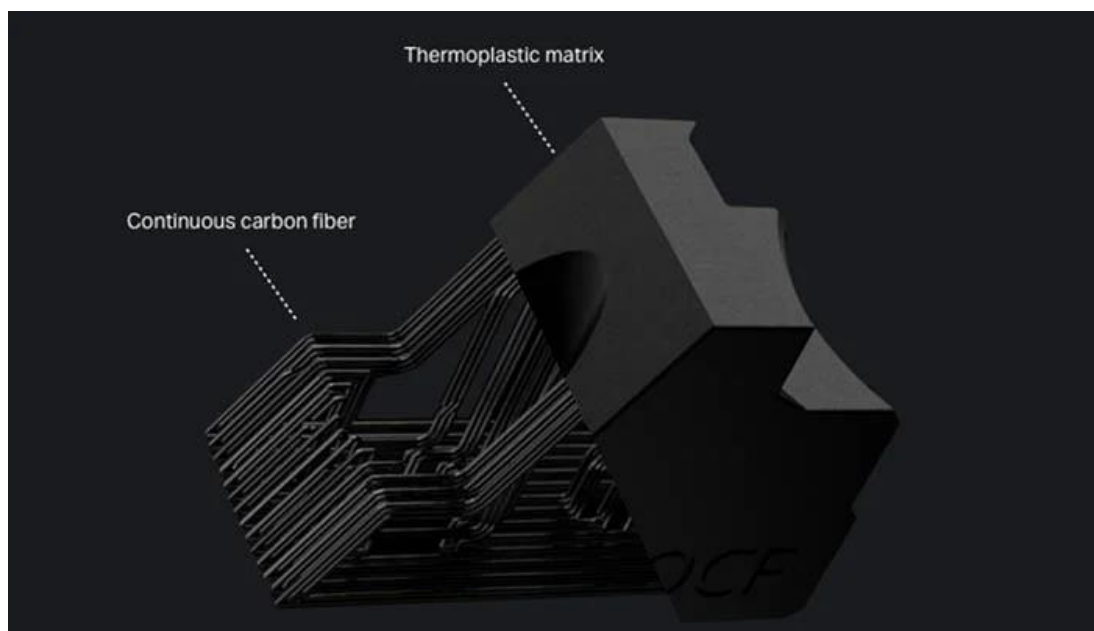


Figura 1.25: Pezzo stampato in fibra lunga di carbonio

Nel capitolo 1.2.1 è già stato analizzato il processo di stampa 3D a partire dal software per creare il file STL, nonché il file contenente il modello 3D del pezzo da fare, passando poi per il GCODE, il tipo di file che le stampanti 3D possono leggere e decodificare per poi stampare.

Nel caso della stampa 3D di materiali compositi a fibre lunga di carbonio, quindi, il software di slicing utilizzato deve essere abilitato per poter cambiare i parametri di stampa del composito, essi sono diversi chiaramente dai normali parametri di stampa dei polimeri, a partire dalle più alte temperature, e alle velocità di stampa minori; questo perché essendo il filamento rigido, a velocità alte rischia di non aderire in maniera ottimale alla superficie sulla quale viene depositato, distaccandosi dal piatto di stampa e compromettendo conseguentemente il processo.

1.3 Tomografia industriale computerizzata

La tomografia industriale computerizzata 3D è una tecnica avanzata di controllo non distruttivo, essa consente di studiare la struttura interna ed esterna dei componenti presi in considerazione, ed individuarne le caratteristiche senza dunque danneggiarli.

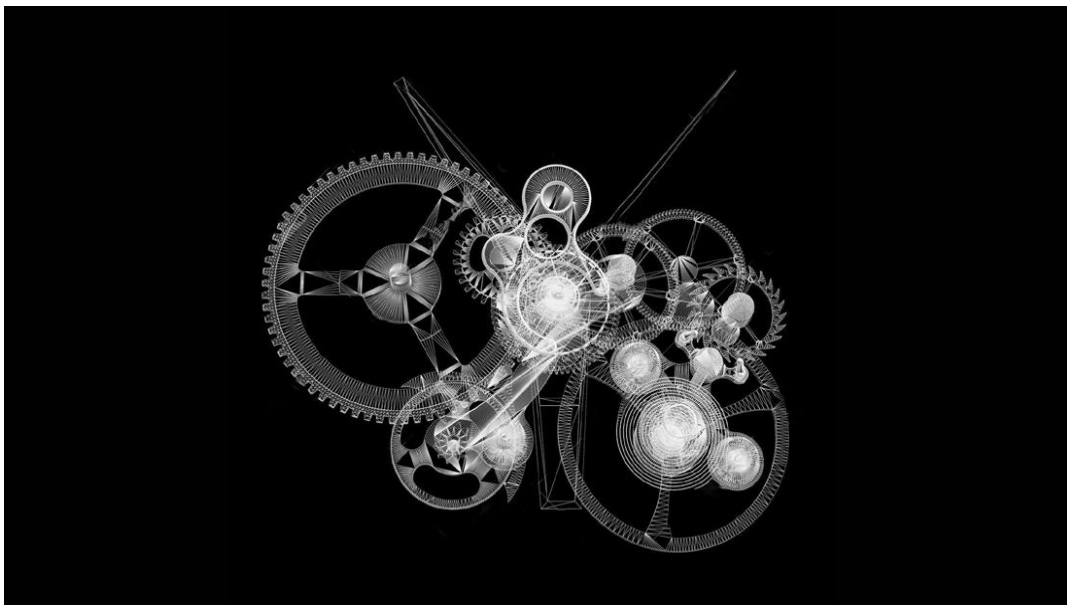


Figura 1.26: Risultato della tomografia industriale

Questa tecnica non invasiva permette perciò di individuare i difetti, le porosità presenti, le inclusioni e le distorsioni, può essere dunque un processo fondamentale in una situazione di ricerca analizzando il provino prima e dopo i test meccanici.

La tomografia industriale è inoltre utile per ottenere misurazioni accurate degli oggetti, da ciò ne deriva un'importante applicazione nel controllo qualità e la ricostruzione CAD.

In conclusione si può definire come un processo di controllo e ispezione fondamentale in ambito industriale che permette all'azienda produttrice di migliorare il processo produttivo, aumentando l'efficienza riducendo costi.



Figura 1.27: Pezzo sottoposto a tomografia industriale

1.4 Prove di caratterizzazione meccanica dei materiali.

Le prove di caratterizzazione meccanica dei materiali sono prove unificate per conoscere il comportamento del materiale quando sottoposto a diversi tipi di sollecitazione meccanica. In generale le prove principali sono quella di trazione, flessione, compressione e torsione.

Le macchine che permettono la messa in atto di queste prove sono macchine generalmente azionate mediante l'uso di un fluido in pressione, di solito olio o aria.

È importante, quando si fa una prova meccanica, seguire la normativa che la riguarda, così da poter avere valori unificati e confrontabili con altre prove di materiali diversi; ciò permette quindi di stabilire qual è il materiale più adatto in base alle esigenze.

1.4.1 Prova di trazione

La prova di trazione è una prova di caratterizzazione dei materiali che consiste nel sottoporre un provino di dimensioni standard (descritte da una apposita norma UNI) di un materiale in esame ad un carico monoassiale inizialmente nullo che viene incrementato fino a un valore massimo che determina la rottura del materiale. È la più utilizzata tra le prove meccaniche distruttive poiché fornisce una descrizione quantitativa del comportamento del flusso plastico del materiale.

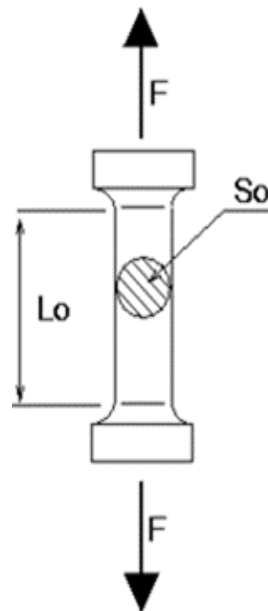


Figura 1.28: Provino di trazione

Il provino di trazione è costituito da due teste che con degli afferraggi che permettono il fissaggio alla macchina, un tratto utile su cui avvengono le deformazioni, e due raccordi che collegano le due zone ed evitano che si formino zone di concentrazione di tensione negli spigoli vivi.

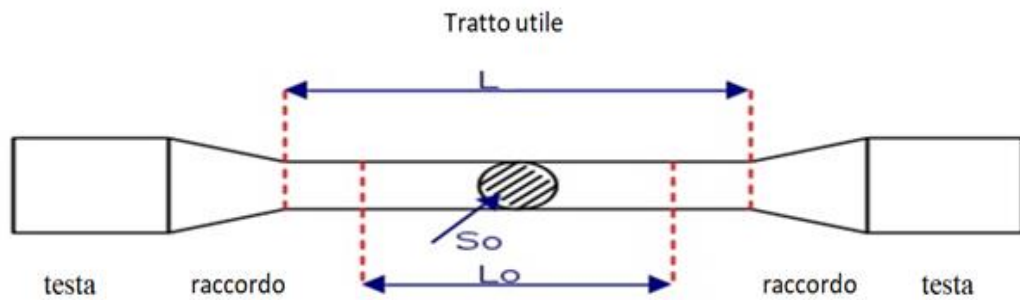


Figura 1.29: Provino di trazione e le rispettive parti

Siano A_0 l'area della sezione iniziale del provino, L_0 la sua lunghezza iniziale, P il carico di trazione applicato, L la lunghezza del provino deformato; mettendo in relazione la tensione nominale (s) e la deformazione nominale (e)

$$s = \frac{P}{A_0}$$

$$e = \frac{L - L^0}{L^0} = \frac{L}{L^0} - 1$$

Si ottiene la curva dei valori nominali. (Fig. 1.29)

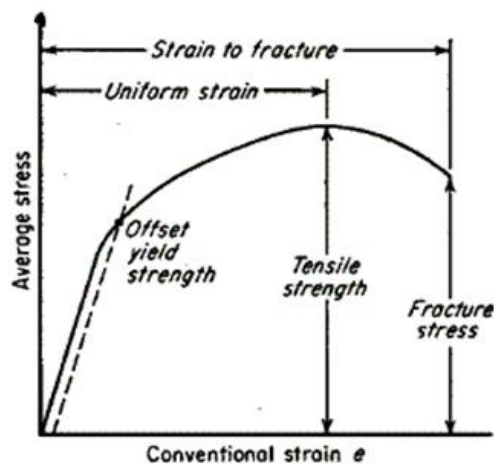


Figura 1.30: Curva dei valori nominali

Dal grafico si possono individuare diverse zone: un tratto iniziale rettilineo, detto “Tratto elastico”, così chiamato perché le deformazioni in quella zona sono puramente elastiche e dunque descritte dalla legge di Hooke, oltre quel tratto si entra nella zona della deformazione plastica.

Lo snervamento del materiale è difficile da determinare per tutti i materiali, in linea di massima però può essere definito dal carico a cui corrisponde una deformazione plastica dello 0,2%.

Procedendo con la prova nell'area della deformazione plastica si nota un aumento dello sforzo dovuto all'incrudimento del materiale che deformandosi riorganizza la sua struttura interna, è una fase dove non c'è perdita di materiale; dunque, l'allungamento desiderato corrisponde ad una diminuzione della sezione del provino.

L'avanzamento della prova causa il fenomeno della strizione localizzata, una forte riduzione della sezione in corrispondenza del punto più debole nel quale per la relazione precedente la tensione nominale aumenta e deforma il provino.

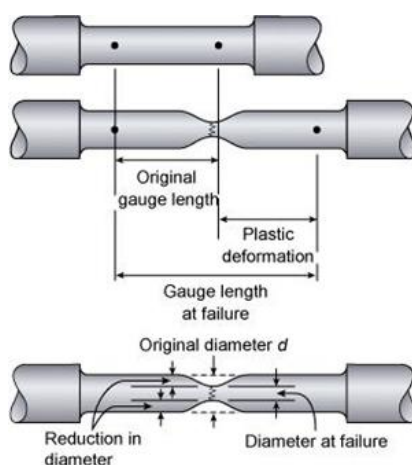


Figura 1.31: Strizione nel provino

A livello pratico non è utile far riferimento ai valori nominali, bensì risulta più opportuno rappresentare la curva dei valori reali, ovvero la curva che relaziona i

valori di tensione reale (σ) e della deformazione reale (ε) che tengono conto delle dimensioni che il campione assume istante per istante nel corso della prova.

Sono di seguito rappresentate le rispettive formulazioni

$$\sigma = \frac{P}{A}$$

$$\varepsilon = \int_{L_0}^L \frac{dl}{l} = \ln \frac{l}{l_0} = \ln \frac{A_0}{A}$$

“A” è l’area istantanea e “dl” l’incremento di lunghezza che il provino subisce durante la prova.

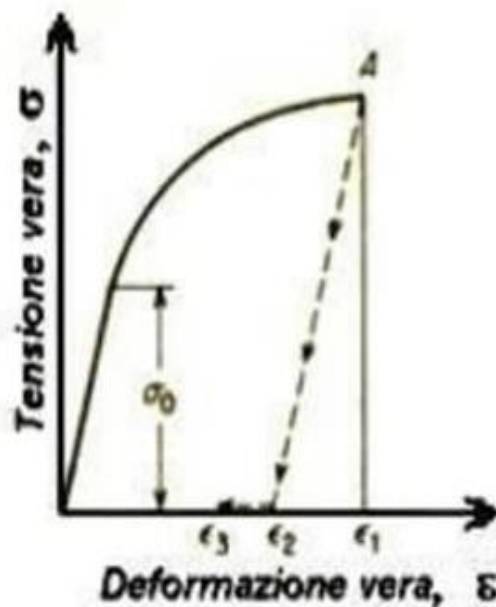


Figura 1.32: Curva dei valori reali

Come nella curva dei valori nominali, anche in questo caso si individua una zona lineare di deformazione elastica ed una zona di deformazione plastica non lineare che inizia una volta oltrepassata la tensione di snervamento.

Caricando il provino fino al valore A e scaricando successivamente il carico il provino recupererà la parte di deformazione elastica, trovare la deformazione finale dalla curva consiste proprio nel tracciare una parallela al tratto elastico fino all'asse della deformazione.

I macchinari utilizzati di norma per le prove di trazione lavorano mediante l'uso di un fluido in pressione, la rottura dei provini avviene diversamente in base al materiale preso in esame, un materiale duro e fragile presenterà un fenomeno di strizione molto ridotto parallelamente ad un allungamento altrettanto basso, un materiale duttile e tenace invece presenterà un marcato fenomeno di strizione parallelamente ad un allungamento corrispondente.

La prova di trazione serve a determinare diverse caratteristiche del materiale in esame, tra cui la resistenza meccanica e il modulo di Young (E).[12]

1.4.2 Prova di flessione

La prova di flessione misura il comportamento del materiale quando sottoposto ad un carico di trave semplice, che si traduce in una combinazione di tensione compressione e taglio; viene solitamente applicata su materiali flessibili come polimeri e compositi.

Un test di flessione a tre punti, di norma, presenta un layout definito dalla normativa di riferimento: due incudini sulle quali poggia il materiale, e una singola incudine superiore allineata nel punto centrale del provino; il procedimento è dunque chiaro: si porta a contatto l'incudine superiore con quella inferiore e si inizia la prova.

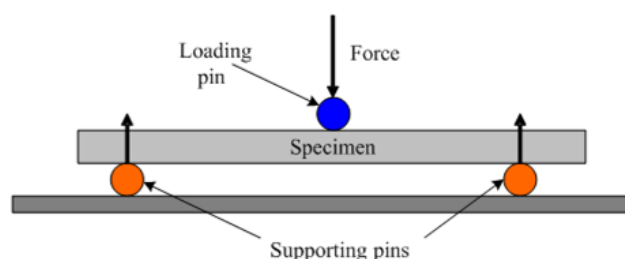


Figura 1.33: Prova di flessione a tre punti

Come per la prova di trazione i parametri come la velocità di avanzamento, lo SPAN: distanza che separa le due incudini, e molti altri sono definiti dalla normativa di riferimento.

I test di flessione vengono eseguiti su macchine di test universali. Questi sistemi sono costituiti da un telaio di test dotato di una cella di carico, software di test e accessori specifici dell'applicazione, come gli estensimetri.

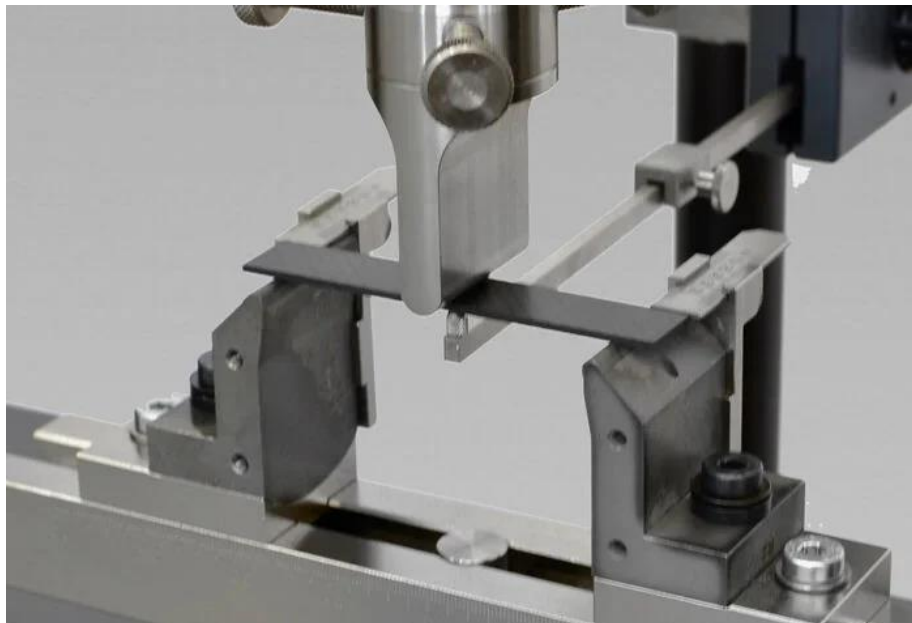


Figura 1.34: Test di flessione a 3 punti

Il tipo di materiale da testare determina il tipo di accessori necessari, da ciò ne viene che una singola macchina può essere adattata per testare qualsiasi materiale all'interno della sua gamma di forza semplicemente cambiando il fissaggio, e per l'appunto gli accessori.

Il grafico che la macchina restituisce è denominato “curva di flessione”, rappresenta la relazione tra la forza applicata al campione e la sua deformazione, fornendo informazioni sulle prestazioni del materiale stesso.

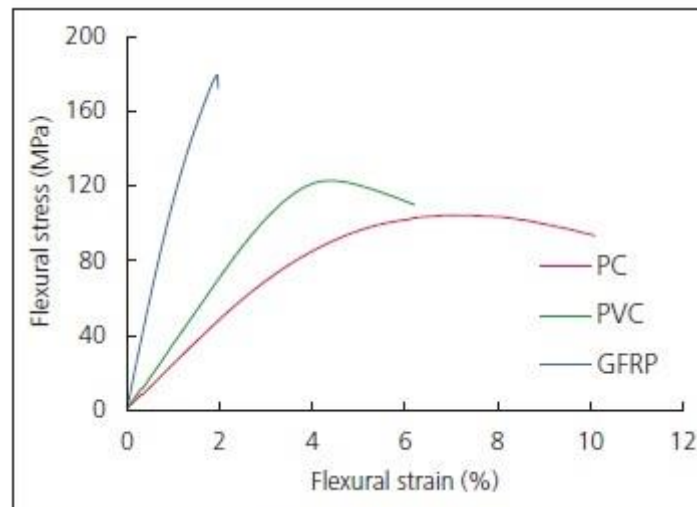


Figura 1.35: Curva di flessione

Anche la curva di flessione presenta un tratto elastico tendenzialmente lineare, in cui il materiale si deforma in maniera reversibile: togliendo il carico torna alle condizioni iniziali, e un tratto plastico, in cui la deformazione è irreversibile.

Per il test di flessione a 3 punti il massimo allungamento a flessione è definito da:

$$\varepsilon = \frac{6\delta h}{L^2}$$

Mentre la massima resistenza a flessione è definita da:

$$\sigma = \frac{3PL}{2bh^2}$$

Per questo tipo di prove i provini utilizzati sono parallelepipedi che possono essere prodotti sia con tecniche sottrattive che additive. Larghezza, lunghezza e spessore sono normati e devono chiaramente essere rispettati per non compromettere la confrontabilità della prova.[13]

1.4.3 Prova di compressione

La prova di compressione è un test per misurare i valori di resistenza-deformazione di un materiale sottoposto ad un carico schiacciante lungo l'asse z

Fornisce anch'essa informazioni sulle prestazioni del prodotto in esame, che si traducono poi in informazioni sulla qualità del materiale. Alcune di queste sono il limite elastico, il limite di snervamento, e i carichi corrispondenti.

Queste informazioni fornite vengono poi mostrate nella curva ottenuta dal test (Fig. 1.36: esempio di curva di compressione di una struttura reticolare Isogrid)

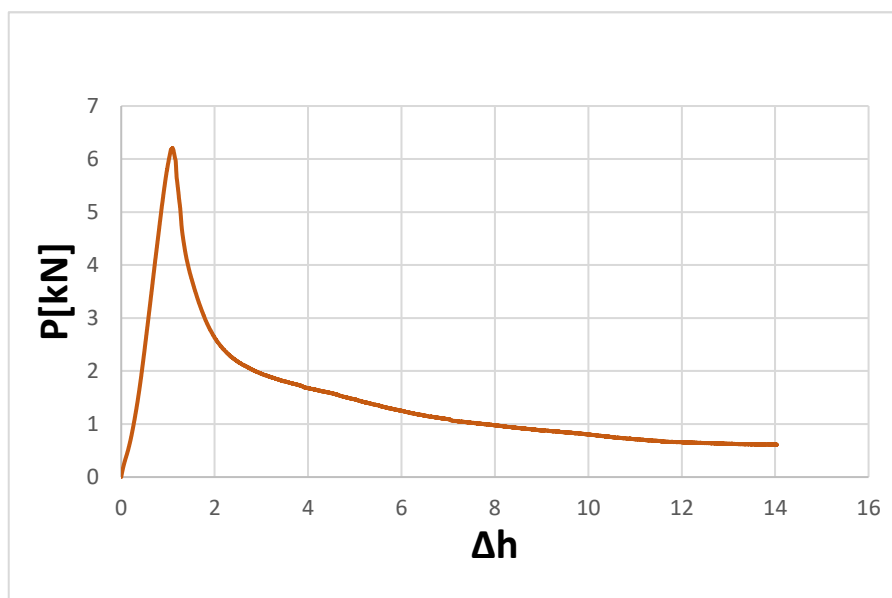


Figura 1.36: Esempio di curva di compressione

La resistenza alla compressione è un parametro di cui si tiene conto specialmente quando si prendono in analisi materiali compositi come la plastica rinforzata con fibra lunga di carbonio, il motivo è la loro grande capacità di sopportare carichi lungo la direzione del proprio asse.

Si possono calcolare sia la resistenza a compressione sia la rispettiva corsa.

