

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, EDILE E AMBIENTALE

Department Of Civil, Environmental and Architectural Engineering

Corso di Laurea in Ingegneria Civile



TESI DI LAUREA

**Analisi delle tensioni in un mezzo
polimerico stampato con
tecnologia FDM**

Relatore:

Prof.ssa Beatrice Pomaro

Laureando:

Francesco de Bartolomeis

Correlatore:

Dr. Ing. Filippo Andreose

ANNO ACCADEMICO 2025-2026

Abstract

L'elaborato si propone di esplorare la tecnologia Fused Deposition Modeling (FDM) nel contesto dell' *Additive Manufacturing*, partendo da un'esposizione iniziale sui suoi principi di funzionamento e dalla discussione analitica delle criticità a cui è soggetta. L'indagine prosegue poi con un approccio sperimentale dove tali problematiche sono indagate attraverso prove di trazione e flessione su due materiali diversi: PLA e PLA rinforzato con fibre di carbonio (PLA-CF). I risultati delle analisi numeriche e sperimentali saranno integrate dall'impiego della Digital Image Correlation (DIC), consentendo una mappatura accurata dei campi di deformazione e una migliore interpretazione visiva dei fenomeni meccanici indagati.

Indice

Introduzione	1
1 Tecnologia FDM	3
1.1 Contestualizzazione storica e terminologica	3
1.2 Principi di funzionamento e controllo del processo FDM	4
1.2.1 Meccanica dell'estrusione e modello analitico	4
1.2.2 Cinematica e controllo del posizionamento	6
1.2.3 Software di <i>slicing</i>	7
1.2.4 Generazione del percorso e strutture di supporto	8
1.2.5 Controllo del flusso e parametri di processo	9
1.3 Problematiche della tecnologia FDM	9
1.3.1 Anisotropia	10
1.3.2 Adesione <i>inter-layer</i>	11
1.3.3 Problematiche a livello materico	16
1.3.4 Consistenza geometrica	17
2 Analisi sperimentale	19
2.1 Obiettivi	19
2.2 Setup sperimentale e risultati visivi	20
2.2.1 Stampa dei provini	20
2.2.2 Classificazione dei provini	23
2.2.3 Configurazione delle prove di trazione e flessione	24
2.2.4 Impostazione dell'analisi DIC	28
2.3 Metodi analitici	30
2.3.1 Analisi prove a trazione	30
2.3.2 Analisi prove a flessione	31
2.3.3 Analisi DIC	32
2.3.4 Valori notevoli	35

3	Risultati sperimentali	36
3.1	Prove di trazione	37
3.1.1	Trazione: PLA con layer longitudinali	37
3.1.2	Trazione: PLA-CF con layer longitudinali	38
3.1.3	Trazione: PLA con layer trasversali	39
3.1.4	Trazione: PLA-CF con layer trasversali	40
3.1.5	Considerazioni e confronto delle prove di trazione	41
3.2	Prove di flessione	43
3.2.1	Flessione: PLA con layer longitudinali	43
3.2.2	Flessione: PLA-CF con layer longitudinali	44
3.2.3	Flessione: PLA con layer trasversali	45
3.2.4	Flessione: PLA-CF con layer trasversali	46
3.2.5	Considerazioni e confronto delle prove di flessione	47
4	Conclusioni	49
4.1	Considerazioni sui risultati analitici	49
4.2	Considerazioni sulla tecnologia FDM	50

Introduzione

Il presente elaborato si propone di esplorare un ambito tecnologico in forte espansione e ricco di potenziale: la stampa 3D, con particolare riferimento alle tecnologie basate sull'estrusione di materiale (FDM). Come verrà illustrato nei capitoli successivi, il panorama dell'*Additive Manufacturing*, di cui la tecnologia FDM fa parte, comprende molteplici tecnologie, ciascuno ottimizzata per specifici campi applicativi e obiettivi ingegneristici.

La trattazione fornirà inizialmente una panoramica sui principi di funzionamento delle macchine FDM, evidenziando come queste consentano oggi la realizzazione di componenti con proprietà meccaniche ed estetiche di notevole rilevanza. Successivamente, l'attenzione si sposterà sull'analisi delle criticità intrinseche che caratterizzano tali processi. Fenomeni quali l'anisotropia e l'adesione *inter-layer* rappresentano, infatti, problematiche strutturali di primaria importanza, attorno alle quali si sta concentrando una fiorente ricerca scientifica.

A valle dell'inquadramento teorico, l'elaborato presenterà un'analisi sperimentale condotta al fine di confrontare le resistenze a flessione e trazione di provini realizzati in due differenti materiali termoplastici: l'Acido Polilattico (PLA), un polimero biodegradabile di origine vegetale, e la sua variante composita rinforzata con fibre di carbonio (PLA-CF), un tecnopolimero formulato per garantire prestazioni meccaniche superiori. L'indagine non si limiterà a un mero confronto materico, ma valuterà in modo sistematico l'influenza dell'orientamento dei *layer* di stampa, parametro fondamentale che governa la risposta meccanica del componente.

Verranno pertanto eseguite prove meccaniche su campioni con *layer* orientati sia parallelamente sia perpendicolarmente alla direzione di applicazione del carico, al fine di caratterizzare la modalità di collasso del materiale e l'eventuale transizione tra un comportamento di tipo duttile e uno di tipo fragile.

Lo studio sarà infine corredato da un confronto prestazionale complessivo tra le diverse famiglie di provini (otto in totale) e da un'analisi parallela condotta mediante

Digital Image Correlation. Questa tecnica ottica permetterà di mappare a campo intero il quadro deformativo, fornendo un riscontro visivo e quantitativo della propagazione delle tensioni sulla superficie del provino polimerico durante l'applicazione del carico.

Capitolo 1

Tecnologia FDM

1.1 Contestualizzazione storica e terminologica

Le origini delle tecnologie di stampa 3D risalgono alla metà degli anni Ottanta, periodo in cui i primi sistemi venivano impiegati esclusivamente per la visualizzazione fisica di modelli geometrici. In questa fase embrionale, gli oggetti prodotti erano privi di reali proprietà meccaniche o strutturali; la loro funzione era limitata alla validazione estetica o dimensionale all'interno del ciclo di progettazione.

Proprio per questa sua natura, la tecnologia venne inizialmente definita con il termine *Rapid Prototyping* (Prototipazione Rapida). Tuttavia, negli ultimi decenni, il settore ha subito un'evoluzione radicale: il miglioramento delle prestazioni dei macchinari e lo sviluppo di nuovi materiali hanno permesso di superare il concetto di mero prototipo, arrivando alla produzione di componenti definitivi, pronti per l'impiego finale o per l'integrazione in sistemi complessi.

A fronte di questo cambio di paradigma progettuale, il comitato tecnico F42 dell'ASTM (*American Society for Testing and Materials*) ha formalizzato la transizione terminologica verso il concetto di *Additive Manufacturing* (AM). Questo termine sottolinea la natura industriale del processo che, a differenza delle metodologie sottrattive tradizionali, realizza il manufatto mediante l'apporto incrementale di materiale.

All'interno della vasta famiglia dell'*Additive Manufacturing* rientrano molteplici tecnologie, tra cui la fotopolimerizzazione in vasca (la cui declinazione odierna più diffusa è la stereolitografia), la fusione a letto di polvere (*Powder Bed Fusion*) e le tecnologie a getto di materiale (*Material Jetting*).

Sempre appartenenti all'ambito dell'*Additive Manufacturing* sono anche le tecnologie ad estrusione di materiale, le quali si distinguono come le soluzioni attualmente più versatili e diffuse. Il principio fisico alla base è intuitivo: un materiale, generalmente polimerico e inizialmente allo stato solido, viene portato a fusione e depositato attraverso un ugello su un piano di stampa.

La rilevante flessibilità di quest'ultima tecnologia risiede nella compatibilità con un'ampia gamma di polimeri (nonché con altre classi di materiali compositi) e nella capacità di scalare il processo per la creazione di geometrie di grandi dimensioni, in funzione delle specifiche architettoniche del macchinario utilizzato.

Per identificare tale tecnologia si utilizzano principalmente due nomenclature. Il termine più comune, *Fused Deposition Modeling* (FDM), è un marchio originariamente registrato dall'azienda Stratasys, che per prima ha ideato e brevettato il processo. Il secondo termine, *Material Extrusion* (MEX), rappresenta invece la denominazione ufficiale introdotta dagli standard ASTM e ISO per la classificazione univoca di questa categoria di processi additivi.

Ad oggi, la dicitura *Fused Deposition Modeling* rimane lo standard linguistico di fatto maggiormente impiegato in ambito industriale e commerciale.

1.2 Principi di funzionamento e controllo del processo FDM

Il processo di stampa per estrusione di materiale, come già introdotto poco sopra, si basa sulla deposizione strato su strato di un filamento polimerico fuso. Il controllo ottimale di questo processo richiede una precisa sincronizzazione tra la fluidodinamica del materiale, la termodinamica del sistema e la cinematica della macchina.

1.2.1 Meccanica dell'estrusione e modello analitico

Il principio cardine della tecnologia FDM prevede l'estrusione di un filamento termoplastico che viene forzato meccanicamente ad attraversare un serbatoio di fusione (*hotend*) e a fuoriuscire attraverso un ugello (*nozzle*) con diametro nominale fisso. L'avanzamento del filamento è garantito dalla forza impressa da dei rulli di trascinamento che spingono meccanicamente il filamento ancora solido all'interno del serbatoio di fusione; in questo sistema, il tratto di filamento solido a monte agisce da vero e proprio pistone, generando la pressione necessaria a vincere la resistenza viscosa e a spingerlo attraverso l'orifizio (Figura 1.1).

All'interno del serbatoio di fusione, il materiale deve raggiungere uno stato viscoelastico ottimale: una viscosità eccessiva comporterebbe l'occlusione dell'ugello, mentre una fluidità eccessiva impedirebbe al materiale depositato di mantenere la forma strutturale sotto il proprio peso. Il controllo della temperatura di estrusione risulta pertanto cruciale, non solo per massimizzare le proprietà meccaniche del profilo stampato, ma anche per evitare la degradazione termica del polimero, che danneggerebbe irrimediabilmente i componenti interni dell'estrusore. Il filamento semi-solido depositato solidifica poi rapidamente, fungendo da piano di appoggio per i layer sovrastanti e da vincolo laterale per le estrusioni adiacenti.

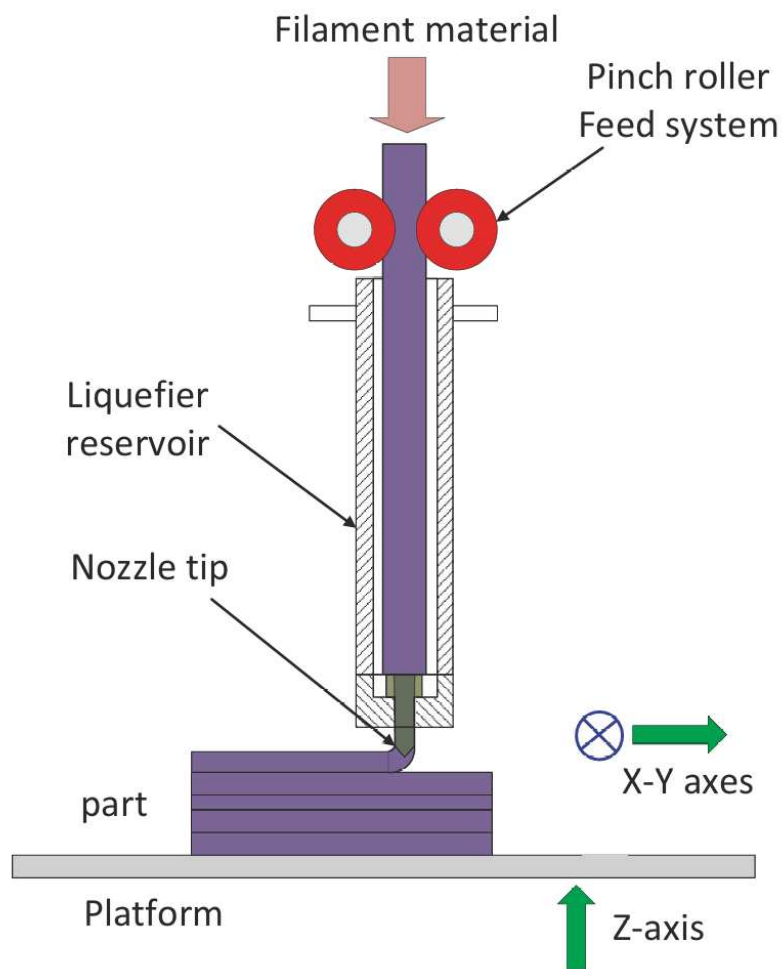


Figura 1.1: Schema funzionale dell'estrusione in una stampante FDM [6].

Per comprendere a fondo le problematiche fluidodinamiche che affliggono questa tecnologia, è opportuno introdurre una descrizione analitica del processo. Adottando il pedice " f " per le variabili relative al filamento in ingresso e il pedice " r " per le

variabili legate al filamento depositato (dal termine inglese *road*), si definisce la portata volumetrica in ingresso come:

$$Q_f = v_f \pi r_f^2 \quad (1.1)$$

dove v_f rappresenta la velocità di avanzamento del filamento spinto dai rulli e r_f è il raggio del filamento solido. Per garantire un flusso di deposizione continuo e privo di accumuli o difetti, la portata in ingresso deve uguagliare la portata in uscita depositata sul piano di stampa:

$$Q_r = v_r W H \quad (1.2)$$

dove v_r è la velocità di movimento dell'ugello (e quindi la velocità di deposizione del filamento), W è la larghezza della traccia di fuso e H la sua altezza. Assumiamo quindi, in questa schematica trattazione, che il filamento estruso abbia una sezione perfettamente rettangolare. Uguagliando le due portate per il principio di conservazione della massa, si ricava la velocità di alimentazione richiesta:

$$v_f = \frac{v_r W H}{\pi r_f^2} \quad (1.3)$$

1.2.2 Cinematica e controllo del posizionamento

Le macchine FDM si avvalgono tipicamente di una piattaforma mobile per l'avanzamento lungo l'asse verticale (Z), la quale consente la formazione sequenziale dei singoli strati, mentre l'estrusore si muove sul piano orizzontale (X-Y) tramite un sistema di posizionamento cartesiano.

Dal punto di vista puramente meccanico, il gruppo estrusore rappresenta una massa soggetta a inerzia. Conseguentemente, ogni variazione di traiettoria nel piano comporta inevitabilmente una fase transitoria di decelerazione seguita da una successiva accelerazione. Affinché la deposizione del materiale risulti omogenea, come descritto dall'equazione 1.2, la portata volumetrica deve adattarsi dinamicamente a queste variazioni della velocità di traslazione v_r . In caso contrario, in prossimità degli spigoli o nei cambi di direzione repentini, si verificherebbero inevitabili fenomeni di sovra-estrusione o sotto-estrusione. I sistemi di movimentazione devono pertanto garantire reattività ed elevata precisione cinematica, affinché il manufatto finale soddisfi appieno le specifiche meccaniche ed estetiche di progetto.

1.2.3 Software di *slicing*

Ad un comparto hardware di tale precisione deve necessariamente corrispondere un ambiente software altrettanto reattivo, incaricato di tradurre la geometria teorica nelle corrette istruzioni di posizionamento ed estrusione.

Il modello tridimensionale sviluppato in ambiente CAD deve quindi essere processato attraverso un software di discretizzazione in strati (lo *slicer*). Generalmente, questo passaggio richiede preliminarmente l'esportazione dall'ambiente CAD di un file in formato STL (acronimo derivato da *STereoLithography*, la prima tecnologia AM storicamente commercializzata).

