POLITECNICO DI TORINO

Facoltà di Ingegneria Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica



Caratterizzazione e modellazione numerica di materiale compositi prodotti mediante tecnologia di Additive Manufacturing

Relatori:

Luca Iuliano Manuela Galati Paolo Minetola Candidati: Stefano Pinna

Sommario

1 Stato de	Stato dell'arte			
1.1 Tec	Fecniche AM			
1.1.1	Liquido			
1.1.2	Polvere	11		
1.1.3	Solido	14		
1.1.4	Supporti	15		
1.1.5	Sviluppo	16		
1.2 Ma ⁻	teriali compositi	19		
1.2.1	Matrice polimerica	20		
1.2.2	Polimeri termoindurenti	21		
1.2.3	Polimeri termoplastici	21		
1.3 Me ⁻	todi tradizionali	22		
1.3.1	Produzione in Autoclave	22		
1.3.2	Filament Winding	23		
1.3.3	Fiber Placement	23		
1.3.4	Pultrusione	24		
1.3.5	Compression Molding Process	24		
1.3.6	Resin Transfer Molding	24		
1.3.7	Vacuum Infusion	25		
1.4 Con	npositi in AM	26		
1.4.1	Laminated Object Manufacturing	26		
1.4.2	Composite Based Additive Manufacturing	27		
1.4.3	Selective Laser Sintering	27		
1.4.4	Fused Filament Fabrication			
1.5 Cor	tinuos Filament Fabrication	29		
1.5.1	Mark Two			
1.5.2	Software			
1.5.3	Strategia			
1.5.4	Calibrazione macchina			
1.6 Pro	prietà meccaniche dei componenti additive a fibra lunga	38		
1.7 Mo	dellazione del comportamento meccanico	40		
2 Analisi sperimentale e modellazione numerica43				

	2.1	Cara	atterizzazione meccanica	43	
	2.1.	1	Design del provino per il test di trazione	43	
	2.1.	2	Design del provino per il test di flessione	44	
2.1.3		3	Design of experiment	45	
	2.1.	4	Design componente reale	48	
	2.2	Test	a trazione	49	
•	2.3	Test	a flessione	51	
	2.4	Prod	duzione dei provini	52	
	2.4.	1	Materiali	52	
	2.4.	2	Tempi di produzione	55	
	2.5	Мо	dellazione numerica	56	
	2.5.	1	Trazione	57	
	2.5.	2	Trazione componente reale	59	
	2.5.	3	Flessione	60	
3	Risu	ıltati	e discussione	61	
	3.1	Star	npa	61	
	3.1.	1	Trazione I	61	
	3.1.	2	Trazione II	64	
	3.1.	3	Flessione	66	
	3.2	Cara	atterizzazione meccanica	67	
	3.2.	1	Confronto a trazione	67	
3.2.2		2	Confronto sandwich a trazione	68	
	3.2.	3	Confronto a flessione	69	
	3.3	Traz	rione nel tempo	70	
	3.4	Cali	brazione del modello numerico	72	
	3.4.	1	Modello nylon	72	
	3.4.	2	Modello composito	74	
	3.5	Con	valida del modello numerico	77	
	3.5.	1	Trazione	77	
	3.5.	2	Confronto a trazione nel tempo	78	
	3.5.	3	Flessione	80	
	3.6	Ana	lisi economica	81	
4	4 Conclusioni				
Bik	3ibliografia				

Abstract

Il lavoro di tesi analizza il comportamento meccanico di un composito prodotto mediante la tecnica Continuous Filament Fabrication (CFF) allo scopo di convalidare un modello numerico per la predizione delle perfomance di un componente prodotto mediante questa tecnologia. Sfruttando gli sviluppi della tecnologia a estrusione, il CFF permette di produrre mediante approccio layer by layer, un componente composito. La fase iniziale del lavoro consiste nell'analisi e caratterizzazione sperimentale del materiale mediante prove di trazione e flessione statica. Successivamente, i risultati ottenuti sono stati confrontati con un modello numerico messo appunto specificatamente per la predizione di tali materiali. Sono stati determinati il modulo elastico longitudinale, trasversale e di taglio con cui calibrare il modello che è stato successivamente validato mediante i provini prodotti depositando la fibra a diversi orientamenti e a diverse altezze di costruzione. Inoltre, è stato analizzato il deterioramento delle proprietà meccaniche del materiale al variare del tempo, supponendo tre istanti temporali che potessero rappresentare il tempo di consegna, il tempo di utilizzo e la vita infinita del componente prodotto.

Introduzione

L'additive manufacturing (AM) nasce negli anni '80 sotto il nome di Rapid Prototyping per indicare una tecnica che permette di creare un oggetto strato dopo strato, senza l'ausilio di attrezzature aggiuntive [1]. Nasce quindi come un processo manuale che permette di generare una struttura tridimensionale come susseguirsi di layer che possono essere considerati in due dimensioni.

Con il passare degli anni la tecnica viene utilizzata nelle fonderie per la creazione di inserti e anime e, agli inizi degli anni 2000 la fabbricazione additiva permette la realizzazione di prodotti finiti [2].

Se nei primi anni l'AM ha sviluppato soluzioni produttive che utilizzavano un singolo materiale, negli ultimi anni la curiosità ingegneristica ha cercato di spostare l'attenzione sulla combinazione di più materiali così da ottenere prestazioni elevate con pesi minori e prestazioni variabili o differenziabili [3],[4]. Se poi si considera che il costo di produzione è calato con il passare del tempo e la loro importanza economica è cresciuta, la rilevanza dei compositi è ancora più evidente.

Gli ambiti con maggiore possibilità di sviluppare questa tecnica vanno ricercati all'interno di realtà sempre al passo con gli sviluppi tecnologici. Il settore automobilistico, nel quale si cerca il continuo alleggerimento ottiene quindi un vantaggio a livello di risparmio energetico, sia in campo racing che nella produzione in serie, che si ripercuote in una riduzione di dimensione e numero degli organi dell'auto [5]. L'integrazione strutturale permette di ridurre in modo significativo il numero delle singole operazioni di produzione e in alcuni casi anche il costo finale del componente.

I materiali compositi iniziano a far parte del mondo aeronautico già nella Seconda guerra mondiale con l'affermazione di compositi di fibra di vetro in resina epossidica per la realizzazione di strutture secondarie come gli allestimenti interni. Con il passare del tempo sono stati integrati in parti strutturali come le ali dei velivoli [6]. La rapidità delle modifiche di un componente direttamente dal CAD, la semplicità di creare geometrie complesse e canali interni, la riduzione di componenti da assemblare, sposano alla perfezione la filosofia di questi settori.

La seguente tesi si pone come obiettivo quello di caratterizzare il comportamento di un materiale composito rinforzato formato da matrice in nylon e rinforzo in fibra di carbonio, e la parallela modellazione con il supporto dell'analisi agli elementi finiti, strumento sempre più utilizzato per agevolare la progettazione con il vantaggio di avere un risultato vicino al comportamento reale e senza la necessità di effettuare prove sperimentali, con la conseguente riduzione dei tempi.

La progettazione dei provini utilizzati è stata fatto seguendo le normative che regolano gli standard per provini prodotti con metodi tradizionali in quanto non esistono standard per la produzione e i relativi test per provini prodotti tramite additive manufacturing. Sono stati fatti degli adattamenti alle dimensioni standardizzate per i limiti dovuti alla tecnologia utilizzata e dopodiché il materiale è stato sottoposto alla prova di trazione, i risultati ottenuti sono stati utilizzati per lo sviluppo del modello e la sua calibrazione. Il termine di questa fase coincide con l'inizio della fase di validazione del modello FE. Sono stati utilizzati provini con differenti rinforzi e i risultati ottenuti nella prova a trazione e flessione sono stati confrontati con quelli previsti dal modello creato precedentemente. Infine, è stato individuato un elemento della vita quotidiana che potesse essere ricreato in ottica FDM ed è stata eseguita la sua validazione. Il capitolo I espone gli studi che sono stati svolti precedentemente a questa ricerca con una panoramica sui materiali compositi e le tecniche che sono state impiegati tradizionalmente per ottenere questo tipo di materiali, e le più moderne tecnologie che vengono utilizzate nella fabbricazione additiva per lo sviluppo degli stessi.

Il capitolo II descrive la parte di progettazione e analisi sperimentale con la conseguente modellazione numerica. Sono stati riportati i provini e le normative che sono state utilizzate, le conformazioni dei compositi utilizzate per la fase di calibrazione e quella di validazione.

Il capitolo III espone i risultati ottenuti dalle prove sperimentali. Si fa particolare attenzione al confronto delle prove per la caratterizzazione del materiale, quindi i vantaggi che si ottengono rinforzando la matrice e il confronto tra i risultati sperimentali con quelli ottenuti tramite la modellazione numerica.

L'ultimo capitolo è dedicato alle conclusioni che sono state tratte durante la fase di sperimentazione e analisi.

1 Stato dell'arte

Le fibre continue sono rinforzi per matrici polimeriche che permettono di ottenere parti rinforzati con caratteristiche meccaniche paragonabili a pezzi lavorati a macchina in metallo. Continuous Carbon Fabrication è il termine che descrive la stampa di materiali compositi con il rinforzo di fibre continue tramite estrusione. Dal 2014, anno di nascita della stampante prodotta e brevettata da Markforged[©], sono state fatte diverse ricerche [7],[8],[9],[10],[11] analizzando il comportamento del materiale prodotto.

Van der Klift [9] è stato uno dei primi a studiare il comportamento meccanico con l'utilizzo della stampante prodotta da Markforged[®], questo ha permesso di avere maggiore conoscenza dei compositi rinforzati con fibra di carbonio, riscontrando diversi difetti durante la deposizione della fibra. In parallelo, Melenka et al. [8] hanno valutato le proprietà dei provini a trazione al variare della frazione di volume di Kevlar, ottenendo buoni risultati nella predizione dei risultati, soprattutto per alte frazioni, grazie allo sviluppo di un modello.

Liu et al. [12] hanno analizzato il comportamento all'interfaccia tra matrice (PA6) e fibra (CF), pre-impregnando la fibra e ottimizzando la strategia di stampa.

Dickson et al. [13] hanno studiato il comportamento di tre diverse fibre con la stessa matrice, valutando l'effetto del posizionamento, l'orientamento e la frazione in volume sul comportamento a trazione e a flessione, concludendo che la fibra di carbonio comporta risultati superiori al Kevlar e alla fibra di vetro. Secondo lo studio svolto da Justo [14], l'analisi della fibra di carbonio e la fibra di vetro porta il miglioramento delle prestazioni rispetto la sola matrice in nylon, ma con caratteristiche inferiori rispetto ai metodi tradizionali, fenomeno dovuto probabilmente alla porosità del materiale stampato. Goh et al. [15] provvedono con la caratterizzazione dei termoplastici rinforzati con fibra di carbonio e di vetro con le prove a trazione, a flessione e di penetrazione. Vengono messi in evidenza i limiti che la tecnologia ancora possiede, ma anche i vantaggi che possono incrementare con l'approfondimento della tecnica.

Todoroki et al. in [16] hanno analizzato le configurazioni standard di CFRP a 0°/90°/45° e hanno riscontrato come la configurazione a 0° comporti l'aumento del modulo di elasticità, la configurazione a 90° offra la maggiore resistenza trasversale, mentre la configurazione a 45° incrementi il modulo di taglio.

El Moumen et al. [17] utilizzano un modello RVE per implementare l'analisi FE e generare delle celle vuote per la rappresentazione della porosità generata nella fase di stampa. Hou et al. [18] mostrano come i pori si distribuiscano lungo la direzione longitudinale con un effetto negativo sulle proprietà del CFRCs.

L'adesione all'interfaccia viene analizzata da Fan in [19] valutando l'influenza della temperatura dell'ugello e del basamento, riscontrando il miglioramento del grado di coesione tra fibra e resina con l'aumento della temperatura da 180° a 220° per la matrice di PLA.

<u>Chacón</u> et al. [20] confermano gli studi precedenti con la valutazione dei provini sia a trazione che flessione, riscontrando grosse differenze nelle proprietà nel caso in cui il provino sia prodotto con orientamenti differenti e fortificando la già nota influenza della strategia di stampa. Le differenze tra le proprietà diventano minime quando il provino è stampato a diverse altezze del layer (0.1/ 0.125/ 0.2 mm).

Al contrario degli studi più recenti, l'indagine svolta da Dutra [21] rivela che considerare il nylon come matrice termoplastica che incorpora la fibra continua sottostima le proprietà elastiche trasversali e di taglio nel piano delle lamine rinforzate. Lo studio amplia notevolmente i risultati precedenti per quanto riguarda le proprietà meccaniche misurate nel taglio trasversale e nel piano.

Lo studio svolto da Wang et al. [22] riprende in considerazione l'effetto della strategia di stampa e i difetti che ne conseguono, influenzando indubbiamente le proprietà. Viene presentata una strategia di stampa per i C-CFRP fabbricati con FFF, che esclude i saltellamenti ed elimina il taglio della fibra durante la deposizione. I miglioramenti sono poi confermati dalle prove a trazione e flessione su tre punti.

Shi et al. [23] hanno studiato la variazione delle caratteristiche meccaniche su un provino nylon rinforzato in kevlar, con lo studio di quattro layer di rinforzo in tre diverse configurazioni: concentrati al centro, equidistanti a un quarto e disposti agli estremi. L'esperimento mostra la disposizione a quarti con caratteristiche superiori mentre i rinforzi agli estremi ottengono le prestazioni minime. È stato dimostrato che il processo in autoclave incrementa le prestazioni dei provini.

