

POLITECNICO DI TORINO



Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Aerospaziale

Tesi Magistrale

Prove sperimentali e simulazioni numeriche per la validazione della matrice dei coefficienti elastici ricavata per elementi strutturali polimerici stampati in FDM

Relatori:

Prof. Salvatore Brischetto

Ing. Roberto Torre

Candidato:

Davide Cadeddu

Anno Accademico 2019-2020

Sommario

Introduzione	7
Obiettivi proposti	7
1 Fused Deposition Modeling (FDM)	8
1.1 Descrizione del processo	8
1.2 Additive Manufacturing	9
1.3 Tecnologia Fused Deposition Modeling (FDM)	12
1.4 Materiali per la stampa.....	17
1.5 Polylactic Acid (PLA).....	19
2 Ragione della caratterizzazione del materiale e resoconto del lavoro passato	23
2.1 Motivazioni all'ipotesi del comportamento ortotropo	23
2.2 Studi a conferma dell'ortotropicità.....	23
2.3 Resoconto del lavoro passato.....	25
2.3.1 Classical Lamination Theory (CLT)	26
2.3.2 Caratterizzazione meccanica del materiale.....	27
2.3.3 Progettazione e stampaggio dei provini.....	29
2.4 Risultati ottenuti e determinazione della matrice di rigidezza	31
3 Digital Image Correlation (DIC)	33
3.1 Prove a validazione della DIC	35
3.1.1 Effetto del coefficiente di distorsione	35
3.1.2 Test di rilevamento della traslazione.....	36
4 Prova di trazione sul filamento di PLA	39
4.1 Processi e test effettuati per il raggiungimento degli obiettivi.....	39
4.2 Introduzione alla prova di trazione sul filamento	40
4.3 Determinazione del carico massimo sopportabile dal filamento.....	42
4.4 Determinazione del modulo di rigidezza del filamento	45
4.4.1 Procedura per lo svolgimento della prova.....	46
4.4.2 Tabelle, grafici e risultati acquisiti.....	47
4.5 Analisi dei dati	49
5 Prova di flessione su tre punti	51
5.1 Introduzione alla prova	51
5.2 Studio del contatto	55
5.3 Studio dell'attrito nel contatto	57
5.4 Effetto della mesh	60
5.5 Effetto della deflessione imposta sul modello FEM	63

5.6	Compimento della prova e procedure applicate.....	65
5.6.1	Verifica della distanza fra i supporti	65
5.6.2	Velocità di traslazione della traversa superiore	66
5.6.3	Calcolo del modulo a flessione	67
5.7	Risultati sperimentali	68
5.7.1	Risultati provini con laminazione lungo la direzione 1 (0°)	68
5.7.2	Risultati provini con laminazione lungo la direzione 2 (90°)	72
5.7.3	Risultati provini con laminazione 12 ($\pm 45^\circ$)	75
5.8	Analisi dei risultati sperimentali e confronto con FEM	78
6	Prova di Flesso-Torsione	81
6.1	Descrizione della prova	82
6.1.1	Costruzione del modello FEM.....	84
6.2	Svolgimento dei test preliminari	85
6.2.1	Risultati test a flesso-torsione preliminare su provini dritti.....	87
6.2.2	Indagine sull'effetto della deflessione.....	92
6.2.3	Analisi degli spostamenti perpendicolari al piano focale	94
6.2.4	Effetto del tempo sulla deflessione	95
6.3	Svolgimento della prova di flesso-torsione e analisi risultati	96
	Conclusioni	99
	Riferimenti	103

Introduzione

Nell'ottica di una rappresentazione ortotropica del comportamento meccanico di materiali polimerici stampati attraverso la comune tecnica di Additive Manufacturing (AM) denominata Fused Deposition Modelling (FDM) o Fused Filament Fabrication (FFF), il lavoro di tesi propone l'allestimento, e discute i risultati, di diverse prove sperimentali di laboratorio affiancate da appropriate simulazioni numeriche agli elementi finiti al fine di validare la matrice dei coefficienti elastici precedentemente ricavata con apposite prove sperimentali. A ciò si accostano prove per la caratterizzazione meccanica del materiale grezzo (filamento) allo scopo di dimostrare eventuali differenze con il prodotto finito post stampaggio, che sottolineeranno l'importanza di una rappresentazione ortotropica del materiale e del processo di laminazione.

Obiettivi proposti

Il traguardo che si vuole conseguire è quindi la caratterizzazione del materiale processato tramite la tecnologia di stampa FDM, ciò permetterà di conoscere le caratteristiche proprie dell'oggetto finito, ignote in fase di progettazione. Infatti, di quello che è il materiale d'apporto, ossia il polimero di PLA iniziale, se ne ipotizza l'isotropia e le caratteristiche meccaniche, ma, una volta che il materiale viene depositato, non è detto che queste rimangano quelle originarie. Sarà perciò parte integrante della tesi, indagare sul modificarsi delle proprietà meccaniche del PLA prima e dopo il processo di Fused Deposition Modeling. In altre parole, l'obiettivo principale della tesi sarà quello di validare un modello che possa spiegare le caratteristiche meccaniche dell'oggetto stampato. Tramite un'implementazione di tale modello in un solver FEM, ciò permetterebbe di simulare il comportamento meccanico di quello che sarà il prodotto finito e individuare eventuali criticità prima della stampa.

La validità di questo tipo di lavoro si manifesta nella tendenza al voler applicare la FDM a un numero di campi sempre in aumento ed evidenzia la necessità di una profonda comprensione delle proprietà meccaniche e del comportamento delle parti prodotte da FDM.

Il comportamento meccanico delle parti costruite con FDM sarà descritto secondo la teoria classica del laminato (CLT) e se ne valuterà l'applicabilità confrontando i risultati ottenuti sperimentalmente con quelli ottenuti con modelli agli Elementi Finiti.

1 Fused Deposition Modeling (FDM)

1.1 Descrizione del processo

Il processo di Fused Deposition Modeling (FDM) è una tecnica di stampa 3D che impiega come materiale d'apporto un filamento continuo di polimero termoplastico che viene riscaldato e depositato per la creazione di un oggetto.

Fra i materiali di principale interesse risultano:

- ❖ ABS (Acrilonitrile butadiene stirene);
- ❖ PLA (Acido polilattico);
- ❖ PC (policarbonato);
- ❖ PET (Polietilene tereftato);
- ❖ PTU (Poliuretano termoplastico);
- ❖ Nylon.

Avendo catene polimeriche lineari, non reticolate e scarsamente ramificate, questi presentano delle basse temperature di rammollimento e costituiscono i candidati principali per l'Additive Manufacturing (AM).

Nella scelta del polimero adatto rientrano anche altre proprietà quali:

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

Il materiale filiforme raccolto in bobine è spinto verso un estrusore da degli ingranaggi o rulli, qui entra nella camera di riscaldamento dove viene liquefatto e successivamente indirizzato verso un ugello riscaldato avente un diametro minore di quello del filamento originario. Una volta spinto fuori dall'ugello il polimero avrà l'aspetto di un filo viscoso e sottile e sarà depositato su un piano orizzontale.

La posa del materiale è un processo computerizzato nel quale l'ugello viene mosso nelle due direzioni del piano orizzontale per costruire, depositando il filamento, uno strato (layer)

dell'oggetto che si vuole realizzare. Successivamente si abbassa la piattaforma di stampaggio e il processo viene reiterato per iniziare lo strato successivo (layer by layer).

È importante poter attuare il processo di stampaggio in maniera corretta per evitare eventuali difetti di realizzazione. Per avere una maggiore comprensione del processo è utile analizzare questa tecnologia da un punto di vista fisico. Il filamento viene spinto, come già detto, all'interno dell'estrusore da dei rulli che rappresentano l'unico meccanismo che comanda il processo di erogazione del materiale. Il filamento viene quindi sottoposto a trazione prima di raggiungere i rulli e a compressione una volta superati.

La forza di compressione necessaria per l'estrusione deve essere sufficiente a superare la caduta di pressione che si ha attraverso il sistema, dipendente dalle proprietà viscosive del materiale fuso e dalla geometria del flusso nella camera di riscaldamento e nell'ugello.

Inoltre, essendo il filamento fuso sottoposto ad una deformazione a taglio durante l'erogazione, si verificherà il fenomeno shear-thinning: un comportamento pseudoplastico consistente in una diminuzione della viscosità. Questo è caratteristico dei fluidi non-newtoniani sottoposti a taglio. Infatti, la geometria del flusso uscente ed il metodo di riscaldamento di questo fluido Non-Newtoniano sono di fondamentale importanza per la corretta realizzazione del processo. La temperatura del processo è regolata da del calore immesso da resistenze elettriche. Il sistema regola continuamente il calore fornito con un sensore termico posto nella parte terminale dell'estrusore che misura la differenza fra il valore della temperatura desiderato e quello misurato, creando un circuito a feedback negativo.

I principali vantaggi del Fused Deposition Modeling risiedono nel basso costo richiesto e nella semplicità e velocità del processo. I costi delle macchine possono variare notevolmente in base al grado di precisione e qualità che si vuole conseguire, il processo è infatti già attuabile, nella più semplice delle sue forme, anche con un investimento di poche centinaia di euro.

Gli svantaggi del processo sono invece rappresentati da una finitura superficiale generalmente bassa, dipendente da altezza e spessore di ogni strato di deposizione. Inoltre, dopo la formatura del materiale d'apporto, se ne perde l'isometria e si ha una variazione delle proprietà meccaniche.

Nei paragrafi successivi si provvederà a descrivere più nel dettaglio alcuni elementi chiave di questa tecnologia.

1.2 Additive Manufacturing

L'Additive Manufacturing (AM), a volte per semplicità denominata: "stampa 3D", si contraddistingue dai classici processi produttivi che prevedono tecniche di formatura comprendenti piegatura, estrusione, colata ecc. e punta alla produzione dell'oggetto finale con un apporto del materiale strato per strato, portando così alla creazione di oggetti 3D non ottenibili tanto facilmente con metodi differenti, ed aprendo possibilità per numerose applicazioni. Per queste motivazioni, se inizialmente l'AM era utilizzata solo per il rapid prototyping, ora viene ampiamente impiegata in diversi settori produttivi e applicata a diverse classi di materiali.

Il punto forte di questa tecnica è il poter passare direttamente dalla modellizzazione tramite CAD alla produzione del prodotto finito: tagliando di netto i tempi ed i costi di progettazione, di formatura ed eventuale assemblaggio che sarebbero stati necessari con processi di produzione tradizionali. Il tutto utilizzando un numero inferiore di operatori e con una maggiore semplicità dei passaggi richiesti. La Manifattura Additiva fa quindi proprie caratteristiche che vanno nella stessa direzione delle richieste del mercato e inoltre permette la creazione di geometrie prima inattuabili o di difficile realizzazione. Ovviamente non è ancora in grado, e non ha come obiettivo, di attuare una sostituzione di quelli che sono i processi di produzione su larga scala, che rappresentano la scelta più veloce ed economica soprattutto nella creazione di semplici pezzi; ma l'AM rappresenta sicuramente la scelta migliore se si tratta di produrre oggetti complessi, personalizzati con materiali polimerici, anisotropi e non, soprattutto se la produzione riguarda pezzi unici o di un numero limitato.

Come già accennato gli step necessari per questa tecnologia sono:

- ❖ Progettazione del pezzo con un software CAD (Computer Aided Design) di modellizzazione 3D;
- ❖ Salvataggio dell'oggetto modellizzato 3D in formato .stl (Standard Triangulation Language) e conseguente rappresentazione poligonale del modello;
- ❖ Slicing, ossia una suddivisione in strati operata da un software apposito dove poter regolare anche i parametri di stampa;
- ❖ Traduzione del modello suddiviso in strati in linguaggio macchina col formato .gcode;
- ❖ Invio del file alla stampante 3D che realizza il modello secondo la procedura indicata.

Questi elencati sono passaggi di facile e rapida esecuzione, e che sia così è necessario per poter vedere concretizzata in poco tempo una propria idea di design e stabilirne l'implementazione.

Un altro aspetto da considerare quando si valuta un processo produttivo è rappresentato dal volume degli scarti di produzione, la frequenza con cui un prodotto viene scartato e la possibilità di riciclo. L'Additive Manufacturing presenta di per sé bassi se non nulli scarti di produzione, poiché quasi la totalità del materiale d'apporto impiegato sarà facente parte della struttura finale del prodotto finito. Sta all'abilità del progettista impiegare soluzioni ed accorgimenti che permettano l'applicabilità dell'oggetto da lui creato e alla precisione e calibratura della macchina di stampa usata l'evitare che il modello finito presenti dei difetti. Ovviamente, poiché in fase di prototipazione il "trial and error" è pratica comune, necessaria e ben sostenuta dalla natura di questa tecnologia, è da tenere conto che spesso il riciclo del pezzo scartato non è sempre possibile, specie quando si utilizzano materiali compositi. Per quanto riguarda alle diverse tecniche utilizzate nell'Additive Manufacturing: da qui in avanti si farà riferimento solo alla tecnologia denominata Fused Deposition Modeling (o FDM), nonché quella impiegata in questo lavoro di tesi. Essa consiste nell'estrusione di un materiale inizialmente filamentoso e raccolto in avvolgimenti, che verrà riscaldato fino a fusione e poi obbligato a passare per un ugello che lo depositerà sul piano di stampa.

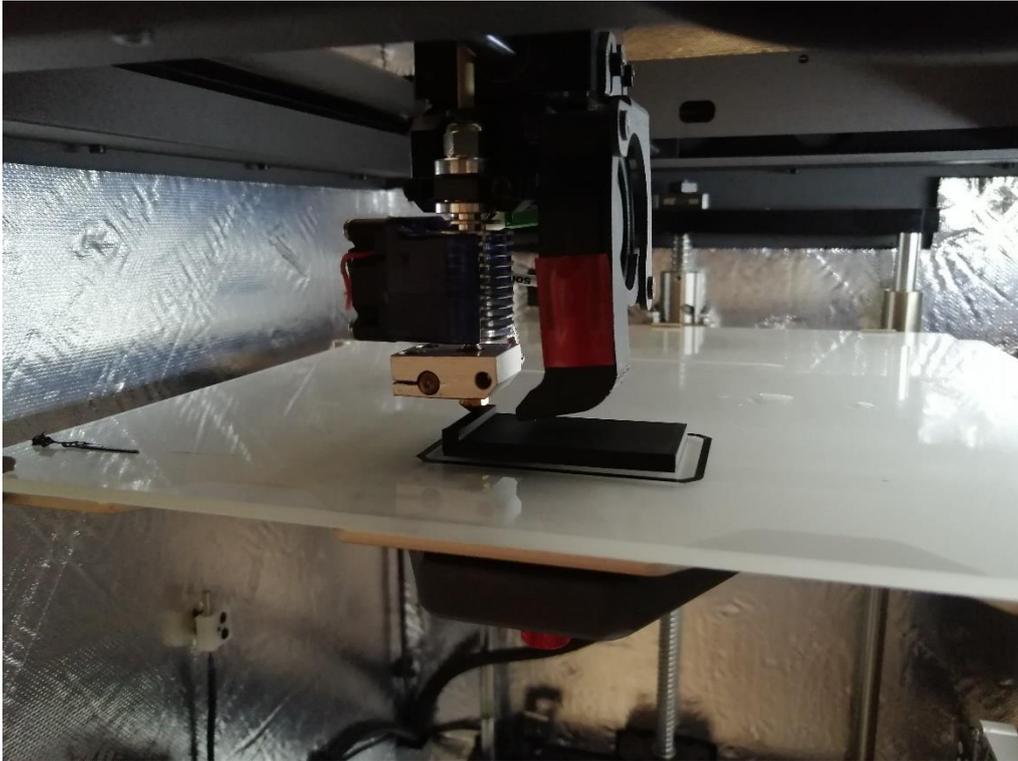


Figura 1 Realizzazione di un oggetto 3D con la tecnica del FDM

La pressione applicata per permettere l'estrusione rimane costante e di conseguenza anche la portata lo è, dato il diametro dell'ugello non varia di dimensione. Sempre caratterizzante l'ugello è la sua velocità, questa non deve variare durante il deposito della road, ossia la linea di materiale estruso che andrà a formare uno strato dell'oggetto. Se la velocità variasse durante la deposizione si avrebbe una disposizione del materiale non uniforme e questo porterebbe a difetti strutturali.

Altri difetti verrebbero invece creati se il materiale non fosse estruso alla temperatura adatta. Infatti, il filamento deve poter fluire senza sforzo attraverso l'ugello, adagiarsi sul piano di stampa o sul layer precedente (bead) e ri-solidificarsi una volta legato con questo.

Comunemente ad altre tecniche di stampa 3D il movimento della testina si svolge nelle due direzioni nel piano e il piatto di stampa si muove nella direzione uscente dal piano, ossia verticalmente per permettere la deposizione di più strati uno sopra l'altro.

Prima di procedere alla spiegazione dettagliata della tecnica del Fused Deposition Modeling, è bene descrivere quei passaggi preliminari, ricorrenti nei vari processi di stampa 3D. Sono procedure basilari ma da riportare per completezza di esposizione e poiché facenti parte della procedura generale di preparazione all'attività di stampa.

Come prima cosa il materiale d'apporto, deve essere caricato all'interno della stampante: la procedura è guidata e consta dell'inserimento fisico dell'avvolgimento del materiale filiforme e del guidarlo verso l'ugello. Qui l'ugello si riscalderebbe per permettere il passaggio del materiale plastico lungo tutto il percorso ed eseguire una prima estrusione di prova, indice del corretto caricamento del materiale. Successivamente vi è una preparazione del piano di stampa e una eventuale calibrazione di questo se ritenuta necessaria. Come ultimo passaggio precedente alla stampa vera e propria, si esegue un preriscaldamento di ugello, piano di stampa e camera

di stampa per adeguarsi a quelle che sono le temperature di estrusione ecc. più consone al materiale che si sta utilizzando.

1.3 Tecnologia Fused Deposition Modeling (FDM)

La FDM è probabilmente la tecnica di Additive Manufacturing impiegata su più larga scala. Basata sul riscaldamento fino allo stato fuso o semi fuso e alla successiva estrusione di un materiale polimerico (spesso polimeri termoplastici), la sua invenzione è dovuta a Scott Crump, che l'ha ideata nel 1989. Il processo inizia con la modellazione, attraverso un software CAD 3D (Solidworks in questo caso di lavoro), dell'oggetto e una sua susseguente conversione a formato .stl (ossia Standard Triangulation Language). Questo formato è utilizzato per ottenere una rete di triangoli che forniranno una approssimazione della superficie esterna dell'oggetto. Successivamente il file viene letto da un software di slicing, dove vengono definiti i parametri di stampa e suddiviso il modello in layer (o strati). Quest'ultimo software crea un file in formato .gcode che corrisponde alla generazione di un codice in linguaggio macchina che verrà letto dalla stampante e contenente tutte le caratteristiche dell'oggetto e le istruzioni della macchina per il suo stampaggio.

Per la scelta dei parametri di stampa e lo slicing si è scelto di utilizzare il software Simplify3D. Di seguito verranno proposte alcune immagini delle finestre di dialogo di questa applicazione per affrontare le varie possibilità di modifica concesse e la definizione dei parametri utilizzati in questo lavoro di tesi.

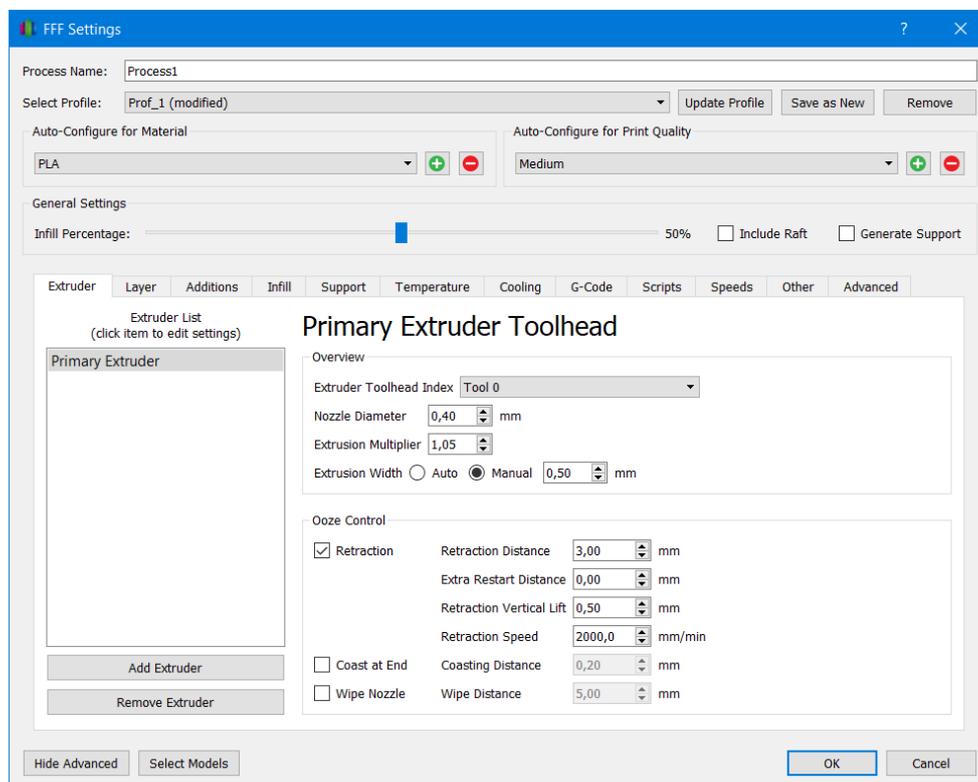


Figura 2 Schermata di Simplify3D per la scelta dei parametri di stampa

Come è possibile osservare dalla Figura 2, sono presenti diversi sottomenu. Ognuno apre alla possibile modifica di diversi parametri riguardanti più proprietà caratterizzanti le modalità di stampa.

Fra i parametri presenti, segue un elenco e descrizione di quelli che sono stati modificati ed utilizzati:

- ❖ **Nozzle Diameter:** diametro dell'ugello di estrusione;
- ❖ **Extrusion Multiplier:** chiamato anche "flow rate", corrisponde al rateo con cui la stampante estrude il materiale in relazione al 100% scelto da default;
- ❖ **Extrusion Width:** larghezza del filamento estruso;
- ❖ **Retraction Distance:** lunghezza del filamento ritratta dall'estrusore necessario a impedire la caduta del materiale durante lo spostamento dell'estrusore.
- ❖ **Primary Layer Height:** Altezza nominale di ogni strato;
- ❖ **Outline/Perimeter Shells:** Numero di road di contorno che delimitano il perimetro dell'oggetto;
- ❖ **First Layer Height:** Altezza di stampa del primo strato a contatto con il piano di stampa;
- ❖ **First Layer Width:** Larghezza del primo strato;
- ❖ **First Layer Speed:** Velocità di stampa del primo strato;
- ❖ **Interior Fill Percentage:** percentuale di riempimento dell'oggetto (inverso dell'air gap);
- ❖ **Outline Overlap:** Percentuale di sovrapposizione fra l'estrusione del perimetro e quella del riempimento interno dell'oggetto;
- ❖ **Infill Extrusion Width:** Larghezza del filamento estruso per il riempimento.
- ❖ **Internal Infill Angle Offsets:** Angolo di deposizione del filamento estruso per il riempimento dell'oggetto (corrispondente all'angolo di raster);
- ❖ **Temperature Extruder/Layer/Piano di stampa:** Parametri di modifica della temperatura del piano di stampa, dell'estrusore durante la stampa dell'oggetto e dell'estrusore durante la deposizione del primo strato a contatto con il bed;
- ❖ **Default Printing Speed:** Velocità di stampa;
- ❖ **X/Y Axis Movement Speed:** Velocità di movimento dell'estrusore nel piano;
- ❖ **Z Axis Movement Speed:** Velocità di movimento dell'estrusore verticale;
- ❖ **Filament diameter:** Diametro di partenza del filamento caricato all'interno della macchina.

Oltre a questi, tanti altri parametri sono impostabili, ed è anche possibile modificare il modello 3D ruotandolo e scalandone le dimensioni. Il software permette inoltre di avere una anteprima di stampa, dove vengono evidenziati il tempo di completamento del processo, la lunghezza del filo del materiale d'apporto necessario e costo e peso dell'oggetto finito. Sono visibili inoltre in questa anteprima i singoli strati dell'oggetto e la deposizione linea per linea necessaria al suo completamento.

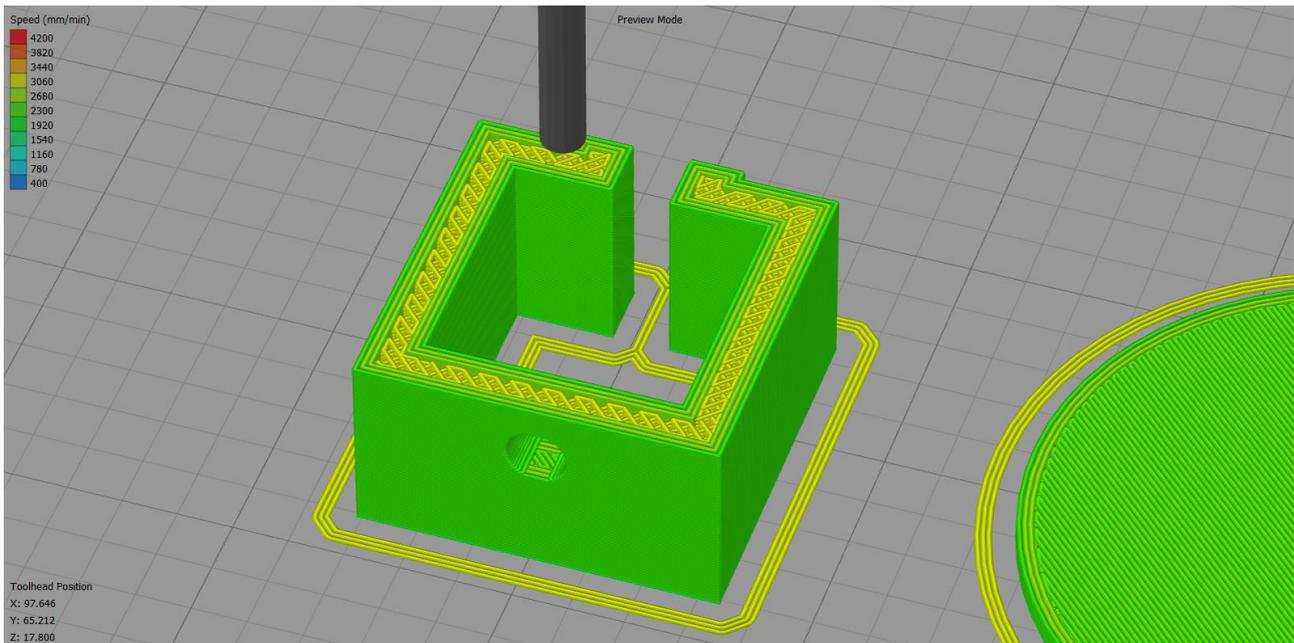


Figura 3 Rappresentazione di Simplify3D fornita dall'opzione "Prepare to print"

In questa fase i colori evidenziano le diverse velocità di stampa, ogni strato o parte del componente può essere completato con velocità di spostamento diverse dell'ugello, in modo tale da poter dedicare, se necessario, maggiore o minore attenzione e qualità di stampa.

Generalmente in questa tecnologia per ogni materiale e tipo di filamento utilizzato si deve eseguire uno studio del polimero, che permetta di ottenere, con le giuste temperature e parametri, un oggetto avente caratteristiche adeguate all'utilizzo che se ne deve compiere.

Scegliere la temperatura di stampa ottimale è importante, per cui è bene distinguere fra i materiali di natura amorfa o semicristallina. Nel caso degli amorfi, è richiesto che la temperatura dell'ugello durante l'estrusione superi quella di transizione vetrosa del materiale, mentre per quelli di natura semicristallina, si deve raggiungere il punto di fusione per fare in modo di ottenere una viscosità del polimero adeguata allo stampaggio, ossia estrusione e successiva solidificazione. Inoltre, in caso si svolga il processo con camera di stampa chiusa, la temperatura dell'ambiente interno è un parametro da determinare con attenzione, per non ammettere degradazione termica o un'eccessiva "cottura" del polimero, che influirebbe sulle caratteristiche finali dell'oggetto.

Si è quindi giunti alla conclusione per cui il procedimento ottimale consiste nel riscaldare e processare il polimero poco al di sopra della sua temperatura di fusione, poiché una fusione incompleta del filamento in corrispondenza del layer sottostante, significherebbe avere una prevalenza di aderenza macroscopica superficiale e non di cristallizzazione e formazione di legami tra le catene polimeriche, che sono i meccanismi fondamentali sui quali si basa la solidificazione del materiale depositato, senza i quali si limitano significativamente le proprietà meccaniche nella direzione verticale (1). Oltre alla temperatura, la dimensione dell'ugello è quella che determina la forma e la taglia del road estruso. Una uscita di diametro maggiore permette al materiale di fuoriuscire più rapidamente ma porta ad avere una minore precisione dimensionale del componente, rispetto al progetto CAD iniziale; infatti nessun

tratto di stampa può essere di dimensioni inferiori a quelle dell'ugello stesso. La portata in massa che attraversa la testina di stampa è quindi dipendente dalla caduta di pressione tra la camera di liquefazione e l'ambiente circostante, dalla geometria dell'ugello e dalla viscosità del materiale, a sua volta, funzione della temperatura.

Le caratteristiche degli oggetti realizzati tramite FDM, tra cui proprietà meccaniche e qualità estetica e dimensionale, dipendono maggiormente dai parametri di processo e dall'ottimizzazione di questi ultimi. L'ingegnerizzazione del processo di stampa, inoltre, gioca un ruolo fondamentale nella riduzione di scarti e tempi di lavorazione, nell'aumento della produttività e, conseguentemente, dei profitti (2).

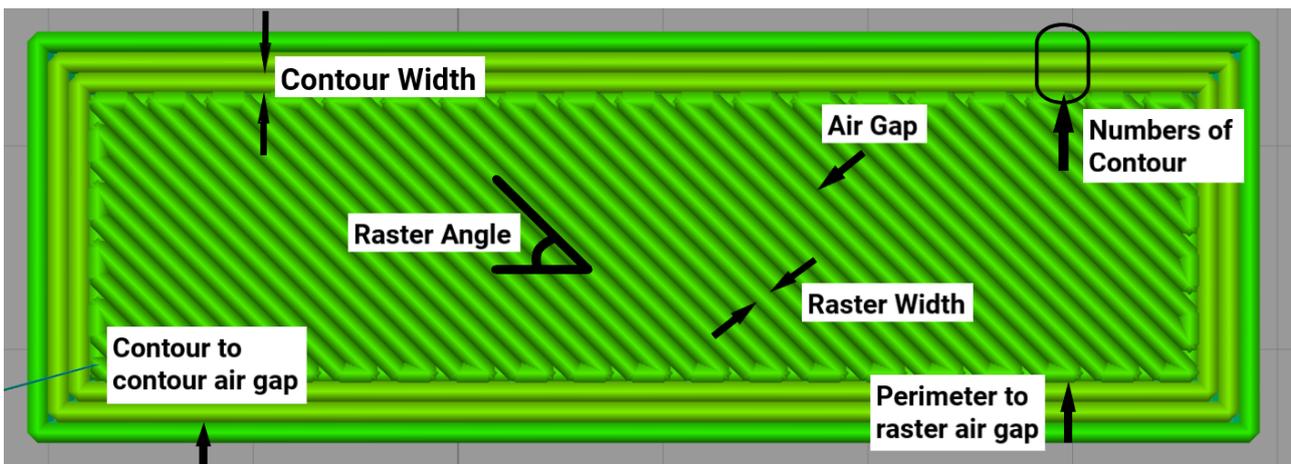


Figura 4 Parametri di stampa

Alcuni dei parametri di stampa maggiormente influenti sulla qualità del prodotto, sono indicati in Figura 4 e descritti di seguito:

- ❖ **Build Orientation:** orientamento dell'oggetto sulla piattaforma di stampa rispetto agli assi X, Y e Z.
- ❖ **Layer thickness:** spessore dello strato di materiale depositato; dipende dal materiale e dalla dimensione dell'estrusore
- ❖ **Air gap:** spazio tra filamenti adiacenti sullo stesso piano.
- ❖ **Raster angle:** angolo che l'estrusore percorre rispetto all'asse X; determinante per approssimare al meglio le zone curve.
- ❖ **Raster width:** larghezza del road depositato.
- ❖ **Contour width:** spessore del contorno.
- ❖ **Number of contours:** numero di perimetri continui intorno all'oggetto.
- ❖ **Contour to contour air gap:** spazio tra un contorno e l'altro.
- ❖ **Perimeter to raster air gap:** spazio tra perimetro e griglia di riempimento.

Secondo uno studio di Chacon et al. uno dei parametri più influenti è il raster angle, il quale risulta essere molto importante per le proprietà meccaniche dell'oggetto finito. Infatti, lo studio riporta, come le prestazioni migliori si siano ottenute in direzione parallela all'orientazione dei beads, mentre si sono registrati valori nettamente minori in direzione perpendicolare. Questo effetto si è manifestato nel comportamento a trazione, a flessione e

nella resistenza all'impatto in quanto, quando il provino è sollecitato in direzione trasversale, rispetto a quella di crescita, la rottura avviene per de-coesione dei beads (3).

È bene anche chiarire quali sono alcune delle dimensioni caratteristiche della stampa 3D generalmente adottate. Valori tipici sono: 1/10 [mm] per lo spessore di uno strato (fino ad un minimo di circa 5/100 [mm]) e una larghezza di 5/10 [mm]. In generale la larghezza del filamento deve essere leggermente superiore al diametro dell'ugello che lo deposita (che nel nostro caso ha una dimensione standard di 4/10 [mm]).

La semplice velocità di stampa è invece bene non aumentarla eccessivamente per evitare l'insorgere di una serie di effetti inerziali che darebbero imprecisione nella deposizione.

Per quel che riguarda il seguente lavoro di tesi, è stata eseguita una calibrazione della macchina per far sì che tutte le fibre siano esattamente larghe 5/10 [mm] in maniera tale che ogni volta che venga costruito un oggetto, questo avrà una larghezza trasversale multipla del suddetto valore, e si possa sapere esattamente il numero di "fibre" depositato.

La stampante 3D utilizzata in questo lavoro di tesi è la FUNMAT HT della Intamsys. Capace di stampare oltre al PLA anche altri polimeri termoplastici, la macchina, è anche in grado di lavorare con materiali ad alte prestazioni come il PEEK (Polyether ether ketone), ULTEM (Polytherimide) e PPSU (Polyphenylsulfone), raggiungendo una precisione di stampa fino a 50 µm. Essa possiede una camera sigillabile e riscaldabile fino ad un massimo di 90°C, un piatto di stampa riscaldabile fino a 160 °C e un estrusore che può raggiungere i 450 °C. La superficie utilizzabile del piatto di stampa è un quadrato 260x260 mm e l'altezza della camera impiegabile si estende anch'essa per 260 mm.



Figura 5 Stampante 3D adottata

1.4 Materiali per la stampa

Una grande quantità di materiali è disponibile per l'applicazione FDM e sono principalmente polimeri termoplastici amorfi. Questa classe di materiali presenta una graduale diminuzione della viscosità con l'aumento della temperatura poiché le catene polimeriche che hanno ottenuto sufficiente energia termica possono muoversi abbastanza liberamente portando il polimero a comportarsi come un liquido viscoso, assumendo che non avvenga la degradazione dello stesso.

Un polimero amorfo riscaldato passa attraverso una temperatura chiamata di transizione vetrosa, al di sopra della quale il materiale diventa gommoso e molte proprietà dello stesso cambiano, come la duttilità e la capacità di essere deformato, la durezza e l'elasticità. Questi cambiamenti sono completamente reversibili e la transizione da stato vetroso a stato gommoso è funzione del movimento delle molecole e non della struttura del polimero. Tuttavia, la temperatura alla quale avviene la transizione vetrosa, dipende, in gran parte, dalla natura chimica delle catene polimeriche. Continuando ad aumentare la temperatura il polimero raggiunge il comportamento di un liquido viscoso (4).

Questa peculiarità dei polimeri amorfi permette di controllare l'estrusione in modo più semplice grazie alla finestra di temperature di processo impiegabili più ampia; al contrario, i polimeri di natura semicristallina, mostrano un calo più marcato delle proprietà meccaniche in corrispondenza del punto di fusione e quindi risulta più difficile una stima del loro comportamento al variare della temperatura. In particolare, i polimeri non sono mai materiali perfettamente cristallini ma contengono regioni disordinate e cristalliti di taglie diverse. Quando il materiale si trova nello stato di liquido viscoso le catene risultano altamente annodate ed è necessario un tempo sufficientemente alto per la diffusione, al fine di raggiungere l'ordine tridimensionale e la formazione delle zone cristalline. Quindi, un raffreddamento rapido dal fuso, solitamente impedisce lo sviluppo di un grado di cristallinità significativo (4).

Per far sì che un materiale possa essere impiegato nelle varie tecnologie di stampa 3D, devono essere verificate alcune proprietà. Il materiale infatti deve poter essere estruso con una certa portata, a pressione costante, attraverso un ugello avente un determinato diametro. Inoltre, questo deve poter essere in grado di creare una struttura solida capace di autosostenersi ed una geometria precisa, in modo da poter rispettare tutte i crismi imposti nella fase di progettazione 3D. Se richiesto, deve poter consentire il bridge, ossia pontare entro certi limiti un determinato spazio (bridge gap) e quindi poter servire da base per ulteriori strati che verranno depositati successivamente sopra di questo. Come ultimo punto, quando il materiale si raffredderà a stampa conclusa, il materiale deve essere stabile e non presentare fenomeni di distorsione che possano modificare la struttura per come era stata progettata.

In un articolo di Chad Duty et al. (5), viene affrontato lo studio di un modello viscoelastico. Qui venivano proposti un gran numero di parametri di cui valutare l'influenza e su si sono basati i calcoli al fondamento per definire se il materiale potesse avere le caratteristiche adatte alla stampa. I parametri, che verranno solo elencati e non trattati approfonditamente, sono definiti dalla Figura 6.