Il formato STL approssima le superfici del modello continuo attraverso una *mesh* di elementi triangolari. Nello specifico, ciascun triangolo è definito univocamente dalle coordinate spaziali dei suoi tre vertici e da un vettore normale alla superficie, il quale indica la direzione esterna del solido, definendone così la topologia, come illustrato nella Figura 1.2. Questo formato memorizza esclusivamente dati geometrici spaziali; qualora fosse necessario esportare attributi aggiuntivi, quali la colorazione o le specifiche materiche, risulterebbe indispensabile l'adozione di formati più avanzati, come l'AMF (*Additive Manufacturing File Format*).

Una volta importato il modello all'interno dello *slicer*, è possibile procedere, tramite l'interfaccia grafica, alla definizione dell'orientamento spaziale del pezzo sul piano di costruzione e all'impostazione dei parametri operativi. In questa fase, l'utente definisce variabili di processo fondamentali, quali l'altezza dei layer, le velocità di movimentazione degli assi e le temperature di estrusione. Risulta pertanto evidente come questo *setup* preliminare costituisca un passaggio critico e di massima importanza per il soddisfacimento dei requisiti di progetto, siano essi legati alle prestazioni meccanico-strutturali del manufatto o alle sue caratteristiche estetiche e dimensionali.

Ulteriori parametri operativi di rilevante importanza, configurabili all'interno dello *slicer*, includono le impostazioni di retrazione e le tolleranze per le geometrie a sbalzo. Nello specifico, la retrazione consiste nell'arretramento controllato del filamento all'interno dell'ugello (variabile in termini di lunghezza e velocità di retrazione) al fine di prevenire la fuoriuscita accidentale di materiale per gravità durante gli spostamenti a vuoto dell'estrusore; tale accorgimento è essenziale per evitare difetti superficiali sul componente. Infine, la lunghezza massima di ponte (o *bridging*) definisce la distanza limite entro la quale un'estrusione polimerica può essere effettuata orizzontalmente tra due punti di appoggio senza collassare, ovviando alla necessità

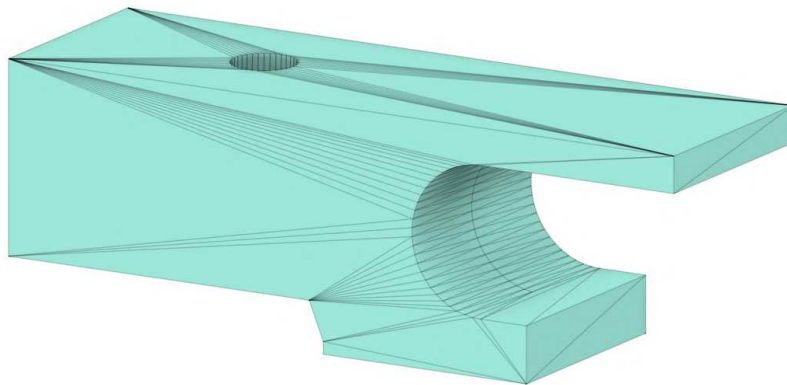


Figura 1.2: Rappresentazione *mesh* triangolare di un aggancio per botola.

di generare apposite strutture di sostegno inferiori.

1.2.4 Generazione del percorso e strutture di supporto

A valle dell'impostazione dei parametri operativi, lo *slicer* estrae i profili trasversali di ogni strato e li converte nel linguaggio macchina necessario per la movimentazione dell'ugello (*G-code*).

La strategia di deposizione standard prevede la stampa preliminare dei perimetri esterni, seguita dalla generazione del riempimento interno. I perimetri vengono tipicamente estrusi a velocità ridotte per garantire un flusso materico costante e massimizzare la precisione geometrica. Questo guscio esterno funge inoltre da barriera fisica, confinando il materiale di riempimento. Il volume interno (*infill*), al contrario, viene realizzato a velocità nettamente superiori, non risultando influente ai fini estetici e permettendo di incrementare l'efficienza complessiva della produzione.

Inoltre, per le geometrie dotate di porzioni a sbalzo, la tecnologia FDM richiede necessariamente la generazione di strutture di supporto temporanee. Tali elementi possono essere calcolati in modo interamente algoritmico dal software o personalizzati manualmente dall'utente. Nel caso in cui si opti per supporti *breakaway* (rimovibili meccanicamente al termine della fase di stampa) realizzati con il medesimo materiale di costruzione del pezzo, risulta fondamentale calibrarne accuratamente l'interfaccia di contatto; la fase di rimozione manuale, infatti, comporta inevitabilmente un'alterazione localizzata della finitura superficiale del componente strutturale.

1.2.5 Controllo del flusso e parametri di processo

I continui cambi di direzione richiesti per generare i pattern di riempimento comportano la formazione di vuoti all'interno della struttura. Per mitigare questo difetto, il controllo del flusso non deve essere unicamente proporzionale alla velocità istantanea: nelle zone di cambio direzione a bassa velocità, aumentare leggermente la portata volumetrica in uscita aiuta a riempire i vuoti interstiziali, migliorando la resistenza meccanica, a patto di non generare rigonfiamenti eccessivi.

Schematicamente, il controllo accurato dell'estrusione è un complesso bilanciamento di molteplici parametri:

- **Pressione di alimentazione:** Varia costantemente per modulare il flusso in base alle accelerazioni della testina.
- **Temperatura:** All'aumentare della temperatura nella camera di fusione, la viscosità cala, richiedendo aggiustamenti dinamici della pressione esercitata dai rulli.
- **Comportamento del materiale:** I fenomeni legati al flusso viscoso rendono complesso il controllo istantaneo delle fasi di avvio e interruzione dell'estrusione.
- **Forze accessorie:** La gravità e l'eventuale espansione di gas interni al polimero possono causare colature indesiderate.

1.3 Problematiche della tecnologia FDM

Sebbene la tecnologia FDM offra notevoli vantaggi in termini di rapidità, da intendersi non tanto come velocità di fabbricazione del singolo componente, quanto come drastico snellimento dell'intera filiera produttiva grazie al passaggio diretto dal modello digitale al prodotto fisico, essa è intrinsecamente soggetta a specifici problemi di processo.

Nel presente elaborato verranno indagate esclusivamente le problematiche aventi una ricaduta diretta sul comportamento meccanico e strutturale del pezzo stampato, escludendo pertanto dalle anomalie prettamente legate all'hardware della macchina. Nello specifico, tali complicazioni possono essere ricondotte a quattro macro-categorie principali: l'anisotropia del manufatto, i difetti di adesione *inter-layer*, le peculiarità materiche dei polimeri estrusi e la perdita di accuratezza dimensionale.

1.3.1 Anisotropia

L'anisotropia è una caratteristica intrinseca degli oggetti realizzati tramite AM, derivante dalla natura stessa della tecnologia. Essendo costruiti strato su strato, risulta evidente come molte proprietà meccaniche del componente dipendano dall'orientamento di stampa e dalla direzione di applicazione dei carichi rispetto al piano di deposizione dei layer.

L'indagine sui parametri in grado di influenzare la già forte predisposizione di questa tecnologia al comportamento anisotropo ha costituito fin da subito un tema di particolare rilievo scientifico.

A tal proposito, uno studio dei primi anni Duemila condotto da Ahn et al. [1] pone per la prima volta l'attenzione su due parametri fondamentali che alterano significativamente le proprietà meccaniche di un oggetto stampato con tecnologia FDM: l'*air gap* (lo spazio tra due *roads* adiacenti nel medesimo piano) e il *raster* (la disposizione delle *roads* per generare il riempimento del layer). La pubblicazione esamina anche altre variabili, quali la larghezza del filamento, la temperatura di stampa e il colore del materiale, ma, come si evince dal grafico in Figura 1.3, i risultati ne dimostrano la sostanziale ininfluenza. È importante notare come in questo studio non sia stata analizzata l'altezza dei layer, poiché si è assunto che tale parametro avesse un peso assimilabile a quella della larghezza delle *roads*.

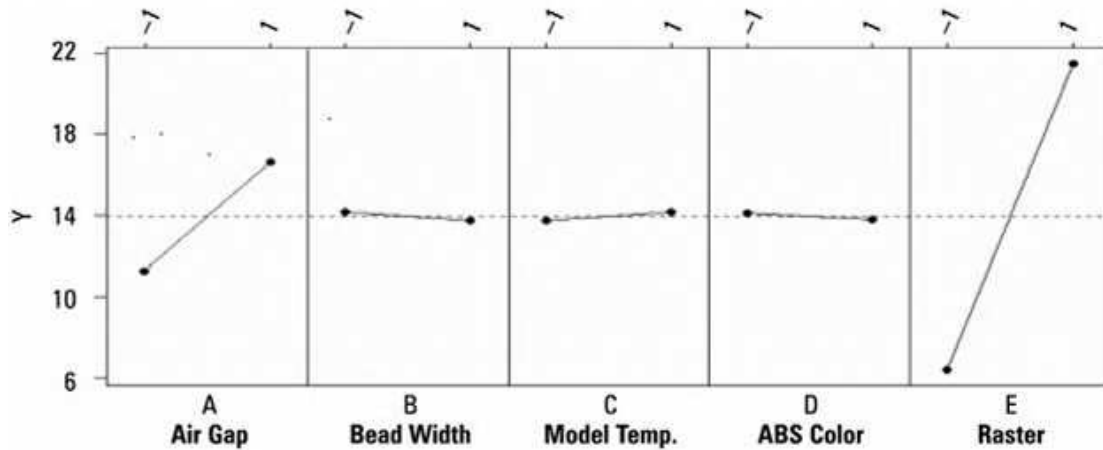


Figura 1.3: Tabella dei parametri. Sulle ordinate le tensioni in MPa, sulle ascisse il valore minimo e massimo utilizzati per ogni parametro [1].

Il grafico presenta sulle ordinate lo sforzo di trazione in MPa a cui i campioni sono stati sottoposti prima di arrivare a rottura, e sulle ascisse due valori operativi per ciascun parametro. Il valore -1 indica il limite inferiore impostabile per il parametro

che consentisse comunque di stampare il pezzo rispettando determinati criteri di qualità, mentre +1 ne rappresenta il limite superiore.

I risultati sperimentali evidenziano chiaramente come, agli albori di queste tecnologie, i parametri dominanti fossero esclusivamente l'*air gap* e la tipologia di riempimento (*raster*). Poiché quest'ultimo comportava la maggiore variazione in termini di resistenza, lo studio è proseguito valutando quale, tra i vari pattern di *infill*, garantisse le migliori prestazioni durante una prova di trazione.

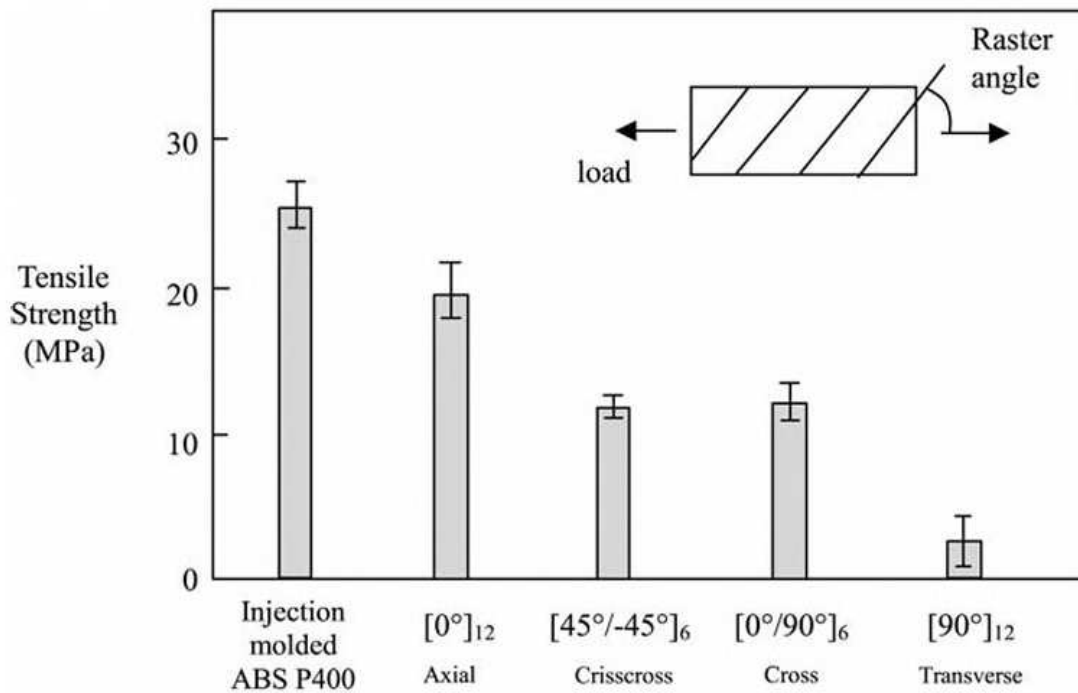


Figura 1.4: Confronto della resistenza dei pattern rispetto a un provino stampato a iniezione [1].

Nel grafico, i risultati vengono confrontati con un provino realizzato nel medesimo materiale (ABS P400) ma stampato a iniezione (processo che garantisce le proprietà isotrope del pezzo finale). Si nota chiaramente come la massima resistenza a trazione sia raggiunta dal provino stampato con l'orientamento dei layer parallelo alla direzione di carico. La resistenza minore, viceversa, è determinata dall'orientamento dei layer perpendicolare alla direzione di trazione; la fenomenologia fisica alla base di questo interessante risultato verrà approfondita nel paragrafo successivo.

1.3.2 Adesione *inter-layer*

La seconda problematica in esame è l'adesione *inter-layer*, fattore di primaria importanza per la comprensione dei micromeccanismi che governano la risposta strutturale

globale del componente stampato. A tal proposito, la letteratura scientifica di settore, tra cui lo studio condotto da Omer et al. [8], evidenzia come il controllo di tale parametro risulti cruciale per il soddisfacimento degli stringenti requisiti meccanici di progetto.

Gli autori riportano, infatti, come l'efficacia di questo legame sia una diretta conseguenza della geometria assunta dal cordone polimerico durante la fase di deposizione. Richiamando le dinamiche descritte nel Paragrafo 1.2, l'ugello estrude un filamento a sezione circolare il quale, adagiandosi sul piano di stampa o sullo strato sottostante, subisce uno schiacciamento assumendo un profilo approssimativamente ellittico. Tale distorsione geometrica è indotta dall'azione combinata della gravità, dallo stato viscoso del materiale fuso e dalla pressione meccanica esercitata dall'ugello in movimento.

Come riportato poco sopra, uno dei fattori maggiormente penalizzanti in tale contesto è la formazione del cosiddetto *air gap*, ovvero la micro-porosità interstiziale che si genera nei punti di tangenza tra layer contigui. Conseguentemente, per massimizzare la superficie utile di contatto e ottimizzare la coesione, risulta necessario minimizzare la frazione di vuoti; da un punto di vista puramente teorico, ciò si tradurrebbe nell'impiego di estrusioni a sezione perfettamente rettangolare, capaci di garantire un riempimento volumetrico continuo e privo di *air gaps*.

Tuttavia, l'impiego di un ugello con sezione rettangolare risulta tecnicamente sconsigliato per due motivi principali. In primo luogo, la mancanza di simmetria radiale comporterebbe una geometria del materiale depositato variabile a seconda della direzione di spostamento nel piano X-Y. In secondo luogo, dal punto di vista fluidodinamico, il polimero fuso che attraversa un canale rettangolare tenderebbe a ristagnare e a degradarsi termicamente in prossimità degli spigoli rispetto alla zona centrale, causando un'estrusione imprecisa e termicamente instabile.