La seguente tesi si basa sul lavoro iniziato negli anni scorsi da Galati et al. [24], con la creazione di un modello FE per la predizione delle proprietà del materiale composito con fibra di carbonio e kevlar, risultati confermati dalle prove a trazione. Con la medesima è stato analizzato il comportamento del composito nylon rinforzato con fibra di carbonio, utilizzando le configurazioni con uno, due e tre layer di rinforzo. L'obiettivo è quello di confermare la validità del modello utilizzando una matrice differente, più configurazioni sandwich e per ultimo la conferma con i test a flessione.

1.1 Tecniche AM

L'AM si sviluppa con diverse tecniche che possono essere descritte in base al materiale che utilizzano (polimeri, metalli, ceramici) e alla forma della materia prima (solido, polvere, liquido). Spesso le tecniche per i diversi materiali, fatti gli opportuni accorgimenti, coincidono.



Figura 1 - Tecniche fabbricazione additiva

1.1.1 Liquido

Stereolitografia. Charles Hull cinque anni dopo Kodama sviluppa la SLA, tecnica che si basa sulla concentrazione di una sorgente luminosa in una vasca di resina fotopolimerica. Affinché questa possa essere utilizzata, è necessario che la sorgente laser inneschi il meccanismo di fotopolimerizzazione e solidificazione della parte interessata alla creazione dell'oggetto. Questa tecnica viene utilizzata per i test aerodinamici e di assemblaggio, per i modelli a perdere per la replicazione siliconica e per la fusione a cera persa nel campo della gioielleria oltre che per la produzione di parti complesse con dettagli di piccola dimensione. Vantaggi:

- offre le migliori prestazioni in termini di tolleranze dimensionali e rugosità superficiali
- possibilità di realizzare elementi trasparenti/lucidi
- produzione di modelli a perdere per il ciclo di microfusione

Svantaggi:

- materiali termoindurenti
- supporti dello stesso materiale prodotto
- impossibile sfruttare l'intero volume di lavoro
- vincoli sull'installazione per la presenza del fotopolimero liquido
- limitata stabilità dimensionale dei componenti a causa delle tensioni residue



Figura 2 - Processo SLA [2]

1.1.2 Polvere

Selective Laser Sintering. Nel 1989, Carl Deckard brevetta la SLS. Una tecnica che utilizza la materia prima sotto forma di polvere, stesa in maniera uniforme su una piattaforma mobile mediante una racla. La sorgente laser si occupa di sinterizzare solo le parti del layer interessate e dopo un lento raffreddamento si procede con il movimento della piattaforma verso il basso così che le operazioni si possano ripetere. Da questa verranno successivamente sviluppate la Direct Metal Laser Sintering (DMLS) e la Select Laser Melting (SLM).

Vantaggi:

- buona tolleranza dimensionale e rugosità superficiale
- materiali termoplastici definitivi
- elevata produttività e possibilità di saturare il volume di lavoro
- possibilità di inserire nuovi pezzi a job avviato
- assenza di supporti e post trattamento

Svantaggi:

- limitata disponibilità dei materiali
- difficoltà di adattamento alla produzione definitiva
- tempi lunghi per il cambio materiale in macchina



3DP. Questa tecnica è stata sviluppata dal Massachussets Institute of Technology che concesse la licenza, in funzione del materiale, a cinque aziende, di cui tre hanno effettivamente sviluppato le macchine (ExOne[©], VoxelJet[©], 3D System[©]).

Il processo si basa sulla deposizione di gocce di collante su letto di polvere come in figura 4, il quale penetra sotto la superficie e permette l'adesione delle particelle. Gli impianti che utilizzano questa tecnica hanno volumi di lavoro medio grandi e si occupano della produzione di modelli sacrificali per la microfusione, oltre anime e forme per la fusione in sabbia.



Vantaggi:

- elevata produzione delle parti
- resa fotorealistica con la stampa a colori
- possibilità di variare le prestazioni del componente in funzione dell'infiltrante
- assenza di supporti e assenza di vincoli

Svantaggi:

- materiale non definitive e prestazioni meccaniche limitate
- impossibile sfruttare l'intero volume di lavoro

DOD. La Drop on Demand è stata sviluppata dalla società Sanders del 1992 e successivamente acquisita da Stratasys[©]. Il processo prevede la fase di deposizione mediante testina di stampa con la successiva fresatura dello strato, quest'ultima permette di ottenere una buona superficie per depositare lo strato successivo e una maggiore precisione sull'asse Z. Viene utilizzata per la creazione di modelli a perdere per microfusione in settori come la gioielleria, la meccanica di precisione e nel dentale.

Vantaggi:

- ottime prestazioni in termini di tolleranze dimensionali e rugosità superficiali
- supporti solubili in soluzione acquosa
- materiali atossici e calcinabili
- assenza di post trattamento e vincoli per l'installazione
- Svantaggi:
 - materiali con proprietà meccaniche limitate
 - volumi limitati
 - velocità di costruzione molto bassa
 - impossibilità di saturare l'intero volume di lavoro



1.1.3 Solido

Fused Deposition Modeling. Nel 1992 Scott Crump inventa la FDM. La scadenza del brevetto ha portato la diffusione delle stampanti 3D a basso costo. La tecnica consiste nella deposizione mediante estrusione di un filamento di materiale termoplastico arrotolato su bobine, più il materiale utilizzato per viene utilizzato per i supporti, su una piattaforma di lavoro [28]. Il processo avviene tramite il riscaldamento di un ugello attraverso il quale viene scaldata, portata a temperatura di estrusione ed estrusa una piccola quantità di materiale. Viene utilizzata per la stampa di numerosi materiali termoplastici come PLA, ABS, TPU, PC, PA.



Figura 6 – Processo FDM [28]

1.1.4 Supporti

Il ruolo dei supporti è quello di sostenere, per un tempo limitato, le strutture costruttive finché non solidificano. Le caratteristiche che questi elementi devono rispettare sono due: stabilità e robustezza durante la fase di stampa, facilità di rimozione nella fase successiva.

Il tipo di macchina utilizzato permette di fare la distinzione sul materiale che verrà utilizzato nei supporti, offrendo la possibilità di un secondo materiale quando son presenti due ugelli, e utilizzando lo stesso nel caso in cui la macchina avesse un solo ugello. In alcuni casi è possibile avere il materiale di supporto solubile in acqua, facilitando la rimozione.

L'aspetto che caratterizza maggiormente i supporti è l'angolo di generazione. Parametro che determina quali superfici verranno supportate e quali no in base all'angolo di inclinazione, generalmente, rispetto l'orizzontale. Il software analizza le singole superfici valutando la loro inclinazione e creando i supporti per le superfici con un angolo superiore al valore limite impostato. È necessario studiare e collocare la struttura e la disposizione ottimale del pezzo in modo che lo slicer si preoccupi il meno possibile per il sostegno del pezzo.



Figura 7 - Creazione supporti componente automotive

1.1.5 Sviluppo

Tutte le tecniche dell'AM hanno in comune la capacità di utilizzare solo il materiale necessario per la fabbricazione del pezzo, considerando anche la creazione di supporti. Questo permette di affermare che i vantaggi non sono solo a livello manufatturiero ma permettono di eliminare o quasi, i rifiuti presi di mira dalla Lean Manufacturing [29], compresi quelli che danneggiano l'ambiente o riducono la sostenibilità.



Figura 8 - Comparazione AM [29]

Il materiale che viene utilizzato nella maggioranza dei casi è il polimero. Questo è dovuto a delle barriere all'ingresso molto più basse rispetto metalli o ceramici. Il suo sviluppo ha avuto una crescita esponenziale con il passare del tempo e la scadenza dei primi brevetti ha permesso l'implementazione delle tecniche più diffuse, permettendo l'utilizzo di stampanti a estrusione anche al di fuori dell'ambito industriale. In commercio si possono trovare macchine a partire dal centinaio di euro che permettono agli appassionati di giocare e avere qualche soddisfazione. L'altro lato della medaglia mostra la poca conoscenza che delle volte porta ad un utilizzo sbagliato dei prodotti ottenuti.

La crescita su larga scala assume un ruolo importante se la diffusione di queste macchine venisse associata al riciclo del materiale plastico, in parallelo ovviamente a una maggiore educazione per far fronte ai pro e ai contro. Fabio Sanchez in [30] analizza il lato ecosostenibile dell'additive trovando negli ultimi dieci anni circa novanta articoli che discutono dell'economia circolare che ruota attorno a questo mondo.

Un ulteriore studio portato avanti da Huang [31] propone un nuovo modo per riciclare i polimeri compositi con la creazione di pezzi tridimensionali utilizzando la FDM. I risultati mostrano che la produzione additiva offre una potenziale strategia per riutilizzare i rifiuti CFRP e fabbricare rapidamente polimeri rinforzati.



Negli ultimi anni l'attenzione delle aziende è stata spostata verso le tecniche che utilizzano i metalli e le sue leghe [32]. Grazie a queste, ambienti di lavoro come l'aeronautico e l'automotive trovano grossi vantaggi per merito della personalizzazione dei prodotti finiti, ottenendo forme e geometrie che non sono mai state ottenute con le tecniche tradizionali. Nel campo medicale l'utilizzo del titanio per la creazione di protesi sta sostituendo le leghe di cobalto utilizzate fin ora, grazie alla sua biocompatibilità che riduce il rischio di problemi legati al rigetto e la sua qualità superficiale che permette la calcificazione ossea. Da non trascurare il vantaggio di adattare i singoli elementi alla persona che ne usufruirà.



Figura 10 - Tutore ottenuto per FA [33]

Un vantaggio che viene riscontrato nei metalli è quello di poter personalizzare la microstruttura del componente modificando i parametri durante la stampa del pezzo. La pala di una turbina è un esempio tra i più comuni, viene garantita la microstruttura più grossolana alla base, con proprietà meccaniche inferiori ma maggiore resistenza agli urti, e una microstruttura più fine man mano che si arriva all'estremità della pala, con caratteristiche meccaniche superiori.



Figura 11 - Microstruttura pala di turbina [33]

1.2 Materiali compositi

Un materiale si dice composito quando è costituito da due o più fasi con proprietà fisiche differenti, le cui proprietà sono migliori di quelle fasi che la costituiscono. I materiali che danno vita al composito prendono il nome di matrice e rinforzo.

La matrice è una fase omogenea con il compito di racchiudere il rinforzo in maniera da garantire la coesione del materiale composito, e a seconda del tipo di materiale utilizzato si possono distinguere:

- PMC (Polymer Matrix Composite): compositi a matrice polimerica, termoplastica nel caso di nylon e ABS, termoindurente nel caso delle resine epossidiche.
- MMC (Metallic Matrix Composite): compositi a matrice metallica, solitamente alluminio o titanio.
- CMC (Ceramic Matrix Composite): compositi a matrice ceramica, generalmente carburo di silicio o allumina.

Il rinforzo viene disperso in diversi modi all'interno della matrice e ha il compito di assicurare rigidezza e resistenza, facendosi carico degli sforzi esterni. Anche in questo caso, a seconda del tipo, i rinforzi si dividono in:

- compositi particellari: il rinforzo è costituito da particelle, le quali possono essere considerate equiassiche e le proprietà che ne derivano dipendono dalla dimensione e forma o, dalla concentrazione, distribuzione e orientamento all'interno della matrice
- compositi strutturati: solitamente si intendono i laminati o sandwich
- compositi rinforzati in fibra: viene fatta una prima distinzione tra fibre corte e fibre lunghe. Le prime a loro volta si distinguono in discontinue allineate o disposte in maniera casuale, mentre le seconde vengono anche dette continue.

La caratteristica che distingue questa tipologia e può essere usata come vantaggio rispetto le altre, è la forte anisotropia che permette al materiale di ottenere delle caratteristiche elevate nel caso in cui venga sforzato lungo la direzione delle fibre. La fibra di vetro, di carbonio e il kevlar sono tra le fibre più utilizzate.

1.2.1 Matrice polimerica

Un polimero è costituito da lunghe catene che hanno come elementi costituenti atomi di carbonio e atomi di idrogeno. Gli atomi sono collegati tra loro da legami covalenti, caratterizzati da elettroni di legame non liberi e vincolati tra due atomi precisi.



Figura 12 - Esempio catena polimerica

Dal punto di vista meccanico le catene generano anisotropia nelle proprietà perché da una parte il legame carbonio-carbonio è molto forte e sviluppa una certa rigidità, dall'altra avendo catene debolmente connesse esiste uno scorrimento che altera la percezione di rigidezza data dal legame covalente. Le caratteristiche meccaniche saranno la media tra le proprietà microscopiche del legame e le proprietà macroscopiche ottenute dal comportamento delle catene.

Dal punto di vista fisico il fatto che gli elettroni sono vincolati agli atomi e non più liberi di muoversi (come nei metalli) fa sì che i materiali polimerici siano degli isolanti elettrici, e nei limiti anche termici. La matrice ha la capacità di influenzare la densità, la resistenza al taglio la resistenza interlaminare.



Figura 13 - Struttura chimica polimerica PA6 (nylon)

1.2.2 Polimeri termoindurenti

I monomeri che costituiscono questo tipo di polimero ha la forte predisposizione a generare catene laterali e a connettersi con la catena principale avendo proprietà molto simili. Le catene oppongono resistenza ai movimenti rotazionali e vibrazionali che si possono produrre con la temperatura e, superando il valore massimo di resistenza, queste vengono rotte e il polimero viene distrutto. La maggior parte dei polimeri facenti parte di questa famiglia è caratterizzata da legami covalenti incrociati che si stabiliscono nel trattamento termico.