Anche questa prova come tutte le prove di caratterizzazione meccanica del materiale ha il suo gruppo di normative che permettono il confronto con altri test,

dunque per risultare confrontabile è anche importante l'uso di una macchina universale ad esempio una MTS.

In questo caso la differenza sostanziale con le altre prove è la forma di provino usato, di norma un cilindro o un parallelepipedo le cui dimensioni ovviamente sono normate, la preparazione del provino chiaramente dipende dal materiale, ma di solito si opta per lavorazioni sottrattive, ciò non toglie che si possano testare anche provini prodotti con manifattura additiva.[14]

1.5 Isogrid

Le strutture isogrid apparirono per la prima volta in un brevetto della McDonnell-Douglas Corporation negli anni 60', venivano ricavate da un pezzo in lega d'alluminio, e la forma della "texture" o trama era di rinforzi formanti tra loro triangoli equilateri.

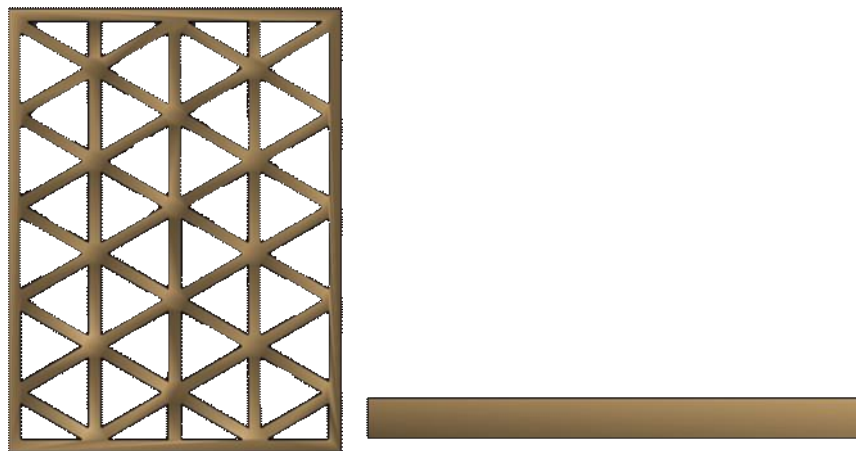


Figura 1.37: Struttura Isogrid nel piano XY e XZ

La produzione di questo tipo di strutture in alluminio però risultava essere molto costosa poiché venivano ricavate tramite processi sottrattivi, con lunghi tempi di esecuzione, e moltissimo materiale scartato.

L'avvento dei materiali compositi in fibra di carbonio, sia lunga che corta, però diede la possibilità di produrre strutture isogrid che, sottoposte a test, risultarono

avere una maggiore forza specifica e modulo più alto, che si tradussero in una maggiore efficienza.

1.5.1 Meccanica delle isogrid

Questo tipo di strutture reticolari permette di distribuire tensioni e deformazioni in maniera equilibrata lungo i lati.

La legge di deformazione delle isogrid è la seguente:

$$\varepsilon_i = \varepsilon_x \cos^2 \theta_i + \gamma_{xy} \cos \theta_i \sin \theta_i + \varepsilon_y \sin^2 \theta_i$$

Conoscendo le deformazioni lungo i lati ε_i , il modulo di Young E e la larghezza delle costole b , è possibile determinare il carico che agisce sulle tre direzioni principali:

$$P_i = b E \varepsilon_i$$

$$i = 1, 2, 3$$

Trovati i carichi si possono trovare le rispettive tensioni.

La produzione di questo tipo di strutture in alluminio però risultava essere molto costosa poiché venivano ricavate tramite processi sottrattivi, con lunghi tempi di esecuzione, e moltissimo materiale scartato.

L'avvento dei materiali compositi in fibra di carbonio, sia lunga che corta, però diede la possibilità di produrre strutture isogrid che sottoposte a test risultarono avere una maggiore forza specifica e modulo più alto, che si tradussero in una maggiore efficienza.

1.5.2 Cosa sono: utilizzi e vantaggi

Le isogrid sono strutture caratterizzate da un motivo geometrico regolare: triangoli equilateri. Esse offrono una serie di vantaggi e per questo motivo sono utilizzate in moltissimi settori.

Essendo strutture complesse da realizzare i processi sottrattivi risultano scomodi e meno praticabili vista la grande quantità di materiale di scarto e i tempi lunghi, per questo l'Additive Manufacturing è una valida soluzione per ridurre costi e tempi, in particolare l'AM di CFRP, ovvero materiali compositi in fibra di carbonio, è una validissima soluzione viste le ottime proprietà di questi materiali. Il tipo di tecnologia più utilizzata è la FDM per la facilità di applicazione.

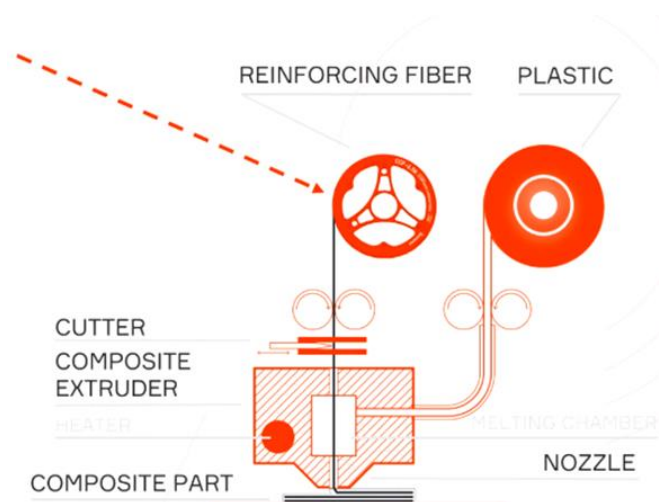


Figura 1.38: Schema di una stampante FDM a coestruzione

Gli studi che sono stati condotti inoltre hanno dimostrato che i compositi a fibra lunga di carbonio sono maggiormente efficienti rispetto a quelli a fibre corte.

Ad ogni modo la stampa 3D permette di oltrepassare anche alcuni punti critici della progettazione di queste strutture: i nodi, ad esempio, sono delle zone in cui la quantità di rinforzo è maggiore, più precisamente vengono depositati tre strati di fibra anziché uno, questo impedisce di mantenere costante l'altezza del "rib".

Le aree di applicazione di questo tipo di strutture sono molteplici: aerospaziale, automobilistico, architettonico, e nell'industria navale, il motivo di un così ampio campo di applicazione è la convivenza tra leggerezza ed alta resistenza, inoltre come già detto essendo strutture prodotte maggiormente tramite Additive Manufacturing permettono anche una minore quantità di materiali di scarto.

A livello di progettazione questo tipo di strutture godono di ampia flessibilità progettuale e di ottima copertura superficiale con poco materiale.

1.5.3 Modalità di rottura

La rottura delle isogrid è racchiusa generalmente sotto il nome di “buckling” che si suddivide in globale e locale con questo termine si intende l’instabilità strutturale che porta la isogrid a piegarsi o curvare portando alla rottura, solitamente è un tipo di rottura che si manifesta in maniera improvvisa; le modalità di buckling dipendono fortemente dal carico applicato e dai parametri geometrici come l’altezza e la larghezza del “rib” che corrisponde al “telaio” della struttura isogrid, e molti altri.

Si verifica in genere per colpa di imperfezioni geometriche nella struttura. [15]

1.6 Anisogrid

Le strutture Anisogrid sono concettualmente strutture parenti alle Isogrid, si differenziano tra loro solamente per il pattern con il quale sono collegate le costole, le Anisogrid presentano in genere un motivo di esagoni alternati a triangoli:

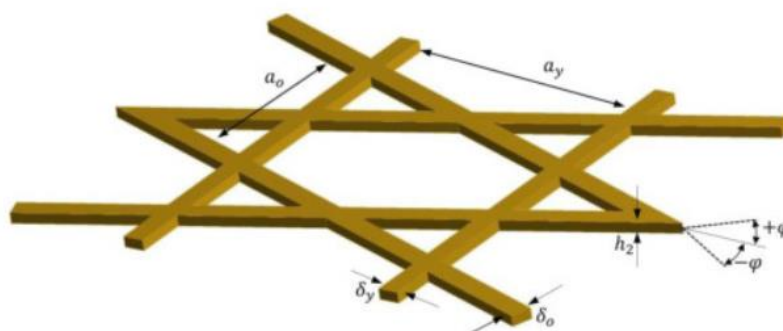


Figura 1.39: Struttura Anisogrid

Sono strutture reticolari a tutti gli effetti, e dunque molto richieste nei settori che esigono leggerezza, resistenza, efficienza spaziale e flessibilità progettuale.

La struttura anisogrid avendo un pattern più articolato rispetto alla sua parente Isogrid presenta delle equazioni di calcolo delle sollecitazioni molto più complesse che non verranno riportate di seguito.⁷

Gli utilizzi delle anisogrid si estendono allo stesso modo delle isogrid in applicazioni richiedenti leggerezza e resistenza, la differenza tra le due però è l’irregolarità del pattern e la non simmetria delle anisogrid.

In generale gli studi fatti riguardo il confronto tra le due danno i seguenti risultati: le strutture anisogrid sono da preferire nel caso ci sia una sollecitazione a trazione, le

isogrid, invece, sviluppano un comportamento migliore nel caso di sollecitazioni di compressione e flessione; chiaramente, le strutture Anisogrid hanno anch'esse un'ottima resistenza a flessione, ma la loro progettazione richiede maggior attenzione per la maggior complessità del pattern delle costole.

Le modalità di rottura anisogrid comprendono, proprio come le isogrid, il buckling locale e globale: i fenomeni di rottura delle strutture reticolari che implicano il cedimento delle costole.

Le anisogrid in particolare sono strutture molto gettonate quando il progetto ricade nell'ambito dell'aerospace, questo perché oltre alle proprietà generiche delle strutture reticolari, le anisogrid permettono una maggiore ispezionabilità, è facile per l'operatore visualizzare l'eventuale problema e passare con mani e braccia (talvolta interamente con il corpo, ma dipende poi dalla dimensione delle intercapedini) per agire.[16]

Capitolo 2: Procedure sperimentali

In questo capitolo si analizzeranno le procedure sperimentali partendo dalla definizione del materiale studiato e dalla realizzazione dei campioni di prova, fino a descrivere le prove di caratterizzazione meccanica del materiale che sono state svolte.

2.1: Materiali

Nel presente lavoro sono stati stampati, mediante tecnologia Anisoprint A3, provini in Poliammide rinforzata con fibre lunghe di carbonio. Come descritto nel precedente capitolo, la stampante utilizzata permette la co-estrusione della resina e della fibra, effettuando l'impregnazione della stessa durante il processo di stampa.

La poliammide è una resina termoplastica che, per l'applicazione nella stampa 3D, si trova in commercio sotto forma di bobina di filamento (Fig. 2.1). In questo caso è stato utilizzato il CFC PA, un materiale a base di Nylon, sviluppato da Polymaker e specifico per la tecnologia Anisoprint.

Il CFC PA è un materiale che dispone di una bassa viscosità, che permette una migliore adesione degli strati di fibra tra loro, e un rapido raffreddamento e solidificazione che contribuiscono ad una migliore qualità nella disposizione delle fibre.

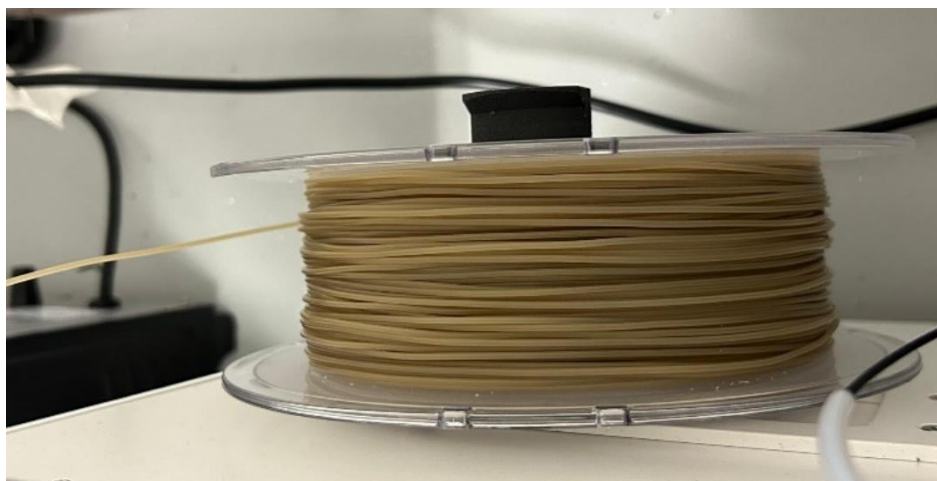


Figura 2.1: Bobina di filamento CFC PA di Anisoprint

Un'altra caratteristica molto importante di questa particolare poliammide è la bassa igroscopia. Nonostante sia a base di nylon (materiale altamente igroscopico) il CFC PA assorbe poca umidità, consentendo la stampa anche all'aria aperta.

Come la maggior parte delle plastiche della famiglia del Nylon, questo materiale è ideale per la stampa di parti funzionali che richiedono resistenza, robustezza e durabilità.

Questo PA ha temperature di stampa che si aggirano intorno ai 250 e 270°C e un range di velocità di stampa consigliato che va dai 10 ai 20 mm/s.

L'azienda produttrice predispone l'utilizzo di questo materiale esclusivamente per le sue stampanti: Composer A3 ed A4, abilitate entrambe alla co-estrusione per creare manufatti in composito, più precisamente in composito a fibra lunga di carbonio.

Di seguito è riportata la scheda tecnica del materiale con le principali proprietà meccaniche (Tabella 2.1):

	CFC PA
Resistenza a trazione	57 MPa
Modulo elastico	1440 MPa
Allungamento a rottura	15,86%
Resistenza a flessione	69 MPa
Modulo a flessione	1580 MPa

Tabella 2.1: Scheda tecnica del CFC PA Anisoprint

Per quanto riguarda il materiale di rinforzo del composito ÷

è stato utilizzato è il CCF 1.5k prodotto da Anisoprint. Si tratta di una bobina di fibra costituita da 1500 monofilamenti di carbonio, binderizzati con una composizione polimerica termoindurente che garantisce ottima adesione tra il filamento di fibra e la matrice polimerica utilizzata. Questo è di fondamentale importanza nel processo di co-estrusione della matrice e della fibra perché garantisce l'adesione tra le due fasi.



Figura 2.2: Sezione di un filamento di CCF 1.5k Anisoprint

La temperatura di estrusione raccomandata è tra 250 e 270 °C dunque è necessario scegliere un materiale polimerico da accoppiargli la cui temperatura di estrusione sia compresa in un range vicino a quello indicato.

Il materiale composito risultante dal processo di stampa può essere definito come materiale di-componente per la presenza sia di una resina termoindurente (binder) che della termoplastica (CFC PA).

Attraverso il software di slicing, è poi possibile controllare la direzione di deposizione della fibra.

Il CCF 1.5k conferisce al materiale una rigidezza 20 volte maggiore rispetto ad un materiale non rinforzato, ed un peso 7 volte più leggero dell'acciaio a parità di volume.

Il filamento di carbonio si presenta come un filo nero lucido molto sottile; il suo diametro è di 0,35 mm per una lunghezza di 750m su tutta la bobina ed ha una resistenza meccanica a trazione di circa 2300 MPa (Tabella 2.2)



Figura 2.3: Bobina di CCF 1.5k di Anisoprint

CCF 1.5k	
Resistenza a trazione	2300 MPa
Modulo elastico	140 GPa
Plastiche consigliate	PLA / PETG
Plastiche compatibili	ABS / PC / PA

Tabella 2.2: Scheda tecnica del CCF 1.5k Anisoprint

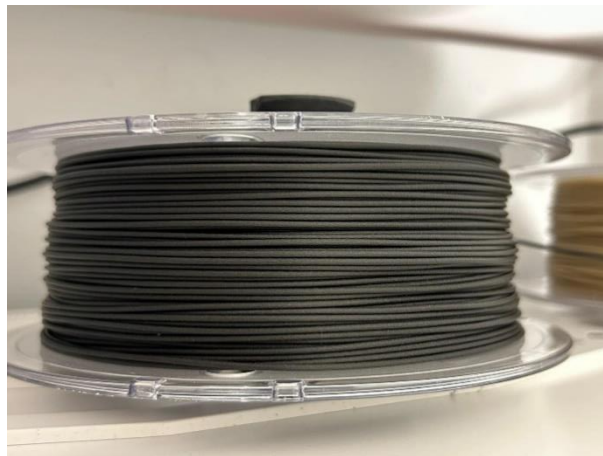


Figura 2.4: Bobina di Smooth PA di Anisoprint

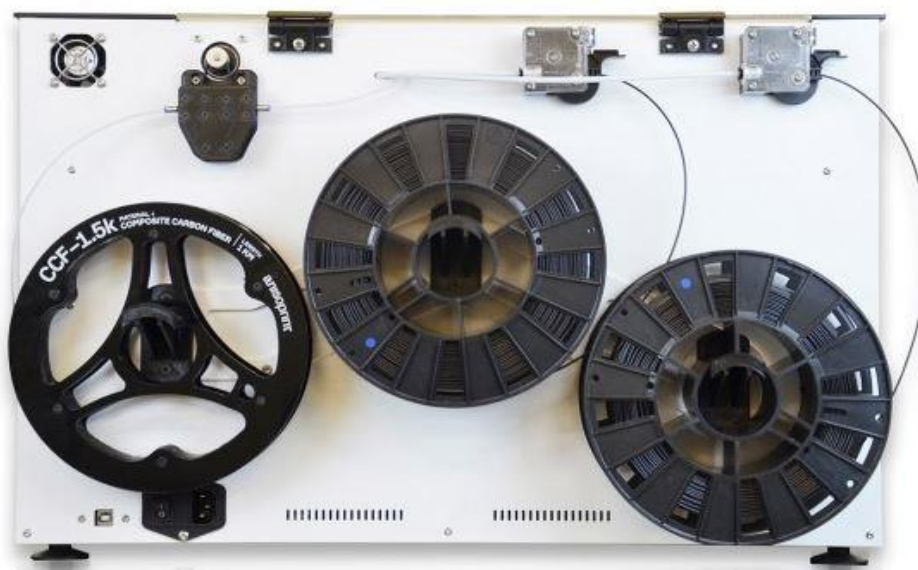


Figura 2.5: Retro dell'Anisoprint Composer A3 con le tre bobine di materiale

2.2 Preparazione dei provini

Questo capitolo sarà dedicato all'analisi della preparazione dei provini, a partire dal software di slicing, fino all'effettiva stampa; si vedranno nello specifico le caratteristiche della macchina e le molteplici impostazioni e parametri da poter variare nel software.

2.2.1 Modellazione Cad e Slicing

Prima di procedere con la stampa, le geometrie dei campioni di prova sono state modellate attraverso il software CAD.

Sono state modellate in tutto 3 geometrie:

- Provino di trazione di dimensioni 250 x 15 x 3 mm secondo la normativa ASTM D3039
- Provino di flessione di dimensioni 160 x 13 x 4,2 mm secondo a normativa ASTM D7264
- Strutture reticolari isogrid e anisogrid di dimensioni 106 x 80 x 8 mm

In particolare, le strutture isogrid e anisogrid sono state successivamente realizzate con differenti percentuali di fill density.

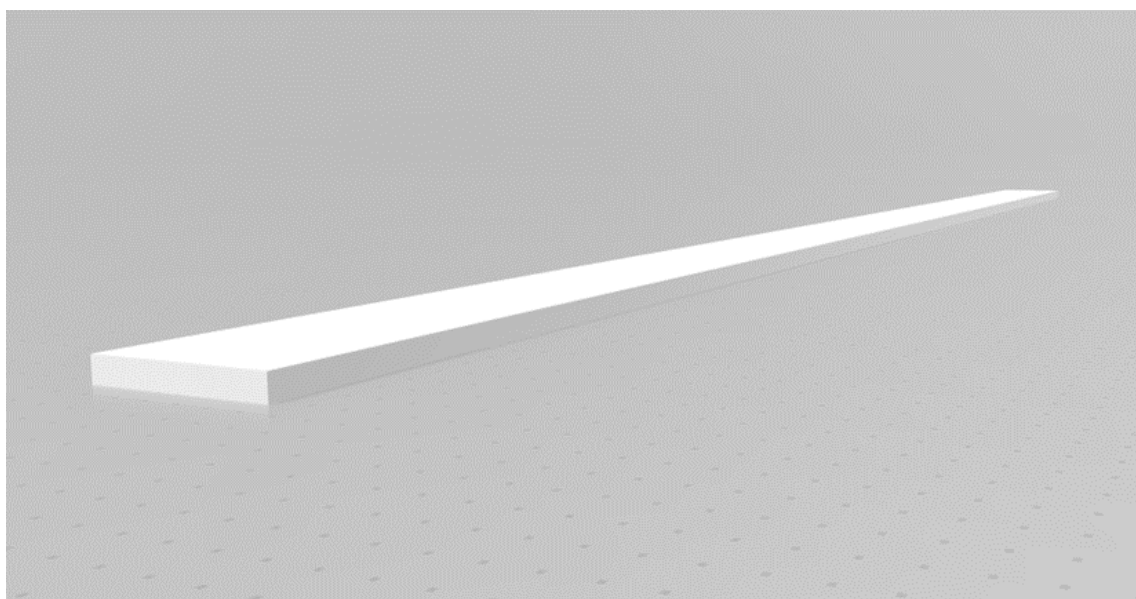


Figura 2.6: File STL di un provino generico

Una volta salvati i modelli 3D dei provini in formato stl (formato tipico degli oggetti 3D) questi vengono inseriti nel software di slicing Aura fornito dall'azienda produttrice della stampante.