Proprio nell'ottica di minimizzare l'*air gap* e ottimizzare l'adesione, risulta necessario analizzare i fenomeni di *Interlayer Bonding* (IB) su scala millimetrica. Isolando e riscaldando due singoli filamenti di test, si osserva che la formazione del legame tra layer si sviluppa tipicamente in tre fasi sequenziali, ciascuna determinante per la qualità strutturale del pezzo:

Contatto: è la fase iniziale del processo di unione dove un filamento estruso entra a contatto con uno precedentemente depositato. Questa fase ovviamente è pesantemente influenzata dall'*air gap* tra le due *roads* e dalle temperature e pressioni espresse dall'ugello.

Necking: seconda fase che prevede la formazione di un piccolo ponte di polimero fuso tra i due filamenti (chiamato *neck* perché simmetrico rispetto ad un asse ortogonale alla direzione di deposizione). Si può analizzare il grado di formazione del legame osservando il tasso di crescita del ponte, dove a rappresenta il raggio del filamento estruso e y rappresenta il raggio del ponte, come illustrato in Figura 1.5. Il rapporto tra questi due parametri ci fornisce un responso su quanto la temperatura di estrusione T_e , la temperatura dell'ambiente circostante T_c , la velocità di stampa V_p e le proprietà viscoelastiche del materiale hanno influenzato l'adesione *inter-layer*. Ovviamente un rapporto y/a maggiore equivale ad una maggiore superficie di contatto e quindi ad una migliore unione e diffusione molecolare tra i layer.

Diffusione molecolare: terza e ultima fase del processo dove le catene polimeriche fluiscono per mezzo del ponte creatosi nella fase precedente nell'interfaccia tra i due filamenti depositati. Le alte temperature qui giocano un ruolo particolarmente favorevole incrementando il movimento molecolare e contribuendo alle catene di compenetrarsi le une con le altre. Garantire un'adeguata diffusione in questa fase aumenta in maniera considerevole le proprietà isotropiche dell'oggetto stampato.

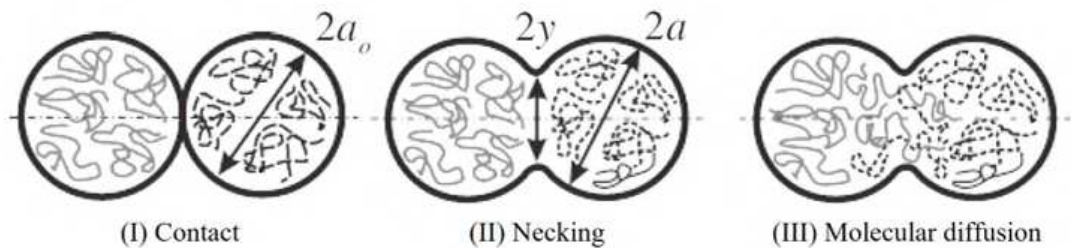


Figura 1.5: Fasi dell'IB

Lo studio condotto da Omer et al. riporta inoltre risultati sperimentali a diretto supporto di tale modello. Si osserva, infatti, che il grado di legame tra due filamenti adiacenti diminuisce progressivamente all'aumentare dell'altezza del layer (ovvero all'aumentare del parametro a). Questo comportamento è attribuibile al fatto che un layer di dimensioni minori rende più efficiente il trasferimento di calore attraverso il materiale, permettendo un'adeguata ri-fusione del layer sottostante con un input energetico inferiore.

Alle tre fasi dell'adesione sopra descritte succede un processo altrettanto critico ai fini dell'integrità strutturale del pezzo: il raffreddamento post-estrusione.

A tal proposito, uno studio di Morales et al. [7] ha esaminato come la velocità di raffreddamento tra layer successivi influenzi la resistenza a compressione e a taglio di un oggetto stampato in ABS. Come ci si può attendere alla luce dei meccanismi di diffusione molecolare sopra descritti, un incremento del lasso di tempo che intercorre tra la deposizione di un layer e quello immediatamente sovrastante impatta negativamente sull'adesione, poiché sfavorisce la diffusione delle catene polimeriche. Gli autori stimano che un'errata impostazione dei parametri di velocità di stampa possa comportare una riduzione della resistenza a compressione e taglio compresa tra il 12% e il 25%.

Inoltre, durante questa fase si generano tensioni interne residue indotte dalla contrazione termica del materiale fuso depositato sopra un layer già raffreddato. Questo stato tensionale può alterare considerevolmente il legame tra strati successivi, innescando macro-difetti geometrici quali il *warping* (l'imbarcamento della base del modello, Figura 1.6a) o la *delamination* (ovvero il distacco strutturale tra due layer contigui in fase di stampa, Figura 1.6b).



(a) Esempio di *warping*



(b) Esempio di *delamination*

Figura 1.6: Problematiche termiche della stampa FDM.

L'analisi dell'evoluzione termica durante la deposizione rappresenta un fattore cruciale nella modellazione dei processi di estrusione, poiché governa direttamente l'insorgenza di tali tensioni residue e dei conseguenti difetti geometrici [4]. La letteratura scientifica evidenzia come la temperatura dello strato superiore un istante prima della deposizione del layer successivo, definita come T_{top} , costituisca il principale indicatore cinematico per valutare l'integrità strutturale e la qualità del legame *inter-layer*.

Al fine di prevenire fessurazioni macroscopiche, la T_{top} deve essere mantenuta stabilmente al di sopra della temperatura di transizione vetrosa (T_g , soglia termica alla quale un polimero passa da uno stato solido e fragile ad uno flessibile e duttile)

del polimero; qualora tale parametro scenda al di sotto della T_g , la rigidità accumulata negli strati sottostanti impedisce il rilassamento degli stress termici indotti dalla contrazione del materiale caldo, innescando severi imbarcamenti e fenomeni di frattura o distacco dal substrato.



Figura 1.7: Analisi termica deposizione filamento

I modelli parametrici evidenziano inoltre dinamiche parzialmente controintuitive legate alle proprietà del materiale e alle variabili di processo. Un incremento della conducibilità termica del materiale estruso non mitiga il rischio di fessurazione, bensì riduce il lasso di tempo ottimo per depositare il layer sovrastante e aumenta la propensione alla delaminazione. Tale comportamento è riconducibile al fatto che una maggiore conducibilità accelera il trasporto del calore, provocando un raffreddamento estremamente rapido del filamento depositato.

Tra i parametri operativi di controllo, la temperatura dell'ambiente di stampa (T_c) esercita l'effetto più significativo sulla stabilizzazione della T_{top} e sull'estensione delle finestre temporali di deposizione sicura. Anche il piatto riscaldato contribuisce al mantenimento di tale temperatura; tuttavia, la sua efficacia si dissipa progressiva-

mente lungo l'asse verticale, risultando pressoché trascurabile per gli strati depositati oltre la soglia dei 50 mm dalla base.

1.3.3 Problematiche a livello materico

Oltre ai parametri termici e di processo, l'adesione *inter-layer* è intimamente legata alle proprietà molecolari che contraddistinguono ciascun polimero. A seconda del materiale impiegato, infatti, si manifestano comportamenti termici e di cristallizzazione profondamente differenti, che influenzano in modo evidente la qualità del legame tra i layer depositati.

Per una trattazione organica, è utile classificare i materiali impiegati nella tecnologia FDM in quattro macro-categorie prestazionali: filamenti di largo consumo, materiali di grado ingegneristico, elastomeri (o materiali ad alta flessibilità) e tecnopolimeri ad alte prestazioni termiche. Ciascuna di queste categorie è formulata per assolvere a specifici requisiti meccanici, termici o chimici.

Il comportamento in fase di estrusione di tali materiali è governato principalmente dalla temperatura di transizione vetrosa T_g e dalla temperatura di fusione T_m . All'interno di ciascuna categoria prestazionale risulta infatti opportuno operare un'ulteriore distinzione fondamentale tra polimeri amorfi e polimeri semicristallini. I polimeri amorfi (come il PETG e l'ABS), essendo sprovvisti di un punto di fusione netto, tendono a esibire comportamenti meno anisotropici e a garantire una maggiore stabilità dimensionale durante il raffreddamento. Al contrario, i polimeri semicristallini (come il PLA) richiedono un controllo rigoroso dei gradienti termici di fusione e cristallizzazione, al fine di ottenere le caratteristiche meccaniche desiderate e scongiurare l'insorgenza di difetti strutturali quali il *warping*.

Al fine di delineare un quadro più completo sulle proprietà meccaniche, risultano di particolare interesse i materiali compositi di grado ingegneristico. Questi materiali stanno assumendo un ruolo di spicco nel panorama dell'innovazione manifatturiera poiché consentono di coniugare un incremento delle resistenze meccaniche a una sensibile riduzione del peso, caratteristica cruciale per alcuni settori come quello meccanico e aerospaziale. Essi sono tipicamente costituiti da una matrice polimerica (come ad esempio il PLA o il PETG) all'interno della quale vengono disperse fibre di rinforzo, quali la fibra di carbonio (CF, *Carbon Fiber*) o la fibra di vetro (GF, *Glass Fiber*). Le fibre corte immerse nella matrice lavorano in sinergia con il polimero, estendendo notevolmente il campo di applicazione della stampa FDM e incrementando significativamente la rigidità e la resistenza a trazione del componente.

La stampa di tali compositi, tuttavia, non è banale e introduce sfide progettuali e operative non trascurabili. Le fibre all'interno della matrice polimerica risultano fortemente abrasive per l'ugello della stampante (tradizionalmente in ottone), rendendo necessaria la sostituzione con un *nozzle* in acciaio temprato. Inoltre, la presenza del rinforzo richiede generalmente temperature di estrusione superiori, che nel caso di alcuni polimeri tecnici compositi possono raggiungere e superare i 400 °C, con conseguenti ripercussioni sui consumi energetici e sui requisiti hardware della macchina.

Dal punto di vista strutturale, è fondamentale sottolineare che i miglioramenti prestazionali si manifestano quasi esclusivamente lungo la direzione di deposizione (asse X-Y), dove le fibre tendono ad allinearsi parallelamente al flusso di estrusione. Trasversalmente alla direzione di deposizione (asse Z), invece, i compositi possono esibire comportamenti sub-ottimali: le resistenze *inter-layer* rimangono invariate o addirittura calano rispetto alle controparti polimeriche non rinforzate. Studi di settore [8] dimostrano che tale riduzione prestazionale è imputabile all'incremento di viscosità indotto dalle fibre di rinforzo; questo si traduce in una minore mobilità delle catene polimeriche, le quali rimangono confinate, ostacolando l'interdiffusione molecolare al confine tra i layer.

Una strategia consolidata per mitigare questa criticità consiste nel sottoporre l'oggetto stampato a un trattamento termico di *post-processing* di ricottura: innalzando la temperatura del componente fino a ridosso della sua T_g , si favorisce il rilassamento delle tensioni interne residue e si incentiva un'ulteriore compenetrazione macromolecolare, migliorando così l'adesione *inter-layer* e mitigando l'anisotropia del pezzo.

Infine, l'additivazione della matrice polimerica con fibre corte di carbonio si conferma una strategia ingegneristica efficace per incrementare l'accuratezza dimensionale, contrastando il *warping* grazie al coefficiente di espansione termica pressoché nullo che le fibre presentano lungo il proprio asse longitudinale [4].

1.3.4 Consistenza geometrica

La consistenza geometrica e l'accuratezza dimensionale dei componenti realizzati tramite FDM sono strettamente limitate dal fenomeno del ritiro volumetrico (*shrinkage*) [5]. Questo fenomeno è intrinseco alla termodinamica del processo: il polimero termoplastico viene fuso all'interno dell'estrusore e depositato allo stato semi-fluido; durante il successivo e rapido raffreddamento verso la temperatura ambiente, il materiale subisce una naturale contrazione termica. Tale contrazione si manifesta in

maniera fortemente disomogenea a causa della dissipazione del calore, rendendo il comportamento dimensionale della parte anisotropo. Tipicamente, si registra una contrazione predominante lungo le direzioni complanari al piatto di stampa (piani X e Y), mentre lungo la direzione di accrescimento (asse Z) è frequente riscontrare deviazioni positive, ossia un aumento dello spessore effettivo rispetto al modello CAD. Questa discrepanza è causata dalla fluidità del polimero estruso ad alte temperature, che favorisce lo schiacciamento e lo scorrimento laterale del materiale per effetto della gravità prima della sua completa solidificazione.

Inoltre, la discretizzazione del volume in layer successivi impedisce di ottenere un'accuratezza geometrica assoluta. Il processo FDM approssima le geometrie continue del modello virtuale CAD in strati discreti di spessore finito, generando l'inevitabile "effetto gradino" sulle superfici curve o inclinate. L'altezza del layer e il diametro dell'ugello pongono un limite fisico invalicabile alla risoluzione ottenibile. Se da un lato altezze di layer maggiori accentuano le linee di stampa e riducono drasticamente l'accuratezza, dall'altro layer troppo sottili aumentano il rischio di occlusione dell'ugello e i tempi di stampa.

Le tolleranze geometriche subiscono un ulteriore e marcato degrado in presenza di superfici a sbalzo (*overhangs*). Gli studi dimostrano che i campioni stampati con inclinazioni critiche (ad esempio a 45°) presentano un'accuratezza peggiore e maggiori difetti a livello locale. Questo avviene poiché i layer inclinati vengono depositati in uno stato di parziale sospensione: in assenza di un supporto solido e continuo sottostante, la forza di gravità agisce sul materiale ancora plastico durante la fase di solidificazione, accentuando le distorsioni geometriche e favorendo il collasso della struttura. Infine, la stabilità dimensionale è crucialmente influenzata dalle condizioni del materiale pre-stampa, in particolar modo dall'umidità. Molti dei polimeri impiegati nella tecnologia FDM presentano una spiccata igroscopia. La presenza di umidità all'interno del filamento, anche in concentrazioni apparentemente trascurabili (come lo 0.74%), gioca un ruolo deleterio: l'acqua intrappolata nel filamento vaporizza istantaneamente attraversando l'ugello ad alta temperatura, generando micro-bolle e irregolarità nell'estrusione che causano difetti superficiali e un marcato, anomalo aumento delle dimensioni finali del provino rispetto al valore nominale.

Capitolo 2

Analisi sperimentale

Conclusa la trattazione teorica riguardante la tecnologia FDM, all'interno della quale ne sono stati analizzati i principi operativi, i vantaggi industriali e le intrinseche criticità, il presente capitolo introduce la campagna sperimentale vera e propria. L'obiettivo di questa indagine è la verifica empirica dei fenomeni precedentemente discussi, condotta attraverso una rigorosa caratterizzazione meccanica di differenti famiglie di provini.

2.1 Obiettivi

Come anticipato nell'introduzione, l'analisi sperimentale sarà finalizzata allo studio della propagazione delle tensioni all'interno dei provini. I campioni testati si suddividono in due tipologie materiche (PLA e PLA-CF), ciascuna declinata in due diverse orientazioni di stampa (con layer perpendicolari o paralleli alla direzione di applicazione del carico). Per ciascuna di queste quattro configurazioni verranno effettuate, rispettivamente, una prova di trazione e una prova di flessione, portando complessivamente a otto il numero delle famiglie di provini analizzati.

Per ogni famiglia verrà studiata la curva tensione-deformazione, ponendo particolare attenzione alla valutazione del modulo elastico e all'individuazione del punto di rottura, al fine di caratterizzare la natura duttile o fragile del collasso. Parallelamente ai test meccanici tradizionali, verrà condotta un'indagine ottica mediante *Digital Image Correlation* (DIC), allo scopo di ottenere una mappatura visiva a campo intero delle deformazioni e confermare i risultati empirici. L'obiettivo ultimo della ricerca è, pertanto, quello di fornire una panoramica esauriente sul comportamen-

to meccanico di questi polimeri, correlando i dati quantitativi globali a una chiara visualizzazione della distribuzione locale delle tensioni all'interno del mezzo.