Nell'ottica della tecnologia additive non si può pensare di utilizzare il polimero già fatto, la macchina deve essere in grado di dare origine alla reazione che aggrega i monomeri in polimero. Questo tipo di materiale non può essere riciclato.

1.2.3 Polimeri termoplastici

A differenza dei polimeri termoindurenti, i termoplastici mantengono la loro plasticità. Quando si fornisce sufficiente calore, arrivando poco sopra il punto di fusione, il materiale rammollisce abbastanza da essere lavorato. Se la fonte viene rimossa e la temperatura scende sotto la temperatura di fusione, la plastica solidifica tornando in uno stato simile al vetro.

La temperatura massima che può essere utilizzata con un termoplastico e la temperatura di transizione vetrosa nel caso in cui sia amorfo, o la temperatura di fusione nel caso in cui sia semicristallino. Questo limite è esclusivamente teorico perché la rigidità del materiale diminuisce significativamente quando la sua temperatura supera la temperatura vetrosa. L'utilizzo di fibre organiche e inorganiche è particolarmente vantaggioso per rinforzare la matrice termoplastica con conseguente incremento del modulo elastico anche al di sopra della temperatura vetrosa.

I materiali termoplastici hanno un ciclo di vita indefinito, basso assorbimento di umidità, eccellente stabilità termica e chimica. Possono essere riprocessati, passando dallo stato fuso, e le strutture danneggiate possono essere riparate applicando calore e pressione.

1.3 Metodi tradizionali

Ci sono numerose tecniche che permettono la realizzazione di componenti in composito [34]. Alcune di queste nascono per esigenze industriali specifiche, come lo stampaggio a iniezione, altre invece son state sviluppate per rispondere alle sfide proposte dalla progettazione o dalla produzione. La scelta della tecnologia dipende allora dalla combinazione tra matrice e fibra che viene scelta per la produzione del componente. I compositi termoplastici vengono realizzati con autoclave, fiber placement, pultrusione, formatura per compressione, termoformatura e tecniche di stampaggio a iniezione.

1.3.1 Produzione in Autoclave

La polimerizzazione delle resine può avvenire, come detto, in stampi riscaldati o sottovuoto, ma i risultati migliori si ottengono tramite il processo seguente.

L'autoclave è un dispositivo dotato di chiusura ermetica al cui interno, tramite controlli digitali, è possibile gestire livelli di temperatura, vuoto e pressione per ottenere la polimerizzazione della resina. Il componente viene tenuto sottovuoto sigillato in appositi involucri per eliminare tutte le infiltrazioni di aria e sottoposto ad una pressione esterna per migliorarne la compattezza.



Figura 14 - Autoclave Italmatic [35]

1.3.2 Filament Winding

Il FW è utilizzato per lo più nella produzione di prodotti compositi circolari cavi internamente. Consiste nell'utilizzo di una preforma rotante intorno alla quale si avvolgono fibre di tessuto impregnate di resina. Il metodo così detto "a umido" prevede che la fibra effettui il raccoglimento della resina a bassa viscosità passando da una vasca di impregnazione (come avviene anche nella pultrusione) mentre il metodo "a secco" utilizza filamenti preimpregnati. Dopo l'indurimento del prodotto, lo stampo interno viene rimosso dando origine al prodotto finito.

1.3.3 Fiber Placement

È un processo simile al FW, ma in questo caso le fibre vengono disposte sulla superficie del mandrino una striscia per volta con un processo automatizzato. La differenza rispetto il processo precedente sta nel fatto che le fibre vengono spinte verso la superficie del mandrino, non possono essere utilizzate fibre o fasci di fibre flessibili, ma devono avere una certa rigidità. Un'altra differenza è quella di utilizzare esclusivamente preimpregnanti.



Figura 15 - Processo fiber placement [36]

1.3.4 Pultrusione

È possibile realizzare componenti a basso costo con la sicurezza di un processo continuo e automatico, che consente di arrivare ad alti volumi produttivi con la fabbricazione di sezioni costanti. Il materiale passa attraverso uno stampo riscaldato e viene curato parzialmente o completamente. Il grado di permeabilità della resina nelle fibre varia in base al quantitativo di fibre impregnate e al loro grado di compressione nel letto di resina. Dopo il processo i componenti ottenuti saranno lisci e non richiedono la fase di post-processo.

1.3.5 Compression Molding Process

Tale tecnologia viene utilizzata per lo più con materiali termoindurenti, ma trova utilizzo anche con i termoplastici. Il processo prevede l'inserimento del composito da stampare all'interno della sezione inferiore di uno stampo aperto riscaldato, la parte superiore dello stampo viene abbassata mediante pressione idraulica, in modo che il composito assuma la forma dello stampo e l'eventuale eccedenza venga trasportata all'esterno. La pressione viene mantenuta costante per tutto il tempo ed il composto curato viene rimosso dallo stampo.

1.3.6 Resin Transfer Molding

Lo stampaggio a trasferimento di resina viene utilizzato in molte applicazioni automotive e aeronautico perché permette la riduzione del tempo di fabbricazione con prodotti finali ad elevata resistenza. In questo processo si introduce la resina all'interno dello stampo dove in precedenza è stato messo il rinforzo.



1.3.7 Vacuum Infusion

Il RIFT prevede un processo sottovuoto, nel quale la pompa di aspirazione crea una depressione che spinge la resina catalizzata ad attraversare ed impregnare tutti gli strati di tessuto. La velocità con cui si può riempire una pila di tessuti dipende dalla viscosità del sistema di resina, dalla permeabilità degli strati di tessuto e dal gradiente di pressione che agisce sulla resina infusa. Prevede principalmente l'utilizzo di sacchi a vuoto in film o in silicone riutilizzabili per più stampe.

Rispetto l'infusione classica, si ha un sistema di lavorazione nel quale un film di resina soggetto a diverse temperature viene collocato sopra il tessuto e, grazie alla depressione creata, attraversa tutti gli strati del tessuto in maniera uniforme. Si ottiene un risparmio dei costi, in una produzione più rapida ed efficiente con una maggiore accuratezza nella realizzazione del componente finale.



1.4 Compositi in AM

Negli ultimi anni sono state sviluppate nuove tecnologie che permettono di poter utilizzare l'AM con i materiali compositi. I polimeri rinforzati in fibra prendono una grossa fetta del mercato ingegneristico e vengono identificati con l'acronimo FRPs.

Ciò che rende così peculiari questi materiali è la loro lavorabilità e la variabilità delle proprietà meccaniche al variare dei tipi delle combinazioni matrici/rinforzi studiate. Inoltre, i materiali a disposizione di tale tecnologia permettono di stampare non solo strutture leggere ma anche estremamente resistenti.

Tra i campi che beneficiano maggiormente di questi vantaggi possiamo citare quello militare [6] con la fabbricazione di ali alleggerite, l'industria automotive e l'industria navale che sfrutta le potenzialità dell'additive, per esempio, per la modifica di volantini [39].

1.4.1 Laminated Object Manufacturing

La LOM (Laminated Object Manufacturing) è stata sviluppata da Helysis nel 1991, passata successivamente a Cubic tecnhologies[©], i quali, prima di chiudere, sfruttavano film polimerici [40]. Utilizza fogli di materiali differenti, tagliati, sovrapposti e incollati per la realizzazione di manufatti, in maniera molto simile alla tecnica tradizionale.

Viene utilizzato per parti che devono avere caratteristiche unidirezionali con fibre di vetro continue e matrice epossidica. Si ottiene una buona adesione all'interfaccia dei singoli strati anche se si riscontra il problema con le elevate temperature sul rullo che non porta a completa consolidazione le parti. Sonmez e Hahn [41] hanno verificato che gli effetti termici dipendono dalle dimensioni del rullo. L'adesione sarà più favorevole con le dimensioni elevate del rullo a causa della minore concentrazione di stress.



1.4.2 Composite Based Additive Manufacturing

Un altro metodo per la fabbricazione di compositi è il CBAM, acronimo di Composite Based Additive Manufacturing. Lamine consecutive di fibre lunghe vengono impacchettate e fuse insieme con il supporto di un collante liquido mediante la stampa Inkjet e compattate durante il riscaldamento. Anche in questo caso si riscontrano vantaggi per quanto riguarda la velocità di produzione con la possibilità di ottenere geometria complesse, rispetto le tecniche tradizionali.



Figura 19 - Processo CBAM [42]

1.4.3 Selective Laser Sintering

Utilizza il materiale base sotto forma di polvere, il laser scansiona il letto di polvere e layer dopo layer si ottiene la struttura 3D desiderata. La polvere che viene utilizzata spazia dai materiali ceramici ai metalli, passando per i polimeri. Nylon, poliammide (PA), polietilene (PE) e PCL sono tra i polimeri più utilizzati. A sua volta la tecnica può essere suddivisa in tre sottocategorie: Solid State Sintering (SSS), Liquid Phase Sintering-Partial Melting (LPSPM), Full Melting e Chemically Induced Binding.

SSS è un processo che lavora tra la metà e la temperatura di fusione. Nel LPSPM il materiale che funge da legante diventa liquefatto mentre la matrice rimane solido.

Il metodo che utilizzano Zhu et al. [43] si basa sulla preparazione della polvere composita in fibra di carbonio rivestita in nylon (PA12). I componenti ottenuti sono caratterizzati da una maggiore porosità rispetto le altre tecnologie e per questo vengono infiltrate successivamente con la resina epossidica (EP) e successivamente polimerizzati ad alta temperatura. Il composito che si ottiene in questo caso si dice ternario.

1.4.4 Fused Filament Fabrication

La tecnica più diffusa e relativamente più semplice è la FFF. Si basa sul flusso di materiale fibrorinforzato attraverso l'ugello e la successiva deposizione sul piatto di stampa o su layer precedenti [44]. L'orientamento della fibra è definito dal flusso che quindi governa il comportamento anisotropo della parte stampata e nel caso in cui la frazione di fibra fosse significativa, sono presenti delle fibre in sospensione. L'orientamento delle fibre influisce sul campo di flusso risultante. Carneiro e Silva [45] utilizzano fibre di vetro come rinforzo del polipropilene (PP), riscontrando l'effettivo incremento dello sforzo e del modulo elastico.

Durante la deposizione il materiale ha un'elevata temperatura e, dopo il raffreddamento subisce un secondo riscaldamento per permettere allo strato successivo di essere depositato. Il processo di bagnatura determina l'area di contatto tra le sferette mentre la lunga esposizione ad alta temperatura influisce sulla coalescenza e la diffusione nelle catene polimeriche. A bassa temperatura, la mobilità molecolare decresce e il processo di diffusione rallenta fino a fermarsi. Nei polimeri semi-cristallini la viscosità aumenta rapidamente quando inizia il processo di cristallizzazione, interrompendo la fase di coalescenza.

La tecnica è stata inserita nel contesto racing grazie al team F1 Mclaren [46] con il supporto di Stratasys[©] e la loro Fortus 450mc, utilizzando nylon caricato con carbonio per la fabbricazione del braccetto di collegamento della linea idraulica. Questa soluzione ha permesso alla squadra di risparmiare in tempo, circa due settimane per la fabbricazione del componente.



1.5 Continuos Filament Fabrication

La società nordamericana Markforged ha brevettato il processo di stampa CFF. Dopo la scadenza del brevetto FDM di Stratasys[©], si è distinta dagli altri produttori per l'introduzione di nylon caricati con fibre continue di carbonio, kevlar o fibra di vetro, e l'adozione di un sofisticato controllo di processo che verifica la correttezza degli strati depositati.

Il sistema è provvisto di una doppia testa di stampa: un estrusore per il deposito della matrice (nylon o Onyx) (FFF) e un estrusore per il deposito delle fibre di rinforzo continue (CFF). La possibilità di stendere filamenti continui permette di distribuire la resistenza su tutta la parte prodotta. Onyx è il fiore all'occhiello di Markforged, è un nylon caricato con microfibra di carbonio che produce parti con una buona finitura superficiale. Secondo la casa esistono pochi materiali con la stessa versatilità, Onyx offre elevata resistenza, tenacità e resistenza chimica quando viene stampato e può essere usato come matrice con il rinforzo di fibre continue ottenendo caratteristiche paragonabili all'alluminio.

La produzione Markforged è costituita da tre modelli che variano per dimensione della tavola di lavoro e materiali utilizzabili. Si va dalla stampante entry level Onyx Pro [47] che può utilizzare Onyx e fibra di vetro, alla Mark Two [48], introdotta nel 2014, che può utilizzare tutti i materiali disponibili, fino alla Mark X [49] introdotta nel 2016, che oltre alla possibilità di impiegare tutti i materiali, è dotata del sistema laser di controllo dimensionale.

Negli ultimi anni sono state sviluppate altre macchine, come la COMBOT-1 prodotta da Shaanxi Fibertech Technology Development Co. [50], capace di stampare PLA con rinforzi in fibra di carbonio o kevlar con la tecnica FDM e utilizzata nel caso studio riportato da Hou in [18]. Nel 2020 è stata lanciata sul mercato la Wizard 480+, capace di sfruttare la CFF, prodotta dalla compagnia austriaca APS – Tech Solution [51].