All'interno del software è possibile scegliere i materiali compositi che si vanno ad utilizzare, le caratteristiche degli estrusori, e tutti i parametri di stampa come:

- Temperatura di estrusione;
- Velocità di estrusione;
- Velocità di stampa;
- Estrusione di parti rinforzate e no.
- Flow Multiplier: indicatore della larghezza del filamento depositato;
- Reinforced infill pattern: la geometria con cui viene depositato il filamento estruso;

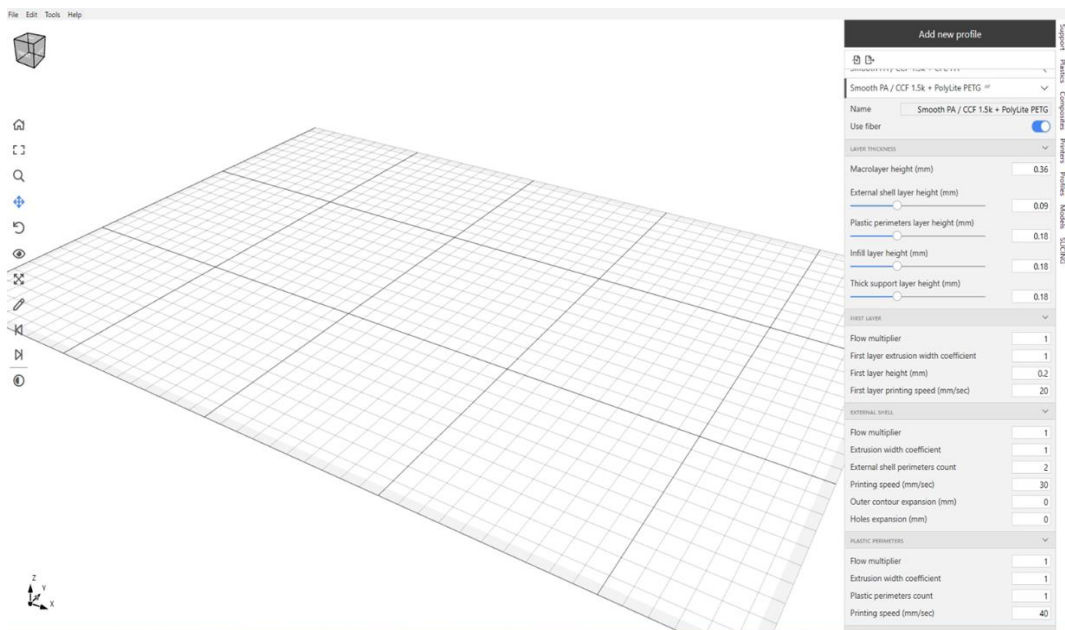


Figura 2.7: Interfaccia di AURA

Aura è dunque capace di generare traiettorie di fibre di rinforzo in ogni strato e regolarne lo schema per poter ottenere componenti resistenti ed al contempo leggeri. Ha la facoltà di combinare strati di plastica denominati come “cellular infill” e strati di fibra così da stampare riempimenti con strati spessi e rinforzati ma che possano essere coperti e protetti da gusci esterni e sottili, diminuendo il tempo di stampa ed aumentando la qualità.

La tecnologia di Aura però non limita il suo utilizzo alla sola stampa di compositi rinforzati a fibra lunga, bensì è anche possibile la semplice stampa senza fibre. [17]

Aura come già detto permette di scegliere il motivo (pattern) del rinforzo e la direzione di disposizione della fibra.

Per i provini di trazione e flessione le fibre sono state depositate lungo la direzione longitudinale del provino impostando un infill di tipo “solid” al 100%.

Per le strutture reticolari sono stati scelti i riempimenti di tipo sogrid e Anisogrid rispettivamente, variando poi le percentuali di riempimento.

Dunque, la geometria reticolare viene direttamente calcolata e generata in automatico dal software come riempimento del parallelepipedo che rappresenta il confine esterno del campione.

Una volta terminato lo slicing il file viene salvato come GCODE in modo che poi la macchina possa leggerlo.

2.2.2 Stampa 3D Anisoprint

La stampante utilizzata è l’Anisoprint composer A3 (ad indicare la dimensione del piatto di stampa che è quella di un foglio A3). Le stampati Anisoprint possono funzionare sia come semplici stampanti 3D che utilizzano la tecnologia FFF sia in combinazione con la tecnologia CFC, la quale come sopradetto permette di stampare parti co-estrudendo plastica e rinforzo con continuità, i pezzi prodotti grazie a questa tecnologia avranno dunque una rigidità superiore rispetto ai pezzi in sola plastica ed una consistente perdita in termini di peso in relazione al volume.

La tecnologia Anisoprint offre una vasta gamma di materiali da poter utilizzare per soddisfare le proprie esigenze in termini di proprietà meccaniche.

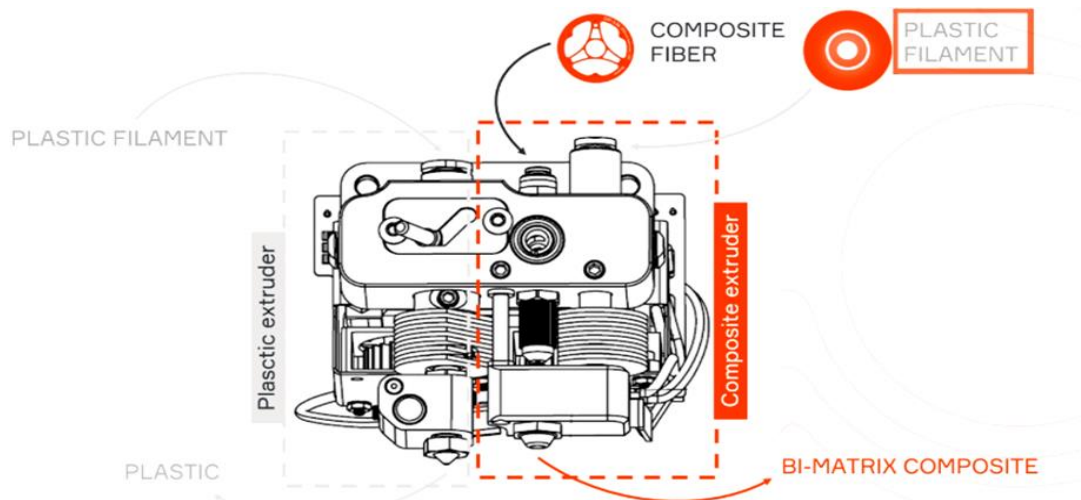


Figura 2.8: Schema del sistema a doppio estrusore dell'Anisoprint Composer

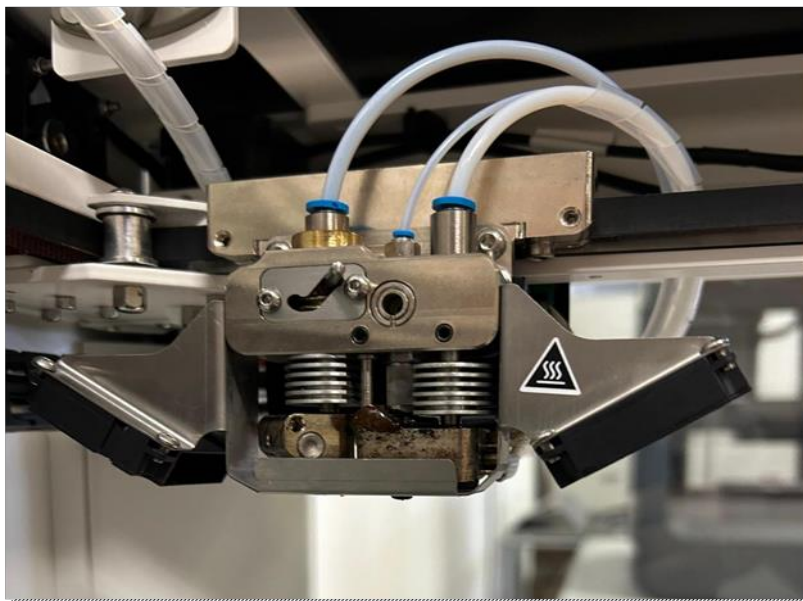


Figura 2.9: Sistema di estrusione dell'Anisoprint Composer A3

La macchina è dotata di un pannello di controllo con il quale si può interfacciare direttamente l'utente; esso permette la regolazione dei parametri di stampa in tempo reale, ed inoltre, permette il caricamento e scaricamento dei materiali utilizzati nel caso si debba cambiare bobina, pulire l'estrusore o semplicemente verificare (è buona norma farlo) che i materiali vengano estrusi correttamente.

L'estrusore CFC è inoltre dotato di un dispositivo di taglio della fibra, il quale è azionabile manualmente dal display della macchina (ad esempio nel caso si voglia interrompere il load del materiale), o in automatico se previsto dal programma GCODE che la macchina legge.

Per procedere con la stampa il file GCODE viene trasferito alla macchina attraverso scheda SD e si effettua una verifica della corretta estrusione dei materiali.

Se la procedura va a buon fine, si può lanciare la stampa scegliendo il file da stampare e aspettando che l'estrusore raggiunga la temperatura prestabilita

L'Anisoprint Composer A3 è una macchina molto efficiente in termini di qualità, resistenza e leggerezza del pezzo e questo rende la sua applicazione ideale in molteplici campi come l'aerospace o l'automotive. .[18]

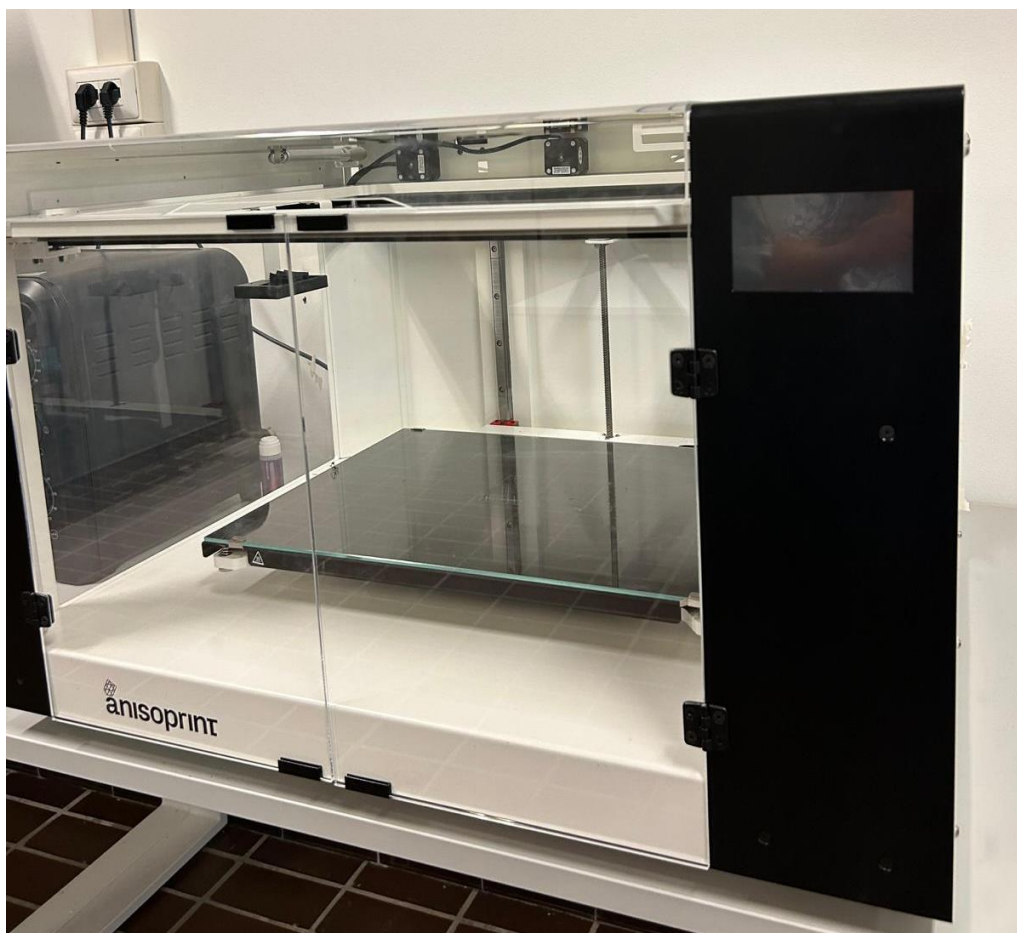


Figura2.10: Frontale dell'Anisoprint Composer A3 con piatto di stampa e pannello di controllo

2.3 Test Meccanici

In questo capitolo verranno analizzate le procedure di preparazione del provino e il test effettivo facendo riferimento alle rispettive normative.

2.3.1 Flessione

Il comportamento meccanico a flessione del materiale composito in poliammide e fibra di carbonio lunga, ottenuto mediante stampa 3D, è stato caratterizzato attraverso delle prove di flessione a tre punti.

Le prove sono state eseguite con la macchina servo-idraulica universale MTS 810, equipaggiata con la specifica attrezzatura per l'esecuzione della prova.

Le dimensioni dei provini di flessione, 160 x 13 x 4,2 mm, sono state scelte secondo la normativa ASTM D7264.

I parametri di stampa dei provini di flessione scelti direttamente da Aura sono i seguenti: Flow Multiplier di 1,5: esso è un fattore correttivo riguardante l'estrusione della plastica, variando questo valore si otterrà sovra-estrusione o sotto-estrusione in base a come viene scelto.

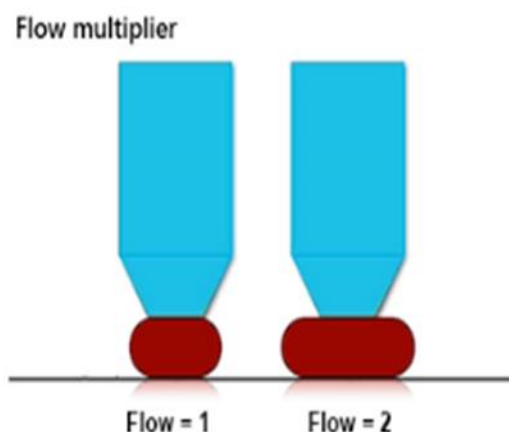


Figura 2.11: Schema esplicativo del Flow Multiplier

Aura propone diversi valori di velocità di stampa, come ad esempio di inizio e fine, massima e minima, impostate rispettivamente sui valori di 10 e 5 mm/s considerando dunque una velocità media di 7,5 mm/s.

Un altro parametro importante per la corretta stampa dei provini di flessione è il “Reinforced Infill Pattern”, ovvero il motivo con il quale viene depositata la fibra di carbonio, in questo caso la scelta ricade su “Solid”: le fibre vengono depositate parallelamente tra loro e, scegliendo le “Guide directions” pari a 0°, risultano dunque orientate lungo la direzione longitudinale del provino.



Figura 2.12: Reinforced infill Pattern Solid

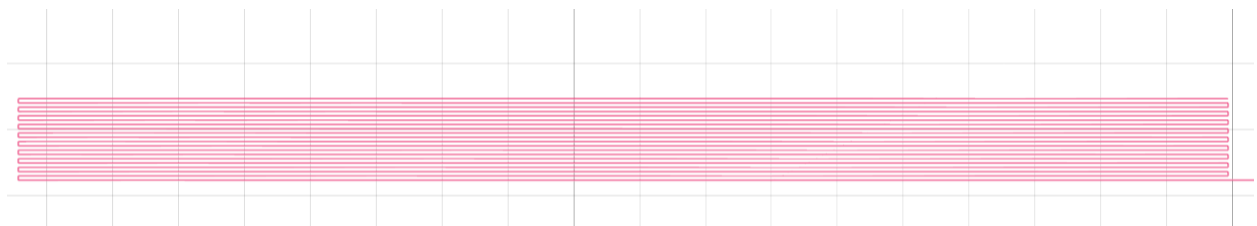


Figura 2.13: Visuale 2D del codice per i provini di flessione

La temperatura di estrusione, 255°C, è stata scelta in base alle caratteristiche dei materiali da estrudere e dunque a quanto consigliato dalle schede tecniche.

Essa poteva essere direttamente impostata dal pannello di controllo della stampante in fase di stampa.



Figura 2.14: Provini di flessione

Per verificare la ripetibilità della prova sono stati stampati in totale sette provini di flessione, quattro di essi (denominati Pf22a-b-c-d) sono stati direttamente testati subito dopo la stampa, mentre i restanti tre (denominati Pf23a-b-c) sono stati prima essiccati alla temperatura di 70°C per 2h e successivamente testati-.

Prima della prova sono state anche rilevate, con un micrometro, lo spessore e la larghezza effettivi di ciascun provino così da poter inserire i parametri nel software che restituisce i valori di tensione e deformazione nominale da cui ricavare la curva di flessione.

PROVINO	Media spessore [mm]	Media Larghezza [mm]
Pf22a	4,32	13,38
Pf22b	4,66	13,24
Pf22c	4,56	13,13
Pf22d	4,67	12,99
Pf23a	4,73	13,15
Pf23b	4,68	13,22
Pf23c	4,7	12,99

Tabella 2.3: Misurazioni e medie in spessore dei provini di flessione

I provini da essiccare sono stati anche pesati prima e dopo il processo di essiccazione per verificare se ci fossero delle variazioni (Tab. 2.4).

	Pre-essiccazione	Post-essiccazione
PROVINO	Media peso [g]	Media peso [g]
Pf23a	11,32	11,26
Pf23b	12	11,94
Pf23c	11,41	11,36

Tabella 2.4: Misurazioni e medie in peso e larghezza dei provini di flessione

Un parametro fondamentale da scegliere prima di svolgere la prova è lo span. È definito sapendo che il rapporto span/spessore deve essere di 31/1.

Inoltre, è stata impostata una velocità di test di 0,033 mm/s, e una frequenza di 5 Hz.

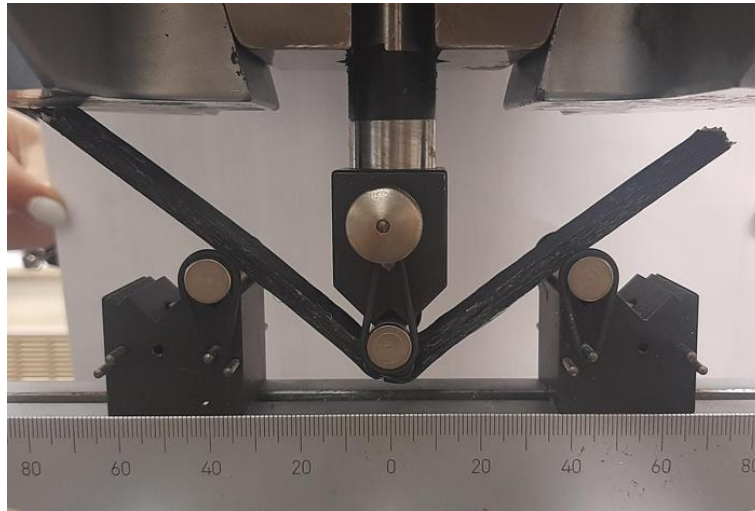


Figura 2.15: Test di flessione

I risultati della prova vengono restituiti dalla macchina sottoforma di forza e spostamento, per trovare il sigma o tensione (in MPa) si è utilizzata la seguente formula:

$$\sigma = \frac{3PL}{2bh}$$

Dove P è la forza applicata dalla macchina ed è misurata in kN, L è lo Span, misurato in mm, mentre b ed h sono rispettivamente larghezza e spessore del provino, anch'essi misurati in mm.

Per ottenere la deformazione ϵ la procedura utilizzata è la seguente:

$$\epsilon = \frac{6\delta h}{L^2}$$

Dove δ è definito come “mid-span deflection”, L è lo span, ed h è lo spessore e si misurano tutti in mm.

Successivamente è stata effettuata su excel l'analisi dei dati da cui sono state ricavate le curve $\sigma_f - \epsilon_f$ ed il Modulo di resistenza a flessione di ciascun provino. Il

modulo è stato calcolato come la pendenza del tratto elastico della curva, compreso tra i valori di deformazione di 0.001 e 0.003.

Sono state messe a confronto tra loro le curve le curve tensione -deformazione relative ai Pf22 e Pf23 per verificare la ripetibilità delle prove. In seguito, sono state messe a confronto le curve dei provini non essiccati con quelle dei provini essiccati.

Essendo il materiale molto resistente i provini non hanno mai raggiunto una rottura completa, bensì solo delle fratture nelle zone previste.

2.3.2 Trazione

Il comportamento meccanico a trazione del materiale composito stampato 3D è stato caratterizzato attraverso la prova di trazione.

Le prove sono state eseguite sulla macchina Zwick/Roell Z050, equipaggiata con la specifica attrezzatura per l'esecuzione della prova.



Figura 2.16: Zwick Roell Z050

La normativa di riferimento per questo test è la ASTM 3039, in base ad essa le dimensioni dei provini di trazione sono di 250 x 15 x 2 mm.

I parametri di stampa dei provini di trazione sono i seguenti: Flow Multiplier di 1,5: esso è un indicatore della larghezza del filamento depositato, in altre parole un indicatore di quanto le fibre nella matrice composita risultano distanti tra loro.

La velocità di stampa è stata scelta di 7,5 mm/s come media delle velocità massima e minima proposte da Aura.

Un altro parametro importante per la corretta stampa dei provini di flessione è il “Reinforced Infill Pattern”, ovvero il motivo con il quale viene depositata la fibra di carbonio, anche in questo caso è stato scelto come “solid”

A differenza dei provini di trazione però in questo caso è stata variata leggermente la geometria di stampa, confrontandosi infatti anche con il supporto Anisoprint si è deciso di stampare due provini in un'unica geometria tenendoli uniti da un collegamento con stesso pattern della fibra, che verrà successivamente tagliato.

Questa scelta è dovuta al fatto che la stampante arrivando al limite del provino taglia la fibra e ricomincia ad estrarla all'inizio dell'altro provino, creando elevate irregolarità.

Con la precedente soluzione, dunque, si è scelto di estrarre più fibra per guadagnare in qualità.

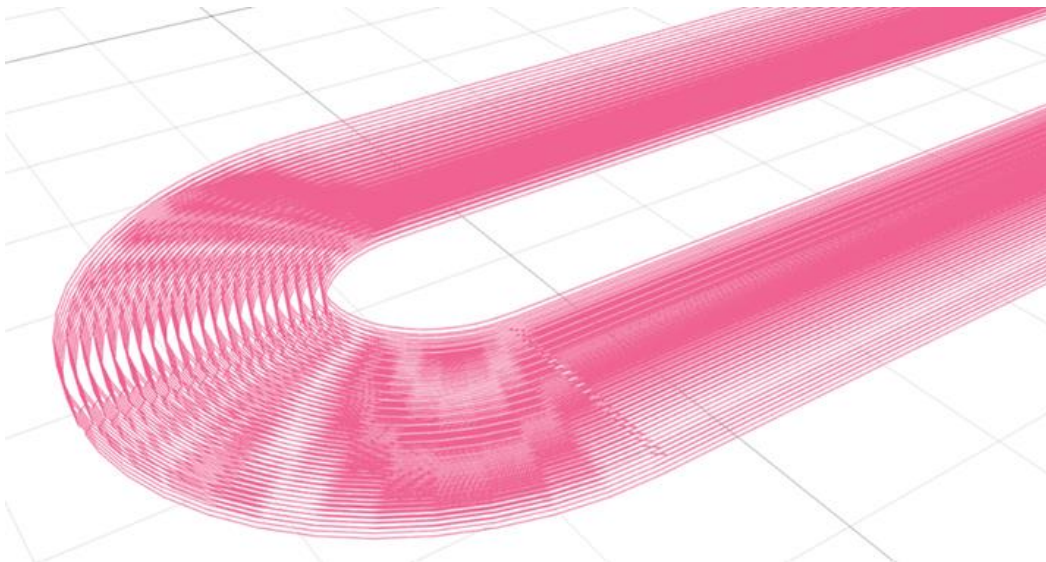


Figura 2.17: Codice 3D dei provini di trazione

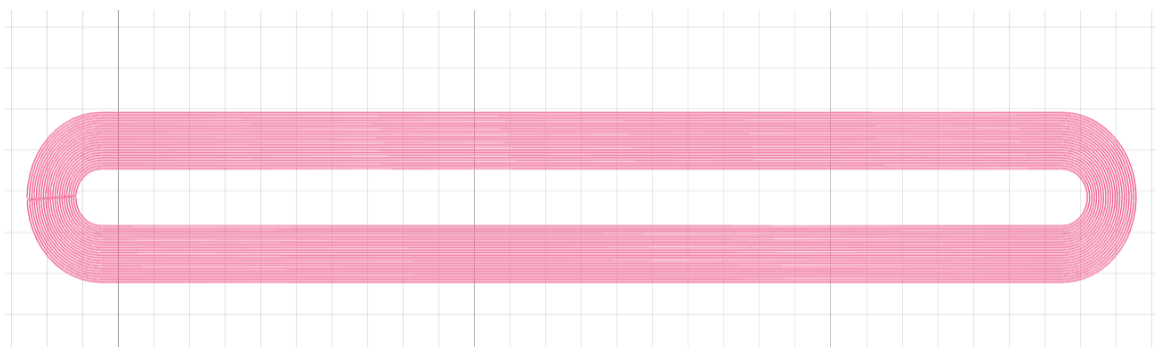


Figura 2.18: Codice 2D dei provini di trazione

La temperatura di estrusione, 255°C , è stata scelta in base alle caratteristiche dei materiali da estrudere e dunque a quanto consigliato dalle schede tecniche.