2.2 Setup sperimentale e risultati visivi

La campagna sperimentale si articola in tre fasi fondamentali, indispensabili per garantire la validità e la coerenza dei risultati ottenuti: la stampa dei provini, la configurazione delle prove meccaniche di trazione e flessione, e l'impostazione dell'analisi ottica DIC. Di seguito verranno analizzati nel dettaglio i parametri e le procedure adottate in ciascuna di queste fasi.

2.2.1 Stampa dei provini

I provini sono stati stampati seguendo le specifiche tecniche fornite dal produttore del filamento [3, 2] e in stretta conformità alle geometrie stabilite dalle normative ASTM per le prove di trazione [11] e flessione [9]. Come discusso nel Capitolo 1, lievi variazioni nei parametri di processo possono compromettere significativamente la risposta meccanica del componente finale.

Parametro	Valore
Umidità di stampa e stoccaggio	< 20% RH (sigillato con essiccante)
Diametro ugello	0.4 mm
Temperatura ugello	210 °C
Temperatura piano di stampa	40 °C
Ventola di raffreddamento	Attiva
Velocità di stampa	< 300 mm/s
Lunghezza di retrazione	0.8 mm
Velocità di retrazione	30 mm/s
Temperatura camera (T_c)	25 °C
Angolo massimo di <i>overhang</i>	55°
Lunghezza massima <i>bridging</i>	30 mm
Materiale di supporto	Supporto per PLA

Tabella 2.1: Impostazioni di stampa utilizzate.

Particolare attenzione è stata dedicata all'accuratezza dimensionale dei campioni rispetto ai modelli progettati in ambiente CAD. Al fine di ottimizzare il processo, si è scelto di non impiegare i supporti generati automaticamente dal software di *slicing*; sono stati invece progettati appositi supporti triangolari, concepiti per minimizzare il consumo di materiale garantendo al contempo un'adeguata stabilità strutturale in fase di stampa. Tale accorgimento è stato adottato esclusivamente per i provini stampati con orientamento dei layer trasversale rispetto alla dimensione predominante del campione, come illustrato in Figura 2.1.

Tutti i campioni sono stati estrusi da bobine nuove e appena sigillate, al fine di escludere qualsiasi alterazione dell'output finale dovuta all'assorbimento di umidità da parte del polimero. Inoltre, durante le fasi di trasporto fino al laboratorio di sperimentazione, i provini sono stati accuratamente conservati all'interno di buste ermetiche.



(a) Vista frontale



(b) Vista a tre quarti

Figura 2.1: Supporti verticali atti al sostegno durante la stampa.

Successivamente, sui campioni destinati all'indagine DIC è stato applicato accuratamente, tramite un *marker* nero, lo *speckle pattern*, elemento essenziale per la corretta misurazione del campo di deformazione in questa tipologia di analisi.

Per garantire l'accuratezza dell'analisi ottica, i provini in PLA-CF (di colore grigio scuro) sono stati preventivamente rivestiti con uno strato di vernice spray bianca opaca. Questa operazione ha permesso di massimizzare il contrasto superficiale con il *pattern* nero applicato in un secondo momento, agevolando l'acquisizione dei micro-spostamenti indotti dallo stato tensionale.

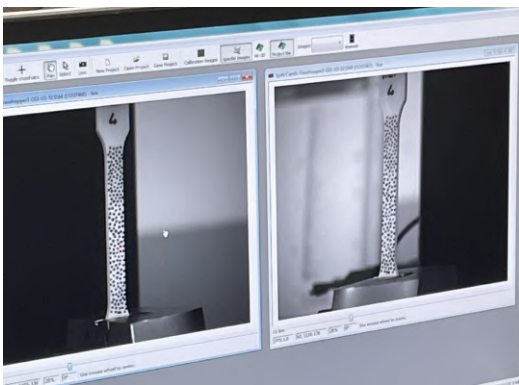


(a) Provino standard

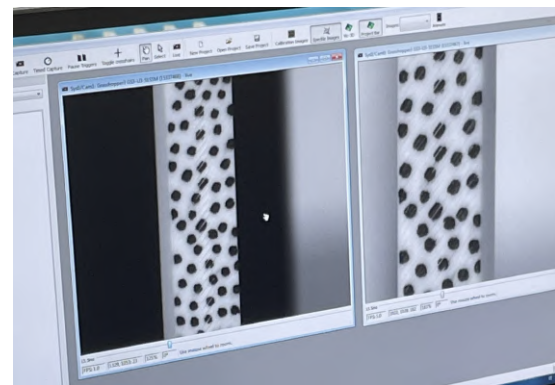


(b) Provino dipinto

Figura 2.2: Confronto visivo pre e post tinteggiatura.



(a) Provino con *speckle pattern*



(b) Dettaglio ingrandimento *speckle pattern*

Figura 2.3: *Speckle pattern* per analisi DIC.

Come ultima operazione preliminare, le dimensioni della sezione trasversale di cia-

scun provino sono state accuratamente misurate mediante un calibro. Tale procedura si è resa necessaria per verificare la corrispondenza dimensionale con il modello CAD di progetto, tenendo in debita considerazione i ben noti fenomeni di ritiro termico e contrazione che interessano le matrici polimeriche durante la fase di raffreddamento. L'impiego delle sezioni resistenti effettive, anziché di quelle teoriche nominali, per il calcolo degli sforzi garantisce una maggiore accuratezza analitica e attendibilità dei risultati sperimentali.

2.2.2 Classificazione dei provini

A ciascun provino è stato assegnato un codice identificativo univoco, al fine di poterne classificare il comportamento meccanico e raggruppare i risultati per famiglia di appartenenza. La nomenclatura adottata si basa sull'acronimo di tre parametri operativi fondamentali: la tipologia di prova (Flessione o Trazione), l'orientamento dei layer (Longitudinale o Trasversale) e il materiale di composizione (PLA rinforzato con fibra di carbonio o PLA standard), come illustrato nella Tabella 2.2.

Codice	Tipo di Prova	Orientamento Layer	Materiale
TL-CF	Trazione	Longitudinali	PLA-CF (Rinforzato)
TL	Trazione	Longitudinali	PLA (Non rinforzato)
TT-CF	Trazione	Trasversali	PLA-CF (Rinforzato)
TT	Trazione	Trasversali	PLA (Non rinforzato)
FL-CF	Flessione	Longitudinali	PLA-CF (Rinforzato)
FL	Flessione	Longitudinali	PLA (Non rinforzato)
FT-CF	Flessione	Trasversali	PLA-CF (Rinforzato)
FT	Flessione	Trasversali	PLA (Non rinforzato)

Tabella 2.2: Nomenclatura e classificazione delle famiglie di provini.

Nella Tabella 2.3 è riportato il riepilogo dettagliato di tutti i campioni sottoposti a test. Il suffisso *_DIC* indica i provini specificamente preparati e destinati all'analisi ottica mediante *Digital Image Correlation*.

Famiglia	Codici identificativi dei campioni
TL-CF	TL-CF1, TL-CF2, TL-CF3, TL-CF4_DIC
TL	TL1, TL2, TL3, TL4_DIC, TL5_DIC
TT-CF	TT-CF1, TT-CF2, TT-CF3, TT-CF4_DIC
TT	TT1, TT2, TT3, TT4_DIC, TT5_DIC
FL-CF	FL-CF1, FL-CF2, FL-CF3, FL-CF4
FL	FL1, FL2, FL3, FL4
FT-CF	FT-CF1, FT-CF2, FT-CF3, FT-CF4
FT	FT1, FT2, FT3, FT4

Tabella 2.3: Elenco dei provini sottoposti ad analisi.

2.2.3 Configurazione delle prove di trazione e flessione

Terminata la fase di preparazione, si è proceduto all'allestimento del *setup* sperimentale per l'esecuzione dei test meccanici. Le prove sono state condotte impiegando una macchina universale di prova Galdabini Sun 2500 (classe di precisione 0.5), dotata di una capacità di carico nominale pari a 25 kN. Al fine di garantire la massima risoluzione e accuratezza nell'acquisizione dei carichi, date le specifiche del materiale polimerico in esame, il telaio è stato equipaggiato con una cella di carico ridotta da 2,5 kN.

Nelle prove di trazione il provino è stato posizionato verticalmente all'interno delle morse. In questa fase, particolare attenzione è stata dedicata all'interfaccia di bloccaggio tra la macchina e il campione, tarando in modo ottimale la pressione di serraggio. Un bloccaggio eccessivo, infatti, avrebbe rischiato di indurre stati tensionali (quali torsioni o compressioni localizzate) all'interno del materiale; al contrario, un serraggio insufficiente avrebbe comportato il progressivo slittamento del provino tra le ganasce, invalidando l'acquisizione dei dati sperimentali.

Infine, una volta vincolato correttamente il campione, quest'ultimo è stato strumentato con un apposito estensimetro al fine di rilevarne le deformazioni longitudinali sul tratto utile durante la prova.



(a) Prova di trazione su un provino con layer longitudinali



(b) Prova di trazione su un provino con layer trasversali

Figura 2.4: Confronto prove di trazione PLA

Come è possibile osservare da un'analisi visiva preliminare, le quattro famiglie di provini presentano comportamenti macroscopici ben distinti, in particolar modo per quanto concerne le dinamiche di rottura. Si nota chiaramente come i campioni stampati con layer longitudinali (Figura 2.6, in alto) esibiscano un comportamento a rottura apparentemente di tipo duttile; tale fenomeno risulta, peraltro, nettamente più marcato nel caso del PLA non rinforzato. Al contrario, nei provini caratterizzati da un orientamento dei layer trasversale (Figura 2.6, in basso), il collasso appare di natura fragile per ambedue i materiali testati.

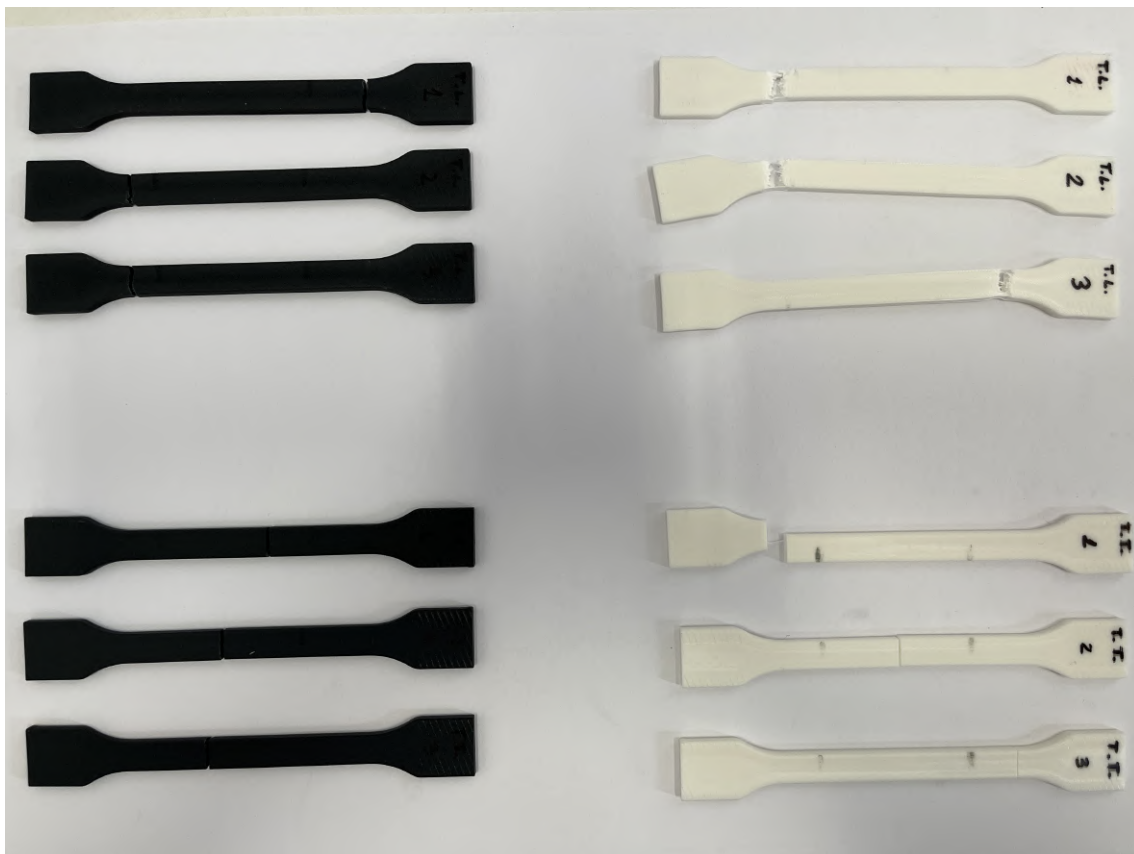


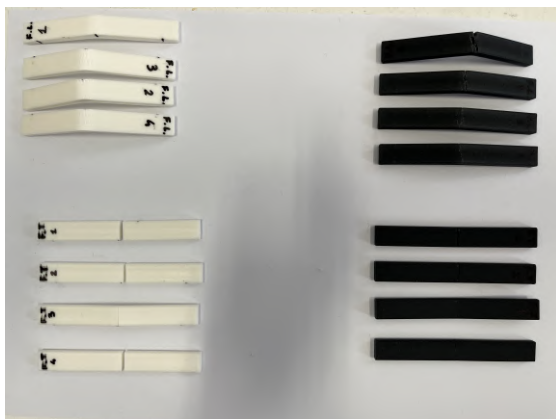
Figura 2.5: Provini testati a trazione.

Concluse le prove di trazione, si è passati alla configurazione dei test di flessione su tre punti. In questa fase, i provini sono stati posizionati orizzontalmente su due appoggi aventi una luce netta di 64 mm e sono stati sottoposti a un carico puntuale applicato in mezzeria. Al fine di garantire l'assoluta ripetibilità del posizionamento per tutti i campioni, sono stati tracciati dei segmenti di riferimento (con l'ausilio del medesimo *marker* nero usato in precedenza) a 8 mm da ciascuna estremità. Questo accorgimento operativo ha permesso di incrementare la precisione delle prove, minimizzando le incertezze legate a errori di malposizionamento. Durante l'esecuzione di questa prova è stata misurata la corsa della traversa della macchina e il carico corrispondente.



Figura 2.6: Provino in PLA con *layer* trasversali testato a flessione.

Anche per le prove di flessione è possibile osservare differenze macroscopiche significative nelle dinamiche di collasso. A causa dell'elevata duttilità di questi polimeri, nei campioni stampati con layer longitudinali non si è verificata una rottura completa; tuttavia, in corrispondenza del punto di applicazione del carico – ovvero la zona soggetta alla massima deflessione – i provini in PLA-CF hanno subito severe lacerazioni. Al contrario, nei campioni con layer trasversali, il comportamento a rottura si è confermato di natura marcatamente fragile per entrambi i materiali testati.