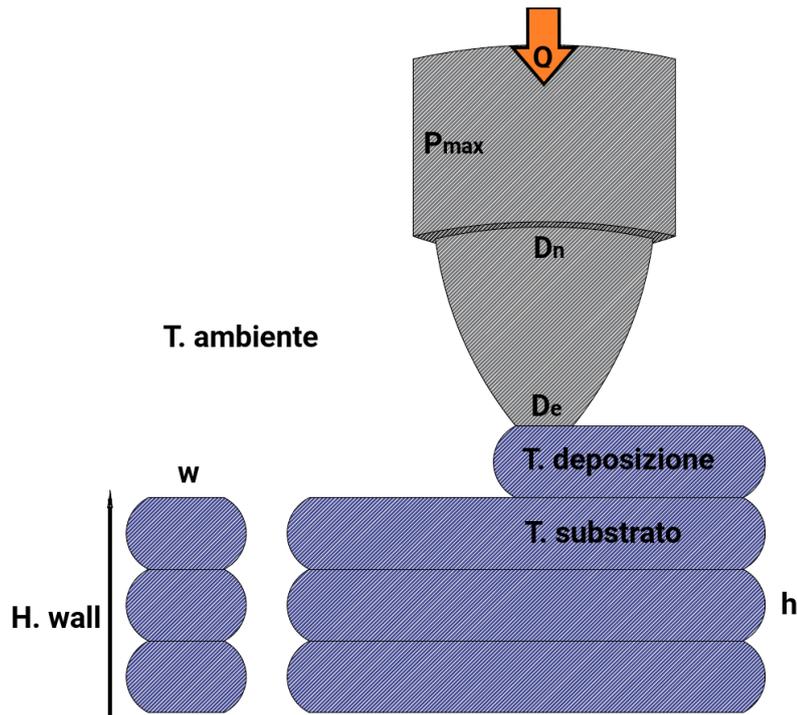


Figura 6 Illustrazione della variabili di stampaggio (5)

- ❖ Q : portata in volume di materiale estruso;
- ❖ P_{max} : pressione massima del sistema;
- ❖ t_{layer} : tempo di deposizione di un singolo strato;
- ❖ D_e : diametro all'uscita della testina di estrusione;
- ❖ L_e : lunghezza della regione di uscita dell'estrusore;
- ❖ D_n : diametro dell'ugello;
- ❖ L_n : lunghezza dell'ugello;
- ❖ T_{amb} : temperatura ambiente della camera;
- ❖ T_{dep} : temperatura di deposizione;
- ❖ T_{sub} : temperatura del substrato depositato in precedenza
- ❖ h : altezza del bead depositato;
- ❖ w : larghezza del bead;
- ❖ H_{wall} : altezza totale della struttura;
- ❖ L : lunghezza totale della struttura.

Inoltre, sono elencate quelle proprietà intrinseche al materiale:

- ❖ ρ_{RT}, ρ_{melt} : densità a temperatura ambiente e T_{dep} per i polimeri termoplastici
- ❖ E : modulo di Young a temperatura ambiente
- ❖ γ_{SE} : energia superficiale alla T_{dep}
- ❖ η : viscosità, funzione della velocità di deformazione (shear rate $0,01 < \dot{\gamma} < 1000 \text{ s}^{-1}$) alla T_{dep}
- ❖ G'_0 : modulo di conservazione a bassi shear rate ($\dot{\gamma} \sim 0,01 \div 0,1 \text{ s}^{-1}$) e T_g
- ❖ G''_0 : modulo di dissipazione a bassi shear rate ($\dot{\gamma} \sim 0,01 \div 0,1 \text{ s}^{-1}$) e T_{dep}
- ❖ σ_{yeld} : resistenza allo snervamento a bassi shear rate ($\dot{\gamma} \sim 0,01 \div 0,1 \text{ s}^{-1}$) e T_g

- ❖ α : coefficiente di espansione termica (CTE) tra temperatura ambiente e T_g

L'approfondimento di tali studi e proprietà esula da i temi principali di questa tesi, ma, per completezza di esposizione, si sono voluti riportare per sottolineare l'importanza di un punto di vista più ampio necessario in questo campo.

1.5 Polylactic Acid (PLA)

L'acido polilattico (PLA) è un poliesteri biodegradabile e ottenuto da fonti rinnovabili e alimentari. Per questo rappresenta anche una valida alternativa "bio" o ecologica ad altri polimeri sintetici usati tradizionalmente.

Con il termine bioplastica si comprende quella classe di materia di origine naturale, biodegradabili o ambedue. Questi materiali possono avere le stesse proprietà delle plastiche convenzionali e, come già detto, offrire anche ulteriori benefici come la riduzione di gas nocivi per la produzione, o la possibilità di smaltimento sicuro senza intaccare l'ambiente.

Si possono distinguere tre grandi classi di bioplastiche:

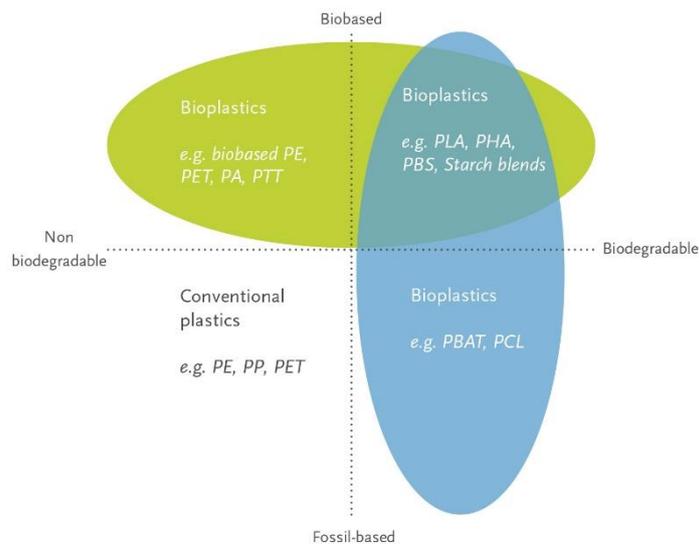


Figura 7 Schema rappresentante le categorie delle bioplastiche commercializzate (6)

- ❖ Non biodegradabili a base interamente o parzialmente bio: (PE, PET, PA, PTT biobased, rispettivamente polietilene, polietilene tereftalato, poliacrilato, politrimetilene tereftalato a base bio);
- ❖ Biodegradabili e a base bio: (PLA, PHA, PBS e Starch blends, rispettivamente acido polilattico, poliidrossialcanoati, polibutilene succinato e miscele di amido a base bio);
- ❖ Basate su risorse fossili e biodegradabili: (PBAT, polibutirrato-adipato-tereftalato) (6).

Per la produzione del PLA si usa la polimerizzazione dell'acido lattico, ossia il suo monomero. Questo si trova normalmente in quelli che vengono chiamati due diversi enantiomeri: l'acido D-Lattico e quello L-lattico, come indicato in Figura 8:

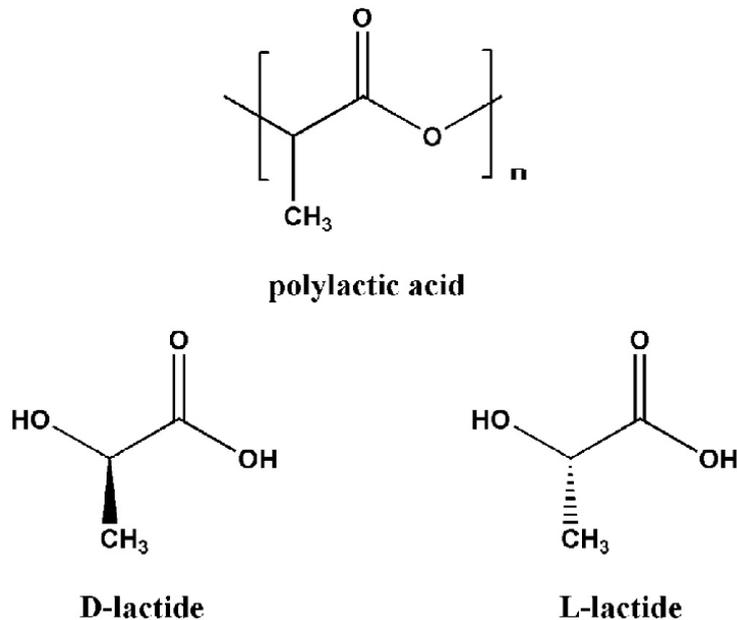


Figura 8 Struttura chimica dell'acido polilattico e rappresentazione dell'acido D-lattico e acido L- lattico (7)

L'acido lattico è un acido carbossilico ed è quello più facilmente reperibile in natura; questo può essere ricavato per sintesi chimica o per fermentazione. Per quanto riguarda la produzione per sintesi chimica, questa si basa sull'idrolisi del lattone, che viene ottenuto da acetaldeide e acido cianidrico. Ciò porta a una miscela dei due enantiomeri quali l'acido L-lattico e acido D-lattico.

Parlando invece della produzione tramite fermentazione, è una tecnica più conveniente e più largamente utilizzata. Si basa sulla fermentazione di risorse naturali, come piante contenenti amido (mais per la maggior parte, grano e canne da zucchero).

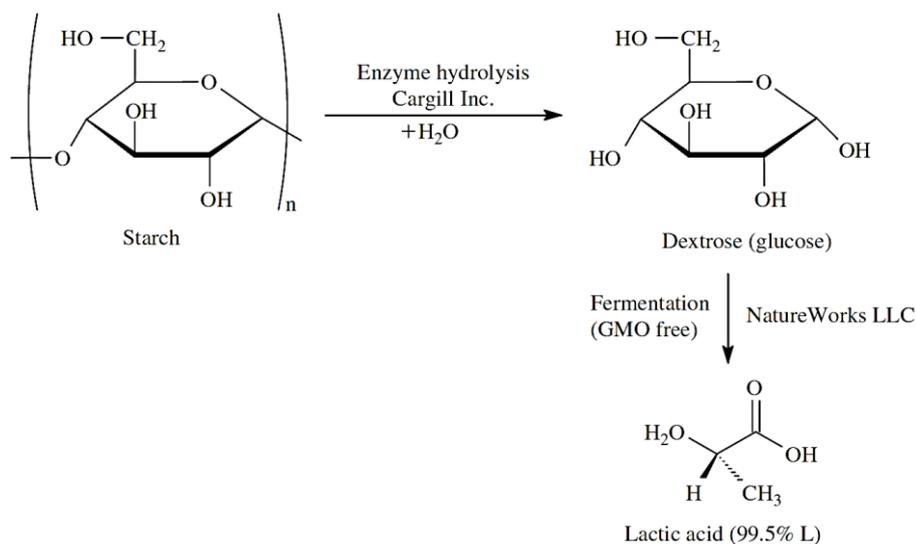


Figura 9 Formazione dell'acido lattico mediante fermentazione (8)

Non appena si è formato l'acido lattico, con esso viene realizzata la polimerizzazione per l'ottenimento del PLA. La polimerizzazione consiste in una reazione che avviene per policondensazione o per apertura di anello.

Di seguito sono mostrate le possibili modalità per l'ottenimento del PLA:

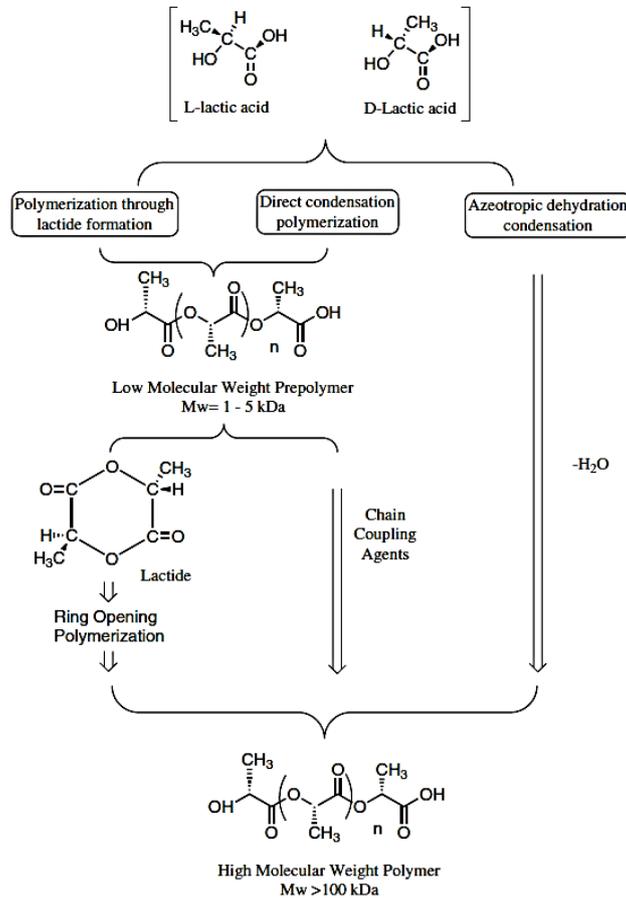


Figura 10 Generazione del PLA secondo le diverse procedure (9)

Il PLA normalmente prodotto in filamenti è rigido e fragile, è un materiale igroscopico e offre proprietà barriera all'ossigeno quattro volte superiori rispetto al polipropilene (10).

È stato dimostrato come lo stiramento delle catene polimeriche di questo materiale, ne migliori alcune proprietà, quali la resistenza all'impatto e alle temperature.

È interessante segnalare come, per quanto esistano numerose aziende produttrici di PLA per il settore dell'Additive Manufacturing ed ognuna di queste metta in commercio filamenti dalle caratteristiche differenti, in letteratura non è affrontato spesso l'influenza sul prodotto finito di tali proprietà di partenza. Infine, è da evidenziare come il PLA sia un polimero molto influenzato dalle condizioni ambientali, quali l'umidità del luogo in cui è conservato; questo significa che, in condizioni atmosferiche prive di umidità, il materiale diventa più resistente ma meno tenace, con un comportamento più fragile. Tuttavia, la rottura avviene per la comparsa di difetti nella struttura e non per un limite intrinseco del materiale. Risulta quindi essenziale il raggiungimento di un controllo maggiore sul grande numero di parametri che possono inficiare il processo cominciando da una regolamentazione maggiore per il

materiale, per la sua composizione, per le condizioni di stoccaggio e per le procedure di realizzazione e di prova (11).

Il materiale utilizzato per questa tesi è costituito da un filamento nero in PLA prodotto dalla ditta: "ERYONE" di spessore nominale di 1,75 mm e una temperatura di stampa variabile fra 190-220 °C.



Figura 11 Filamento PLA utilizzato

2 Ragione della caratterizzazione del materiale e resoconto del lavoro passato

2.1 Motivazioni all'ipotesi del comportamento ortotropo

La stampa di un oggetto avviene strato per strato (layer-by-layer), e per ogni strato si può scegliere una certa strategia di riempimento. La strategia più semplice (ed efficace) è la disposizione dei filamenti in modo lineare.

L'idea da cui si è partiti consiste nell'ipotesi dell'analogia fra la classe dei materiali ortotropi e il comportamento degli oggetti creati via deposizione lineare dei filamenti su un'unica direzione. Tale ipotesi trova riscontro nello studio di S.H. Ahn, et al. (12), in cui viene dimostrato come una parte di ABS costruita per FDM può essere considerata come una struttura composita laminata con strati di fibre legate impilate verticalmente. Di conseguenza, non solo il materiale di alimentazione controlla le proprietà meccaniche delle parti FDM, ma anche le sequenze di stack in cui gli strati vengono sovrapposti.

Nello studio del supposto comportamento ortotropo si è anche aggiunta l'ipotesi che gli oggetti creati si comportino in maniera analoga ad un composito in fibra lunga.

2.2 Studi a conferma dell'ortotropicità

Diversi articoli trattano le caratteristiche anisotrope delle parti FDM negli ultimi anni.

Per chiarire, l'esempio in Figura 12 mostra chiaramente il metodo di giunzione tra i vari layer (strati) realizzati con tecnologia di stampa a deposizione di materiale fuso. Ogni layer è compatto su tutta la sua superficie mentre risulta meno denso nelle zone di contatto tra strati differenti. Nella stampa FDM il sovrapporsi dei layer avviene meccanicamente piuttosto che a livello molecolare (13). Ciò genera una mesostruttura caratterizzata da una particolare ripartizione di polimero e vuoti, responsabile di una diversa distribuzione delle sollecitazioni rispetto ad un componente completamente pieno.

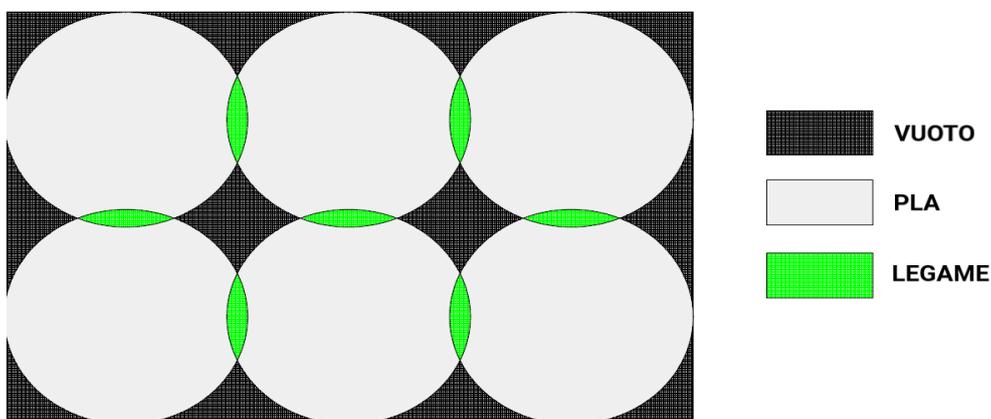


Figura 12 Rappresentazione della struttura interna di un oggetto costruito con FDM

Raramente la rottura di un componente si originerà per separazione molecolare internamente ad un dato layer, o su piani di sezione dei filamenti. Più verosimilmente invece avverrà un distacco tra strati dovuto ad una minore densità di materiale nelle superfici di sovrapposizione.

Al fine di ottimizzare la resistenza meccanica degli oggetti stampati in FDM converrebbe quindi ottimizzare la progettazione tenendo conto della minore resistenza meccanica offerta dai componenti nelle direzioni perpendicolari ai filamenti. Sempre lo studio di Sung-Hoon Ahn sul comportamento anisotropo dei materiali (12) rivela che il processo FDM produce parti con caratteristiche uniche. Evidenzia come, filamento per filamento, la macchina depositando materiale in una direzione, crea delle parti con un comportamento anisotropo.

I parametri di costruzione individuati in tale studio, anche qui sono:

- ❖ Bead width;
- ❖ Air gap;
- ❖ Model Build temperature;
- ❖ Raster orientation;
- ❖ Color;

Esistono altri parametri ma sono o duplicati dei precedenti o non hanno una connessione rilevante con le proprietà meccaniche finali. Questi sono:

- ❖ Envelope temperature;
- ❖ Slice height;
- ❖ Nozzle diameter;

Da questi ne vengono tratte delle regole di costruzione:

- I. Costruire parti dove il carico di tensione sarà applicato longitudinalmente alle fibre;
- II. Essere consapevoli del verificarsi di una concentrazione degli stress nelle zone raccordate. Questo poiché la FDM porta ad una discontinuità nelle zone di transizione. E da notare che anche se il raggio di curvatura è grande, nelle sezioni trasversali come in Figura 13, dove il tratto verticale termina ci saranno zone di concentrazione degli stress. Un problema addizionale è che, in queste zone raccordate, i filamenti interni non saranno più sollecitati secondo tensione pura;

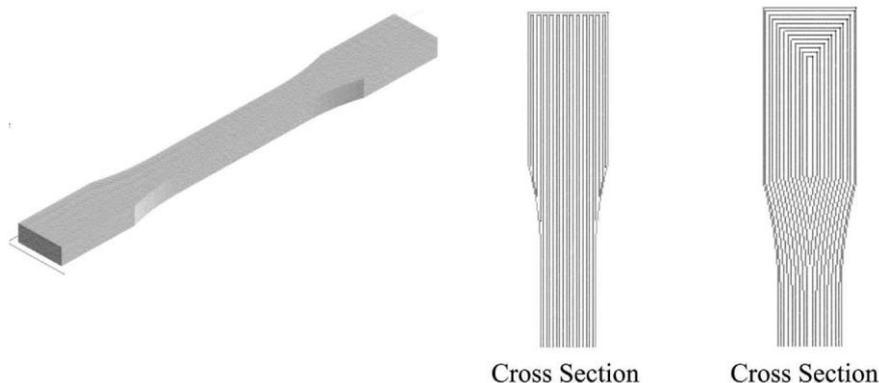


Figura 13 Due differenti tipologie di deposizione del road secondo la normativa ASTM D3039

- III. Usare un air gap negativo in modo da ridurre i vuoti e, quindi, incrementare forza e rigidità;
- IV. La larghezza del bead può portare a diverse complicazioni:
 - Se questa è troppo piccola, si aumenta la qualità del pezzo ad il costo di aumentare il tempo di stampa. La larghezza dei contorni deve essere un multiplo intero di quella del bead in modo da evitare gap;
- V. Considerare l'effetto della direzione di costruzione del pezzo per aumentarne la precisione;
- VI. Essere consapevoli che le regioni sottoposte a tensione giungono prima a failure rispetto a quelle sottoposte a compressione;

In conclusione, è stato trovato che l'effetto dell'air gap e il raster orientation sono consistenti nella caratterizzazione delle proprietà meccaniche nella tecnica del FDM e che questa porta alla creazione di pezzi con caratteristiche anisotrope.

Le sollecitazioni a compressione sopportate da questi pezzi, sono maggiori di quelle a trazione e queste non sono influenzate preminentemente dalla direzione di costruzione. Inoltre, grazie al comportamento anisotropo dei pezzi costruiti con il FDM, la forza di un'area della parte dipende fortemente dalla direzione di raster.

Pochi articoli in letteratura, invece, trattano dello sviluppo di modelli predittivi per determinare le proprietà meccaniche delle parti FDM. La strategia adottata impiegherà l'uso di modelli ampiamente conosciuti e implementati, come la classica teoria del laminato già impiegata per i materiali compositi, che potrebbe fornire un vero vantaggio in termini di usabilità.

2.3 Resoconto del lavoro passato

Per quel che riguarda le basi di questo lavoro di tesi e la caratterizzazione meccanica del materiale, l'idea iniziale è stata quindi quella di costruire la matrice di rigidità 6×6 per il generico materiale ortotropo. Abituamente per i materiali compositi non vengono studiate le proprietà fuori dal piano, ma è anche vero che nel nostro caso, data la facilità con si possono ottenere tramite la tecnologia FDM oggetti 3D sviluppati in tale direzione, sarebbe indubbiamente interessante indagare su tali proprietà. Secondo tali calcoli sono quindi presenti un totale di nove variabili indipendenti determinabili grazie a sei test, tre a trazione e tre a taglio (nei test a trazione ne vengono infatti determinate due: un modulo di rigidità ed un Poisson).

Si è valutato però di applicare prima un passaggio intermedio, a valle del quale inizia il seguente lavoro di tesi, che implica la scelta di seguire l'ipotesi CLT (Classical Lamination Theory) valida per strutture sottili, dove si trascurano le differenze fra le direzioni trasversali e si determina quindi la matrice 3×3 delle rigidità ridotte, e verificarne la validità per la caratterizzazione di questa tipologie di strutture.

2.3.1 Classical Lamination Theory (CLT)

La CLT è stata quindi applicata per descrivere il comportamento meccanico delle parti stampate con FDM. Come richiesto dalla CLT, i valori del modulo elastico nelle direzioni longitudinale e trasversale alla fibra (E_1, E_2), il modulo di taglio (G_{12}) e il modulo di Poisson (ν_{12}) sono stati determinati sperimentalmente.

La teoria classica del laminato consente di calcolare il comportamento elastico di un materiale ortotropo multistrato utilizzando le costanti che descrivono il comportamento meccanico del singolo strato $E_1, E_2, \nu_{12}, G_{12}$ e h_c . E_1 ed E_2 sono il modulo elastico nelle direzioni longitudinale e trasversale alla fibra, ν_{12} è il rapporto di Poisson, G_{12} è il modulo di taglio e h_c è lo spessore dello strato. È possibile calcolare il tensore di rigidità Q_k ridotto, per ogni strato k e nel riferimento al sistema di strati $\{x_1, x_2, x_3\}$, come:

$$[Q_k] = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix}$$

I termini nella matrice sono:

$$Q_{11} = \frac{E_1}{1 - \nu_{12}\nu_{21}}$$

$$Q_{12} = \frac{\nu_{21}E_1}{1 - \nu_{12}\nu_{21}}$$

$$Q_{22} = \frac{E_2}{1 - \nu_{12}\nu_{21}}$$

$$Q_{66} = G_{12}$$

con

$$\nu_{21} = \frac{\nu_{12}E_2}{E_1}$$

Le relazioni tra le forze applicate N e i momenti e le risultanti deformazioni del piano medio ε^0 e le curvature χ possono essere riassunte nella seguente equazione matriciale:

$$\begin{Bmatrix} N \\ M \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ B & D \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon^0 \\ \chi \end{Bmatrix}$$

dove i tensori A, B e D , quando lo spessore h_c degli strati è costante, sono:

$$A = \frac{h}{n} \sum_{k=1}^n Q_k(\delta_k) \quad B = \sum_{k=1}^n \frac{h^2}{2n^2} b_k Q_k(\delta_k) \quad D = \sum_{k=1}^n \frac{h^3}{12n^3} d_k Q_k(\delta_k)$$

Nelle equazioni precedenti k è stato numerato dal fondo del laminato, n è il numero totale di strati, h è lo spessore del laminato mentre b_k e d_k sono:

$$b_k = 2k - n - 1 \quad d_k = 12k(k - n - 1) + 3n(n + 2) + 4$$

Mentre $Q_k(\delta_k)$ è il tensore di rigidezza ridotto dello strato k nel riferimento laminato $\{x, y, z\}$. δ_k è l'angolo tra l'asse x del riferimento laminato e l'asse x_1 in riferimento allo strato k -esimo. Il calcolo della sollecitazione in ogni strato richiede il calcolo delle deformazioni e, quindi, è necessario invertire l'equazione delle forze e momenti:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon^0 \\ \chi \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ B & D \end{bmatrix}^{-1} \begin{Bmatrix} N \\ M \end{Bmatrix}$$

Poiché questa inversione potrebbe essere abbastanza complicata, un altro modo per affrontare il problema è di invertire uno per uno i tre tensori che compaiono nelle relazioni di A , B e D . Pertanto, è possibile riscrivere l'equazione precedente nella forma:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon^0 \\ \chi \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} a & b \\ b^T & d \end{bmatrix}^{-1} \begin{Bmatrix} N \\ M \end{Bmatrix}$$

Con

$$a = (A - BD^{-1}B)^{-1} \quad b = -(A - BD^{-1}B)^{-1}BD^{-1} = -aBD^{-1} \quad d = (D - BA^{-1}B)^{-1}$$

Infine, al fine di ottenere le proprietà del laminato, si può definire:

$$a^* = ha$$

Pertanto, il modulo di Young in laminato nella direzione x è:

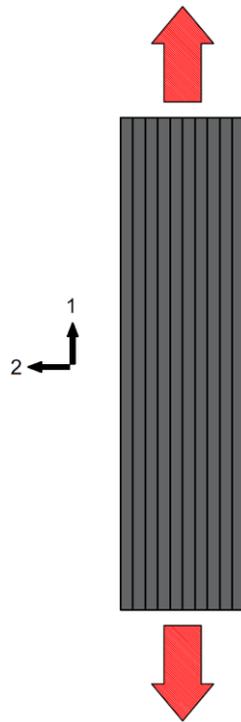
$$E_x = \frac{1}{a_{11}^*}$$

2.3.2 Caratterizzazione meccanica del materiale

Questo paragrafo vuole quindi affrontare le modalità del lavoro svolto alla base di questo progetto di tesi, e la preparazione che è risultata necessaria per poter giungere a tali risultati. I test di caratterizzazione meccanica, atti a poter delineare la matrice di rigidezza 3x3 del PLA descritta precedentemente e quindi la determinazione delle quattro variabili indipendenti necessarie, consistono in due prove a trazione ed una a taglio.

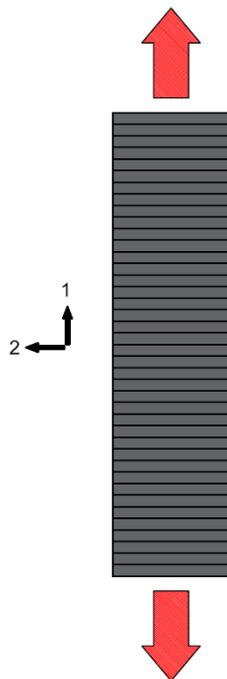
Le prove meccaniche svolte sono state:

- ❖ Prova a trazione del provino in PLA con fibre disposte lungo la direzione 1:



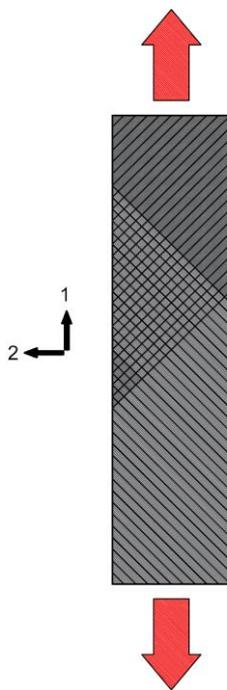
Per la determinazione del modulo di rigidezza in direzione 1 (E_1) e il coefficiente di Poisson ν_{12} ;

- ❖ Prova a trazione del provino in PLA con fibre disposte lungo la direzione 2:



Per la determinazione del modulo di rigidezza in direzione 2 (E_2);

- ❖ Prova a trazione del provino in PLA con fibre disposte a $\pm 45^\circ$ rispetto alla direzione 1:



Per la determinazione del modulo di taglio G_{12} .

2.3.3 Progettazione e stampaggio dei provini

Per i materiali polimerici la normativa di riferimento per le prove a trazione descrive provini ad osso di cane, ma a questi, si è scelta una tipologia avente sezione rettangolare costante. Infatti, uno dei problemi riscontrati nella costruzione di un provino ad osso di cane è la creazione di una zona raccordata iniziatrice di possibili zone di rottura e difetti strutturali. Il raccordo è dunque una zona di concentrazione degli stress a causa della metodologia di deposizione adottata e dalla rifinitura superficiale che si riesce a dare al prodotto stampato. Infatti, le fibre disposte nella sezione allargata del provino terminerebbero nel vuoto e non contribuirebbero al sostentamento del carico nella direzione delle fibre, se non per sforzi di taglio (trascurabili).

Un attento lavoro di studio dove si è variato il raggio di raccordo e le diverse tangenze nei punti critici, ha portato alla scelta risolutiva di optare per un provino avente sezione rettangolare costante ed immune alle sopracitate criticità. Eliminando quindi variabili che avrebbero potuto giocare un ruolo negativo nel processo di caratterizzazione che non avrebbero consentito l'esplorazione completa del comportamento meccanico. Si è fatto quindi riferimento alla normativa per i materiali compositi a trazione ASTM D3039. Parlando sempre della geometria del provino ma in particolare delle dimensioni, queste sono state leggermente modificate rispetto a quelle suggerite. La normativa impone uno spessore che possa garantire la presenza di un numero statisticamente alto di fibre; poiché però nel nostro caso le "fibre" sono filamenti caratterizzati da dimensioni maggiori rispetto alle dimensioni

classiche, spessore e larghezza sono stati incrementati. Per quel che invece riguarda la lunghezza del provino, questa non è stata modificata rispetto a quella consigliata. A completamento, è stato eseguito un lavoro di studio approfondito sulle caratteristiche dei tab. Appositi elementi per l'afferraggio del provino da parte delle macchine di prova, i tab, vengono incollati tramite resina epossidica esternamente ai capi del campione. Il loro scopo è ottenere una distribuzione quanto più possibile uniforme degli stress nella sezione utile ed evitare il danneggiamento del provino da parte degli afferraggi della macchina. Nella normativa ASTM 3039 non sono indicate delle dimensioni precise per questi elementi ma sono presenti solo delle raccomandazioni. Esistono però diversi studi sulle dimensioni ottimali dei tab, dove si correla la variazione di lunghezza, inclinazione e spessore del tab alle sue prestazioni.

Poiché era presente la necessità di determinare le dimensioni ottimali per quella che è la nostra tipologia di provino, si è eseguito uno studio analogo a quello sopra citato. È stata infatti eseguita un'analisi consistente in diversi test (run) con tab che assumevano determinate grandezze, inclinazioni e spessori e successivamente un'analisi statistica che cercava la correlazione tra i vari parametri e gli output.

L'output desiderato consisteva nella rottura del provino all'interno della sezione utile. Ovviamente questo sarebbe stato un indice della distribuzione uniforme degli stress. Ciò non è stato però sempre possibile, infatti per una categoria di provini si è dovuto deviare ed utilizzare come output la tensione massima. Il ragionamento è analogo poiché un provino che si rompe a una tensione maggiore implica una corretta ed uniforme distribuzione degli stress. Contro un provino che rompendosi a una tensione minore, indica una distribuzione degli sforzi interni non regolare. Infine, come già affermato dalle ricerche precedentemente riportate, si individua una correlazione fra proprietà meccaniche e parametri di stampa. Alla luce di ciò, i parametri definiti nella realizzazione dei provini usati per la determinazione delle proprietà meccaniche, sono stati mantenuti nella stampa dei provini impiegati per le prove di validazione, introdotte nei successivi capitoli.

Parametri di stampa adottati:

❖ Extrusion Multiplier	1,05
❖ Extrusion Width	0,50 mm
❖ Primary Layer Height	0.1 mm
❖ Outline/Perimeter Shells	0
❖ Interior Fill Percentage	100%
❖ Infill Extrusion Width	100%
❖ Internal Infill Angle Offsets	0° , 90° e ±45°
❖ Temperature Extruder	190 °C
❖ Temperature Layer	200 °C (first layer) 190 °C (others)
❖ Piano di stampa	30 °C
❖ Default Printing Speed	3000 mm/min

I sopracitati parametri non sono la totalità dei valori settati, ma danno un'idea delle più importanti proprietà rispettate per tutti i provini utilizzati. Fra queste, spicca per importanza la laminazione (Internal Infill Angle Offsets o Angolo di Raster).

2.4 Risultati ottenuti e determinazione della matrice di rigidezza

Le tre prove di trazione hanno permesso di ricavare quindi i seguenti moduli e grandezze:

$$\begin{array}{l|l} E_1 & 3008 \left[\frac{N}{mm^2} \right] \\ E_2 & 2876 \left[\frac{N}{mm^2} \right] \\ \nu_{12} & 0.2985 \\ G_{12} & 1230 \left[\frac{N}{mm^2} \right] \end{array}$$

Tabella 1 Grandezze ricavate dalla caratterizzazione del materiale

Questi dati confermano quindi l'anisotropia del provino stampato tramite FDM. Nell'ipotesi che il materiale si comporti in modo ortotropo, e segua la CLT, gli stessi saranno utilizzati per simulare le prove di validazione successive. Tali valori saranno quindi utilizzati nel modello ad elementi finiti costruito con Patran e costituiranno le proprietà del materiale 2D ortotropo con cui saranno costruiti i vari laminati necessari a simulare i test effettuati.

Come la CLT suggerisce, si ricava quindi la matrice a rigidezze ridotte caratterizzante il particolare filamento testato di PLA:

$$[Q] = \begin{bmatrix} 3272.0 & 908.8 & 0 \\ 908.8 & 3128.4 & 0 \\ 0 & 0 & 1230.0 \end{bmatrix}$$

Questi valori rappresentano le caratteristiche che il materiale possiede successivamente al suo stampaggio, ossia quindi dopo un procedimento di fusione, estrusione e deposizione. Verrà trattato in un capitolo a parte la determinazione delle caratteristiche del PLA nella sua forma isotropa precedente al processo di Fused Deposition Modeling.

Per misurare spostamenti e deformazioni da cui si sono ottenuti i dati precedenti, si è usata la tecnica chiamata Digital Image Correlation (DIC). Questa tecnica consiste nell'eseguire un video della prova e utilizzare uno specifico algoritmo (software) per collegare gli spostamenti dei singoli pixel con gli spostamenti reali del provino.

La Digital Image Correlation è stata applicata in modo tale da evitare fenomeni di irrigidimento localizzato dati dall'estensimetro; irrigidimento che non è trascurabile su un provino polimerico. Questo fenomeno che si è infatti già registrato e studiato precedentemente, dipende da una relazione incrociata fra dimensioni dell'estensimetro e del provino e influisce nell'ordine del 5-7% sulla rigidezza del campione.

L'utilizzo della DIC potrebbe corrispondere all'idea di avere un numero notevolmente alto di estensimetri posti sulla superficie del provino. Volendo meglio spiegare l'affermazione precedente, questa tecnologia, non misura lo spostamento in un solo punto ma in tutta l'area di interesse (denominata: "Region Of Interest" o semplicemente ROI) inquadrata dalla fotocamera. Questo permette di misurare la reale distribuzione degli spostamenti, da cui si

ricavano deformazioni e tensioni. Le complicazioni della Digital Image Correlation sono legate all'area della superficie che si vuole correlare: questa non deve essere troppo piccola o eccessivamente estesa per tutta la larghezza della area ripresa, in modo da non incorrere in problemi di distorsione focale prodotto dall'obiettivo. Ulteriori complicazioni possono risiedere nell'eventuale spostamento fuori dal piano dell'oggetto inquadrato. L'uso dell'estensimetro è stato evitato sia per il già espresso motivo legato all'irrigidimento del provino, sia per semplicità di utilizzo. Infatti, sarebbero richiesti più estensimetri per misurare l'allungamento nelle due direzioni e determinare il Poisson con un'unica prova, mentre con la DIC ciò è facilmente conseguibile in una sola ripresa. Allo stesso modo, non si sono considerate altre tecnologie di misurazioni che avrebbero potuto in qualche modo, incidere, danneggiare o irrigidire il provino anche solo localmente.

In ottica dell'uso della Digital Image Correlation per l'acquisizione dei dati di diversi test sperimentali svolti in questo lavoro di tesi, il capitolo seguente ha lo scopo di descriverla in maniera approfondita e studiarne le criticità.

3 Digital Image Correlation (DIC)

Esistono diverse tipologie di implementazione per questa tecnologia. Quello che si è attuato è un semplice sistema DIC-2D, svolto quindi con un solo obiettivo, con l'intento di catturare spostamenti e deformazioni durante prove di semplice trazione e di flessione-torsione di una trave incastrata.

Per applicare questa tecnica, come prima cosa si esegue un video, o in alternativa molteplici scatti, al campione durante l'esecuzione della prova. Lo spostamento o deformazione che si intende registrare sull'oggetto deve interessare un piano parallelo a quello focale della telecamera utilizzata. Questo poiché l'obiettivo deve rimanere, durante l'intera durata della prova, immobile ed a una distanza prefissata dal provino, in modo da poter correlare efficacemente e univocamente ogni pixel dell'inquadratura e misurare il solo spostamento interessato. Va assolutamente evitato ogni traslazione dell'obiettivo o movimento del provino perpendicolare al piano di inquadratura, che potrebbe cambiare le distanze e quindi invalidare le misurazioni della prova. Una volta eseguito il video, i frame vengono estratti ed esaminati da un software opensource apposito per la DIC chiamato NCORR, che funziona attraverso il programma Matlab.