Dopo la stampa di tre delle geometrie sopra citate sono state tagliate le estremità ottenendo sei provini, tre di essi (denominati Pt22a-c-d) sono stati testati direttamente dopo la stampa, mentre i restanti tre sono stati essiccati per 2h a 70°C e mantenuti sottovuoto fino al momento del test.



Figura 2.19: Provino sottoposto alla prova di trazione

Prima del test sono stati anche rilevati, con un micrometro, lo spessore e la larghezza effettivi di ciascun provino

Provino	Media spessore [mm]	Media larghezza [mm]
Pt22a	2,713333333	14,31
Pt22c	2,753333333	14,05
Pt22d	2,685555556	14,15333333
Pt23a	2,686666667	14,11
Pt23b	2,695555556	14,29666667
Pt23c	2,747777778	14,43666667
PROVA	2,66	13,91

Tabella 2.5: Misurazioni in spessore e larghezza dei provini di trazione

I provini sono stati anche pesati prima e dopo il processo di essiccazione per verificare se ci fossero delle variazioni.

	Pre-essiccazione	Post-essiccazione
Provino	Media peso [g]	Media peso [g]
Pt23a	9,22	9,17
Pt23b	9,283333333	9,24
Pt23c	9,58	9,52

Tabella 2.6: Misurazioni in peso dei provini di trazione Pt23

Le misurazioni sono state seguite poi da l segnare i provini per determinare il tratto utile, preso a 55 mm da ogni estremità e la zona degli afferraggi a 35 mm da ogni estremità. (Fig. 2.19)

Il monitoraggio della prova è stato effettuato usando una telecamera che riprendeva il provino.

La macchina restituisce come risultato i valori nominali di forza e spostamento, successivamente alla prova quindi è stata necessaria l'analisi dei dati prima analizzando visivamente (con i Pixel) la deformazione, poi su Excel dalla quale sono state ricavate le curve $\sigma_t - \varepsilon_t$.

$$\sigma = \frac{P}{A}$$

Con P forza in un determinato momento ed A: area della sezione del provino.

La normativa in questo caso propone il calcolo di E considerando nella prova l'uso di un estensimetro, ma nel caso pratico non sono stati usati sensori di spostamento, bensì una telecamera, misurando lo spostamento con i pixel dello schermo.

Il modulo di Young E , è stato calcolato come la pendenza del tratto elastico della curva, compreso tra i valori di deformazione di 0.001 e 0.003.

Il termine del test è stato sempre determinato dalla delaminazione del provino.

2.3.3 Compressione Isogrid ed Anisogrid

Le prove di compressione sono state eseguite sulla macchina MTS 810, macchina per test universali, attrezzata per la prova con due piastre parallele.

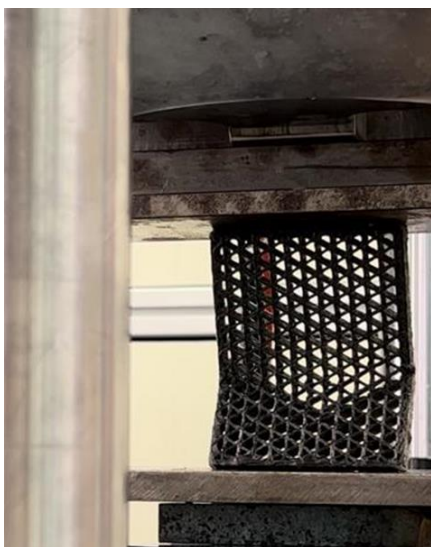


Figura 2.21: Test di compressione della Isogrid al 35%

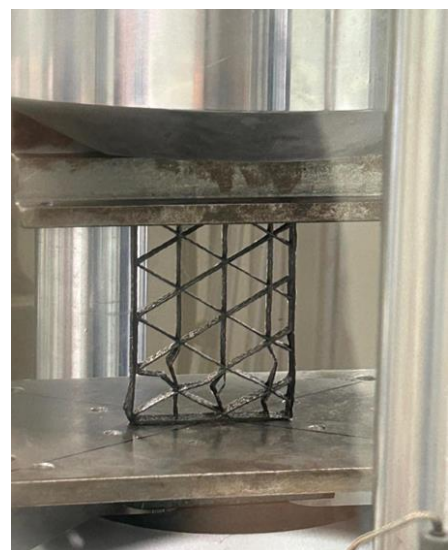


Figura 2.22: Test di compressione della Isogrid al 10%

Le dimensioni esterne dei campioni isogrid e anisogrid realizzati sono di 106 x 80 x 8 mm.

In questo caso i parametri di stampa per queste geometrie sono i seguenti:

flow multiplier di 1,5, velocità media di 7,5 mm/s, e la temperatura di estrusione di 255°C, come nelle prove di flessione e trazione.

A differenza dei provini di flessione e trazione, in questo caso il “Reinforced Infill Pattern” è stato scelto di tipo “isogrid” e “anisogrid”; in modo da studiare il comportamento a compressione delle due differenti strutture reticolari.

Per questi test la struttura reticolare è direttamente sviluppata da software di slicing Aura.

Si è deciso di stampare cinque provini per la geometria Isogrid e due provini per la Anisogrid, a diverse percentuali di Fill Density.

Le Isogrid sono state stampate con fill density pari a 10%, 20%, 35%, 42% e 50%; mentre le strutture Anisogrid 10% e 20%.

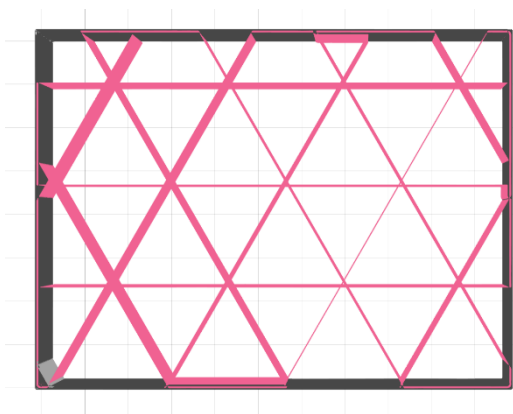


Figura 2.23: Isogrid al 10% di fill density

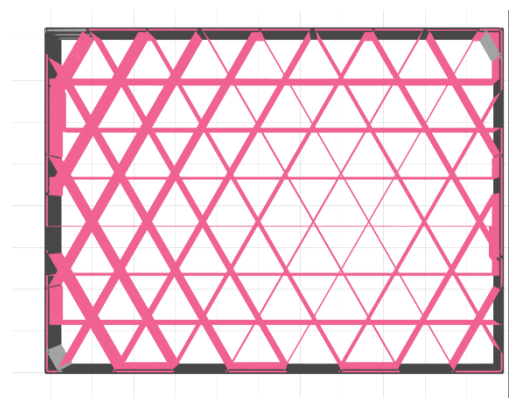


Figura 2.24: Isogrid al 20% di fill density

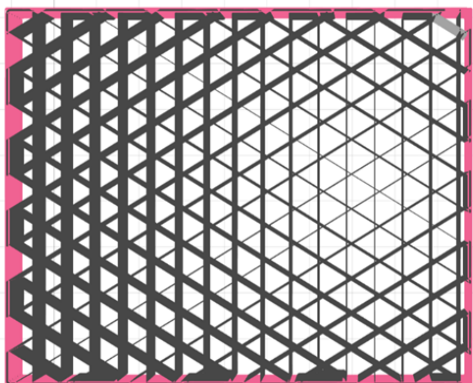


Fig. 2.25: Isogrid con fill density al 35%

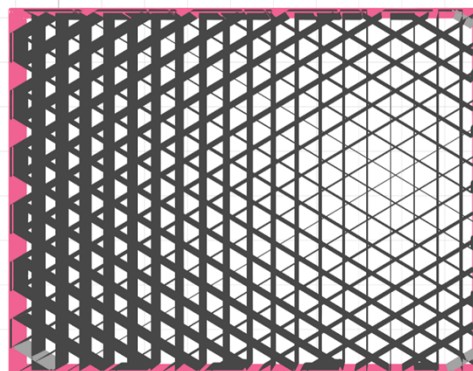


Fig. 2.26: Isogrid con fill density al 42%

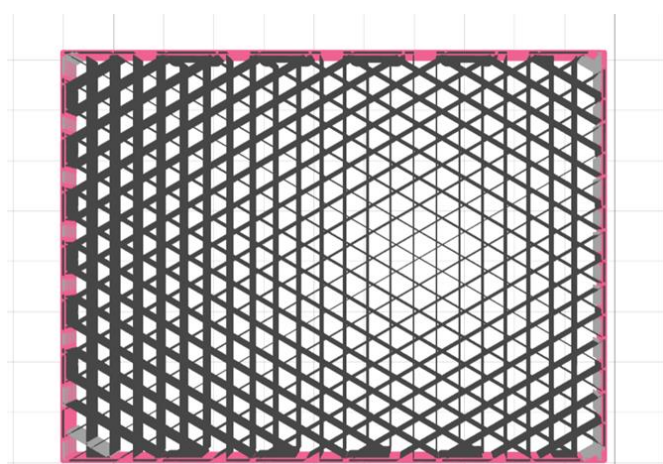


Figura 2.27: Isogrid con fill density al 50%

% Infill	Peso [g]	Tempo di stampa [min]
10%	12,72	149
20%	19,73	213
35%	30,32	296
42%	34,74	339
50%	40,1	406

Tabella 2.7: Confronto tra pesi e tempi di stampa delle Isogrid

Per le strutture reticolari si è deciso di tabellare il peso, considerato come un indicatore della quantità di fibra utilizzata, dunque un indicatore che guarda anche la spesa economica delle singole strutture, ed il tempo di stampa.

Anche in questo caso le “guide directions”, l’angolo con il quale il riempimento reticolare è ruotato, sono pari a 0° . Inoltre, si è deciso di stampare le strutture con i perimetri rinforzati, ed aumentare il loro numero a due, questo perché altrimenti la struttura non avrebbe un contorno continuo e regolare.

Oltre a ciò, per permettere alla struttura interna di essere saldamente ancorata al suo perimetro esterno è stato variato un parametro chiamato “Infill extensions into perimeters”, ovvero ciò che permette alla fibra del pattern isogrid (o anisogrid) di sovrapporsi al perimetro esterno e mantenerla attaccata ad esso.

L’”Infill extensions into perimeters” è stato dunque impostato sul valore di 1,2, scelto controllando il codice di slicing; è importante capire che basta impostare il parametro su un numero positivo per ottenere sovrapposizione tra i due elementi.

Outer reinforced perimeters count

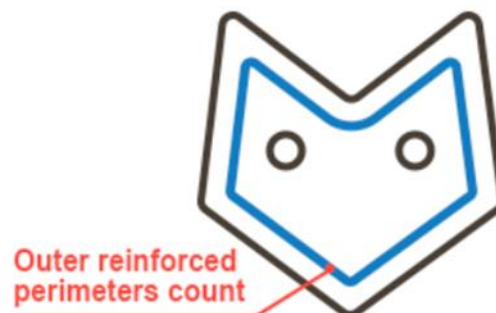


Figura 2.28: Schema del reinforced perimeters count

Infill extension into perimeters

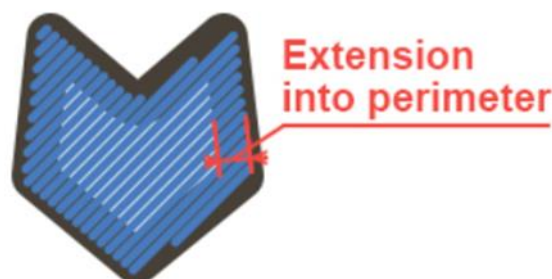


Figura 2.29: Schema dell'Infill extensions into perimeters

Una volta stampate le strutture sono state misurate e segnate evidenziando la percentuale di Fill Density; ed inoltre pesate per poter sviluppare la curva forza/peso e corsa.

In particolare, la struttura con Fill density al 42% è stata sottoposta ad un'analisi al tomografo industriale per analizzare la presenza di vuoti e le zone dove essi si concentrano maggiormente.

Il termine della prova di compressione delle strutture reticolari è avvenuto per il fenomeno del Buckling, localizzato (Fig. 2.21) o globale (Fig. 2.22).

La curva che la macchina restituisce in questo caso è la curva forza corsa; la rielaborazione dei dati però in questo caso si è basata sulla creazione (sempre tramite un foglio di calcolo) della curva forza/peso e corsa, per avere delle informazioni riguardo la forza massima sviluppata rispetto alla quantità di fibra utilizzata.

In ultimo è stato effettuato un confronto tra le curve di Isogrid a Anisogrid con le stesse percentuali di fill density, cioè al 10% e 20%.

Capitolo 3: Risultati

3.1 Risultati dei test di flessione

Eseguendo i test a flessione sono state valutate le proprietà meccaniche di tensione massima a flessione, modulo di elasticità a flessione e allungamento massimo a rottura.

Questi valori sono stati ottenuti rielaborando i dati derivanti dalle prove sperimentali da cui sono state successivamente ricavate le curve tensione-deformazione relative a ogni singola condizione.

Per garantire la ripetibilità delle prove sono stati testati 7 provini, 3 dei quali sono stati sottoposti a un processo di essiccazione a 70° per 2 ore

	Pre- essiccazione	Post- essiccazione
Provino	Media peso [g]	Media peso [g]
Pf23a	11,32	11,26
Pf23b	12	11,94
Pf23c	11,41	11,36

Tabella 3.1: Pesì prima e dopo l'essiccazione dei provini Pf23

Per ogni provino sono stati registrati i valori massimi di tensione ($\sigma_{f,max}$), deformazione a flessione ($\epsilon_{f,max}$) e del modulo di Young a flessione (E_f), di cui poi è stata calcolata una media per ogni singola grandezza come riportato in tabella (Tabella 3.1)

Di seguito sono riportate le tabelle dei valori medi delle misure e dei pesi di ogni provino e le rispettive proprietà meccaniche: σ , ϵ ed E , accompagnati dalle curve di flessione di ciascuno.

Provino	Media Spessore [mm]	Media Larghezza [mm]	$\sigma_{f,max}$ [MPa]	$\epsilon_{f,max}$ [mm/mm]	E [MPa]
Pf22a	4,32	13,38	122,12	0,008	21299
Pf22b	4,66	13,24	105,75	0,005	22035
Pf22c	4,56	13,13	147,06	0,005	31321
Pf22d	4,67	12,99	155,06	0,005	29649
Pf23a	4,73	13,15	134,55	0,005	31380
Pf23b	4,68	13,22	130,16	0,005	32316
Pf23c	4,7	12,99	136,52	0,005	31623

Tabella 3.2: misurazioni e proprietà meccaniche medie dei provini di flessione

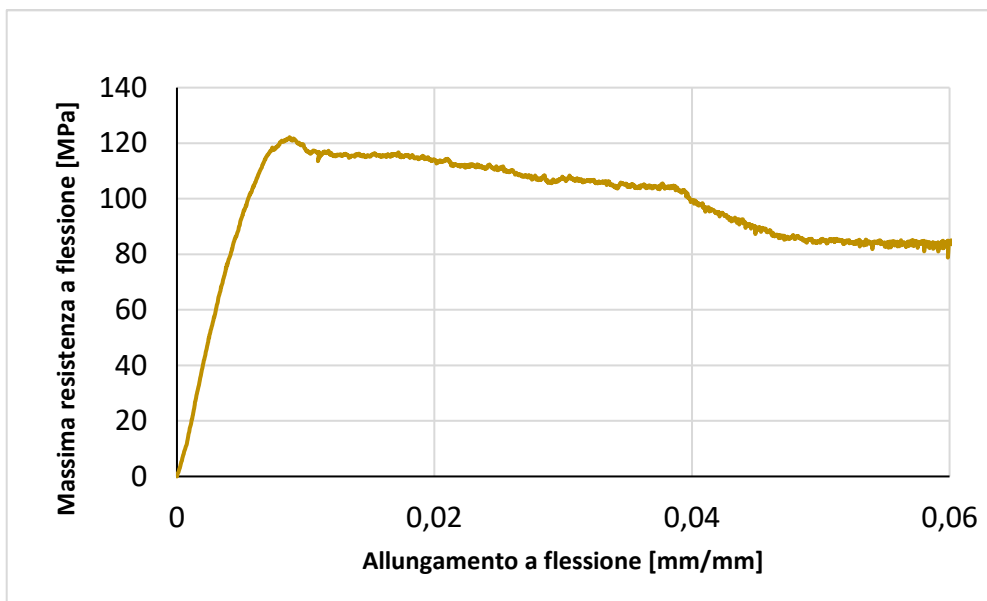


Grafico 3.1: Curve tensione-deformazione a flessione del provino Pf22a

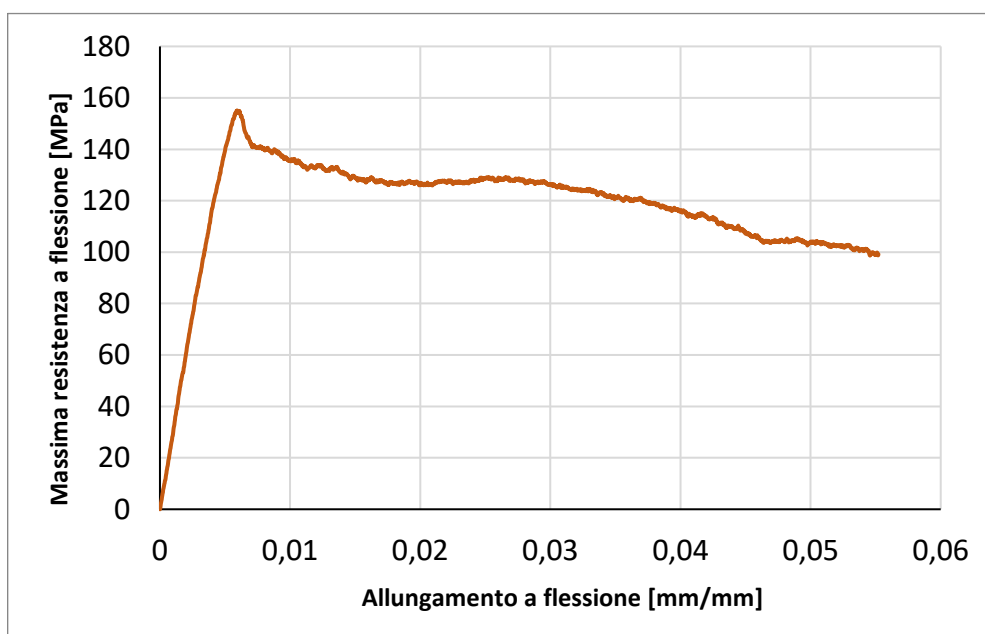


Grafico 3.2: Curve tensione-deformazione a flessione del provino Pf22b

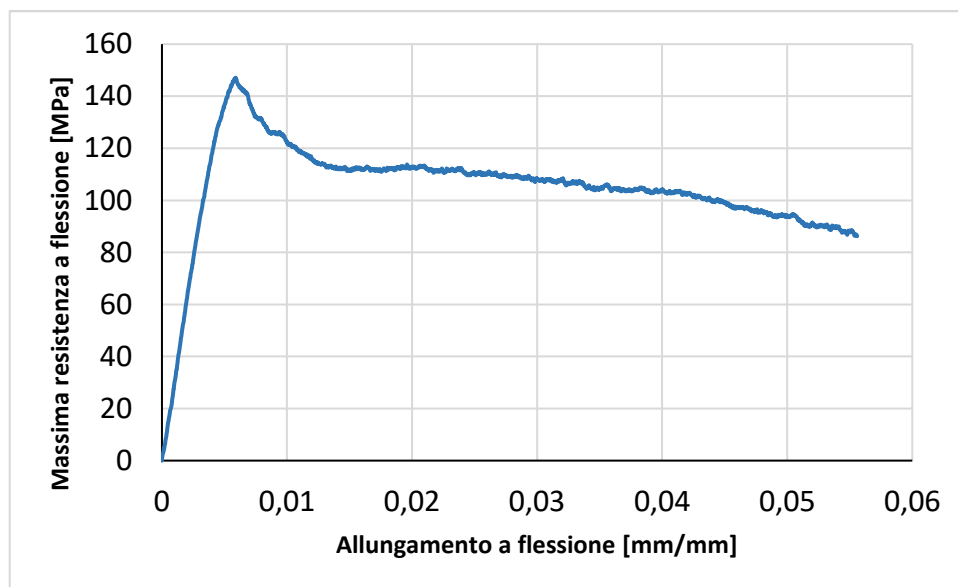


Grafico 3.3: Curve tensione deformazione a flessione del provino Pf22c

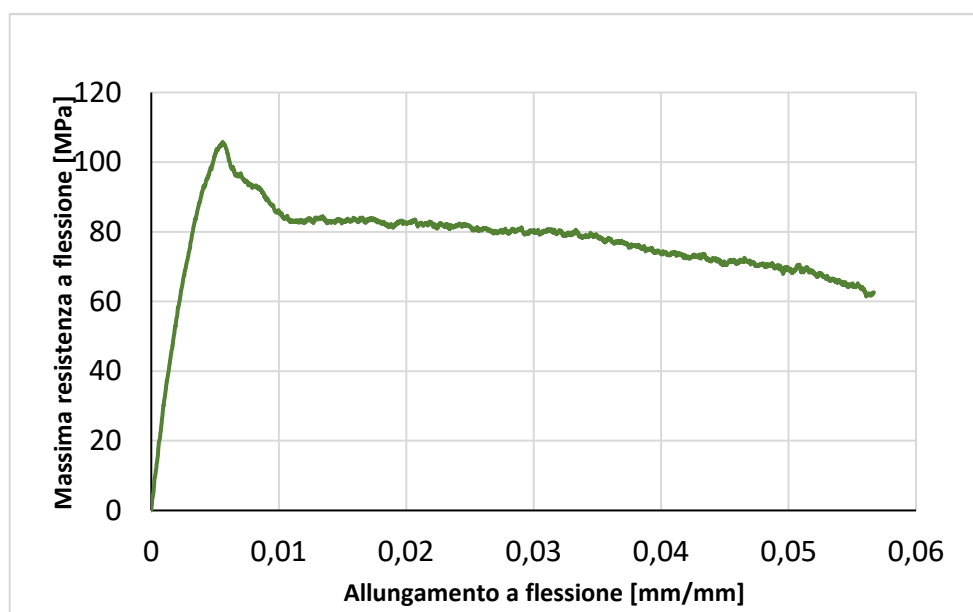


Grafico 3.4: Curve tensione deformazione a flessione del provino Pf22d

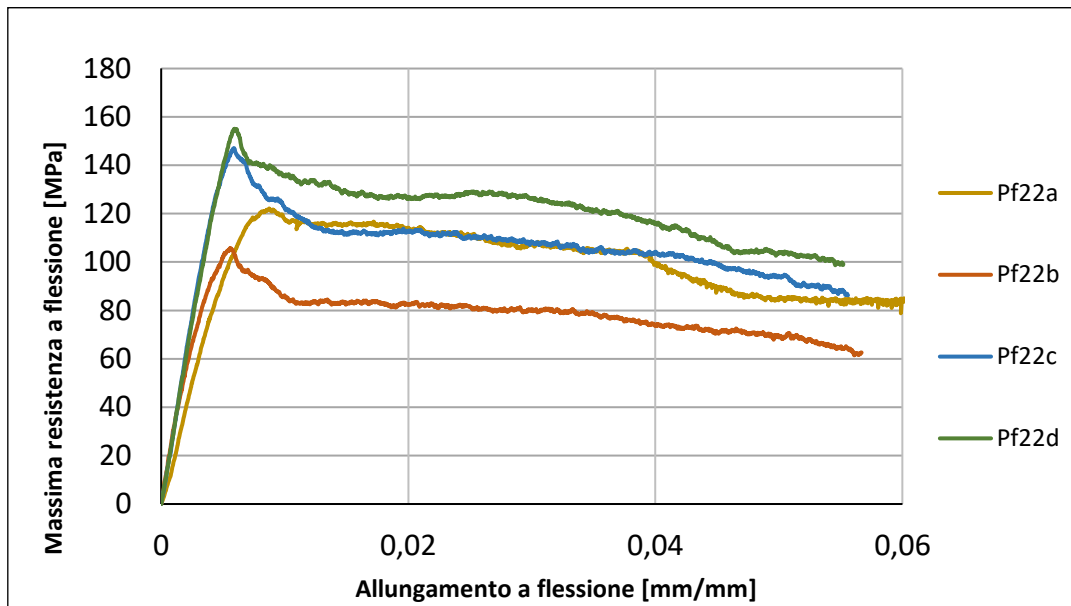


Grafico 3.5: Curve tensione-deformazione a flessione di confronto tra i provini Pf22a-b-c-d

Come già accennato precedentemente i provini sottoposti al test di flessione presentano sulla superficie superiore del provino, a contatto con il punzone, in corrispondenza delle fibre compresse, zone di rottura e delaminazione delle fibre stesse, contrariamente a ciò che accade invece nella zona sottostante al provino, in corrispondenza delle fibre tese.