1.5.1 Mark Two

La macchina che è stata utilizzata per la produzione dei provini è la Mark Two prodotta da Markforged. Questa ha profondità di 330 mm e larghezza di 584 mm, con un'altezza di 355 mm per un peso di circa 16 kg. Dalle dimensioni si può subito notare che non permette la produzione di pezzi di grosse dimensioni e nonostante la tecnologia CFF, non ha raggiunto il successo commerciale sperato in quanto non in grado di poter soddisfare le esigenze del mercato nella produzione, il volume di lavoro è ridotto a 132 mm per 320 mm di lunghezza, e all'altezza di 154 mm. Oltre questa problematica, si aggiunge la mancanza di un sistema di controllo capace di individuare sia le tolleranze che i possibili difetti dello strato deposto.



Figura 21 - Markforged MarkTwo

La testina si sposta sull'area di lavoro con un sistema gantry. I due motori passo-passo e il sistema di trasmissione a cinghie (figura 22) permettono lo spostamento con estrema precisione.



Figura 22 - Motore passo-passo per la trasmissione del moto

La piattaforma sulla quale viene stampato il pezzo viene mossa lungo la direzione Z con un sistema madrevite che permette piccoli spostamenti e una risoluzione che può variare dai 0.1 mm ai 0.2 mm.

Entrambi le matrici polimeriche e i filamenti di fibra sono fornite direttamente da Markforged.



Figura 23 - Sistema di movimentazione della piattaforma

La stampante permette la deposizione del materiale polimerico e della fibra attraverso due ugelli separati come si può vedere dalla figura 24. I due sono calettati sulla stessa testina ma lavorano in maniera autonoma per quanto riguarda la deposizione del materiale in quanto i due materiali lavorano a temperature differenti.



Figura 24 - Dettaglio ugelli

L'operazione di caricamento del materiale deve essere svolta prima di chiudere la dry-box. Tramite lo schermo touch della macchina viene scelta l'opzione "upload plastic" così da attivare il sistema di trazione (figura 25). Il filamento di nylon deve essere tagliato in maniera tale da formare un angolo di circa 45° così da agevolare il suo ingresso nel sistema di trazione prima, e nell'apposito ugello poi.

Dopo aver portato il capo del filamento a battimento, il sistema provvede a posizionarlo fino all'ugello. Un ultimo controllo alla bobina, così da evitare attorcigliamenti o posizioni errate del filo e si può chiudere la dry-box. Lo stesso procedimento viene svolto per la bobina di carbonio.



Figura 25 - Sistemi di trazione carbonio e nylon

1.5.2 Software

Lo slicer che viene usato da Markforged si chiama EIGER e come tutti gli slicer permette di sezionare prima il disegno tridimensionale e poi, fornisce alla macchina le informazioni necessarie per costruirlo strato dopo strato. Inoltre, permette la gestione di altre funzioni come il posizionamento sul piano di lavoro, calcola eventuali supporti, tempi e costi di stampa preventivamente.

Oltre le operazioni classiche, EIGER permette di sfruttare le potenzialità della tecnologia CFF da remoto grazie alla piattaforma basata sul cloud che consente di lavorare in piena autonomia senza bisogno di un computer dedicato.

In figura 26 è riportata la schermata dopo il caricamento del file .STL su EIGER. Come si può vedere dalla figura, sul lato sinistro vengono riportate le informazioni del pezzo, in questo caso il primo provino prodotto e testato. Dall'alto verso il basso si può vedere:

- dimensioni
- tempo di stampa
- massa finale
- volume di plastica
- costo del materiale

Mentre a destra della stessa figura si può scegliere il materiale utilizzato come matrice e la fibra di rinforzo.



Figura 26 – Schermata iniziale di EIGER

Nella figura 27 si può vedere la sezione dedicata al riempimento del materiale e la scelta della dimensione del muro. Il materiale utilizzato è il Nylon White e il rinforzo è la fibra di carbonio. Le impostazioni utilizzate per la prova sono le stesse riportate in figura, con riempimento completo (*solid fill*) e spessore della parete di 0.40 mm, stesse impostazioni utilizzate nello studio precedente.



Figura 27 – Schermata EIGER per la selezione dei materiali (sinistra) e del riempimento della matrice (destra)

Dopo aver stabilito i parametri di riempimento si procede con la seconda schermata (figura 28), la quale permette la visualizzazione del componente con la vista 2D e 3D, e in particolare, selezionando la vista bidimensionale è possibile valutare la creazione del singolo layer con l'aggiornamento per quanto riguarda il progressivo tempo di stampa, il consumo e il costo del materiale.

La finestra in alto a destra permette la modifica dei singoli layer con la deposizione della fibra, che può essere depositata in due differenti configurazioni: isotropa e concentrica. Lo studio delle due configurazioni è stato svolto sia da Dickson in [13] che da Araya-Calvo in [52]. Sempre sulla stessa schermata è possibile modificare l'angolo della fibra. Lo studio che è stato

effettuato si basa principalmente su quattro angoli differenti: 0°, 45°, 60°, 90°.



Figura 28 - Schermata EIGER 2D

1.5.3 Strategia

Il software permette l'utilizzo di due differenti strategie di rinforzo, le quali possono essere utilizzate sia separatamente che combinate in maniera da poter rinforzare il singolo layer su diversi punti con caratteristiche differenti.

La configurazione isotropica (figura 29a) utilizza un riempimento che, seguendo l'angolo impostato nella scelta della fibra, cerca di riempire quanto più è possibile del layer in esame. Questa soluzione è quella che è stata scelta per il riempimento dei test.

Il rinforzo di tipo concentrico (figura 29b) viene utilizzato quando si rinforzano le superfici sui piani ortogonali al piano XY. Questo metodo non permette la deposizione della fibra con angoli differenti da profilo perimetrale.



Figura 29 a - Strategia isotropica



Figura 29 b - Strategia concentrica
1.5.4 Calibrazione macchina

Prima di poter utilizzare la macchina è necessario effettuare la calibrazione in modo che il piatto sia allineato correttamente su tutti i punti e non si verifichino errori durante la stampa. A sinistra della figura 30 viene mostrato il risultato del primo *bed test level* e mette in evidenza la non planarità tra gli estremi della piattaforma. Con l'utilizzo del sistema *plastic shim* è stato possibile riportare i punti allo stesso livello, con una precisione variabile tra 0.004 e 0.102 mm, come mostrato a destra della stessa figura.



Figura 30 - Piatto prima e dopo calibrazione

1.6 Proprietà meccaniche dei componenti additive a fibra lunga

I compositi rinforzati rappresentano materiali con elevate resistenze affiancate dal basso peso. Se la matrice conferisce la forma, unisce le fibre e sostiene il carico, le fibre influenzano:

- modulo di resistenza a trazione e compressione
- densità
- resistenza a fatica
- conducibilità elettrica e termica
- coefficiente di espansione termica
- costo

Le proprietà di un composito con le fibre allineate sono marcatamente anisotrope e la risposta meccanica dipende principalmente da:

- 1. comportamento sforzo-deformazione di fibra e matrice
- 2. frazione volumetrica delle due fasi
- 3. direzione di applicazione del carico

Per capire il comportamento meccanico di un composito è necessario fare una rappresentazione che metta in evidenza il sistema di riferimento globale, solidale alla matrice, e il sistema di riferimento locale che verrà assegnato alla deposizione della fibra. Nella figura 31 viene messa in evidenza la disposizione degli assi principali:

- l'asse 1 parallelo alla direzione di stampa
- l'asse 2 ortogonale alla direzione e sullo stesso piano di stampa
- l'asse 3 ortogonale alla direzione e al piano di stampa



Figura 31 - Elemento composito

Il massimo miglioramento delle proprietà dei materiali compositi si ottiene con una distribuzione delle fibre uniforme. Queste possono essere classificate in base alla natura e al diametro. Possono essere suddivise in tre gruppi principali:

- Whiskers: sono monocristalli molto sottili che presentano un elevato rapporto lunghezza/diametro e la maggiore resistenza meccanica. La grafite e il carburo di silicio (SiC) fanno parte di questa famiglia.
- Fili: acciaio e molibdeno sono due esempi di questo tipo di fibre, caratterizzate da un diametro superiore.
- Fibre: possono essere sia policristalline che amorfe, hanno un diametro nell'intorno del decimo di millimetro e sono tra le più utilizzate per l'alto rapporto qualità/prezzo. Fibra di vetro, fibra di carbonio, fibra di boro e i poliaramidi sono tra i più utilizzati.

Diversi studi mostrano il differente comportamento dei provini prodotti con la strategia isotropica o concentrica. Lo studio che è stato condotto da Dickson [13] mostra come il modello isotropico testato a con la prova a trazione produca il maggiore modulo elastico rispetto il modello concentrico, questa tendenza è stata confermata per la fibra di carbonio, la fibra di vetro e il kevlar. La prova a flessione ha evidenziato l'incremento della rigidezza nei provini rinforzati, ma in questo caso i risultati preferiscono il modello concentrico.

Shi et al. [23] hanno caratterizzato il composito nylon rinforzato con kevlar distinguendo una configurazione con i layer di rinforzo centrali, una con i rinforzi posizionati nei layer estremi e una con i rinforzi distribuiti a un quarto dello spessore. Dai risultati si vede la forza supportata da quest'ultimo raggiunga il valore massimo della prova, mentre i rinforzi esterni offrano la forza minore, probabilmente dovuto ai numerosi layer di nylon centrali che aumentano la debolezza del provino. Il maggior numero di interfacce matrice-fibra permette di avere un maggiore rinforzo della struttura e aumenta la resistenza a trazione. Le disposizioni con fibra uniforme permettono alla struttura di condividere gli stress in maniera distribuita incrementando la resistenza alla rottura per trazione.

La ricerca prosegue con l'analisi delle proprietà in funzione dell'angolo della fibra. Il valore del modulo elastico è maggiore quando la fibra è parallela al carico applicato e diminuisce con l'aumentare dell'inclinazione. Il valore massimo di resistenza a trazione è stato ottenuto con la disposizione a 45°, con valori molto vicini per quanto riguarda la fibra a 30° e 60°.

Parmiggiani et al. [53] con la caratterizzazione del composito formato da matrice Onyx e rinforzo in carbonio, depositata con la strategia isotropa, hanno ottenuto risultati analoghi ai precedenti. Il valore di forza massima a trazione è stato ottenuto con la disposizione della fibra a 0°. Lo stesso andamento è stato ottenuto nella prova a flessione. L'utilizzo di più layer disposti in maniera differente provvede a incrementare le prestazioni sia nella prova a trazione che nella prova a flessione.

1.7 Modellazione del comportamento meccanico

L'analisi computazionale per elementi finiti permette di analizzare il processo mediante il quale una struttura e le sue azioni sono ridotte a uno schema più o meno semplificato, il quale permette di simulare in modo realistico il comportamento della struttura in termini di sollecitazione, deformazione e tensione. È necessario individuare gli schemi statici per simulare in modo realistico il comportamento reale della struttura, conciliando l'esattezza del risultato con la sicurezza e la praticità operativa. Il problema risiede nella definizione di uno schema strutturale che sia semplice per agevolare i calcoli e sufficientemente complesso da mettere in conto l'effetto delle variabili più importanti, così da avere una buona affidabilità dei risultati ottenuti.

Al Abadi et al. in [54] hanno ricreato il modello FE con la tecnica dei plies, la creazione di elementi che rappresentano lo strato di materiale considerato. I plies sono stati meshati così da poter predire il punto di rottura dei provini e dopo aver assegnato le condizioni a contorno il modello non solo ha predetto con buona approssimazione i risultati dei test a trazione e a compressione sul tratto iniziale, ma ha anche approssimato il carico di rottura.

L'RVE è una cella elementare formata da particelle singole e multiple che viene incorporata all'interno del modello della matrice in maniera casuale. Come dimostra El Moumen in [17], l'approccio può essere implementato e affiancato da diversi algoritmi così da simulare tutte le tecniche di fabbricazione additiva, per esempio nella FDM è stato utilizzato la creazione dei vuoti che si creano durante il processo.



Figura 32 - Esempio cella RVE [17]

Il metodo utilizzato da Dutra in [21] prevede con una buona approssimazione le proprietà del composito nelle direzioni trasversale e longitudinale. La tecnica prende il nome di *asymptotic homogenization technique* e si basa sulla riproduzione di una cella elementare sull'intero componente.



Figura 33 - Riproduzione cella elementare [55]

Il metodo che utilizza Malakhov in [56] prende il nome di Variable Stiffness Composite Structures (VSVSs) e si divide in due fasi:

- la prima fase di preparazione del modello vede il posizionamento delle fibre in maniera omogenea lungo la direzione del carico, all'interno della matrice. Dopodiché vengono stabilite le condizioni al bordo.
- La seconda fase è iterativa in quanto viene modificata la frazione in volume di fibra e rianalizzato tramite FEM. Ogni iterazione viene confrontata con i risultati analitici fino a convergenza.



Figura 34 - Schema generale VSCSs [56]

Il modello FE utilizzato da Galati et al. in [24] prevede la costruzione del componente layer by layer, con un approccio differente tra matrice e rinforzo. Quest'ultimo viene rappresentato da due parti differenti, una che rappresenta il bordo che viene stampato all'esterno e una che rappresenta la fibra di carbonio. Per rappresentare le proprietà lungo direzioni differenti da quella di carico è stato utilizzato un sistema di riferimento locale. Come nel caso precedente, anche in questo modello è stato utilizzato un metodo iterativo per la ricerca della proprietà.



