

SCUOLA DI INGEGNERIA E ARCHITETTURA

Corso di Laurea in Ingegneria Aerospaziale

**ADDITIVE MANUFACTURING
CON FIBRA LUNGA DI CARBONIO:
CARATTERIZZAZIONE E ANALISI NUMERICA**

Relatore:

Prof: Sara Bagassi

Correlatore:

Ing: Martino Carlo Moruzzi

Ing: Marzia Corsi

Candidato:

Davide Tonelli

III Sessione

Anno Accademico 2022/2023

Ringraziamenti

Desidero ringraziare la Professoressa Sara Bagassi, l'Ing. Marzia Corsi e l'Ing. Martino Carlo Moruzzi per avermi permesso di svolgere questa attività di tesi, oltre ad avermi fornito preziosi consigli durante lo svolgimento delle attività e durante la stesura dell'elaborato.

Ringrazio molto Matteo Perini e tutti i dipendenti di Pro-M Facility, dove ho svolto il mio tirocinio, per il supporto che mi hanno dato con le attrezzature che ho utilizzato e tutti i consigli preziosi che mi hanno aiutato a completare i miei obiettivi e la mia tesi.

Ringrazio poi mia madre, mio padre, mia sorella, le mie nonne e tutti i miei parenti, che mi hanno sempre supportato e soprattutto con sacrifici mi hanno permesso di intraprendere questo percorso.

Un grazie speciale alla mia ragazza che mi è sempre stata vicina, dandomi la forza di continuare anche nei momenti di difficoltà, grazie anche a tutti i miei amici e a tutte le persone che mi sono state vicine durante l'intero percorso di studi.

Indice

1	Introduzione	9
2	Additive Manufacturing	11
2.1	Processo di Produzione	11
2.2	Vantaggi dell'Additive Manufacturing	12
2.3	Limiti dell'Additive Manufacturing	12
2.4	Tecnologie di Stampa 3D	13
2.5	AM con Fibra di Carbonio	14
2.5.1	Fibra Corta	15
2.5.2	Fibra Continua	16
2.5.3	Anisoprint	17
3	Analisi a Trazione su Provini	19
3.1	Scopo dell'Analisi	19
3.2	Strumentazione Utilizzata	19
3.2.1	Hardware	19
3.2.2	Software	21
3.3	Svolgimento dell'analisi	23
3.3.1	Realizzazione Provini	23
3.3.2	Prove a Rottura	29
3.3.3	Analisi Risultati	30
4	Simulazioni FEM	43
4.1	Realizzazione Modello	43
4.2	Simulazioni del Modello	45
4.2.1	Simulazione Statica	45
4.2.2	Simulazioni Dinamiche	47
4.2.3	Considerazioni sulle Simulazioni	50
5	Conclusioni	51
A	Abbreviazioni	53
	Bibliografi	55

Elenco delle figure

2.1	Processo di estrusione per fibra corta.	15
2.2	Processo di estrusione per fibra continua	16
2.3	Componenti di Anisoprint Desktop	17
2.4	Tipologie di riempimenti rinforzati.	18
3.1	Anisoprint Desktop A4.	20
3.2	Banco Prova Galdabini Quasar 100	20
3.3	Layer con riempimento plastico.	21
3.4	Layer con rinforzo di fibra continua.	21
3.5	Utilizzo delle masks in un componente.	22
3.6	Provino ASTM D638-14 Tipo 1.	23
3.7	Modelli disegnati con NX	24
3.8	Provino 1.	25
3.9	Provino 2: layer con interruzione al bordo.	25
3.10	Provino 2: layer con interruzione sul raccordo.	25
3.11	Provino 3.	26
3.12	Provino 4.	26
3.13	Provino 5.	26
3.14	Provino 6 con core evidenziato.	27
3.15	Provino 6: layer con interruzione al bordo.	27
3.16	Provino 6: layer con interruzione quasi al bordo.	27
3.17	Come appare il rinforzo interno del provino 1.	28
3.18	Come appare il rinforzo interno del provino 2.	28
3.19	Problema ingombo estensimetri	29
3.20	Provini durante i test	30
3.21	Provini di tipo 3	31
3.22	Grafico Sforzo-Deformazione provino 3.	32
3.23	Grafico Sforzo-Deformazione provino 1.	32
3.24	Provini di tipo 1	33
3.25	Provini di tipo 2	34
3.26	Grafico Sforzo-Deformazione provino 2.	35
3.27	Grafico Sforzo-Deformazione provino 4.	35
3.28	Provini di tipo 4	36
3.29	Provini di tipo 5	37

3.30	Grafico Sforzo-Deformazione provino 5.	38
3.31	Grafico Sforzo-Deformazione provino 6.	38
3.32	Provini di tipo 6	39
3.33	Sforzo a rottura di ogni provino.	40
3.34	Istogrammi comparativi	40
4.1	Provino 6.	43
4.2	Rinforzo semplificato provino 6.	44
4.3	Provino 6.	44
4.4	Provino 6 con afferraggio virtuale.	45
4.5	Provino 6 con afferraggio e visualizzazione della mesh.	46
4.6	Elemento fissato (blu) e forza (giallo)	46
4.7	Deformazione totale visualizzata con sezione in mezzeria	47
4.8	Stress equivalente visualizzato con sezione in mezzeria	47
4.9	Impostazione simulazione multinodale	48
4.10	Stress equivalente visualizzato con sezione in mezzeria	48
4.11	Deformazione elastica equivalente	49
4.12	Deformazione elastica equivalente visualizzata con sezione in mezzeria	49
4.13	Stress equivalente visualizzata con sezione in mezzeria	50

Capitolo 1

Introduzione

Nell'ambito ingegneristico la ricerca sui materiali e sulle tecnologie produttive è in continua evoluzione. In campo aerospaziale si trova un particolare interesse, data la fondamentale importanza del peso di strutture e strumentazione ai fini di ottimizzare efficienza e funzionalità.

Negli ultimi anni, per la realizzazione di strutture in generale, e particolarmente nell'ambito dell'aviazione è stata vantaggiosa l'introduzione dei materiali compositi, capaci di garantire proprietà meccaniche elevate nonostante pesi ridotti.

Altro grande passo tecnologico che sta rivoluzionando alcuni ambiti dell'industria è quello dell'Additive Manufacturing (AM), grazie alla sua capacità di realizzare componenti in modo relativamente rapido, e soprattutto con limiti geometrici estremamente minori rispetto alle lavorazioni meccaniche tradizionali.

Unendo AM e utilizzo di materiali compositi, troviamo la possibilità di realizzare componenti mediante la prototipazione rapida con compositi rinforzati grazie a fibre continue di carbonio.

In questo lavoro si andrà ad analizzare e caratterizzare mediante test a trazione, varie tipologie di provini realizzati tramite stampa a filamento con rinforzi in fibra continua di carbonio. In seguito mediante simulazioni con metodi agli elementi finiti verranno indagati: modalità e motivi di rottura dei provini.

Capitolo 2

Additive Manufacturing

L'Additive Manufacturing (AM), conosciuto anche come stampa 3D o prototipazione rapida, secondo il relativo standard ASTM è “il processo di fusione dei materiali per creare oggetti a partire da modelli 3D, di solito con approccio strato su strato, in opposizione ai metodi produttivi di tipo sottrattivo tradizionali”.

2.1 Processo di Produzione

Per generare un componente tramite additive manufacturing è usuale seguire un processo come quello di seguito elencato (che può subire variazioni in base alla tecnologia di stampa adottata):

1. progettazione 3D: partendo dall'idea, si devono definire geometria e parametri del pezzo da realizzare, in seguito questa geometria verrà disegnata utilizzando un software CAD. Il file risultato della modellazione verrà esportato in formato STL;
2. preparazione alla stampa: questa fase comprende un controllo di punti e superfici presenti nel modello 3D. Tramite un software di slicing si valuta l'orientamento di stampa, lo studio e la simulazione dei supporti di stampa e la definizione dei parametri con cui stampare: tipo di riempimento, spessori, temperature, velocità, ecc. (per alcune tecnologie non è possibile personalizzare tutti questi parametri). Il software di slicing genera il codice macchina che controllerà la stampante;
3. prototipazione 3D: in questa fase, il componente progettato viene realizzato dalla macchina mediante la tecnica adottata;
4. post processo: al termine della stampa posso dover effettuare i seguenti processi:
 - rimozione dei supporti di stampa (se presenti): manualmente, tramite precisi sistemi di taglio, abrasione meccanica o tramite altri processi;

- stabilizzazione delle geometrie (se necessario): tramite luce uv per stampe mediante resine fotosensibili, oppure in forni ad alta temperatura per alcuni tipi di stampe metalliche che rischiano di deformarsi a causa di gradienti di temperatura interni;
- finitura superficiale: può essere realizzata sia su polimeri che su metalli per apportare migliori finiture estetiche o funzionali.

2.2 Vantaggi dell'Additive Manufacturing

- Riduzione dei costi: il primo vantaggio di questa tecnica produttiva, per certi casi, può essere un ridotto costo di produzione. Grazie ai sistemi di stampa 3D è possibile realizzare produzioni personalizzate o piccole produzioni in serie in maniera diretta, senza passare attraverso la realizzazione di stampi. Ciò comporta una filiera di produzione molto corta e una riduzione nello stoccaggio di materiale che rischia di diventare obsoleto. La produzione additiva è anche sinonimo di scarto di lavorazione molto ridotto o addirittura nullo e quindi minori costi di smaltimento o trasformazione degli scarti di processo.
- Time to market: il time to market è il tempo che intercorre tra la fase di ideazione e progettazione, e quella di commercializzazione. L'additive manufacturing permette grazie ai software dedicati e i nuovi sistemi di stampa 3D di realizzare modelli fisici in tempi ridotti rispetto ai metodi tradizionali.
- Nuovi materiali e nuove opportunità: l'evoluzione tecnologica nel mondo dell'additive manufacturing cresce a pari passo con il settore dei materiali di stampa 3D. Ad oggi si stampa con polimeri, metalli, compositi e materiali biocompatibili.
- Ottimizzazione topologica: grazie ai sistemi di produzione additiva è possibile progettare liberamente senza doversi più preoccupare della complessità dei modelli nella fase di produzione. I software di ottimizzazione topologica e design generativo assieme alla stampa 3D possono generare componenti rivoluzionari, riducendo l'uso di materia prima, il peso e il costo di produzione.

2.3 Limiti dell'Additive Manufacturing

L'AM presenta anche delle limitazioni, ad oggi questa tecnologia difficilmente soddisfa requisiti di produttività ed economicità compatibili con la produzione e manifesta alcune limitazioni in termini di scalabilità dei volumi, oltre che di scelta di materiali utilizzabili. In alcuni casi è inoltre necessario procedere con trattamenti successivi per realizzare la finitura superficiale richiesta, o per aumentare l'accuratezza in termini dimensionali.

2.4 Tecnologie di Stampa 3D

Esistono molteplici differenti tecnologie di prototipazione che variano a seconda della forma del materiale grezzo (polvere micrometrica, filamento solido, resina,...), del materiale adottato (polimeri, metalli, compositi, ceramiche,...) e del metodo utilizzato per trasformare il grezzo nel componente (resistenze elettriche, laser, fonti luminose, fasci elettronici,..)

FFF (Fused Filament Fabrication)

La modellazione a deposizione, detta anche FDM (Fused Filament Deposition) è la forma di stampa 3D più diffusa e permette di creare parti fondendo ed estrudendo il filamento termoplastico che l'ugello dell'estrusore deposita strato per strato nell'area di stampa. Questa tecnica può essere utilizzata con una vasta gamma di termoplastiche ed è particolarmente adatta per prototipazione veloce di modelli semplici e a basso costo. La risoluzione offerta non è molto elevata e non conviene per realizzare design complessi o parti con dettagli elaborati.

FFF con CFRTP (Carbon Fiber Reinforced Thermoplastic Polymer)

Particolari stampanti FDM permettono di utilizzare sia le classiche termoplastiche, sia un filamento termoplastico contenente fibre sminuzzate di carbonio, sia una fibra continua di carbonio che viene coestrusa con il polimero. Questa tecnologia permette di sfruttare i vantaggi delle stampanti FDM elevando notevolmente le proprietà meccaniche dei prodotti mantenendo comunque pesi estremamente bassi tipici delle plastiche.

SLA (Stereolithography)

La stereolitografia utilizza un laser per polimerizzare la resina liquida in plastica dura, in un processo chiamato fotopolimerizzazione. Questa tecnologia permette una maggiore risoluzione e precisione, dettagli più accurati e finiture superficiali migliori rispetto a tutte le altre tecnologie di stampa 3D. Grande punto di forza è anche la sua versatilità, grazie alla vasta gamma di materiali utilizzabili, con molteplici differenti proprietà ottiche, meccaniche e termiche.

MJF (Multi Jet Fusion)

Questa tecnologia funziona grazie a una fine stratificazione di polvere polimerica su cui viene disegnata la forma del componente da stampare con un inchiostro fotosensibile che fa fondere e solidificare la polvere sottostante, strato per strato grazie al passaggio di una fonte luminosa ad elevata potenza. Grazie a questa tecnica è possibile realizzare componenti anche relativamente grandi con una notevole definizione e un costo abbastanza ridotto.

SLM (Selective Laser Melting)

La tecnologia di sinterizzazione laser selettiva è la più utilizzata per applicazioni industriali. Queste stampanti utilizzano un laser ad alta potenza per fondere polveri di polimeri o metalli strato dopo strato, permettendo di stampare componenti estremamente complessi e con proprietà simili a quelle di pezzi creati tramite iniezione.

DED (Directed Energy Deposition)

Questa tecnologia sfrutta un fascio elettronico o un laser montato su un braccio a quattro o cinque assi che fonde un filamento o un getto di polvere di riporto. Questa tecnica può essere utilizzata con polimeri, ceramiche o metalli.

LOM (Laminated Object Manufacturing)

La produzione di oggetti laminati è un metodo di stampa 3d in cui strati di plastica, metallo o carta vengono fusi insieme usando calore e pressione, vengono poi tagliati nella forma desiderata con un laser o una lama controllata da computer.

2.5 AM con Fibra di Carbonio

La tecnica del FDM è nata attorno al 1980 e grazie alla sua ampia gamma di applicazioni, il costo ridotto e la buona affidabilità ha subito una crescita esponenziale nell'ultimo decennio. Inizialmente venivano utilizzati ABS o PLA, in seguito per aumentarne ulteriormente la competitività iniziarono ad essere utilizzati polimeri ad alte prestazioni o rinforzati con altri materiali come fibra di carbonio, fibra di vetro o basalto, quindi utilizzando dei compositi. Un composito è creato combinando due o più materiali così che le loro distinte proprietà si vadano a unire per creare un materiale migliore. Nella maggior parte dei casi abbiamo un materiale che funge da rinforzo e uno da legante. Combinando quindi questa tecnologia e questi materiali otteniamo i benefici di libertà nella geometria e nella disposizione del materiale, pesi estremamente ridotti e alte prestazioni meccaniche. L'aggiunta di fibre in una stampante a filamento aumenta resistenza e rigidità mentre riduce il grado di espansione del filamento dopo l'estrusione. Le termoplastiche rinforzate possono avere diverse tipologie di rinforzo, basandosi sulla geometria di questi, posso avere: fibre continue, fibre corte o particelle. Il miglior modo per descriverne la differenza è utilizzare un parametro detto allungamento, cioè un rapporto tra lunghezza e larghezza di un oggetto. Infatti le fibre continue presentano un alto allungamento e un orientamento ottimale mentre fibre corte o discontinue hanno basso allungamento e una minore influenza del loro orientamento nelle prestazioni. Le fibre lunghe, come già detto, avranno un orientamento ottimale e, grazie alla loro ampia area di interfaccia con la matrice polimerica, ci daranno una maggiore resistenza e rigidità rispetto alle fibre discontinue.