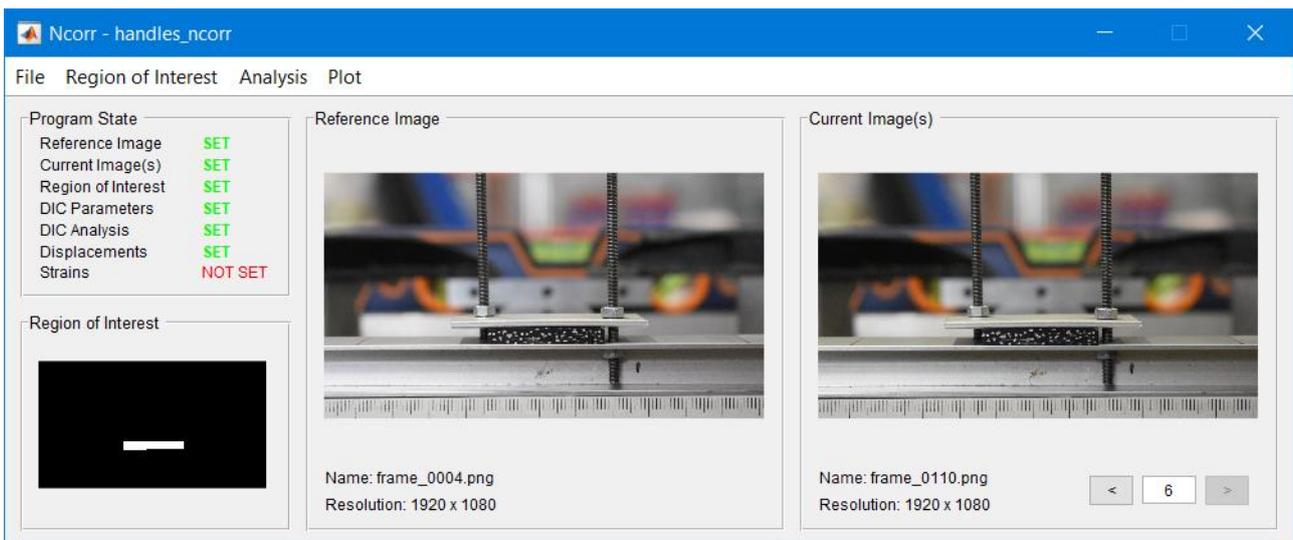


Figura 14 Schermata di lavoro di NCORR su Matlab

Questo ha bisogno di una immagine di riferimento a cui correlare i consecutivi spostamenti, e successivamente necessita degli ulteriori frame sui quali si vuole effettuare l'analisi. Per eseguire la DIC il software crea una rete di punti sulla superficie scelta per l'analisi, a cui associa un valore in base alla localizzazione di questi all'interno dell'immagine. Di questi punti verrà tracciato lo spostamento nei vari frame forniti per l'elaborazione dei dati.

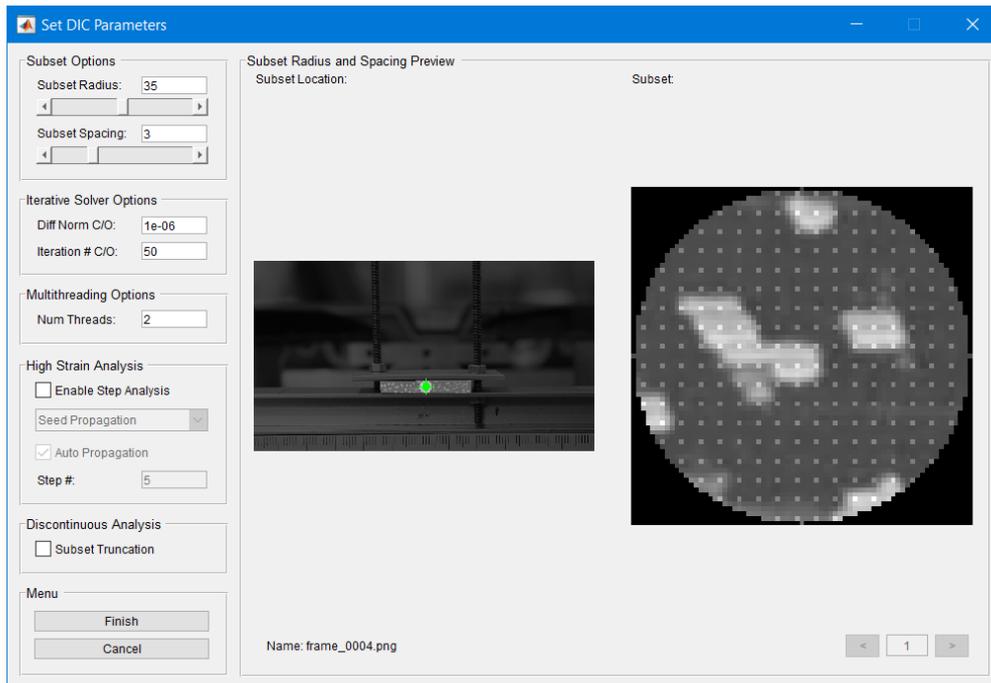


Figura 15 Rappresentazione della rete creata da NCORR sulla superficie analizzata con l'analisi DIC

Una volta che l'analisi sugli spostamenti è conclusa, si esegue una calibrazione per poter convertire lo spostamento in pixel in uno in millimetri. Successivamente lo spostamento di ogni singolo punto della rete creata e facente parte dell'area esaminata dalla DIC viene registrato all'interno di matrici. In questo modo i dati sono pronti ad essere processati attraverso Matlab o altri software nel metodo che più si aggrada. NCORR fornisce anche una rappresentazione grafica degli spostamenti, attraverso gradazioni di colore, in modo da apprezzarne visivamente l'entità e valore in fase preliminare e poter esplicitare la corretta, o meno, esecuzione dell'analisi.

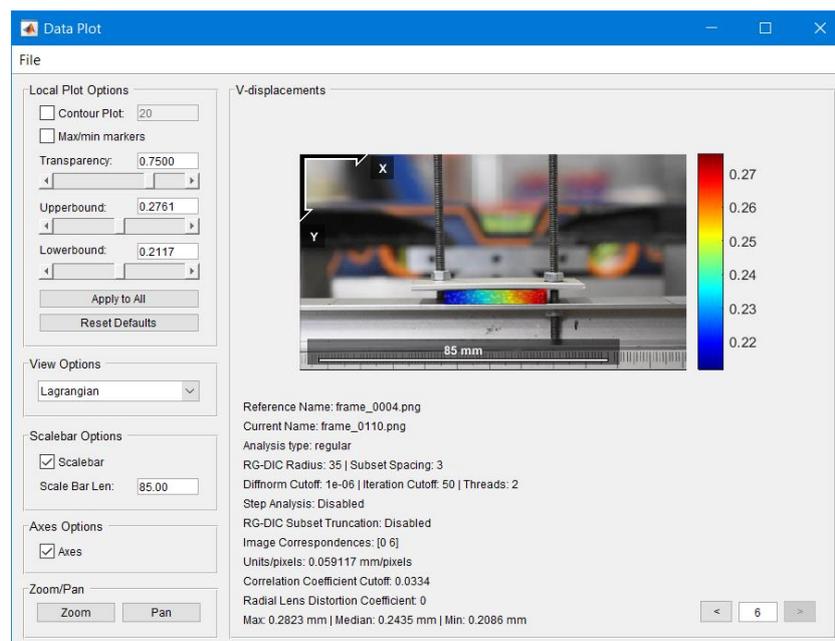


Figura 16 Visualizzazione grafica degli spostamenti su NCORR

Per ottenere delle misurazioni efficaci con l'utilizzo della Digital Image Correlation, si sono eseguiti diversi test, in modo da giungere a una validazione della tecnica.

3.1 Prove a validazione della DIC

La DIC è una tecnica comoda e molto efficace ma è necessario rispettare diverse indicazioni per poterne sfruttare a pieno le potenzialità. Nei prossimi paragrafi saranno esposti accorgimenti e prove doverose per assicurarsi del corretto funzionamento di questa tecnologia.

3.1.1 Effetto del coefficiente di distorsione

Oltre a una necessaria precisione ed accuratezza nel preparare il set-up per questa tecnologia, è fondamentale chiarirne alcuni aspetti per una corretta interpretazione dei dati che ci fornisce. Quando si fa affidamento su tale tecnologia, è bene quindi conoscere e fare il possibile per evitare qualsiasi fenomeno che possa in qualche modo andare ad influire negativamente sulla rilevazione dei dati, invalidandoli. Il fenomeno della distorsione ottica è quello che più preoccupa chiunque utilizzi la DIC per ottenere misurazioni che di natura devono essere il più precise possibile.

La distorsione ottica è un difetto che mostra gli oggetti in direzione diversa da quella in cui realmente si trovano, ne esistono di due tipi: a cuscino e a barile, a seconda della curva concava o convessa che può assumere l'immagine distorta.

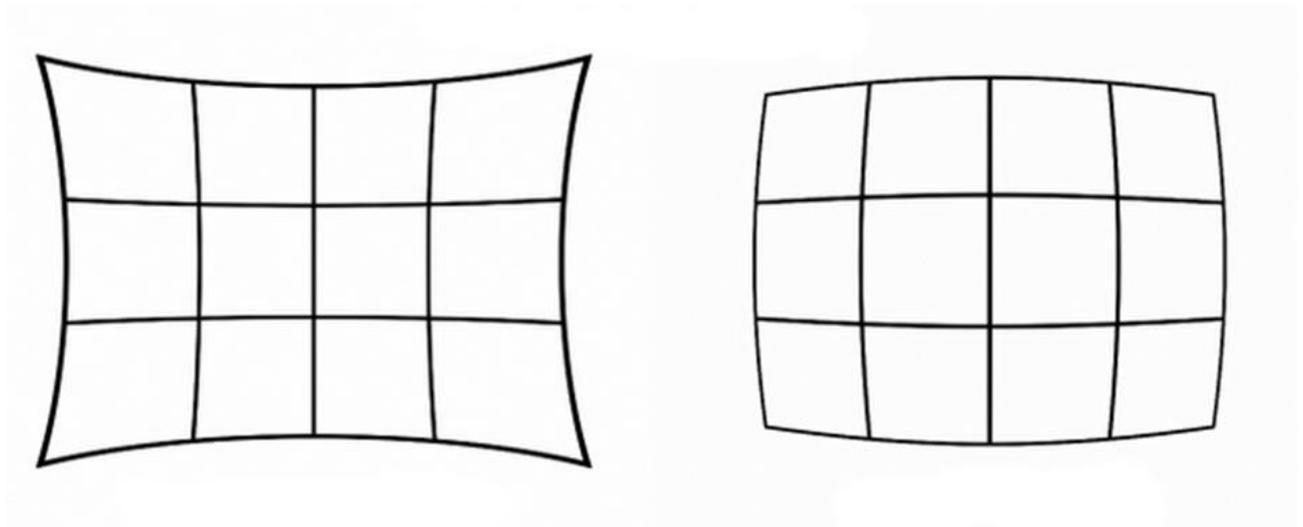


Figura 17 Da sinistra a destra rispettivamente distorsione a cuscino ed a barile.

La distorsione ottica si verifica nel momento in cui ai punti del piano oggetto costituenti una certa figura corrispondono immagini che non costituiscono una figura simile (14).

Questo fenomeno è dovuto in buona parte al fatto che le superfici esterne delle lenti sono curve o sferiche. Risulta quindi assai dannoso nelle applicazioni fotogrammetriche: esso

però, essendo legato a fatti geometrici noti, può essere preventivamente studiato e se ne può spesso tenere conto in sede di restituzione correggendo così i risultati ottenuti. A tale proposito, si è in primo luogo svolto un lavoro di ricerca sull'obiettivo usato per questo lavoro di tesi, e sulle sue caratteristiche.

L'obiettivo è un: "Nikon 18-55mm f/3.5-5.6G DX VR AF-P" ed il suo sistema ottico è composto da 12 lenti di cui 2 asferiche ed assemblate in 9 gruppi come in Figura 18:

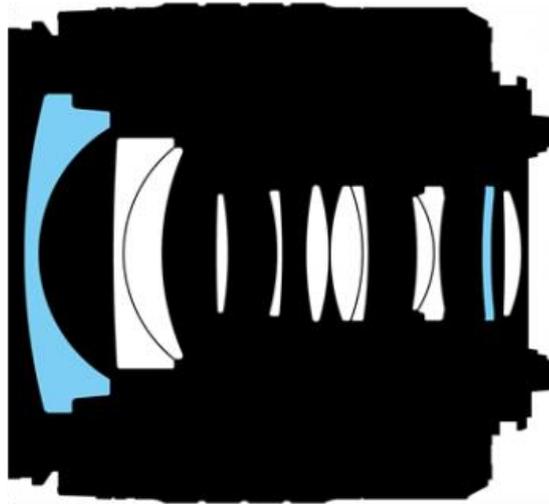


Figura 18 Sistema ottico dell'obiettivo utilizzato

Le lenti al suo interno quindi variano nel range da 18 a 55 mm avendo diverse curvature e per ognuna diversi range di apertura col quale possono mettere a fuoco un oggetto. Ognuna di queste lenti può avere un più o meno intenso effetto distorsivo dell'immagine facente parte di una delle due categorie sopra citate.

Un articolo di recensione di questo particolare obiettivo svolto da Václav Bacovský (15) quantifica la distorsione per ognuna di esse. Usando il 18 mm ci sarebbe una distorsione di tipo a barile del 4,3%, difetto che si abbasserebbe al 3,0% con la lente da 24 mm. Mentre con quella da 55 mm comparirebbe l'effetto opposto, a cuscino.

Quello che però è importante per questo lavoro è che viene riscontrata una totale assenza di distorsione ottica ai 35 mm e nel suo intorno, producendo quindi un'immagine completamente priva di questo difetto. Un'affermazione del genere è rilevante e ci permetterebbe di non dover ricorrere a sistemi software di correzione automatica modicamente precisi che comporterebbero una involontaria alterazione dell'immagine su cui effettuare la misurazione.

3.1.2 Test di rilevamento della traslazione

A valle di tali considerazioni, si è ricercata un'ulteriore dimostrazione della possibile assenza di distorsione ottica e per questo si è ideato un test in laboratorio che potesse confermare o smentire l'assenza di questo fenomeno.

La prova realizzata consiste nell'impiegare la macchina, che sarà in seguito utilizzata per dei test di trazione, per far traslare un oggetto, dedurne spostamento e velocità con la DIC e confrontarle con quelli reali noti.

L'oggetto è stato realizzato appositamente con la stampante 3D ed è composto di una faccia che rimane sempre parallela al piano focale durante tutta la traslazione. Tale movimento avviene verticalmente, dal punto più basso al più alto dell'inquadratura ad una velocità costante di 10 mm/min.



Figura 19, 18 Configurazione del test di traslazione.

Analizzando i dati della DIC riportanti gli spostamenti e sapendo che il campionamento è stato svolto a cinque frame per secondo, si è potuto delineare il seguente grafico:

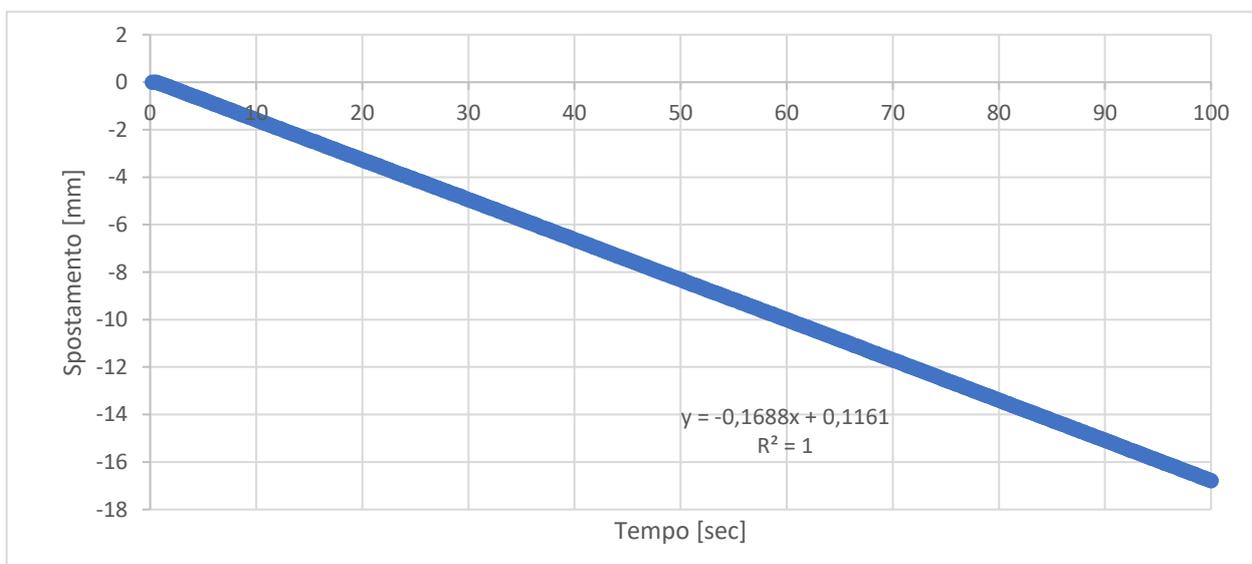


Figura 20 Andamento spostamento nel tempo ricavato dall'analisi DIC di traslazione

Eseguendo una regressione lineare fra i singoli punti di rilevazione della DIC si ottiene prova della perfetta linearità del campionamento delle posizioni. Questa indica di per sé la corretta esecuzione del test e l'assenza di una distorsione agli estremi. Derivando la retta di regressione lineare, interpolante tutti i punti del nostro grafico e passando da millimetri al secondo a mm/min si ottiene l'esatto valore della velocità imposta alla macchina per la traslazione, ossia 10 mm/min.

Il medesimo valore è ricavabile dalle misure ottenute tramite DIC, ottenendo le velocità puntuali e ponendole su un grafico in relazione alla posizione istantanea:

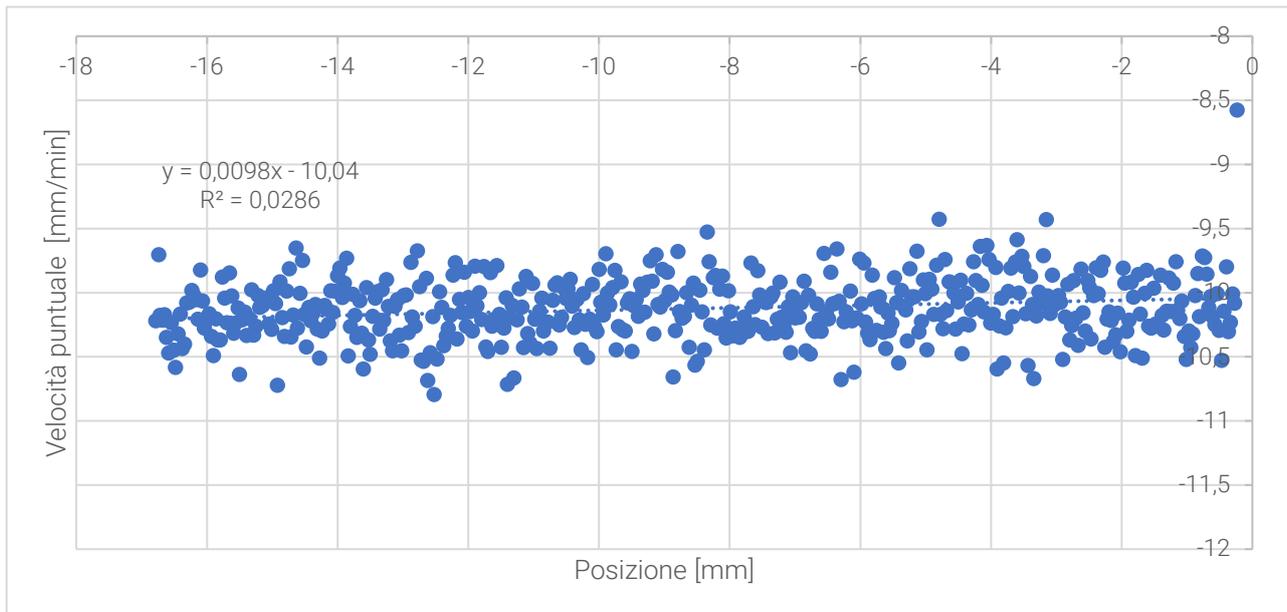


Figura 21 Nuvola delle velocità puntuali ricavate dall'analisi DIC di traslazione

In tutto ciò non si è ovviamente trascurato il più semplice test attuabile, ossia la cattura di un'immagine di una griglia perfetta, e il confronto di questa immagine con la griglia originale. La positività di questo ulteriore test ha quindi portato a l'affermare un'assenza del fenomeno di distorsione ottica nel set-up impiegato per la lettura degli spostamenti.

4 Prova di trazione sul filamento di PLA

Procedendo verso questo primo test sperimentale è necessario richiamare, col seguente paragrafo, obiettivi e metodologie applicate che giustifichino la scelta ed esecuzione delle prove trattate in questo capitolo e nei successivi.

4.1 Processi e test effettuati per il raggiungimento degli obiettivi

Per la conferma dei valori della matrice di rigidità ottenuta precedentemente si è scelto di effettuare delle prove di validazione che si potessero distanziare da quelle svolte secondo le normative di riferimento per la caratterizzazione del materiale. La differenza con queste prove si è ricercata in due modi: in primo luogo l'obiettivo era distanziarsi nella creazione del modello dell'oggetto esaminato, ossia allontanarsi dalle forme classiche di un provino e raggiungere quello che poteva definirsi più un componente di una ipotetica struttura; in secondo luogo si è voluto diversificare la modalità di caricamento dell'oggetto, in modo tale da poter stressare la struttura in maniera più elaborata di una semplice compressione o trazione.

Le prove che sono state proposte per questo scopo sono:

- ❖ Prova di flessione su tre punti;
- ❖ Prova di flessione torsione su campioni di forme differenti.

Inoltre, si è eseguita una prova di trazione su un filamento di PLA con l'intenzione di caratterizzare le proprietà meccaniche del materiale grezzo prima del processo di stampaggio. Questo test è importante al fine di ottenere dei termini di paragone col materiale dopo il processo di fusione-estrusione e deposizione tipico dell'Additive Manufacturing, e poter avere una misura di quanto possano cambiare le rigidità, che sia questo un incremento o flessione di tali proprietà.

Le prove sopra elencate sono state riprodotte fedelmente con un modello agli elementi finiti utilizzando il software per analisi strutturali MSC Patran & Nastran. Questi modelli sfruttano i dati ricavati dalle prove di caratterizzazione antecedenti questo lavoro e li implementano nelle proprietà fornite ai materiali. È fondamentale che il modello FEM possa essere il più vicino possibile a quella che è l'esecuzione del test originale, in modo tale da poter ottenere degli errori minimi. Infatti, per poter dichiarare la validità della rappresentazione del reale da parte del modello agli elementi finiti, è stato ritenuto adeguato che l'errore rispetto ai risultati ottenuti nello sperimentale non sia eccedente il 10%.

Per concludere, si sottolinea l'utilizzo di due diversi filamenti di PLA. Aventi ambedue lo stesso marchio, fornitore e la medesima tipologia, questi differiscono solo per il lotto di produzione della bobina stessa. Da adesso in avanti, si farà riferimento ai due diversi lotti come:

- ❖ Filamento A;
- ❖ Filamento B;

Questa distinzione ci permette di eseguire un piccolo studio sulla variabilità delle caratteristiche meccaniche dei diversi lotti in analisi e ha la principale funzione di distinguere con quale filamento di PLA si sono stampati i provini delle diverse prove di validazione.

Riassumendo, utilizzando il Filamento A si è provveduto a stampare i provini per le seguenti prove:

- ❖ Prove di caratterizzazione meccanica del filamento:
 - Due prove a trazione;
 - Prova a taglio.
- ❖ Test di trazione sul filamento;
- ❖ Prova di flessione su tre punti.

Mentre, grazie al Filamento B si sono potute attuare:

- ❖ Ulteriore test di trazione sul filamento
- ❖ Prova di flessione-torsione.

Ognuno dei sopracitati test, affrontati e sviluppati singolarmente da qui in avanti, evidenzierà le eventuali differenze fra i due lotti di PLA e ne trarrà le relative conclusioni.

4.2 Introduzione alla prova di trazione sul filamento

La prova di trazione sul filamento di PLA è stata eseguita anticipatamente ad i test di validazione con l'intento di verificare le proprietà meccaniche del filamento prima che questo venga sottoposto al processo di stampaggio. Essere a conoscenza delle caratteristiche proprie del filamento di apporto è utile per avere un quadro completo del prodotto utilizzato, per facilitare eventuali lavori futuri e per avere una base di confronto con il prodotto finito.

Il filamento è stato sottoposto ad una prova di trazione, prendendo esempio dalla normativa ASTM A931-18 "Standard Test Method for Tension Testing of Wire Ropes and Strand" per il calcolo della sigma massima e, sequenzialmente, il modulo di rigidità nella direzione di trazione.

Le prove sono state eseguite con macchinario

- ❖ Macchina elettromeccanica di trazione MTS QTEST Elite.

I risultati ottenuti da questo test saranno alla base della creazione di due modelli FEM isotropi, Filamento A e B, i quali risultati saranno confrontati con quelli ricavati dal modello ad elementi finiti ortotropo. Entrambe le configurazioni saranno confrontate con i risultati sperimentali delle prove di validazione trattate successivamente e si osserverà quale otterrà gli errori minori.

La scommessa che si vuole portare avanti vede il modello isotropo ottenere i risultati più lontani dallo sperimentale, dimostrando l'anisotropia dell'oggetto finito e l'inadeguatezza delle caratteristiche meccaniche del PLA grezzo per la previsione del comportamento meccanico dell'oggetto finito. Comprovando come la fusione, l'estrusione e la deposizione del processo

di Fused Deposition Modeling inducano una variazione delle proprietà meccaniche e validando il modello ortotropo.

La prova sul filamento è stata svolta affidandosi a diverse configurazioni. In primo luogo, è stato imposto un certo raggio di curvatura nelle prossimità dell'incastro, per non incorrere in zone con accumulo di tensione che possano portare ad una non corretta esecuzione della prova di trazione. Per farlo si sono utilizzati degli afferraggi particolari comprendenti di due dischi aventi diametro 12 cm. Segue foto:



Figura 22 Prima configurazione del test di trazione su filamento in PLA

Con questa tipologia di afferraggio, ideata e realizzata in e per questo lavoro di tesi, sono state eseguite più prove con un numero di avvolgimenti diversi. Questa configurazione è quella che ha permesso la migliore distribuzione di tensione all'interno del filo e ha fatto registrare i valori di carico massimo proprio del filamento.

Una volta trovato il carico massimo si è impostato un diverso modello di afferraggio, tale da poter rendere facile la misura del tratto di lunghezza iniziale L_0 e ricavare quindi il modulo di rigidezza (Figura 23).

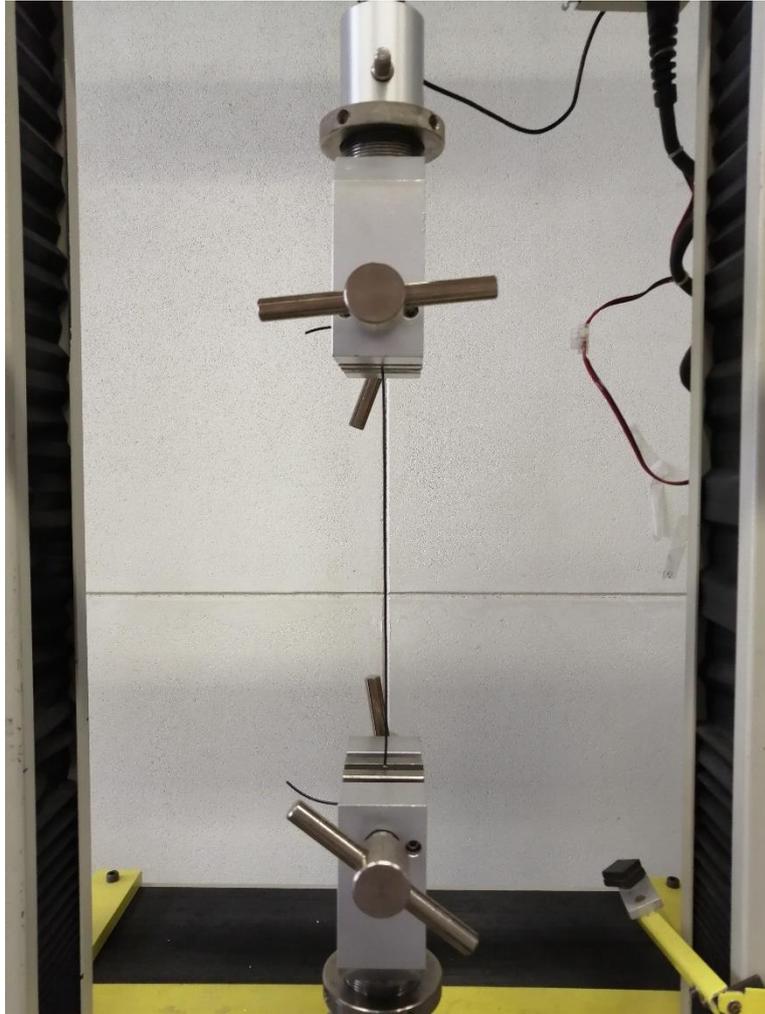


Figura 23 Seconda configurazione del test di trazione su filamento in PLA

La necessità di dover ideare anche questa seconda configurazione di afferraggio (descritta più approfonditamente nei paragrafi seguenti) risiede nell'incertezza sul determinare la lunghezza del filamento sottoposta unicamente a uno stato di tensione semplice e costante, utile per valutare correttamente la deformazione assiale e, quindi, il modulo di rigidità.

4.3 Determinazione del carico massimo sopportabile dal filamento

In questa prima fase, come già detto, si è ricercata una distribuzione delle tensioni all'interno del filamento quanto più possibile uniforme, in modo da poter ottenerne il carico massimo sopportabile e indagare sulla regione a comportamento plastico del materiale e sul comportamento a rottura. Il tutto ricercando una configurazione della prova il più possibile simile a quanto affermato nella normativa. Da questo specifico test si vuole ottenere una curva carico/spostamento il più possibile pulita e rappresentativa delle proprietà meccaniche del filamento, in modo da usarla come metro di paragone per le prove sul filamento successive da cui si ricaveranno i moduli di elasticità.

Data la conformazione del set-up di prova realizzato, in una prima fase di studio si è ricercata la determinazione del numero corretto di avvolgimenti attorno ad ogni cilindro che potessero garantire il migliore risultato. Si è partiti da un numero di due avvolgimenti per cilindro e si è sceso fino a zero.

Seguono le immagini illustrative del concetto del numero di avvolgimenti:

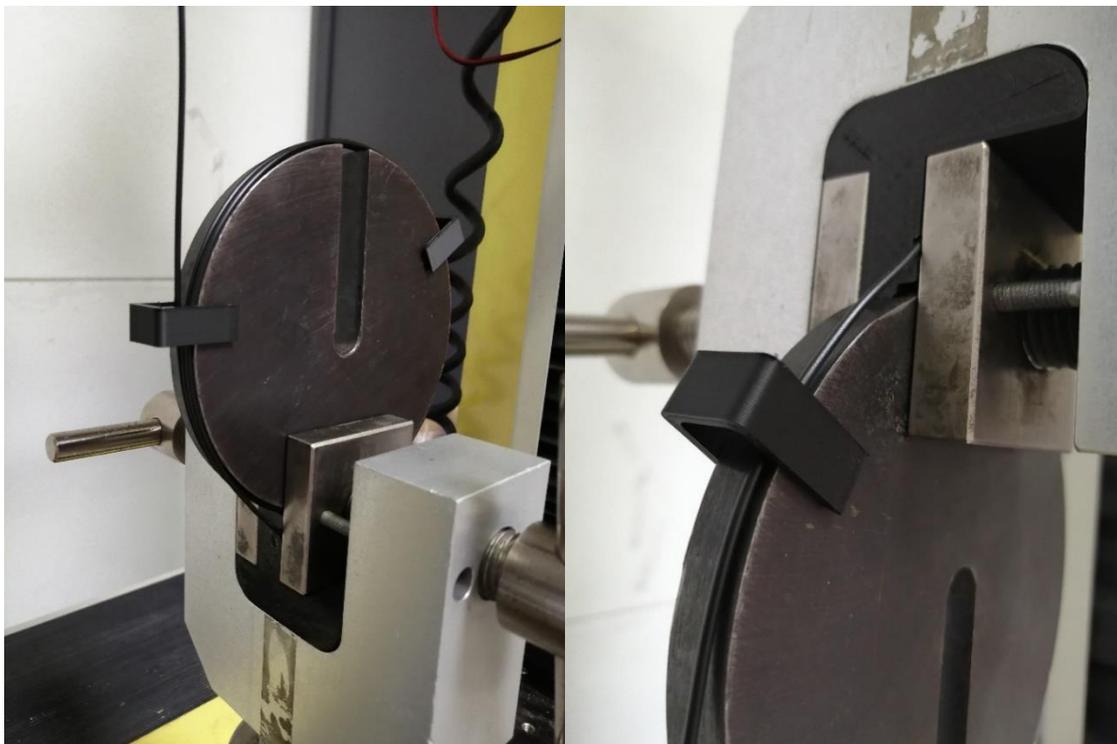


Figura 24 Configurazione con più avvolgimenti

Figura 25 Configurazione con zero avvolgimenti

Successivamente è stato riscontrato che la configurazione con uno o più avvolgimenti non permettesse una corretta esecuzione della prova. Nel grafico carico spostamento imposto dalla macchina di prova si notano diversi balzi, dovuti a continui slittamenti del filo sul cilindro all'aumentare del carico:

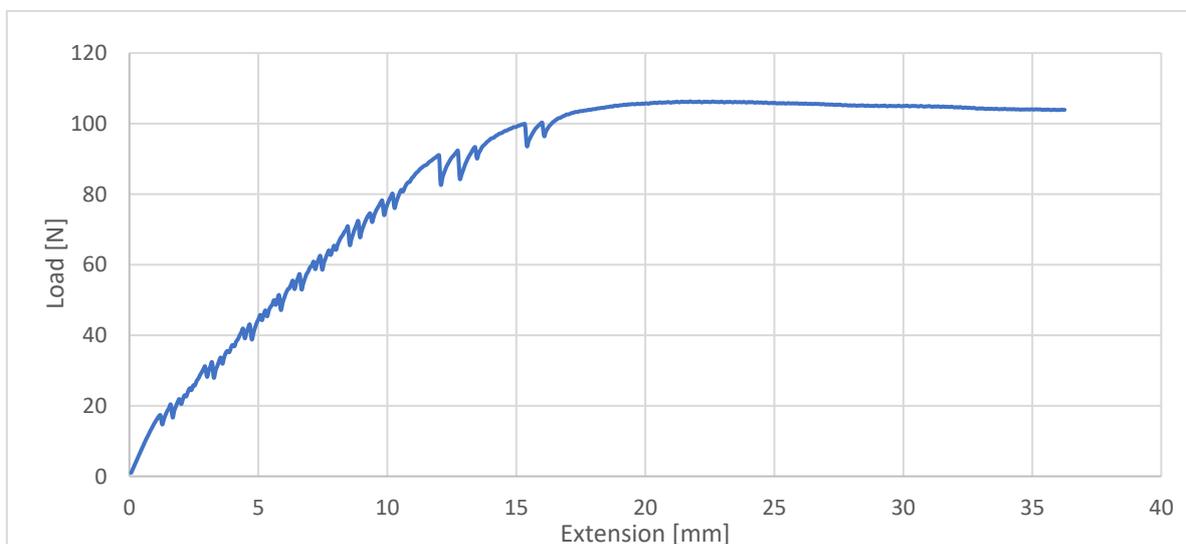


Figura 26 Andamento carico/spostamento nella configurazione con due avvolgimenti

La configurazione a zero avvolgimenti invece si è riscontrata vincente, poiché ha permesso un caricamento graduale del carico, una ottima distribuzione di tensione che ha fornito i più alti valori del carico applicato, ha escluso gli slittamenti e non ha indotto nessuna zona di strizione al filo nella zona di incastro. Il tutto consentendo una rottura del filamento nel tratto utile.

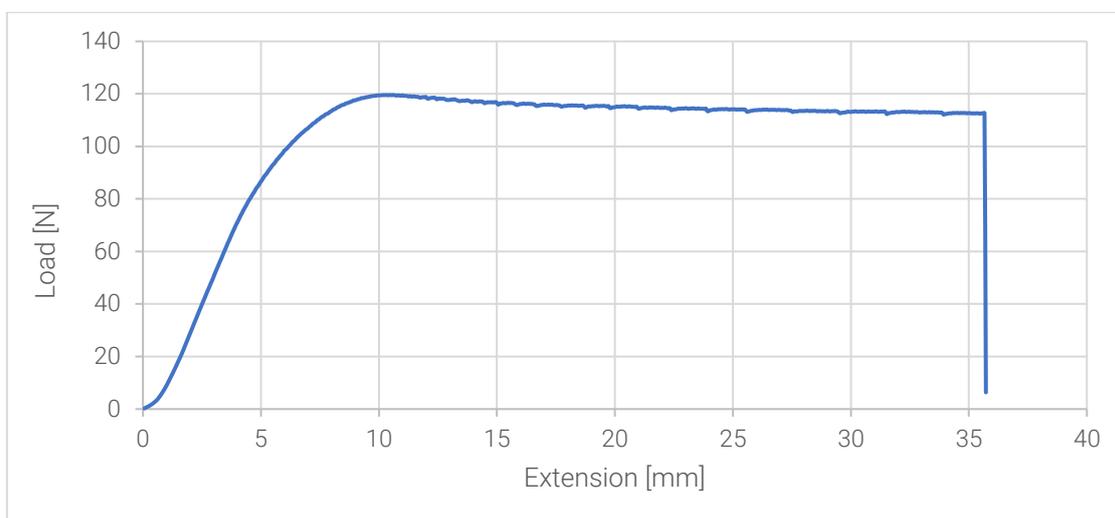


Figura 27 Andamento carico/spostamento nella configurazione con zero avvolgimenti

Come si può vedere il grafico è caratterizzato da un tratto iniziale, corrispondente alla fase di allineamento del filamento alla direzione di applicazione del carico, un tratto lineare e un ampio tratto plastico di deformazione a carico quasi costante che viene interrotto dalla rottura del provino.

Dalle prove di trazione sul filo effettuate con la configurazione a zero avvolgimenti si sono quindi ricavati:

- ❖ Massimo carico sopportato P_{max} [N];
- ❖ Tensione massima raggiunta σ_{max} [N/mm²].

Nella seguenti tabelle sono riportate queste due grandezze in riferimento al diametro del filamento, misurato all'inizio di ogni prova.

Filamento A

N. Provino	d [mm] (diametro)	P_{max} [N]	σ_{max} [N/mm ²]
1	1.60	117.311	58.3457
2	1.60	120.387	59.87558
3	1.60	117.11	58.24574
4	1.60	117.723	58.55062
5	1.60	115.361	57.37585

MEDIA	117.5784	58.4787
-------	----------	---------

Tabella 2 Risultati test trazione per il Filamento A (prima configurazione)

Filamento B

N. Provino	d [mm] (diametro)	P_{max} [N]	σ_{max} [N/mm ²]
1	1.60	120.331	59.84773
2	1.60	122.052	60.70368
3	1.60	120.206	59.78556
4	1.60	125.457	62.39719
5	1.60	124.57	61.95604
MEDIA		122.5232	60.93804

Tabella 3 Risultati test trazione per il Filamento B (prima configurazione)

Questi dati saranno confrontati con quelli ottenuti con la seconda configurazione di afferraggi, affrontata nel paragrafo successivo. Quest'ultima, utile per rendere possibile una corretta misurazione della lunghezza iniziale L_0 e quindi ottenere il modulo di elasticità, produrrà anch'essa dati riguardanti il massimo carico e tensione massima del filamento. Una corrispondenza adeguata dei suddetti valori potrà far assumere la bontà del vincolo creato dall'afferraggio stesso.