Figura 35 - Metodo iterativo [24]

2 Analisi sperimentale e modellazione numerica

2.1 Caratterizzazione meccanica

2.1.1 Design del provino per il test di trazione

Il provino è stato progettato con l'utilizzo del software fornito dall'università Politecnico di Torino, SolidWorks 2019[©] e secondo normativa ASTM D638 [57], selezionando la geometria denominata Type II. Rispetto alle dimensioni riportate dalla normativa colonna "Type II" in tabella 1, a causa dei limiti tecnologici delle dimensioni dovute all'ugello e alla strategia di stampa, queste sono state modificate e riportate nella colonna "Type II – modified" di tabella 1. La geometria del provino è riportata in figura 36.

Tabella 1 – Dimensioni provino per prova trazione					
Dimensions	ASTM D638	ASTM D638	Tolerances		
[mm]	Type II	Type II - modified			
width	6	6.1	± 0.5		
length	57	57	± 0.5		
width overall	19	19	± 6.4		
length overall	183	185	no max		
radius	76	76	± 1		
thickness	3.2	3.125	± 0.4		
		(CF/KVF)			



Figura 36 - Type II modified

2.1.2 Design del provino per il test di flessione

I provini per i test di flessione hanno sezione rettangolare costante pari a 3.125 mm x 12.4 mm e lunghezza di 121 mm come si può vedere in figura 37. Lo spessore del provino è stato fissato pari a 25 layer di spessore 0.125 mm.



Figura 37 - Provino a flessione

2.1.3 Design of experiment

Nylon CF45

La fibra di carbonio è stata depositata su tutto il layer interessato, anche agli estremi in presa del provino, in quanto già Dickson [13] riscontrò dei problemi di continuità nel caso di deposizione localizzata sul tratto da analizzare. Lo studio svolto da Melenka [8] mostra che nel caso in cui la fibra non fosse depositata correttamente, sono frequenti danneggiamenti nel tratto subito prima dell'afferraggio, fenomeno che porta l'invalidazione della prova.

L'esperimento prevede la produzione di un set da 5 provini per ogni configurazione studiata come riportato nelle tabelle 2 e 3.

Туре	Number of specimens	Orientation	Test
Nylon	5	±45°	Tensile
Nylon CF0	5	0°	Tensile
Nylon CF90	5	90°	Tensile
Nylon CF45	5	45°	Tensile
Nylon CF60	5	60°	Tensile
2L-A	5	[+45° / -45°]	Tensile
2L-B	5	[+45° / -45°]	Tensile
3L	5	[+45° / -45° / +45°]	Tensile

Tabella	2 –	Organiza	zazione	della	prova	а	trazione

Туре	Number of specimens	Orientation	Test
Nylon	5	±45°	Flexural
Nylon CF0	5	0°	Flexural
Nylon CF90	5	90°	Flexural

45°

Flexural

5

Tabella 3 – Organizzazione della prova a flessione

I manufatti prodotti interamente con il polimero vengono stampati con l'alternanza dei layer a ±45° (figura 38) così da poter ottenere delle caratteristiche meccaniche omogenee. I set di provini con una sola fibra di rinforzo posta in mezzeria (layer 13) e utilizzati sia per la prova a trazione che per la prova a flessione vengono mostrati in figura 38. La matrice che viene utilizzata segue l'andamento alternato del nylon a ±45° con l'inserimento della fibra di rinforzo in tre diverse configurazioni:

- b) la fibra a 0° viene depositata lungo l'asse principale;
- c) la fibra a 90° viene depositata ortogonalmente all'asse principale;
- d) la fibra a 45° considera l'angolo crescente dall'asse ortogonale all'asse principale.



Figura 38 – Disposizione layer a) pure-nylon, b) fibra di carbonio 0°, c) fibra di carbonio 90°, d) fibra di carbonio 45°

Per lo studio dei compositi multistrato è stato preso in esame un caso che rappresenta la concentrazione di rinforzo centrale e due casi che rappresentano la distribuzione della fibra in modo equidistante. La disposizione scelta per la fibra è di ± 45° così da avere sempre una certa simmetria nel provino.

Con riferimento alla disposizione dei layer, questi vengono denominati in ordine numerico crescente dove il layer è il primo layer prodotto con fibra di carbonio. Il provino 2L-A rappresenta la concentrazione di rinforzo centrale, i layer rinforzati sono due e corrispondono ai layer 12 e 14, rispettivamente +45° e -45°. Il provino 2L-B rappresenta la prima configurazione con layer equidistanti e due layer di rinforzo, ma ora posizionati ai layer 10 e 16. La seconda configurazione di rinforzo equidistante prende il nome 3L poiché i layer di rinforzo sono disposti a un terzo dello spessore, l'8 e il 18 disposti a +45° mentre il 13 a -45°. In figura 39 vengono riportate le disposizioni dei layer di rinforzo per i provini multistrato con un ulteriore approfondimento in figura 40.



Figura 39 – Esempio di disposizione layer sandwich



2.1.4 Design componente reale

La validazione definitiva del modello è realizzata mediante sperimentazione su un componente reale. Il caso studio prevede la realizzazione di un gancio traino per collegare un carrello ad una motrice o come connettore per una cinghia per il sollevamento di un peso. In particolare, l'oggetto scelto si ispira a ganci traino per autovettura in panne. Come si può vedere dalla figura 41, il componente presenta un foro che sarò utilizzato per il collegamento dell'oggetto condotto, e due fori più piccoli destinati al collegamento rigido alla struttura.



Figura 41 – Dimensioni del gancio traino

2.2 Test a trazione

La prova a trazione viene effettuata mediante la macchina Easydur Aura 10T, con un carico massimo di 10 tonnellate e chiusura pneumatica delle pinze di afferraggio.



Figura 42 – Macchina di trazione e sistema pinze

Come da normativa EN ISO 527-1:2019 [58], durante la prova è stata utilizzata la velocità di avanzamento di 5 mm/min e la prova è stata condotta senza l'utilizzo di un estensimetro.

Per il gancio traino è stato necessario creare un sistema di afferraggio adatto per il posizionamento del gancio all'interno della macchina di trazione e che simulasse la condizione di carico del componente. Come si può vedere dalle foto riportate di seguito, sia la parte superiore che quella inferiore sono state bloccate con dei cilindri dal diametro di 25 mm e 11 mm rispettivamente.



Figura 43 - Sistema di afferraggio

Il foro superiore è posizionato in linea con il foro dell'afferraggio inferiore poiché è stato progettato in modo tale che la forza fosse applicata in maniera uniassiale.



Figura 44 - Posizionamento del componente nella macchina di trazione

2.3 Test a flessione

Per effettuare una migliore caratterizzazione del materiale è stato scelto di testare le configurazioni di riferimento con la prova a flessione su tre punti. La prova consiste nel sollecitare il provino centralmente, su due appoggi alla distanza di 50 mm, con un punzone, come prevede la normativa D790 [59]. La velocità della prova è stata calcolata come prevede la normativa ed è pari a 1.45 mm/min, la sezione rettangolare è in accordo con la D7264 [60]. La macchina utilizzata, anche in questo caso, è fornita dal laboratorio IAM e ha lo stesso principio di funzionamento della precedente. In questo caso la macchina viene utilizzata nella configurazione *compressione inferiore* con una cella di carico di 5000 kg. La dimensione delle sfere degli appoggi e del punzone rispettano le normative citate precedentemente.



Figura 45 - Macchina test a flessione

2.4 Produzione dei provini

2.4.1 Materiali

Il nylon è un termoplastico tecnico ad alta scorrevolezza. A differenza dell'Onyx non è caricato con microfilamenti di carbonio e possiede la caratteristica di allungamento a rottura del 150%, a differenza del primo che, secondo i dati forniti dalla casa, arriva a circa il 60%. La scelta della fibra ricade sul carbonio in quanto è considerato il miglior rinforzo fornito da Markforged. La macchina per poter estrudere il materiale deve riscaldare l'ugello dedicato al nylon a 275° mentre l'ugello per la fibra di carbonio a 230°.

🗧 Mark Two Poli	TO-DIGEP	622		III
Wet Plastic P owner Markforged	urge		time rer	naming
Heating Nozzle Temperat	ures 272 23	io.		99%
Pause	Reload		Stop	

Figura 46 - Schermata spurgo iniziale

Le caratteristiche di riferimento sono riportate nel datasheet [61] e sono fornite direttamente dalla casa produttrice.

Composite				
Base				
		test (ASTM)	Onyx	Nylon
Tensile Modulus	(GPa)	D638	2.4	1.7
Tensile Stress at Yeld	(MPa)	D638	40	51
Tensile Stress at Break	(MPa)	D638	37	36
Tensile Strain at Break	(%)	D638	25	150
Flexural Strength	(MPa)	D790	71	50
Flexural Modulus	(GPa)	D790	3	1.4
Heat Deflection Temp	(°C)	D648 B	145	41
Flame Resistance		UL94		
Inoz Impact	(J/m)	D256-10A	330	110
Surface Resistance	(Ω)	ANSI/ESD STM11.11		
Density	(g/cm ³)		1.2	1.1

Tabella 4 – Valori relativi alla matrice fornita da Markforged

Tabella 5 – Valori relativi alla fibra fornita da Markforged

_

Composite				
Fiber				
		test (ASTM)	Carbon	Kevlar
Tensile Strength	(MPa)	D3039	800	610
Tensile Modulus	(GPa)	D3039	60	27
Tensile Strain at Break	(%)	D3039	1.5	2.7
Flexural Strength	(MPa)	D790	540	240
Flexural Modulus	(GPa)	D790	51	26
Flexural Strain at Break	(%)	D790	1.2	2.1
Comprensive Strength	(MPa)	D6641	320	97
Comprensive Modulus	(MPa)	D6641	54	28
Comprensive Strain at Break	(%)	D6641	0.7	1.5
Heat Deflection Temp	(°C)	D648 B	105	105
Inoz Impact	(J/m)	D256-10 A	960	2000
Density	(g/cm ³)		1.4	1.2

È molto importante che il materiale venga posto all'interno di una dry-box per evitare la degradazione dovuta all'umidità. Questa, sia che sia esterna che interna, influisce negativamente sulla qualità estetica e funzionale del manufatto in quanto alle temperature di trasformazione dei materiali polimerici, l'acqua può diventare vapore, dando origine alla formazione di striature e bolle superficiali, ritiri irregolari, tensioni strutturali che portano a deformazioni e rotture. Per limitare il problema sono state inserite delle buste di silice con il compito di assorbire l'umidità presente nel box.



Grafico 1 – Volume di matrice e di fibra utilizzati per i singoli provini

2.4.2 Tempi di produzione

La stampa dei provini destinati alla prova a trazione, come mostra la tabella 6, impiega un tempo superiore all'ora, differente rispetto i provini per la prova a flessione, per via della minore dimensione. La durata della stampa del provino dipende da diversi fattori:

- dimensioni
- strategia di riempimento
- numero di layer di rinforzo

Dalla stessa tabella viene messo in risalto l'incremento di tempo necessario per la stampa del provino rinforzato, fenomeno dovuto alla minore velocità di stampa della fibra di carbonio. Il divario è di circa 5 minuti nel caso di produzione del singolo layer rinforzato, e cresce all'aumentare del numero di layer.

Туре	Orientation	Test	Time		
Nylon	±45°	Tensile	65 min		
Nylon CF0	0°	Tensile	72 min		
Nylon CF90	90°	Tensile	73 min		
Nylon CF45	45°	Tensile	73 min		
Nylon CF60	60°	Tensile	73 min		
2L-A	[+45° / -45°]	Tensile	74 min		
2L-B	[+45° / -45°]	Tensile	74 min		
3L	[+45° / -45° / +45°]	Tensile	76 min		
Nylon	±45°	Flexural	44 min		
Nylon CF0	0°	Flexural	49 min		
Nylon CF90	90°	Flexural	49 min		
Nylon CF45	45°	Flexural	49 min		

Tabella 6 – Tompi di produziono provini

2.5 Modellazione numerica

Il modello utilizzato si basa su un precedente sviluppato all'interno dell'IAM con il supporto del software HyperMesh[®]. La simulazione è svolta in campo elastico e le equazioni che vengono utilizzate sono di tipo lineare.

Il FEM rappresenta uno strumento avanzato di analisi strutturale che permette lo studio di componenti vincolati e caricati in modi differenti senza, ipoteticamente, la necessità di test reali. Gli step che devono essere eseguiti per la creazione di un modello ai fini dell'analisi numerica sono:

- importazione della geometria
- definizione delle proprietà del materiale
- definizione delle proprietà fisiche dell'elemento
- meshing
- assegnazione delle condizioni a contorno e/o iniziali

Sono stati simulati due materiali differenti, nylon e fibra di carbonio. Al primo, essendo un materiale isotropico viene associata la card image MAT1 mentre il secondo utilizzerà la card image MAT9ORT in quanto materiale ortotropico.

Sono state create le proprietà associate ai due materiali. Questo punto è stato utile per l'associazione del sistema di riferimento locale al layer di fibra (figura 47) che è stato modificato a seconda del caso analizzato.



Figura 47 - Sistema di riferimento locale

2.5.1 Trazione

Per la simulazione del sistema di afferraggio è stato necessario creare due cartelle per i *load collector*, selezionando sui due estremi una serie di punti che potessero rappresentare al meglio il caso reale, sia del bloccaggio che della forza tirante. Nelle figure 48 e 49 si possono vedere i punti utilizzati. Nel caso della forza è stato necessario creare un elemento rigido che si collegasse al punto di applicazione della forza.