2.5.1 Fibra Corta

La fibra corta di carbonio è composta da particelle di lunghezza media $< 1\text{mm}$ e nella stampa 3D è ampiamente diffusa grazie al fatto che richiede modifiche minimali all'hardware di una classica stampante FDM per poter essere utilizzata. Basterà sostituire l'estrusore con uno composto di metallo duro, data la presenza del rinforzo nel polimero da estrudere lo renderà altamente abrasivo. Il processo per produrre un filamento termoplastico rinforzato è svolto mescolando polvere di fibra di carbonio con pellet polimerici che vengono estrusi in forma di filamento e avvolti in bobine. Le proprietà di pezzi stampati tramite FDM con questi filamenti non dipendono tanto dal processo di stampa come per le fibre continue, ma più da proprietà come la percentuale di fibra presente nel filamento, l'orientamento e la dimensione delle fibre. Per esempio formulazioni con alto contenuto di fibra potrebbero causare difficoltà come degradazione termica della matrice plastica a causa della dissipazione viscosa e/o ostruzione dell'estrusore. Molte ricerche sono state fatte con lo scopo di analizzare e comprendere il comportamento di oggetti stampati con filamenti rinforzati al variare di percentuale in massa di fibra di carbonio e lunghezza media delle fibre utilizzate. Generalmente per prove di trazione e compressione i risultati più performanti per quanto riguarda tensione di rottura, modulo di Young e capacità di estrusione si trovano utilizzando fibre sminuzzate di lunghezza compresa tra $100\ \mu\text{m}$ e $150\ \mu\text{m}$ le cui percentuali in massa rispetto al polimero attorno al 10% - 15%. Dati osservati nelle ricerche:[1], [5], [8].

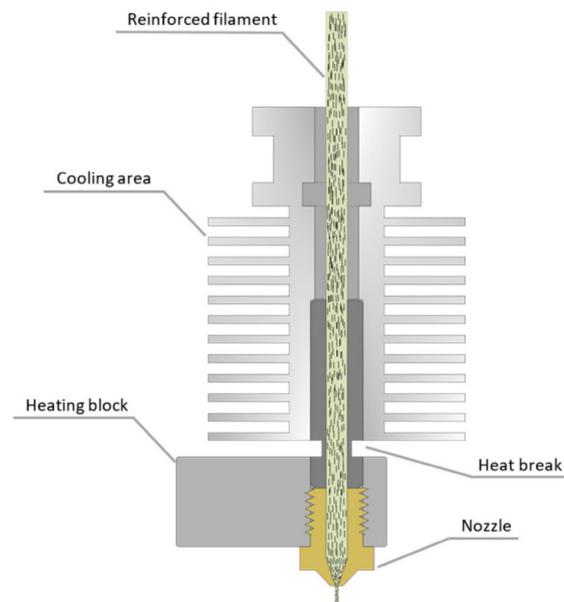
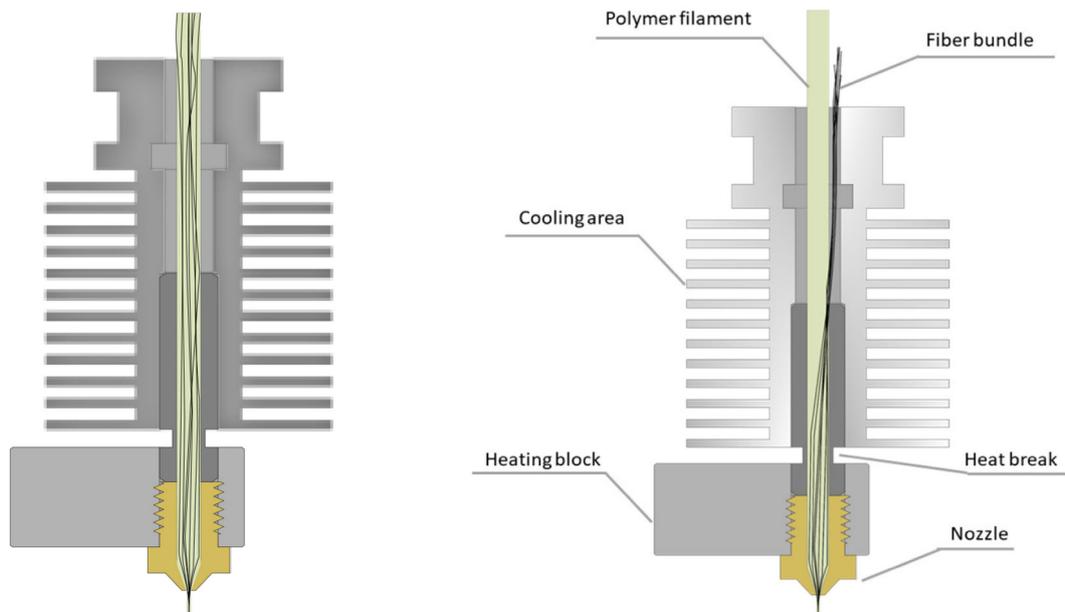


Figura 2.1: Processo di estrusione per fibra corta.

2.5.2 Fibra Continua

L'applicazione della fibra continua è molto più ristretta perché il processo di stampa richiede uno specifico hardware che deve essere in grado di gestire questo particolare filamento a differenza della stampa con fibra corta. La fibra continua di carbonio può essere stampata in due modi:

- unendo polimero e fibra all'interno della testa dell'estrusore. Una stampante che usa questa tecnica deve disporre di due differenti bobine: una per la fibra di carbonio asciutta e una per il polimero da coestrudere con essa. Entrambi i filamenti entrano dall'estrusore, dove il polimero che funge da matrice è portato a fusione, la fibra viene fatta entrare nel flusso e fuoriesce dall'estrusore impregnata e pronta ad essere depositata come in Figura 2.2b. Mediante questa è possibile regolare il rateo di estrusione della fibra e della matrice polimerica, quindi il diametro del filamento e la velocità di estrusione. Si può però incorrere in problematiche durante l'unione dei due componenti, potrebbero trovarsi difetti come inclusione di aria nell'interfaccia del filamento, bassa adesione o ostruzione dell'estrusore. Un'altra criticità sta nel meccanismo che spinge la fibra di carbonio all'interno dell'estrusore, in quanto questa risulta essere molto fragile alla compressione quando è asciutta;
- estrudendo il filamento di fibra pre-impregnato nel polimero come in Figura 2.2a. Per stampare con questa tecnica è necessario avere a disposizione specifici filamenti per la stampa 3D che contengano la fibra continua.



(a) Coestrazione di fibra pre-impregnata (b) Coestrazione di fibra asciutta

Figura 2.2: Processo di estrusione per fibra continua

In entrambi i casi le stampanti non possono essere convenzionali FDM, visto che oltre al resto, devono avere un apposito meccanismo attuo al taglio della fibra continua di carbonio, dato che non è possibile semplicemente interrompere l'estrusione come con un polimero.

2.5.3 Anisoprint

La stampante con cui ho potuto effettuare il mio studio si chiama Anisoprint Desktop A4. Si tratta di una stampante per CCFRAM con piatto di lavoro di dimensioni di un foglio A4.

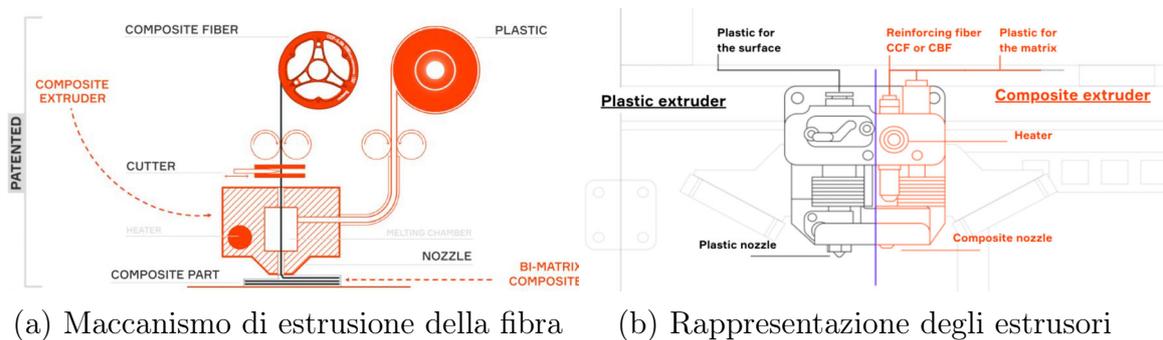


Figura 2.3: Componenti di Anisoprint Desktop

A differenza di una normale stampante FDM possiamo notare in Figura 2.3b la presenza di due diversi estrusori uno con un input e un output per la plastica e uno con due input e un output per il composito. Il funzionamento della linea di stampa del composito si può osservare meglio in Figura 2.3a con tutti i suoi componenti. Come si può notare, questa stampante utilizza fibre non pre-impregnate da unire con la matrice plastica in camera di fusione. Con questo macchinario è possibile stampare un'ampia gamma di materiali sia attraverso l'estrusore plastico: Nylon, PETG, PLA, TPU, PC, plastiche rinforzate con fibra corta, sia attraverso l'estrusore per compositi: fibra di carbonio/vetro/basalto, unibile con differenti matrici plastiche. Il software che permette di utilizzare questa stampante si chiama Aura, uno slicer estremamente versatile, che permette di importare modelli CAD di vari formati e generare il riempimento del componente scegliendo come disporre le fibre di rinforzo al meglio per la particolare funzione del nostro componente. Con questa stampante è quindi possibile unire l'ampia gamma di compositi utilizzabili con la capacità di creare componenti rinforzati solo dove serve e quanto serve, quindi, grazie a queste due caratteristiche si possono realizzare elementi fino a due volte più resistenti e leggeri dell'alluminio, contemporaneamente magari anche più economici rispetto a un pezzo con simili caratteristiche meccaniche prodotto tramite lavorazioni tradizionali partendo da un pieno.



Figura 2.4: Tipologie di riempimenti rinforzati.

In Figura 2.4 si possono notare i differenti tipi di rinforzo che possiamo adottare con lo slicer Aura. In questi tipi di riempimento, solitamente è possibile modificare anche la direzione ed orientamento del pattern, oltre che la percentuale di rinforzo per ogni strato. Adottando l'opportuno metodo di riempimento, è possibile realizzare componenti apparentemente uguali, ma con proprietà meccaniche completamente differenti tra loro, variando la direzione di osservazione di queste. Questo può essere uno svantaggio se non conosciamo esattamente le sollecitazioni a cui sarà sottoposto il componente che andiamo a realizzare, o un gran vantaggio se siamo consapevoli delle proprietà meccaniche che dobbiamo garantire nelle diverse direzioni permettendo quindi di inserire tutto il rinforzo di cui abbiamo bisogno e solo quanto ne abbiamo bisogno, migliorando sia prestazioni che economicità del prodotto.

Capitolo 3

Analisi a Trazione su Provini

3.1 Scopo dell'Analisi

Lo scopo di questa analisi è caratterizzare la resistenza a trazione di provini stampati mediante tecnologia CCFRAM (Continuous Carbon Fiber Reinforced Additive Manufacturing), sfruttando diverse quantità e tipologie di rinforzo adottabile. Andrò a valutare prima di tutto il carico a rottura delle varie prove, poi cercherò di approfondire le criticità di ogni specifica categoria di provino in base al modo di rottura, cercando di trovare possibili correlazioni tra tipo di riempimento in fibra di carbonio adottato e risposta data durante le prove effettuate al banco.

3.2 Strumentazione Utilizzata

Per realizzare i provini di cui avevo bisogno, effettuare i test di trazione e in seguito analizzare i dati, ho avuto modo di utilizzare e conoscere i seguenti strumenti.

3.2.1 Hardware

Anisoprint Desktop A4

La stampante FDM capace di realizzare componenti in polimeri rinforzati con fibra di carbonio, vedi Figura 3.1. Ho avuto modo di imparare il meccanismo di stampa e le varie possibilità che permette di adottare questo macchinario per realizzare componenti. Comprendere i meccanismi di taratura del piatto di stampa, degli assi di movimento e dei motori di spinta del filamento all'interno degli estrusori. Imparare ad effettuare la manutenzione che richiede il macchinario tra una stampa e l'altra, per assicurarsi la pulizia degli estrusori e quindi evitare ostruzioni durante la stampa.

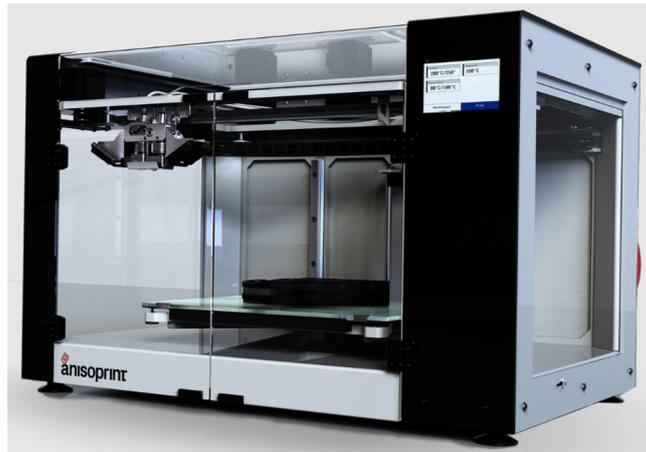


Figura 3.1: Anisoprint Desktop A4.

Banco Prova Galdabini Quasar 100

Galdabini Quasar 100 è un banco prova a doppia colonna, con portata massima di 100 kN, adatto per metalli compositi e altri materiali, vedi Figura 3.2a. Il telaio ha una costruzione flessibile e modulare che permette di essere equipaggiato con varie attrezzature, oltre ad estensimetri, celle di carico supplementari, camere termostatiche e molti altri accessori. Risulta adatto sia per prove di trazione, che per compressione, flessione, fatica, ecc.



(a) Configurazione del banco prova



(b) Afferraggi e estensimetro

Figura 3.2: Banco Prova Galdabini Quasar 100

Il banco acquistato dall'azienda che mi ha ospitato presentava però una problematica: siccome sono stati scelti gli afferraggi della versione Quasar 250 invece di quelli Quasar 100 per effettuare con maggiore sicurezza prove ad alta resistenza,

questi afferraggi presentano un ingombro maggiore, e visto che gli estensimetri adottati sono quelli della versione da 100 kN, si riscontra l'impossibilità inserire gli estensimetri tra gli afferraggi se si utilizza un provino più corto di circa 25 cm, vedi Figura 3.2b. Il problema di non poter usare gli estensimetri è stato abbastanza penalizzante per la mia analisi, visto che i dati che ho raccolto dalle prove si sono limitati al carico ultimo di rottura, escludendo caratteristiche come allungamento e quindi modulo elastico. Nelle prove da me effettuate infatti l'allungamento è misurato tramite lo spostamento della traversa e quindi non rappresenta minimamente la deformazione del provino, visto che, oltre al provino, solitamente in una prova di trazione, subisce deformazione l'intero sistema e questi allungamenti non sono quantificabili o compensabili.