(a) Provini visti dall'alto



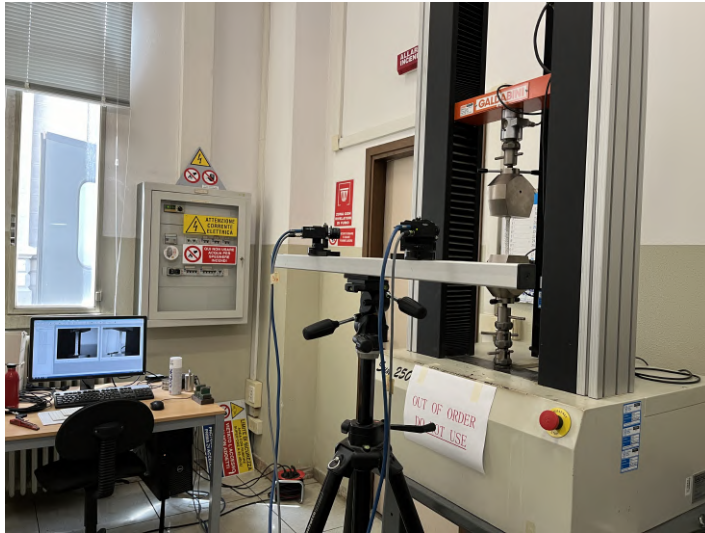
(b) Provini visti di lato

Figura 2.7: Provini testati a flessione.

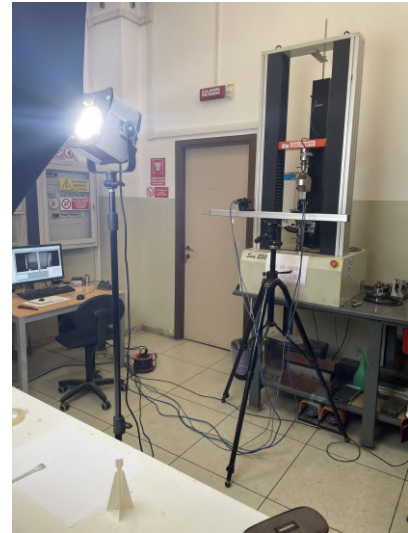
2.2.4 Impostazione dell'analisi DIC

L'analisi DIC prevede l'utilizzo di un sistema di acquisizione ottica – nel caso di specie in configurazione stereoscopica – in grado di catturare fotogramma per fotogramma gli spostamenti subiti dallo *speckle pattern* precedentemente applicato sul provino. Attraverso un apposito software di calcolo, tali spostamenti vengono elaborati per restituire il campo di deformazione a campo intero e, conseguentemente, mappare lo stato tensionale sulla superficie del componente.

L'allestimento della prova, salvo specifici accorgimenti, ricalca quello delle prove a trazione precedentemente descritte. Tuttavia, nei test DIC, oltre a prestare un'attenzione ancora maggiore ai potenziali stati tensionali anomali indotti dalle ganasce di bloccaggio, risulta essenziale orientare la faccia del provino a favore di fotocamera. È altresì fondamentale garantire che il campione sia irraggiato da un'adeguata fonte luminosa che non generi riflessi sulla superficie, i quali comprometterebbero l'acquisizione ottica degli spostamenti e la successiva correlazione dei dati. Per ovviare a tali criticità, le morse superiore e inferiore sono state ruotate di 90° rispetto all'analisi precedente; inoltre, alle spalle del sistema di acquisizione è stato posizionato un illuminatore direzionato verso un ombrello riflettente, garantendo così che il provino venisse colpito da una luce diffusa, omogenea e priva di picchi di intensità.



(a) Dettaglio dell'apparecchio di acquisizione



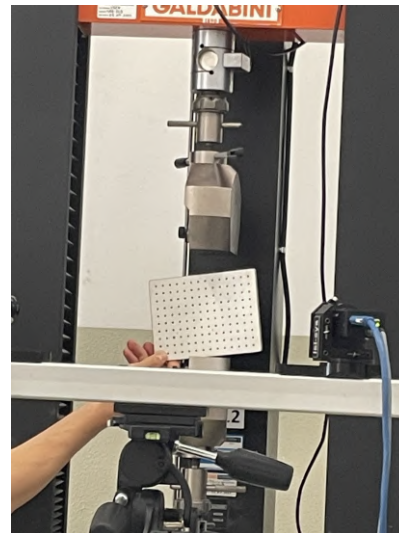
(b) Dettaglio dell'illuminazione

Figura 2.8: Setup per l'analisi *Digital Image Correlation*.

Prima di avviare l'effettiva prova di trazione, è indispensabile procedere alla calibrazione del sistema ottico. Tale procedura si avvale di uno specifico pannello di calibrazione (Figura 2.9), il quale viene traslato e ruotato nello spazio antistante le due fotocamere. Questa operazione permette all'algoritmo del software DIC di riconoscere la distanza focale a cui viene effettuata l'acquisizione, calcolare i parametri ottici delle lenti e convertire le misurazioni in pixel in grandezze metriche reali.



(a) Dettaglio *pattern* di calibrazione



(b) Calibrazione manuale del programma

Figura 2.9: Fasi preliminari di calibrazione prima dell'avvio dell'acquisizione.

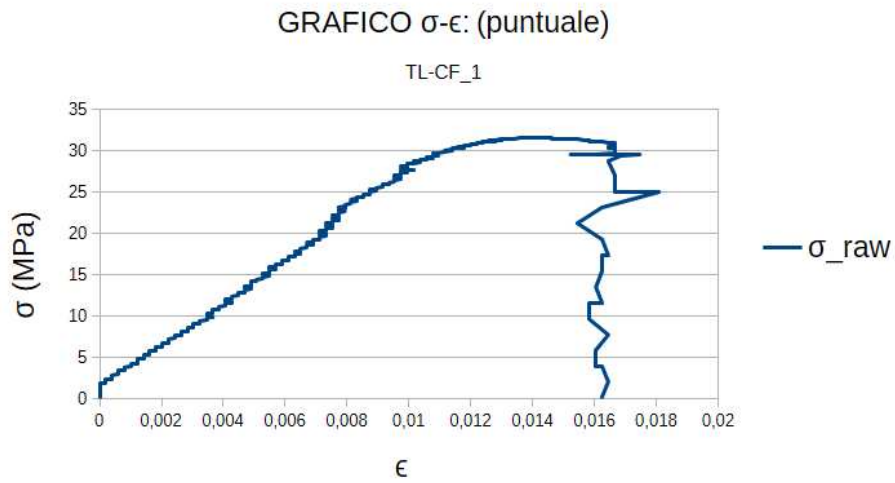
2.3 Metodi analitici

2.3.1 Analisi prove a trazione

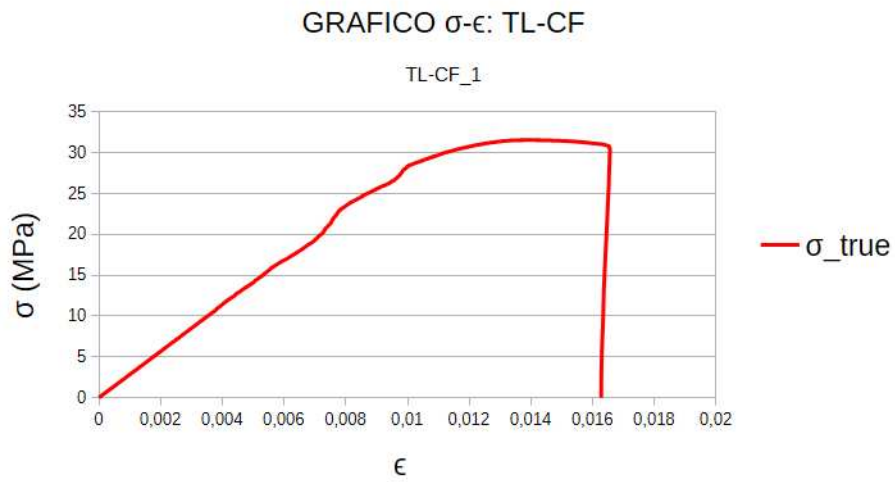
Per le prove di trazione standard, come anticipato, è stato posizionato un estensimetro con una base di misura di $L_0 = 50mm$ sul tratto utile del provino, al fine di rilevarne gli allungamenti. Poiché il sistema di acquisizione forniva in output le deformazioni assolute in micrometri (ΔL), per tracciare correttamente i grafici è stato necessario convertire tale dato in deformazione ingegneristica (adimensionale) attraverso la relazione $\epsilon = \frac{\Delta L}{L_0}$. Successivamente, sono state determinate le sezioni resistenti iniziali (A_0) a partire dalle misurazioni calibrometriche effettive descritte nel Paragrafo 2.2.1. Conoscendo i valori del carico istantaneo applicato F , espressi in Newton e registrati dalla macchina di prova, è stato possibile ricavare le tensioni ingegneristiche agenti sul materiale mediante la relazione $\sigma = \frac{F}{A_0}$.

Considerando che l'estensimetro impiegato presentava una risoluzione di 10 μm , i dati grezzi in output sono stati filtrati mediante una media mobile a 50 campioni; tale operazione si è resa necessaria per ridurre il rumore di fondo e restituire curve tensione-deformazione ($\sigma - \epsilon$) più pulite e facilmente interpretabili. Oltre a questo trattamento, è stata effettuata una correzione analitica del tratto iniziale della curva. A causa dei limiti di tolleranza strumentale e di fisiologici assestamenti iniziali del setup, l'estensimetro non registrava deformazioni a fronte del primissimo incremento di carico, generando un andamento verticale fittizio (un "gradino") nel grafico. Tale anomalia avrebbe falsato il calcolo del modulo elastico, restituendo una rigidità apparente inferiore a quella reale del materiale.

Per ovviare a questa criticità, è stato isolato il tratto propriamente lineare (elastico) della curva, situato a valle dell'anomalia iniziale e prima dell'insorgere della tensione di snervamento. Calcolando la retta di regressione lineare su questo intervallo di dati validi, è stato possibile estrapolare l'effettivo ramo iniziale del grafico fino all'intersezione con l'asse delle ascisse, traslando l'origine e correggendo l'errore sistematico di lettura. A titolo esemplificativo, nella Figura 3.13 viene riportato il confronto tra la curva dei dati grezzi e quella corretta per il provino TL-CF_1.



(a) Plot dati grezzi



(b) Plot dati corretti

Figura 2.10: Confronto dell'elaborazione dei dati per il provino TL-CF_1.

2.3.2 Analisi prove a flessione

Per le prove di flessione il procedimento di elaborazione dei dati è stato analogo. In questo caso, tuttavia, per il calcolo delle deformazioni massime nella porzione inferiore del provino si è ricorsi alla formula classica della Scienza delle Costruzioni per una trave in semplice appoggio soggetta a un carico concentrato in mezzzeria:

$$\epsilon_f = \frac{6 \cdot s \cdot h}{L^2} \quad (2.1)$$

dove s è la freccia (spostamento in mezzzeria) del provino, h è l'altezza della sezione trasversale e L è la luce netta tra i due appoggi.

Come per le prove di trazione, è risultato necessario rilevare le dimensioni effettive della sezione trasversale per ogni provino. Questo passaggio ha permesso di valutare accuratamente le tensioni flessionali agenti (σ_f) istante per istante. Dalla formula di Navier sappiamo infatti che lo sforzo normale massimo in flessione semplice si ricava come il rapporto tra il momento flettente massimo ($M = \frac{F \cdot L}{4}$) e il modulo di resistenza a flessione della sezione rettangolare ($W = \frac{b \cdot h^2}{6}$), da cui si ottiene la formula standard:

$$\sigma_f = \frac{3 \cdot F \cdot L}{2 \cdot b \cdot h^2} \quad (2.2)$$

dove F rappresenta il carico istantaneo applicato dalla macchina di prova e b è la base del provino.

2.3.3 Analisi DIC

Per quanto concerne le analisi condotte mediante *Digital Image Correlation*, una volta inseriti i dati operativi all'interno del software (quali il caricamento delle immagini di calibrazione di cui alla Figura 2.9 e la sequenza di fotogrammi catturati durante il test), si è proceduto all'avvio dell'elaborazione ottica. Ad elaborazione conclusa, è stato selezionato il parametro deformativo di interesse: essendo i provini orientati verticalmente lungo l'asse di carico, la grandezza da visualizzare e quantificare corrispondeva alla deformazione assiale ϵ_{yy} . Nelle figure seguenti si riportano alcune mappe a colori estrapolate dal software, le quali evidenziano chiaramente l'evoluzione del campo delle deformazioni per il provino TT_CF4 fino al momento del collasso.

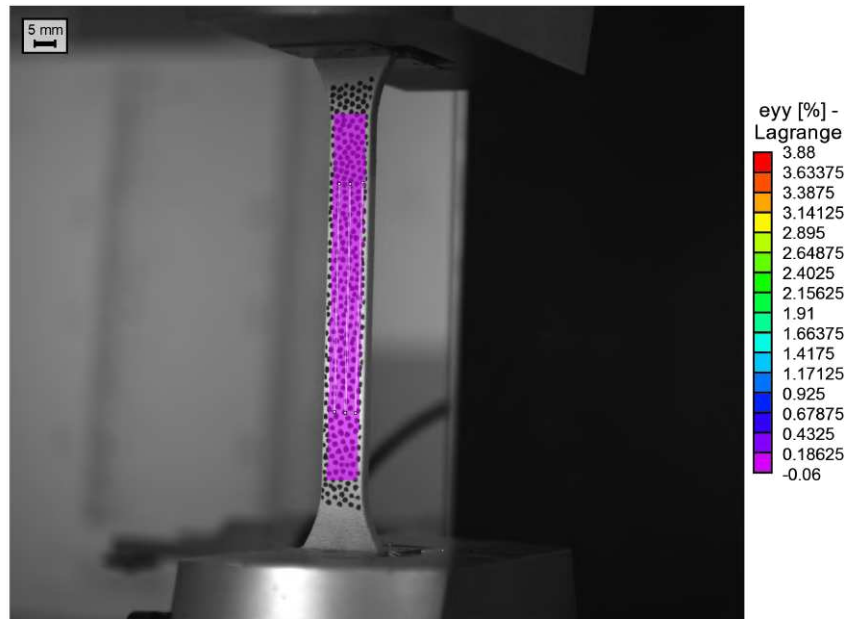


Figura 2.11: Istante iniziale dell'analisi.

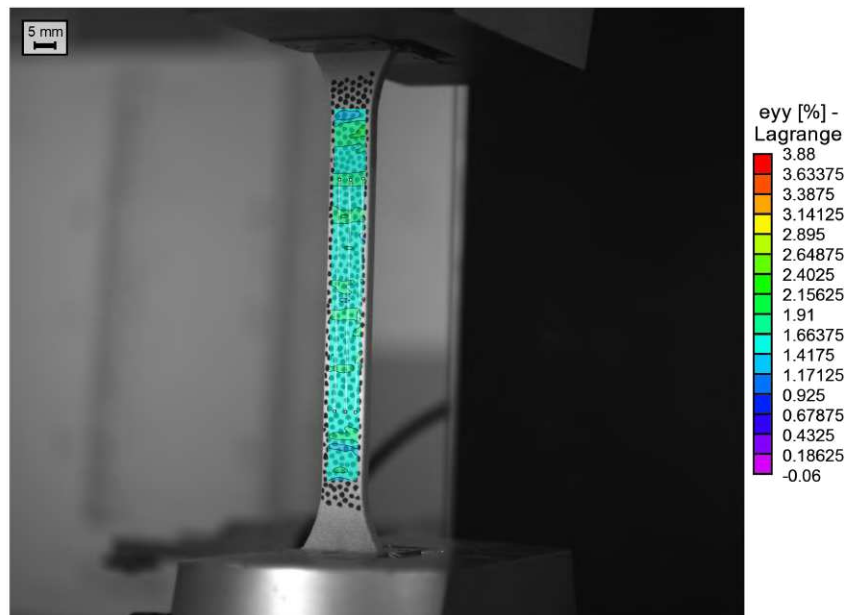


Figura 2.12: Istante intermedio dell'analisi.