4.4 Determinazione del modulo di rigidezza del filamento

Per questa fase si è quindi cambiato il tipo di afferraggio. Esso è stato progettato in modo da garantire comunque un certo raggio di curvatura, e allo stesso tempo creare un incastro più netto. Ciò ha permesso una facile misurazione del tratto di lunghezza iniziale L_0 , fondamentale per poter ricavare il modulo di Young del materiale. Questo dato permetterà un di attuare un confronto diretto con i moduli di rigidezza ricavati delle prove di caratterizzazione del materiale e constatarne eventuali differenze.

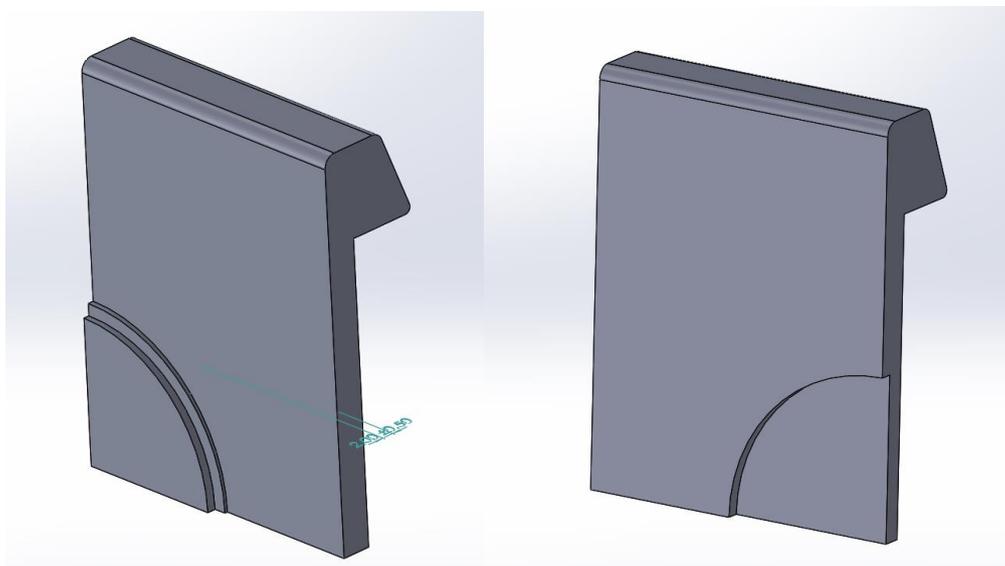


Figura 28 e Figura 29 Afferraggio per la determinazione del Modulo di rigidezza del filamento Lato A (s_x) e lato B (d_x)

Tali afferraggi, sono stati ideati sfruttando degli spazi naturalmente presenti nelle ganasce della macchina per prove a trazione utilizzata. Realizzati in PLA tramite FDM, possiedono un raggio di curvatura con un profilo inclinato utile per imporre un incastro non netto ma graduale e scongiurare di conseguenza zone di accumulo di tensione.

Durante lo svolgimento di questa fase è di principale interesse la caratterizzazione del tratto lineare elastico della curva e difatti, non è importante il prolungamento della prova fino a rottura. La rottura del filamento infatti, come è possibile vedere dai grafici del paragrafo precedente, sopraggiunge dopo un lungo tratto di deformazione plastica. Pertanto, si ritiene soddisfacente e adatto interrompere la prova di trazione quando, dopo il tratto lineare, si registrano le forze e tensioni massime sopportate dal provino e comincia il calo delle prestazioni caratteristico del campo plastico.

Con questa configurazione di afferraggi si sono eseguite un totale di ventidue prove di cui dieci col Filamento A e le restanti con il Filamento B.

Per ognuna di queste prove di trazione si sono preventivamente misurati:

- ❖ Lunghezza iniziale del filamento: L_0 [mm];
- ❖ Diametro iniziale del filamento: d [mm];
- ❖ Precarico iniziale al filamento: P_0 [N];

e successivamente si sono ricavati:

- ❖ Massimo carico sopportato: P_{max} [N];
- ❖ Tensione massima raggiunta: σ_{max} [N/mm²];
- ❖ Modulo di Young: E [N/mm²].

4.4.1 Procedura per lo svolgimento della prova

Per la corretta misurazione delle grandezze sopra riportate, si è seguita una prestabilita procedura:

- ❖ In primo luogo, il filamento è stato fissato all'afferraggio, facendo attenzione di rispettare la curvatura propria del filamento stesso (curvatura dovuta allo stockaggio del PLA in avvolgimenti);
- ❖ successivamente, per poter avere una misurazione della lunghezza iniziale del tratto testato, si procede a sollevare la traversa superiore della macchina di trazione fino ad aver ottenuto una disposizione del filamento perfettamente verticale, ottenuta con un precarico impostato su ogni filamento di **20 [N]**. Il precarico imposto sarà successivamente addizionato al massimo carico rilevato dalla macchina di prova durante il test di trazione.
- ❖ A questo punto si è misurata la lunghezza iniziale L_0 . Il diametro d invece era già stato registrato prima dell'inizio di ogni test.
- ❖ Infine, si azzerano i parametri della macchina di prova quali lo spostamento della traversa e il valore registrato dalla cella di carico e si dà inizio alla prova di trazione.

4.4.2 Tabelle, grafici e risultati acquisiti

I dati misurati e ricavati dalle prove di trazione del filamento con questo particolare tipo di afferraggi, sono riportati nelle tabelle sottostanti per entrambi i lotti del PLA:

Filamento A

N. Provino	L_0 [mm]	d [mm] (diametro)	P_0 [N]	P_{max} [N]	σ_{max} $\left[\frac{N}{mm^2}\right]$	E $\left[\frac{N}{mm^2}\right]$
1	226	1.60	20	116.65	58.02	2884.80
2	224	1.60	20	116.12	57.75	2843.93
3	219	1.60	20	116.79	58.09	3317.84
4	218	1.60	20	118.42	58.90	3567.39
5	220	1.60	20	117.66	58.52	3324.19
6	219	1.60	20	117.53	58.45	2986.12
7	220	1.60	20	117.09	58.23	2934.14
8	222	1.60	20	114.77	57.08	3037.96
9	220	1.60	20	119.97	59.67	3331.09
10	212	1.60	20	119.51	59.44	3093.45

MEDIA	117.45	58.41	3132.09
--------------	---------------	--------------	----------------

Tabella 4 Risultati test trazione per il Filamento A (seconda configurazione)

Filamento B

N. Provino	L_0 [mm]	d [mm] (diametro)	P_0 [N]	P_{max} [N]	σ_{max} $\left[\frac{N}{mm^2}\right]$	E $\left[\frac{N}{mm^2}\right]$
1	198	1.60	20	113.23	56.32	3157.18
2	200	1.60	20	115.15	57.27	2924.49
3	202	1.60	20	116.30	57.84	3066.01
4	202	1.60	20	119.26	59.32	2921.01
5	204	1.60	20	116.55	57.96	3279.32
6	207	1.60	20	117.44	58.41	3108.09
7	208	1.60	20	121.41	60.38	3262.58
8	210	1.60	20	119.26	59.32	2922.79
9	214	1.60	20	118.20	58.79	3025.09
10	216	1.60	20	119.27	59.32	3000.56
11	220	1.60	20	108.30	53.86	2776.79
12	223	1.60	20	120.45	59.91	3424.76

MEDIA	117.07	58.22	3072.39
--------------	---------------	--------------	----------------

Tabella 5 Risultati test trazione per il Filamento B (seconda configurazione)

Confrontando questi valori di carico e tensione massima con quelli delle fase precedente con zero avvolgimenti e per entrambi i filamenti, si nota come l'errore medio sia dell' ordine dell' 0.1% per il Filamento A e del 4% per il Filamento B. La differenza fra le due differenti tipologie di afferraggio è quindi molto bassa e dimostra come la seconda configurazione impostata possa garantire una ottima distribuzione delle tensioni interne del materiale nel filamento e assicurare l'ottenimento di risultati più sicuri.

Seguono i grafici tensione/deformazione per di diversi tratti di PLA grezzo testati e raggruppati secondo i due differenti lotti di filamento:

Filamento A

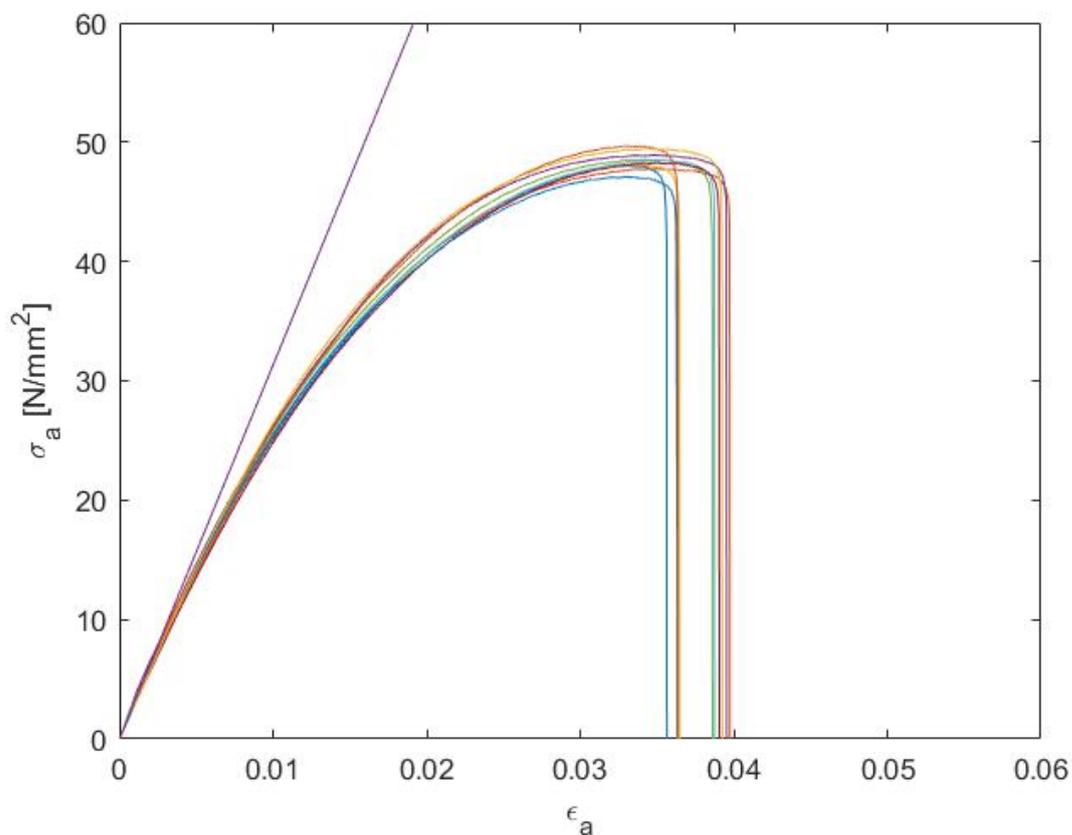


Figura 30 Curve tensione/deformazione per il Filamento A

Filamento B

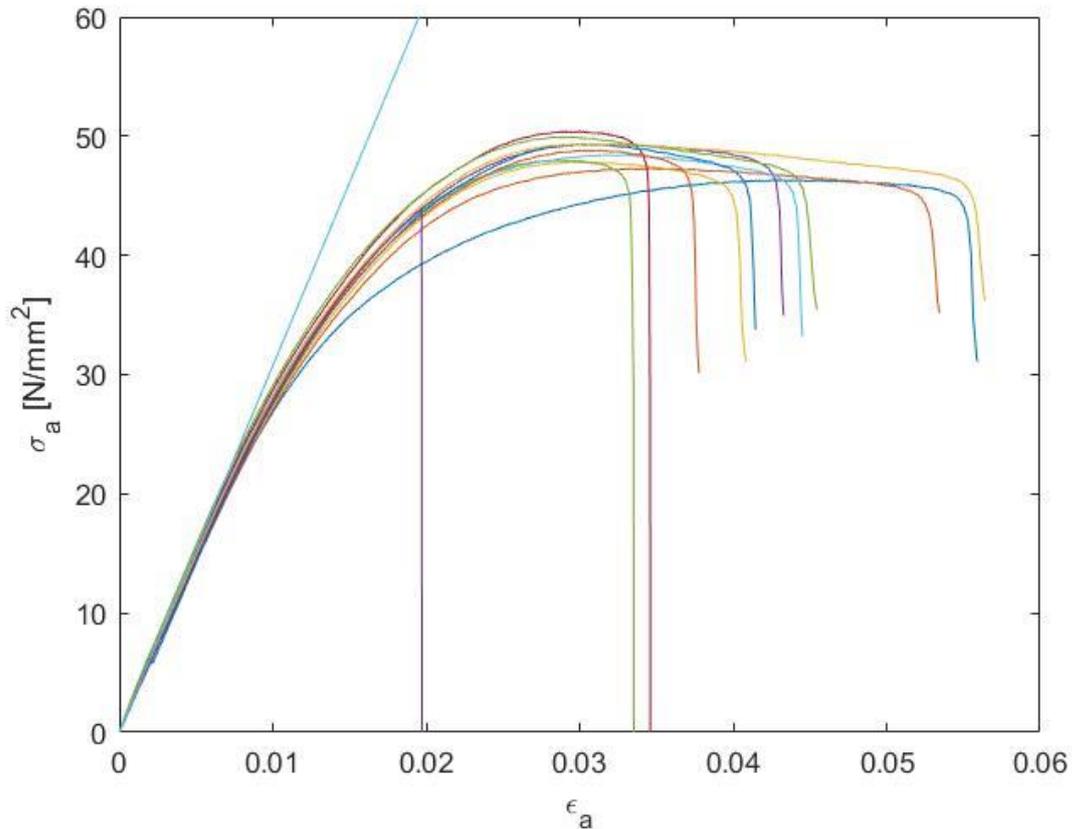


Figura 31 Curve tensione/deformazione per il Filamento B

Per ognuno di questi si è scelto il primo tratto lineare per il calcolo del modulo elastico, si nota l'assenza di scatti e ribassamenti improvvisi nelle curve, segno di un corretta messa in tensione graduale del filamento.

4.5 Analisi dei dati

In prima approssimazione si possono confrontare i moduli di rigidezza E_1 , E_2 e G_{12} ottenuti dalle prove di caratterizzazione del materiale con i moduli ricavati da queste prove di trazione sul filamento, andando a delineare una prima differenziazione fra il modello ortotropo e dei modelli isotropi. Infatti, il materiale in forma di filamento ha caratteristiche isotrope prima di essere sottoposto al processo di stampaggio. Il confronto con i provini ortotropi consentirà di accertare e valutare l'entità della differenza fra le due configurazioni del materiale.

	Modello Ortotropo	Filamento A Isotropo	$\Delta_{\%A}$ [%]	Filamento B Isotropo	$\Delta_{\%B}$ [%]
E_1 [MPa]	3008	3132.09	4.13	3072.39	2.14
E_2 [MPa]	2876	//	8.90	//	6.83
ν_{12}	0.2905	0.3		0.3	
G_{12} [MPa]	1230	1204.65	-2.06	1181.69	-3.93

Tabella 6 Moduli Elastici ricavati dai filamenti e confronto con quelli ottenuti dalle prove di caratterizzazione del materiale

Per ognuna delle grandezze riportate in tabella, si osserva una più o meno significativa differenza fra i valori determinati dalla caratterizzazione meccanica del materiale ed i valori ricavati dal filamento grezzo:

- ❖ I moduli di rigidezza ricavati per il Filamento A e per il Filamento B, si distanziano dal E_1 del modello ortotropo, rispettivamente di circa 4% e 2%. Si può quindi affermare che si è ottenuta una corrispondenza adeguata fra i due valori, evidenziando come le caratteristiche meccaniche, almeno in questa direzione, rimanga pressoché immutate. Allo stesso tempo, i moduli di rigidezza differenti nei due filamenti, inizia a delineare l'esistenza di una differenza fra i due lotti di PLA impiegati.
- ❖ Per quel che riguarda il confronto con E_2 le differenze sono invece più concrete ed i valori del modello isotropo non possono più considerarsi assimilabili al modello ortotropo.
- ❖ Infine, i moduli a taglio dei filamenti, ricavati per un modello isotropo utilizzando un valore del modulo di Poisson di uso accertato dalla letteratura, presentano le stesse differenze e vale il medesimo discorso fatto per E_1 .

I dati del PLA grezzo quindi non ricalcano i valori propri dell'oggetto finito creato con la tecnica del Fused Deposition Modeling. Nelle prove di validazione successive, si affronterà ancora tale problema andando a sottolineare sempre eventuali differenze con i dati ricavati dall'oggetto finito ortotropo.

5 Prova di flessione su tre punti

Il primo test di validazione effettuato è una prova a flessione su tre punti. Prova che può rappresentare un metodo efficace per verificare un eventuale comportamento ortotropo del materiale e confermare o meno la matrice di rigidezza 3x3 ricavata tramite CLT.

Nel nostro caso, siffatta prova, ci ha permesso di ri-testare il comportamento elastico dei provini e ricavare importanti caratteristiche meccaniche quali il modulo di rigidezza a flessione, la resistenza a flessione e la forza di reazione ad una determinata deflessione imposta.

5.1 Introduzione alla prova

Per l'attuazione del test sperimentale, in accordo alla normativa ASTM D790, il provino viene posizionato orizzontalmente sopra due supporti in acciaio, cilindrici e paralleli posti ad una certa distanza (L) tra loro. Il carico viene applicato in mezzzeria con l'ausilio di un terzo cilindro, collegato alla traversa mobile superiore della macchina di prova, che pigia il provino facendolo flettere nella modalità rappresentata dalla Figura 32.

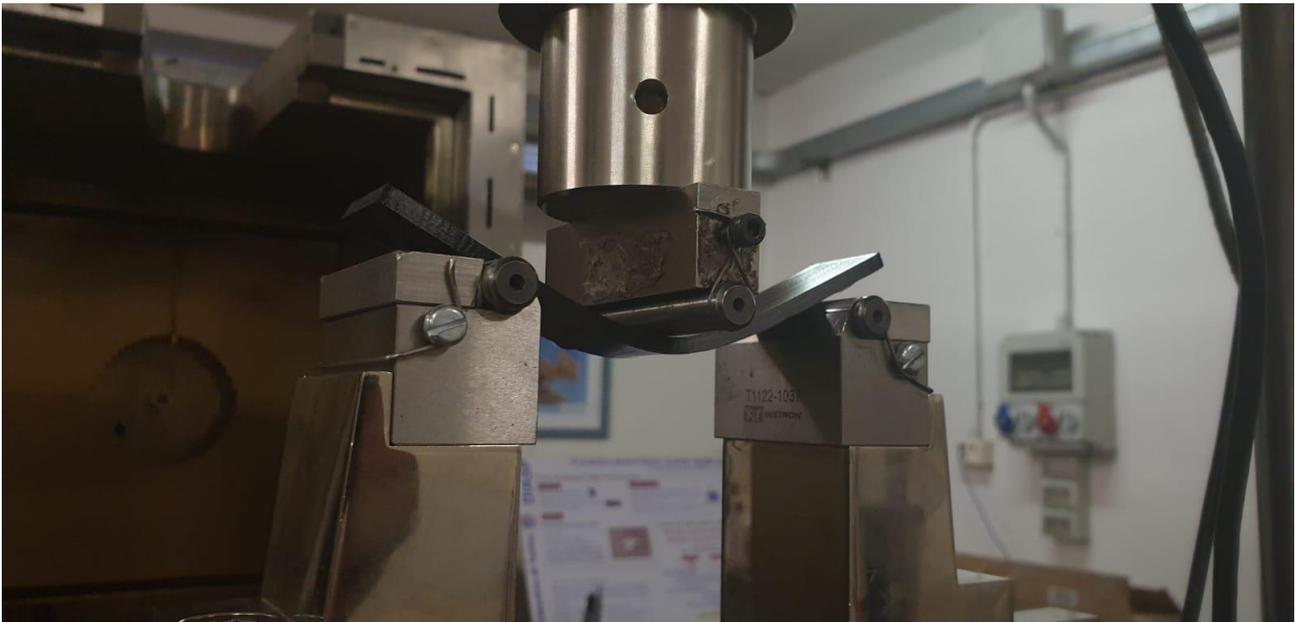


Figura 32 Esecuzione sperimentale della prova di flessione su tre punti

La deflessione impostata crea nel provino uno stato tensionale caratteristico di tale prova. Difatti, mentre gli strati del laminato nella metà superiore sono costretti in uno stato di compressione, vi è invece uno stato di sollecitazione a trazione per quelli della metà inferiore.

Le prove sono state eseguite con il seguente macchinario:

- ❖ Macchina servoidraulica INSTRON 8801;

In primo luogo, è stata usata una cella di carico da 100kN (cella preimpostata nel macchinario), per poi essere cambiata con una da 10kN che disponeva di una necessaria sensibilità maggiore. Ciò ha permesso una più accurata rilevazione di carichi, relativamente piccoli, sopportati dai provini polimerici testati.

Il provino tipico creato per la prova di flessione è un parallelepipedo rettangolo; per la determinazione della geometria si è fatto riferimento alla normativa che pone degli standard particolari per i materiali polimerici, ciò ha permesso il calcolo delle seguenti grandezze:

- ❖ Lunghezza: $L_p=140$ mm;
- ❖ Larghezza: $b=25$ mm;
- ❖ Spessore: $d=4$ mm.

Si prenda a riferimento la Figura 33:

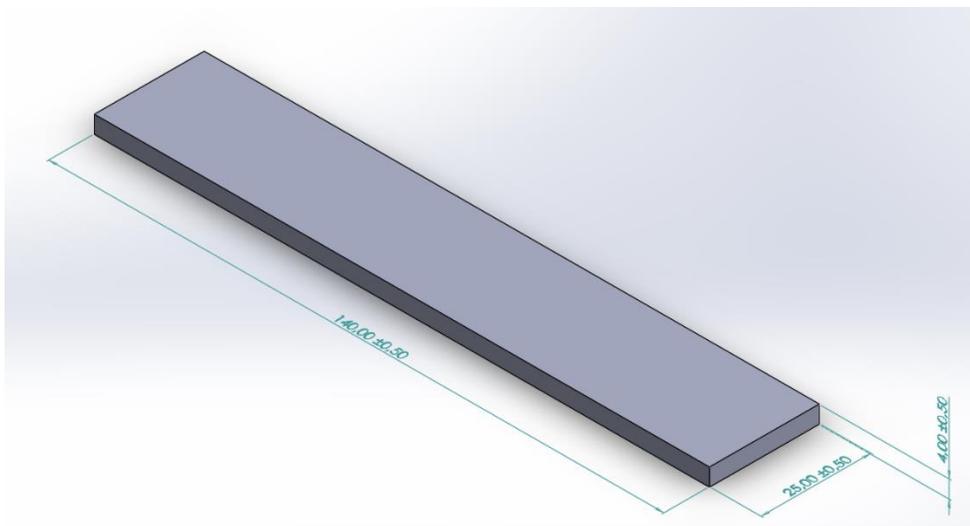


Figura 33 Rappresentazione 3D con Solidworks del provino usato per il test a flessione su tre punti

Di questi provini così definiti sono state stampate un totale di tre tipologie, una per ogni varietà di laminazione considerata. Tali laminazioni sono le medesime considerate per la prova di caratterizzazione; seguono illustrazioni a scopo esplicativo:

Immagine rappresentativa della laminazione di stampa in direzione 1, 2 e a $\pm 45^\circ$

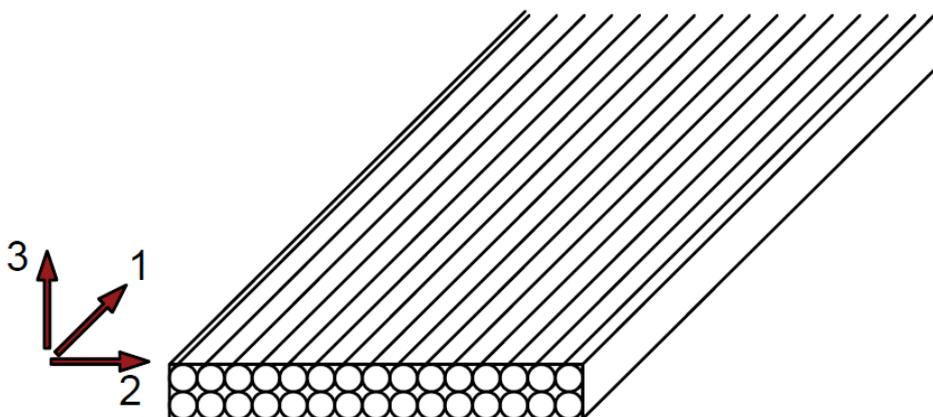


Figura 34 Laminazione a 0° - lungo direzione 1

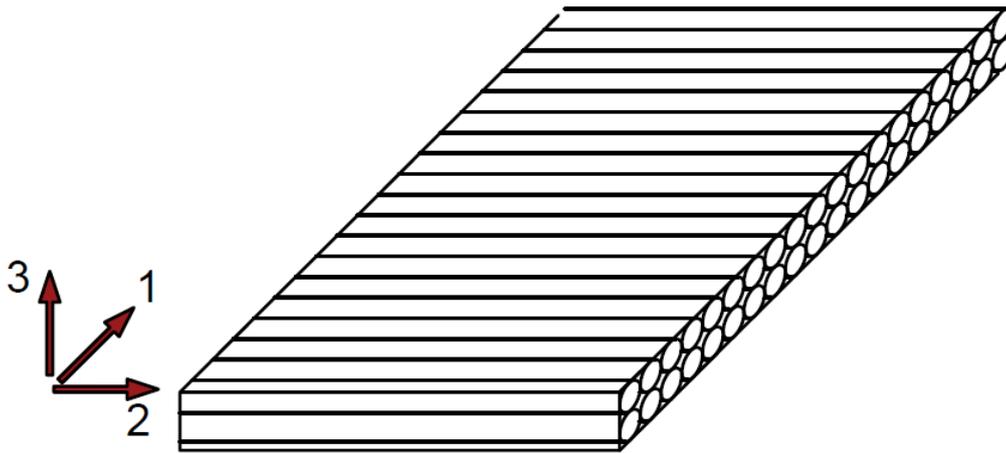


Figura 35 Laminazione a 90° - lungo direzione 2

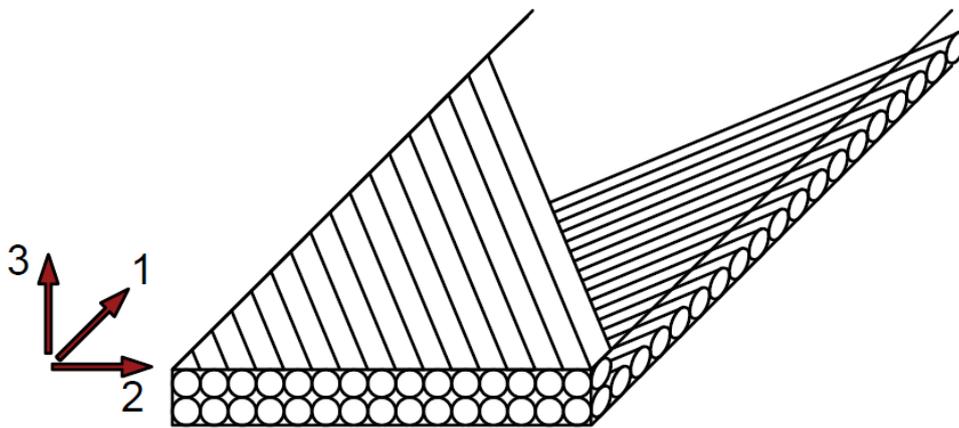


Figura 36 Laminazione a $\pm 45^\circ$

Come si può quindi dedurre, si sono scelte tre tipologie diverse di laminazione del provino:

- ❖ Provino con laminazione a 0° in direzione 1;
- ❖ Provino con laminazione a 90° rispetto alla direzione 1 (con direzione 2);
- ❖ Provino con laminazione a $\pm 45^\circ$ rispetto alla direzione 1.

Questa scelta è stata portata avanti allo scopo di accentuare le eventuali differenze di comportamento in presenza di mesostrutture differenti risultati che saranno conseguiti con le diverse laminazioni e quindi convalidare l'ipotetica ortotropia del materiale che si è sperimentata nelle prove di caratterizzazione meccanica.

Con in mente queste premesse, affiancata alle prove sperimentali vi è la creazione di un modello agli elementi finiti che possa simulare il test di flessione a tre punti e dare risultati comparativi.

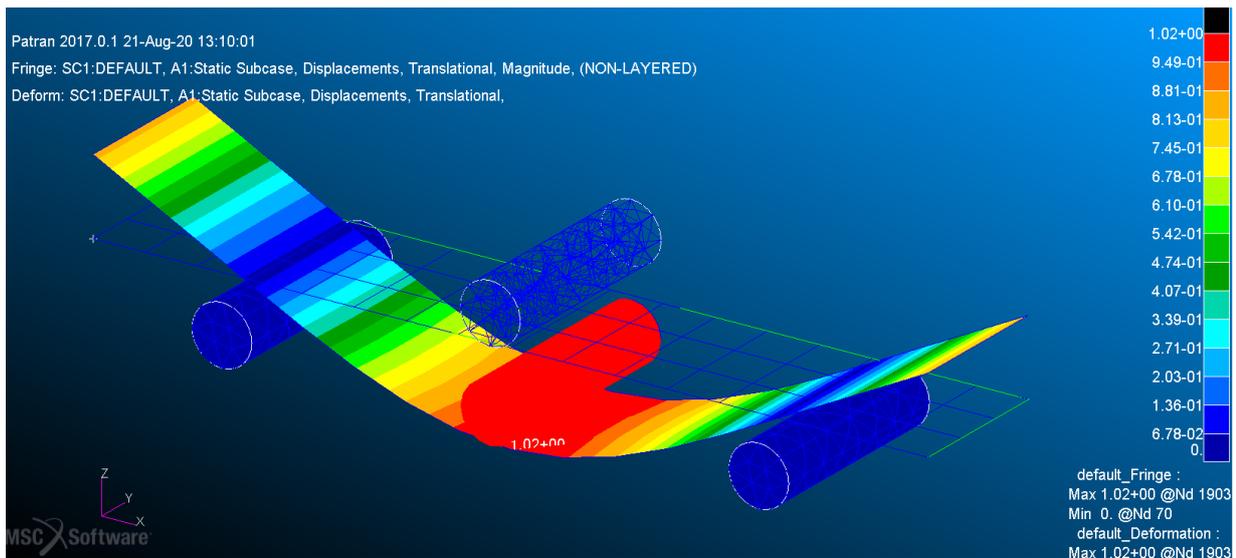


Figura 37 Rappresentazione del modello deformato a flessione su Patran

Il modello FEM, rappresentato in Figura 37, è costituito da quattro corpi, di cui:

- ❖ 3 cilindri aventi come dimensione caratteristica un diametro di 10 mm, realizzati con elementi 3D solidi tetragonali Tet10 con dimensione calcolata automaticamente avente valore 10.8476;
- ❖ 1 piastra rettangolare rappresentata sfruttando le proprietà Shell 2D e avente mesh costituita da elementi IsoMesh Quad4.

Per quel che riguarda le proprietà dei materiali, ai tre cilindri si sono imposte le proprietà di un acciaio isotropo, mentre nella definizione delle caratteristiche meccaniche del PLA si sono considerati i già visti moduli di rigidezza e coefficienti derivanti dalle prove a trazione ed a taglio precedentemente esposte.

Per poter consentire la definizione del materiale Patran necessita inoltre dei moduli di rigidezza a taglio G_{23} e G_{13} ; poiché però si è fatto riferimento alla Classical Lamination Theory per strutture sottili, non vi è stata necessità di calcolare tali grandezze ed in maniera concorde alla teoria, questi si sono considerati maggiori di diversi ordine di grandezza rispetto ai precedenti, simulando quindi una struttura infinitamente rigida verticalmente.

Si ottiene quindi un modello a lamine 2D ortotrope sovrapposte nella creazione di un composito con i seguenti moduli di rigidezza:

- ❖ $E_{11} = 3008 \text{ MPa}$
- ❖ $E_{22} = 2876 \text{ MPa}$
- ❖ $G_{12} = 1230 \text{ MPa}$
- ❖ $\nu_{12} = 0.2905$

Abbinato al modello ortotropo si è costruito un equivalente isotropo che sfrutta i valori ricavati dalle prove di trazione sul Filamento A e pertanto con le seguenti costanti:

- ❖ $E = 3132 \text{ MPa}$
- ❖ $G_{12} = 1204 \text{ MPa}$
- ❖ $\nu_{12} = 0.3$

Quest'ultimo modello, come già accennato nel capitolo precedente, concorrerà al primo nella simulazione dei risultati sperimentali e permetterà di determinare quale delle due configurazioni, ortotropica o isotropica, descrive meglio la realtà.

Passando a descrivere nei particolari la costituzione del modello agli elementi finiti, in modo da simulare fedelmente quello che era la prova sperimentale si è svolta un'analisi lineare di contatto fra i tre cilindri e la piastra e si è posto un attrito per ricreare le forze vincolari realmente presenti nel test. Il modello FEM impone un determinato spostamento al cilindro superiore, posto a contatto con il top della piastra e si è studiata la forza di reazione di quest'ultima, per poi confrontarla con quella ottenuta nella prova in laboratorio.

Come parametro di confronto fra sperimentale e a Elementi finiti si è quindi presa la forza necessaria per poter imporre un determinato spostamento in mezzeria. Nella fase di analisi del modello FEM sono inoltre stati eseguiti studi di convergenza della mesh, analisi dell'attrito fra i cilindri e piastra e lo studio delle zone di contatto.

Prima di giungere però all'analisi dei dati vera e propria e al paragone dei risultati è bene approfondire uno ad uno i vari studi prima elencati sul FEM, in modo da comprendere a fondo il modello e, a cascata, i risultati che ne conseguono.

5.2 Studio del contatto

Grazie all'utilizzo del Fringe di Patran (Figura 38) che permette la visualizzazione delle zone di contatto e delle forze normali di contatto, si è potuto osservare come la disposizione delle forze di reazione della piastra in queste zone non è uniformemente distribuita lungo tutta la superficie.

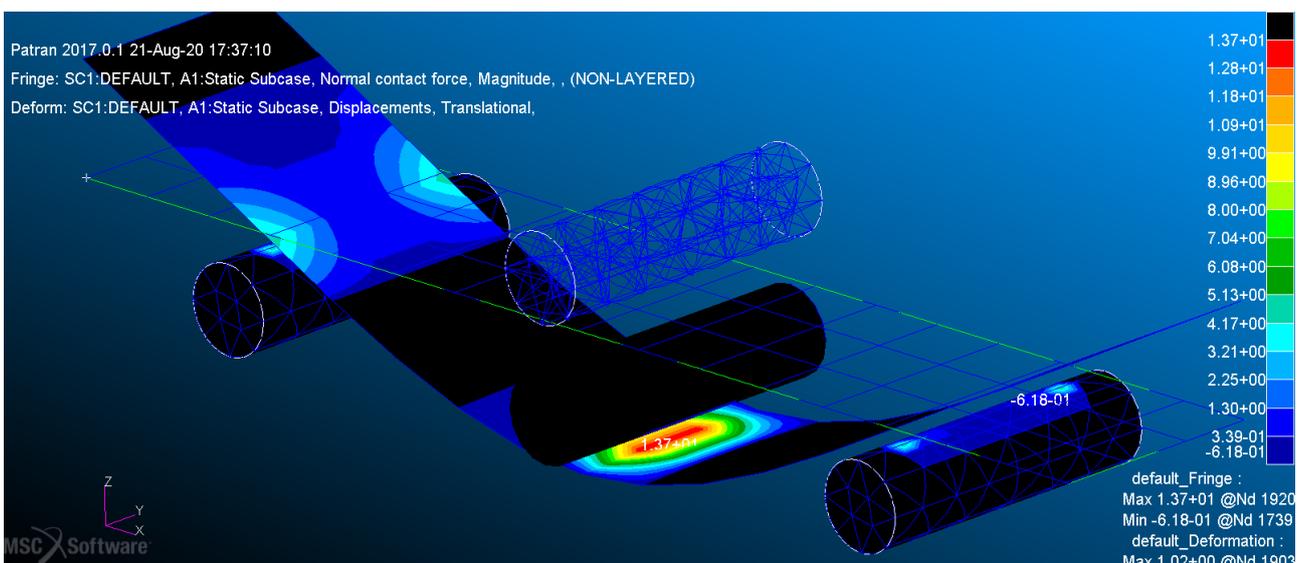


Figura 38 Rappresentazione delle zone di contatto su Patran

Analizzando infatti la regione in mezzeria si osserva come le forze maggiori siano trasmesse al centro della zona di contatto mentre, viceversa, nelle zone laterali vincolate dai cilindri le forze preponderanti sono trasmesse lungo i bordi dell'area. Questo si verifica poiché avviene

una deflessione sul piano Y-Z del provino, che forma una tipica configurazione ad U rovesciata. Ciò è ben visibile diagrammando gli spostamenti verticali lungo la direzione Y in mezzeria:

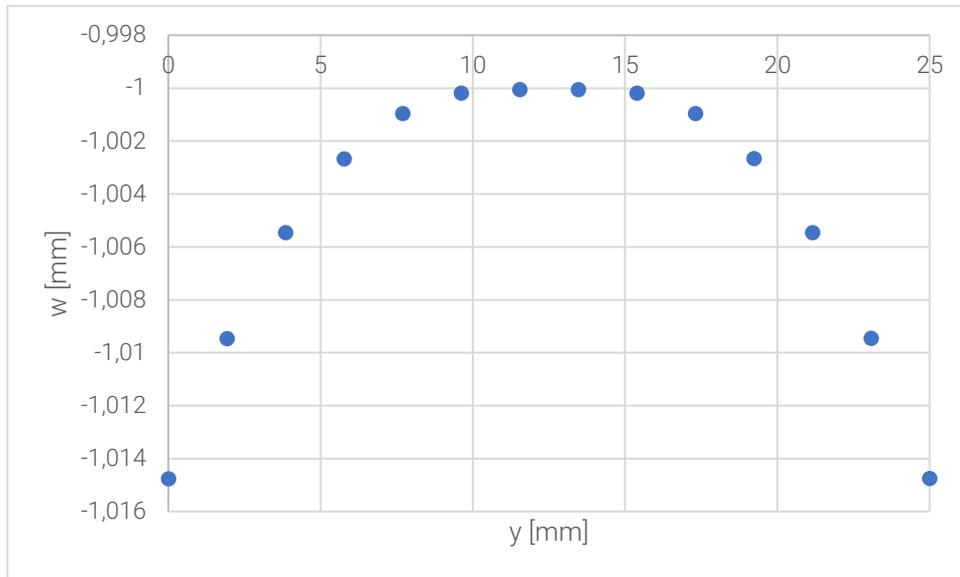


Figura 39 Spostamenti verticali in mezzeria per un millimetro di deflessione imposto

Il fenomeno è facilmente spiegabile e sviluppato dalla natura stessa della prova. Il test di flessione a tre punti infatti provoca, come già detto, uno stato di compressione per i layer più vicini al top del laminato e uno stato di tensione a trazione in quelli inferiori. Ciò determina un restringimento dovuto al coefficiente di Poisson per gli strati inferiori e un allargamento per gli strati superiori. Comportamento che sfocia in una deflessione ad U rovesciata come visualizzata in Figura 40, che comporta un non omogeneo trasferimento delle forze nelle zone di contatto.