3.2.2 Software

NX CAD

NX è un Software sviluppato da Siemens che permette di progettare, modellare, simulare e analizzare geometrie bidimensionali o tridimensionali di ogni genere. Grazie a questo programma, ho avuto modo di disegnare svariati componenti oltre ai miei provini, come parti e assiemi dipendentemente dalla funzione.

Aura

Anisoprint Aura è lo slicer che mi ha permesso di generare tramite un modello 3D precedentemente modellato su NX, le traiettorie delle fibre di rinforzo in ogni layer, permettendo eventualmente di modificare lo schema dei rinforzi e i parametri di stampa. Questo programma permette di combinare micro e macro layers, rendendo possibile la stampa del riempimento con uno spessore maggiore e del guscio esterno con uno spessore minore, risultando un processo più veloce senza perdere qualità della finitura esterna.

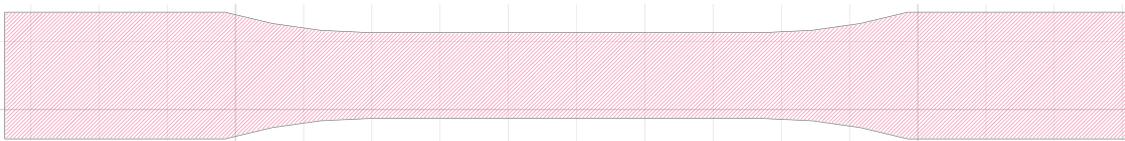


Figura 3.3: Layer con riempimento plastico.

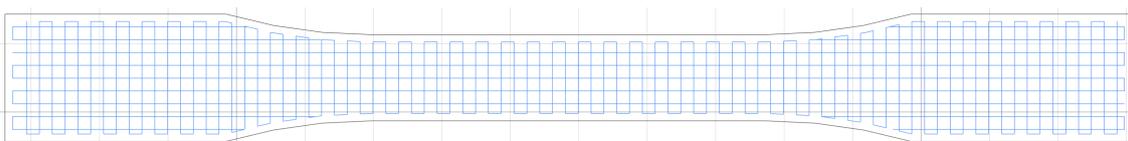


Figura 3.4: Layer con rinforzo di fibra continua.

Per comprendere meglio il discorso dei micro e macro layer possiamo osservare come diverse parti della stampa presentino differenti spessori multipli dello spessore minore. Per esempio possiamo notare in Figura 3.3 rappresentato in rosso uno strato con riempimento di plastica e in nero il contorno perimetrale esterno, mentre in Figura 3.4 possiamo notare in blu il pattern del rinforzo in fibra continua di carbonio. In questo caso, lo spessore del riempimento plastico è il doppio di quello del perimetro, mentre lo spessore del rinforzo in fibra è il quadruplo di quello del perimetro. Questo permette di avere i vantaggi sopra descritti.

Oltre ai classici riempimenti uniformi che ci permette di applicare ad un componente, vedi Figura 2.4, questo software ci permette di generare zone con differenti forme o quantità di riempimento all'interno della nostra geometria.

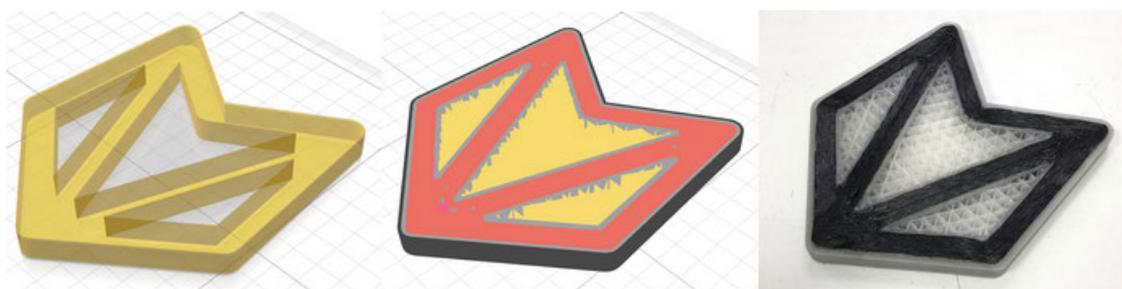


Figura 3.5: Utilizzo delle masks in un componente.

Come posso vedere in Figura 3.5 creando due solidi e importandoli in Aura possiamo farli compenetrare uno nell'altro e generare diversi riempimenti per ottimizzare sia la quantità di fibra di carbonio che utilizziamo, evitando di metterne in zone non sollecitate, sia la direzione ottimale del rinforzo che risponderà alle sollecitazioni esterne.

LabTest

LabTest è il software fornito da Galdabini che permette di realizzare, controllare e analizzare i test con il banco prova. Per effettuare una prova di trazione è necessario generare un metodo di prova che il macchinario seguirà. Nel metodo si definiscono: i parametri del provino, le modalità di utilizzo degli estensimetri, le modalità di applicazione di precarico, carico e scarico, i parametri che vogliamo visualizzare durante la prova, dopo la prova ed eventualmente nei grafici. Dal software potremmo poi controllare lo stato della macchina, effettuare movimenti, tarare estensimetri, carico e celle di carico. I metodi di prova possono essere direttamente caricati dalle normative già presenti sul macchinario ed eventualmente modificati per il proprio caso. In seguito alla prova è possibile semplicemente esportare i dati raccolti durante la prova in una o più tabelle.

MatLab

MatLab (abbreviazione di Matrix Laboratory) è un ambiente per il calcolo numerico e l'analisi statistica scritto in C, che comprende anche l'omonimo linguaggio di programmazione creato dalla MathWorks. Questo software consente di manipolare matrici, visualizzare funzioni e dati, implementare algoritmi, creare interfacce utente, e interfacciarsi con altri programmi. Nel mio caso, è stato utile per elaborare i dati raccolti durante le prove di trazione in grafici di vario genere adatti alle mie analisi.

3.3 Svolgimento dell'analisi

In seguito descriverò il processo che ho seguito per progettare, disegnare, stampare, testare e infine analizzare i miei provini.

3.3.1 Realizzazione Provini

Prima di tutto ho ricercato la forma secondo cui avrei dovuto disegnare il provino. Le dimensioni dei provini sono descritte all'interno di apposite normative, che hanno lo scopo di unificare forma e processo per test di provini adatti ad un determinato tipo di prova, in modo da avere una base comune per il confronto tra le varie ricerche sugli stessi materiali o simili. Ho seguito la normativa ASTM D638-14 specifica per prove a trazione effettuate su materiali plastici o compositi. All'interno della normativa troviamo distinzioni tra tipo di provini: plastici rigidi o semirigidi, plastici non rigidi, compositi rinforzati. Nel mio caso: per provini di compositi rinforzati dovrò attenermi a forma e dimensioni del provino tipo 1.

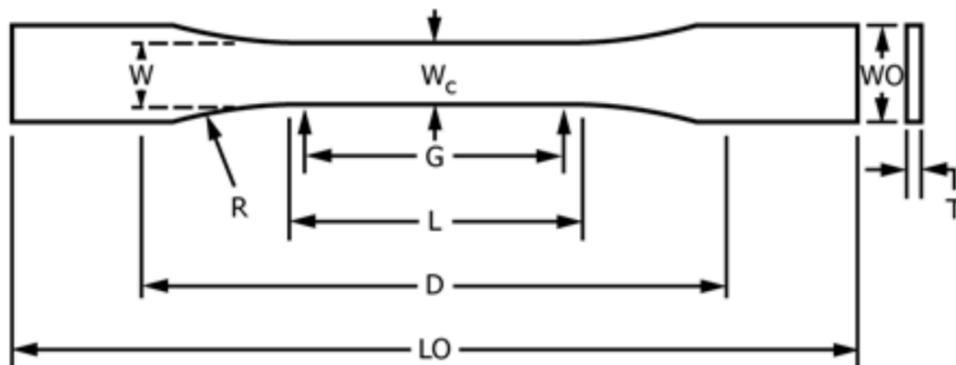


Figura 3.6: Provino ASTM D638-14 Tipo 1.

Le dimensioni delle rispettive quote rappresentate in Figura 3.6 si trovano in Tabella 3.1.

Dimensione trattata	Quota di riferimento	Misura [mm]
Larghezza tratto parallelo	W	13
Lunghezza tratto parallelo	L	57
Larghezza totale	W0	19
Lunghezza totale	L0	165
Gage length	G	50
Distanza tra afferraggi	D	115
Raggio di raccordo	R	76
Spessore	T	3.2

Tabella 3.1: Dimensioni Provino ASTM D638-14 Tipo 1

Attenendomi a queste dimensioni ho modellato il provino su NX, vedi Figura 3.7a. Per alcuni provini, in cui ho utilizzato la modalità masks di Aura, ho dovuto disegnare anche un parallelepipedo di dimensioni $L0 \times W \times T$ a cui applicare il rinforzo, vedi Figura 3.7b.

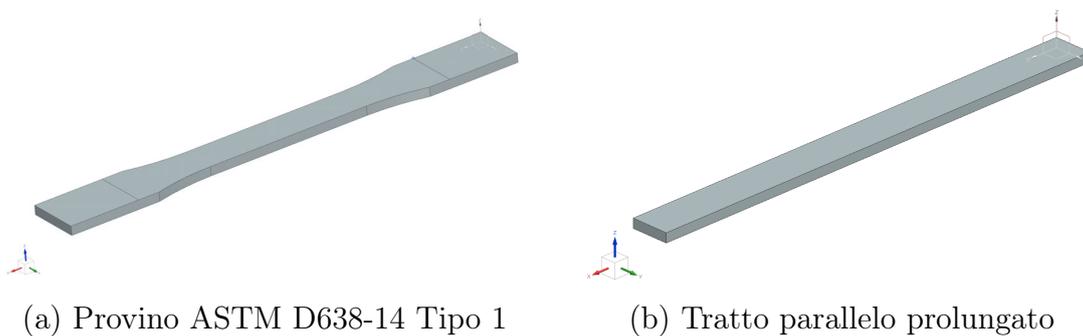


Figura 3.7: Modelli disegnati con NX

Dopo aver realizzato i modelli che mi servivano seguendo la normativa, ho importato i file in formato ".stl" nel software Aura per realizzare gli slicing. Ho realizzato sei differenti tipologie di provino, in cui andavo a variare forma e quantità dei rinforzi in fibra continua di carbonio, con lo scopo di cercare di caratterizzare la tecnica di stampa. In seguito ho analizzato tutti gli slicing e le caratteristiche di questi.

Provino 1



Figura 3.8: Provino 1.

Il provino 1 è realizzato con un perimetro plastico, 2 strati solidi plastici sopra e sotto l'anima in fibra di carbonio e 6 strati di rinforzo con pattern solido e orientamento delle fibre pari a 0° (in blu nella Figura 3.8).

In questo modo otteniamo 16 fibre continuative per ogni strato, per un totale di 96 fibre di rinforzo lungo tutto il tratto sollecitato con un ulteriore rinforzo nella zona degli afferraggi. Il difetto del riempimento solido è che per essere realizzato in stampa, ha bisogno di un piccolo spazio vuoto tra il rinforzo e il guscio plastico, vedremo dalle prove che questo potrà influire sull'adesione dei due.

Provino 2



Figura 3.9: Provino 2: layer con interruzione al bordo.



Figura 3.10: Provino 2: layer con interruzione sul raccordo.

Il provino 2 è realizzato con 3 perimetri plastici, 2 strati solidi plastici sopra e sotto l'anima in fibra di carbonio e 6 strati di rinforzo con 8 perimetri di carbonio. In questo modo otteniamo 16 fibre continuative per ogni strato, per un totale di 96 fibre di rinforzo lungo tutto il tratto sollecitato con un ulteriore rinforzo nella zona degli afferraggi da parte del riempimento plastico. Possiamo notare come la disposizione di rinforzo perimetrale non soffra del distanziamento tra il guscio plastico e le fibre continue che avevamo notato nel provino 1. Il difetto del riempimento perimetrale applicato ad un oggetto di questa forma, è che i 6 strati di rinforzo sono tre come quello in Figura 3.9 e tre come quelli in Figura 3.10 alternati uno ad uno. Posso osservare in Figura 3.10 che la fibra subisce un'interruzione lungo il raccordo

e quindi in quella zona avrò anche un'interruzione nel trasferimento dei carichi tra le fibre, risultando in un punto particolarmente critico.

Provino 3

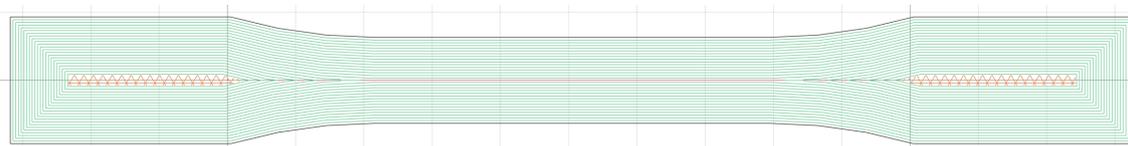


Figura 3.11: Provino 3.

Il provino 3 è realizzato con 22 perimetri plastici e 2 strati solidi plastici. Questo provino non presenta alcun rinforzo in fibra continua, è stampato utilizzando esclusivamente il filamento polimerico contenente fibra corta di carbonio. Lo scopo del provino 3 è appunto quello di caratterizzare il comportamento di questo materiale.

Provino 4



Figura 3.12: Provino 4.

Il provino 4 è realizzato con 3 perimetri plastici, 2 strati solidi plastici sopra e sotto l'anima in fibra di carbonio e 6 strati di rinforzo con pattern solido e orientamento delle fibre pari a 0° .

In questo modo otteniamo 15 fibre continuative per ogni strato, per un totale di 90 fibre di rinforzo lungo tutto il tratto sollecitato, con un ulteriore rinforzo nella zona degli afferraggi. Anche nel provino 4 riscontriamo quanto detto per il provino 1.

Provino 5



Figura 3.13: Provino 5.

Il provino 5 è realizzato con 4 perimetri plastici, 2 strati solidi plastici sopra e sotto l'anima in fibra di carbonio e 6 strati di rinforzo con pattern solido e orientamento

delle fibre pari a 0° .

In questo modo otteniamo 13 fibre continuative per ogni strato, per un totale di 78 fibre di rinforzo lungo tutto il tratto sollecitato, con un ulteriore rinforzo nella zona degli afferraggi. Anche nel provino 5 riscontriamo quanto detto per il provino 1 e per il provino 4.

Provino 6



Figura 3.14: Provino 6 con core evidenziato.



Figura 3.15: Provino 6: layer con interruzione al bordo.



Figura 3.16: Provino 6: layer con interruzione quasi al bordo.