Figura 48 - Sistema di punti simulazione bloccaggio



Figura 49 - Sistema di punti lato in trazione

La creazione del modello per la simulazione del composito risulta più articolata poiché vengono distinte tre parti:

- matrice nylon
- bordi del rinforzo
- fibra di carbonio

I tre elementi son stati creati utilizzando il procedimento base del caso precedente, con l'aggiunta di una fase di *check components* che permette di avere un unico pezzo unendo tutti i nodi dei singoli elementi, fino a questo momento separati tra loro anche se coincidenti.



Figura 50 - Merge parti differenti

Nella modellazione dei provini con più layer di rinforzo è stato seguito lo stesso filo logico utilizzato nel modello con singolo layer, ma in questo caso sono stati utilizzati due sistemi di riferimento locali, come si può vedere dalla figura 51.



Figura 51 - Doppio sistema di riferimento locale

2.5.2 Trazione componente reale

La figura 52 riporta la configurazione dei layer di fibra di carbonio utilizzati per il rinforzo del gancio. Come si può intuire, la modellazione di questa parte sfrutta la logica del multilayer, due sistemi di riferimento locali che simulano le diverse proprietà della fibra.



Figura 52 - Modellazione dei layer di rinforzo

Come mostrato in precedenza, il carico viene applicato lungo la direzione X in maniera monoassiale. Il sistema di afferraggio inferiore è stato simulato con un elemento rigido che collega la parte inferiore del foro ad un punto fisso. Il foro superiore è stato collegato ad un altro elemento rigido che converge al punto di applicazione del carico.



Figura 53 - Modellazione gancio traino

2.5.3 Flessione

I passaggi che sono stati seguiti per la creazione del modello utilizzato per la predizione dello spostamento a flessione sono gli stessi dei casi precedenti, con la differenza dell'applicazione dei carichi e dei vincoli. L'analisi reale prevede un punzone del raggio di 5 mm che esercita la forza su un tratto lineare della sezione del provino. In figura 54 si può vedere come sia stata rappresentata l'impronta del punzone, utilizzando l'elemento rigido RBE2 con il nodo in comune per l'applicazione della forza.



Figura 54 – Simulazione dell'impronta del punzone

I supporti sono stati rappresentati come una linea in quanto la parte del provino che vi si appoggia ha la capacità di ruotare attorno ad essa. Prima di validare le analisi sono state fatte diverse prove per comprendere meglio il comportamento del provino durante la simulazione.



Figura 55 - Modello FE con condizioni per la flessione

3.1 Stampa

3.1.1 Trazione I

La strategia di stampa prevede la creazione del bordo esterno del provino e la successiva creazione dei layer interni alternati a $\pm 45^{\circ}$.



Figura 56 - Confronto deposizione reale e deposizione software

I provini compositi rinforzati con la fibra disposta lungo l'asse principale sono stati utilizzati per la valutazione del modulo elastico E₁. Dalla figura 57 si nota la differenza tra la stampa descritta dal software e la reale deposizione della fibra. L'immagine estratta dal software mette in evidenza i vuoti previsti durante la deposizione del carbonio mentre la foto a sinistra mostra come la fibra non venga depositata in maniera uniforme, con la formazione di tratti discontinui che comportano la mancata saturazione del layer.



Figura 57 - Confronto deposizione reale e deposizione software

La prova ha mostrato la rottura fragile del materiale con l'inclinazione tipica a 90° (figura 58) rispetto la direzione di applicazione del carico.



Figura 58 - Rottura fragile

In entrambe le immagini di figura 59 si può notare come la fibra non viene depositata sul bordo poiché, come detto in precedenza, è stato impostato uno strato di 0.40 mm come strato di contenimento. Ponendo attenzione alla parte a sezione ridotta della foto a sinistra si può constatare come la deposizione della fibra non segua l'andamento ideale e in alcuni punti crei delle sovrapposizioni piuttosto che riempire uniformemente la base di stampa.



Figura 59 - Confronto deposizione reale e deposizione software

Come ultimo step utile alla calibrazione son stati prodotti i provini con fibra a 45°, utilizzati per il confronto con il modello FE e la modifica del modulo di taglio sul piano XY. Come per i precedenti possono essere evidenziate delle differenze tra il software e la stampa.

A differenza dei provini precedenti, in quest'ultimo caso è stato riscontrato l'inarcamento su tutti i manufatti dopo la fase di stampa, dovuto al ritiro del polimero nella fase di raffreddamento.



Figura 60 - Confronto tra deposizione reale e software

In figura 61 è riportata una foto che evidenzia la rottura del provino a 45°, che segue perfettamente la linea di deposizione della fibra di carbonio.



Figura 61 - Rottura a 45°

3.1.2 Trazione II

Il primo provino utile per la validazione è stato prodotto con la fibra di carbonio depositata a 60°. Il tratto ristretto nell'immagine a sinistra mostra dei difetti nella sistemazione del carbonio, con spazi non equidistanti tra le curvature che riempiono tale tratto.



Figura 62 - Confronto tra deposizione reale e software

I provini sotto il gruppo sandwich mostrano distorsione lungo l'asse principale (figura 63), fenomeno che può essere associato al ritiro della matrice con questa disposizione di fibra.



Figura 63 - Twist provino sandwich

È stata fatta un'ulteriore prova del composito nylon rinforzato con fibra di carbonio, incrementando il numero di layer rinforzati alla ricerca di una miglioria delle prestazioni del provino. Questo caso è rappresentato dai rinforzi dei layer 8/13/18, con la distribuzione a circa un terzo dello spessore del provino.

In figura 64 è stato riportato un provino multistrato, la parte alta rappresenta il contorno dal quale parte l'estrusione mentre la parte bassa rappresenta la stessa linea di contorno, questa volta in chiusura. L'inizio del contorno mostra dei salti durante il passaggio che vengono eliminati con la progressiva estrusione. Questo fenomeno è probabilmente dovuto a un piccolo decremento della temperatura ideale nella prima fase del layer.



Figura 64 - Dettaglio difetti bordo di contorno

3.1.3 Flessione

La produzione dei provini destinati per il test a flessione è stata più lineare. A differenza del provino utilizzato per i test a trazione, la forma semplice di questi ha permesso al software di elaborare una strategia lineare, con minori differenze tra l'anteprima di EIGER e la stampa come si può vedere nelle figure riportate di seguito.



Figura 65 - Confronto tra deposizione reale e software



Figura 66 - Confronto tra deposizione reale e software



Figura 67 - Confronto tra deposizione reale e software

3.2 Caratterizzazione meccanica

3.2.1 Confronto a trazione

Nel grafico 2 è stato riportato il confronto dei risultati ottenuti con il variare dell'angolo di fibra. Tutti i provini rinforzati dimostrano la reale efficacia della fibra che migliora la resistenza massima del provino in campo elastico e, esclusa la fibra orientata a 0 gradi, un allungamento superiore. I provini con deposizione a 0° mostrano il valore del modulo di Young maggiore rispetto gli altri. L'elevato allungamento è dovuto all'angolo delle fibre, che disposte con angoli superiori a 0° offrono un'elevata resistenza al taglio sul piano XY come mostrato da Todoroki [16]. In corrispondenza degli allungamenti massimi si può notare che in alcuni punti la decrescita è meno ripida, fenomeno dovuto alla resistenza delle ultime fibre che vengono portate a rottura.

In termini di valori si passa dai circa 1300 N che vengono sopportati dalla deposizione longitudinale, a valori compresi tra 800 e 900 N delle configurazioni rinforzate. L'andamento in rosso evidenzia come le caratteristiche dei provini in solo nylon siano di molto inferiori, arrivando a valori poco superiori ai 750 N.

In generale si può dire che i compositi rinforzati ottengono allungamenti superiori alla matrice non rinforzata, escluso il caso in cui la fibra sia disposta a 0° (linea verde nel grafico 2).



3.2.2 Confronto sandwich a trazione

L'andamento dei provini con un rinforzo a 45°, paragonato al rinforzo con doppio layer nelle due configurazioni, mostra un valore di resistenza a trazione maggiore, fenomeno dovuto probabilmente alla bassa coesione che è stata verificata sulle pareti dei sandwich. L'andamento dei provini 3L mostra effettivamente un incremento della forza massima.



3.2.3 Confronto a flessione

Le fibre di rinforzo vengono depositate sul piano XY e, partendo da questo presupposto, le stesse non porterebbero un incremento sostanziale della resistenza a flessione come nel caso di trazione poiché la sollecitazione viene fatta sul piano trasversale. Dal grafico si può vedere come il tratto elastico sia molto simile per tutte le configurazioni, con una leggera differenza per il provino con rinforzo a 90°, nel quale si nota una minore resistenza nell'ultimo tratto del campo elastico. Le differenze sostanziali tra la sola matrice e i due rinforzi a 0° e 45° risaltano nel tratto plastico, dove i due provini compositi riescono a sopportare uno sforzo massimo superiore rispetto la sola matrice.



Grafico 4 – Andamento forza-spostamento dei provini testati a flessione

3.3 Trazione nel tempo

I dati che vengono analizzati successivamente rappresentano tre condizioni che vogliono distinguere tre istanti di vita del componente dopo essere stato prodotto. I provini dopo essere stati stampati sono stati lasciati in un ambiente con un livello medio di umidità, simulando la condizione peggiore per il mantenimento del componente.

Il primo lasso temporale rappresenta la spedizione e la consegna del manufatto. Supponendo che la catena di trasporto non subisca ritardi vengono considerate 24 ore tra la produzione e la consegna. Tra questa e l'utilizzo effettivo potrebbero passare almeno 48 ore. I test svolti dopo sette giorni rappresentano il comportamento del provino a vita infinita.

Le prove son state svolte valutando due configurazioni: nylon puro e fibra di rinforzo orientata a 45°.

L'andamento nel tempo mostra come il nylon abbia subito il degrado in ambiente umido. I provini testati subito dopo la prova arrivano alla forza massima di circa 790 N, dopo 24 ore si passa a 780 N, con il seguente calo a 705 N e il successivo crollo a circa 620 dei provini testati dopo 7 giorni. L'allungamento vale circa 4 mm ai valori massimi di forza mentre assume valori crescenti prima della rottura con il passare del tempo. I risultati ottenuti sperimentalmente mostrano lo stretto legame che intercorre tra l'andamento del tempo e il calo delle prestazioni, discostandosi dall'andamento rilevato subito dopo la stampa, e quindi quello utilizzato per la calibrazione del modello.



Andamento forza-spostamento provini nel tempo



Il composito nylon con fibra di carbonio mostra anch'esso il declino delle prestazioni con il passare del tempo. I provini analizzati subito dopo la stampa mostrano il valore di circa 900 N di forza massima, con una drastica caduta nei provini che passa dai 750 N dopo 24 ore, ai circa 700 dopo 48 ore, per arrivare a poco meno di 600 nei provini testati dopo 7 giorni. Lo spostamento di circa 4.5 mm alla forza massima è valido per tutti i provini rinforzati e come nell'analisi precedente, il grafico mostra l'incremento nel tempo della capacità di allungamento in campo plastico.

I grafici riportati mostrano il diminuire dell'inclinazione della retta che segue il comportamento elastico. Questo fenomeno indica il leggero decadimento del modulo elastico se viene ipotizzato che la sezione del provino si riduce della stessa percentuale per tutti i provini.

Prendendo in considerazione il grafico 6 si può vedere come il fenomeno sia accentuato nel caso dei provini compositi rinforzati, solo in due casi i test hanno mostrato la soglia di 600 N.





3.4 Calibrazione del modello numerico

3.4.1 Modello nylon

Per la calibrazione del modello sono stati inseriti i dati del materiale forniti dalla casa produttrice. Per la simulazione in campo lineare è stato utilizzato uno dei solutori offerti dal software di Altair, Optistruc*t, il quale* è un solutore implicito agli elementi finiti (FE) specializzato per il calcolo di analisi strutturali lineari e non lineari, in condizioni di carico statico e dinamico. Si è proceduto con il confronto tra i dati ottenuti numericamente e i dati dell'analisi sperimentale. La geometria del provino è studiata in modo tale che si abbia rottura nella zona centrale dello stesso, in quanto vicino alle ganasce non si ha una forza uniassiale. Nella zona centrale del provino l'area della sezione è minore di quella nella zona più larga, ciò consente di ottenere uno sforzo maggiore nella zona centrale a parità di forza applicata, e quindi ottenere rotture in quel punto. Dalla figura sotto riportata si può vedere come la situazione del modello rappresenti il caso reale: le zone blu non subiscono sforzo in quanto sono state fissate come nel caso delle ganasce, la zona arancione al contrario rappresenta il tratto maggiormente sollecitato.



Figura 68 - Rappresentazione sforzi agenti sul provino a trazione
In questo caso, essendo il nylon un materiale isotropo sotto il solo sforzo normale, è stato modificato il valore del modulo elastico E₁ lungo X. Il valore è stato diminuito rispetto il valore base fornito dalla casa produttrice così da ottenere la convergenza tra il risultato della prova sperimentale e la simulazione del modello, con un errore percentuale inferiore al 2% nel campo elastico. L'andamento del grafico sotto riportato rappresenta gli spostamenti ottenuti durante le prove sperimentali e la simulazione. I risultati tengono conto nello specifico del campo di forza tra 200 N e 500 N in quanto i valori agli estremi possono essere associati rispettivamente all'assestamento della trazione nei primi istanti della prova e all'inizio del campo plastico subito dopo la zona elastica.