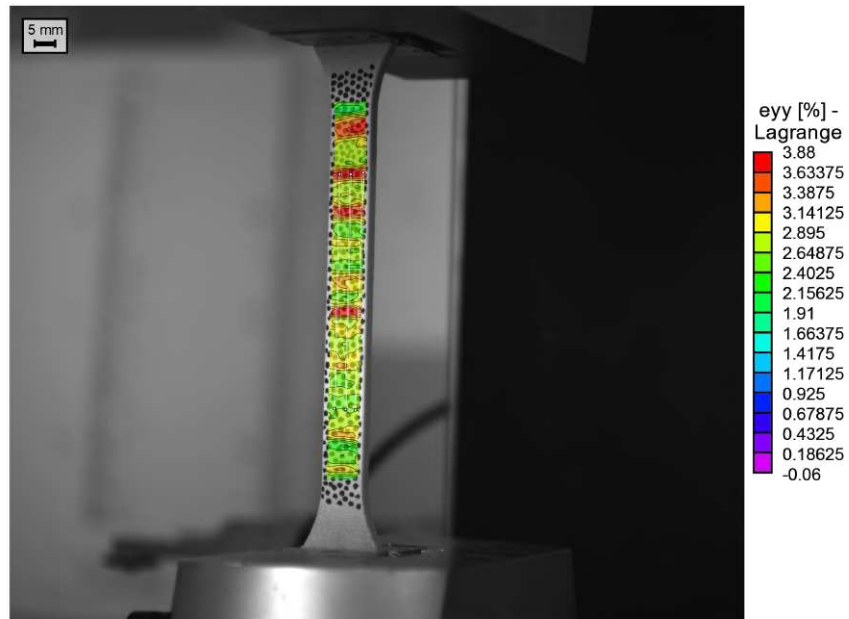


Figura 2.13: Istante finale antecedente alla rottura.

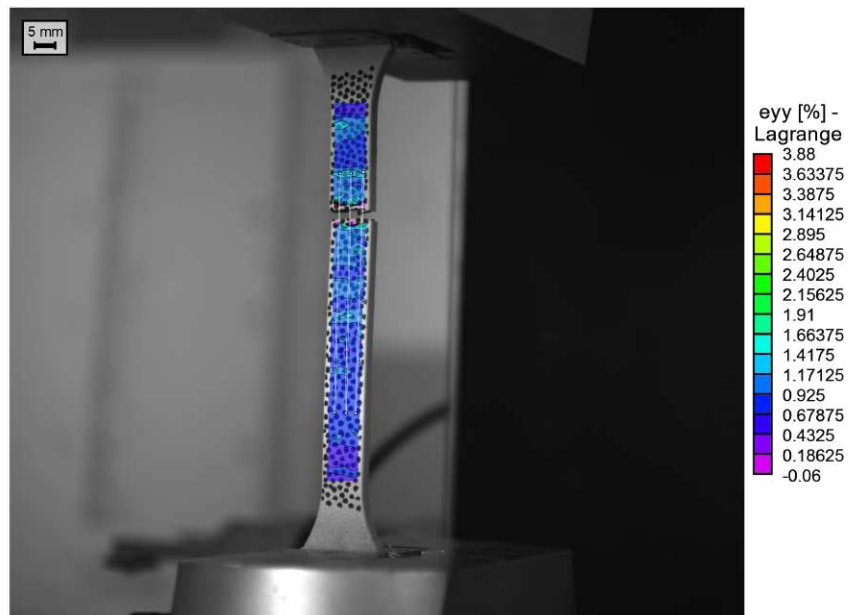


Figura 2.14: Istante di rottura.

Come si evince dalle immagini, sulla superficie analizzata del provino sono stati posizionati tre estensimetri virtuali aventi una base di misura di 50 mm. Tale accorciamento ha permesso di estrarre un valore medio delle deformazioni sul tratto utile, garantendo una maggiore affidabilità e rappresentatività del dato sperimentale rispetto alla lettura di un singolo punto. Infine, le deformazioni medie così ottenute sono state sincronizzate con i valori di tensione registrati dalla macchina di prova per ciascun fotogramma, consentendo la corretta ricostruzione delle curve $\sigma - \epsilon$ derivate dall'analisi ottica.

2.3.4 Valori notevoli

A valle delle elaborazioni e delle correzioni applicate alle curve $\sigma - \epsilon$, si è proceduto all'estrazione dei principali parametri meccanici per tutte le configurazioni di test. La determinazione del modulo elastico (E) è stata effettuata valutando la pendenza del tratto lineare in un intervallo di deformazione ben definito, conformemente alle prescrizioni delle normative di riferimento ([10] per i test di trazione e [9] per quelli di flessione).

Nello specifico, il range di deformazione ingegneristica raccomandato per il calcolo è compreso tra $\epsilon_1 = 0,0005$ ed $\epsilon_2 = 0,0025$. Estrapolando i valori di tensione corrispondenti a tali estremi (σ_1 e σ_2), il modulo elastico è stato calcolato per ogni singolo campione come rapporto incrementale:

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\epsilon} = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{0,002} \quad (2.3)$$

Infine, è stata valutata la resistenza massima ($\sigma_{\max}$) del materiale – intesa come tensione di picco a trazione o a flessione, a seconda della prova in esame – individuando analiticamente il valore massimo sulla curva degli sforzi. Al fine di garantire l'affidabilità statistica dei risultati finali, per ciascuna famiglia di provini è stato calcolato il valore medio sia del modulo elastico sia della resistenza massima, mitigando in tal modo l'incertezza legata alle fisiologiche dispersioni sperimentali intrinseche al processo di stampa FDM.

Capitolo 3

Risultati sperimentali

Nei paragrafi seguenti vengono riportati gli andamenti delle curve $\sigma - \epsilon$ relativi alle prove meccaniche di trazione e flessione, corredati dai principali parametri numerici calcolati per un rigoroso inquadramento quantitativo del comportamento dei materiali. Al fine di garantire la massima chiarezza espositiva e facilitare il confronto dei dati, i valori dei moduli elastici e delle tensioni massime sono stati presentati distinguendo i risultati delle prove di trazione standard da quelli derivanti dall'indagine ottica mediante *Digital Image Correlation*.

In sede di analisi dei grafici, è inoltre opportuno precisare una differenza sostanziale nei criteri di fine prova. Per quanto concerne i test di trazione, le curve sperimentali sono state tracciate fino all'effettivo collasso strutturale dei provini. Al contrario, le prove di flessione, dove necessario, sono state arrestate al raggiungimento dei limiti geometrici del setup sperimentale, antecedenti alla rottura del materiale. Tale interruzione precauzionale si è resa necessaria per evitare che il campione, a fronte di notevoli deformazioni plastiche e inflessioni marcate, scivolasse accidentalmente dai rulli cilindrici di appoggio, invalidando così l'acquisizione dei dati finali.

3.1 Prove di trazione

3.1.1 Trazione: PLA con layer longitudinali

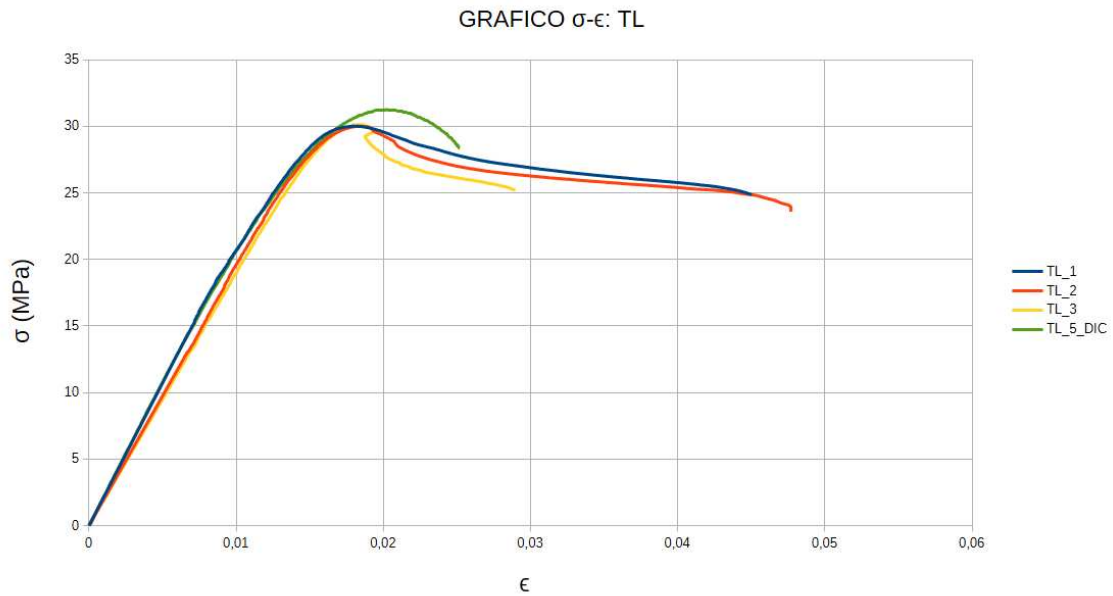


Figura 3.1

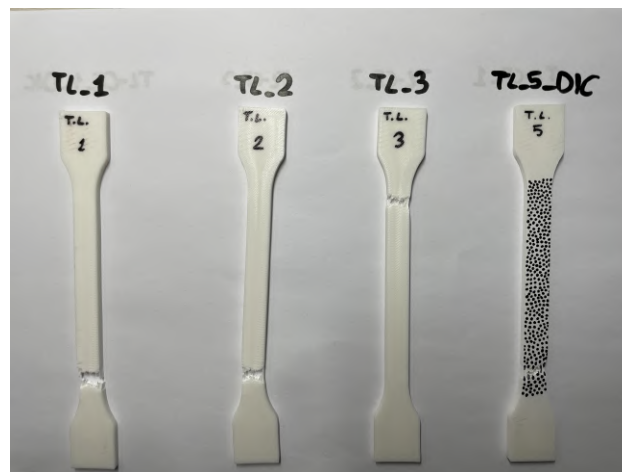


Figura 3.2: Provini TL

	Modulo Elastico E [MPa]	Resistenza Massima σ_{max} [MPa]
Trazione standard	1997	30,05
Analisi DIC	2197	31,26

Tabella 3.1: Risultati notevoli TL

3.1.2 Trazione: PLA-CF con layer longitudinali

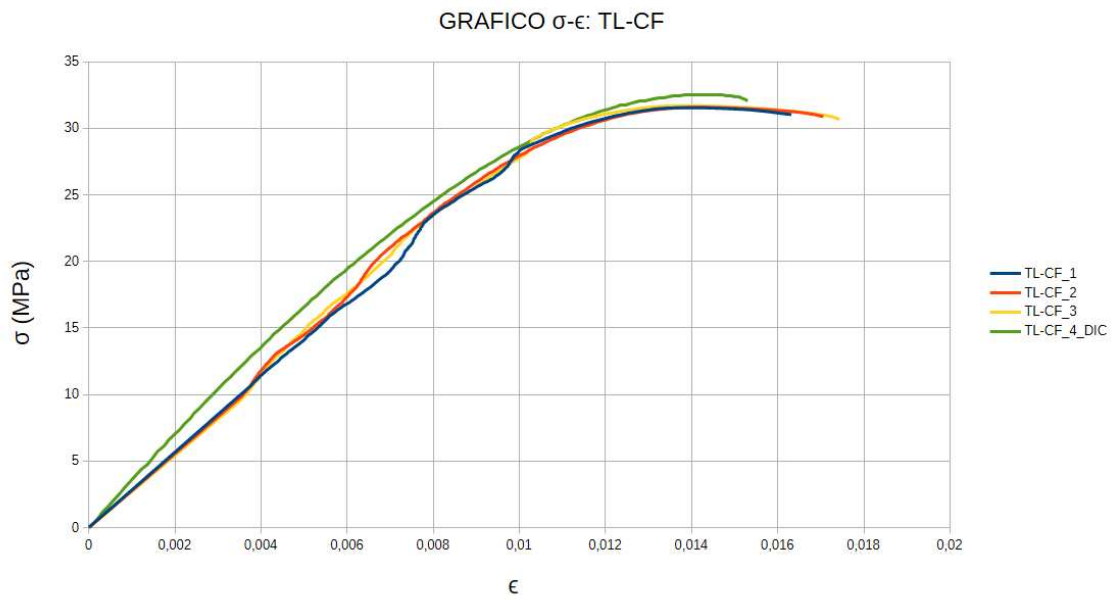


Figura 3.3



Figura 3.4: Provini TL-CF

	Modulo Elastico E [MPa]	Resistenza Massima σ_{max} [MPa]
Trazione standard	2778	31,62
Analisi DIC	3458	32,55

Tabella 3.2: Risultati notevoli TL-CF

3.1.3 Trazione: PLA con layer trasversali

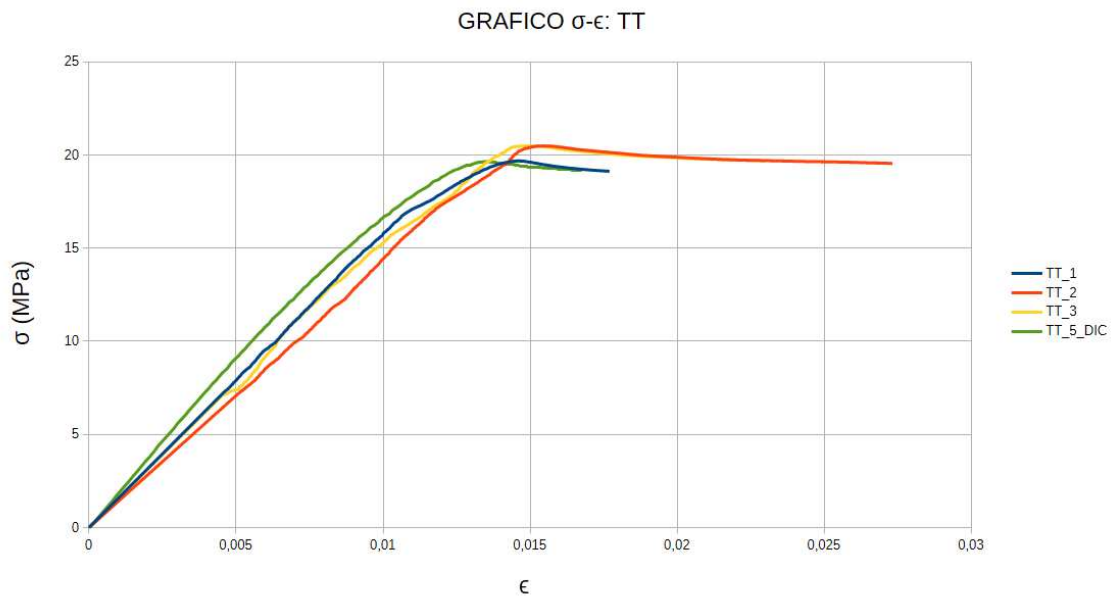


Figura 3.5

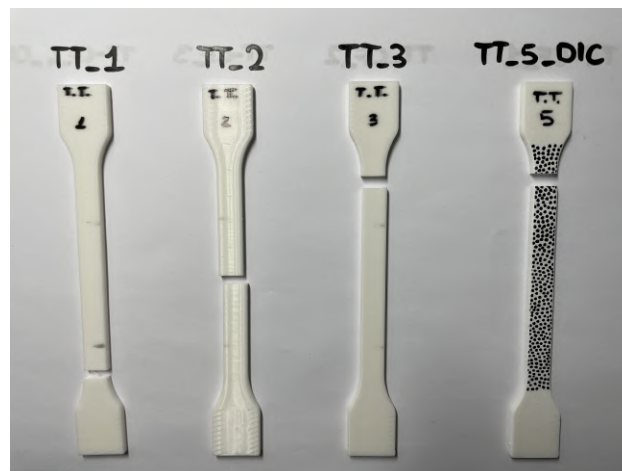


Figura 3.6: Provini TT

	Modulo Elastico E [MPa]	Resistenza Massima σ_{max} [MPa]
Trazione standard	1521	20,22
Analisi DIC	1877	19,64