Il provino 6 è realizzato diversamente da tutti i precedenti, usando il comando `mask` possiamo interfacciare due solidi e utilizzare differenti riempimenti. In questo caso utilizzando il rinforzo perimetrale nel core si hanno 6 strati di rinforzo con 18 fibre continuative per ognuno, per un totale di 108 nell'intero provino. Questo provino non presenta né gli svantaggi del provino 1 né quelli del provino 2, infatti possiamo notare che i rinforzi e il guscio plastico sono perfettamente interfacciati e l'interruzione di fibra che trovavamo sul raccordo del provino 2 si sposta all'interno della zona presa dagli afferraggi come si vede in Figura 3.16.

Dopo aver realizzato gli slicing di tutti i provini ho iniziato a stamparli uno alla volta. Anche se la normativa prevederebbe la realizzazione di 5 provini per tipo, trattandosi di una prima analisi mi sono limitato a realizzarne 3 per tipo. Tra una stampa e l'altra è opportuno effettuare la pulizia degli estrusori per evitare ostruzioni o altre problematiche. Dopo la stampa di ogni provino è necessaria la scrittura del codice identificativo e una minima rifinitura delle superfici. Particolarmente nelle superfici laterali è possibile trovare imperfezioni nelle zone in cui l'estrusore plastico termina il layer e quindi si può trovare un tratto di filamento in esubero, ma non solo, perchè ho potuto riscontrare la fuoriuscita di fibre di carbonio dalla sagoma del provino, probabilmente dovute allo sfregamento con la testina dell'estusore nel layer successivo.

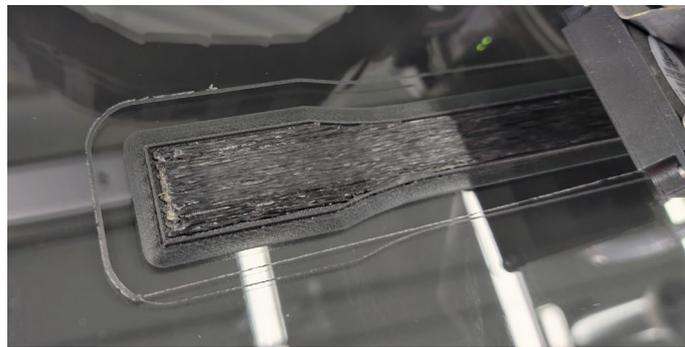


Figura 3.17: Come appare il rinforzo interno del provino 1.



Figura 3.18: Come appare il rinforzo interno del provino 2.

Come si può osservare in queste immagini la stesura della fibra continua non avviene in modo estremamente preciso e dettagliato, questo accade per vari motivi: il diametro del filamento estruso si aggira attorno ai 0,36 mm, che non è poco per essere utilizzato su piccoli componenti, la rigidità della fibra continua all'interno della matrice fusa non rappresenta un fattore ottimale per poter eseguire traiettorie strette, infine l'adesione tra fibra e matrice plastica all'interno della camera di fusione dell'estrusore può non essere sempre perfetta, quindi il diametro e la porosità del filo estruso può non risultare sempre omogeneo.

3.3.2 Prove a Rottura

Per effettuare le prove, come già detto, ho avuto modo di utilizzare il banco prova Galdabini Quasar 100, un macchinario estremamente efficace e accurato. Come menzionato nel paragrafo in cui ho descritto il macchinario, a causa di una scarsa compatibilità tra afferraggi ed estensimetri del banco, non risultava possibile acquisire misure riguardo la deformazione durante le prove.

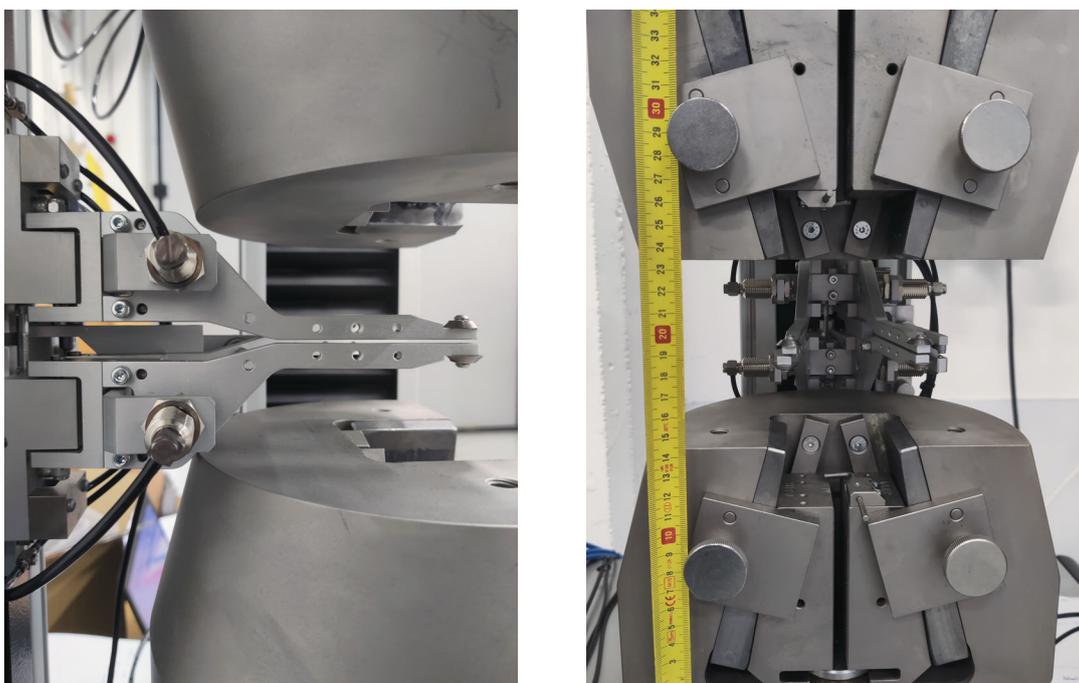
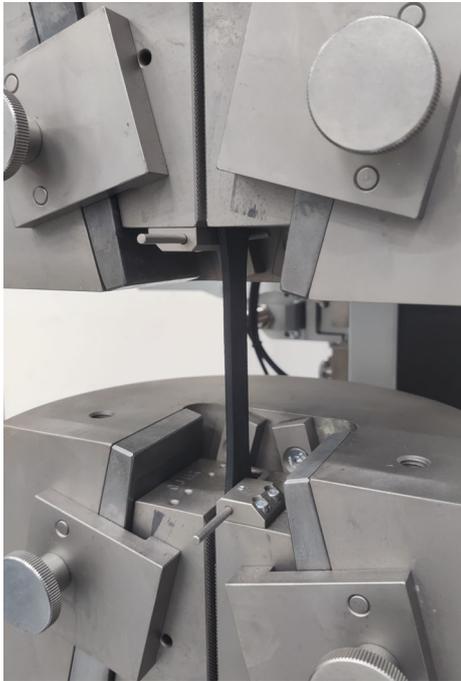


Figura 3.19: Problema ingombo estensimetri

Come si può notare in Figura 3.19 nonostante gli afferraggi siano parecchio distanti tra loro, l'estensimetro può essere utilizzato solo con una base estremamente ridotta, rendendolo inutilizzabile. Per risolvere questo problema è stato sufficiente ordinare dei nuovi estensimetri con i bracci più lunghi, che però non ho potuto utilizzare.

Per effettuare i miei test quindi ho seguito il procedimento descritto nella normativa ASTM D638-14, dove sono riportate tutte le informazioni del caso. Per procedere con la prova sui miei provini è opportuno applicare un precarico minore di 5 N, a velocità di 1 mm/min, con lo scopo di allineare correttamente il provino, in seguito inizia la vera e propria prova, dove si applica il carico mantenendo costante la velocità della traversa a 5 mm/min fino a rottura. Generando il metodo di prova su LabTest, è necessario definire anche i parametri di fine prova, in questo caso per assicurarmi che i provini fossero completamente rotti, le mie prove si interrompevano quando il carico applicato risultava del 90% inferiore al carico massimo rilevato durante la prova. In seguito ho definito i parametri che volevo visualizzare a fine prova, cioè nel mio caso solo lo sforzo in funzione dello spostamento della traversa,

le dimensioni del provino in esame e la frequenza di raccolta dei dati durante la prova, cioè 100 Hz.



(a) Provino negli afferraggi



(b) Provino rotto negli afferraggi

Figura 3.20: Provini durante i test

Per avviare una prova è sufficiente posizionare manualmente il provino negli afferraggi e serrare uno dei due tramite la pulsantiera, poi da programma si chiude pure l'altro afferraggio e si avvia la taratura del carico. Dopo questo procedimento è sufficiente avviare la prova, composta da precarico e carico, che il macchinario svolgerà in maniera autonoma in conformità al metodo impostato. Durante la prova è opportuno verificare il corretto procedimento e il modo in cui i dati vengono acquisiti. Al termine (innescato da rottura del provino o manualmente) si avranno a disposizione tutti i dati raccolti.

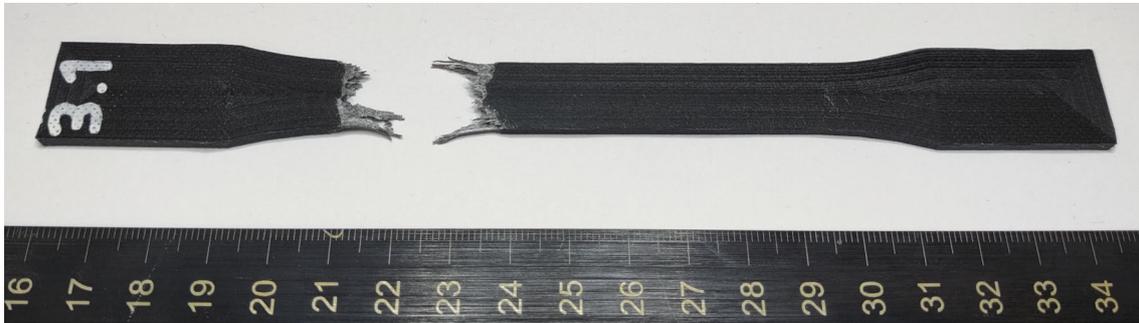
3.3.3 Analisi Risultati

Qui di seguito riporterò tutti i dati che sono riuscito ad acquisire riguardo i provini prima e dopo le prove. Queste informazioni sono: massa del provino, numero di fibre longitudinali, carico a rottura, immagini dei provini in seguito alla rottura. Con queste informazioni cercherò di fare delle osservazioni riguardo la forma dei provini, la tecnica di stampa e la modalità di rottura. Come si potrà notare, i provini mostrano dei comportamenti poco omogenei anche all'interno della stessa tipologia.

Provino 3

Parto dal provino 3 perchè è quello caratterizzato dall'assenza di fibre lunghe di rinforzo, quindi composto solo da PA rinforzato con fibre corte di carbonio.

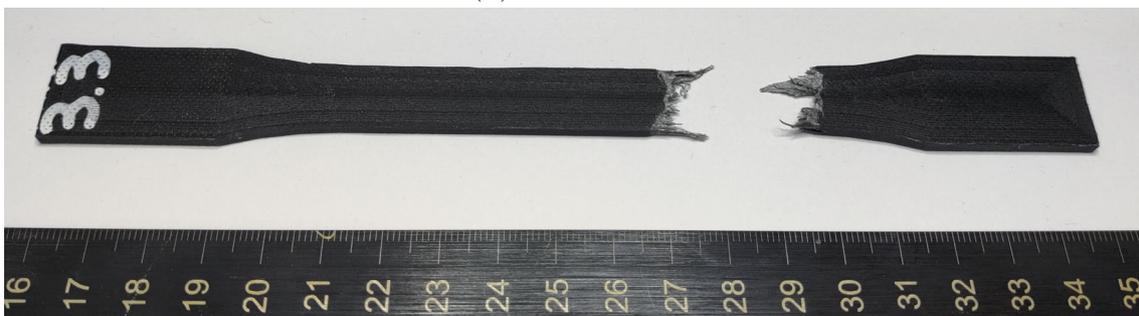
La massa media di questi 3 provini è 7.64g.



(a) Provino 3.1



(b) Provino 3.2



(c) Provino 3.3

Figura 3.21: Provini di tipo 3

Come si può notare dalle immagini, il modo in cui questa specie di provino si è rotto risulta molto omogeneo, tutti e tre i provini hanno subito una strizione nella zona adiacente al raccordo sul tratto parallelo e infine si sono deformati plasticamente fino a rompersi. In Figura 3.22 possiamo visualizzare il grafico Sforzo-Deformazione, in cui riconosciamo il comportamento di un materiale plastico. Lo sforzo massimo medio tra le tre prove è circa 50,6 MPa, quindi non molto diverso da un polimero comune in stampe 3D come per esempio il PA12.

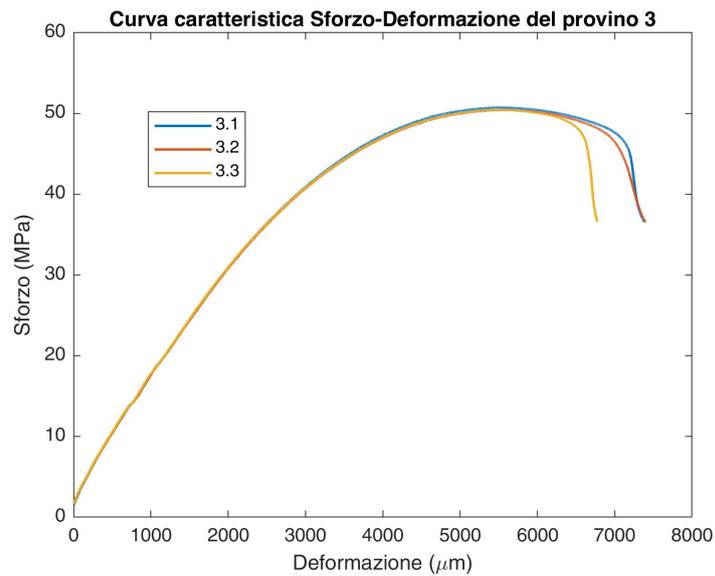


Figura 3.22: Grafico Sforzo-Deformazione provino 3.

Ripeto che in questo grafico la deformazione in realtà è lo spostamento della traversa del banco prova.

Provino 1

Il provino 1 è realizzato con riempimento solido a orientamento di 0° con un totale di 96 fibre continuative.

La massa media di questi 3 provini è 7.71g.