Grafico 7 - Confronto tra i risultati della prova sperimentale e i risultati ottenti tramite modello matematico

3.4.2 Modello composito

Il caso studio prevede la calibrazione delle tre disposizioni di riferimento (0°, 90°, 45°). Questo aspetto è stato gestito con il supporto del sistema di riferimento locale, il quale è stato modificato a seconda del caso analizzato. Lo scopo è quello di simulare l'orientamento differente delle fibre rispetto la direzione di stampa poiché il modello prevede la rappresentazione del layer di fibra come uno strato uniforme e non una fibra continua, come rappresentato in figura 69.

La calibrazione del modello, come primo passo, prevede il confronto tra i risultati del test a trazione con fibra depositata a 0 ° e il modello con il sistema di riferimento locale coincidente con quello globale.

Dopo aver validato i valori per la matrice, si prosegue con l'individuazione del valore relativo al modulo elastico E₁ lungo la direzione del carico. Il valore iniziale è stato preso dal datasheet, mentre i valori iniziali di E₂, E₃, modulo di Poisson e il modulo di taglio sono stati presi da una ricerca svolta precedentemente [24].

I primi risultati hanno mostrato una grossa divergenza tra i valori. È stato ridotto gradualmente il valore di E1 per ottenere la convergenza tra i valori.



Figura 69 – Riferimento 90° (giallo); riferimento 0° (verde); riferimento 45° (celeste); riferimento 60° (fucsia)

Dopo aver modificato di 90° il sistema locale, sono stati analizzati i valori. La differenza iniziale è stata successivamente colmata modificando il valore E₂, responsabile della resistenza sull'asse ortogonale alla direzione di trazione.

Il passo successivo prevede il confronto tra i casi con disposizione a 45° così da trovare il valore corretto del modulo di taglio G_{12} sul piano XY. Il valore utilizzato inizialmente è decisamente elevato ed è stato ridotto di due ordini di grandezza affinché ci fosse convergenza.

Per poter procedere è necessario verificare che i due modelli precedenti rispettino le modifiche successive. Si riparte dal primo caso modificando E_1 , con il secondo caso viene modificato E_2 , e infine si conferma la convergenza con G_{12} .

I risultati definitivi ottenuti nel processo vengono esposti in tabella 7.

Tabella 7 - Valori finali della modellazione					
				Modello	
			Datasheet	numerico	
Nylon	E	[MPa]	1700	1481	
	G	[MPa]	611	532	
	v		0.39	0.39	
Carbonio	E1	[MPa]	60000	40000	
	E2	[MPa]	7500	1000	
	Ез	[MPa]	7500	1500	
	V1=V2=V3		0.15	0.15	
	G12	[MPa]	4000	25	
	G23	[MPa]	3260	50	
	G31	[MPa]	3260	50	

Di seguito vengono riportati i grafici che mostrano gli andamenti medi dei test paragonati con i risultati ottenuti post convergenza del modello.



Grafico 8 – Confronto tra i risultati delle prove sperimentali e la simulazione



Grafico 9 - Confronto tra i risultati delle prove sperimentali e la simulazione



Grafico 10 - Confronto tra i risultati delle prove sperimentali e la simulazione

3.5 Convalida del modello numerico

3.5.1 Trazione

La convalida del modello è stata eseguita confrontando la risposta numerica con quella sperimentale nel caso di deposizione della fibra a 60° (grafico 11). La deviazione tra i risultati numerici e quelli sperimentali è attorno al 13%. Tale deviazione è comunque all'interno della deviazione standard sperimentale ed è quindi stato ritenuto e in linea con i test svolti in altre sperimentazioni [24].

Rimanendo sul grafico 11 è possibile notare come i modelli utilizzati successivamente hanno permesso di predire i risultati delle prove sperimentali con una buona precisione, stando all'interno del campo di variabilità ottenuto dai set analizzati in laboratorio. I provini 2L-A hanno un errore variabile tra l'1% e il 3%, il modello 2L-B invece si aggira attorno al 3% mentre il multistrato 3L ha fatto riscontrare un errore variabile tra l'1% e l'11%.





3.5.2 Confronto a trazione nel tempo

I risultati che sono emersi dall'analisi dei provini con il passare del tempo evidenziano la degradazione delle proprietà del materiale nel tempo. Nel grafico 12 viene mostrato il progressivo decadimento delle prestazioni della matrice, la quale perde rigidezza. Il grafico 13 mostra l'andamento dei compositi rinforzati e si può notare una tendenza al decadimento minore entro le 48 ore dopo la stampa, seguita da andamenti anomali nei 7 giorni successivi. In questo caso evidentemente la fibra apporta un contributo che tuttavia non compensa il decadimento delle proprietà della matrice. I risultati per gli andamenti a 7 giorni risultano molto dispersi e solo due provini hanno raggiunto circa un carico uguale a 600 N.



Grafico 12 – Divergenza tra la predizione del modello matrice e le analisi svolte nel tempo



Grafico 13 - Divergenza tra la predizione del modello composito e le analisi svolte nel tempo

Il gancio traino mostra delle ampie divergenze tra i risultati proposti dal modello e quelli ottenuti durante i test a trazione, i risultati ottenuti sono circa la metà rispetto quelli predetti. Le possibili cause potrebbero essere riscontrate sia nella disposizione dei layer di fibra di carbonio, essendo questo il primo caso analizzato con cinque layer di rinforzo consecutivi, sia negli errori di deposizione del contorno che potrebbero aver inciso in maniera grossolana per la mancata coesione della matrice, ottenendo così due parti (una superiore e una inferiore) quasi sconnesse tra di loro. Un altro possibile errore potrebbe essere individuato nella creazione della parte che non subisce la sola forza uniassiale ma potrebbero crearsi delle componenti trasversali che incidono sul risultato finale.



Grafico 14 - Differenza tra i risultati delle prove sperimentali e della simulazione

3.5.3 Flessione

I risultati dei provini di puro nylon ottenuti nel test a flessione hanno una bassa varianza, questo indica la forte ripetibilità del provino con questa tecnica; il modello che è stato creato ha previsto dei risultati molto simili a quelli ottenuti in laboratorio, con un errore di circa il 5%. Le prove che son state effettuate con i compositi hanno confermato l'ottima ripetibilità nella produzione, il range di variabilità è leggermente più ampio rispetto il caso della sola matrice ma rimane comunque abbastanza limitato. Anche in questo caso la predizione del modello viene fatta con un'ottima attendibilità, con un errore che arriva al 2% nel caso di fibra depositata a 90°.



Grafico 15 - Differenza tra i risultati delle prove sperimentali e della simulazione



Grafico 16 – Confronto tra la predizione del modello e i risultati sperimentali

3.6 Analisi economica

La fabbricazione di un pezzo comporta ovviamente un costo per l'azienda, se questo non è giustificato dalle prestazioni, difficilmente questo verrà messo in produzione.

Il costo del nylon per additive è di 0.19 USD/g (0.16 euro/g) mentre il prezzo della fibra di carbonio si aggira intorno al 2.18 USD/g (1.83 euro/g), decisamente più alto rispetto il polimero.

I risultati mostrati nel capitolo 3.1 mettono in evidenzia come l'aumento delle prestazioni non sia collegato direttamente all'incremento del numero di layer di rinforzo. Se nel caso di provino con un singolo layer rinforzato, l'aumento del costo è giustificato dall'incremento delle prestazioni, nel caso di due o tre rinforzi questo non viene giustificato poiché possono essere ottenuti valori di forza più elevati con un costo minore.

Lo stesso discorso è valido per i provini testati a flessione. La spesa sostenuta per rinforzare il provino è circa il 50% superiore al provino di nylon mentre il vantaggio in termini di performance si traduce in 3 N.

rabella 8 – Costo del materiale per la produzione del provini					
Туре	Orientation	Cost [USD]	Fmax [N]		
Nylon	±45°	1.37	778		
Nylon CF0	0°	2.03	1318		
Nylon CF90	90°	2	904		
Nylon CF45	45°	2.01	888		
Nylon CF60	60°	2	861		
2L-A	[+45° / -45°]	2.61	837		
2L-B	[+45° / -45°]	2.61	701		
3L	[+45° / -45° / +45°]	3.24	918		
Nylon	±45°	0.92	99		
Nylon CF0	0°	1.34	101		
Nylon CF90	90°	1.34	94		
Nylon CF45	45°	1.34	102		

Tabella 8 – Costo del materiale per la produzione dei provini

4 Conclusioni

È stato analizzato il comportamento a trazione e flessione di un materiale composito formato da matrice in nylon e rinforzo in fibra di carbonio, e confrontato con il rispettivo modello FE. Le conclusioni che derivano dalla campagna sperimentale sono le seguenti:

- Durante il periodo di stampa è stata riscontrata l'importanza della calibrazione periodica della macchina, fenomeno che incide in maniera evidente durante la fase di stampa e sulla qualità provini.
- Le prove sperimentali hanno mostrato il miglioramento delle prestazioni a trazione quando è stato inserito un unico layer centrale di rinforzo.
- I provini con più di un rinforzo non hanno mostrato l'incremento delle proprietà atteso e sono previste ricerche future per la comprensione di questo fatto.
- I sandwich hanno mostrato maggiore difficoltà per la deposizione del contorno e nel riempimento dei vuoti lasciati dal rinforzo, creando delle discontinuità nella deposizione. Questo fenomeno potrebbe essere associato a un errore nell'allineamento della piattaforma ma non sono giustificati in quanto dopo diverse calibrazioni, gli esiti sono stati gli stessi. I provini stampati con un unico layer mostrano una superficie laterale più uniforme, contribuendo a migliorare la continuità della matrice.
- I risultati delle prove a flessione sono stati utilizzati per la validazione del modello sviluppato sulla base dei risultati delle prove a trazione, con una risposta più che positiva.
- L'ambiente di lavoro, il grado di umidità e il tempo di stallo dei componenti sono fattori importanti che incidono sulle prestazioni del materiale, favorendo il rammollimento dello stesso.
- Il modello FE utilizzato è uno strumento di estrema importanza in quanto aiuta il progettista nella previsione del comportamento del materiale composito con estrema facilità. I risultati ottenuti in questa fase di sperimentazione fortificano la sua validità. Il modello sviluppato quindi consente di predire il comportamento del materiale senza l'ausilio di analisi sperimentali permettendo una progettazione consapevole.

Bibliografia

- I. Campbell, D. Bourell, and I. Gibson, "Additive manufacturing: rapid prototyping comes of age," *Rapid Prototyp. J.*, vol. 18, no. 4, pp. 255–258, Jun. 2012, doi: 10.1108/13552541211231563.
- [2] T. D. Ngo, A. Kashani, G. Imbalzano, K. T. Q. Nguyen, and D. Hui, "Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges," *Composites Part B: Engineering*, vol. 143. Elsevier Ltd, pp. 172–196, Jun. 15, 2018, doi: 10.1016/j.compositesb.2018.02.012.
- [3] N. van de Werken, H. Tekinalp, P. Khanbolouki, S. Ozcan, A. Williams, and M. Tehrani, "Additively manufactured carbon fiber-reinforced composites: State of the art and perspective," *Additive Manufacturing*, vol. 31. Elsevier B.V., p. 100962, Jan. 01, 2020, doi: 10.1016/j.addma.2019.100962.
- Q. Hu, Y. Duan, H. Zhang, D. Liu, B. Yan, and F. Peng, "Manufacturing and 3D printing of continuous carbon fiber prepreg filament," *J. Mater. Sci.*, vol. 53, no. 3, pp. 1887–1898, Feb. 2018, doi: 10.1007/s10853-017-1624-2.
- [5] K. Friedrich and A. A. Almajid, "Manufacturing aspects of advanced polymer composites for automotive applications," *Appl. Compos. Mater.*, vol. 20, no. 2, pp. 107–128, Apr. 2013, doi: 10.1007/s10443-012-9258-7.
- [6] "Continuous Composites demonstrates CF3D technology for Lockheed Martin, AFRL WiSDM project | CompositesWorld." https://www.compositesworld.com/news/continuous-composites-demonstratescf3d-technology-for-lockheed-martin-afrl-wisdm-project (accessed Apr. 17, 2021).
- [7] F. Ning, W. Cong, J. Qiu, J. Wei, and S. Wang, "Additive manufacturing of carbon fiber reinforced thermoplastic composites using fused deposition modeling," *Compos. Part B Eng.*, vol. 80, pp. 369–378, Oct. 2015, doi: 10.1016/j.compositesb.2015.06.013.
- [8] G. W. Melenka, B. K. O. Cheung, J. S. Schofield, M. R. Dawson, and J. P. Carey, "Evaluation and prediction of the tensile properties of continuous fiber-reinforced 3D printed structures," *Compos. Struct.*, vol. 153, pp. 866–875, Oct. 2016, doi: 10.1016/j.compstruct.2016.07.018.
- [9] F. Van Der Klift, Y. Koga, A. Todoroki, M. Ueda, Y. Hirano, and R. Matsuzaki, "3D Printing of Continuous Carbon Fibre Reinforced Thermo-Plastic (CFRTP) Tensile Test Specimens," Open J. Compos. Mater., vol. 06, no. 01, pp. 18–27, Dec. 2016, doi: 10.4236/ojcm.2016.61003.
- [10] N. Mohan, P. Senthil, S. Vinodh, and N. Jayanth, "A review on composite materials and process parameters optimisation for the fused deposition modelling process," *Virtual Phys. Prototyp.*, vol. 12, no. 1, pp. 47–59, Jan. 2017, doi: 10.1080/17452759.2016.1274490.
- [11] F. Baumann, J. Scholz, and J. Fleischer, "Investigation of a New Approach for Additively Manufactured Continuous Fiber-reinforced Polymers," in *Procedia CIRP*, Jan. 2017, vol. 66, pp. 323–328, doi: 10.1016/j.procir.2017.03.276.
- [12] T. Liu, X. Tian, M. Zhang, D. Abliz, D. Li, and G. Ziegmann, "Interfacial performance and fracture patterns of 3D printed continuous carbon fiber with sizing reinforced PA6 composites," *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 114, pp. 368–376, Nov. 2018, doi:

10.1016/j.compositesa.2018.09.001.