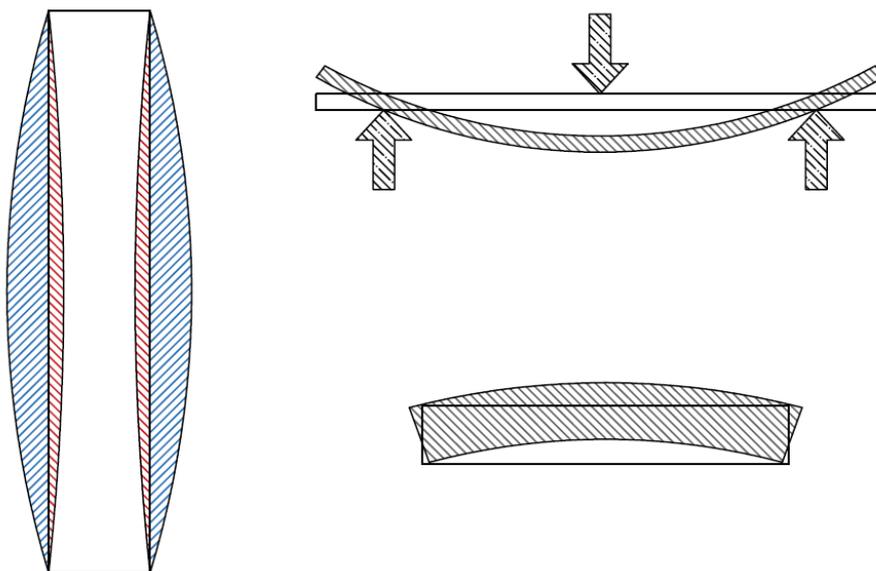


Figura 40 Immagine rappresentativa dell'effetto di curvatura del provino dovuta al Poisson

Questo naturale comportamento potrebbe portare al rilevamento di un fenomeno di irrigidimento del provino che si esplica nella misurazione di rigidezze del materiale più alte. Il fenomeno però non dovrebbe comportare alcun errore poiché presente nel modello ad Elementi Finiti tanto quanto nello sperimentale.

5.3 Studio dell'attrito nel contatto

Un'ulteriore analisi del contatto fra i cilindri e la piastra riguarda la scelta del coefficiente di attrito. Un valore per tale grandezza è necessario per la definizione del modello agli elementi finiti e descrivere un contatto fra l'acciaio dei cilindri e PLA il più possibile realistico. Sfogliando la letteratura è stato evidente come fosse inverosimile la ricerca di un valore univoco data la complessità del tema; uno dei pochi valori trovati puntava su un $\mu=0.16$ con una variabilità di ± 0.02 per casi di attrito fra semplice PLA non rinforzato e metalli.

Sempre dalla letteratura si evince, infatti, che per la determinazione del coefficiente di attrito statico di materiali polimerici quali PLA si delinea non un singolo valore costante ma una forte dipendenza da un numero abbastanza elevato di fattori.

Fra questi spiccano:

- ❖ Temperatura;
- ❖ Forza normale al moto (F_{\perp});
- ❖ Finitura superficiale.

Questo poiché il PLA è un materiale elastico, con basse rigidezze e quindi di facile deformazione.

Dal momento che era di interesse trovare un singolo valore che permettesse di simulare il test sperimentale, e si voleva determinare l'effetto che tale valore avrebbe avuto sui risultati finali, si è svolto uno studio di analisi sul modello FEM nel quale si è registrato la variazione dei valori di output di tale modello, in base al coefficiente di attrito che veniva imposto volta per volta. Il parametro su cui si è osservata la variazione è sempre la forza di reazione in mezzeria per un determinato spostamento imposto; tale variazione permetterà di misurare se e quanto un determinato valore del coefficiente di attrito possa vincolare più del dovuto la piastra irrigidendola, o viceversa. Si è quindi scelto di imporre una deflessione pari a 1 mm in mezzeria e di far variare il coefficiente di attrito fra l'acciaio dei cilindri e il PLA della piastra fra un minimo di $\mu=0,001$ a un massimo di $\mu=1$.

Static Friction Coefficient (μ)	F [N]
0.001	27.853071
0.01	27.454378
0.15	27.425569
0.16	27.425443
0.3	27.424672
0.4	27.424674
0.5	27.424674
0.7	27.424679

Tabella 7 Forza di reazione in relazione al coefficiente di attrito

Dal grafico è possibile delineare un peculiare andamento caratterizzante la scelta del valore del coefficiente di attrito:

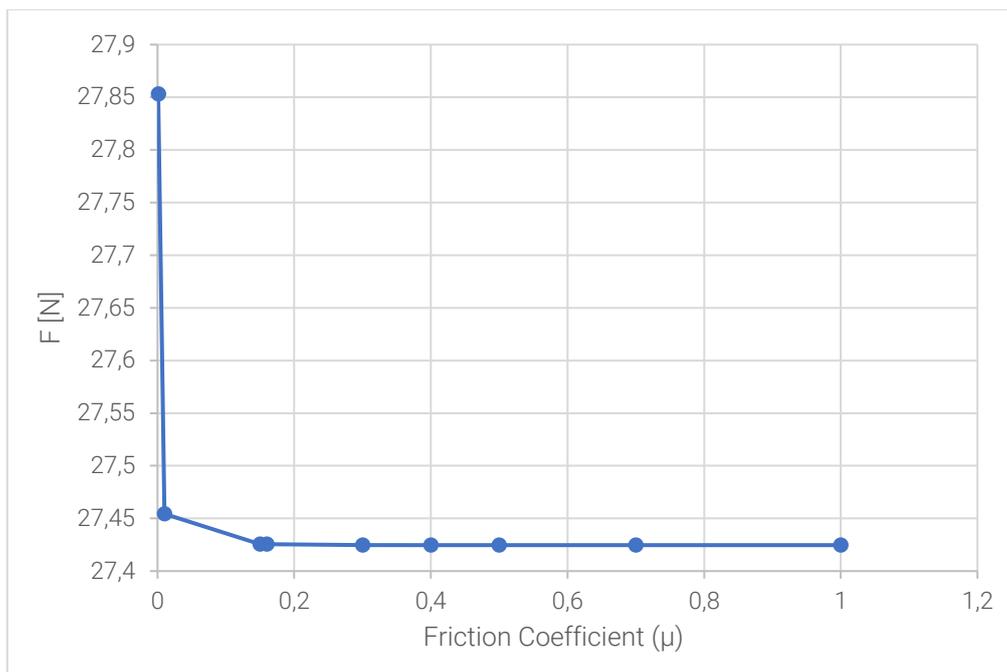


Figura 41 Andamento forza di contatto/coefficiente di attrito con passo di mesh pari a 1mm

Da questo si nota come, escludendo valori bassissimi del coefficiente ($\mu=0.001$) il valore della forza di contatto normale risultante rimane pressoché costante all'interno dell'intervallo studiato (dove è lecito pensare che al cui interno risieda il reale valore di μ per il nostro caso). Inoltre, si è svolta la medesima procedura variando il passo della mesh con la quale si era discretizzata la superficie della piastra, per osservare se questa avesse qualche influenza sull'effetto del coefficiente di attrito.

Quello che si è ottenuto è un andamento più che simile al precedente, scagionando questa variabile:

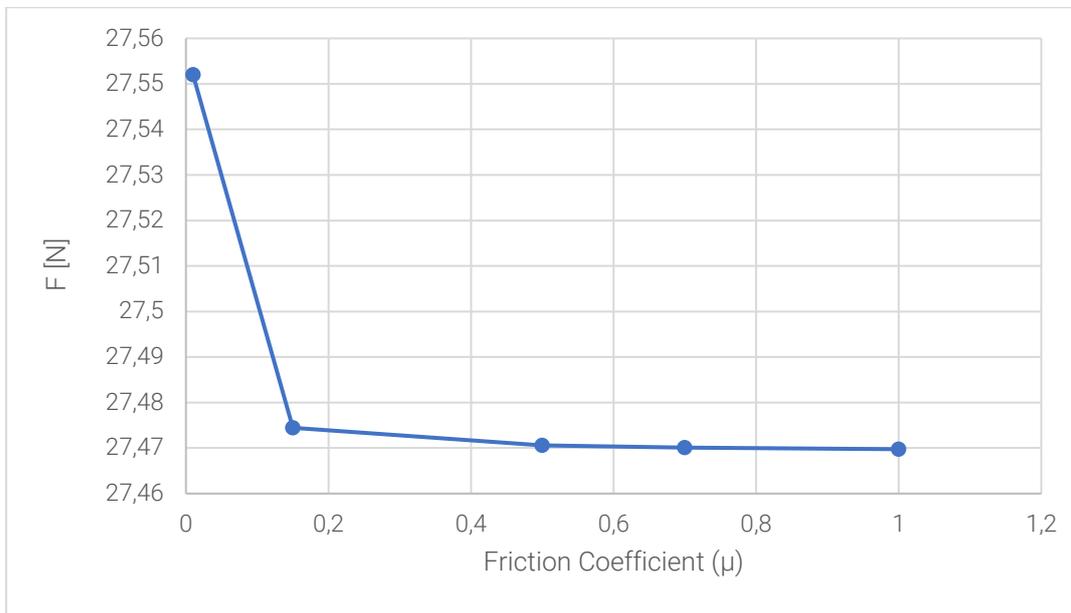


Figura 42 Andamento forza di contatto/coefficiente di attrito con passo di mesh pari a 8.48 mm

Infine, come ultimo test si è variata la laminazione ponendola a 90°, per esplorarne l'effetto, e quello che si è ottenuto è il medesimo andamento. Inoltre, confrontando i valori di output ottenuti per gli estremi dell'intervallo analizzato del coefficiente di attrito, si fa notare come la differenza nei valori di output sia minima:

Static Friction Coefficient (μ)	F [N]
0.001	25.30142
0.01	25.18330

Tabella 8 Forza di reazione in relazione al coefficiente di attrito per laminazione a 90°

Comportamento facilmente riscontrabile anche nei precedenti grafici creati per una laminazione a 0°. Da questi risultati si ricava che il coefficiente di attrito, almeno nel modello FEM, non determina effetti di irrigidimento concreti. Quindi per cui, si è scelto di svolgere le successive prove con un coefficiente di attrito pari a $\mu=0.16$. Valore, che oltre a risultare essere compreso nell'intervallo a valore costante dei grafici precedenti, è inoltre coincidente con quanto riportato in letteratura.

5.4 Effetto della mesh

Per ogni modello creato, rappresentativo della prova a flessione su tre punti, si è sempre utilizzata una meshatura della piastra 2D avente elementi IsoMesh Quad4. Quello che però è stato variato è la grandezza degli elementi stessi, rendendo il reticolo della mesh più o meno fitto. Questo lavoro di convergenza della mesh è stato eseguito per osservarne l'effetto sui risultati e per poter decretare quale fosse la dimensione più appropriata per i successivi test. Così come è stato fatto per il coefficiente di attrito, si è scelto come output sempre la forza trasmessa in mezzeria, necessaria ad ottenere una deflessione della piastra di 1 mm.

I dati sono stati raccolti imponendo una laminazione sia a 0° che a 90° e sono stati riportati nella seguente tabella:

$D = 1 [mm]$		$\mu = 016$	
Laminazione 0°		Laminazione 90°	
Mesh [mm ²]	Forza [N]	Mesh [mm ²]	Forza [N]
1	27.425443	1	25.146114
2	27.438419	2	25.14655
4	42.778983 ←	4	43.296646 ←
5	27.451271	5	25.167973
6	57.263069 ←	6	29.908739 ←
7	47.668726 ←	7	46.960381 ←
8.48485 (auto)	27.46668	8.48485 (auto)	25.187263
12.5	29.262233	12.5	26.817472
25	28.840399 ←	25	24.642939 ←

Tabella 9 Andamento delle forza di reazione in relazione al passo della mesh per le diverse laminazioni

Come si può notare dai valori soprastanti, questi sono stati suddivisi in due parti. Ciò è presto spiegato se si pensa a quali sono i risultati attesi in un test di questa tipologia.

Sarebbe infatti normale aspettarsi che all'infittirsi della mesh i risultati siano più precisi e allo stesso tempo, quando il passo della mesh aumenta, la piastra dovrebbe mostrare un comportamento più rigido data la bassa approssimazione dei gradi di libertà. Se si osservano solamente i dati evidenziati in verde, questo comportamento viene evidenziato al meglio e si ottiene appunto una serie crescente al ridursi del numero di elementi discretizzanti la piastra. Guardando invece le tabelle nel complesso questa crescita non è visibile. Sono quindi segnati da una freccia, i passi della mesh per cui si ottengono valori anomali della forza di contatto necessari alla deflessione.

Seguono i grafici degli andamenti della forza necessaria ad ottenere 1 mm di freccia in mezzeria per ognuna delle meshature analizzate. In rosso vengono segnati i valori anomali e in verde la serie crescente:

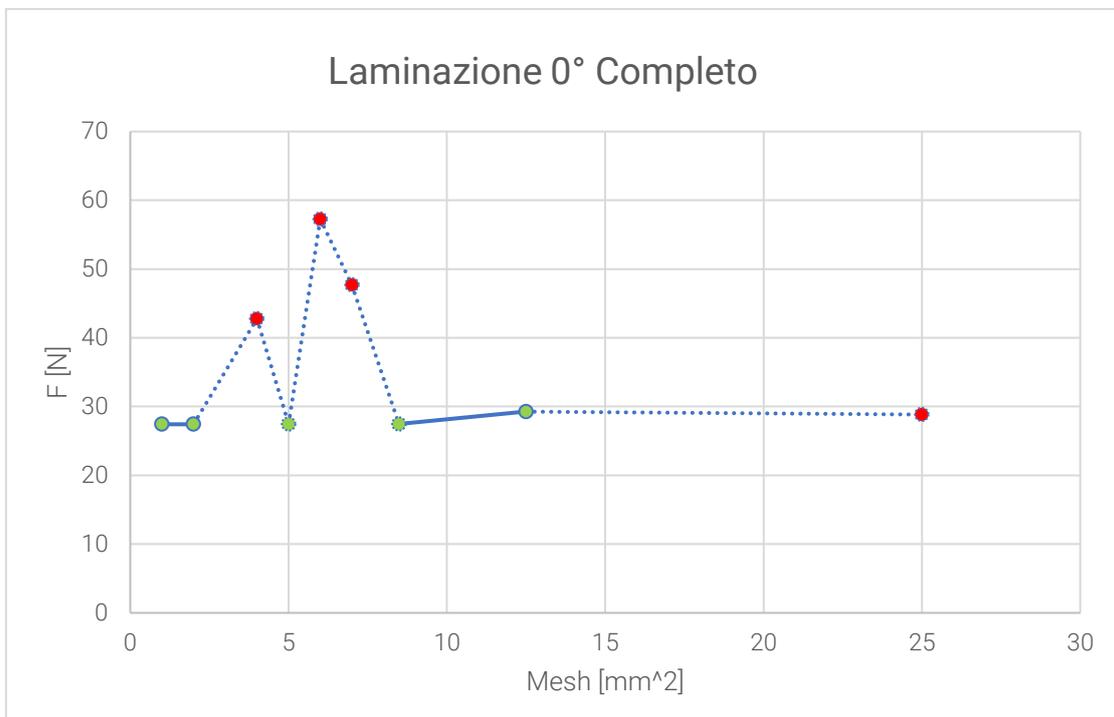


Figura 43 Andamento delle forze di reazione in relazione al passo della mesh (laminazione a 0°)

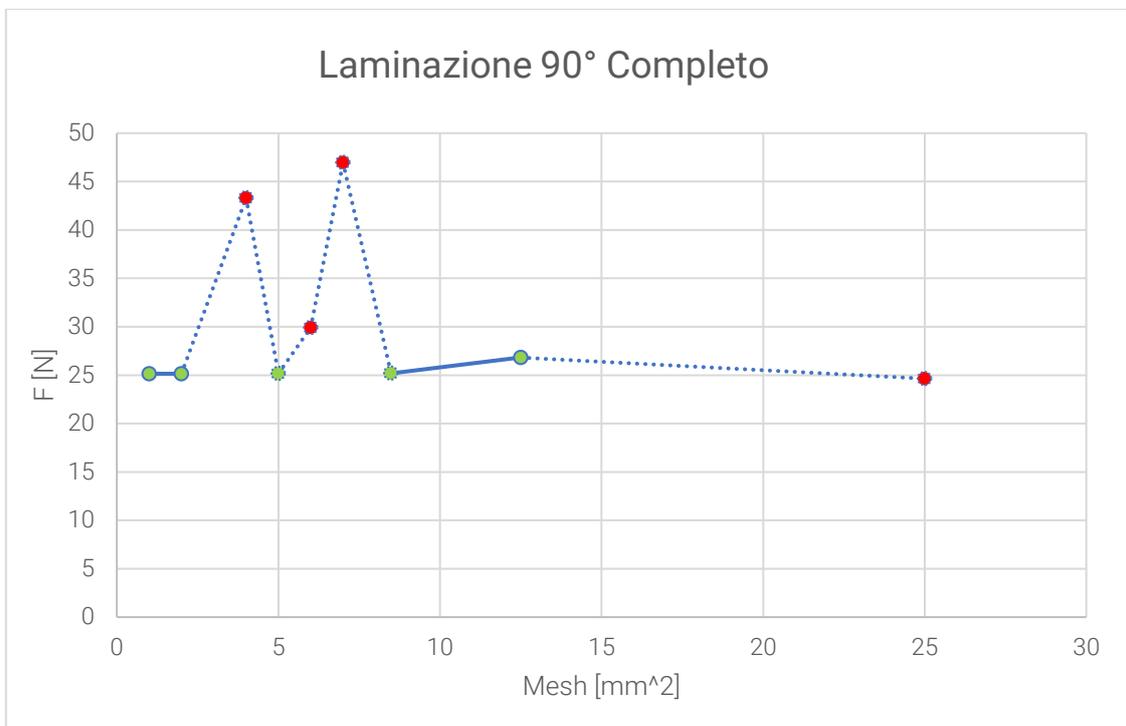


Figura 44 Andamento delle forze di reazione in relazione al passo della mesh (laminazione a 90°)

Di seguito invece la serie crescente per le due laminazioni depurate dei risultati anomali:

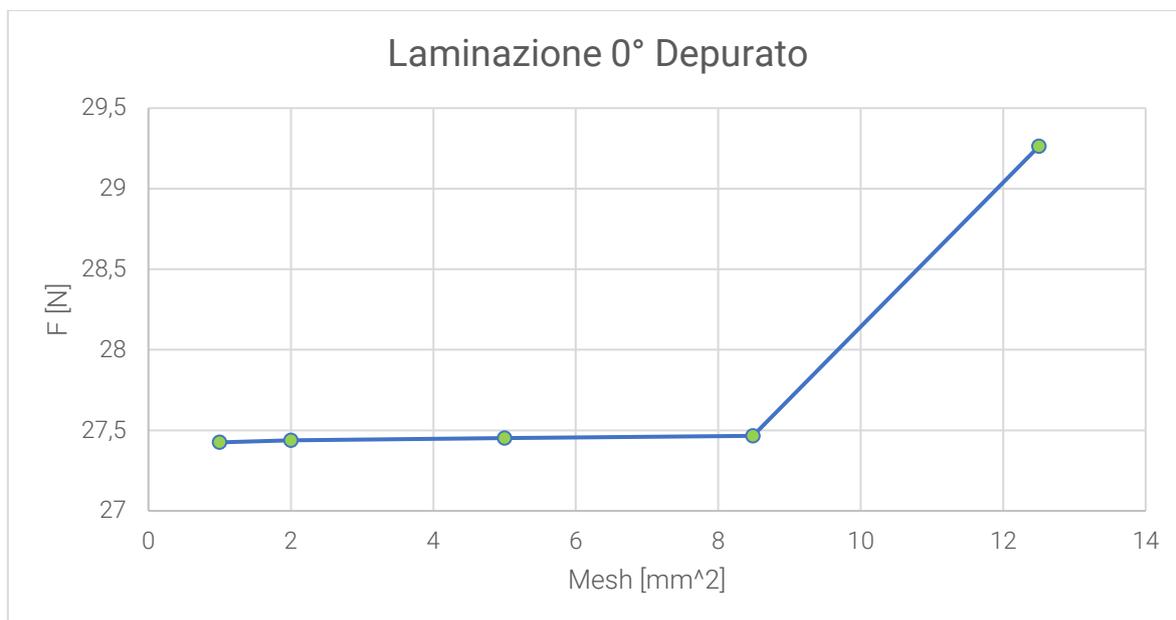


Figura 45 Andamento delle forza di reazione in relazione al passo delle mesh esenti da errore (laminazione a 0°)

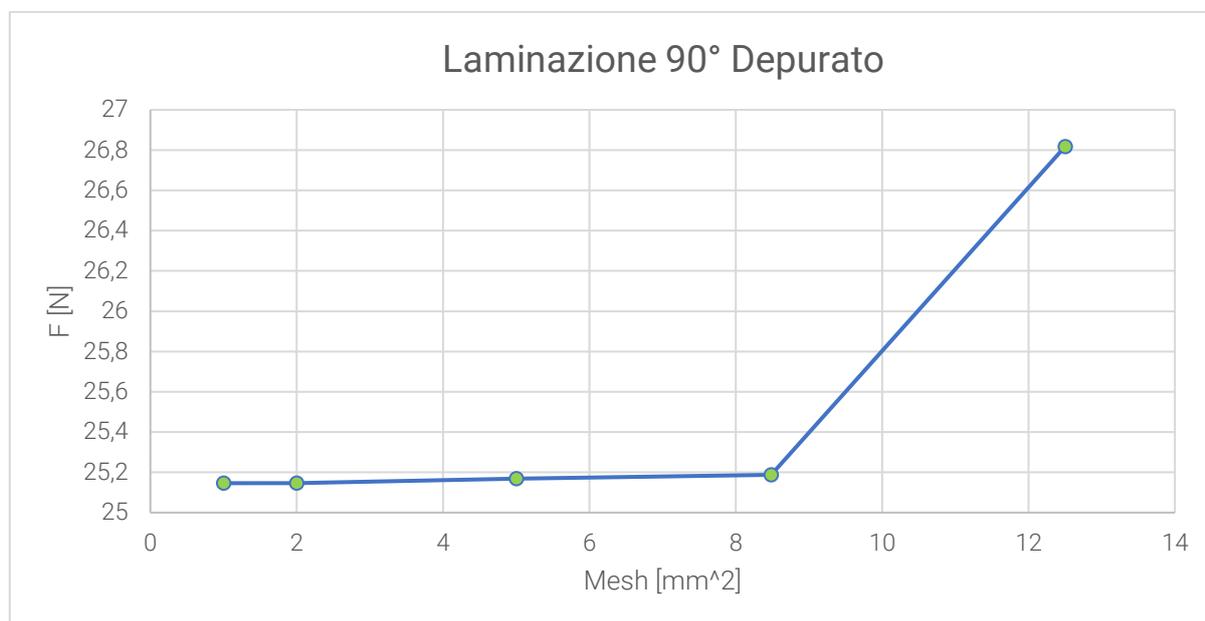


Figura 46 Andamento delle forza di reazione in relazione al passo delle mesh esenti da errore (laminazione a 90°)

Fra questi risultati anomali che descrivono aumenti considerevoli della rigidità della piastra con le mesh aventi passo 4, 6, 7 e 25 mm solo l'ultima è di probabile facile spiegazione. Avendo la mesh passo 25 mm la piastra sarebbe formata solo da un totale di quattro elementi, di cui un solo elemento nel lato corto. Condizione che non può certamente rappresentare al meglio la flessione della piastra e fornire risultati validi. Per gli altri, invece, si può ipotizzare che siano in parte dovuti alla non divisibilità per numeri interi della superficie

con determinati passi della mesh, oppure alla mancata convergenza dei singoli elementi, che ha portato a valori eccessivamente alti di risposta e rigidità della piastra.

Concludendo, dopo aver stabilito il range del passo entro cui l'output rimanesse stabile, l'operazione di convergenza ha fatto ricadere la scelta sulla mesh che garantisse, entro il suddetto intervallo di stabilità, il tempo di analisi minore del modello. Ciò equivale alla scelta del passo più grande pari a 8.48485, lo stesso determinato automaticamente da Patran per tale superficie.

5.5 Effetto della deflessione imposta sul modello FEM

Come ultimo test al modello agli elementi finiti si è deciso di rilevare l'effetto della deflessione imposta in mezzeria. Come output si è scelto di selezionare il rapporto fra la forza di reazione trasmessa in mezzeria e la deflessione stessa. Gli altri parametri quali passo della mesh, coefficiente di attrito e laminazione sono stati tenuti costanti.

La prova è stata ripetuta simulando sia una piastra laminata interamente a 0°, sia con laminazione interamente a 90° e con un range di deflessione tra 0.5 mm a 30 mm.

Seguono le tabelle riportanti i valori per le due laminazioni:

0° Auto mesh $\mu=0.16$	Spostamento [mm]	Forza [N]	Forza/Spostamento
	0.5	13.54	27.08
	1	27.13	27.13
	2	54.46	27.23
	3	82.00	27.33
	5	137.71	27.54
	6	165.87	27.64
	7	209.76	29.97
	10	308.59	30.86
	15	478.54	31.90
	20	704.38	35.22
	30	1094.80	36.49

Tabella 10 Relazione deflessione/forza trasmessa (laminazione 0°)

90° Auto mesh $\mu=0.16$	Spostamento [mm]	Forza [N]	Forza/Spostamento
	0.5	12.94	25.88
	1	25.92	25.92
	2	52.02	26.01
	3	78.32	26.11
	5	131.48	26.29
	6	158.34	26.39
	7	199.65	28.52
	10	293.34	29.33
	15	454.46	30.30
	20	666.45	33.32
	30	1039.05	34.64

Tabella 11 Relazione deflessione/forza trasmessa (laminazione 90°)

Come è possibile notare, per ambedue le laminazioni si assiste ad un trend crescente per quanto riguarda l'output. Il rapporto forza/deflessione non è costante, ma è richiesta una sempre maggiore forza per unità di deflessione.

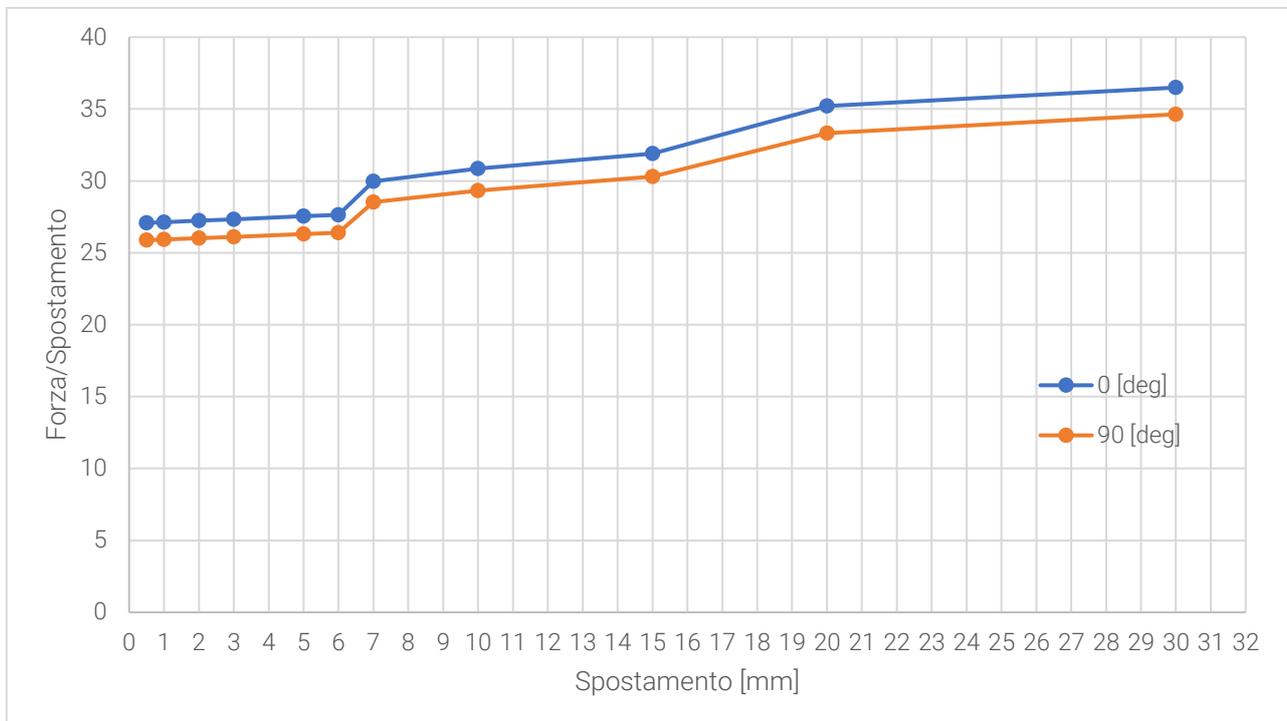


Figura 47 Andamento del parametro forza richiesta/spostamento in relazione alla deflessione imposta

Riportando su un grafico questi valori si nota come essi siano sostanzialmente costanti per il primo tratto fino a 6 mm di deflessione, oltre tale valore il rapporto forza/spostamento si impenna.

Si può inoltre notare come, benché traslati, l'andamento dei valori fra laminazione a 0° e 90° rimane sostanzialmente identico. Indipendentemente dalla deflessione imposta, nell'ipotesi che la matrice di rigidezza 3x3 sia rappresentativa del comportamento meccanico, risulta confermato come il provino con laminazione a 90° e quello con laminazione a 0° manifestino un comportamento differente.

Nella porzione iniziale del grafico, tuttavia, si può notare come il rapporto forza/deflessione si mantenga sostanzialmente costante. L'analisi proposta si soffermerà in tale campo; è possibile supporre che a deflessioni maggiori sopraggiungano non linearità geometriche e/o una variazione delle condizioni di carico e di vincolo. Questo andamento è stato confermato dai dati sperimentali che saranno presentati nel paragrafo successivo.

Infine, la stessa tendenza si è registrata per la laminazione a $\pm 45^\circ$:

$\pm 45^\circ$	Spostamento [mm]	Forza [N]	Forza/Spostamento
Auto mesh	0.5	13.79	27.57
$\mu=0.16$	1	27.63	27.63
	2	55.47	27.74

Tenendo conto delle affermazioni precedenti, per la scelta della deflessione imposta alla base delle successive analisi, si sono presi in considerazione solo i valori facenti parte del tratto a Forza/Spostamento costante; più precisamente si è scelta una deflessione unitaria che potesse garantire la linearità geometrica.

5.6 Compimento della prova e procedure applicate

Per lo svolgimento della prova, si è fatto riferimento alla normativa ASTM D790 per la determinazione delle proprietà a flessione di materiali plastici rinforzati e non rinforzati.

Mentre i modi e dispositivi di caricamento sono stati già trattati, in questo paragrafo si parlerà di alcune procedure svolte e dei calcoli effettuati per il corretto ottenimento dei risultati finali.

5.6.1 Verifica della distanza fra i supporti

Uno dei requisiti principali per la giusta esecuzione della prova è l'avere una corretta misurazione delle distanze fra i due cilindri inferiori di supporto al provino. Questa distanza infatti, cui si farà riferimento come L d'ora in avanti, ricopre un ruolo molto importante nella determinazione delle proprietà meccaniche del provino; lo stesso modulo di elasticità flessionale è difatti proporzionale al cubo di L ($E_B \propto L^3$).

Per la sua determinazione, si è fatto riferimento alla stessa normativa. Essa infatti suggerisce di dotarsi di un dispositivo di misurazione ed allineamento, che possa garantire il rispetto della corretta distanza L fra i due cilindri.

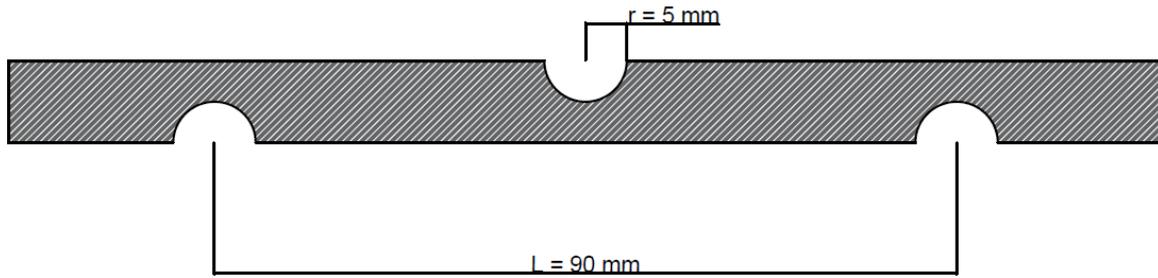


Figura 48 Supporto distanziatore per la prova a flessione su tre punti.

Questo dispositivo, ha la forma adatta per incastrarsi perfettamente fra i due cilindri di supporto inferiori, e deve essere usato all'inizio di ogni prova per garantire il rispetto della distanza L . Inoltre, è dotato di un alloggiamento anche per il cilindro superiore, in modo che questo venga fatto scendere esattamente al centro fra i due cilindri di supporto, e quindi in mezziera a $L/2$. Il supporto oltre a svolgere la funzione di distanziatore, serve a verificare che il cilindro superiore scenda perfettamente parallelo agli altri due.

5.6.2 Velocità di traslazione della traversa superiore

Un altro parametro che merita una trattazione è la determinazione della velocità di caricamento del provino, ossia la velocità imposta verso il basso alla traversa mobile superiore della macchina in millimetri al minuto. Questa grandezza, indicata con la lettera R dall'inglese: "Rate of crosshead motion", non è indicata esplicitamente nella normativa ma deve essere ricavata con un'espressione che viene indicata come:

$$R = \frac{ZL^2}{6d}$$

Dove i vari parametri indicati sono:

R = (Rate of crosshead motion) velocità di movimento della trasversa superiore [mm/min];

L = Distanza fra i due cilindri di supporto inferiori [mm];

d = Spessore del provino [mm];

$Z = 0,01$ (Rateo di deformazione delle fibre esterne) [mm/mm/min].

Si può osservare quindi come si ottiene una velocità di traslazione evidentemente dipendete dalle dimensioni del provino.

Conoscendo:

❖ $L = 90$ [mm];

❖ $d = 4$ [mm];

si ricava facilmente una velocità pari a:

$$R = 3.375 \text{ [mm/min]}$$

Valore che è rimasto invariato per tutte le prove a flessione sui provini con le diverse tipologie di laminazione.

5.6.3 Calcolo del modulo a flessione

Si vuole ora esplicitare, la metodologia che si è adottata, a valle delle prove di flessione su tre punti, per il calcolo della tensione di flessione, della deformazione, e quindi del modulo di elasticità a flessione di ogni singolo provino testato.

Data la natura del test, quella che serve calcolare è la tensione delle fibre e le deformazioni delle superfici esterne nella mezzeria.

Le relative formule, suggerite dalla normativa ma di facile deduzione, includono sia le caratteristiche geometriche proprie del provino, sia i valori estrapolati dalla curva Carico/Deflessione (P/D [N/mm]) nella sua regione ad andamento lineare rappresentate la zona di deformazione elastica.

La sigma di flessione si ottiene quindi con:

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

Dove i vari componenti rappresentano:

σ_f = Tensione delle fibre esterne in mezzeria [MPa];

P = Carico imposto ad un determinato punto della curva carico/spostamento [N];

L = Distanza fra i due cilindri di supporto inferiori [mm];

b = Larghezza del provino [mm];

d = Spessore del provino [mm].

Mentre la deformazione si ha per:

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

Con:

ε_f = Deformazione delle superfici esterne [mm/mm];

D = Deflessione massima in mezzeria [mm];

d = Spessore del provino [mm];

L = Distanza fra i due cilindri di supporto inferiori [mm].

Infine, per la legge di Hooke si ha:

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

Di cui:

E_B = Modulo di elasticità a flessione [Mpa];

L = Distanza fra i due cilindri di supporto inferiori [mm];

b = Larghezza del provino [mm];

d = Spessore del provino [mm].

$m = P/D$ = Pendenza della tangente alla porzione lineare iniziale della curva carico/spostamento [N/mm].

Le precedenti relazioni sono state impiegate sia per il calcolo del modulo di elasticità a flessione dai dati sperimentali, sia per estrapolare lo stesso modulo dai valori ottenuti dal modello ad elementi finiti. Il confronto fra queste due diverse misurazioni della medesima grandezza è stato il metro di paragone per verificare la capacità del modello FEM nella previsione dei risultati sperimentali e la conseguente validazione della matrice di rigidezza ridotta ottenuta secondo la Classical Lamination Theory, in continuazione delle prove a trazioni antecedenti questo lavoro di tesi. Si è scelto di utilizzare il modulo di elasticità a flessione come grandezza di confronto fra FEM e sperimentale poiché normalizza il risultato, eliminando la variabilità di natura geometrica propria dei singoli provini e che invece non avrebbe influenzato il modello FEM provvisto delle dimensioni nominali.