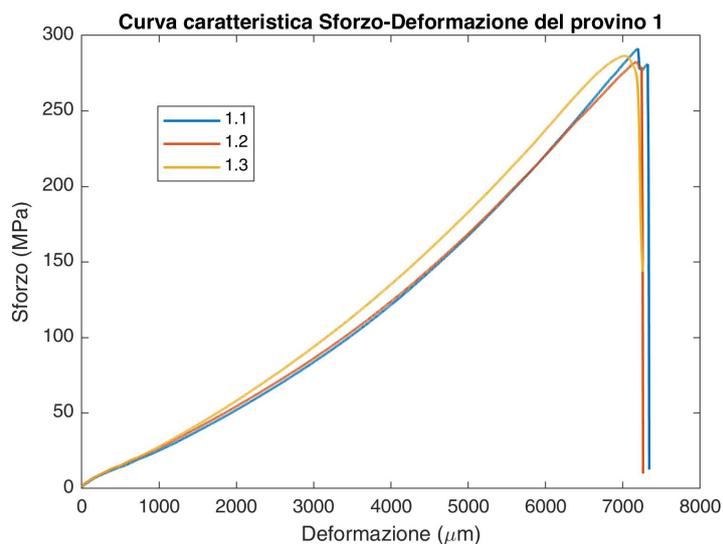
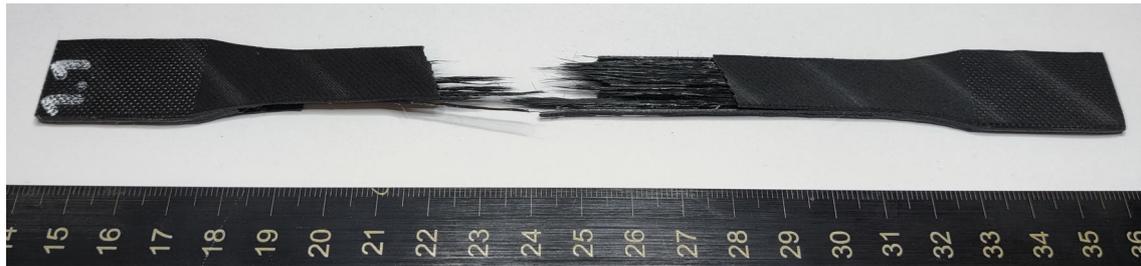
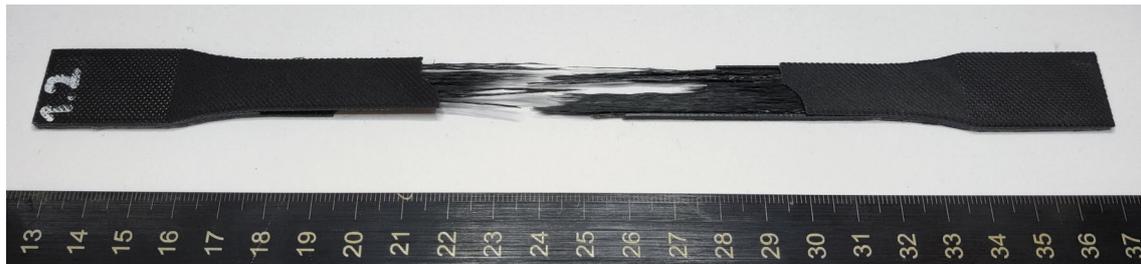


Figura 3.23: Grafico Sforzo-Deformazione provino 1.

Come si può notare in Figura 3.23 lo sforzo massimo delle tre prove è stato rispettivamente 291,4 MPa per il provino 1.1, 282,5 MPa per il provino 1.2, mentre



(a) Provino 1.1



(b) Provino 1.2



(c) Provino 1.3

Figura 3.24: Provini di tipo 1

286,5 MPa per il provino 1.3. I provini 1.1 e 1.2 come si può vedere nelle immagini si sono rotti circa a metà del tratto parallelo, mediante un cedimento di tipo fragile, sia da parte della fibra di carbonio che del guscio plastico.

Il provino 1.3 ha avuto un comportamento differente, possiamo notare che ad uno sforzo simile a quello in cui 1.1 e 1.2 hanno ceduto in maniera fragile, questo ha subito una delaminazione in corrispondenza dell'afferraggio. Delaminazione significa che si separa il guscio plastico dal rinforzo, a causa del cedimento dell'adesione avvenuta tra i due. Questo comportamento può accadere quando si cerca di unire due materiali con proprietà meccaniche molto differenti, come in questo caso. Possiamo appunto notare che una volta delaminato il provino, ha iniziato a deformarsi plasticamente il guscio plastico, in questo caso il rinforzo in fibra continua non si è rotto. Il punto in cui inizia a fratturarsi il guscio plastico è un punto critico a causa della pressione applicata dagli afferraggi sul provino. La differenza di comportamento tra 1.3 e gli altri due può essere data da un difetto di qualche genere all'interno della stampa.

Provino 2

Il provino 2 è realizzato con riempimento perimetrale del rinforzo per raggiungere un totale di 96 fibre continuative. La massa media di questi 3 provini è 7.93g.



(a) Provino 2.1



(b) Provino 2.2



(c) Provino 2.3

Figura 3.25: Provini di tipo 2

Il comportamento di questa specie di provino è stato consistente e omogeneo in tutte tre le prove, come possiamo notare sia dalle immagini dei provini rotti che dalla Figura 3.26 con gli sforzi applicati. Tutti e tre i provini hanno subito un cedimento fragile di fibra e guscio polimerico in corrispondenza di quel punto critico che avevo descritto nella sezione 3.3.1 (Realizzazione Provini), in questo punto si riscontra un'interruzione della fibra in alcuni layer. Il fatto che tutti e tre si siano rotti nello stesso modo è un buon indicatore per quanto riguarda il metodo di riempimento, che come descritto nella sezione 3.3.1 (Realizzazione Provini), risultava più compatto (quindi secondo me probabilmente meno soggetto a delaminazione) dei provini 1, 4 e 5.

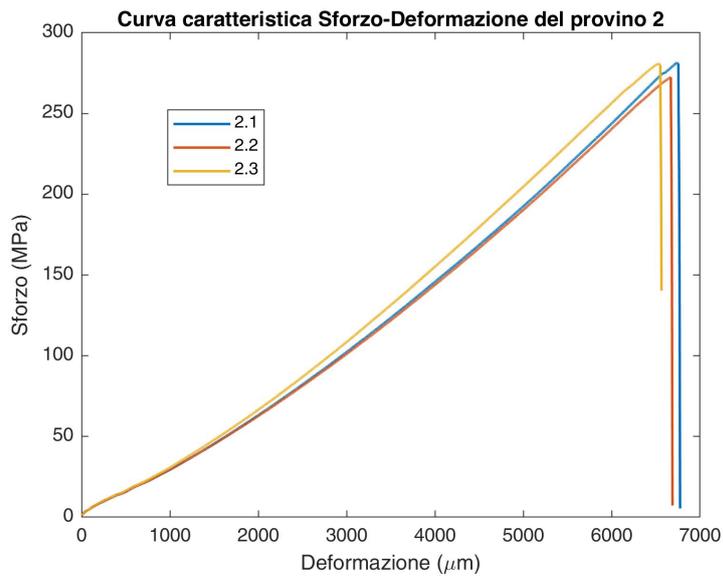


Figura 3.26: Grafico Sforzo-Deformazione provino 2.

Provino 4

Il provino 4 è realizzato con riempimento solido a orientamento di 0° con un totale di 90 fibre continuative. La massa media di questi 3 provini è 7.65g.

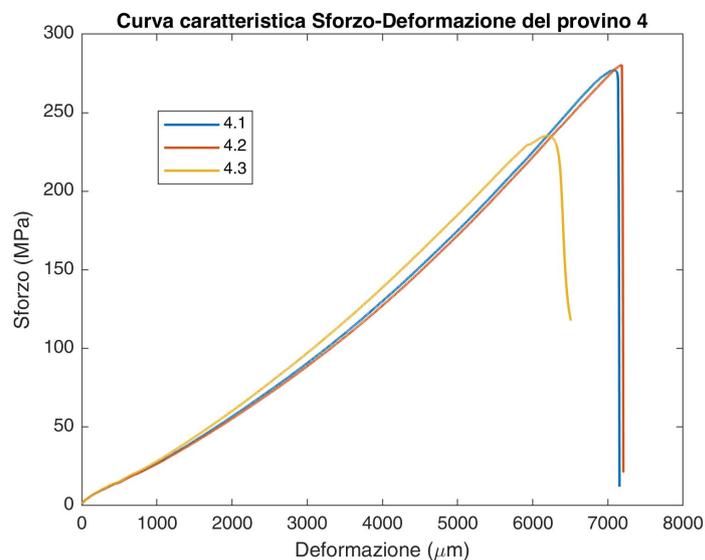
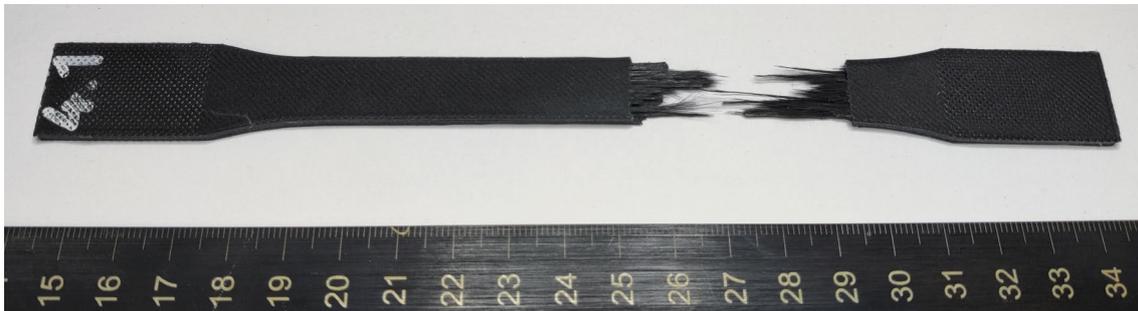


Figura 3.27: Grafico Sforzo-Deformazione provino 4.

Analizzando il modo in cui questi provini si sono rotti, notiamo che 4.1 e 4.2 hanno ceduto a sforzi simili, rispettivamente 277,1 MPa e 280,5 MPa, e anche in modi simili, entrambi lungo il tratto parallelo. In 4.1 notiamo una rottura fragile sia del rinforzo che della matrice plastica. In 4.2 notiamo che il rinforzo in fibra ha

subito rottura fragile, ma il guscio plastico no, infatti si è gonfiato dove è avvenuta la rottura ma è rimasto unito, deformandosi plasticamente.



(a) Provino 4.1



(b) Provino 4.2



(c) Provino 4.3

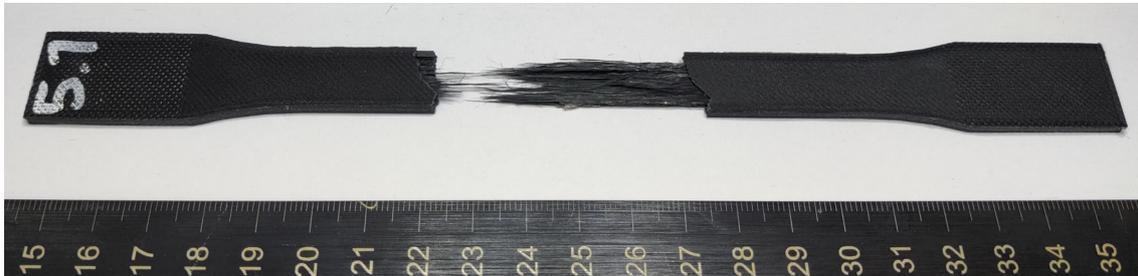
Figura 3.28: Provini di tipo 4

Per quanto riguarda il provino 4.3, riscontriamo nuovamente delaminazione in corrispondenza degli afferraggi. Anche qui (come per il provino 1.3) abbiamo un cedimento probabilmente causato dalla pressione esercitata dalle morse, che rende discontinua la distribuzione degli stress nel guscio plastico facilitando quindi il distacco tra lo stesso e il rinforzo in fibra. La delaminazione in questo caso è avvenuta a uno sforzo pari a 235,2 MPa, quindi molto minore degli altri.

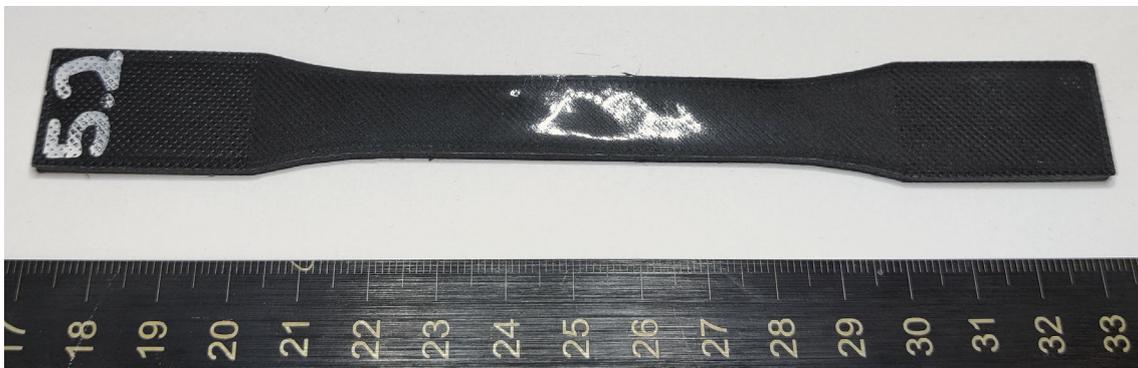
Provino 5

Il provino 5 è realizzato con riempimento solido a orientamento di 0° con un totale di 78 fibre continuative.

La massa media di questi 3 provini è 7.62g.



(a) Provino 5.1



(b) Provino 5.2



(c) Provino 5.3

Figura 3.29: Provini di tipo 5

Nei tre provini numero 5 riscontriamo tre comportamenti analoghi a quelli osservati nella tipologia di provino 4, solo a sforzi minori dato il minor numero di rinforzi. 5.1 ha subito rottura fragile sia del rinforzo che del guscio plastico nel tratto parallelo a $245,1$ MPa. Il provino 5.2 ha subito rottura fragile della fibra nel tratto parallelo, ma non la rottura del guscio plastico, solo deformazione plastica gonfiandosi a $256,4$ MPa, mentre il provino 5.3 si è delaminato in corrispondenza degli afferraggi a $171,9$ MPa.

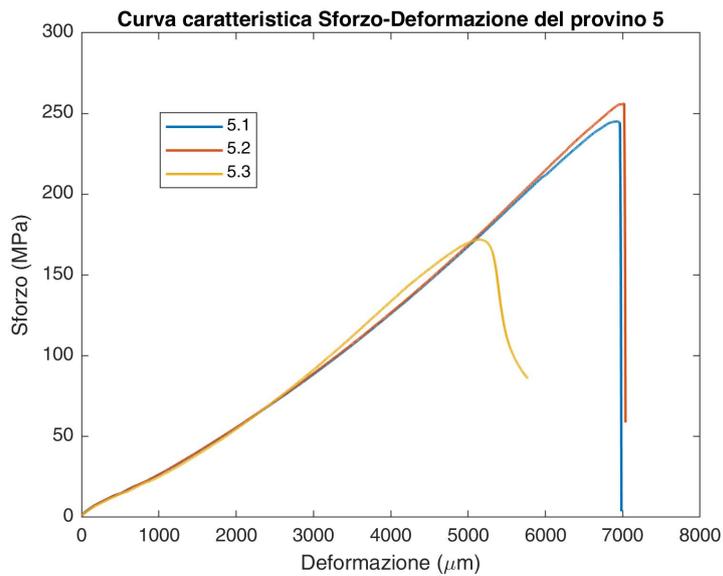


Figura 3.30: Grafico Sforzo-Deformazione provino 5.