Tabella 3.3: Risultati notevoli TT

3.1.4 Trazione: PLA-CF con layer trasversali

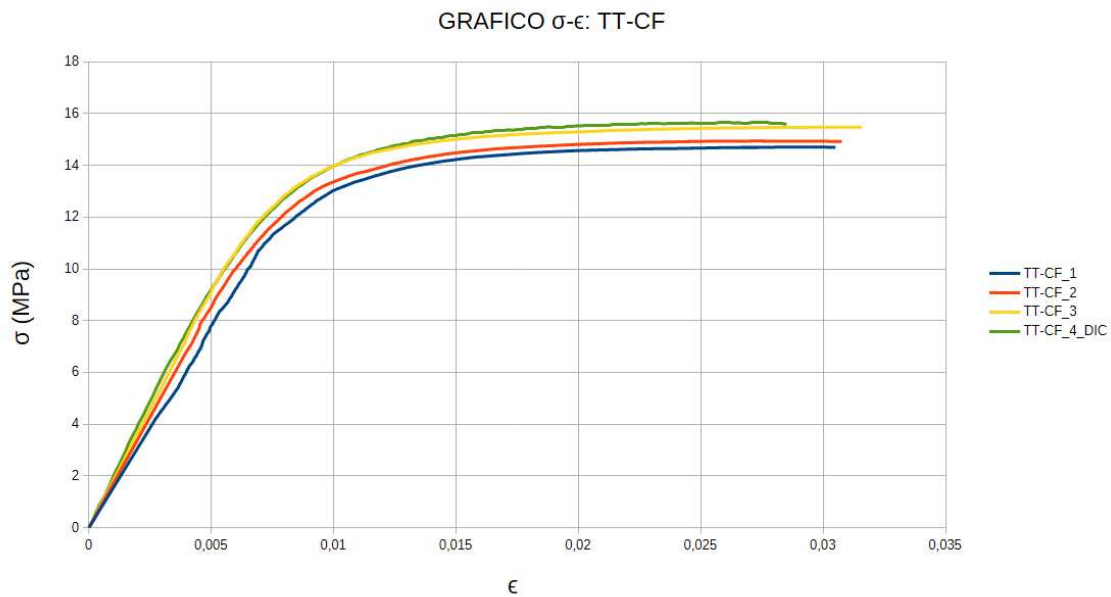


Figura 3.7

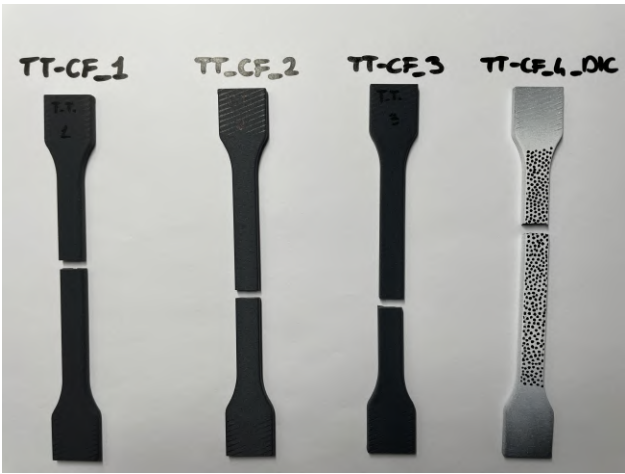


Figura 3.8: Provini TT-CF

	Modulo Elastico E [MPa]	Resistenza Massima σ_{max} [MPa]
Trazione standard	1694	15,04
Analisi DIC	1973	15,66

Tabella 3.4: Risultati notevoli TT-CF

3.1.5 Considerazioni e confronto delle prove di trazione

Dal grafico in Figura 3.9 è possibile apprezzare gli andamenti delle quattro famiglie di provini, ciascuna caratterizzata da un comportamento meccanico ben distinto. Si evince chiaramente come la rigidità delle matrici polimeriche composite sia superiore in entrambe le orientazioni di stampa; tuttavia, nella configurazione di trazione trasversale, tale maggiore rigidità si accompagna a una minore resistenza di picco (fenomeno strutturale già discusso nel Paragrafo 1.3.3). Analizzando invece i parametri a rottura, si osserva che nei provini stampati con layer longitudinali il PLA standard esibisce un comportamento marcatamente più duttile rispetto alla controparte rinforzata, raggiungendo deformazioni plastiche sensibilmente maggiori prima del cedimento. Tale divario prestazionale subisce tuttavia un'inversione di tendenza nella configurazione con layer trasversali: in questo caso, i campioni in PLA non rinforzato giungono a collasso in maniera fragile, mentre le varianti composite conservano una maggiore capacità di deformazione prima della rottura.

Viene riportato inoltre in Tabella 3.5 un confronto tra i valori sperimentali misurati dalle prove in laboratorio (Lab.) e i valori dichiarati dal produttore del filamento (Prod.) [3] [2]

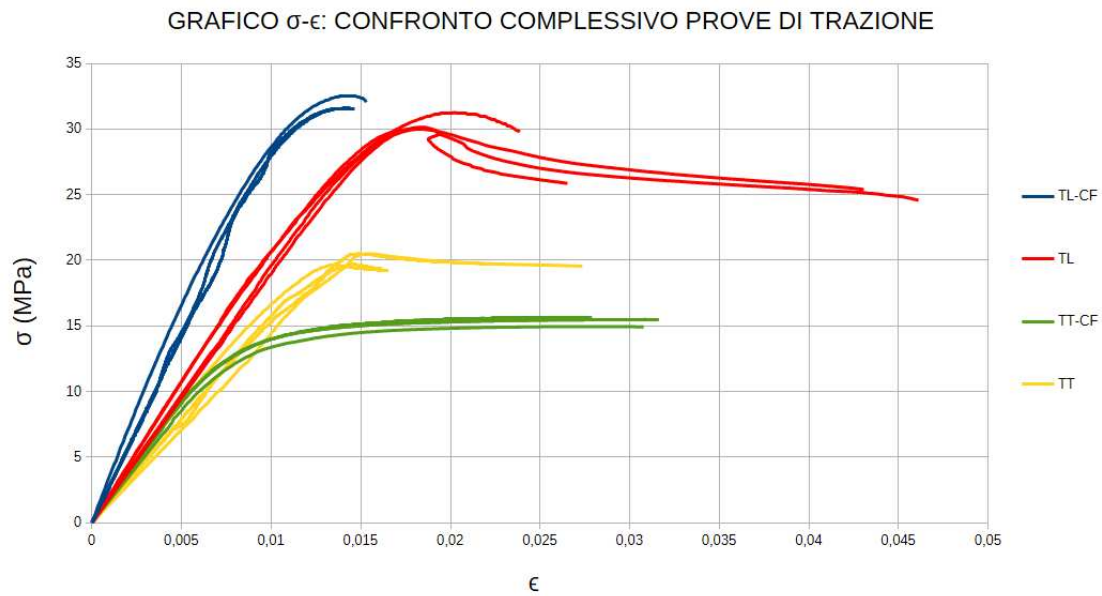


Figura 3.9

Provino	Metodo di Misura	E [MPa]		σ_{max} [MPa]	
		Lab.	Prod.	Lab.	Prod.
TL	Trazione standard	1997	2580 ± 220	30,05	35 ± 4
	Analisi DIC	2197		31,26	
TL-CF	Trazione standard	2778	2790 ± 120	31,62	38 ± 4
	Analisi DIC	3458		32,55	
TT	Trazione standard	1521	2060 ± 170	20,22	31 ± 3
	Analisi DIC	1877		19,64	
TT-CF	Trazione standard	1694	2160 ± 90	15,04	26 ± 2
	Analisi DIC	1973		15,66	

Tabella 3.5: Confronto tra i valori sperimentali (Trazione standard e DIC) e i dati forniti dal produttore.