Si riportano di seguito le immagini dei provini di flessione dopo la prova.



Figura 3.1: Pf22a frontale



Figura 3.2: Pf22a laterale



Figura 3.3: Pf22b frontale



Figura3.4: Pf22b laterale



Figura 3.5: Pf22c frontale



Figura 3.6: Pf22c laterale



Figura 3.7: Pf22d frontale



Figura 3.8: Pf22d laterale

Di seguito sono stati riportati i grafici dei provini di flessione del lotto “23” essi hanno subito, come già detto, un processo di essiccazione di 2h a 70°C.

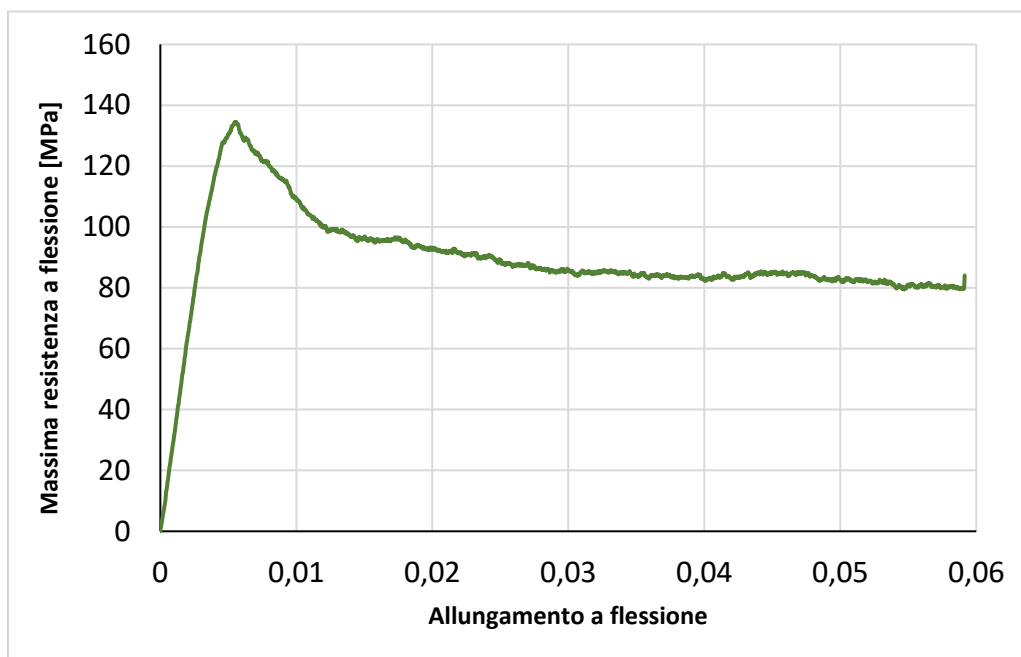


Grafico 3.6: Curva tensione-deformazione a flessione del provino Pf23a

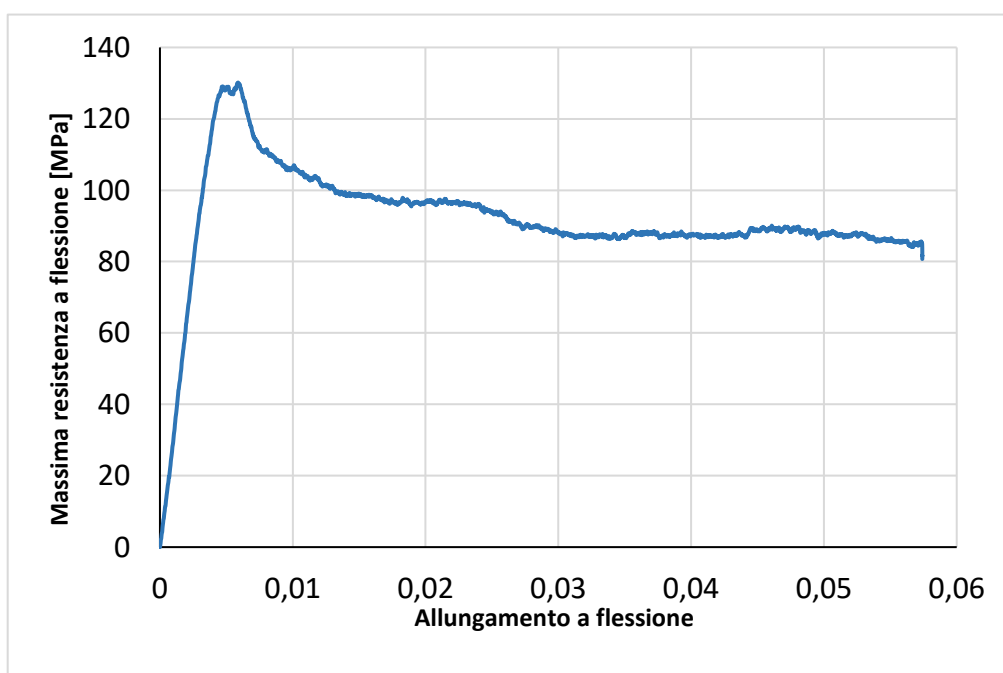


Grafico 3.7: Curva tensione-deformazione a flessione del provino Pf23b

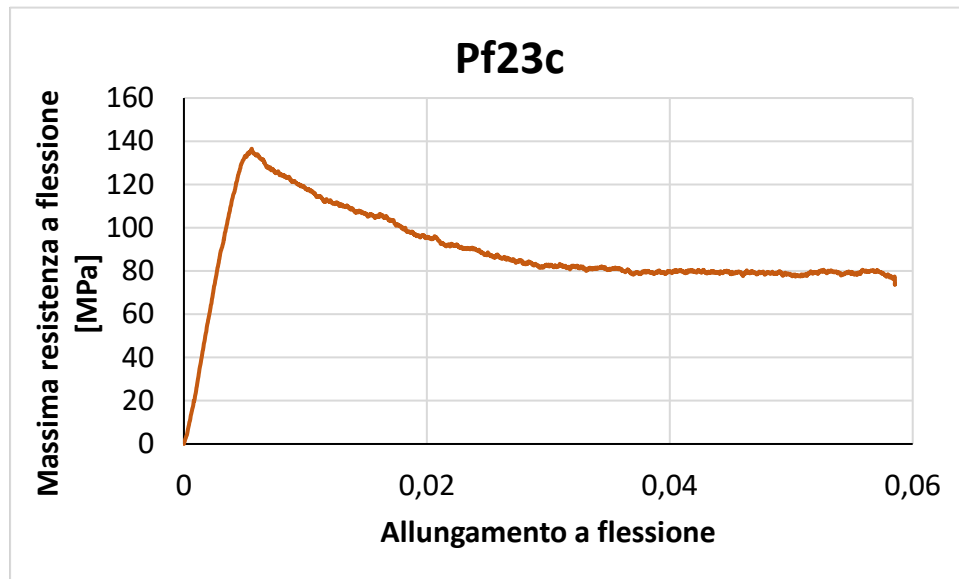


Grafico 3.8: Curva tensione-deformazione a flessione del provino Pf23c

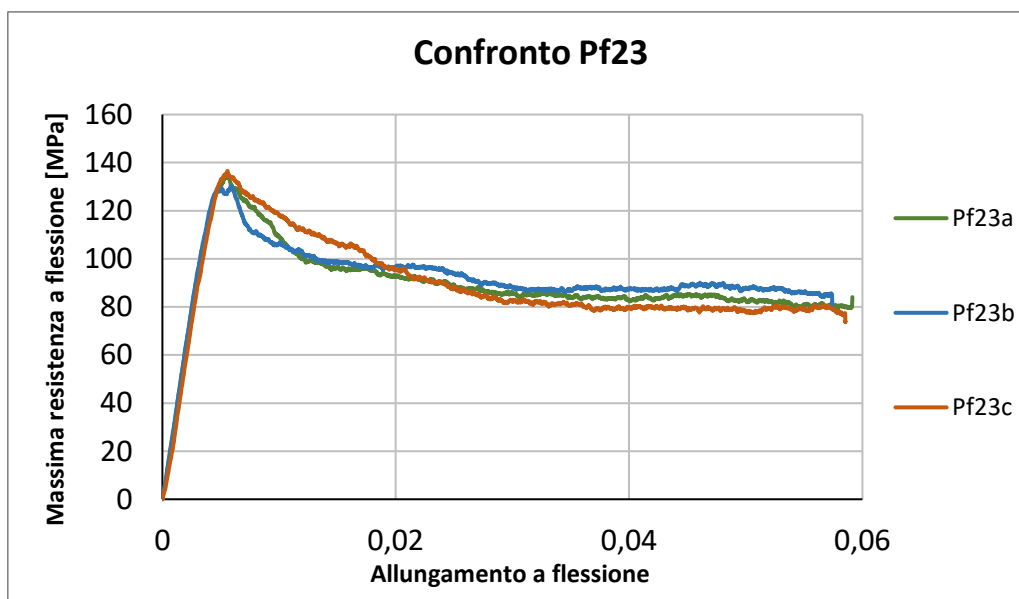


Grafico 3.9: Curva tensione-deformazione a flessione di confronto dei provini Pf23a-b-c

Si riportano di seguito le immagini relative ai Pf23a-b-c dopo la prova.



Figura 3.9: Pf23a frontale



Figura 3.10: Pf23a laterale



Figura 3.11: Pf23b frontale



Figura 3.12: Pf23b laterale



Figura 3.13: Pf23c frontale



Figura 3.14: Pf23c laterale

Di seguito si illustra ora il grafico di confronto tra i provini Pf22 e Pf23 e la rispettiva tabella con i valori medi di σ_{max} , E ed ε in corrispondenza della σ_{max} .

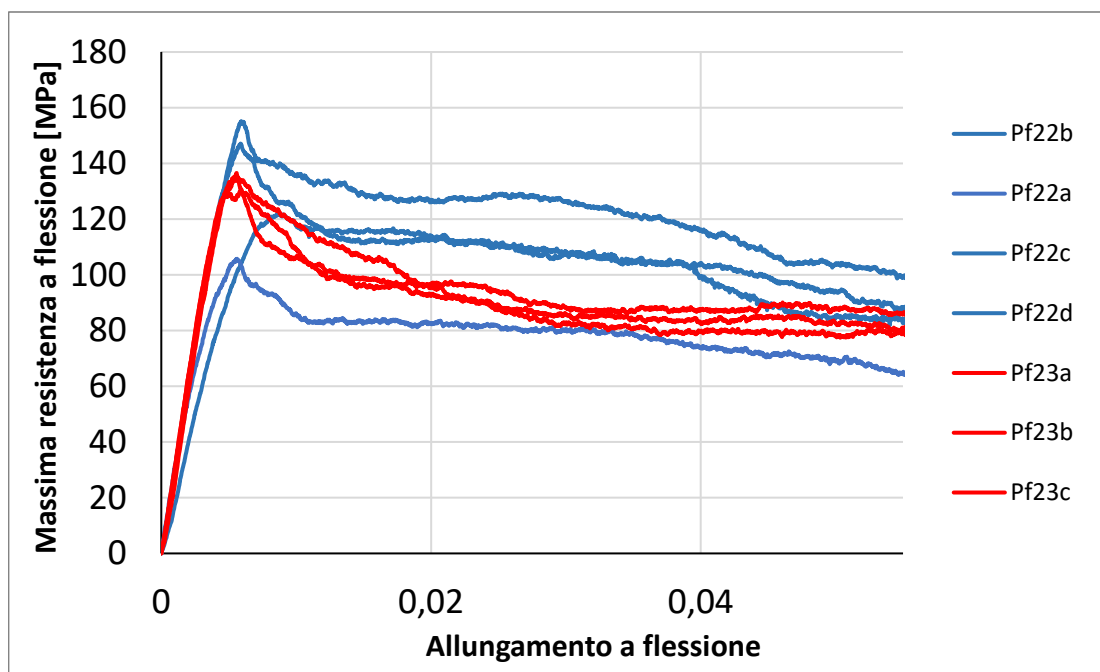


Grafico 3.10: Curve tensione-deformazione a flessione di confronto tra i provini Pf22 e Pf23

Come si nota dal confronto i provini del lotto “Pf23” presentano una maggiore resistenza rispetto a quelli del lotto “Pf22”, questo è dovuto al fatto che la stampa dei provini di flessione dei “Pf22” è avvenuta stampandone uno alla volta uno alla volta per verificare che rispettassero i requisiti geometrici.

I provini di flessione “Pf23”, invece, sono stati realizzati mediante un unico comando di stampa.

Di seguito viene riportata la tabella con i valori medi di tensione ($\sigma_{f,max}$), deformazione a flessione ($\varepsilon_{f,max}$) e del modulo di Young a flessione (E_f) di cui è stata calcolata la media per ogni lotto.

	Provino	σ_{fmax} medio [MPa]	ϵ_{fmax} medio	E medio [MPa]
	Pf22	132,5	0,006	26076
	Pf23	133,74	0,005	31773
Deviazione standard	Pf22	$\pm 19,64$	$\pm 0,001$	$\pm 4456,05$
	Pf23	$\pm 2,65$	$\pm 0,0001$	$\pm 396,56$

Tabella 3.3: Valori medi e deviazioni standard dei Pf22 e Pf23

Dal confronto si nota che la tensione massima a flessione nel caso dei provini essiccati presenta un aumento trascurabile dell'1% rispetto al lotto non essiccato, per quanto riguarda ϵ invece, si misura una diminuzione dell'allungamento a flessione di circa il 15%.

Il risultato più rilevante in questo caso si riscontra sul modulo di Young che presenta un consistente aumento del 21% a seguito dell'essiccazione.

	Deviazione Standard
σ_{fmax_f}	+1%
ϵ_{fmax_f}	-16%
E_f	+21%

Tabella 3.4: Deviazione standard dei valori medi

3.2 Risultati dei test di trazione

Eseguendo i test di trazione sono state valutate le proprietà meccaniche di tensione massima a trazione, modulo di elasticità e allungamento massimo a rottura.

Questi valori sono stati ottenuti rielaborando i dati derivanti dalle prove sperimentali da cui sono state successivamente ricavate le curve tensione-deformazione relative a ogni singola condizione.

Per garantire la ripetibilità delle prove sono stati testati 6 provini, 3 dei quali sono stati sottoposti a un processo di essiccazione a 70°C per ore.

Per ogni provino sono stati registrati i valori massimi di tensione ($\sigma_{f,max}$), deformazione a trazione ($\epsilon_{f,max}$) e del modulo di Young a trazione (E_f), di cui poi è stata calcolata una media per ogni singola grandezza come riportato in Tabella.

Provino	Media spessore [mm]	Media larghezza [mm]	σ_{max} [Mpa]	ϵ_{max} [mm/mm]	E [Mpa]
Pt22a	2,71	14,31	329,44	0,008	43566
Pt22c	2,75	14,05	403,68	0,009	41533
Pt22d	2,68	14,15	351,3	0,008	39341
Pt23a	2,68	14,11	397,6	0,009	42922
Pt23b	2,69	14,29	377,06	0,009	40440
Pt23c	2,74	14,43	340,74	0,008	41097

Tabella 3.5: misurazioni e proprietà meccaniche dei provini di trazione

	Pre-essiccazione	Post-essiccazione
Provino	Media peso [g]	Media peso [g]
Pt22a	9,37	
Pt22c	9,33	
Pt22d	9,59	
Pt23a	9,22	9,17
Pt23b	9,28	9,24
Pt23c	9,58	9,52

Tabella 3.6: Pesi prima e dopo l'essiccazione dei provini di trazione

Si vedano ora ordinati come segue i grafici e le foto prima dei Pt22a-c-d, poi dei Pt23a-b-c, con i confronti tra i provini dello stesso lotto e il confronto tra i due lotti diversi.

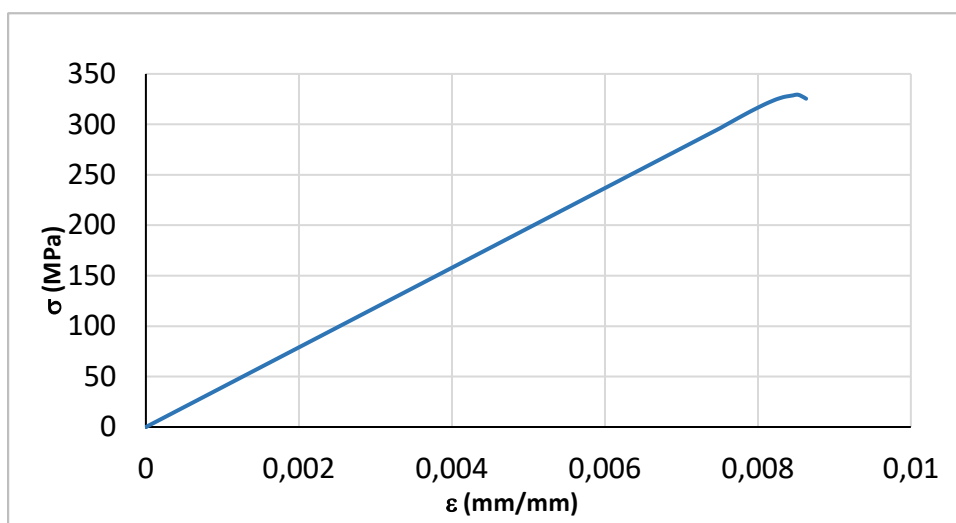


Grafico 3.11: Curve tensione-deformazione a trazione del provino Pt22a

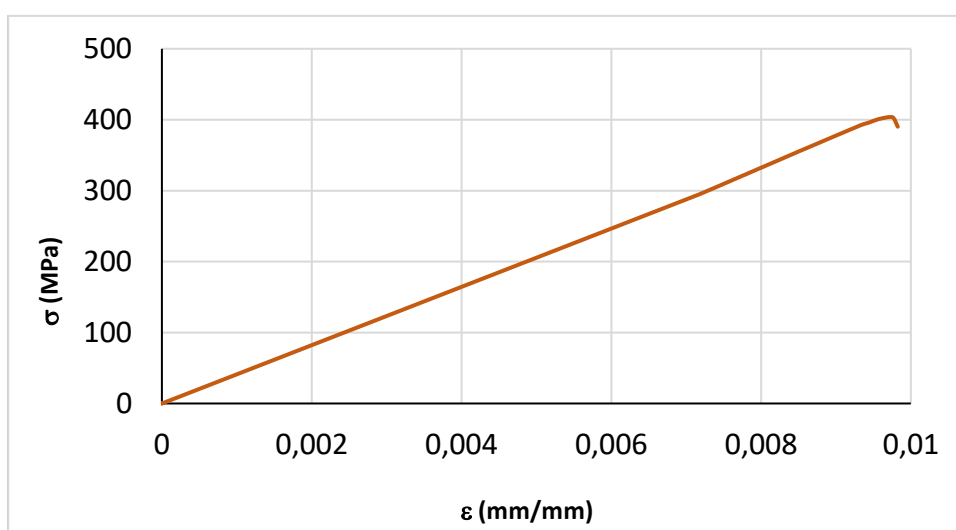


Grafico 3.11: Curve tensione-deformazione a trazione del provino Pt22c

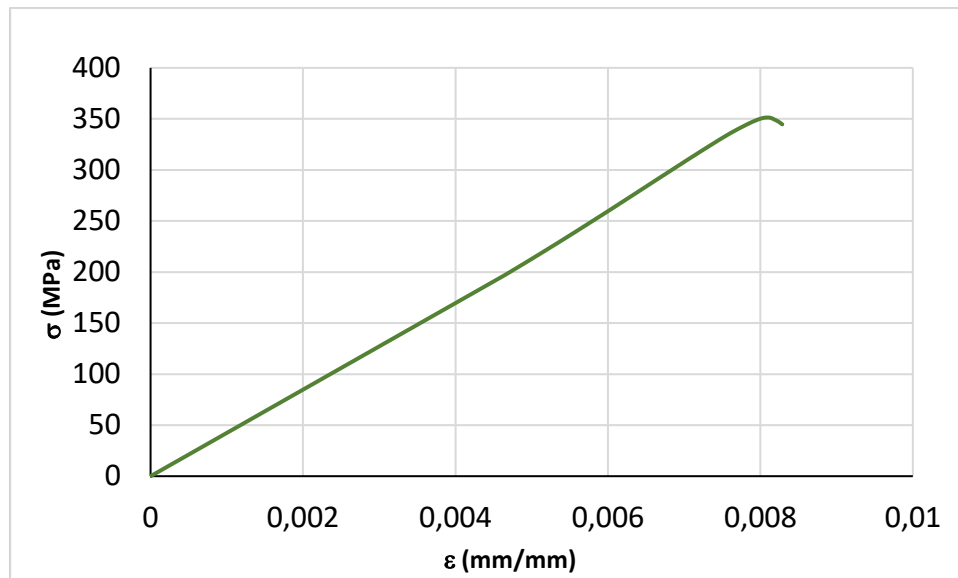


Grafico 3.12: Curve tensione-deformazione a trazione del provino Pt22d

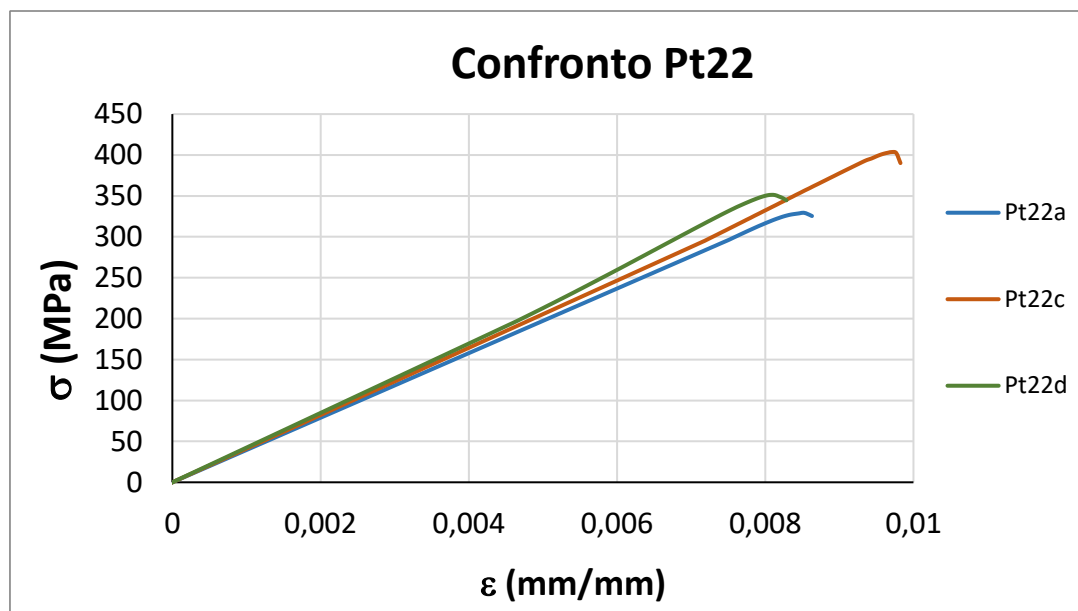


Grafico 3.13: Curve tensione-deformazione a trazione di confronto dei provini Pt22a-b-c

I test di trazione dei provini sia nel caso del lotto Pt22 che del Pt23 non hanno portato alla rottura del provino in corrispondenza del tratto utile, bensì si è verificata una delaminazione degli strati superficiali: i layer di materiale depositato si distaccano l'uno dall'altro e, scivolando, determinano la fine della prova.