Provino 6

Il provino 6 è realizzato con riempimento perimetrale delle fibre di rinforzo solo nel core rettangolare per raggiungere un totale di 108 fibre continuative.

La massa media di questi 3 provini è 8.05g.

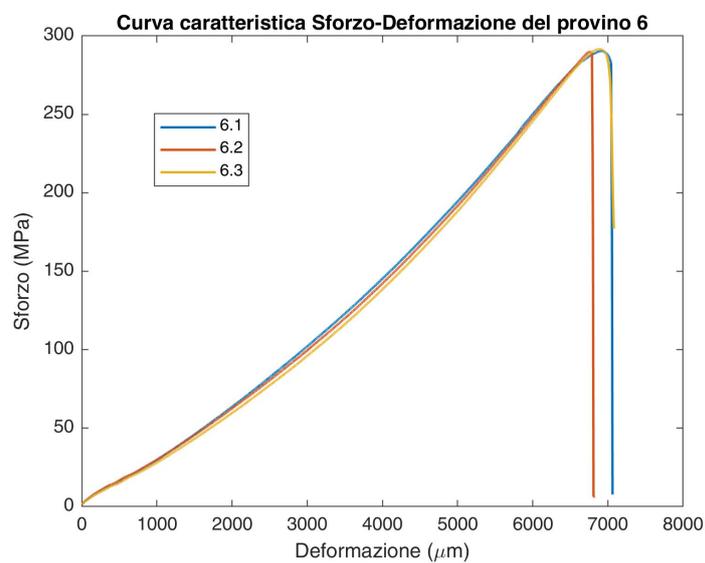


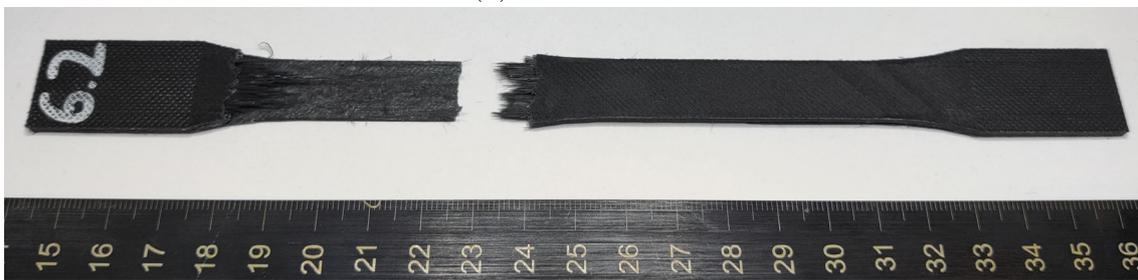
Figura 3.31: Grafico Sforzo-Deformazione provino 6.

Dal provino 6 mi aspettavo il comportamento migliore rispetto agli altri, perchè non presentava l'interruzione della fibra che riscontravamo nel provino 2 e neanche il piccolo vuoto tra rinforzo interno e guscio plastico presente nei provini 1, 4 e 5.

Come possiamo osservare in Figura 2.31 è quello che ha resistito a carichi maggiori, infatti 6.1, 6.2 e 6.3 si sono rotti rispettivamente a 290,5 MPa, 290,0 MPa e 291,6 MPa.



(a) Provino 6.1



(b) Provino 6.2



(c) Provino 6.3

Figura 3.32: Provini di tipo 6

I provini 6.1 e 6.2 hanno subito rottura fragile sia della fibra interna che del guscio polimerico a sforzi quasi uguali, entrambi in corrispondenza del raccordo tra tratto parallelo e zona di afferraggio. La zona del raccordo come vedremo in seguito nelle simulazioni, per i provini piani corrisponde ad un luogo dove si concentra il picco degli sforzi, è quindi ragionevole aspettarsi la rottura in questo punto. Per quanto riguarda il provino 6.3, invece, notiamo un comportamento anomalo, è avvenuta delaminazione senza rottura della fibra interna ad uno sforzo maggiore di quello che ha rotto sia 6.1 che 6.2.

Osservazioni Finali

Alcune considerazioni conclusive riguardo alle prove di trazione che ho effettuato.

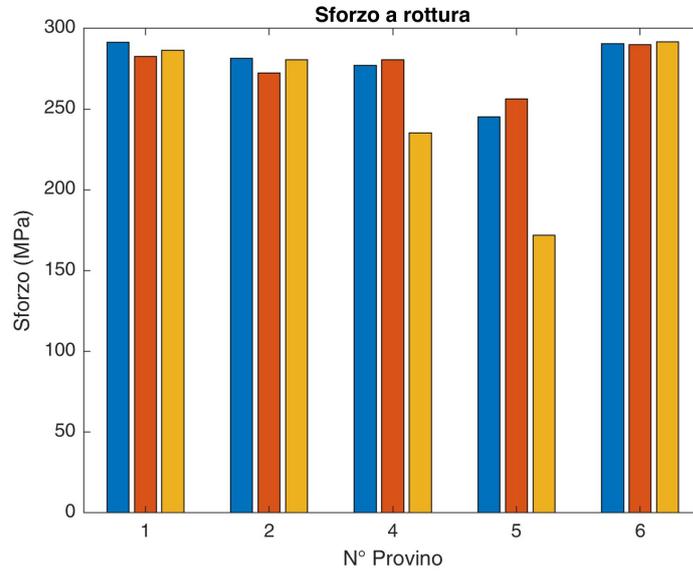
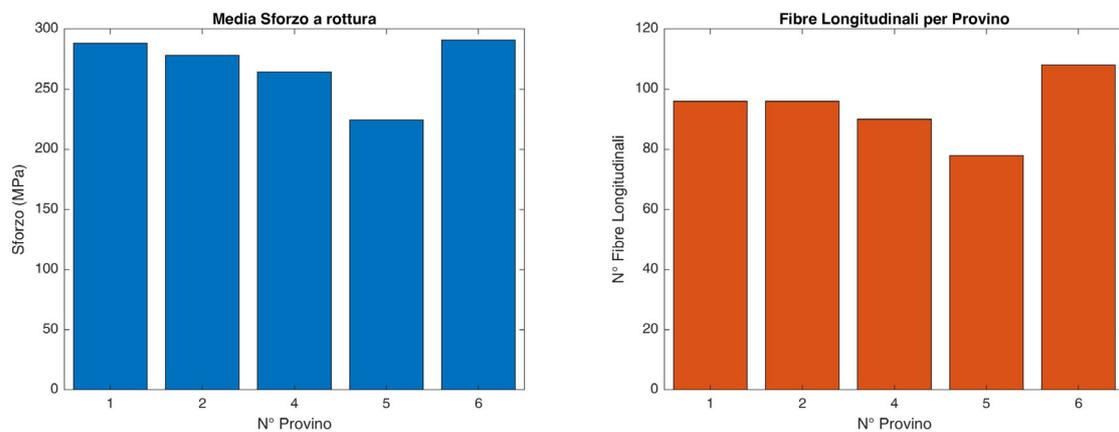


Figura 3.33: Sforzo a rottura di ogni provino.

In Figura 3.33 si può notare un istogramma contenente lo sforzo a rottura, quindi lo sforzo massimo di ogni provino, esclusi quelli senza rinforzo in fibra lunga.



(a) Media degli sforzi a rottura

(b) Numero fibre continue per provino

Figura 3.34: Istogrammi comparativi

In Figura 3.34 (a) e (b), invece, possiamo vedere a confronto e quindi notare la relazione, quasi diretta, tra il numero di fibre longitudinali che ho inserito nel provino e lo sforzo massimo medio a cui la tipologia di provino ha resistito. Risultato che può sembrare scontato con l'esperienza nei materiali omogenei, ma non così banale a parer mio in questo caso in cui entrano in gioco differenti fattori come la qualità di stesura dei rinforzi nel processo di stampa, e l'adesione tra i vari materiali in gioco.

Concludendo, come si è potuto notare dall'analisi dei provini rotti, non è semplice trovare una continuità nei risultati di questa prova, particolarmente per il modo in cui si rompono i provini. Questo può essere dovuto in parte alla modalità di prova, per cui secondo me il fatto di afferrare con elevata pressione il provino utilizzando delle morse zigrinate può facilitare sia la delaminazione, perchè carica troppo il guscio plastico in zone molto localizzate, sia può rischiare di compromettere la fibra di carbonio in quanto questa risulta molto fragile se sottoposta a compressione. Quindi secondo me l'utilizzo delle morse zigrinate può aver influito particolarmente sul modo di rottura per certe specie di provino. Altro fattore potrebbe essere proprio la tecnica di stampa, non so definire con certezza se la stampante che ho usato sia in grado di realizzare un processo perfettamente ripetibile, quindi se la varietà dei risultati che ho ottenuto dipende anche da questo, sicuramente è una cosa che non posso escludere. Sarebbero necessari ulteriori test per definire più accuratamente la ripetibilità di questo processo produttivo. Per quanto riguarda il comportamento ciclicamente simile del provino 4 e del provino 5, credo sia un caso, in quanto i provini sono stati stampati tutti in processi separati e in periodi della giornata non accomunabili. Come è stato osservato lo sforzo a rottura medio si aggira attorno ai 280 MPa e per alcune specie 290 MPa, quindi decisamente notevole se si pensa a quanto sia bassa la densità di questi provini e a quanto sia semplice realizzarne uno avendo a disposizione hardware e software dedicati. Credo che oltre alla realizzazione di provini da trazione, per cui questa tecnologia sicuramente non esprime il meglio di se, con una tecnica di stampa di questo genere abbiamo vastissime possibilità realizzative per componenti con proprietà uniche ed elevatissime per quanto riguarda il rapporto resistenza su peso, cosa che si cerca sempre di ottimizzare a livelli di competizioni o nell'ambito aerospaziale.

Capitolo 4

Simulazioni FEM

Ho avuto modo di sperimentare effettuando svariate tipologie di analisi FEM, in cui cercavo di simulare un provino in polimero con rinforzo interno in fibra di carbonio, per giungere a dei risultati qualitativi sulla distribuzione interna ed esterna degli stress, la deformazione e il modo di rottura. Lo scopo delle analisi numeriche è quello di verificare la possibilità di simulare il comportamento qualitativo di provini polimerici rinforzati con fibra di carbonio.

4.1 Realizzazione Modello

Per realizzare un modello del mio provino ho utilizzato NX. Ho preso come esempio il provino 6 nel quale avevamo una forma del riempimento interno rappresentata in Figura 4.1.



Figura 4.1: Provino 6.

Per poter semplificare la realizzazione del modello e il calcolo computazionale:

- ho rappresentato le fibre come se si sviluppavano lungo 9 rettangoli chiusi, uno interno all'altro (quindi non come una spirale rettangolare).
- invece di rappresentare il rinforzo con sezione circolare (diametro nominale 0.35 mm) ho utilizzato una sezione quadrata con area equivalente (Area = 0.0962 mm^2).
- invece di realizzare 6 differenti strati sovrapposti ho rappresentato un unico strato tramite una sezione rettangolare di base pari a 0.36 mm e altezza 1.6 mm, in questo modo abbiamo un'area quasi uguale a quella di 6 cerchi di raggio 0.35 mm (Area totale = 0.577 mm^2)

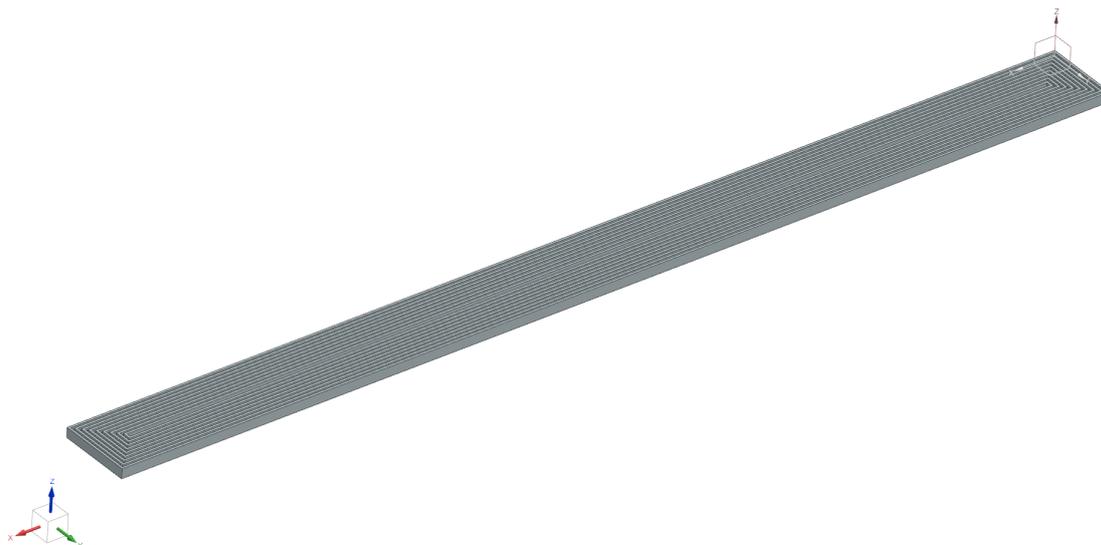


Figura 4.2: Rinforzo semplificato provino 6.

Il modello del rinforzo è stato sottratto dal provino di forma conforme alla normativa ASTM D638-14 in modo da crearvi una cavità, in seguito aggiungendo un nuovo modello del rinforzo è possibile avere anima e matrice di due componenti differenti la cui interfaccia sarà il bordo esterno per il rinforzo e il bordo interno per il provino.

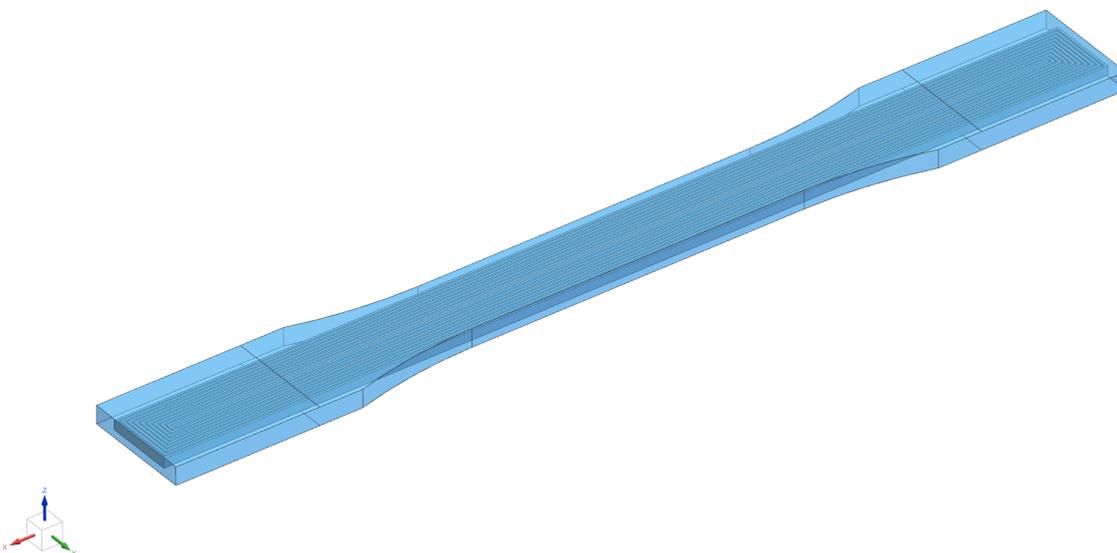


Figura 4.3: Provino 6.