- [13] A. N. Dickson, J. N. Barry, K. A. McDonnell, and D. P. Dowling, "Fabrication of continuous carbon, glass and Kevlar fibre reinforced polymer composites using additive manufacturing," *Addit. Manuf.*, vol. 16, pp. 146–152, Aug. 2017, doi: 10.1016/j.addma.2017.06.004.
- [14] J. Justo, L. Távara, L. García-Guzmán, and F. París, "Characterization of 3D printed long fibre reinforced composites," *Compos. Struct.*, vol. 185, pp. 537–548, Feb. 2018, doi: 10.1016/j.compstruct.2017.11.052.
- [15] G. D. Goh *et al.*, "Characterization of mechanical properties and fracture mode of additively manufactured carbon fiber and glass fiber reinforced thermoplastics," *Mater. Des.*, vol. 137, pp. 79–89, Jan. 2018, doi: 10.1016/j.matdes.2017.10.021.
- [16] A. Todoroki *et al.*, "Tensile property evaluations of 3D printed continuous carbon fiber reinforced thermoplastic composites," *Adv. Compos. Mater.*, vol. 29, no. 2, pp. 147– 162, Mar. 2020, doi: 10.1080/09243046.2019.1650323.
- [17] A. El Moumen, M. Tarfaoui, and K. Lafdi, "Additive manufacturing of polymer composites: Processing and modeling approaches," *Compos. Part B Eng.*, vol. 171, pp. 166–182, Aug. 2019, doi: 10.1016/j.compositesb.2019.04.029.
- [18] Z. Hou *et al.*, "A constitutive model for 3D printed continuous fiber reinforced composite structures with variable fiber content," *Compos. Part B Eng.*, vol. 189, p. 107893, May 2020, doi: 10.1016/j.compositesb.2020.107893.
- [19] C. Fan, Z. Shan, G. Zou, L. Zhan, and D. Yan, "Interfacial Bonding Mechanism and Mechanical Performance of Continuous Fiber Reinforced Composites in Additive Manufacturing," *Chinese J. Mech. Eng.*, vol. 34, no. 1, p. 21, Dec. 2021, doi: 10.1186/s10033-021-00538-7.
- [20] J. M. Chacón, M. A. Caminero, P. J. Núñez, E. García-Plaza, I. García-Moreno, and J. M. Reverte, "Additive manufacturing of continuous fibre reinforced thermoplastic composites using fused deposition modelling: Effect of process parameters on mechanical properties," *Compos. Sci. Technol.*, vol. 181, p. 107688, Sep. 2019, doi: 10.1016/j.compscitech.2019.107688.
- [21] T. A. Dutra, R. T. L. Ferreira, H. B. Resende, and A. Guimarães, "Mechanical characterization and asymptotic homogenization of 3D-printed continuous carbon fiber-reinforced thermoplastic," *J. Brazilian Soc. Mech. Sci. Eng.*, vol. 41, no. 3, pp. 1– 15, 2019, doi: 10.1007/s40430-019-1630-1.
- [22] F. Wang, J. Zheng, G. Wang, D. Jiang, and F. Ning, "A novel printing strategy in additive manufacturing of continuous carbon fiber reinforced plastic composites," *Manuf. Lett.*, vol. 27, pp. 72–77, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.mfglet.2020.12.006.
- [23] K. Shi, Y. Yan, H. Mei, C. Chen, and L. Cheng, "3D printing Kevlar fiber layer distributions and fiber orientations into nylon composites to achieve designable mechanical strength," *Addit. Manuf.*, vol. 39, p. 101882, Mar. 2021, doi: 10.1016/j.addma.2021.101882.
- [24] M. Galati, M. Viccica, and P. Minetola, "A Finite Element approach for the prediction of the mechanical behaviour of layered composites produced by Continuous Filament Fabrication (CFF)," *Polym. Test.*, p. 107181, Mar. 2021, doi: 10.1016/j.polymertesting.2021.107181.
- [25] J. R. C. Dizon, A. H. Espera, Q. Chen, and R. C. Advincula, "Mechanical characterization of 3D-printed polymers," *Additive Manufacturing*, vol. 20. Elsevier B.V., pp. 44–67, Mar. 01, 2018, doi: 10.1016/j.addma.2017.12.002.

- [26] A. El-Hajje *et al.*, "Physical and mechanical characterisation of 3D-printed porous titanium for biomedical applications," *J. Mater. Sci. Mater. Med.*, vol. 25, no. 11, pp. 2471–2480, Oct. 2014, doi: 10.1007/S10856-014-5277-2.
- [27] I. Burgués-Ceballos, M. Stella, P. Lacharmoise, and E. Martínez-Ferrero, "Towards industrialization of polymer solar cells: Material processing for upscaling," *J. Mater. Chem. A*, vol. 2, no. 42, pp. 17711–17722, Nov. 2014, doi: 10.1039/C4TA03780D.
- [28] F. Calignano *et al.*, "Overview on additive manufacturing technologies," *Proc. IEEE*, vol. 105, no. 4, pp. 593–612, 2017, doi: 10.1109/JPROC.2016.2625098.
- [29] A. Ghobadian, I. Talavera, A. Bhattacharya, V. Kumar, J. A. Garza-Reyes, and N. O'Regan, "Examining legitimatisation of additive manufacturing in the interplay between innovation, lean manufacturing and sustainability," *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 219, pp. 457– 468, Jan. 2020, doi: 10.1016/j.ijpe.2018.06.001.
- [30] F. A. Cruz Sanchez, H. Boudaoud, M. Camargo, and J. M. Pearce, "Plastic recycling in additive manufacturing: A systematic literature review and opportunities for the circular economy," *Journal of Cleaner Production*, vol. 264. Elsevier Ltd, p. 121602, Aug. 10, 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.121602.
- [31] H. Huang, W. Liu, and Z. Liu, "An additive manufacturing-based approach for carbon fiber reinforced polymer recycling," *CIRP Ann.*, vol. 69, no. 1, pp. 33–36, Jan. 2020, doi: 10.1016/j.cirp.2020.04.085.
- [32] W. E. Frazier, "Metal additive manufacturing: A review," Journal of Materials Engineering and Performance, vol. 23, no. 6. Springer New York LLC, pp. 1917–1928, Apr. 08, 2014, doi: 10.1007/s11665-014-0958-z.
- [33] ا.سينا , "No Title", قانون در طب ا. ا.سينا [33]
- [34] J. M. Rowell, "I materiali fotonici," 1960.
- [35] "Autoclave Compositi | Italmatic | Autoclavi e forni." https://www.italmatic.eu/autoclavi-2/autoclave-compositi/ (accessed Apr. 22, 2021).
- [36] "Coriolis C1 · Coriolis Composites." https://www.coriolis-composites.com/fiberplacement-machines/coriolis-c1/ (accessed Apr. 22, 2021).
- [37] P. Bhat, J. Merotte, P. Simacek, and S. G. Advani, "Process analysis of compression resin transfer molding," *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 40, no. 4, pp. 431–441, Apr. 2009, doi: 10.1016/J.COMPOSITESA.2009.01.006.
- [38] "Intoduction to the resin infusion (or vacuum infusion) process." https://www.vacmobiles.com/resin_infusion.html (accessed Apr. 22, 2021).
- [39] M. Ziółkowski and T. Dyl, "Possible applications of additive manufacturing technologies in shipbuilding: A review," *Machines*, vol. 8, no. 4, pp. 1–34, 2020, doi: 10.3390/machines8040084.
- [40] P. Parandoush and D. Lin, "A review on additive manufacturing of polymer-fiber composites," *Composite Structures*, vol. 182. Elsevier Ltd, pp. 36–53, Dec. 15, 2017, doi: 10.1016/j.compstruct.2017.08.088.
- [41] F. O. Sonmez and H. T. Hahn, "Thermomechanical analysis of the laminated object manufacturing (LOM) process," *Rapid Prototyp. J.*, vol. 4, no. 1, pp. 26–36, 1998, doi: 10.1108/13552549810197541.
- [42] "New composite-based additive manufacturing technology | 3D Printing Progress." https://www.3dprintingprogress.com/articles/11023/new-composite-based-additivemanufacturing-technology (accessed Apr. 22, 2021).
- [43] W. Zhu *et al.*, "A novel method based on selective laser sintering for preparing highperformance carbon fibres/polyamide12/epoxy ternary composites," *Sci. Rep.*, vol. 6,

no. 1, pp. 1–10, Sep. 2016, doi: 10.1038/srep33780.

- [44] B. Brenken, E. Barocio, A. Favaloro, V. Kunc, and R. B. Pipes, "Fused filament fabrication of fiber-reinforced polymers: A review," *Additive Manufacturing*, vol. 21. Elsevier B.V., pp. 1–16, May 01, 2018, doi: 10.1016/j.addma.2018.01.002.
- [45] O. S. Carneiro, A. F. Silva, and R. Gomes, "Fused deposition modeling with polypropylene," *Mater. Des.*, vol. 83, pp. 768–776, Oct. 2015, doi: 10.1016/j.matdes.2015.06.053.
- [46] "McLaren Racing Stratasys." https://www.mclaren.com/racing/partners/stratasys/ (accessed Apr. 13, 2021).
- [47] "Onyx Pro Composite 3D printer | Markforged." https://markforged.com/3dprinters/onyxpro?utm_source=google&utm_medium=cpc&utm_campaign=12000578543&utm_co ntent=117539000633&utm_term=onyx pro 3d printer&gclid=Cj0KCQjwgtWDBhDZARIsADEKwgN9P5quQ50XE2o8_e5IIWOnySy0cdLa A0DddIZvCAILZp9__bIJZ8saArxaEALw_wcB (accessed Apr. 13, 2021).
- [48] "Mark Two Carbon Fiber 3D Printer | Markforged." https://markforged.com/3dprinters/mark-two (accessed Apr. 13, 2021).
- [49] "Introducing the Mark X: Performance, Precision, and Presentation all...." https://markforged.com/resources/blog/introducing-the-mark-x (accessed Apr. 13, 2021).
- [50] "combot-I Product 斐 帛 科 技 ." http://www.fibertech3d.com/en/index.php?m=content&c=index&a=show&catid=3&i d=3 (accessed Apr. 13, 2021).
- [51] "APS Advanced Additive Manufacturing," Accessed: Apr. 21, 2021. [Online]. Available: https://aps-techsolutions.com/en.
- [52] M. Araya-Calvo et al., "Evaluation of compressive and flexural properties of continuous fiber fabrication additive manufacturing technology," Addit. Manuf., vol. 22, pp. 157– 164, Aug. 2018, doi: 10.1016/j.addma.2018.05.007.
- [53] A. Parmiggiani, M. Prato, and M. Pizzorni, "Effect of the fiber orientation on the tensile and flexural behavior of continuous carbon fiber composites made via fused filament fabrication," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2021, doi: 10.1007/s00170-021-06997-5.
- [54] H. Al Abadi, H. T. Thai, V. Paton-Cole, and V. I. Patel, "Elastic properties of 3D printed fibre-reinforced structures," *Compos. Struct.*, vol. 193, pp. 8–18, Jun. 2018, doi: 10.1016/j.compstruct.2018.03.051.
- [55] R. T. L. Ferreira, H. C. Rodrigues, J. M. Guedes, and J. A. Hernandes, "Hierarchical optimization of laminated fiber reinforced composites," *Compos. Struct.*, vol. 107, no. 1, pp. 246–259, Jan. 2014, doi: 10.1016/J.COMPSTRUCT.2013.07.051.
- [56] A. V. Malakhov, A. N. Polilov, J. Zhang, Z. Hou, and X. Tian, "A Modeling Method of Continuous Fiber Paths for Additive Manufacturing (3D Printing) of Variable Stiffness Composite Structures," *Appl. Compos. Mater.*, vol. 27, no. 3, pp. 185–208, Jun. 2020, doi: 10.1007/s10443-020-09804-8.
- [57] P. Materials, E. I. Materials, P. Matrix, C. Materials, and P. Specimens, "Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics 1," no. January 2004, pp. 1–15, 2006, doi: 10.1520/D0638-14.1.
- [58] British Standards Institutions, "BSI Standards Publication Plastics Determination of flexural properties," 2013.
- [59] ASTM INTERNATIONAL, "Standard Test Methods for Flexural Properties of

Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials. D790," *Annu. B. ASTM Stand.*, pp. 1–12, 2002, doi: 10.1520/D0790-17.2.

- [60] ASTM D7264/D7264M-07, "Standard Test Method for Flexural Properties of Polymer Matrix Composite Materials," Annu. B. ASTM Stand., vol. i, pp. 1–11, 2007, doi: 10.1520/D7264.
- [61] Markforged, "Composite 3D properties," pp. 0–1, 2020.