Si riportano infatti di seguito le immagini dei provini Pt22 (come verrà fatto per i Pt23) dopo il test con eventuali parti distaccate.



Figura 3.15: Pt22a frontale



Figura 3.16: Pt22d frontale



Figura 3.17: Pt22c frontale

I provini sono stati segnati per definire il tratto utile e dove fissare gli afferraggi.

Di seguito sono riportati i grafici delle prove dei provini di trazione Pt23 essiccati prima del test.

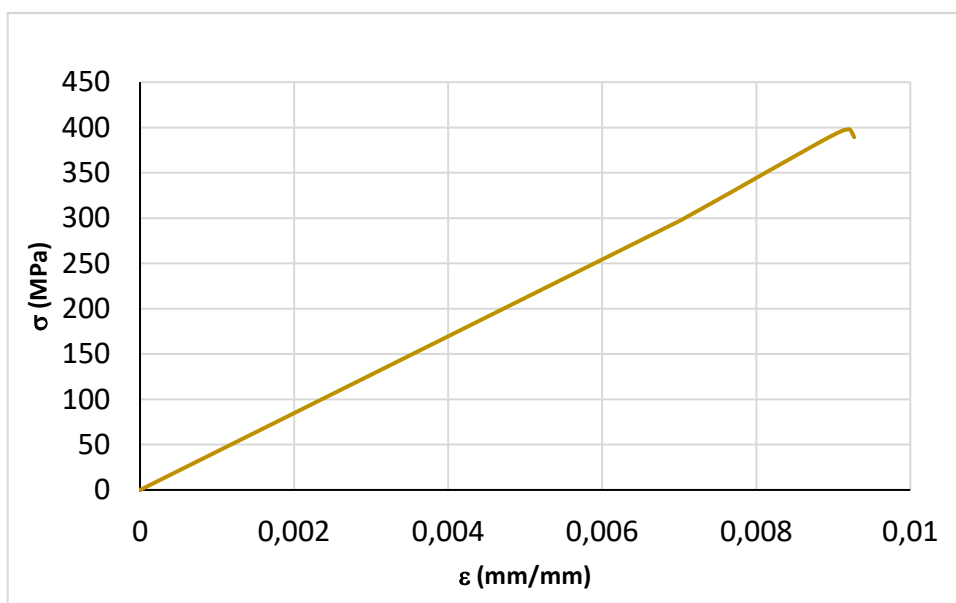


Grafico 3.14: Curve tensione-deformazione a trazione del provino Pt23a

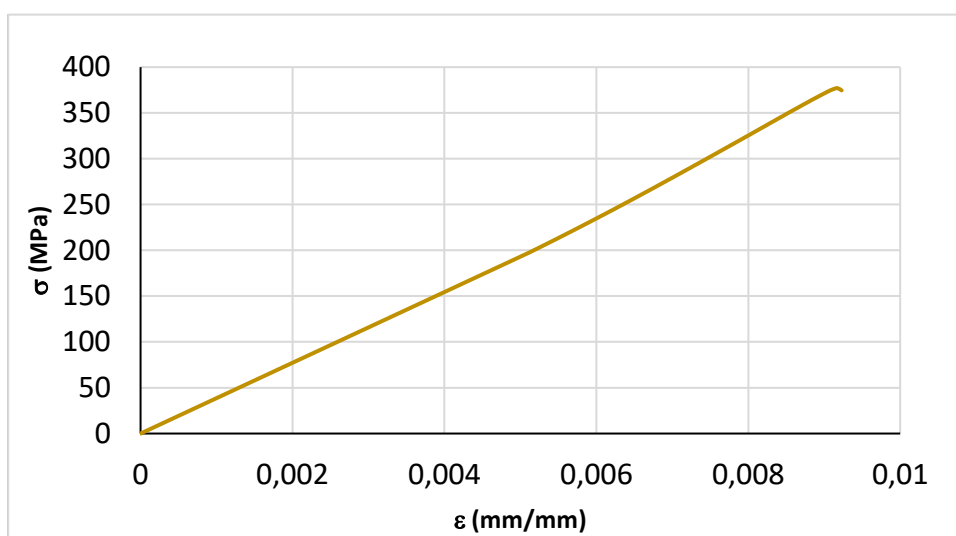


Grafico 3.15: Curve tensione-deformazione a trazione del provino Pt23b

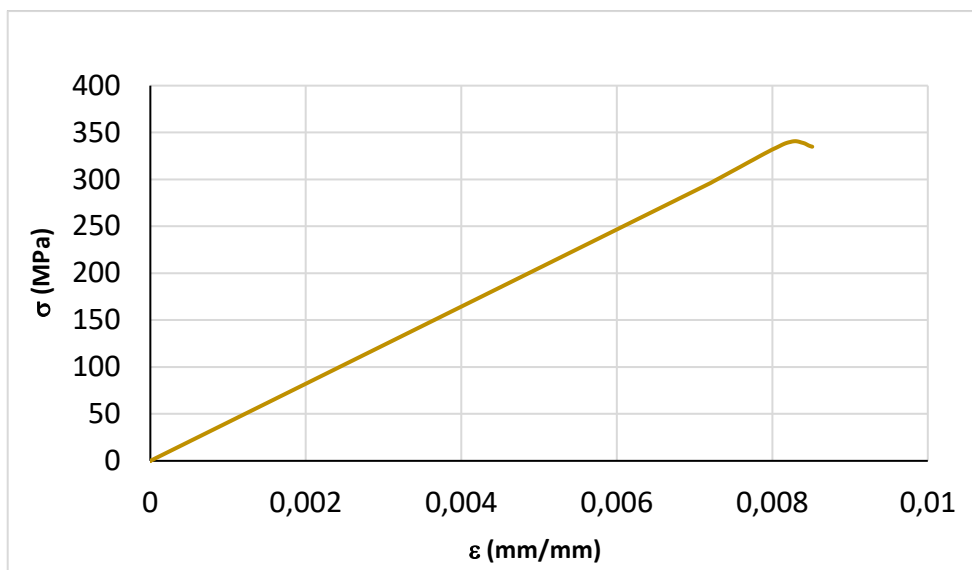


Grafico 3.16: Curve tensione-deformazione a trazione del provino Pt23c

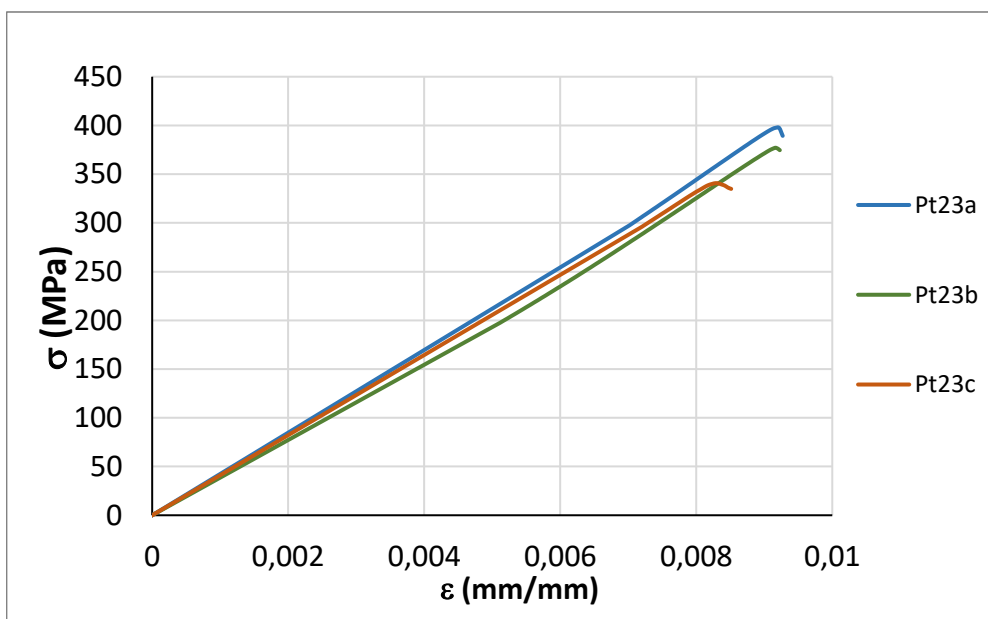


Grafico 3.17: Curve tensione-deformazione a trazione di confronto dei provini Pt23a-b-c



Figura 3.18: Pt23a frontale

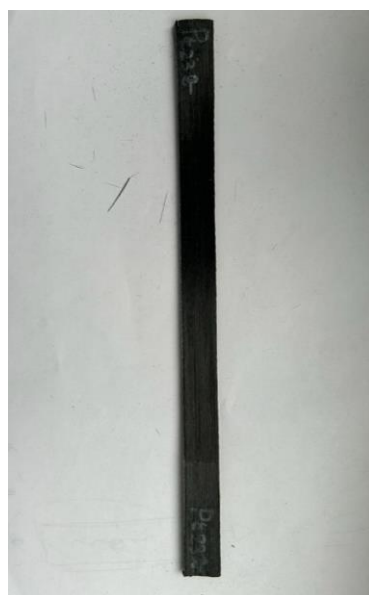


Figura 3.19: Pt23b frontale



Figura 3.20: Pt23c frontale



Figura 3.21: Pt23c sottosopra

Il confronto tra i Pt22 ed i Pt23 mostra la poca differenza tra quelli essiccati e non, di seguito si vede il grafico di confronto dei due lotti.

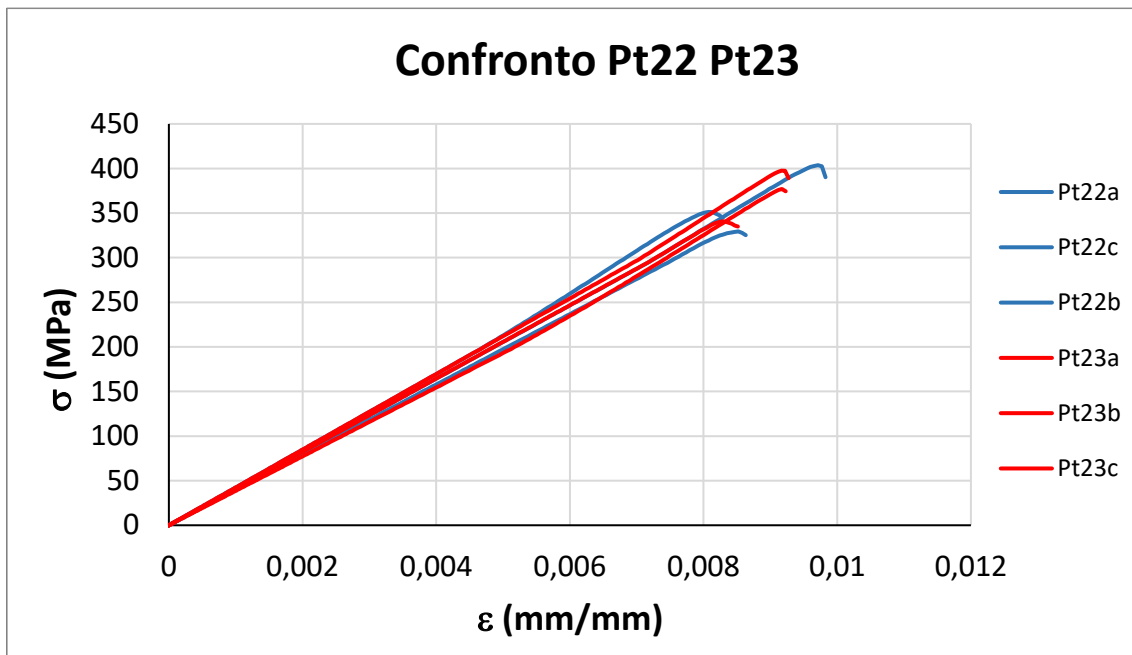


Grafico 3.18: Curve di tensione-deformazione a trazione di confronto tra i provini Pt22 ed i Pt23

		$\sigma_{\max}$ medio [MPa]	$\epsilon_{\max}$ medio	E medio [MPa]
	Pt22	361,47	0,008	40979
	Pt23	371,8	0,008	40703
Deviazione standard	Pt22	$\pm 31,15$	$\pm 0,0004$	$\pm 1725,25$
	Pt23	$\pm 23,5$	$\pm 0,0004$	± 1050

Tabella 3.7: Valori medi e deviazioni standard dei Pt22 e i Pt23

La tabella successiva mostra come nel caso della trazione l'effetto dell'essiccazione non ha mostrato risultati rilevanti, difatti le prove sono molto ripetibili tra loro.

	Deviazione Standard
$\sigma fmax_t$	+2,67%
$\varepsilon fmax_t$	+1,14%
E_t	-0,67%

Tabella 3.8: Deviazione standard dei valori medi

La σ_{max_t} aumenta del 2,67% e la ε_{max_t} dell'1,14% rispetto ai Pt22, il modulo di Young invece diminuisce di una quantità trascurabile inferiore all'1%.

3.3 Risultati dei test di compressione delle Isogrid e delle Anisogrid

Tramite i test di compressione eseguiti sulle strutture reticolari si è voluto studiare l'effetto della variazione del parametro "Fill density" per valutare la forza massima e la forza massima rapportata al peso della struttura. Infine, è stato effettuato un confronto fra isogrid e anisogrid a parità di percentuale di fill density per valutare la struttura reticolare più performante.

Pertanto, per la prima analisi sono stati rielaborati i dati della fase di sperimentazione da cui sono state ricavate le curve forza - corsa e le rispettive con la forza rapportata al peso. Di seguito sono riportati i risultati dei test di compressione delle strutture reticolari con i grafici delle singole prove ed il confronto tra esse per ogni percentuale di fill density utilizzata.

I parametri di cui si è tenuto conto sono la forza massima e la forza massima per unità di peso, come indicatore della forza sviluppata rispetto alla quantità di fibra utilizzata.

Fill density %	Peso [g]	Tempo di stampa [min]	Fmax [kN]	Fmax/Peso [kN / g]
10%	12,72	149	1,16	0,09
20%	19,73	213	1,99	0,1
35%	30,32	296	3,69	0,12
42%	34,74	339	6,2	0,17
50%	40,1	406	7,1	0,17

Tabella 3.9: Pesi, tempi di stampa e proprietà dei provini di compressione Isogrid