In Figura 4.3 si può proprio notare il provino plastico in color azzurro traslucido che contiene il rinforzo prima descritto.

Per effettuare alcune simulazioni ho dovuto modellare una sorta di afferraggio, a cui in seguito avrei vincolato le pareti a contatto con il modello da testare, per evitare di avere una deformazione non realistica del provino nella zona in cui veniva aggrappato dagli afferraggi.

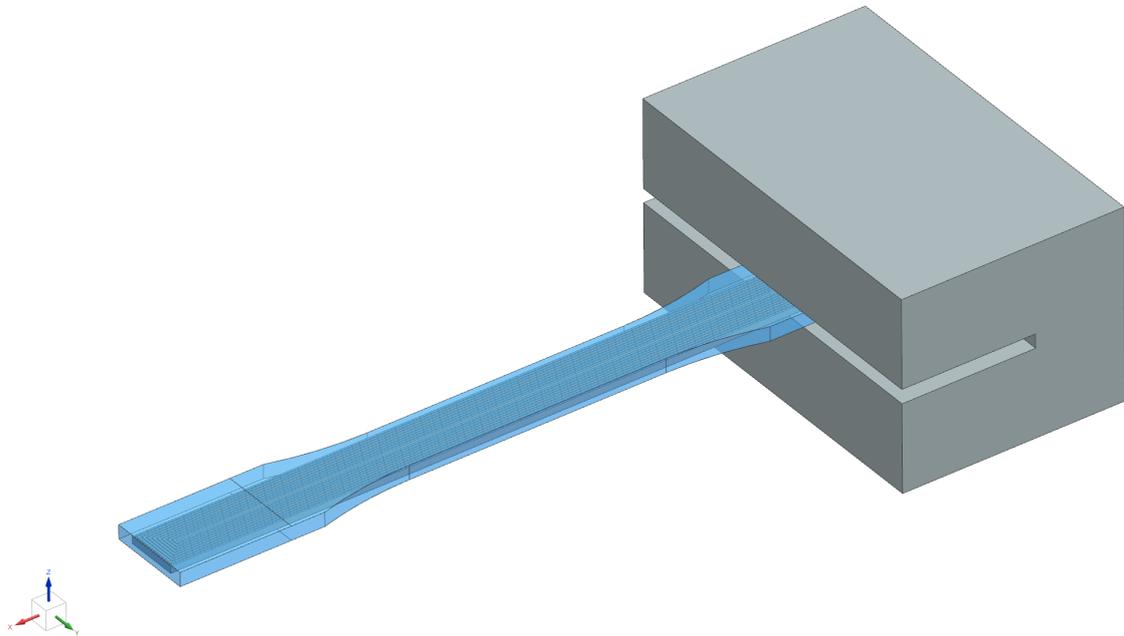


Figura 4.4: Provino 6 con afferraggio virtuale.

4.2 Simulazioni del Modello

Ho utilizzato Ansys per simulare forze, stress e allungamenti del provino, permettendo di applicare vincoli, contatti e proprietà dei componenti.

4.2.1 Simulazione Statica

Effettuare un'analisi statica agli elementi finiti significa prendere un componente, discretizzarlo in tanti piccoli elementi che manterranno le proprietà proprie del materiale, ma avranno una geometria ridotta e semplificata allo scopo di suddividere il calcolo di un parametro in tanti piccoli valori che dipenderanno da quelli degli elementini adiacenti. In questo modo il computer riesce a risolvere geometrie anche estremamente complesse tramite calcoli iterativi fino a raggiungere un risultato. Analisi statica significa che vengono applicate delle condizioni di vincolo e di carico statiche ad un componente, che quindi andrà a reagire a queste in una soluzione finale unica.

Per effettuare questa simulazione ho importato sul software Ansys, il modello che precedentemente avevo realizzato su NX. Ansys comprende un'ampia libreria di materiali, nel mio caso ho utilizzato i più simili che ho trovato a quelli del mio esempio

di studio: quindi fibra di carbonio per i rinforzi, polyetilene per la matrice e acciaio strutturale per gli afferraggi. Le relazioni di contatto tra le parti vengono generate automaticamente dal software quando le riconosce. Il passaggio da effettuare successivamente è la realizzazione della mesh, ovvero la suddivisione in elementini adatti al calcolo computazionale. Per ottimizzare sia la definizione del risultato che la semplicità di calcolo, ho applicato una mesh molto sottile agli elementi del provino e una più grossolana all'afferraggio, come si può vedere in Figura 4.5.

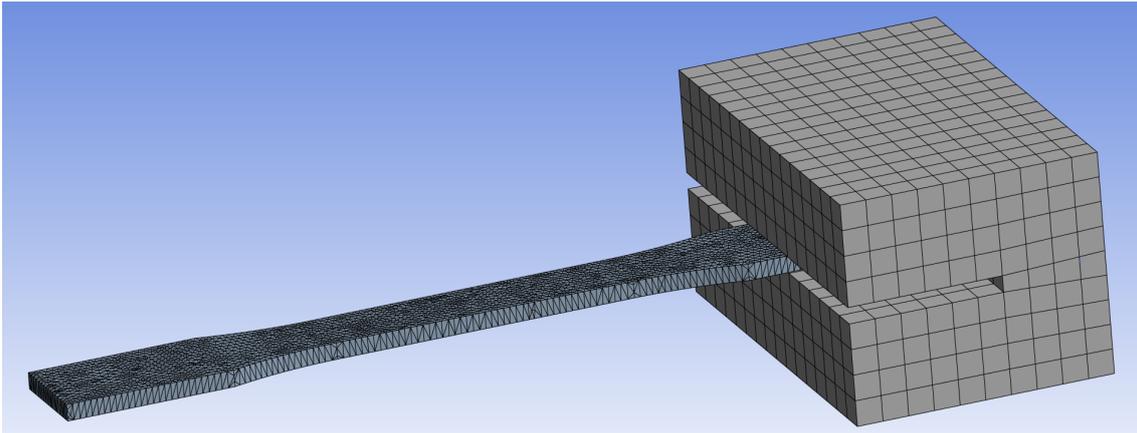


Figura 4.5: Provino 6 con afferraggio e visualizzazione della mesh.

A questo punto, nel mio caso, ho applicato un vincolo di fissaggio alle due superfici che entrano nella morsa, in blu nella Figura 3.6, mentre dall'altro lato ho applicato una forza di intensità pari a 5000 N all'afferraggio vincolato al provino, in giallo nella Figura 4.6.

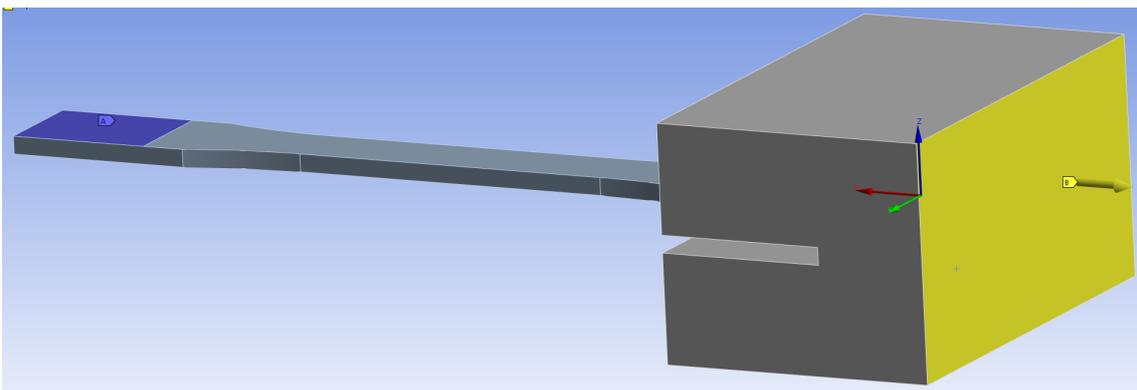


Figura 4.6: Elemento fissato (blu) e forza (giallo)

Infine è necessario impostare il tipo di soluzione che si vuole visualizzare una volta terminata la simulazione, in questa prova saranno stress equivalente e deformazione totale.

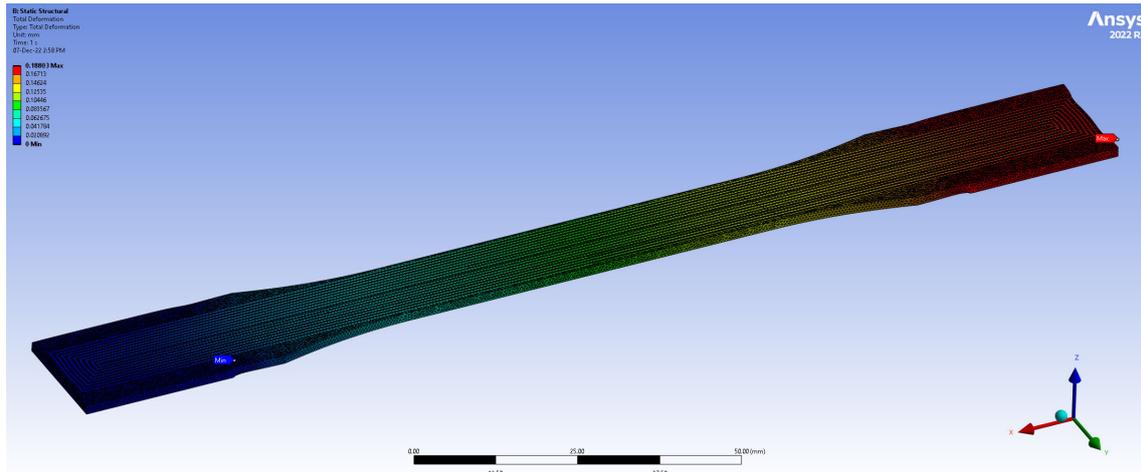


Figura 4.7: Deformazione totale visualizzata con sezione in mezzeria

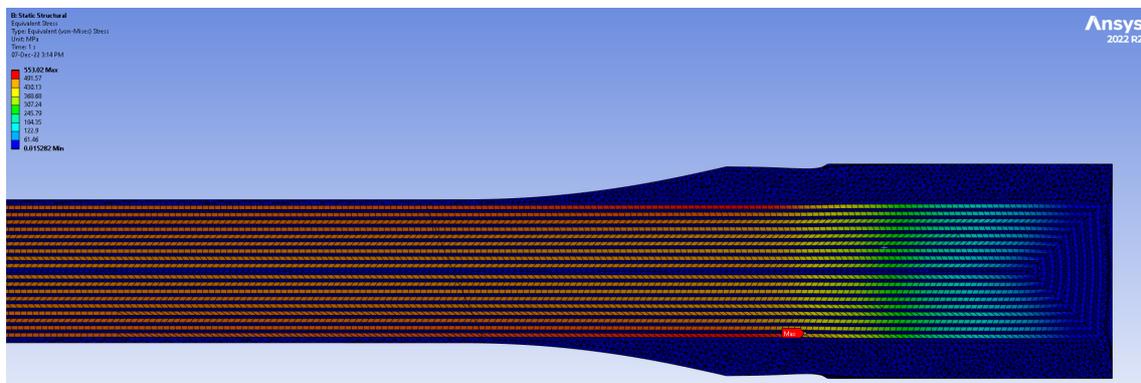


Figura 4.8: Stress equivalente visualizzato con sezione in mezzeria

In Figura 4.7 si visualizza la deformazione totale del provino, vediamo che per il carico dato, l'allungamento totale del provino è di circa 0.19 mm. In Figura 4.8 visualizziamo lo stress, cioè lo sforzo che varia all'interno degli elementi della mesh, si può appunto notare come gli elementi di rinforzo in fibra di carbonio assorbano quasi totalmente lo sforzo dato dalla forza. Lo sforzo tende a essere minore per le fibre più interne al provino, mentre la maggior concentrazione la notiamo tra la zona presa dagli afferraggi e il raccordo del provino, proprio dove osservavamo delaminazione o rottura in alcune prove al banco.

4.2.2 Simulazioni Dinamiche

Le simulazioni dinamiche sono differenti da quelle statiche perchè in queste è possibile applicare un carico o uno spostamento in funzione del tempo, quindi visualizzare i risultati in piccoli step temporali, come se svolgessimo una prova reale al banco. Per svolgere una simulazione dinamica si procede nello stesso modo di una simulazione statica, cambia solo il tipo di forze o spostamenti da applicare e i risultati da visualizzare.

Simulazione con Spostamento Multinodale

Per impostare una simulazione di questo genere è necessario generare una mesh preferibilmente dettagliata. Questa volta, invece di fissare o applicare forze a superfici del provino, vado ad applicarle ad un insieme di nodi, che sono gli spigoli degli elementi della mesh. Una simulazione svolta in questo modo ha lo scopo di annullare le criticità che accadono nella zona degli afferraggi e visualizzare come si romperebbe il provino in una situazione di prova ideale.

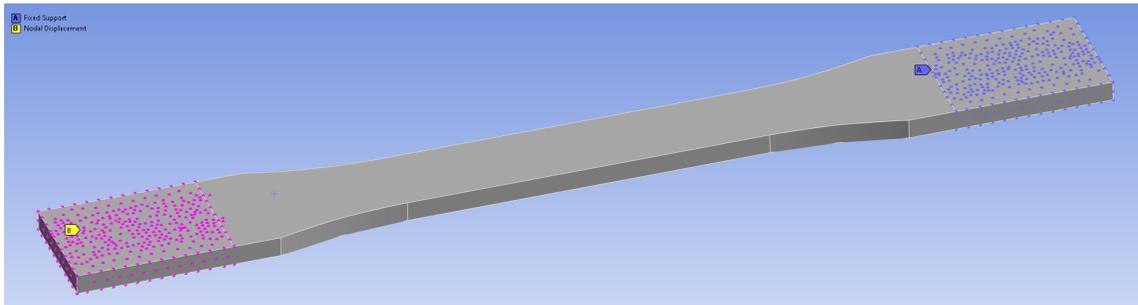


Figura 4.9: Impostazione simulazione multinodale

Nelle simulazioni dinamiche è possibile applicare spostamenti, come ho fatto io, ai nodi evidenziati in fucsia in Figura 4.9 ho applicato uno spostamento graduale nel tempo come quello che avrebbe applicato il banco prova, mentre i nodi evidenziati in blu sono fissi.