5.7 Risultati sperimentali

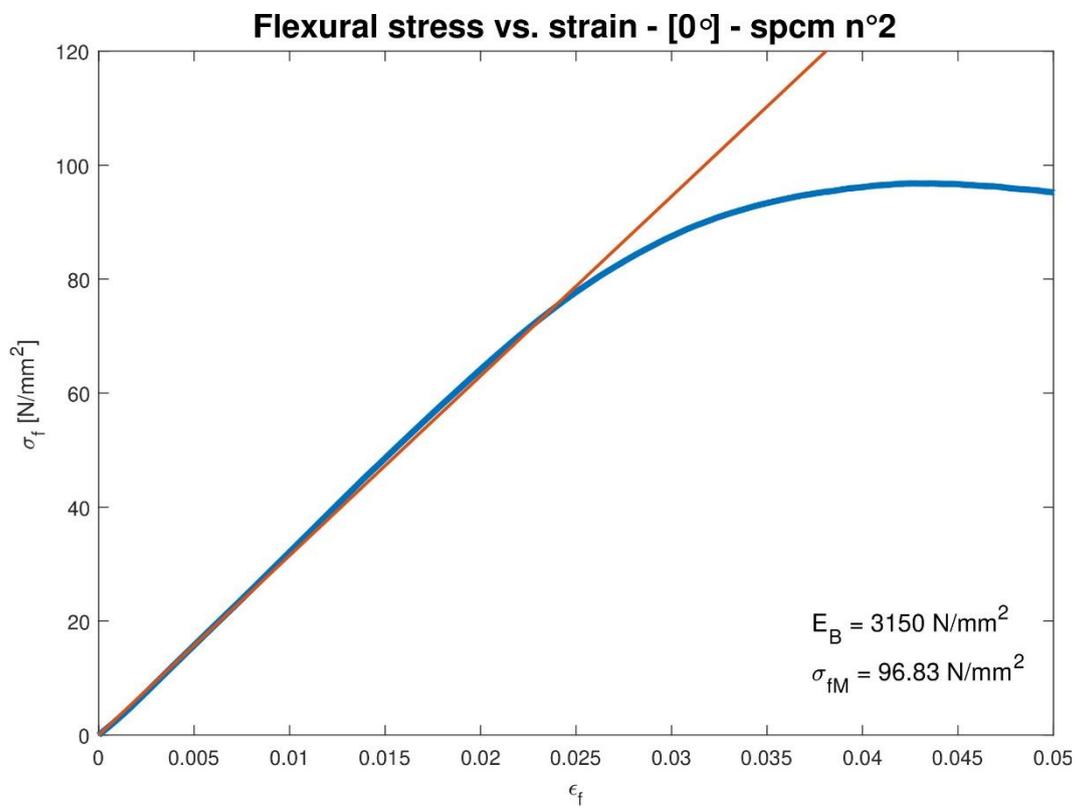
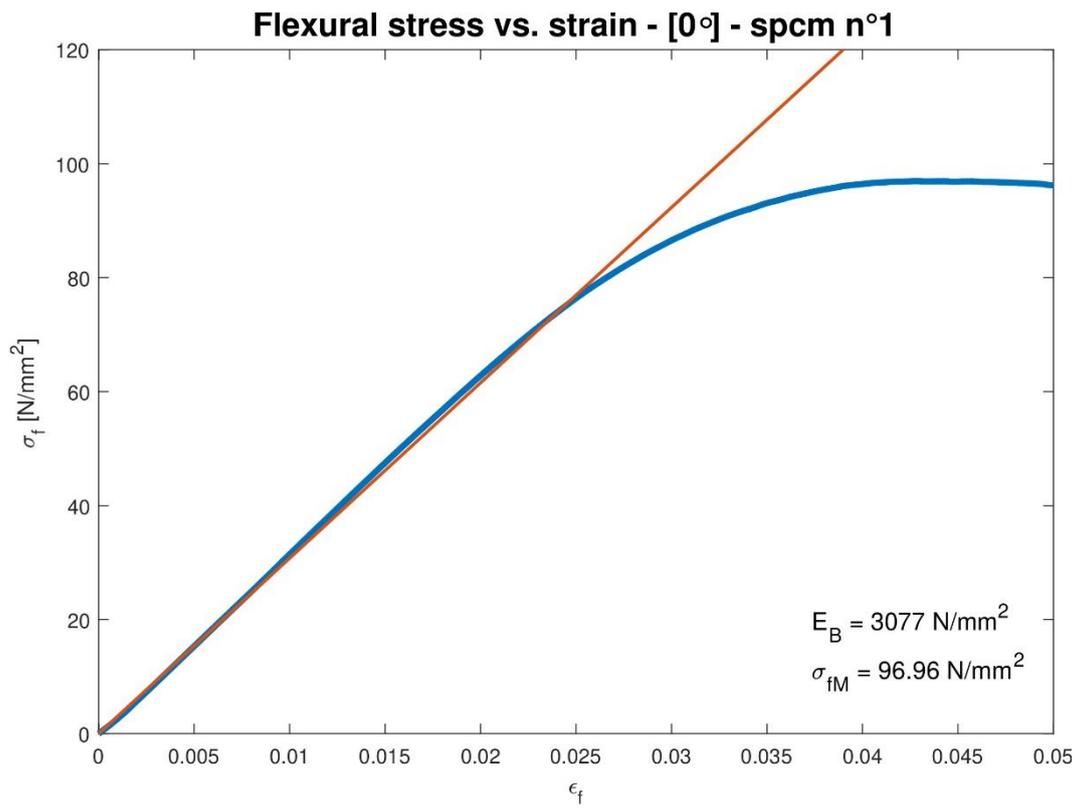
Nel corso della prova sono stati valutati un totale di diciotto provini, di cui sei per ogni tipo di laminazione. Per ognuno di questi si è estrapolato tramite script di Matlab un grafico tensioni/deformazioni con relativa retta tangente al tratto lineare usato per il calcolo del modulo di rigidezza e resistenza a flessione.

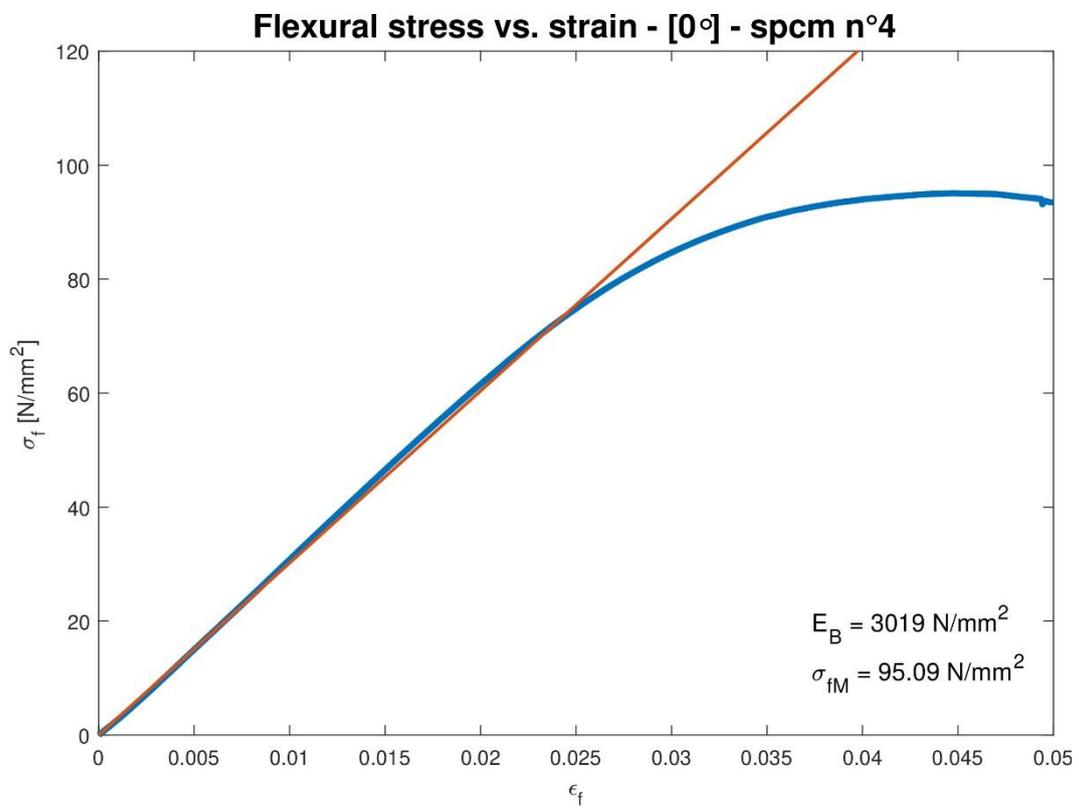
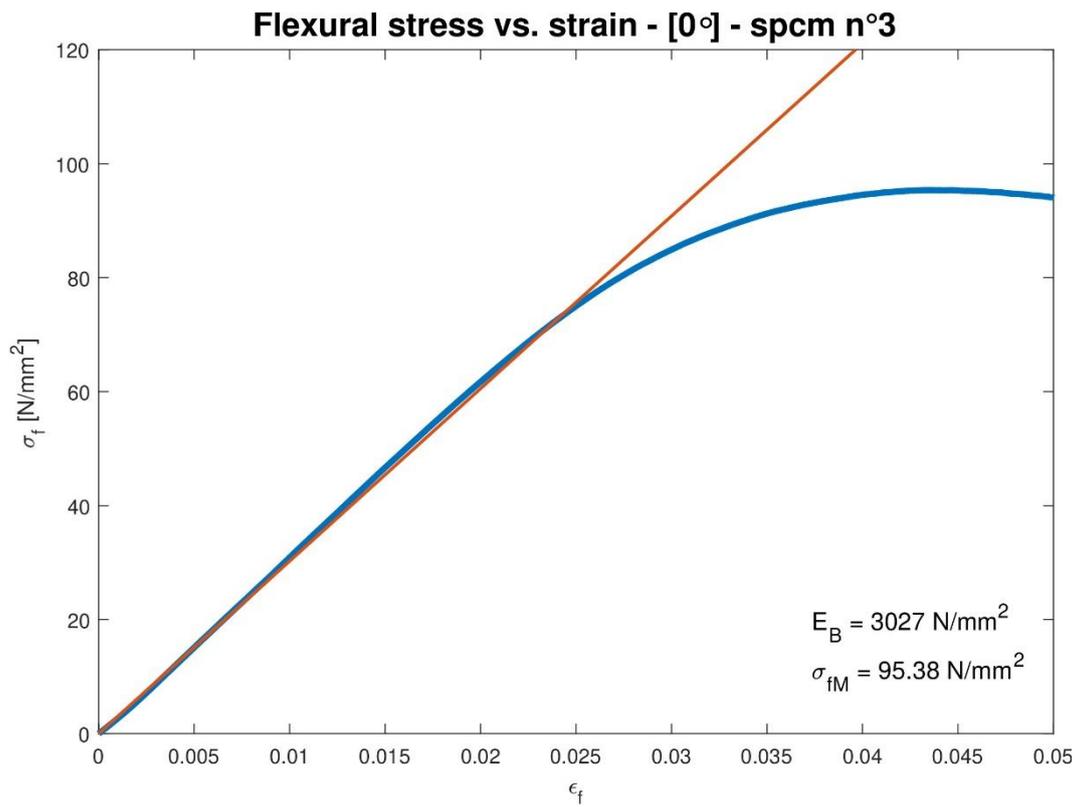
I moduli elastici a flessione ricavati e relativa tensione sono elencati nelle seguenti tabelle seguite dai grafici delle singole prove, ciò è reiterato per ognuna delle tre laminazioni:

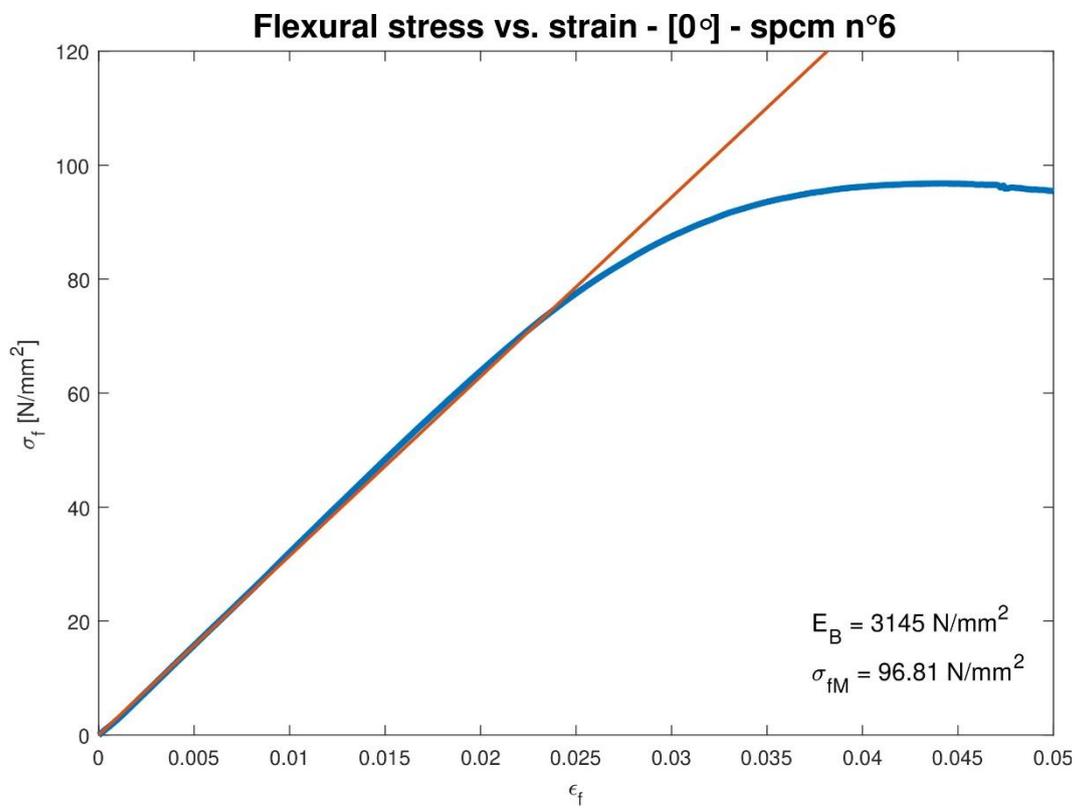
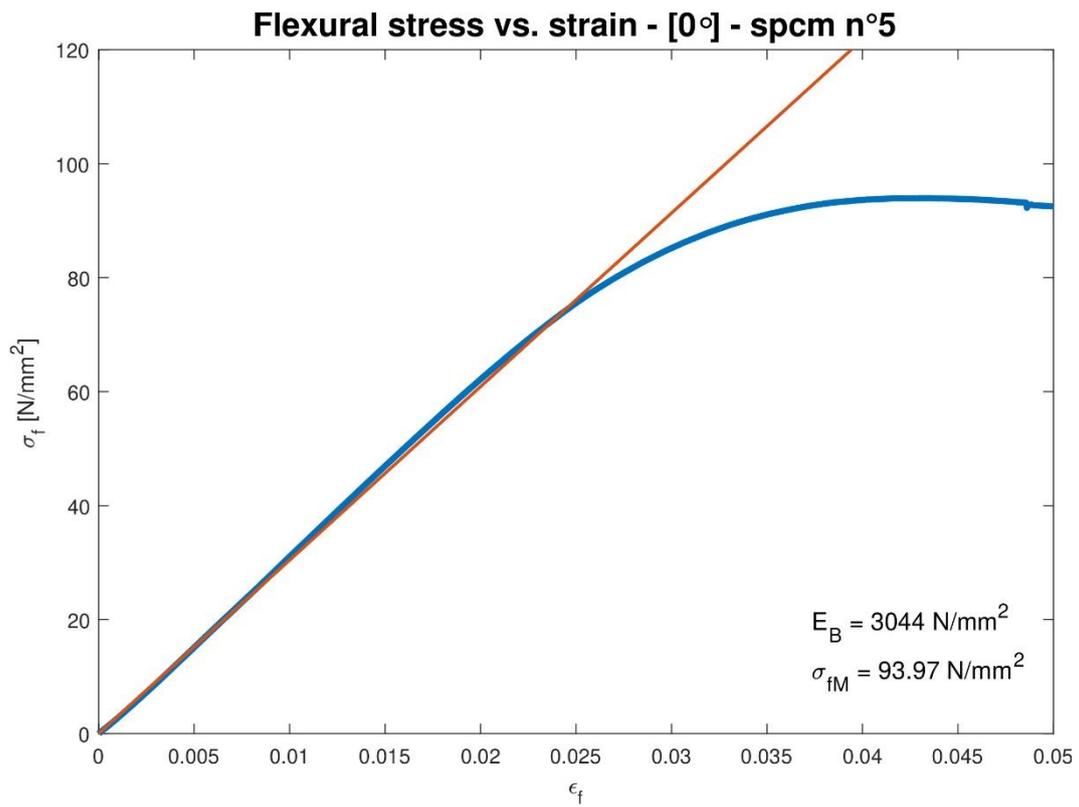
5.7.1 Risultati provini con laminazione lungo la direzione 1 (0°)

Provino N.	$E_B \left[\frac{N}{mm^2} \right]$	$\sigma_{f_{max}} \left[\frac{N}{mm^2} \right]$
1	3077.4	97.0
2	3150.4	96.8
3	3027.1	95.4
4	3019.4	95.1
5	3044.4	94.0
6	3144.8	96.8
MEDIA	3077.3	95.9

Tabella 12 Moduli Elastici e Resistenze a flessione per laminazione a 0°



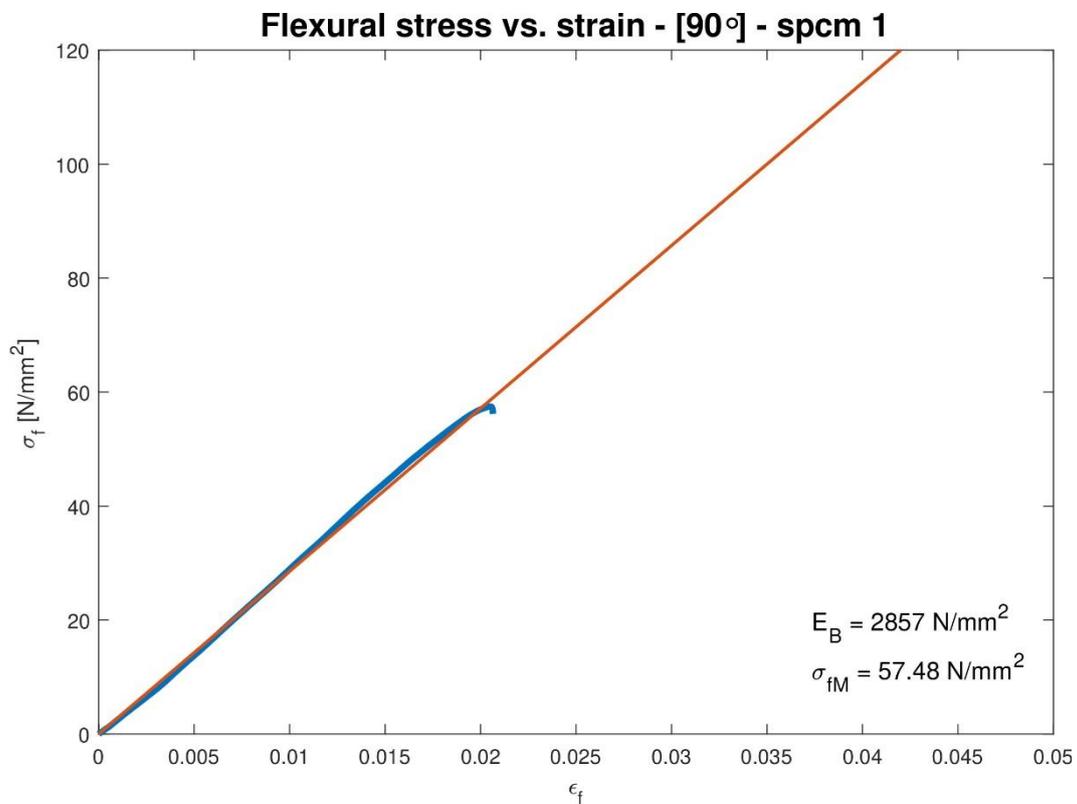


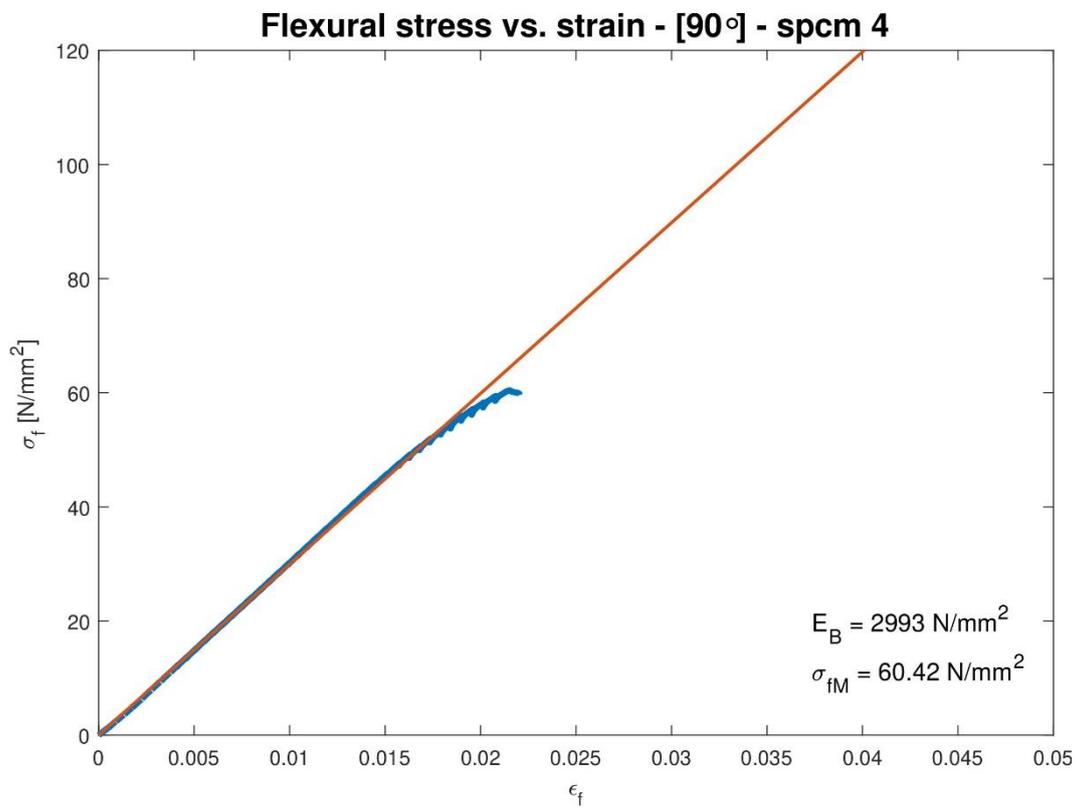
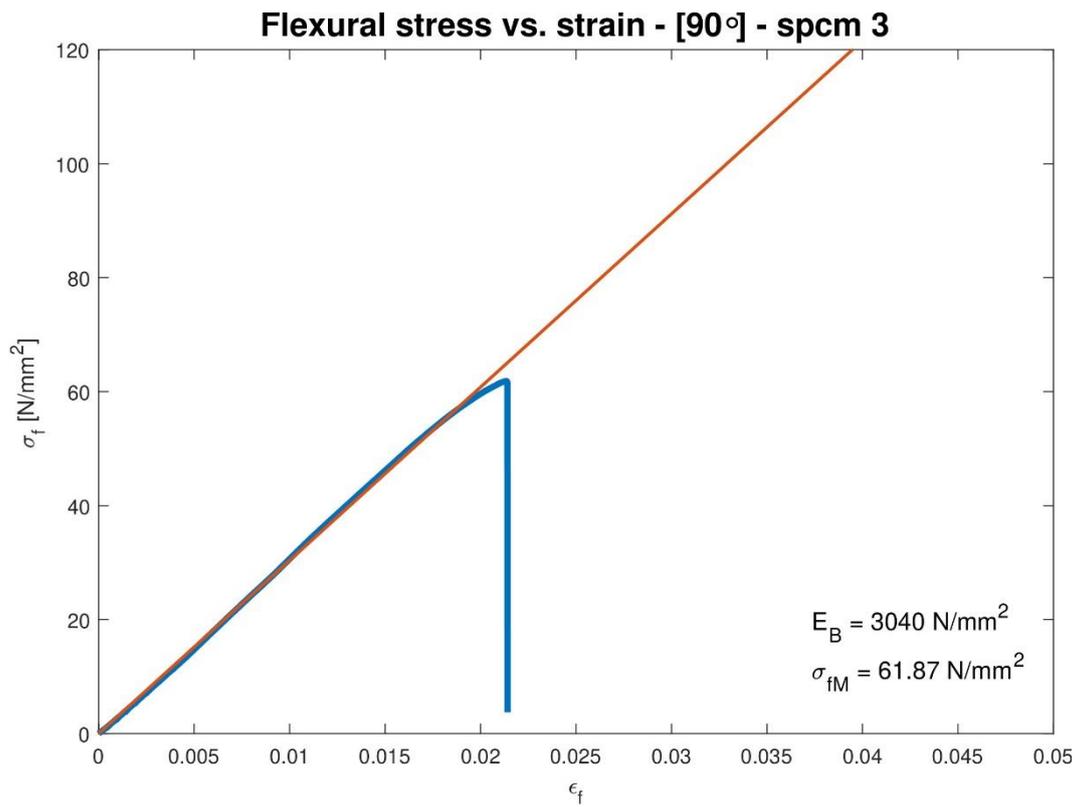


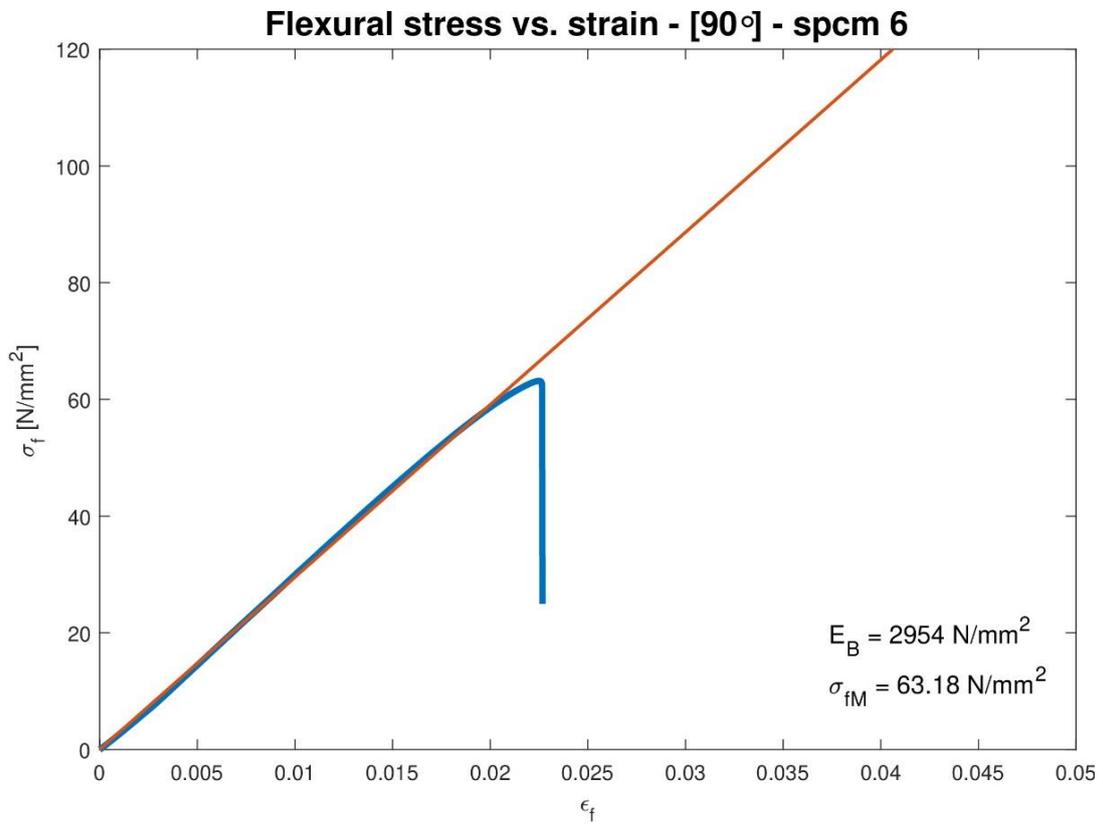
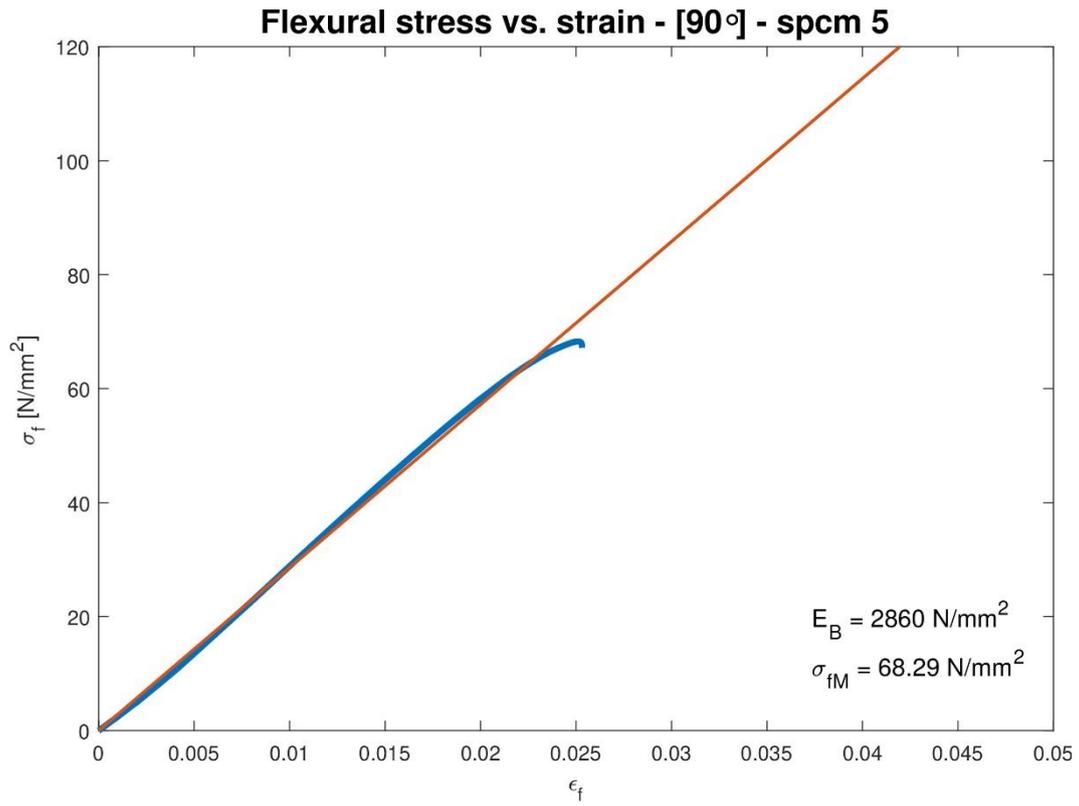
5.7.2 Risultati provini con laminazione lungo la direzione 2 (90°)

Provino N.	$E_B \left[\frac{N}{mm^2} \right]$	$\sigma_{f_{max}} \left[\frac{N}{mm^2} \right]$			
1	2856.9	57.5			
2	3013.7	54			
3	3039.8	61.9			
4	2993.4	60.4			
5	2860.1	68.3			
6	2954.4	63.2			
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="text-align: center;">MEDIA</td> <td style="text-align: center;">2953.05</td> <td style="text-align: center;">60.88333</td> </tr> </table>			MEDIA	2953.05	60.88333
MEDIA	2953.05	60.88333			

Tabella 13 Moduli Elastici e Resistenze a flessione per laminazione a 90°



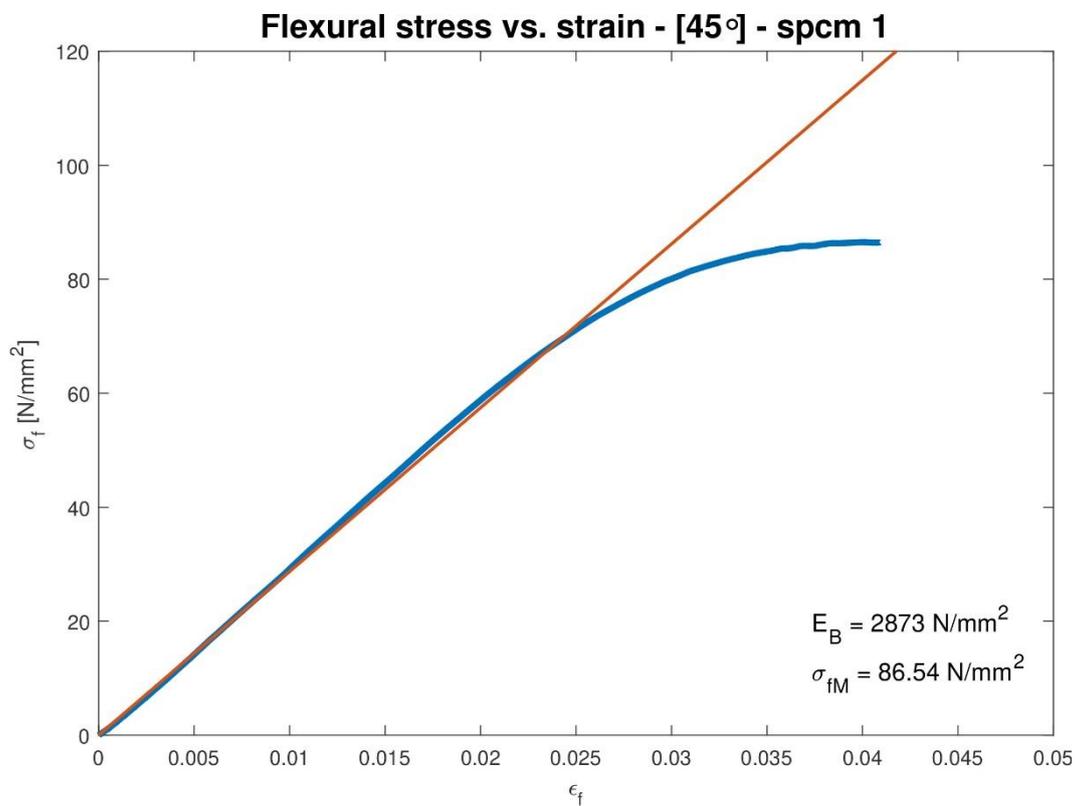


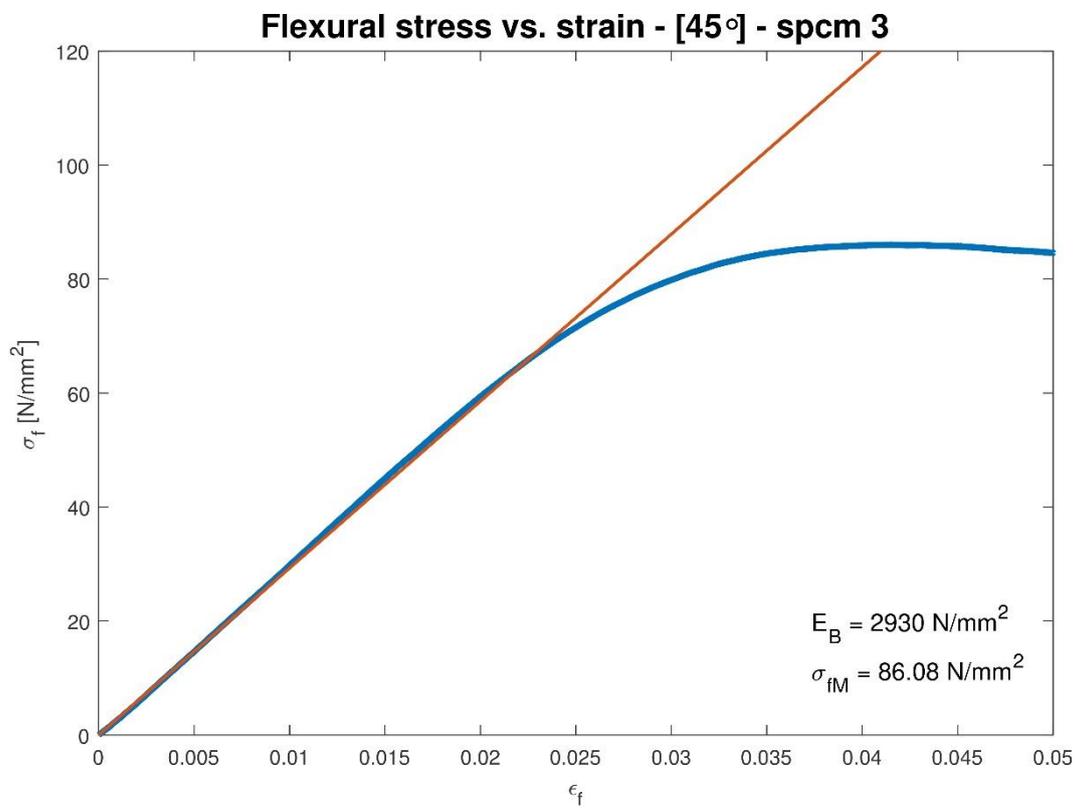
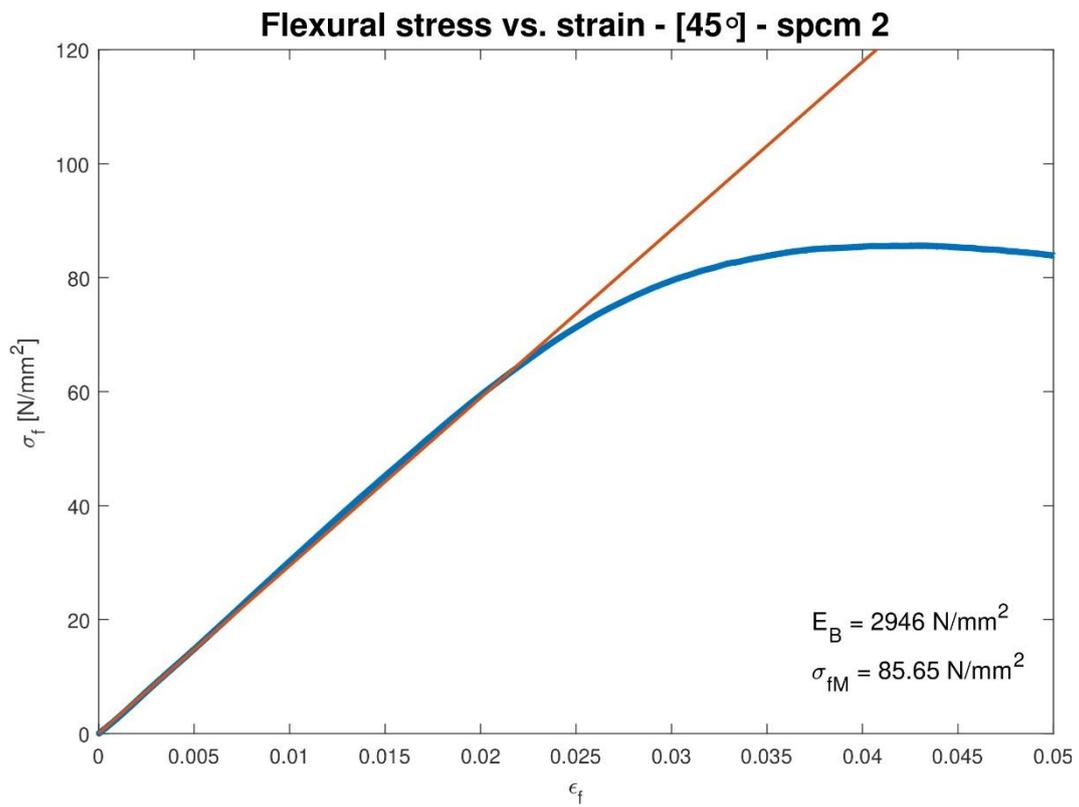