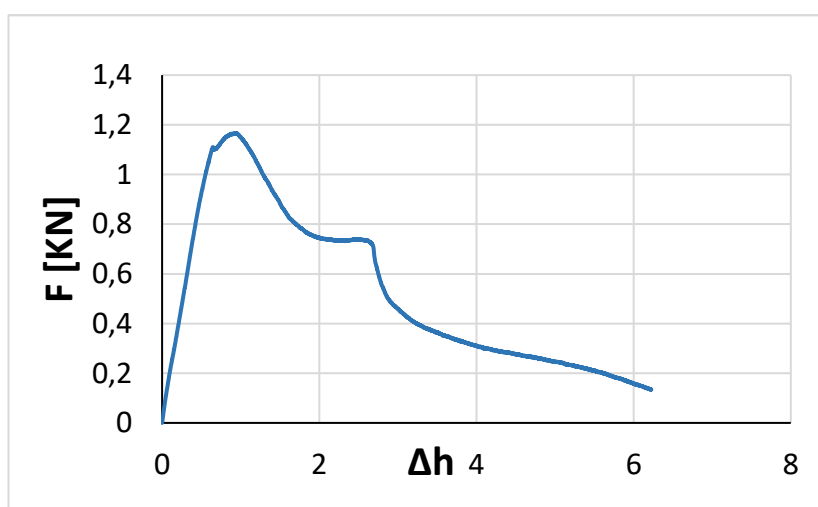


Grafico 3.19: Grafico Forza-corsa della struttura reticolare Isogrid al 10%

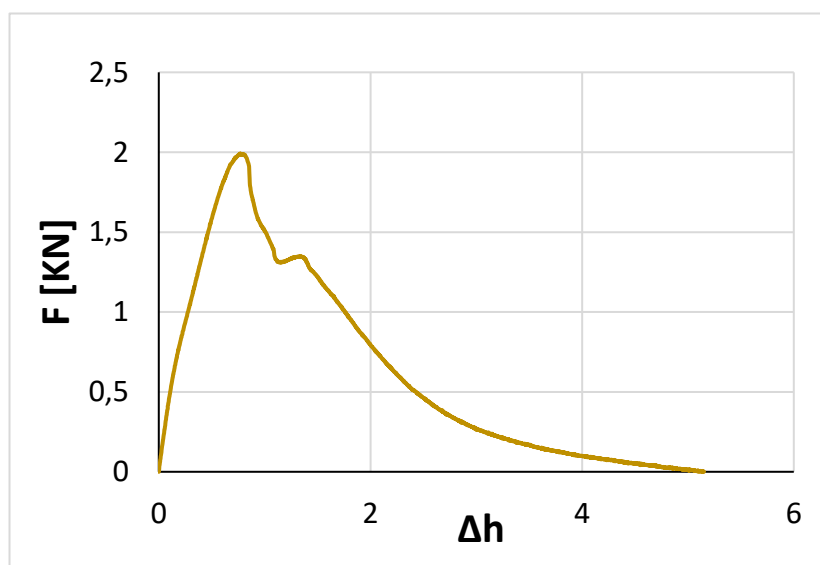


Grafico 3.20: Grafico Forza-corsa della struttura reticolare Isogrid al 20%

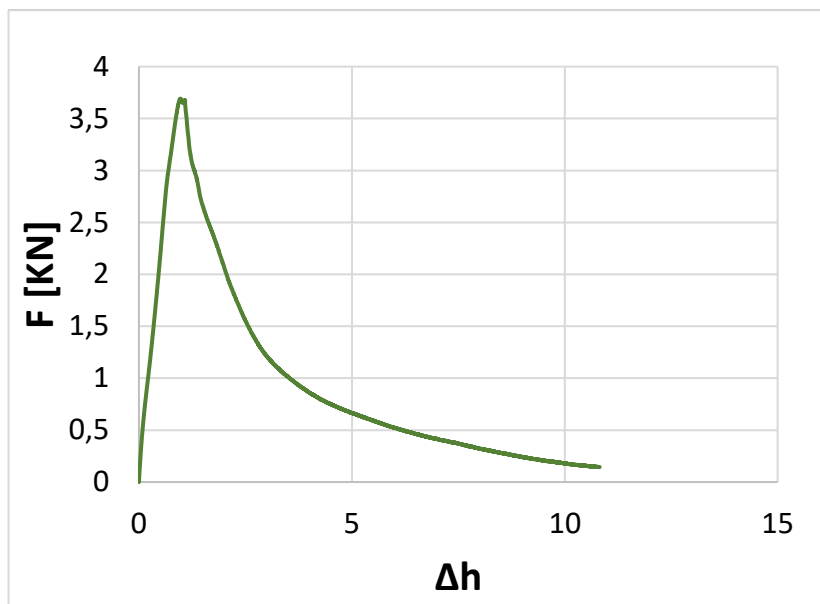


Grafico 3.21: Grafico Forza-corsa della struttura reticolare Isogrid al 35%

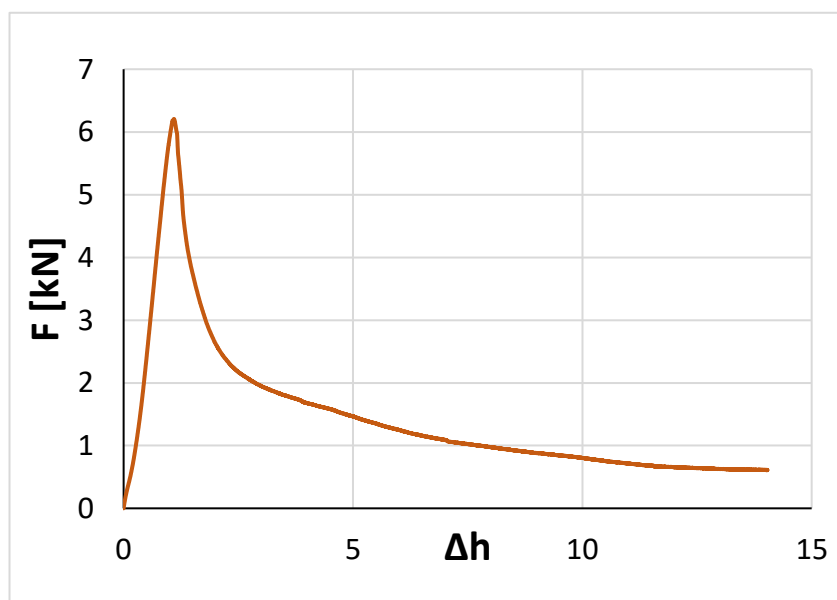


Grafico 3.22: Grafico Forza-corsa della struttura reticolare Isogrid al 42%

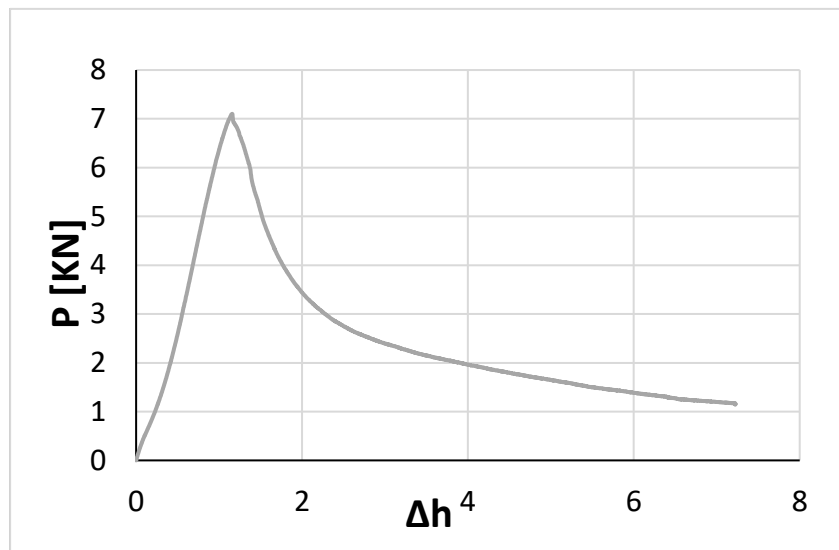


Grafico 3.23: Grafico Forza-corsa della struttura reticolare al 50%

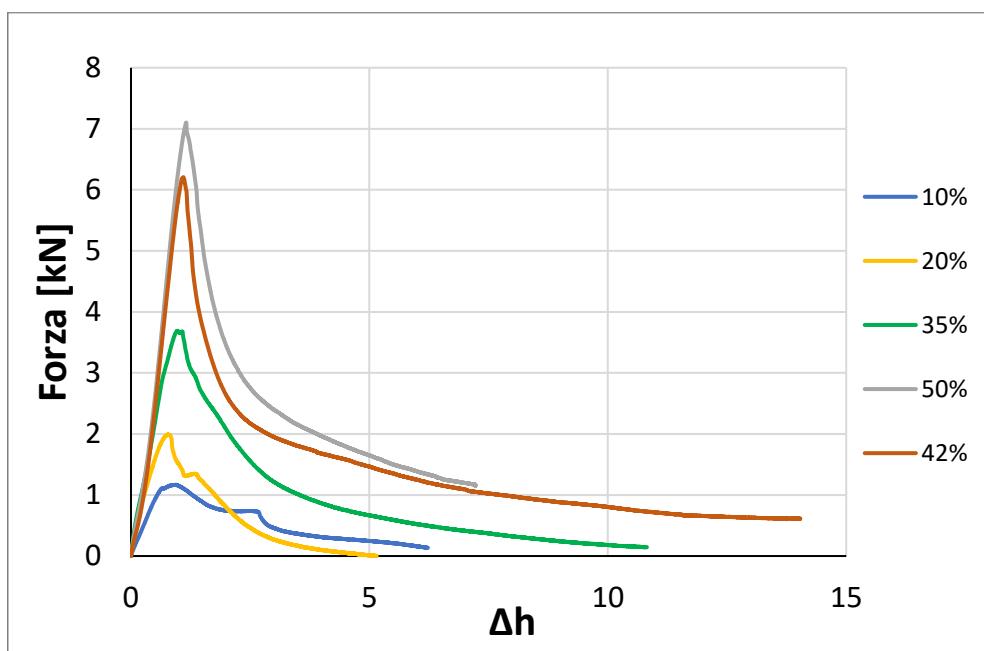


Grafico 3.24: Curve di compressione forza-corsa di confronto tra le Isogrid

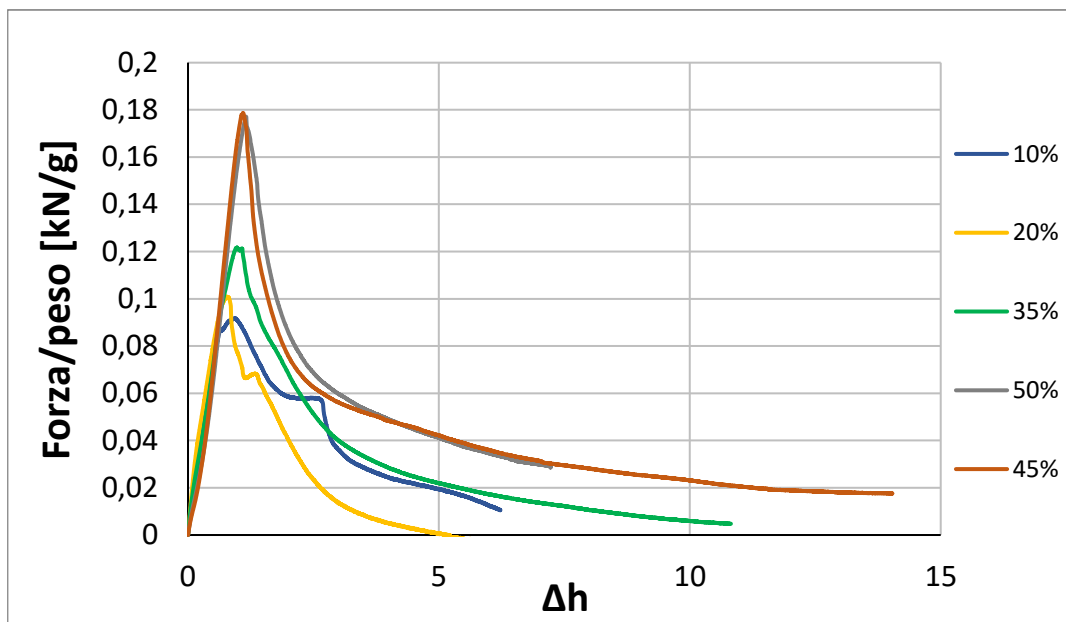


Grafico 3.25: Curve di compressione forza/peso-corsa di confronto tra le Isogrid

Come si può evincere dal grafico di confronto (Grafico 3.24) risulta che la forza sviluppata cresce al crescere della percentuale di fill density. Questo è dovuto al fatto che all'aumentare della fill density vi è una maggior quantità di fibra di carbonio che conferisce resistenza al pezzo, mentre, per quanto riguarda il grafico di confronto (Grafico 3.25) con le curve forza/peso-corsa, si nota un andamento crescente fino alla struttura con fill density del 42% a seguito del quale il guadagno di forza in relazione al peso non è più evidente, rendendo la soluzione alla maggiore percentuale di Fill density non più conveniente, ne dal punto di vista economico che prestazionale.

Si nota inoltre come il Buckling locale si manifesti nelle strutture con percentuali di fill density basse vista la minore quantità di fibra, mentre il buckling globale nelle strutture con fill density maggiori ove la quantità di fibra è maggiore (Fig. 2.21, Fig. 2.22).

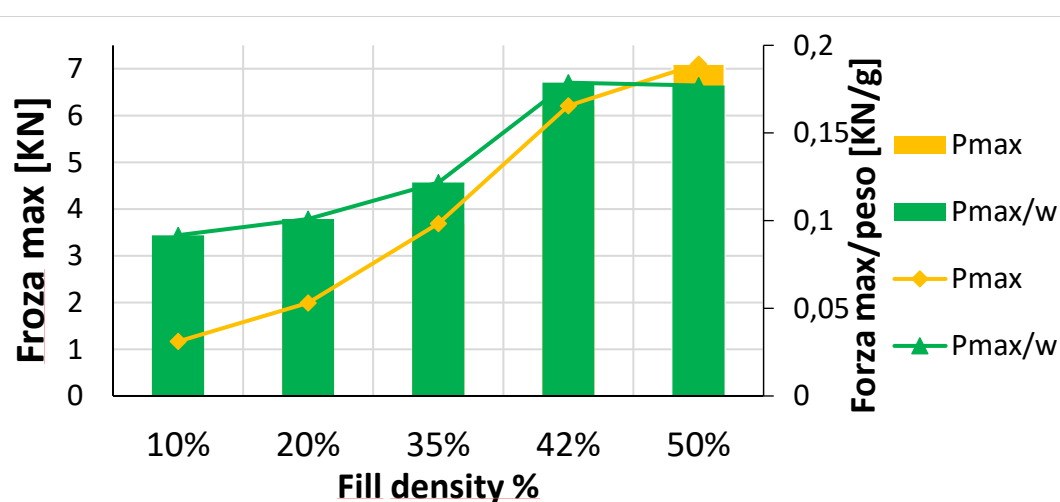


Grafico 3.26: Confronto degli andamenti della forza e della forza/peso

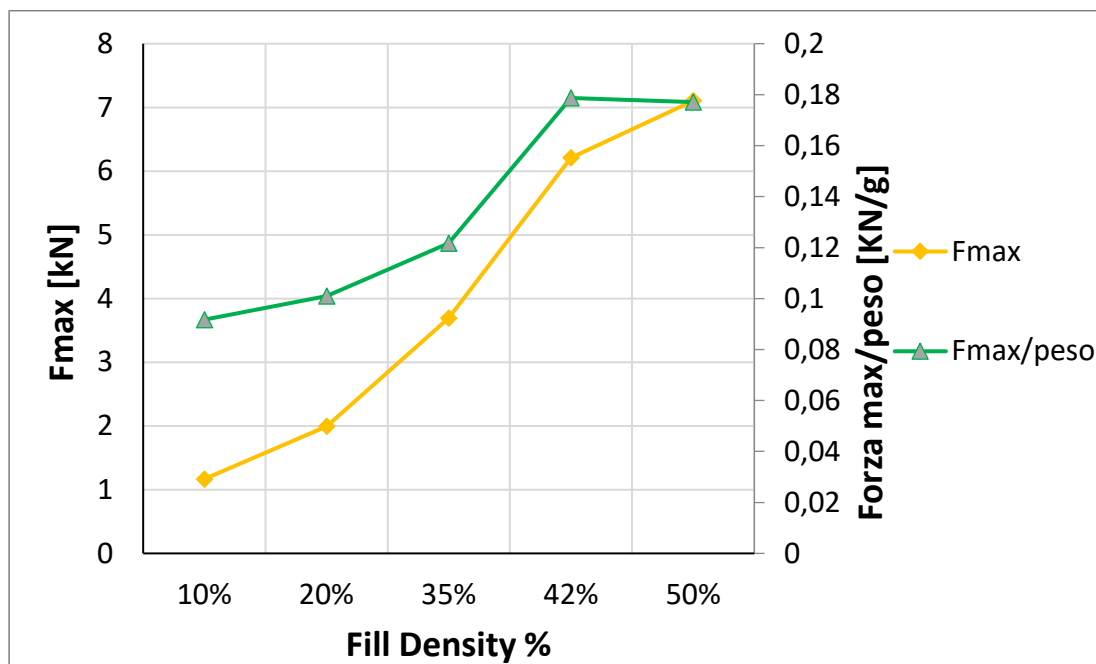


Grafico 3.26: Confronto degli andamenti della forza e della forza/peso

Inoltre, graficando la curva corsa-percentuale di infill, si è riscontrato che alla percentuale di riempimento pari al 20% la corsa assume il valore minimo.

Di seguito è riportata la tabella con i valori di forza e corsa, ottenuti al variare dell'infill.

	Fmax [kN]	Δh [mm]
10%	1,16	0,93
20%	1,99	0,77
35%	3,69	0,98
42%	6,20	1,09
50%	7,10	1,15

Tabella 3.10: Forza massima e rispettiva corsa delle Isogrid

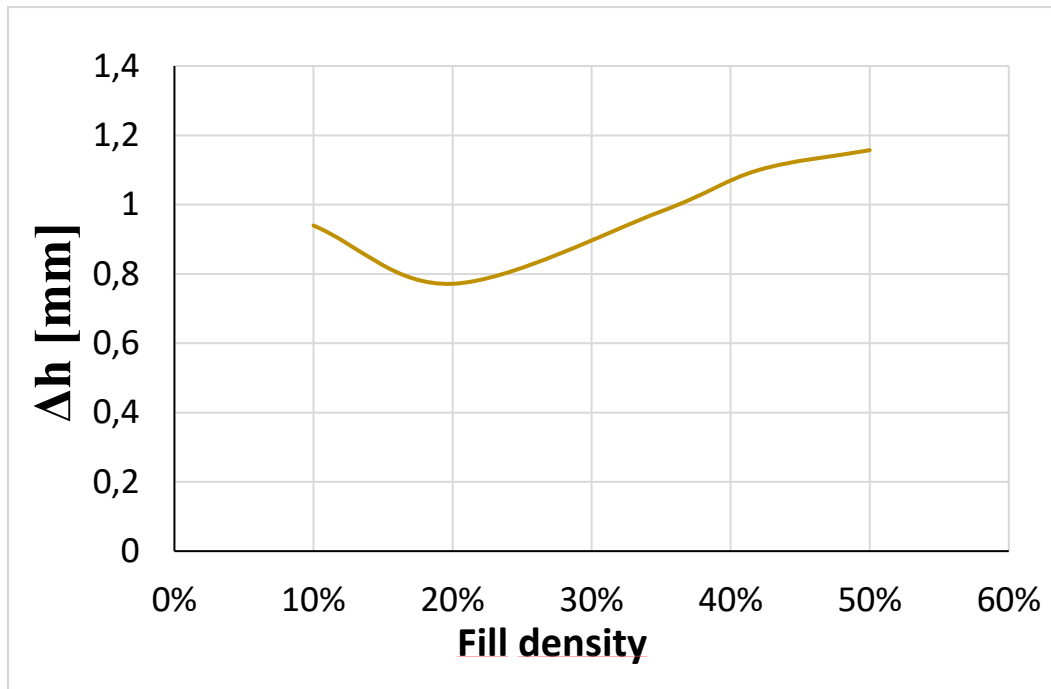


Grafico 3.27: Andamento della corsa in corrispondenza della Fmax delle Isogrid

Come già riportato nei capitoli precedenti, la struttura con fill density al 42%, prima di essere testata a compressione, è stata analizzata al tomografo industriale, con lo scopo di individuare le criticità della struttura in termini di vuoti ed errori di deposizione. In figura 3.21 si riporta un'immagine con più scansioni di cinque sezioni trasversali della struttura reticolare; dall'osservazione di tali immagini si nota che in corrispondenza dei nodi è presente un'elevata densità di fibra di carbonio poiché in quei punti si sovrappongono, incrociandosi uno sull'altro (overlap), più filamenti, , mentre, nella zona subito prossima si riscontra un'elevata quantità di nodi. ; Questo accade poiché uscendo dai nodi, le fibre prima sovrapposte, vanno a divergere, in più direzioni, per formare le celle unitarie del reticolo. La presenza di questi vuoti è sintomo di una scarsa adesione del filamento con quello sottostante.

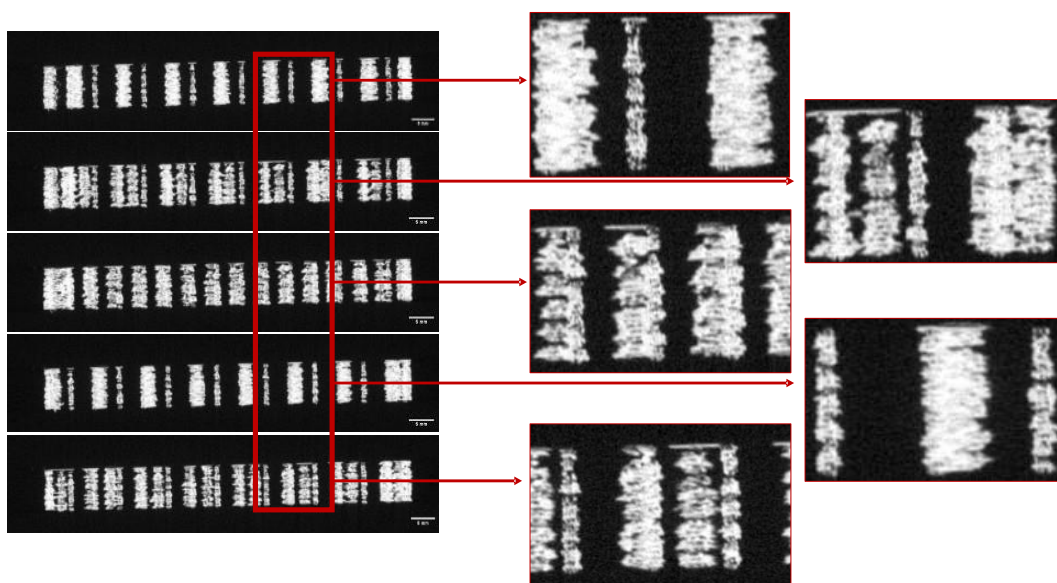


Figura 3.22: Risultati della tomografia

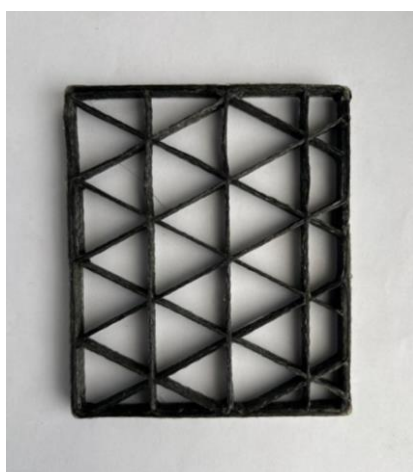


Figura 3.23: Vista frontale della Isogrid al 10%



Figura 3.24: Vista laterale della Isogrid al 10%



Figura 3.25: Vista frontale della Isogrid al 20%



Figura 3.26: Vista laterale della Isogrid al 20%



Figura 3.27: Vista frontale della Isogrid al 35%



Figura 3.28: Vista laterale della Isogrid al 35%

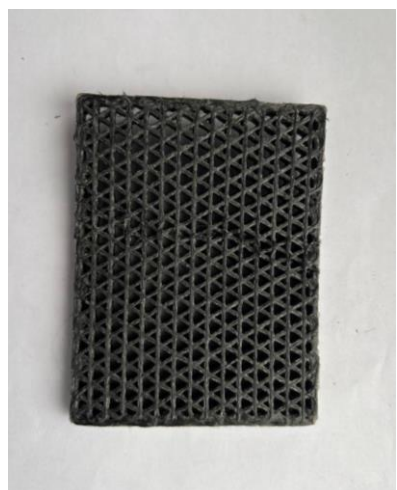


Figura 3.29: Vista frontale della Isogrid al 42%



Figura 3.30: Vista laterale della Isogrid al 42%



Figura 3.31: Vista frontale della Isogrid al 50%



Figura 3.32: Vista laterale della Isogrid al 50%

Per quanto riguarda invece le strutture Anisogrid si riportano di seguito la tabella con i parametri principali rilevati e i grafici con le curve forza-corsa e forza/peso-corsa.

Fill density %	Peso [g]	Tempo di stampa [min]	Fmax [kN]	F/Peso [kN/g]
10%	13,15	143	1,09	0,083
20%	20,47	219	2,04	0,099