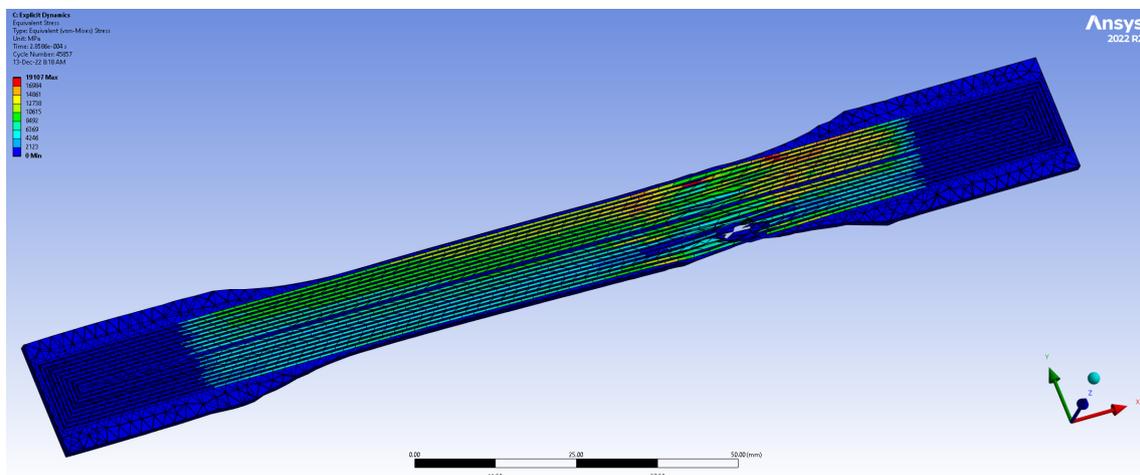


Figura 4.10: Stress equivalente visualizzato con sezione in mezzeria

In Figura 4.10 si visualizza il risultato dello stress nel momento della rottura del provino. Come possiamo notare anche qui, il punto dove si concentra più sforzo all'interno delle fibre, si trova in corrispondenza del raccordo del provino, e la rottura avviene esattamente dove è avvenuta quella dei provini 6.1 e 6.2.

Simulazione con Spostamento della Morsa

Per svolgere questa simulazione ho adottato il sistema di provino e morsa che avevo usato anche per la prova statica, in questo caso però ho applicato anche una pressione di 2.5 MPa che va a schiacciare la zona degli afferraggi, per rendere la simulazione ancora più realistica. Il valore della pressione è stato calcolato tenendo conto dell'inclinazione degli afferraggi, che sono a forma di cuneo nel banco prova, quindi è simile a quello che i provini subivano durante le prove al banco.

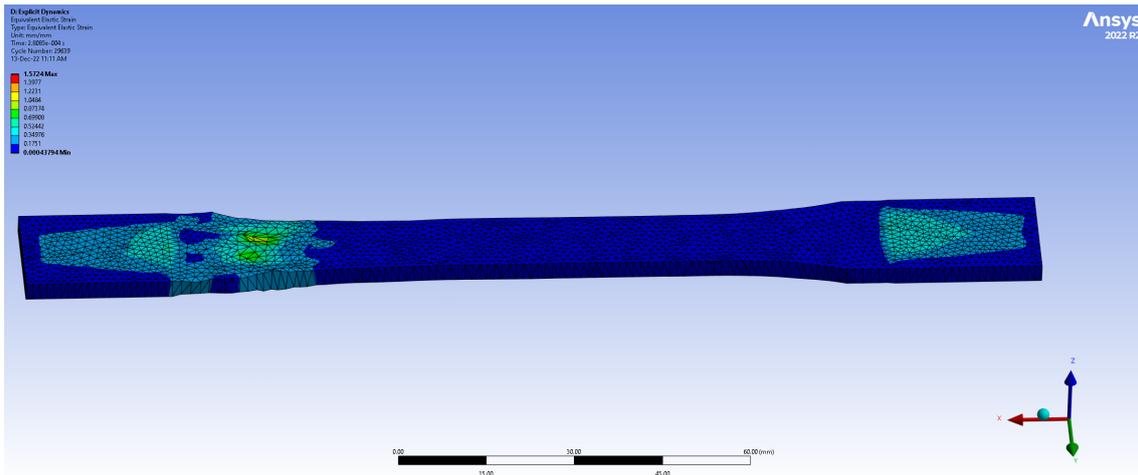


Figura 4.11: Deformazione elastica equivalente

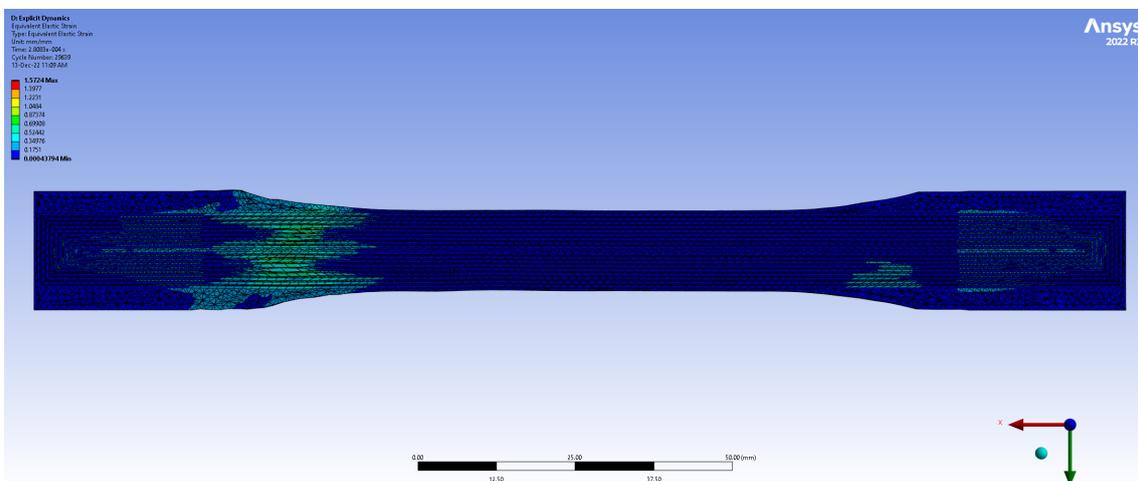


Figura 4.12: Deformazione elastica equivalente visualizzata con sezione in mezzeria

In queste due figure possiamo visualizzare la deformazione equivalente alla rottura del provino. Dalla Figura 4.11 possiamo osservare chiaramente come la pressione genera una deformazione del guscio plastico nella zona degli afferraggi, questo secondo me indica chiaramente un punto critico che, come abbiamo visualizzato dalle prove al banco, può essere luogo di cedimento del guscio e quindi di seguito innescare delaminazione del provino.

In figura 4.12 notiamo attraverso la sezione in mezzzeria, dove avviene la rottura delle fibre, ovvero nella zona del raccordo, che ancora una volta è proprio quello che accadeva anche nelle prove reali.

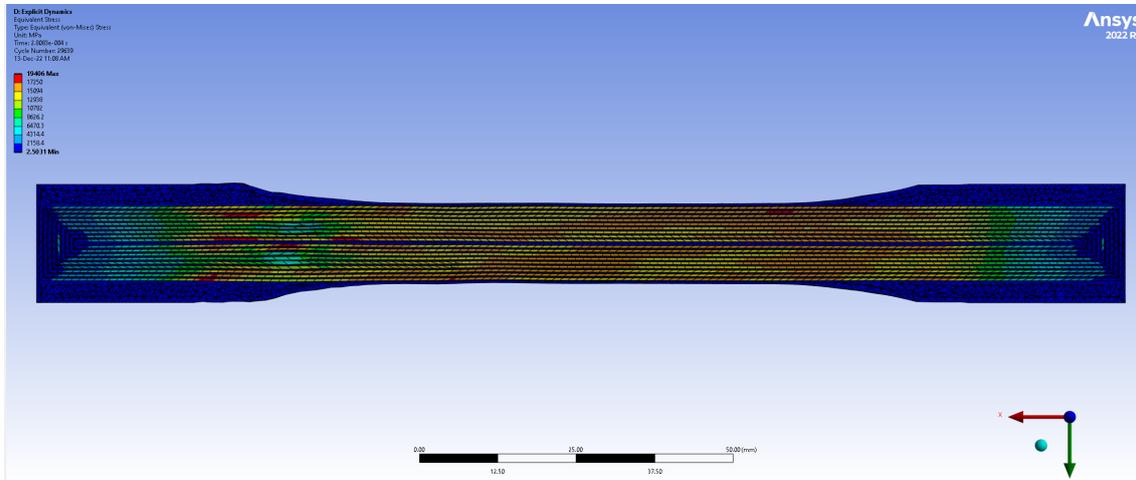


Figura 4.13: Stress equivalente visualizzata con sezione in mezzzeria

In quest'ultima figura è visualizzabile lo stress equivalente nel provino al momento della rottura. Ritroviamo ancora che la maggior concentrazione si ritrova nella zona del raccordo, ciò ovviamente porta alla rottura delle fibre di carbonio.

4.2.3 Considerazioni sulle Simulazioni

Come già detto le analisi che ho tratto da queste simulazioni sono qualitative. Questo mi è stato molto utile per comprendere la localizzazione dei cedimenti dei provini, dato che mentre facevo le prove al banco non riuscivo a spiegarmi come mai i provini si rompessero in quei modi e in quelle zone. Queste simulazioni sono state utili anche per verificare come il programma sia in grado di riprodurre le relazioni di aderenza tra i due componenti e abbiamo visualizzato che risultano molto simili al comportamento reale. Concludo dicendo che i risultati delle simulazioni sono positivi. Sarebbe necessario eseguire numerose altre simulazioni per raggiungere risultati anche quantitativi riguardo carico a rottura e allungamento, perfezionando le caratteristiche meccaniche dei materiali utilizzati sul software e confrontando i risultati ottenuti dalle simulazioni con ulteriori prove effettuate al banco.

Capitolo 5

Conclusioni

Dopo i numerosi test e analisi effettuate posso concludere che i componenti stampati con le tecnologie utilizzate presentano un'ottima resistenza a rottura, superiore a quella di un alluminio, presentando una densità minore della metà dell'alluminio. La buona resistenza a rottura però può scontrarsi con la principale difficoltà di questa tecnica di stampa, ovvero quella di estrarre fibra e polimero facendoli aderire bene. Come abbiamo visto dai modi di rottura dei provini, può essere motivo di cedimento del nostro componente. Abbiamo anche notato come analizzando attentamente gli slicing dei nostri provini, possiamo ridurre il rischio di cedimento del guscio plastico prima del rinforzo. Mediante le analisi numeriche abbiamo dimostrato la possibilità di simulare il comportamento di componenti stampati con questa tecnica. Un fattore critico della tecnologia è appunto la difficoltà nel simulare e quindi prevedere e progettare il comportamento di un componente senza dover necessariamente testarlo praticamente.

Appendice A

Abbreviazioni

AM: Additive Manufacturing

FFF: Fused Filament Fabrication

FDM: Fusion Deposition Modeling

CFRTP: Carbon Fiber Reinforced Thermoplastic Polymer

SLA: Stereolithography

MJF: Multi Jet Fusion

SLM: Selective Laser Melting

CCFRAM: Continuous Carbon Fiber Reinforced Additive Manufacturing

CAD: Computer Aided Design

FEM: Finite Elements Method

ABS: Acrylonitrile Butadiene Styrene

PLA: Polylactic Acid

PETG: Polietilene Tereftalato Glicole modificato

TPU: Thermoplastic PolyUrethane

PC: PolyCarbonate

Bibliografia

- [1] Ferreira, Isaac and Machado, Margarida and Alves, Fernando and Marques, Antonio Torres *"A review on fibre reinforced composite printing via FFF"*, Rapid Prototyping Journal, 2019
- [2] Van Der Klift, Frank and Koga, Yoichiro and Todoroki, Akira and Ueda, Masahito and Hirano, Yoshiyasu and Matsuzaki, Ryosuke and others *3D printing of continuous carbon fibre reinforced thermo-plastic (CFRTP) tensile test specimens* Open Journal of Composite Materials, 2016
- [3] Ozkan, Dervis and Gok, Mustafa Sabri and Karaoglanli, Abdullah Cahit *Carbon fiber reinforced polymer (CFRP) composite materials, their characteristic properties, industrial application areas and their machinability* Engineering Design Applications III, 2020
- [4] Nakagawa, Yuki and Mori, Ken-ichiro and Maeno, Tomoyoshi *3D printing of carbon fibre-reinforced plastic parts* The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017
- [5] Ning, Fuda and Cong, Weilong and Qiu, Jingjing and Wei, Junhua and Wang, Shiren *Additive manufacturing of carbon fiber reinforced thermoplastic composites using fused deposition modeling* Composites Part B: Engineering, 2015
- [6] Carolin, Anders *Carbon fibre reinforced polymers for strengthening of structural elements* Luleå tekniska universitet, 2003
- [7] Rahman, Mosfequr and Liggett, J Chandler and Grella, Kacie and Gagnon, Benjamin and Membreno, Alejandro *Validation of a finite element method for simulation of components produced by continuous carbon fiber reinforced additive manufacturing* International Journal for Computational Methods in Engineering Science and Mechanics, 2022
- [8] Naranjo-Lozada, Juan and Ahuett-Garza, Horacio and Orta-Castañón, Pedro and Verbeeten, Wilco MH and Sáiz-González, Daniel *Tensile properties and failure behavior of chopped and continuous carbon fiber composites produced by additive manufacturing* Additive Manufacturing, 2019

-
- [9] Azarov, AV and Kolesnikov, VA and Khaziev, AR *Development of equipment for composite 3D printing of structural elements for aerospace applications* IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020
- [10] Ghebretinsae, F and Mikkelsen, O and Akessa, AD *Strength analysis of 3D printed carbon fibre reinforced thermoplastic using experimental and numerical methods* IOP conference series: materials science and engineering, 2019
- [11] Jiang, Delin and Hoglund, Robert and Smith, Douglas E. *Continuous fiber angle topology optimization for polymer composite deposition additive manufacturing applications* Fibers, 2019
- [12] Corsi, M. and Bagassi, S. and Moruzzi, MC. and Seccia, L. *Correlation between production parameters and mechanical properties of ABS plus p430 fused deposition material* Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science , 2022
- [13] Majko, Jaroslav and Saga, Milan and Vasko, Milan and Handrik, Marian and Barnik, Frantisek and Dorčiak, Filip *FEM analysis of long-fibre composite structures created by 3D printing* Transportation Research Procedia, 2019
- [14] Liu, Guang and Xiong, Yi and Zhou, Limin *Additive manufacturing of continuous fiber reinforced polymer composites: Design opportunities and novel applications* Composites Communications, 2021
- [15] Žmindák, M and Novak, Pavol and Soukup, Josef and Milosavljevic, Dragan and Kaco, Michal *Finite element simulation of tensile test of composite materials manufactured by 3D printing* IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020
- [16] Zhang, Guoquan and Wang, Yaohui and Qiu, Wanglin and Dong, Ke and Xiong, Yi *Geometric characteristics of single bead fabricated by continuous fiber reinforced polymer composite additive manufacturing* Materials Today: Proceedings, 2022
- [17] Pizzorni, Marco and Lertora, Enrico and Parmiggiani, Albert *Adhesive bonding of 3D-printed short-and continuous-carbon-fiber composites: An experimental analysis of design methods to improve joint strength* Composites Part B: Engineering, 2022
- [18] Avanzini, A and Battini, D and Giorleo, L *Finite element modelling of 3D printed continuous carbon fiber composites: Embedded elements technique and experimental validation* Composite Structures, 2022