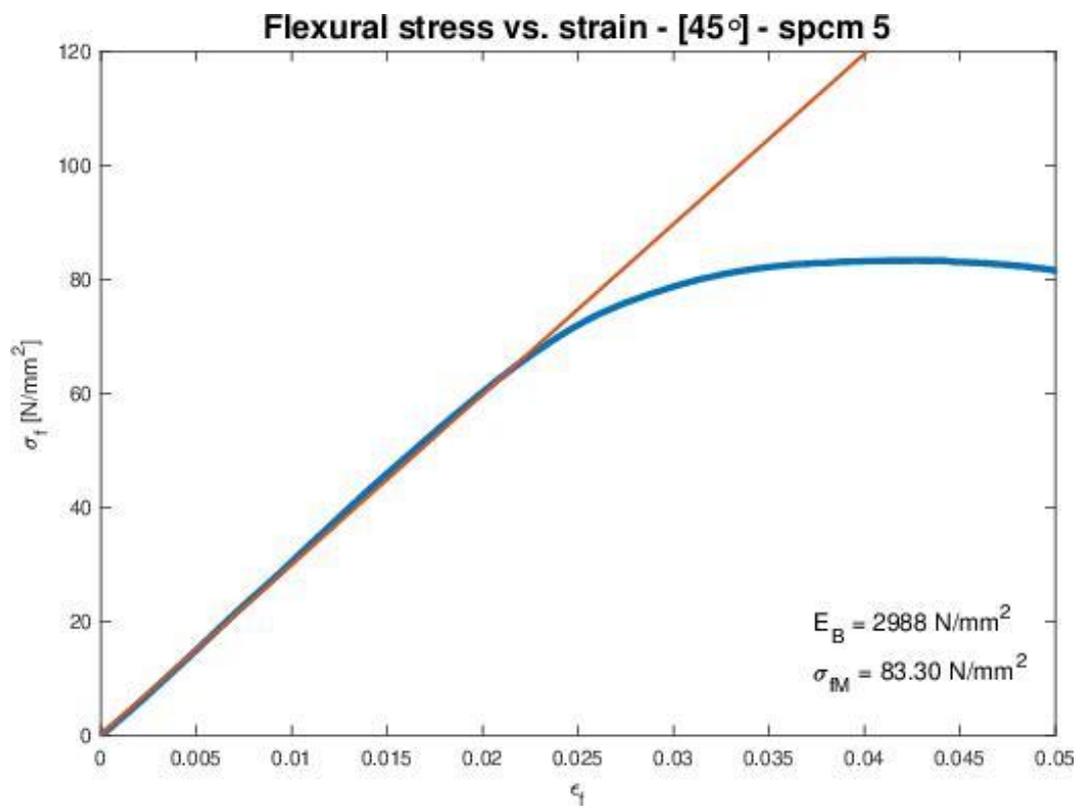
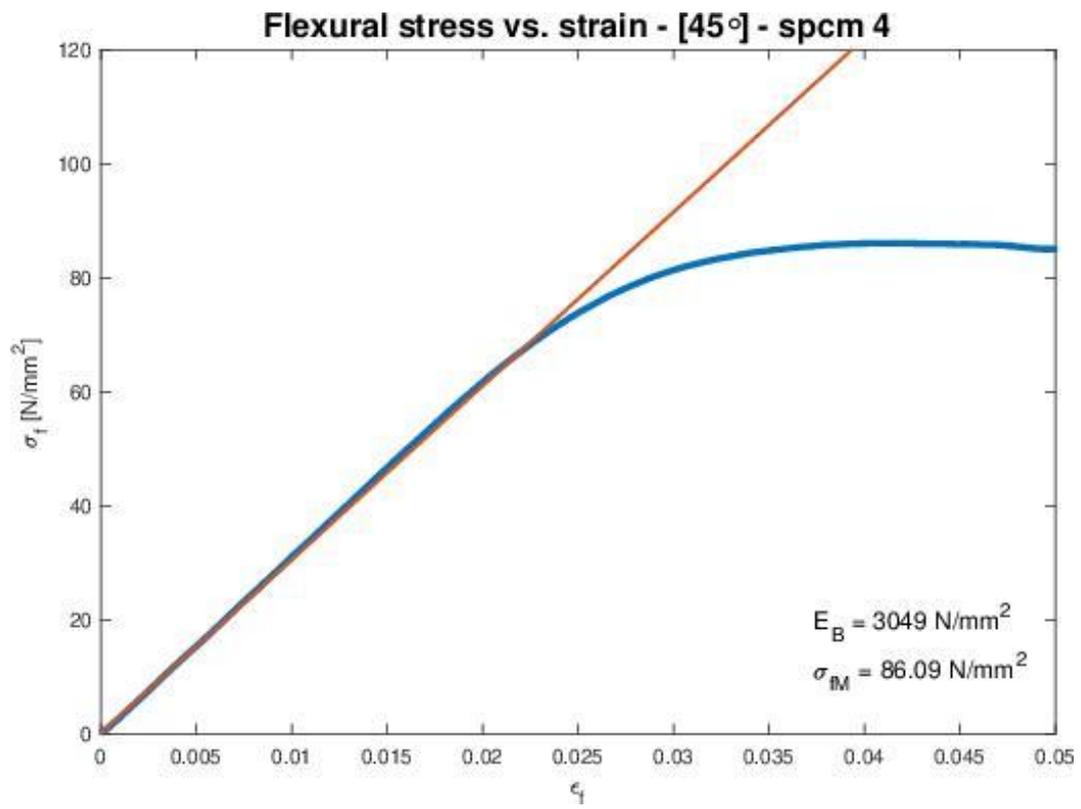
5.7.3 Risultati provini con laminazione 12 ($\pm 45^\circ$)

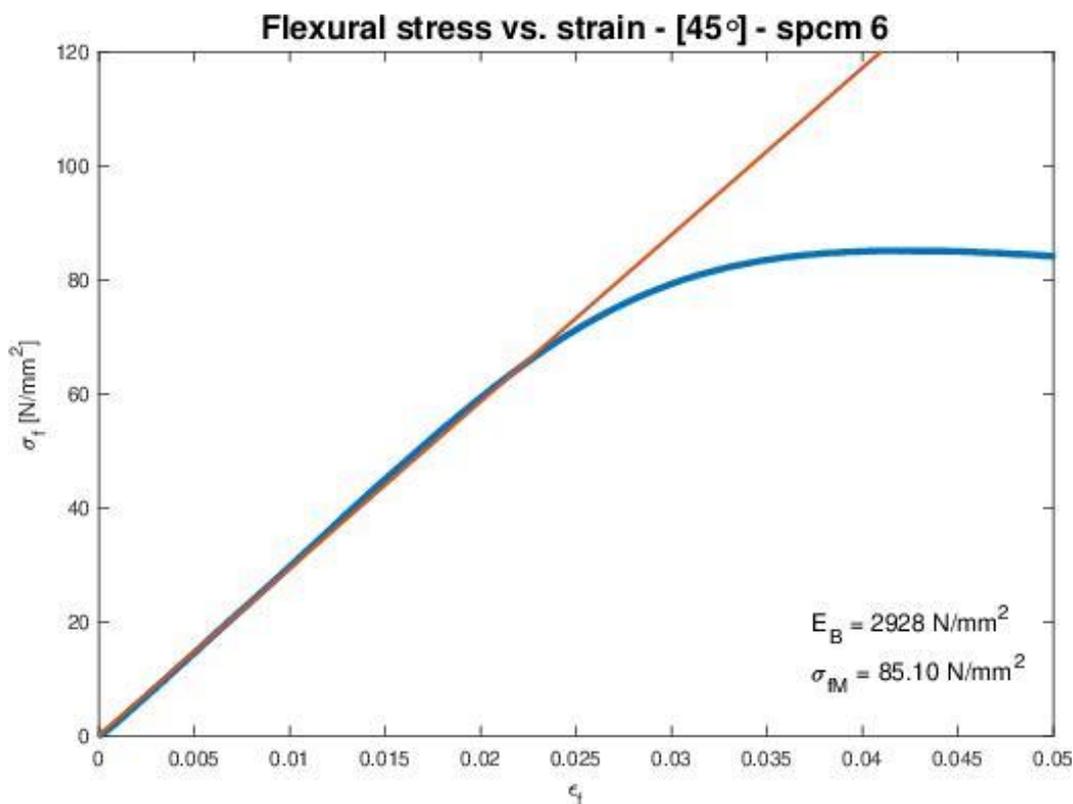
Provino N.	$E_B \left[\frac{N}{mm^2} \right]$	$\sigma_{f_{max}} \left[\frac{N}{mm^2} \right]$
1	2873	86.5
2	2945.8	85.7
3	2929.7	86.1
4	3049.2	86.1
5	2987.6	83.3
6	2928.3	85.1
MEDIA	2952.267	85.46667

Tabella 14 Moduli Elastici e Resistenze a flessione per laminazione a $\pm 45^\circ$









5.8 Analisi dei risultati sperimentali e confronto con FEM

Confrontando i valori medi di modulo e resistenza per le tre tipologie di provino e assumendo le grandezze dedotte dalla laminazione a 0° come quelle di riferimento, si valutano le differenze percentuali con le altre:

	Laminazione a 0°	Laminazione a 90°	Differenza rispetto 0° [%]	Laminazione a 45°	Differenza rispetto 0° [%]
$E_B \left[\frac{N}{mm^2} \right]$	3077.25	2953.05	4.04	2952.27	4.06
$\sigma_{f_{max}} \left[\frac{N}{mm^2} \right]$	95.85	60.88	36.48	85.47	10.83

Tabella 15 Moduli Elastici e Resistenze a flessione a confronto fra le diverse laminazioni nello sperimentale

Si nota subito come il comportamento anisotropo venga sperimentalmente confermato, segnando una differenza nei moduli a flessione di circa il 4% e della resistenza a flessione tra il 10% ed il 36% circa. Per quanto riguarda i valori delle resistenze a tensione, i valori con laminazione a 45° sembrerebbero essere più vicini a quelli ottenuti con una laminazione a 0°,

mentre parlando dei valori del modulo di rigidezza a flessione, per questa stessa configurazione a 45°, sono molto più simili alla laminazione a 90°.

Anche dal modello agli elementi finiti si possono trarre, nello stesso modo che per i risultati sperimentali, i valori dei moduli elastici a flessione. Questi sono stati ricavati per tutte e tre le laminazioni ponendo una deflessione unitaria in mezzzeria.

Auto mesh $D = 1 [mm]$ $\mu = 016$				
Modello ORTOTROPO 2D				
0°	$P [N]$	$E_B \left[\frac{N}{mm^2} \right]$	$E_{B_{provino}} \left[\frac{N}{mm^2} \right]$	Errore rispetto sperimentale 0° [%]
	27.13	3090.18	3077.25	0.42
90°	$P [N]$	$E_B \left[\frac{N}{mm^2} \right]$	$E_{B_{provino}} \left[\frac{N}{mm^2} \right]$	Errore rispetto sperimentale 90° [%]
	25.92	2952.23	2953.05	-0.03
$\pm 45^\circ$	$P [N]$	$E_B \left[\frac{N}{mm^2} \right]$	$E_{B_{provino}} \left[\frac{N}{mm^2} \right]$	Errore rispetto sperimentale 45° [%]
	27.63	3146.66	2952.27	6.58

Tabella 16 Moduli Elastici e Resistenze a flessione a confronto fra sperimentale e FEM ortotropo per le diverse laminazioni

Osservando l'errore percentuale calcolato con i risultati ottenuti sperimentalmente si nota come questi siano essenzialmente inesistenti lungo la laminazione a 0° e la laminazione a 90° e siano dell'ordine del 6% per quanto riguarda la laminazione a 45°. Anche l'errore del 6% rientra in quel 10% di differenza fra FEM e sperimentale che ci si era posti come massimo errore durante la preliminare fase di studio del problema.

Di seguito vengono invece presentati i risultati che il modello FEM produce se al posto di un materiale composito di lamine ortotrope, gli viene fornito un materiale omogeneo isotropo avente le caratteristiche del PLA grezzo, ricavate durante il test di trazione sul filamento.

Auto mesh $D = 1 [mm]$ $\mu = 016$			
Modello ISOTROPO Filamento A			
$P [N]$	$E_B \left[\frac{N}{mm^2} \right]$	$E_{B_{provino}} \left[\frac{N}{mm^2} \right]$	Errore con sperimentale 0° [%]
28.06	3195.79	3077.25	3.85
	$E_B \left[\frac{N}{mm^2} \right]$	$E_{B_{provino}} \left[\frac{N}{mm^2} \right]$	Errore con sperimentale 90° [%]
	3195.79	2953.05	8.22
	$E_B \left[\frac{N}{mm^2} \right]$	$E_{B_{provino}} \left[\frac{N}{mm^2} \right]$	Errore con sperimentale 45° [%]
	3195.79	2952.27	8.25

Tabella 17 Moduli Elastici e Resistenze a flessione a confronto fra sperimentale e FEM isotropo per le diverse laminazioni

In riferimento ai dati appena esposti si nota immediatamente come gli errori percentuali rispetto a quanto trovato nello sperimentale siano indubbiamente più alti. Tenendosi essenzialmente molto bassi per la laminazione a 0°, gli errori crescono per quella a 45° e 90°. Confrontando questi errori con quanto trovato con il modello FEM ortotropo si può affermare che quest'ultimo possa simulare con una precisione maggiore il modello reale ottenendo risultati davvero affini. Per trovare invece risposta agli errori più elevati di entrambi i modelli sulla laminazione a 45°, si necessita di ulteriore studio.

6 Prova di Flesso-Torsione

Una seconda prova di validazione era necessaria per indagare più a fondo sulle proprietà meccaniche del materiale e cercare ulteriori conferme. Con la prova di flesso torsione si sono potute sperimentare geometrie diverse e sollecitare le strutture create in modi meno convenzionali. I provini utilizzati per questo test sono più lunghi rispetto a quelli impiegati nelle prove a flessione su tre punti ed hanno una larghezza maggiore. Sono state prese in considerazione anche geometrie differenti, come strutture ad "L". Tutti i provini, di qualsiasi geometria essi siano, riportano uno spessore pari a 4 mm.

Nelle seguenti immagini (Figura 49 e Figura 50) sono presentate le due tipologie di provini prese in considerazione:

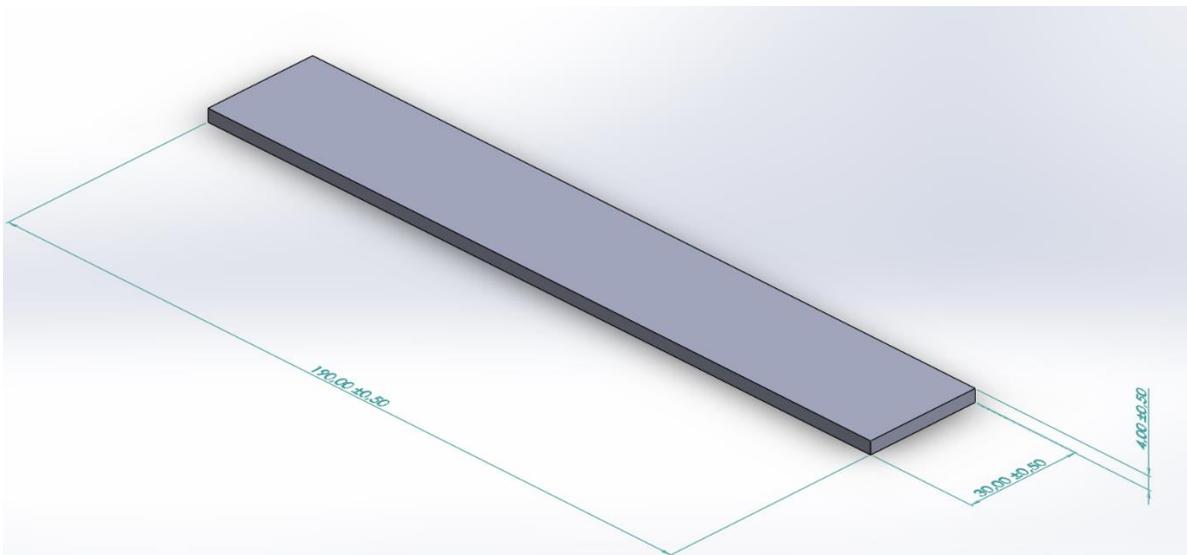


Figura 49 Rappresentazione 3D tramite Solidworks del provino rettilineo usato per il test a Flesso-Torsione

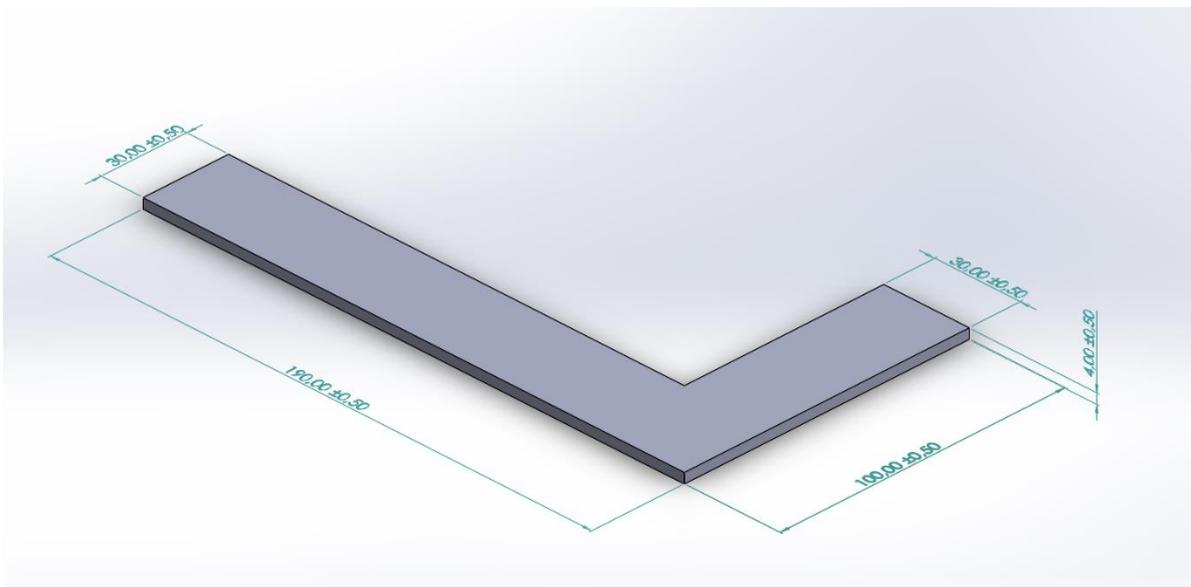


Figura 50 Rappresentazione 3D tramite Solidworks del provino con conformazione a "L" usato per il test a Flesso-Torsione

I parametri di stampa usati per la creazione di queste due tipologie di provino sono i medesimi delle prove precedenti e anche in questo test, si sono realizzate tutte e tre le tipologie di laminazione per l'attuazione di uno studio completo delle varie casistiche.

6.1 Descrizione della prova

L'allestimento per la prova di flesso-torsione non fa uso di macchinari ma consiste nel realizzare un incastro ad un estremo della struttura esaminata e lasciare l'altro estremo libero. L'incastro, creato per più di $\frac{1}{4}$ della lunghezza iniziale del provino, rende l'effettiva lunghezza sottoposta a flessione pari a **140 mm**.

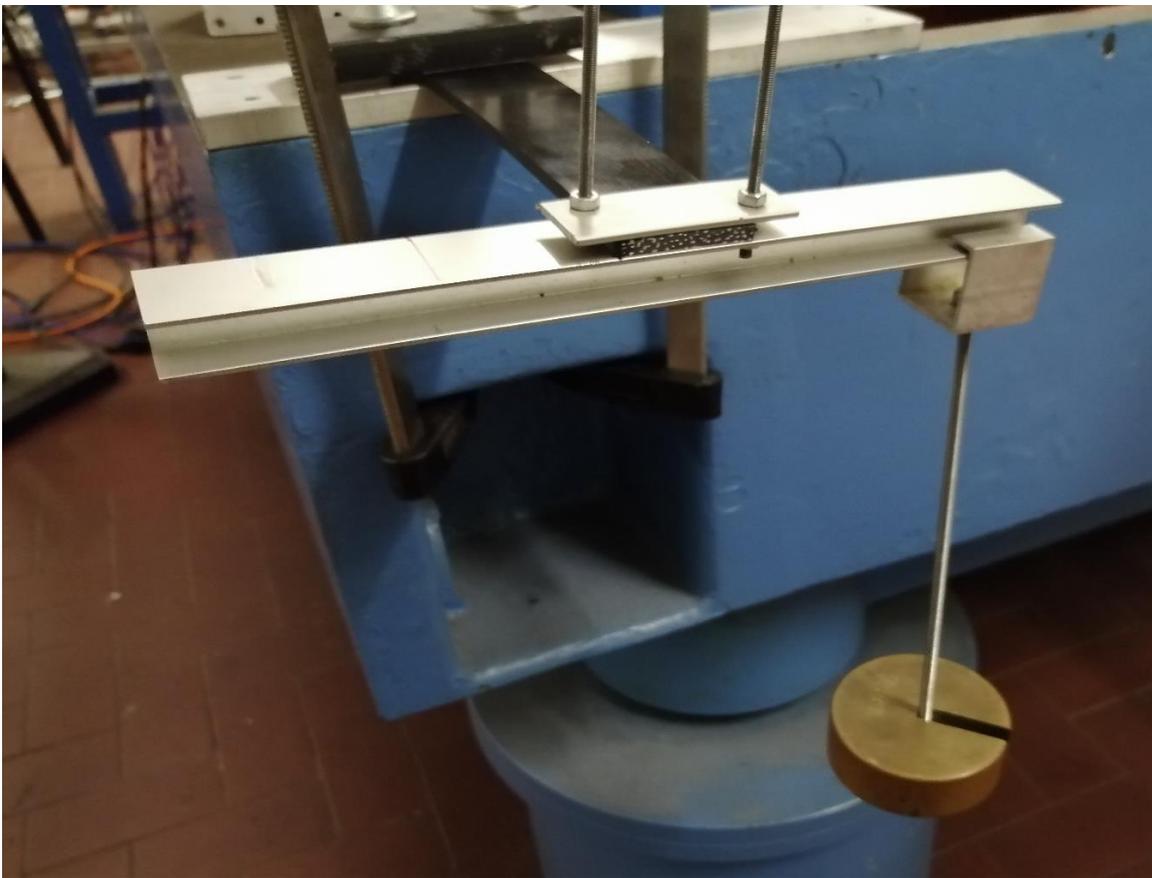


Figura 51 Prova di Flesso-Torsione

Nell'estremo libero viene posizionato, mediante un apposito supporto, un determinato carico, con un braccio di flessione pari a **102.5 mm** rispetto alla superficie laterale del provino nel caso della trave dritta (Figura 52) e di **89 mm** nel caso della trave ad "L" (Figura 53):

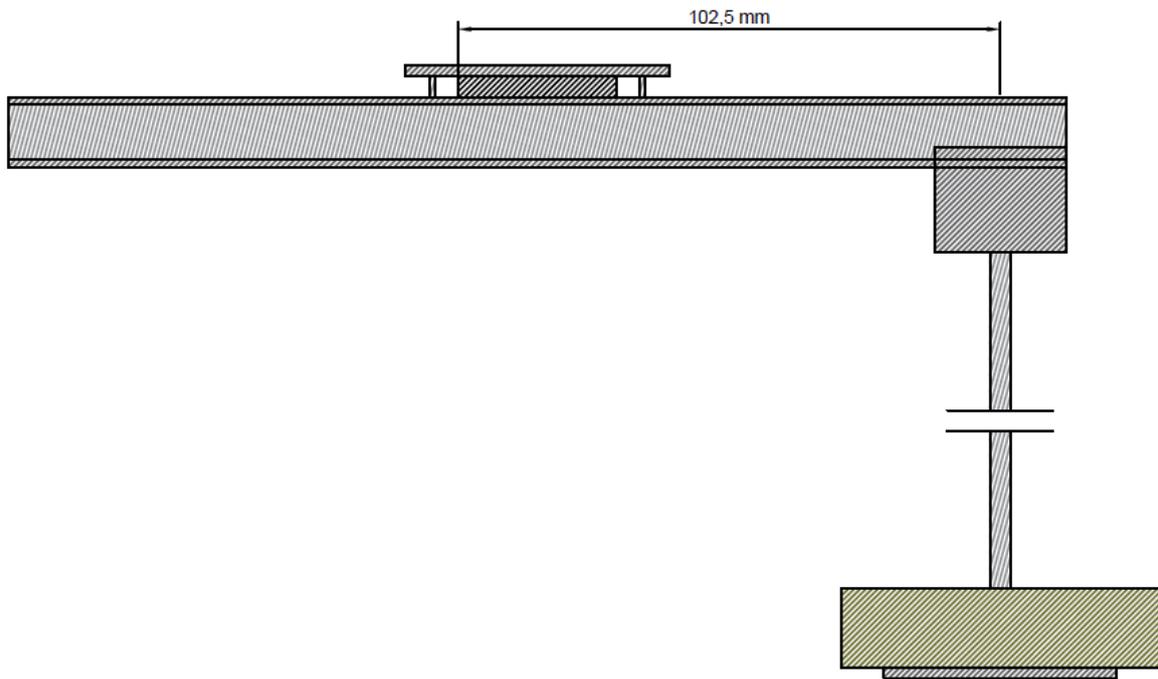


Figura 52 Immagine rappresentativa della struttura di carico usata per il provino rettilineo (VISTA FRONTALE)

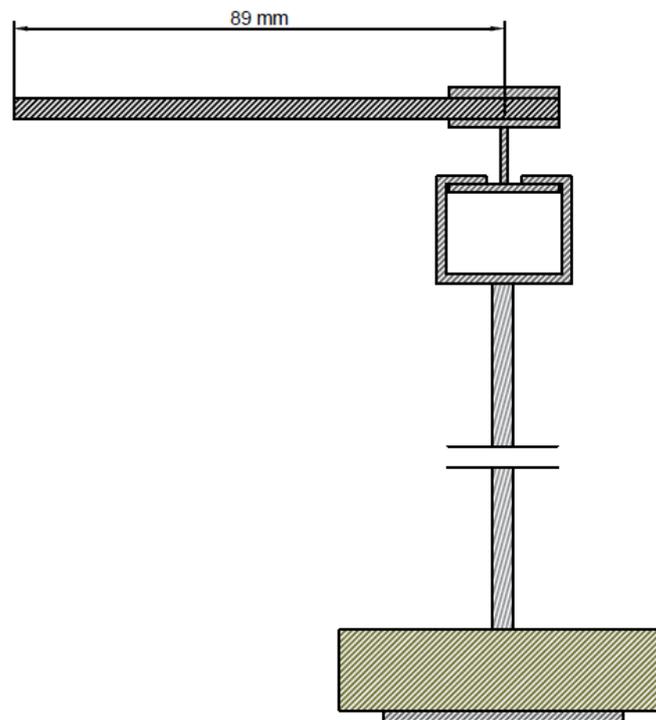


Figura 53 Immagine rappresentativa della struttura di carico usata per il provino ad "L" (VISTA FRONTALE)

Sempre nella Figura 52 e in Figura 53 sono raffigurati i vari componenti della struttura di supporto impiegata per l'applicazione del carico. Essa consiste in una semplice piastrina, combinata con una leggera trave a doppia T di alluminio che insieme si stringono al provino, e una struttura a gancio con piattello per il caricamento dei pesi. Ingombri e pesi sono stati registrati per la trasposizione sul modello ad elementi finiti.

In questa prova si è fatto uso della Digital Image Correlation per la misurazione degli spostamenti e l'output richiesto è stato stavolta lo spostamento verticale della superficie esterna della parte libera del provino. La Figura 52 e Figura 53 rappresentano perfettamente l'inquadratura impostata dall'obiettivo utilizzato. La deflessione misurata è stata quindi il metro di paragone con la medesima grandezza prevista dal modello ad elementi finiti descritto di seguito.

6.1.1 Costruzione del modello FEM

Il modello FEM ricrea fedelmente il test originale: il provino è stato anche qui rappresentato da una superficie composta da elementi Shell 2D, IsoMesh, Quad4 e in egual maniera i supporti.

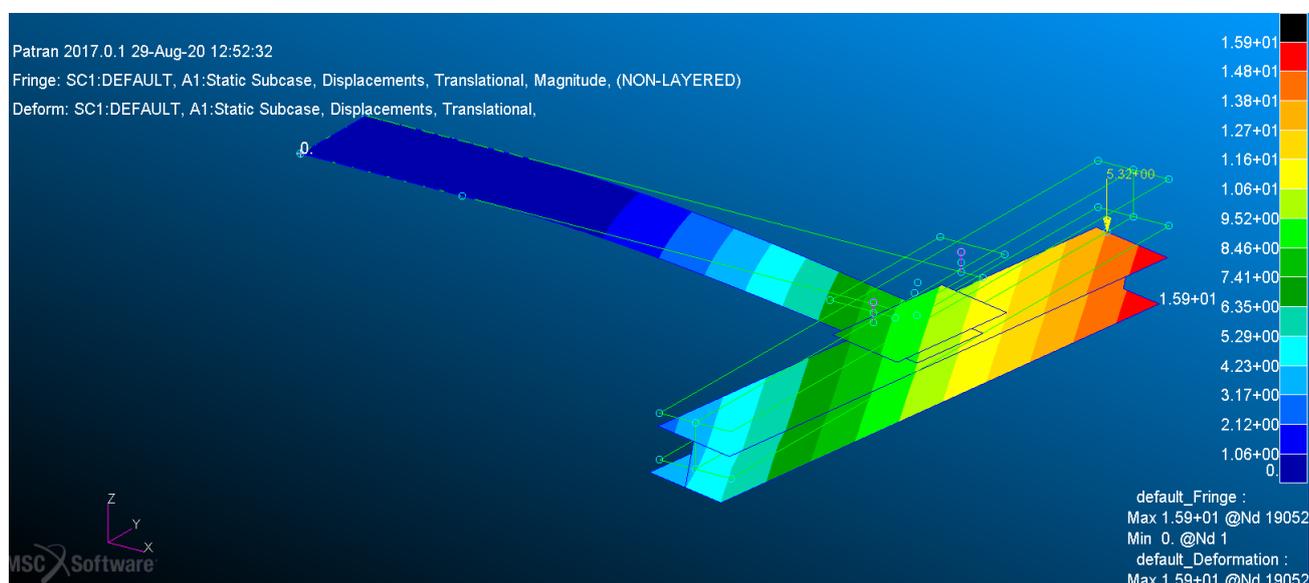


Figura 54 Rappresentazione su Patran del provino rettilineo in configurazione deformata

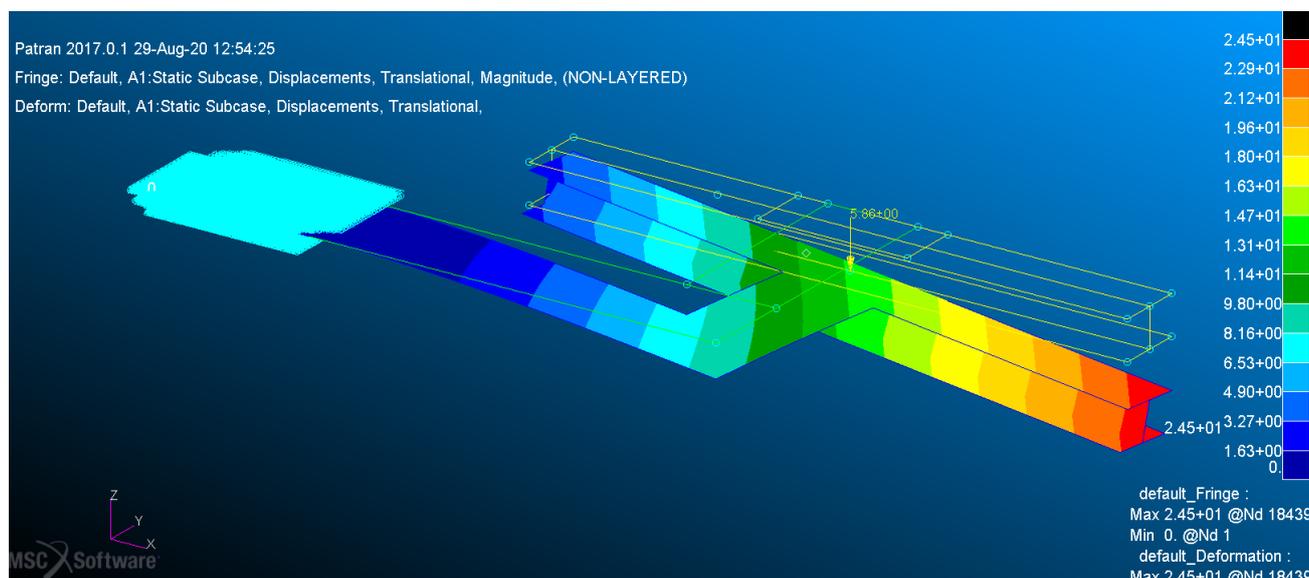


Figura 55 Rappresentazione su Patran del provino ad "L" in configurazione deformata

Per il modello con la trave rettilinea si è posto un carico di sola flessione in corrispondenza del centro di taglio del provino, in modo da rappresentare il peso della struttura di supporto ed a questo si è ovviamente aggiunto il carico di flesso-torsione all'estremità libera con un braccio di 102.5 mm rappresentate la forza peso del piattino di caricamento e del peso stesso (Figura 54). Per quel che riguarda invece il modello FEM del provino ad "L", si è imposto un solo carico comprendente dell'intera struttura più il peso al termine del lato corto del provino (Figura 55). Il supporto è stato invece ricreato con le stesse geometrie dell'originale e dotato delle proprietà meccaniche di un alluminio isotropo, rendendolo effettivamente più rigido rispetto alla trave di PLA esattamente come nel reale. La regione di accostamento fra supporto in alluminio e PLA è stata simulata creando un offset fra le superfici dei relativi modelli ed imponendo tramite l'utilizzo di MPC e dell'analisi di contatto gli stessi spostamenti i nodi facenti parte di tale zona.

Come per la precedente prova di validazione, il modello ad elementi finiti è stato studiato sia con la configurazione ortotropa che con quella isotropa. Il modello isotropo, in questo caso, fa riferimento ai dati ottenuti sulla prova di trazione del Filamento B, con cui sono stati costruiti i provini di questo test, ed avente le seguenti caratteristiche:

- ❖ $E = 3072 \text{ MPa}$
- ❖ $G_{12} = 1181 \text{ MPa}$
- ❖ $\nu_{12} = 0.3$

6.2 Svolgimento dei test preliminari

Per lo svolgimento della prova di flesso-torsione è stato necessario un gran numero di test e sperimentazioni prima di arrivare alla configurazione ottimale che potesse assicurare la bontà dei risultati finali.

Nel corso di una preliminare fase di analisi, sono stati testati un totale di sette provini, sei divisi equamente fra le laminazioni a 0° e 90° ed il restante con laminazione a $\pm 45^\circ$. Una volta registrato l'incastro ed il supporto per il peso aggiuntivo, si è proceduto a sottoporre ogni provino esaminato ad un totale di tre cicli di carico-scarico, addizionando e rimuovendo una massa da 500g. Una volta caricato il peso, il più possibile staticamente, prima di una registrazione dei dati si è aspettato un tempo tale da far dissipare ogni oscillazione visibile dall'obbiettivo di inquadratura. Il motivo dei diversi cicli di carico-scarico risiede nella ricerca di eliminare ogni qualsivoglia effetto di accomodamento del provino all'interno della struttura usata per l'incastro. L'ultimo e banale vantaggio di questo procedimento è l'ottenimento di un numero maggiore di dati da poter processare, confrontare e da cui trarre conclusioni. Ogni fase di carico e scarico ha dovuto quindi rispettare delle tempistiche che hanno permesso una cattura dell'immagine, su cui fare la DIC, il più possibile ferma e rappresentativa.

Durante la riprese effettuate sul provino dritto non si è incorso ad alcun problema, mentre sono sorte preoccupazioni quando è stata la volta del provino con configurazione ad "L". Come già affermato, per eseguire la Digital Image Correlation si ha fortemente bisogno di avere una visione chiara dell'intera superficie di cui si intendono misurare gli spostamenti, e

a causa della configurazione stessa del sistema di prova ciò non è stato pienamente possibile per quest'ultima configurazione.

Di seguito, nella Figura 56 è possibile avere una visione dei problemi sopraggiunti:

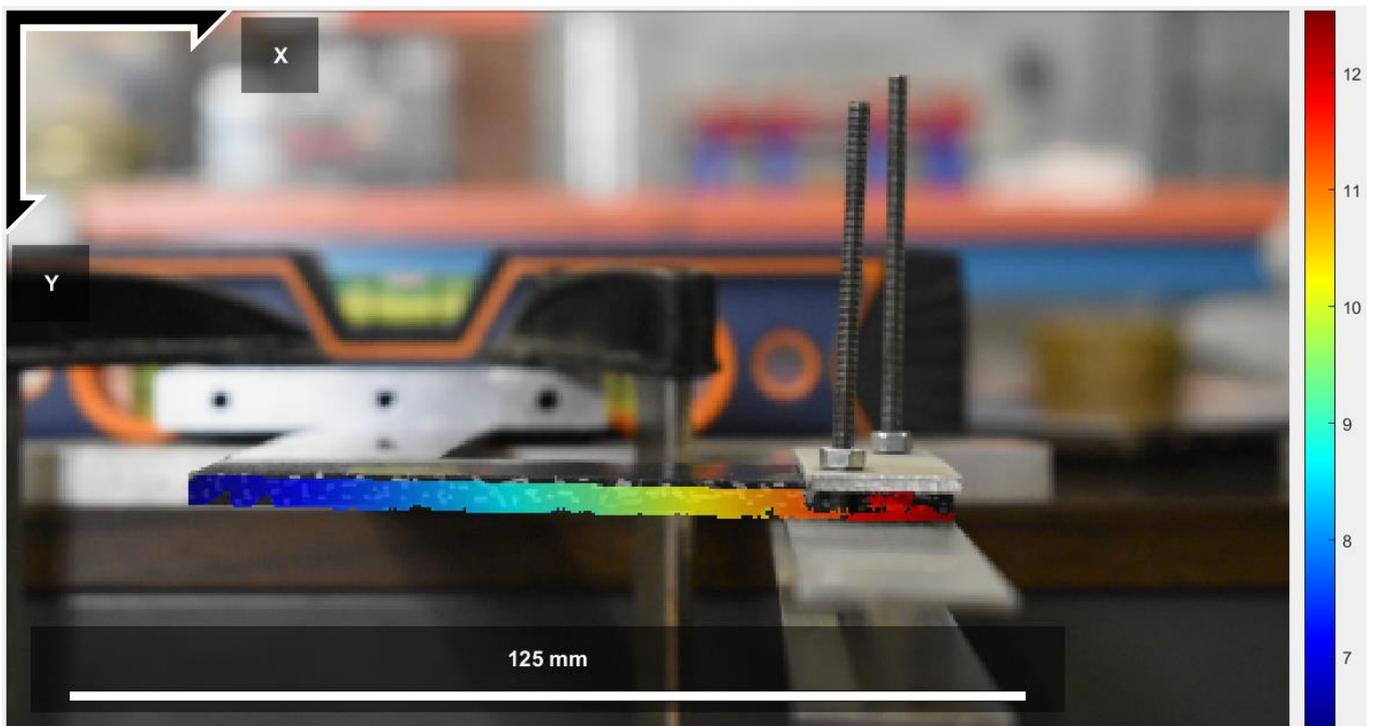
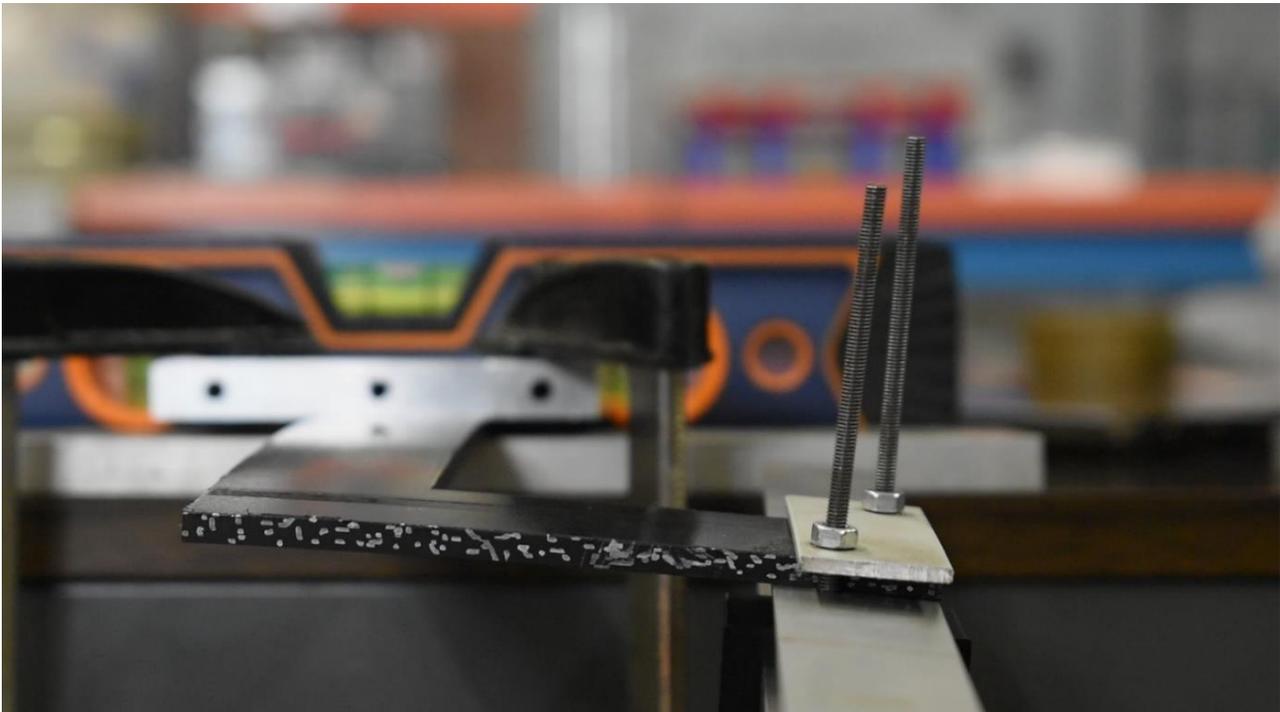


Figura 56 Immagini dallo scopo rappresentativo delle difficoltà riscontrate durante la fase di carico del provino ad "L".