3.2 Prove di flessione

3.2.1 Flessione: PLA con layer longitudinali

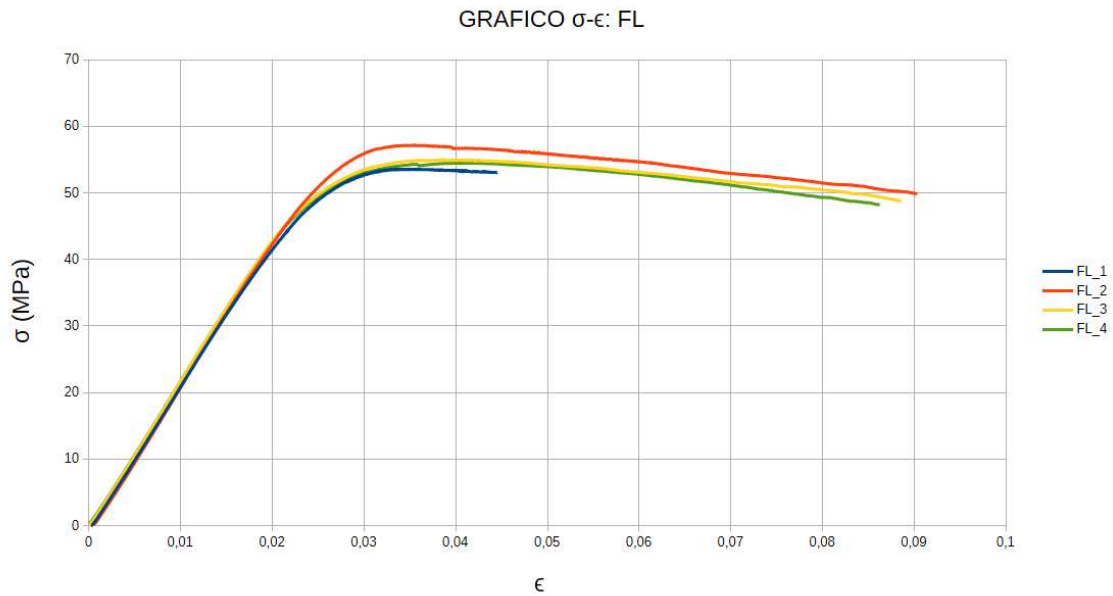


Figura 3.10

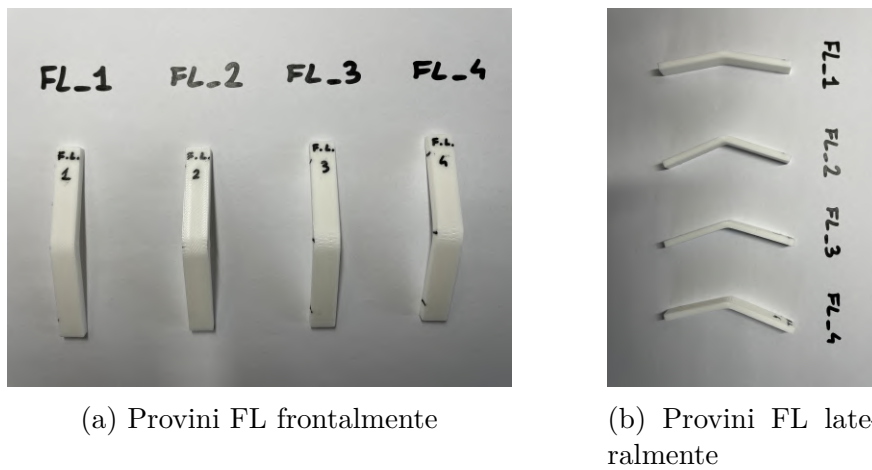


Figura 3.11: Confronto provini FL

	Modulo Elastico E [MPa]	Resistenza Massima σ_{max} [MPa]
Flessione	2136	56,87

Tabella 3.6: Risultati notevoli FL

3.2.2 Flessione: PLA-CF con layer longitudinali

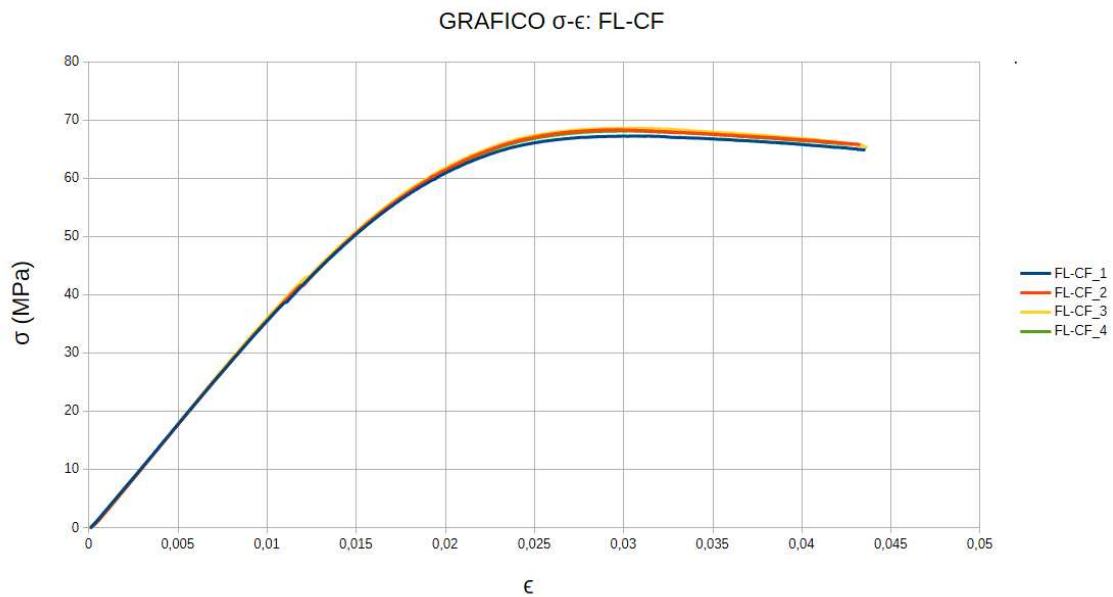


Figura 3.12

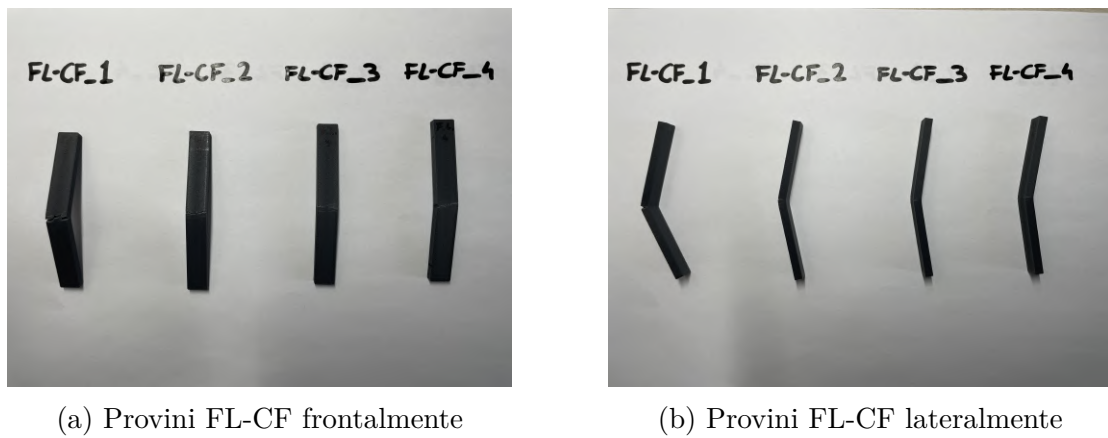


Figura 3.13: Confronto provini FL-CF

	Modulo Elastico E [MPa]	Resistenza Massima σ_{max} [MPa]
Flessione	3645	68,09

Tabella 3.7: Risultati notevoli FL-CF

3.2.3 Flessione: PLA con layer trasversali

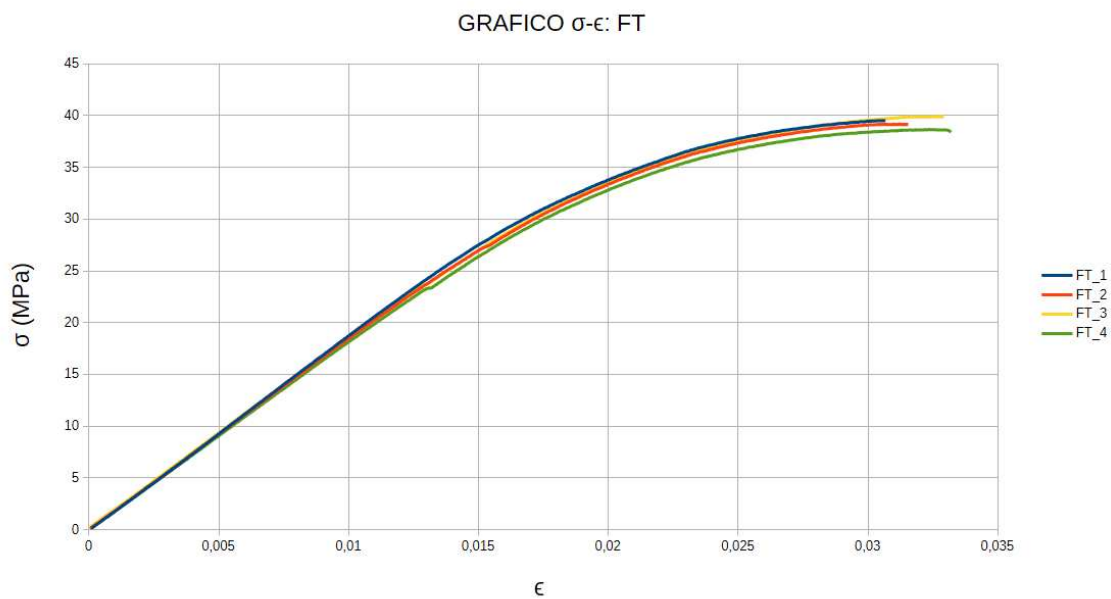


Figura 3.14

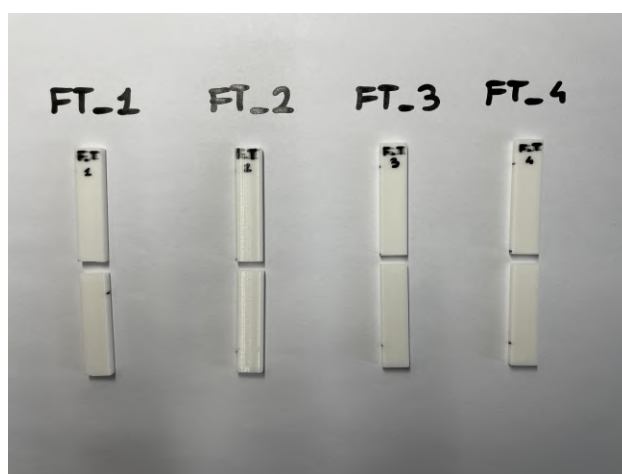


Figura 3.15: Provini FT

	Modulo Elastico E [MPa]	Resistenza Massima σ_{max} [MPa]
Flessione	1846	39,32

Tabella 3.8: Risultati notevoli FT

3.2.4 Flessione: PLA-CF con layer trasversali

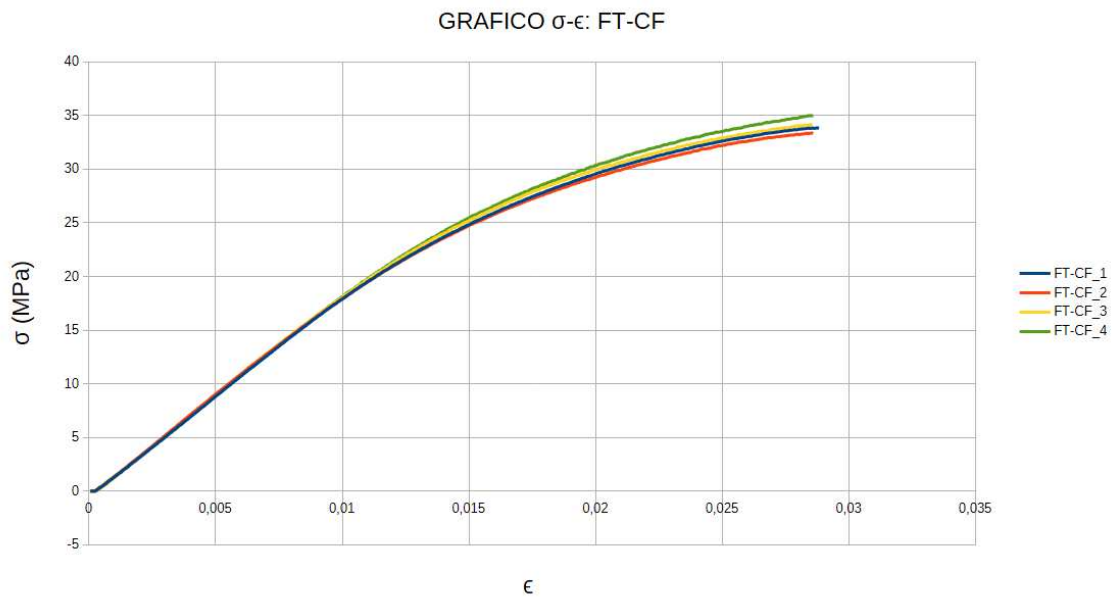


Figura 3.16

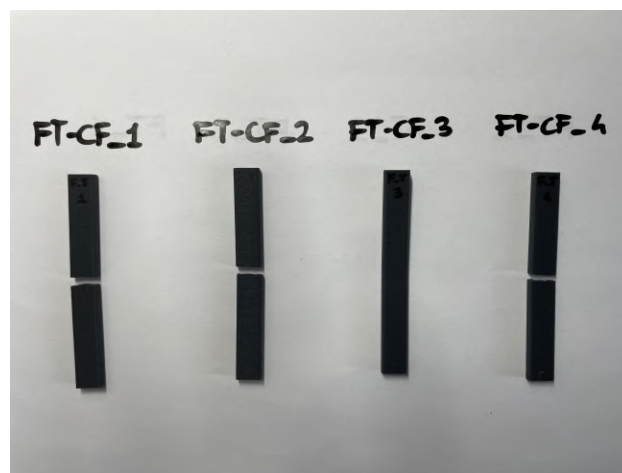


Figura 3.17: Provini FT-CF

	Modulo Elastico E [MPa]	Resistenza Massima σ_{max} [MPa]
Flessione	1862	34,45

Tabella 3.9: Risultati notevoli FT-CF

3.2.5 Considerazioni e confronto delle prove di flessione

Analogamente a quanto osservato per le prove di trazione, il grafico in Figura 3.18 permette di distinguere chiaramente la risposta meccanica delle quattro famiglie di provini. Emerge, tuttavia, una divergenza significativa rispetto all'analisi precedente: in regime flessionale, infatti, l'incremento del modulo elastico garantito dal rinforzo risulta marcato quasi esclusivamente per i campioni stampati con layer longitudinali. Per quanto concerne le geometrie con layer trasversali, sebbene il PLA-CF si confermi marginalmente più rigido rispetto alla controparte non rinforzata, tale divario non è sufficientemente ampio da tradursi in un effettivo miglioramento delle prestazioni meccaniche globali del componente.

Anche in questo caso viene riportato, a fini di completezza, un confronto tra i valori misurati in laboratorio (Lab.) e quelli dichiarati dal produttore (Prod.) secondo le schede tecniche dei rispettivi polimeri utilizzati [3] [2].

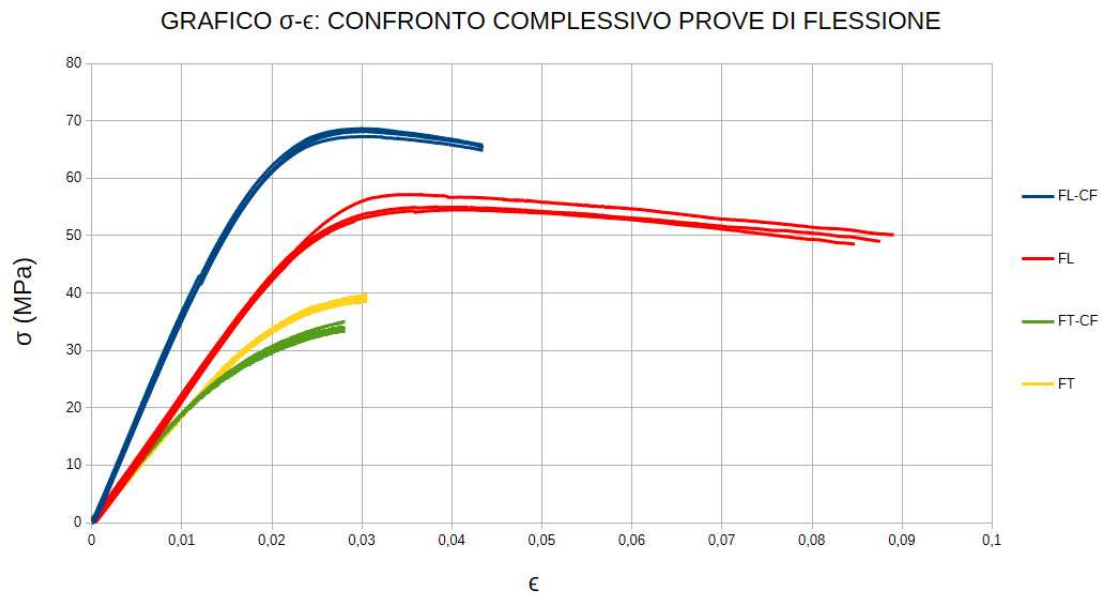


Figura 3.18

Provino	Metodo di Prova	E [MPa]		σ_{max} [MPa]	
		Lab.	Prod.	Lab.	Prod.
FL	Flessione	2136	2750 ± 160	56,87	76 ± 5
FL-CF	Flessione	3645	3950 ± 190	68,09	89 ± 4
FT	Flessione	1846	2370 ± 150	39,32	59 ± 6
FT-CF	Flessione	1862	2260 ± 180	34,45	49 ± 3

Tabella 3.10: Confronto tra i valori sperimentali di flessione e i dati forniti dal produttore.

Capitolo 4

Conclusioni

4.1 Considerazioni sui risultati analitici

Alla luce dei dati sperimentali raccolti e dei confronti precedentemente illustrati, è possibile formulare alcune considerazioni conclusive sul comportamento meccanico dei provini testati. Procedendo per gradi, le prove di trazione sui campioni in PLA standard con layer longitudinali hanno restituito risultati pienamente in linea con le attese: durante l'incremento del carico si è assistito allo sviluppo di un'evidente strizione della sezione trasversale, indice di un classico comportamento a rottura duttile. I provini rinforzati in PLA-CF, al contrario, hanno esibito una risposta meccanica peculiare. Pur raggiungendo tensioni di picco superiori rispetto alla controparte non rinforzata, al superamento del carico massimo sono giunti rapidamente a collasso, generando una frattura localizzata e irregolare. Ciò denota un comportamento macroscopico di tipo quasi-fragile anche in regime di trazione longitudinale.

Ulteriori spunti di interesse emergono dall'analisi delle prove di trazione sui provini con layer trasversali. Come si evince dal confronto in Figura 3.9, i dati evidenziano come, in questa specifica configurazione, i campioni rinforzati giungano a rottura ritardata, ovvero a livelli di sollecitazione e deformazione sistematicamente superiori rispetto a quelli del PLA standard. Questo risultato suggerisce che la matrice polimerica rinforzata, stampata adottando i parametri operativi prescritti dal produttore, possa favorire una migliore adesione inter-layer.

Per quanto concerne i test di flessione, il comportamento dei materiali si è rivelato maggiormente aderente alle previsioni teoriche. Nelle prove con layer longitudinali si è osservato lo sviluppo di ampie deformazioni plastiche che, in assenza dei sopracitati limiti cinematici della macchina di prova, avrebbero proseguito il loro decorso.

Risulta tuttavia fondamentale sottolineare che, a parità di deformazione flessionale imposta, il polimero rinforzato iniziava già a presentare evidenti micro-lesioni e sfibrature nella porzione inferiore tesa.

Infine, i campioni sottoposti a flessione con layer trasversali hanno replicato la natura puramente fragile già osservata nei corrispondenti test di trazione. Tuttavia, a differenza del caso precedente, in regime flessionale si registra un'inversione di tendenza relativa alle resistenze massime: con questa specifica orientazione di stampa, infatti, il PLA standard ha esibito prestazioni meccaniche superiori, opponendo una maggiore resistenza alla rottura rispetto alla controparte in fibra di carbonio.

4.2 Considerazioni sulla tecnologia FDM

Confrontando i risultati sperimentali ottenuti con le criticità note della tecnologia FDM, emergono evidenti corrispondenze: dagli scostamenti dimensionali rispetto alle tolleranze di progetto ai difetti di adesione inter-layer che penalizzano la resistenza trasversale, fino alle peculiarità meccaniche intrinseche delle matrici polimeriche rinforzate. Tali aspetti, uniti alle notevoli prestazioni strutturali registrate, confermano il grande potenziale di questo ambito di ricerca e la sua concreta capacità di contribuire allo sviluppo di svariati settori industriali. Risulta pertanto imprescindibile un'approfondita conoscenza dei limiti, delle soluzioni tecniche e delle alternative offerte da questa tecnologia di *Additive Manufacturing*, al fine di poterne sfruttare appieno le capacità in modo innovativo, rigoroso e consapevole.

Bibliografia

- [1] Sung-Hoon Ahn et al. «Anisotropic Material Properties of Fused Deposition Modeling ABS». In: *Rapid Prototyping Journal* 8.4 (ott. 2002).
- [2] Bambulab. *PLA-CF_Technical_Sheet*. Rapp. tecn.
- [3] Bambulab. *PLA_Technical_Sheet*. Rapp. tecn.
- [4] Brett G. Compton et al. «Thermal Analysis of Additive Manufacturing of Large-Scale Thermoplastic Polymer Composites». In: *Additive Manufacturing* 17 (ott. 2017).
- [5] Azhar Equbal et al. «A Recent Review on Advancements in Dimensional Accuracy in Fused Deposition Modeling (FDM) 3D Printing». In: *AIMS Materials Science* 11.5 (2024).
- [6] Ian Gibson et al. *Additive Manufacturing Technologies*. Cham: Springer International Publishing, 2021.
- [7] Nicolas G. Morales, Trevor J. Fleck e Jeffrey F. Rhoads. «The Effect of Inter-layer Cooling on the Mechanical Properties of Components Printed via Fused Deposition». In: *Additive Manufacturing* 24 (dic. 2018).
- [8] Mohamed A. E. Omer et al. «Advances in Interlayer Bonding in Fused Deposition Modelling: A Comprehensive Review». In: *Virtual and Physical Prototyping* 20.1 (dic. 2025).
- [9] *Plastics. Determination of Flexural Properties*. Under Review. 2019.
- [10] *Plastics. Determination of Tensile Properties General Principles*. Definitive. 2019.
- [11] *Plastics. Determination of Tensile Properties Test Conditions for Moulding and Extrusion Plastics*. Definitive. 2025.