Tabella 3.11: Pesi, tempi di stampa e parametri delle Anisogrid

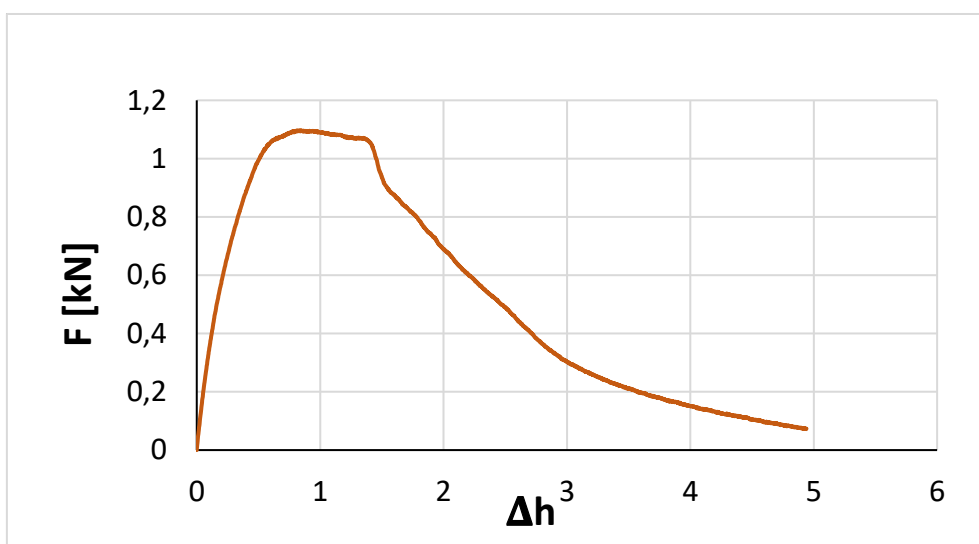


Grafico 3.28: Grafico Forza-corsa della struttura reticolare Anisogrid al 10%

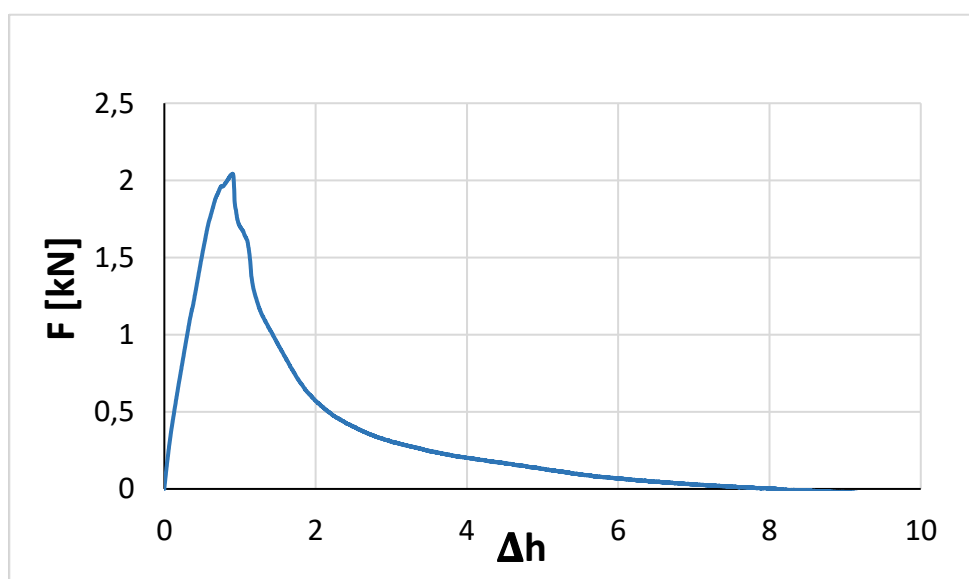


Grafico 3.29: Grafico Forza-corsa della struttura reticolare Anisogrid al 20%

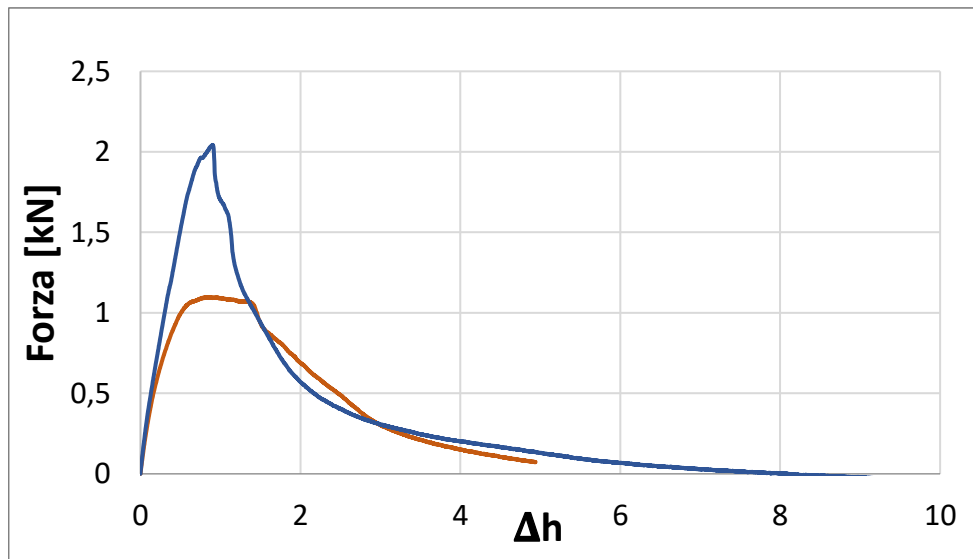


Grafico 3.30: Confronto Anisogrid forza-corsa

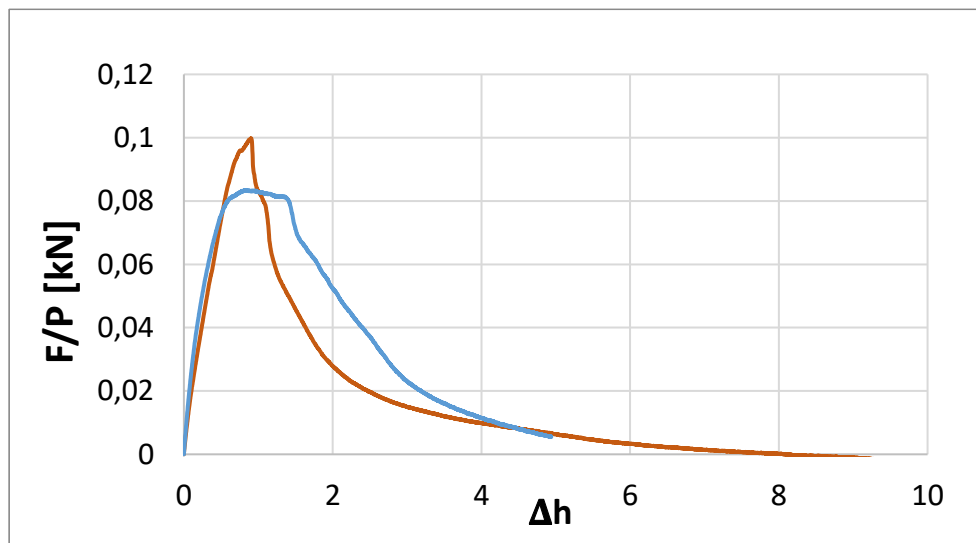


Grafico 3.31: Confronto Anisogrid forza/peso-corsa

I risultati ricavati dalle prove sulle Anisogrid sono stati poi confrontati con quelli delle Isogrid alle stesse percentuali di fill density (10% e 20%), per vedere se ci fossero differenze in termini di performance.

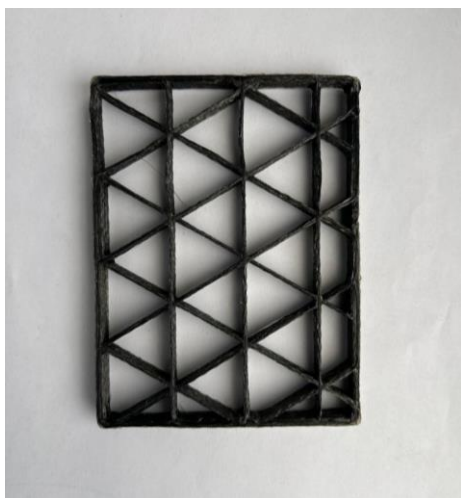


Figura 3.33: Vista frontale dell'Anisogrid al 10%



Figura 3.34: Vista laterale dell'Anisogrid al 10%

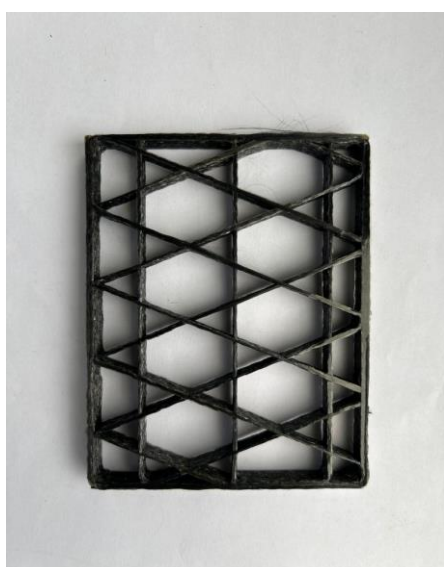


Figura 3.31: Vista frontale dell'Anisogrid al 20%



Figura 3.36: Vista laterale dell'Anisogrid al 20%

Si mostrano dunque i valori di forza e forza/peso tra le due strutture dove con il colore celeste sono indicate le strutture Isogrid, con il giallo le Anisogrid.

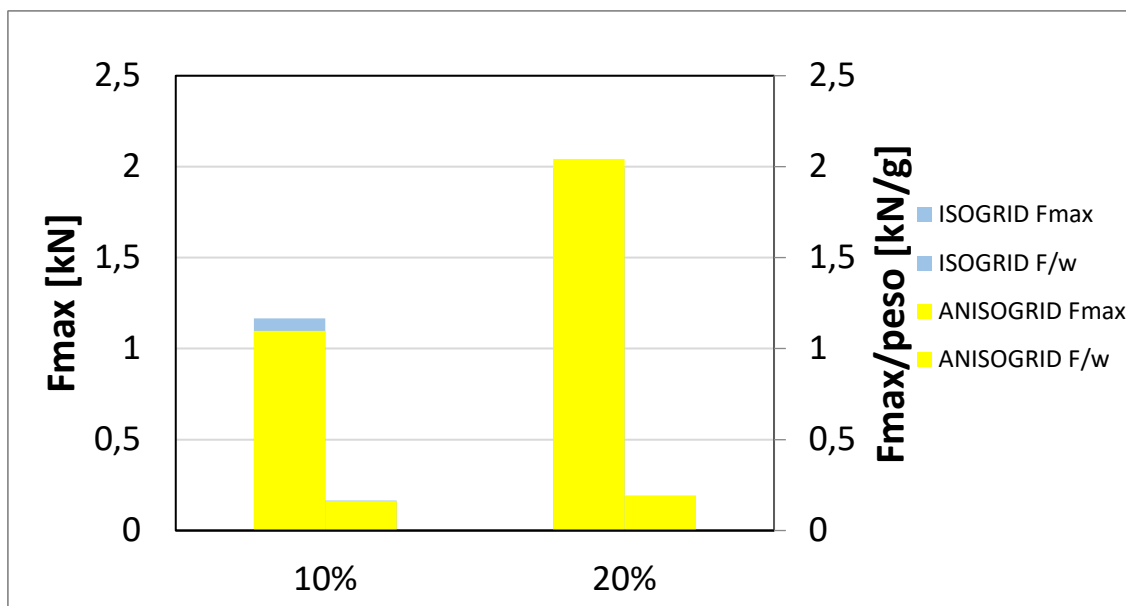


Grafico 3.32: Confronto in termini di forza e forza/peso tra Isogrid ed Anisogrid

Il grafico riporta due istogrammi di confronto per ciascuna percentuale. L'istogramma di sinistra fa riferimento alla forza massima, mentre quello di destra alla forza massima in rapporto al peso. In generale non si notano differenze rilevanti tra una geometria e l'altra.

Inoltre, sono stati confrontati i tempi di stampa, il peso delle strutture e la lunghezza di fibra utilizzata per ciascun campione di prova. Anche in questo caso non emergono differenze sostanziali.

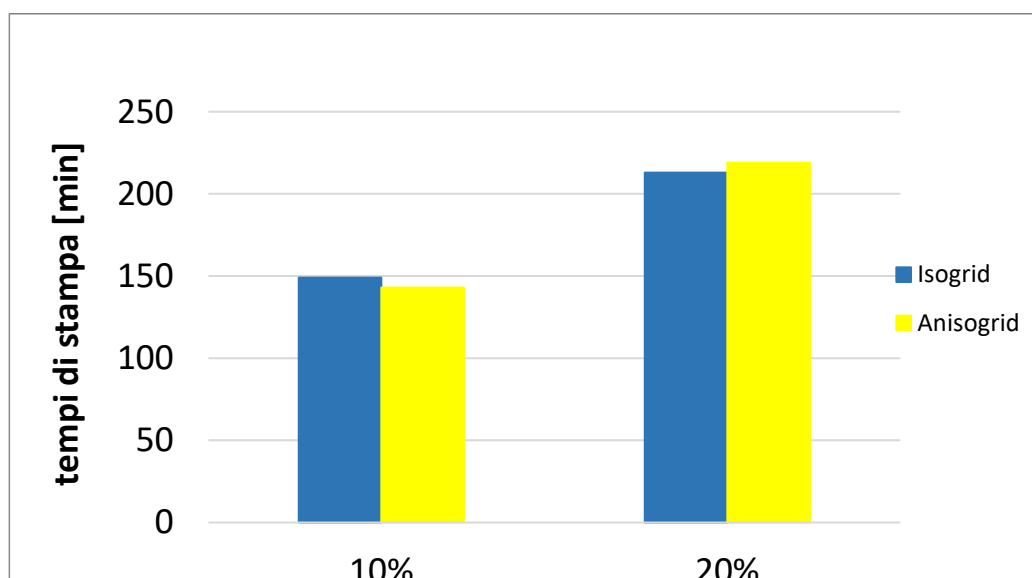


Grafico 3.33: Confronto tra i tempi di stampa di Isogrid ed Anisogrid

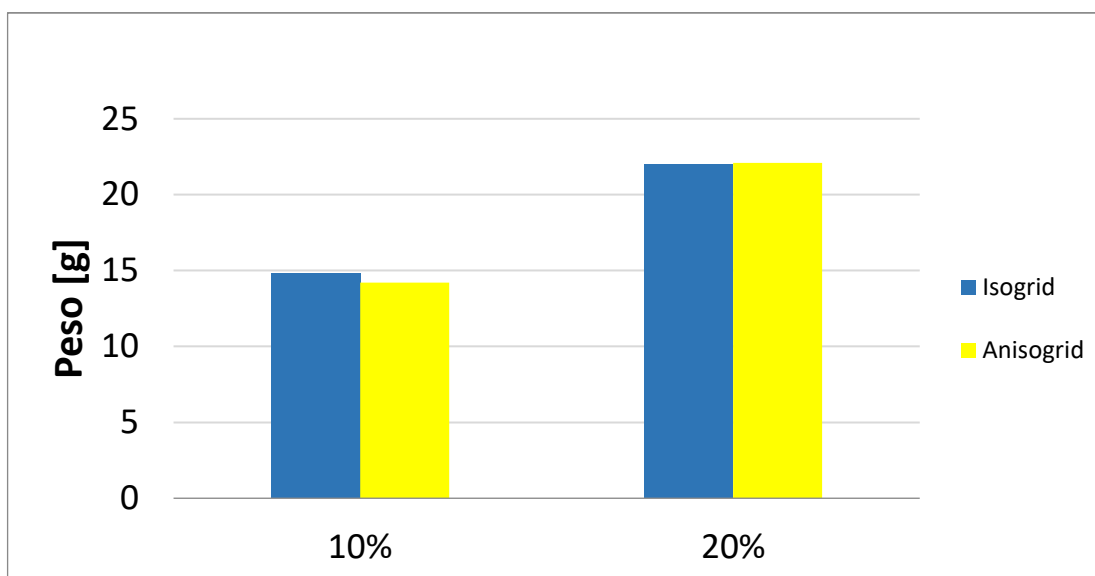


Grafico 3.34: Confronto tra i pesi di Isogrid ed Anisogrid

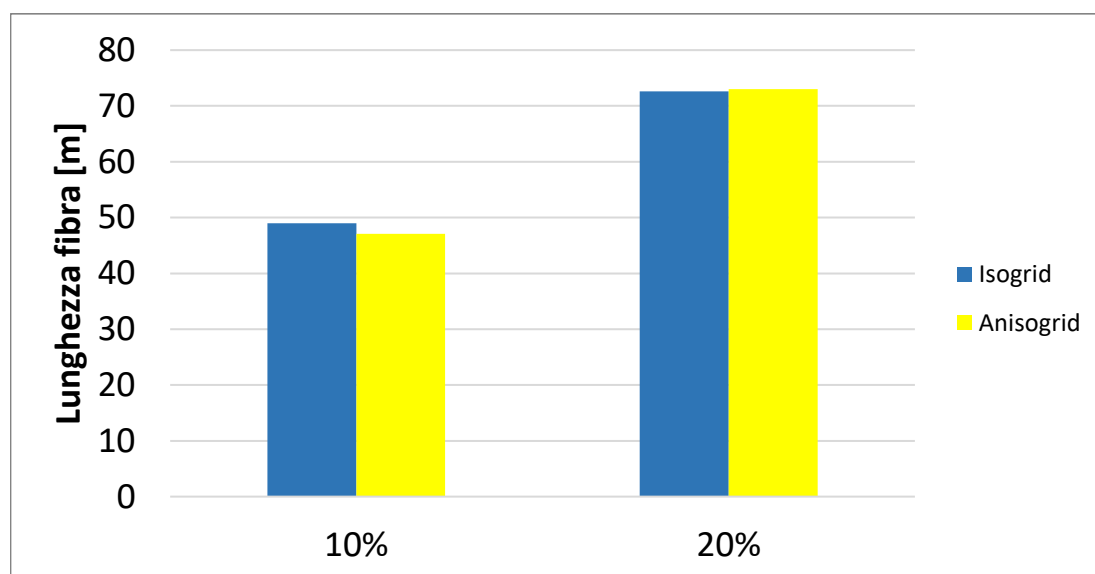


Grafico 3.35: Confronto tra le lunghezze di fibra depositata di Isogrid ed Anisogrid

Di seguito la tabella riassuntiva dei parametri confrontati.

	Fill density %	Tempo [min]	Peso [g]	peso fibra [g]	Lunghezza fibra [m]	Fmax [Kn]
Isogrid	10%	149	14,8	7,1	49	1,16
	20%	213	22	10,5	72,6	1,99
Anisogrid	10%	143	14,2	6,8	47,1	1,09
	20%	219	22,1	10,6	73	2,04

Conclusioni

Le conclusioni sono state suddivise in quattro sezioni, ognuna delle quali analizzerà separatamente i risultati ottenuti dai test fatti.

Attraverso i test di trazione flessione e compressione sono state analizzate le proprietà meccaniche del CCF 1.5k + CFC PA: materiale composito stampato 3D grazie alla tecnologia di co-estrusione Anisoprint.

Sia nel caso della trazione che della flessione i provini metà dei provini sono stati essiccati per 2h a 70°C prima del test e confrontati poi con quelli non essiccati.

Nel caso della compressione sono state stampate strutture reticolari Isogrid ed Anisogrid con diverse percentuali di fill density e confrontate.

Le strutture reticolari sono state analizzate al tomografo per studiare la presenza di vuoti.

- La resistenza a flessione raggiunge valori compresi tra 105 e 155 MPa, ovvero superiori del 10-20% rispetto a quella del Carbon PA;

- Il valore ottenuto per il modulo di Young a flessione risulta circa 5 volte superiore a quello del Carbon PA e raggiunge valori variabili tra 21 e 31 GPa;
- La resistenza a trazione raggiunge valori compresi tra circa 330 e 400 Mpa. Valori che sono 3 volte maggiori rispetto alla poliammide rinforzata con la fibra corta (CarbonPA) [15] e 2 volte in serie 3xxx 4xxx;
- Il valore ottenuto per il modulo di Young a trazione risulta 3 volte superiore rispetto a quello del CarbonPA;
- Anche per i valori della resistenza a flessione i dati sono in linea con le aspettative e i valori sono all'incirca del 10-20% superiori rispetto al CarbonPA dimostrando un contributo limitato della fibra;
- Il valore ottenuto per il modulo di Young a trazione è circa 40 GPa e risulta 3 volte superiore rispetto a quello del CarbonPA;
- Il processo di essiccazione nel caso della trazione non porta a benefici significativi questo è dovuto al fatto che, come riportato sulla scheda tecnica, la poliammide utilizzata è a basso assorbimento di umidità. Nel caso della flessione questo effetto sembra più marcato soprattutto dal punto di vista del modulo che aumenta del 21% rispetto ai provini non essiccati, ma sono necessari ulteriori studi.

Per quanto riguarda lo studio delle strutture reticolari Isogrid e Anisogrid sono stati individuati i seguenti risultati fondamentali:

- Nelle Isogrid si nota che all'aumentare della fill density la forza ha un trend crescente, tuttavia, per quanto riguarda invece la forza rapportata al peso, nel passaggio dal 42% al 50% si nota che non si evidenzia più un guadagno di resistenza
- Dalla tomografia si evidenziano dei vuoti soprattutto nelle vicinanze dei nodi;
- Dal confronto preliminare Isogrid-Anisogrid con la stessa percentuale di fill density emerge che non ci sono differenze sostanziali dal punto di vista di F_{max} , $F_{max}/peso$, tempo di stampa, quantità di fibra utilizzata e peso.

In conclusione, i risultati ottenuti evidenziano che l'utilizzo della stampa 3D, con tecnologia di co-estrusione, per la realizzazione di un composito in poliammide rinforzata con fibre lunghe di carbonio può rappresentare una valida alternativa a materiali e processi tradizionali, grazie alle proprietà meccaniche raggiunte. Ad ogni modo, si ritiene opportuno

proseguire nello studio di tale materiale, approfondendo quanto già fatto ed eseguendo ulteriori analisi. Si riportano di seguito eventuali suggerimenti per gli sviluppi futuri:

- Stampa e caratterizzazione meccanica di provini Isogrid con fill density del 60% e 70% per completare lo studio dell'andamento della forza e della forza/peso;
- Eseguire uno studio di sensibilità sulla variazione dei parametri di stampa;
- Stampare strutture reticolari modellando le geometrie in modo da poter variare gli spessori delle nervature;

BIBLIOGRAFIA e SITOGRAFIA

- [1] “Materiale composito - Wikipedia.”
https://it.wikipedia.org/wiki/Materiale_composito (accessed May 18, 2023).
- [2] G. M. Luz and J. F. Mano, “Mineralized structures in nature: Examples and inspirations for the design of new composite materials and biomaterials,” *Compos Sci Technol*, vol. 70, no. 13, pp. 1777–1788, Nov. 2010, doi: 10.1016/J.COMPSCITECH.2010.05.013.
- [3] “Fibra di vetro: cos’è, caratteristiche e utilizzi.”
<https://www.gavazzispa.it/blog/fibra-di-vetro-cos-e-caratteristiche-e-utilizzi> (accessed May 18, 2023).
- [4] “La fibra di Carbonio: cos’è? A cosa serve? - Reglass.”
<https://www.reglass.it/2019/11/la-fibra-di-carbonio-cose-a-cosa-serve/> (accessed May 18, 2023).
- [5] “Temperatura di transizione vetrosa dei polimeri.” <https://www.protolabs.com/it-it/risorse/suggerimenti-di-progettazione/temperatura-di-transizione-vetrosa-dei-polimeri/> (accessed May 26, 2023).
- [6] “PETG nella stampa 3D: tutto quello che c’è da sapere – 3Dnatives.”
<https://www.3dnatives.com/it/petg-stampa-3d-271020219/> (accessed May 26, 2023).
- [7] “Nylon: caratteristiche, manutenzione e difetti - Technofashion.”
<https://www.technofashion.it/nylon-caratteristiche-e-manutenzione/> (accessed May 25, 2023).

- [8] “Fibre aramidiche - Teknoring.”
<https://www.teknoring.com/wikitecnica/costruzioni/fibre-aramidiche/> (accessed May 18, 2023).
- [9] “Tecnologie di produzione dei compositi - Brano tesi.”
<https://www.tesionline.it/tesi/brano/tecnologie-di-produzione-dei-compositi/30660> (accessed May 18, 2023).
- [10] “Stampa 3D: design, prototipazione e produzione industriale.”
<https://www.meccanicaneews.com/2023/03/21/stampa-3d-design-prototipazione-e-produzione-industriale/> (accessed May 25, 2023).
- [11] “Guida alla stampa 3D in fibra di carbonio: stampanti e materiali a confronto | Formlabs.” <https://formlabs.com/it/blog/guida-stampa-3d-fibra-carbonio-confronto-stampanti-materiali/> (accessed May 22, 2023).
- [12] “Prova di trazione - Wikipedia.” https://it.wikipedia.org/wiki/Prova_di_trazione (accessed May 25, 2023).
- [13] “Prova di flessione | Instron.” <https://www.instron.com/it-it/resources/test-types/flexural-testing> (accessed May 29, 2023).
- [14] “Prove di compressione e di compressione con intaglio sui materiali compositi | ZwickRoell.” <https://www.zwickroell.com/it/settori-industriali/compositi/prove-di-compressione-e-prove-di-compressione-su-provini-intagliati/> (accessed May 30, 2023).
- [15] A. Forcellese, M. Simoncini, A. Vita, and V. Di Pompeo, “3D printing and testing of composite isogrid structures,” *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 109, no. 7–8, pp. 1881–1893, Aug. 2020, doi: 10.1007/S00170-020-05770-4/FIGURES/16.
- [16] G. Totaro, P. Spena, G. Giusto, F. De Nicola, S. Kiryenko, and S. Das, “Highly efficient CFRP anisogrid lattice structures for central tubes of medium-class satellites: Design, manufacturing, and performance,” *Compos Struct*, vol. 258, p. 113368, Feb. 2021, doi: 10.1016/J.COMPSTRUCT.2020.113368.
- [17] “Aura | Anisoprint.” <https://anisoprint.com/aura/> (accessed Jun. 29, 2023).
- [18] “Composer A3 - 3DiTALY Shop.” <https://www.3ditalyshop.it/prodotto/stampanti-3d/anisoprint/stampante-3d-a-fibra-continua-anisoprint-composer-a3/> (accessed Jun. 20, 2023).

RINGRAZIAMENTI

Ringrazio in maniera molto sentita la mia famiglia, la mia fidanzata e tutti i miei più cari amici.

La scienza è il capitano, e la pratica sono i soldati. [Leonardo Da Vinci]