Come si può osservare la struttura che permette il caricamento del provino, durante la fase di carico ostruisce la visuale della parte terminale della superficie, oltre ad ombreggiarne

un'ulteriore zona. Mentre il secondo problema è risolvibile con una adeguata illuminazione, per il primo problema non vi è facile risoluzione, dato che il punto di vista dell'obbiettivo deve rimanere invariato. Inoltre, se confrontato con il provino di conformazione dritta, quello ad "L" necessita una ripresa più larga e "meno zoomata" che possa inquadrare l'intera superficie, questo però comporta l'impossibilità di poter dedicare un maggior numero di pixel a questa stessa zona, con una diminuzione della precisione della DIC stessa. A questo si aggiunge il sospetto che la flessione-torsione di questa particolare configurazione potesse portare ad uno spostamento perpendicolare al piano di inquadratura eccessivo. A valle di queste considerazioni, si è deciso di continuare la prova di validazione sui soli provini con conformazione rettilinea, benché i valori dei provini ad "L" stessero producendo risultati simili a quelli del modello ad elementi finiti.

6.2.1 Risultati test a flessione-torsione preliminare su provini dritti

<u>RISULTATI LAMINAZIONE A 0°</u>				
Provino n.1		Deflessione misurata estremo sinistro [mm]	Deflessione misurata estremo destro [mm]	Rotazione [°]
	Ciclo di carico 1	7.20	9.23	3.89
	Ciclo di carico 2	7.29	9.36	3.95
	Ciclo di carico 3	7.26	9.36	4.01
Provino n.2				
	Ciclo di carico 1	7.52	9.63	4.02
	Ciclo di carico 2	7.62	9.75	4.07
	Ciclo di carico 3	7.50	9.68	4.17
Provino n.3				
	Ciclo di carico 1	7.09	9.13	3.91
	Ciclo di carico 2	7.17	9.26	4.00
	Ciclo di carico 3	7.22	9.34	4.04
	FEM ORTOTROPO	7.75	9.70	3.72
	FEM ISOTROPO FILAMENTO B	7.40	9.66	4.31

Tabella 18

Errore modello FEM Ortotropo 0° rispetto a Sperimentale 0°

		Errore deflessione estremo sinistro	Errore deflessione estremo destro	Errore Rotazione
Provino n.1		[%]	[%]	[%]
	Ciclo di carico 1	7.16	4.80	-4.60
	Ciclo di carico 2	5.90	3.44	-6.33
	Ciclo di carico 3	6.39	3.54	-7.82
Provino n.2				
	Ciclo di carico 1	3.00	0.74	-8.23
	Ciclo di carico 2	1.74	-0.50	-9.43
	Ciclo di carico 3	3.26	0.15	-12.23
Provino n.3				
	Ciclo di carico 1	8.60	5.82	-5.25
	Ciclo di carico 2	7.57	4.54	-7.52
	Ciclo di carico 3	6.80	3.69	-8.71

Tabella 19

Errore modello FEM Isotropo rispetto a Sperimentale 0°

		Errore deflessione estremo sinistro	Errore deflessione estremo destro	Errore Rotazione
Provino n.1		[%]	[%]	[%]
	Ciclo di carico 1	2.76	4.40	9.81
	Ciclo di carico 2	1.43	3.04	8.32
	Ciclo di carico 3	1.95	3.14	7.03
Provino n.2				
	Ciclo di carico 1	-1.61	0.33	6.68
	Ciclo di carico 2	-2.93	-0.92	5.65
	Ciclo di carico 3	-1.33	-0.27	3.23
Provino n.3				
	Ciclo di carico 1	4.26	5.43	9.25
	Ciclo di carico 2	3.18	4.14	7.30
	Ciclo di carico 3	2.38	3.29	6.27

Tabella 20

RISULTATI LAMINAZIONE A 90°

Provino n.1		Deflessione misurata estremo sinistro [mm]	Deflessione misurata estremo destro [mm]	Rotazione [°]
	Ciclo di carico 1	7.06	9.39	4.46
	Ciclo di carico 2	6.96	9.39	4.64
	Ciclo di carico 3	6.96	9.37	4.59
Provino n.2				
	Ciclo di carico 1	7.61	8.80	2.26
	Ciclo di carico 2	7.69	8.89	2.28
	Ciclo di carico 3	7.69	8.92	2.34
Provino n.3				
	Ciclo di carico 1	7.65	9.72	3.96
	Ciclo di carico 2	7.67	9.79	4.05
	Ciclo di carico 3	7.62	9.79	4.15
	FEM ORTOTROPO	8.15	10.11	3.73
	FEM ISOTROPO FILAMENTO B	7.40	9.66	4.31

Tabella 21

Errore modello FEM Ortotropo 90° rispetto a Sperimentale 90°

Provino n.1		Errore deflessione estremo sinistro [%]	Errore deflessione estremo destro [%]	Errore Rotazione [%]
	Ciclo di carico 1	13.47	7.07	-19.70
	Ciclo di carico 2	14.61	7.08	-24.40
	Ciclo di carico 3	14.62	7.31	-23.21
Provino n.2				
	Ciclo di carico 1	6.63	12.94	39.32
	Ciclo di carico 2	5.63	12.05	38.90
	Ciclo di carico 3	5.66	11.75	37.24
Provino n.3				
	Ciclo di carico 1	6.23	3.80	-6.36
	Ciclo di carico 2	5.88	3.08	-8.66
	Ciclo di carico 3	6.51	3.07	-11.30

Tabella 22

Errore modello FEM Isotropo rispetto a Sperimentale 90°

		Errore deflessione estremo sinistro	Errore deflessione estremo destro	Errore Rotazione
Provino n.1		[%]	[%]	[%]
	Ciclo di carico 1	4.67	2.77	-3.46
	Ciclo di carico 2	5.92	2.78	-7.53
	Ciclo di carico 3	5.93	3.02	-6.49
Provino n.2				
	Ciclo di carico 1	-2.87	8.91	47.55
	Ciclo di carico 2	-3.98	7.98	47.18
	Ciclo di carico 3	-3.95	7.67	45.75
Provino n.3				
	Ciclo di carico 1	-3.31	-0.65	8.06
	Ciclo di carico 2	-3.69	-1.41	6.08
	Ciclo di carico 3	-3.00	-1.41	3.80

Tabella 23

RISULTATI LAMINAZIONE A ±45°

Provino n.1	Deflessione misurata estremo sinistro [mm]	Deflessione misurata estremo destro [mm]	Rotazione [°]
Ciclo di carico 1	7.13	9.96	5.42
Ciclo di carico 2	7.63	10.14	4.78
Ciclo di carico 3	7.72	10.22	4.79
FEM ORTOTROPO	7.54	9.61	3.97
FEM ISOTROPO FILAMENTO B	7.40	9.66	4.31

Tabella 24

Errore modello FEM Ortotropo $\pm 45^\circ$ rispetto a Sperimentale $\pm 45^\circ$

Provino n.1	Errore deflessione estremo sinistro	Errore deflessione estremo destro	Errore Rotazione
	[%]	[%]	[%]
Ciclo di carico 1	5.44	-3.64	-36.57
Ciclo di carico 2	-1.29	-5.43	-20.43
Ciclo di carico 3	-2.42	-6.35	-20.57

Tabella 25

Errore modello FEM Isotropo rispetto a Sperimentale $\pm 45^\circ$

Provino n.1	Errore deflessione estremo sinistro	Errore deflessione estremo destro	Errore Rotazione
	[%]	[%]	[%]
Ciclo di carico 1	3.72	-3.16	-25.73
Ciclo di carico 2	-3.13	-4.94	-10.87
Ciclo di carico 3	-4.29	-5.86	-11.00

Tabella 26

Dai risultati conseguiti in questa serie di prove si possono trarre numerose osservazioni.

In primo luogo, per ognuna delle tre diverse laminazioni ed in ogni provino si sono ottenuti valori di deflessioni differenti per ogni ciclo di carico. Queste piccole variazioni risultano tuttavia differenze di alcuni punti percentuali se si osservano gli errori. La variabilità di questi dati può essere spiegata introducendo il fattore umano. Poiché il processo è stato svolto senza l'utilizzo di alcuna macchina, tempistiche e modi di caricamento possono essere risultate variabili in ogni ciclo di carico scarico, per quanto si possa aver cercato di applicare le medesime modalità ogni volta.

Parlando degli errori, per quanto entrambi i modelli agli elementi finiti contraddistinguono differenze generalmente minori del 10% rispetto ai valori sperimentali, il modello isotropo (sfondo celeste) risulta essere spesso quello con gli errori minori. Ciò risultava in contraddizione con quanto affermato nella prova di flessione su tre punti, la quale esecuzione, non poteva però essere messa in dubbio.

Trattandosi però solo di prove preliminari si è ritenuto necessario indagare maggiormente sul comportamento riscontrato dei provini, risultati più rigidi di quanto previsto dai modelli agli elementi finiti. Si è perciò scelto di studiare più approfonditamente temi su cui vi era insicurezza.

I prossimi passi affrontati sono stati effettuati ricercando la soluzione alle seguenti perplessità:

- ❖ Quantità di peso caricato: Assicurare la giusta deflessione del provino con il giusto peso. Una eccessiva deflessione potrebbe indurre spostamenti perpendicolari al piano focale della superficie correlata dalla DIC, che rivelerebbe spostamenti verticali non esatti.
- ❖ Modalità di caricamento dei provini: Accertare che il tempo atteso dopo il caricamento del peso aggiuntivo fosse sufficiente per l'acquisizione della misura corretta di deflessione;

Per poter rispondere a tali quesiti, è stato necessario l'esecuzione di nuovi test.

6.2.2 Indagine sull'effetto della deflessione

Un primo test si è quindi occupato di esplorare l'effetto del peso, e consecutiva deflessione, in relazione all'errore misurato rispetto al modello FEM.

Per questo scopo si è svolta un prova di semplice flessione, ossia con carico aggiuntivo posto in corrispondenza del centro di taglio della sezione del provino, come mostrato in Figura 57:

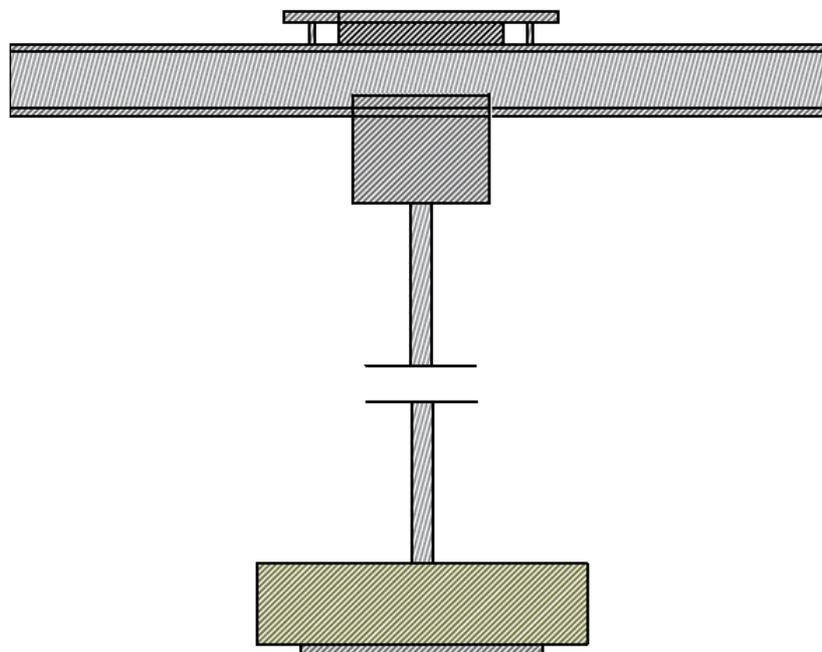


Figura 57 Configurazione del test di flessione semplice

La deflessione del provino si è esplorata con tre carichi differenti:

- ❖ 200g;
- ❖ 500g;
- ❖ 1000g;

utilizzando provini aventi le seguenti dimensioni:

- ❖ Lunghezza = 190 mm;
- ❖ Larghezza = 25 mm;
- ❖ Spessore = 3 mm;

e laminazione a 0°. Tali provini sono stati sempre realizzati a partire dal lotto di PLA indicato come Filamento B.

Gli spostamenti verticali misurati sono stati confrontati con un apposito modello FEM ortotropo che simula tale prova:

	Deflessione verticale sperimentale [mm]	Deflessione verticale Modello FEM Ortotropo [mm]	Errore Deflessione rispetto al FEM [%]
200g	8.1082	8.995118	9.859992943
500g	20.2945	22.946706	11.55811209
1000g	33.86661932	45.893211	26.20560083

Tabella 27 Correlazione deflessione/carico e confronto con il modello FEM ortotropo

Dai risultati ottenuti si osserva una correlazione fra l'aumento del peso aggiunto e il crescere dell'errore percentuale rispetto al modello agli elementi finiti. Come già affermato precedentemente questo aumento dell'errore può essere causato da una eccessiva deflessione della trave e suggerisce la scelta di un peso minore che possa far ottenere una geometria di flessione più lineare rispetto alla vista laterale.

Di fatto, confrontando questa prova con quella svolta precedentemente, si noterà come le deflessioni e conseguentemente gli errori rispetto al FEM abbiano grandezze paragonabili.

Si è quindi presa la decisione di adottare nelle successive prove solo il peso aggiuntivo da 200g per poter ottenere, sulla stessa tipologia di provino utilizzata nei primi test di flessione-torsione, una minore deflessione.

6.2.3 Analisi degli spostamenti perpendicolari al piano focale

Una successiva prova è stata svolta per verificare che la deflessione imposta alla trave non possa allontanare eccessivamente in direzione x (vedi Figura 58) la superficie su cui sinora sono state eseguite le misurazione degli spostamenti verticali, dalla posizione a riposo.

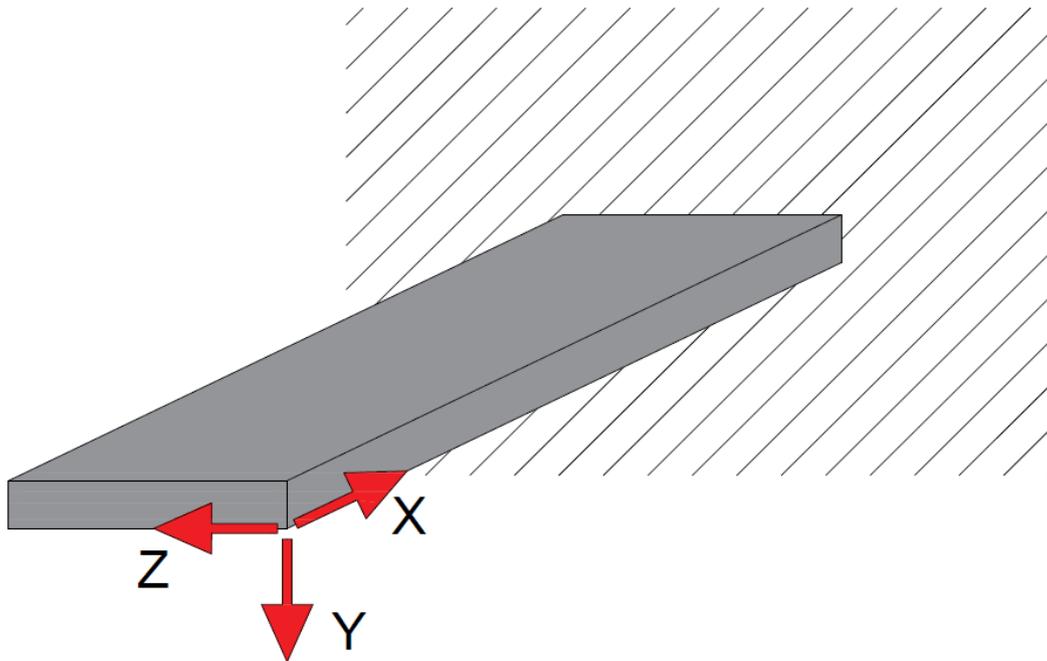


Figura 58 Rappresentazione dell'incastro e sistema di riferimento

Imponendo un carico da 200g all'estremità libera della trave come descritto ad inizio capitolo, è stata eseguita un'analisi DIC laterale che potesse dare un'idea dell'entità dello spostamento in direzione delle ascisse che si può ottenere con tale deflessione.

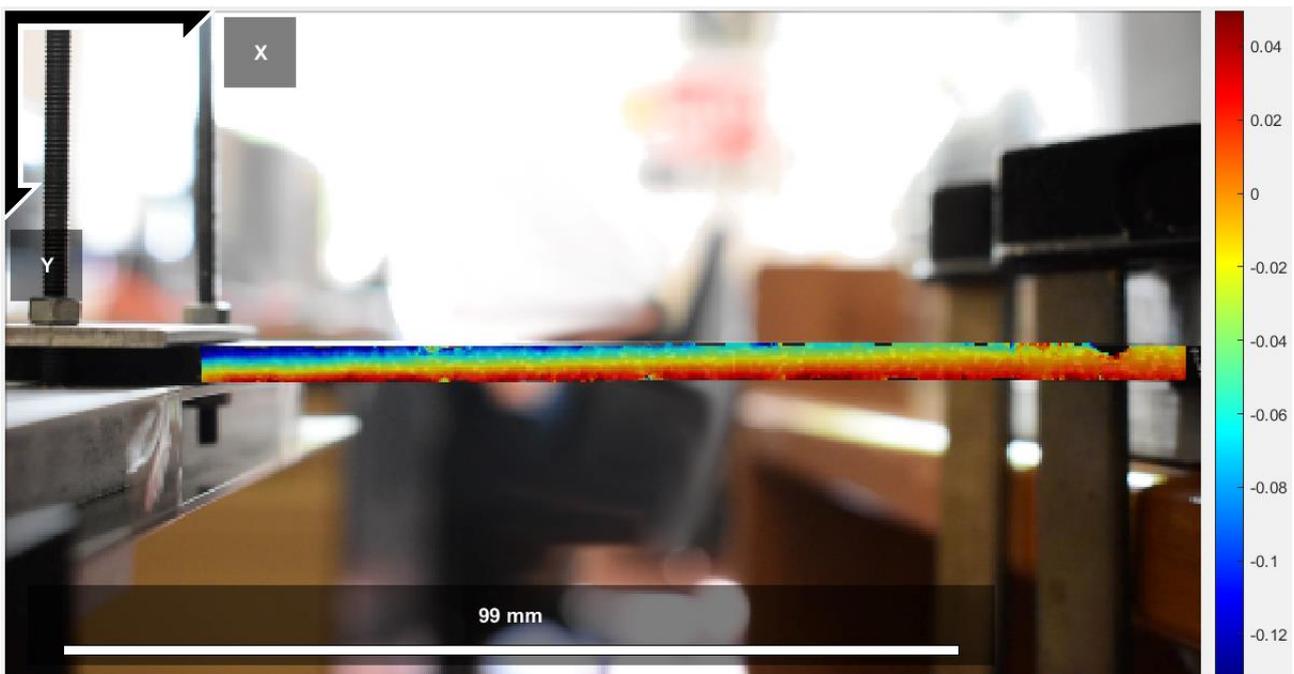


Figura 59 Mappa degli spostamenti in direzione x sulla superficie laterale del provino

Tale analisi, come possibile vedere dalla Figura 59, mostra chiaramente che tali spostamenti sono nell'ordine di un decimo di millimetro e possono considerarsi trascurabili. Non è quindi imputabile a questo fenomeno, con questa deflessione imposta da un carico di 200g, un errore sostanziale nella misurazione degli spostamenti verticali di estremità.

La conferma dei suddetti risultati tramite FEM, valida ulteriormente la capacità della DIC di svolgere questo tipo di analisi.

6.2.4 Effetto del tempo sulla deflessione

Nelle precedenti prove di flesso-torsione il tempo di attesa fra una fase di carico e la successiva ha sicuramente interpretato un ruolo fondamentale nella misurazione dei risultati. La DIC infatti non permette una lettura in diretta della misurazione come è invece possibile fare con l'utilizzo di un trasduttore LVDT e la sola verifica visiva non poteva escludere totalmente la presenza di eventuali fluttuazioni dello spostamento verticale.

È stata quindi organizzata una prova di flesso-torsione sul provino, prolungata per un lungo intervallo di tempo, tale da poter assicurare la completa staticità dell'intera struttura. Mediante software, sono stati prelevati dal video della prova diversi frame equamente distanziati nel tempo dopo il caricamento di un peso da 200g.

Il grafico che si viene a comporre correlando gli spostamenti verticali al tempo è il seguente:

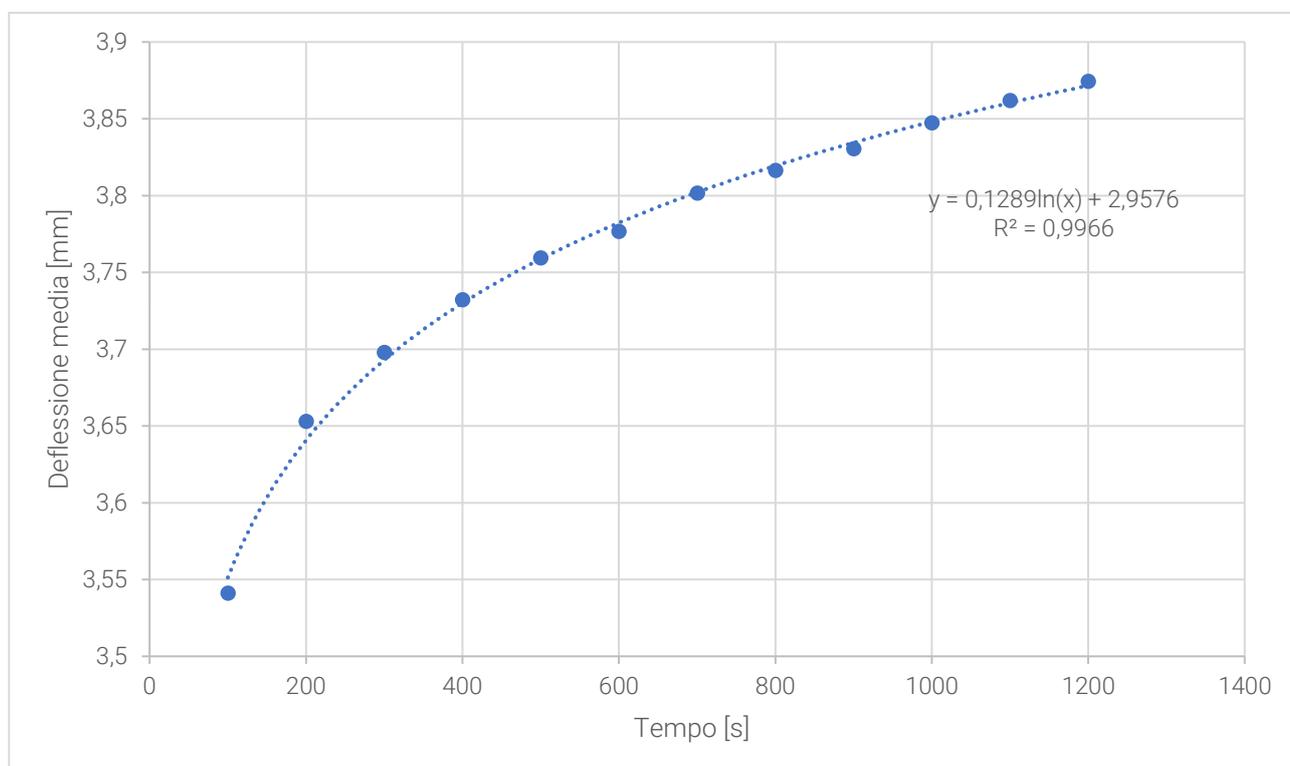


Figura 60 Andamento della deflessione in relazione col tempo di attesa dal momento dell'applicazione del carico

Il lettore osserverà come all'aumentare del tempo, vi sia un incremento della deflessione. Per quanto la relazione che meglio approssima questo andamento sembra essere una logaritmica, è corretto ipotizzare una tendenza asintotica ad un determinato valore di spostamento verticale per un tempo teoricamente infinito di svolgimento della prova.

Solo ora si può assumere con certezza che gran parte dell'errore dovuto all'eccessiva rigidità del provino risiedeva in tempistiche troppo affrettate dei cicli di carico-scarico e si evidenzia la necessità di aspettare lunghi intervalli di tempo per avere una corretta misurazione della grandezza ricercata.

6.3 Svolgimento della prova di flessione-torsione e analisi risultati

Le conclusioni estrapolate dai test sperimentali descritti fino a questo punto hanno portato alla riproduzione della medesima prova di flessione-torsione utilizzando bassi carichi e lunghi tempi di attesa prima del rilevamento dei dati.

Seguendo questi accorgimenti, si è effettuato un solo ciclo di carico per ogni provino esaminato, utilizzando un peso complessivo di 200g e un tempo di attesa di venti minuti. La prova di flessione-torsione è stata accostata ad una di semplice flessione (annullando il braccio di caricamento rispetto al centro di taglio della sezione del provino) per avere il confronto con un test avente una sollecitazione meno complessa.

I risultati ottenuti da entrambi i test sono esposti di seguito:

<u>TEST FLESSO-TORSIONE</u>				
Laminazione		Deflessione misurata estremo sinistro [mm]	Deflessione misurata estremo destro [mm]	Differenza estremi [mm]
	0°	3.379777	4.378718	0.998941
	90°	3.371159	4.308735	0.937577
	±45°	3.494718	4.467514	0.972796
	FEM ORTOTROPO 0°	3.41338	4.2546	0.84122
	FEM ORTOTROPO 90°	3.58948	4.42696	0.83749
	FEM ORTOTROPO ±45°	3.31805	4.21027	0.89222
	FEM ISOTROPO FILAMENTO B	3.28814	4.2453	0.95715

Tabella 28

Errore modello FEM Ortotropo rispetto a Sperimentale

Laminazione	Errore deflessione estremo sinistro [%]	Errore deflessione estremo destro [%]	Errore Rotazione [%]
0°	-0.98439	2.917207	18.74845
90°	-6.08214	-2.67064	11.95107
±45°	5.324525	6.109915	9.030669

Tabella 29 Differenze fra sperimentale e previsione ortotropa (Flesso-Torsione)

Errore modello FEM Isotropo rispetto a Sperimentale

Laminazione	Errore deflessione estremo sinistro [%]	Errore deflessione estremo destro [%]	Errore Rotazione [%]
0°	2.786795	3.142818	4.365877
90°	2.543237	1.690796	-1.26055
±45°	6.309007	5.478066	2.597182

Tabella 30 Differenze fra sperimentale e previsione isotropa (Flesso-Torsione)

TEST FLESSIONE

Laminazione	Deflessione misurata centralmente [mm]
0°	3.853898
90°	3.991621
±45°	4.081385
FEM ORTOTROPO 0°	3.83215
FEM ORTOTROPO 90°	4.00976
FEM ORTOTROPO ±45°	3.76599
FEM ISOTROPO FILAMENTO B	3.28814

Tabella 31

Errore modello FEM Ortotropo rispetto a Sperimentale

Laminazione	Errore deflessione [%]
0°	0.567401
90°	-0.45237
±45°	8.374718

Tabella 32 Differenze fra sperimentale e previsione ortotropa (Flessione semplice)

Errore modello FEM Isotropo rispetto a Sperimentale

Laminazione	Errore deflessione [%]
0°	2.381898
90°	6.040605
±45°	8.425268

Tabella 33 Differenze fra sperimentale e previsione isotropa (Flessione semplice)

Dai valori conseguiti si osserva come, nella prova di flesso-torsione, il modello FEM ortotropo ottiene i risultati migliori per la laminazione a 0° e quello isotropo i migliori nella laminazione a 90°. Per quel che riguarda la laminazione a ±45°, i due modelli ottengono invece errori comparabili.

Esaminando la prova di semplice flessione si nota invece come il modello FEM ortotropo ottenga risultati ottimali per entrambe le laminazioni a 0° e 90°. Mentre per quanto riguarda la laminazione a ±45°, esattamente come per la prova di flesso torsione, i due modelli conseguono gli stessi risultati.

Conclusioni

Le diverse prove di validazione ed esplorative esposte finora hanno portato al conseguimento di una grande mole di dati che ha permesso una serie di deduzioni sui risultati del lavoro svolto. Ognuna delle prove presentate è stata portata a compimento con i corretti canoni e ha consentito il conseguimento degli obiettivi richiesti necessari a portare avanti questo lavoro di tesi raggiungendo la sua completezza.

Dovendo fare una disamina e trarre delle conclusioni dai risultati raggiunti, è evidente come prove comprensive di una semplice sollecitazione del provino sostengano indubbiamente l'anisotropicità dell'oggetto prodotto tramite Fused Deposition Modeling, conseguendo proprietà meccaniche differenti nelle due direzioni considerate e presentando valori allineati con quanto previsto con il modello agli Elementi Finiti basato sulla Classical Lamination Theory. Fra questi test fanno sicuramente parte la prima prova di validazione svolta, ossia la prova di flessione a tre punti e il test di semplice flessione a trave incastrata appena descritto nel capitolo precedente. Le differenze riscontrate fra i sopracitati test sperimentali e il modello FEM ortotropo 2D, basato sulla caratterizzazione del materiale eseguita precedentemente a questo lavoro di tesi, sono minori dell' 1% per le laminazioni a 0° e 90° come descritto in Tabella 16, per la prova a flessione su tre punti, e in Tabella 32 per la prova di flessione su trave incastrata. Meritano invece un discorso a parte i valori ricavati per la laminazione a $\pm 45^\circ$ che in tutte le prove di laminazione hanno fatto constatare le differenze sicuramente maggiori con quanto previsto numericamente. Benché l'errore di previsione su questa casistica si tenga comunque ben sotto il 10%, tale stime non sono in linea con quanto rilevato nelle altre due tipologie di laminazioni e si mostra necessario l'avanzamento di talune ipotesi che possano dare spiegazione al fenomeno. Si suppone che quanto accade con le laminazioni a $\pm 45^\circ$ sia strettamente legato a ciò che si osserva proporsi per i test eseguiti aventi condizioni di carico più complicate. Nei test di flesso-torsione, infatti, si evidenziano sia conferme che criticità che verranno di seguito sviluppate. In riferimento a quanto si può leggere in Tabella 29, le deflessioni per la laminazione a 0° conservano comunque piccoli errori (sotto il 3%), mentre le laminazioni a 90° , a $\pm 45^\circ$ e le rotazioni di tutte e tre le laminazioni riportano instabilità maggiori. Riassumendo, tutte le prove di validazione riscontrano come la configurazione con laminazione a $\pm 45^\circ$ del modello FEM ortotropo sia più rigido della sua controparte reale e il test di flesso-torsione evidenzia come questo abbia, per ognuna laminazione, una rotazione minore.

In prima ipotesi si ipotizza che tutto sia riconducibile ad una mancata determinazione precisa del modulo a taglio G_{12} in fase di caratterizzazione del materiale. Questo avrebbe portato ad un rilevamento maggiorato di tale grandezza, con conseguente ottenimento di una maggiore rigidità del modello FEM nei $\pm 45^\circ$ e minori rotazioni nelle flesso-torsioni. Tesi corroborata da quanto espresso in Tabella 28 e Tabella 30, che evidenzia come il modello FEM isotropo, basato sui dati ottenuti dalla trazione del Filamento B, ed avente un modulo a taglio G_{12}

rigidezza ridotta 3x3 questa può dirsi validata, poiché avendo una visione generale dei risultati acquisiti, gli errori non si sono mai alzati sopra il 10%; adottando però una visione più critica, è opportuno indagare più a fondo sull'entità del modulo a taglio e sulle sue conseguenze. Il modello ortotropo proposto infatti, ha un ottimo decorso nella simulazione della flessione, dove si tende ad isolare i diversi comportamenti e dove ciò viene accentuato dalle semplici laminazioni proposte. Mentre con l'applicazione di carichi che sollecitano la struttura in maniera più complessa e che combina gli effetti della laminazione, si ottengono risultati aventi una minore precisione. Eventuali proposte per il futuro risiedono innanzi tutto nella ricerca di altre prove sperimentali che possano migliorare la determinazione del modulo a taglio (fra questi una proposta risiede nell'Off Axial Tensile Test) e, ampliando la visione del problema, considerare che causa dell'errore possa essere legato alle ipotesi della CLT. In quest'ultimo caso, le risposte si otterranno quando si avrà l'occasione di poter eseguire altre prove di caratterizzazione meccanica che possano determinare la matrice di rigidezza 6x6 e si utilizzeranno modelli agli spostamenti più complessi rispetto a quelli proposti dalla teoria classica del laminato.

Come ultima proposta, si apre la possibilità di considerare che la strategia di riempimento adottata dalla FDM possa presentare particolarità uniche rispetto ai materiali compositi. Se infatti si adotta una tipologia di laminazione alternata come può essere il caso a $\pm 45^\circ$, in fase di deposizione il filamento si vede adagiato su una base costituita da valli e creste create dai road dello strato precedente. Questo potrebbe portare a fenomeni di interazione fra strati che causano un comportamento della struttura non coincidente con quanto può prevedere un modello ortotropo. In tal caso, probabilmente, un oculato modello isotropo potrebbe rappresentare una scelta da considerare per la simulazione di tale realtà.

Riferimenti

1. *Dependence of mechanical properties of polyamide*. B. Caulfield, P.E. McHugh, S. Lohfeld. 2007, *J. Mater. Process.*, p. 477–488.
2. *Optimization of fused deposition modeling parameters: a review of current research and future prospects*. Omar A. Mohamed, Syed H. Masood, Jahar L. Bhowmik. 2015, p. 42-53.
3. *Effect of layer orientation on mechanical properties of rapid prototyped samples*. *Materials and Manufacturing Processes*. Es-Said O. S., Foyos J., Noorani R., Mendelson M., Marloth R., Pregger B. A. 2000, p. 107-122.
4. J.M.G. Cowie, Valeria Arrighi. *Polymers: Chemistry and Physics of Modern Materials*. USA : CRC Press Taylor and Francis Group, 2007.
5. *What makes a material printable? A viscoelastic model for extrusion-based 3D printing of polymers*. Chad Duty, Christine Ajinjeru, Vidya Kishore, Brett Compton, Nadim Hmeidat, Xun Chen, Peng Liu, Ahmed Arabi Hassen, John Lindahl, Vlastimil Kunc. 2018, *Journal of Manufacturing Processes*, p. 526-537.
6. *Bioplastica, è davvero il materiale del futuro*. anteritalia.org.
[Online] anteritalia.org/bioplastica-e-davvero-il-materiale-del-futuro/#:~:text=Prendendo%20spunto%20dal%20grafico%20sopra,politrimetilene%20tereftalato%20a%20base%20bio.
7. *Poly(lactic acid)—Mass production, processing, industrial applications, and end of life*. Castro-Aguirre E., Iñiguez-Franco F., Samsudin H., Fang X., Auras R. 2016.
8. *Compostable Polymer Materials*. E., Rudnik. Elsevier.
9. *High molecular weight polylactic acid polymers*. Hartmann, M.H. 1998, D.L. Kaplan (Ed.), *Biopolymers From Renewable Resources*, Springer, Heidelberg/Berling, p. 367–411.
10. 3deurope.
[Online] www.3deurope.net.
11. *Influence of PLA Filament Conditions on Characteristics of FDM Parts*. Ana Pilar Valerga, Moises Batista, Jorge Salguero, Frank Giro. 2018, *Materials*, Vol. 11, p. 1322.
12. *Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS*. S.-H. Ahn, et al. 2002, *Rapid Prototyp*, p. 248–257.
13. *istropia-stampa-3d*. 3d4growth.
[Online] 3d4growth.com/istropia-stampa-3d.
14. *Distorsione_ottica*. wikipedia.org.
[Online] it.wikipedia.org/wiki/Distorsione_ottica#:~:text=La%20distorsione%20ottica%20si%20verifica,lenti%20sono%20curve%20o%20sferiche..
15. *nikon-18-55mm-dx-vr-af-p/2, reviews*. photographylife.
[Online] photographylife.com/reviews/nikon-18-55mm-dx-vr-af-p/2.

