



ALMA MATER STUDIORUM  
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE

*CORSO DI LAUREA IN:*

**INGEGNERIA AEROSPAZIALE**  
(*CLASSE L-9*)

***CORE SOLUBILI PER LA LAMINAZIONE IN  
MATERIALE COMPOSITO: ANALISI DELLE  
PROBLEMATICHE SPERIMENTALI E  
OTTIMIZZAZIONE DEL PROCESSO***

**Tesi di laurea in Costruzioni Aeronautiche**

**Relatore:**

*Prof.ssa Sara Bagassi*

**Candidato:**

*Marco Rivola*

**Correlatore:**

*Ing. Martino Carlo Moruzzi*

---

**Anno Accademico 2023/2024**



## Sommario

La tesi proposta si concentra sull'utilizzo della tecnologia additiva per la produzione di cuori solubili impiegabili nella laminazione di componenti in materiale composito, analizzando le principali problematiche riscontrate durante il processo sperimentale e fornendo alternative per l'ottimizzazione di esso. Dopo un'introduzione teorica sui materiali compositi, sul processo di produzione di componenti con questa tipologia di materiali e la manifattura additiva, si passa alla presentazione della campagna sperimentale. Lo studio è stato svolto tramite test in autoclave su provini in *SR-30*, materiale plastico di supporto della stampante additiva a filamento *Fortus 250mc*. La caratteristica principale di questo polimero è la sua solubilità in una soluzione basica, il che lo rende ideale per la creazione di supporti facilmente rimovibili anche su geometrie particolarmente complesse. L'obiettivo primario è stato individuare le criticità della tecnologia e del processo produttivo sperimentato, dalla produzione dei provini al componente in materiale composito finito, fornendo, qualora possibile, ipotesi sull'ottimizzazione di esse. Per ultimo si è effettuata una valutazione dei costi e dei tempi necessari alla produzione di un componente cavo in composito, sfruttando la tecnologia oggetto della tesi e confrontandola con il tradizionale metodo stampo-controstampo.

# Indice

<b>INDICE</b> .....	<b>II</b>
<b>INDICE DELLE FIGURE</b> .....	<b>III</b>
<b>INTRODUZIONE</b> .....	<b>1</b>
<b>I MATERIALI COMPOSITI</b> .....	<b>2</b>
2.1 LE MATRICI .....	3
2.1.1 <i>Le resine epossidiche</i> .....	4
2.2 LE FIBRE DI RINFORZO .....	6
2.2.1 <i>Le fibre di vetro</i> .....	7
2.2.2 <i>Le fibre aramidiche</i> .....	8
2.2.3 <i>Le fibre ceramiche</i> .....	9
2.2.4 <i>Le fibre di carbonio</i> .....	9
<b>LAMINAZIONE DI UN COMPONENTE IN FIBRA DI CARBONIO</b> .....	<b>12</b>
3.1 PROCESSO DI LAMINAZIONE .....	12
3.2 IL SACCO A VUOTO .....	13
3.2.1 <i>Creazione del sacco a vuoto</i> .....	14
3.3 L'AUTOCLAVE .....	14
3.4 GLI STAMPI E LE ANIME .....	15
<b>LE TECNOLOGIE ADDITIVE</b> .....	<b>18</b>
4.1 PROCESSO DI STAMPA .....	18
4.2 CLASSIFICAZIONE .....	19
4.3 FDM .....	20
4.4 MATERIALI DI SUPPORTO SOLUBILI .....	21
<b>ANALISI SPERIMENTALE</b> .....	<b>23</b>
5.1 CONTESTO .....	23
5.2 CASI DI STUDIO E PRODUZIONE PROVINI .....	24
5.3 REGOLAZIONE ESPERIMENTO .....	25
5.4 FILM SEPARATORE .....	26
5.5 FINITURA SUPERFICIALE .....	28
5.6 TEMPI DI DISSOLUZIONE MANDRINI .....	30
5.7 FATTIBILITÀ E SPAZIO DI STAMPA .....	32
5.8 LIMITI STRUTTURALI E DI TEMPERATURA .....	33
5.9 CONFRONTO COSTI DI PRODUZIONE .....	34
5.9.1 <i>Metodo di produzione con mandrino solubile</i> .....	34
5.9.2 <i>Metodo di produzione tradizionale (stampo e controstampo)</i> .....	37
5.10 CONSIDERAZIONI E SVILUPPI FUTURI .....	38
<b>CONCLUSIONI</b> .....	<b>41</b>
<b>RINGRAZIAMENTI</b> .....	<b>42</b>
<b>BIBLIOGRAFIA</b> .....	<b>43</b>

# Indice delle figure

FIGURA 2.1: SCHEMA COMPOSIZIONE DI UN MATERIALE COMPOSITO. ....	2
FIGURA 2.2: DIAGRAMMA TENSIONE-ALLUNGAMENTO DI UN COMPOSITO. ....	3
FIGURA 2.3: DIAGRAMMA DI TRASFORMAZIONE NEL TEMPO. ....	5
FIGURA 2.4: NASTRI IN FIBRA DI VETRO. ....	7
FIGURA 2.5: NASTRI IN KEVLAR. ....	8
FIGURA 2.6: FIBRA CERAMICA. ....	9
FIGURA 2.7: ESEMPIO DI CARICO APPLICATO PARALLELAMENTE E PERPENDICOLARMENTE ALLE FIBRE. ....	10
FIGURA 2.8: SOVRAPPOSIZIONE DI PIÙ FOGLI DI MATERIALE NELLE DIFFERENTI DIREZIONI. ....	11
FIGURA 3.1: SCHEMA DELLA TECNICA VACUUM BAGGING. ....	13
FIGURA 3.2: SACCO A VUOTO ULTIMATO PRIMA DELLA MESSA A VUOTO. ....	14
FIGURA 3.3: ALLESTIMENTO AUTOCLAVE. ....	15
FIGURA 3.4: STAMPO APERTO A SINISTRA, STAMPO CHIUSO A DESTRA. ....	16
FIGURA 3.5: ESEMPIO DI MANDRINO CON CORRISPONDENTE GEOMETRIA IN COMPOSITO. ....	17
FIGURA 4.1: FASI DI PRODUZIONE CON TECNOLOGIA ADDITIVA. ....	19
FIGURA 4.2: SCHEMA TECNOLOGIA DI STAMPA FDM. ....	21
FIGURA 4.3: COMPONENTE LAMINATO IN FIBRA DI CARBONIO SU MANDRINO SOLUBILE. ....	22
FIGURA 5.1: TAVOLETTA DI STAMPA CON MANDRINI IN SR-30 PRODOTTI. ....	25
FIGURA 5.2: STAMPANTE FORTUS 250MC. ....	26
FIGURA 5.3: DALL'ALTO: FILM SEPARATORE IN AZZURRO, MATERIALE PER IL SACCO A VUOTO IN VERDE, BREATHING MATERIAL IN BIANCO. DIETRO: SECONDO MATERIALE PER SACCO A VUOTO ROSA. ....	28
FIGURA 5.4: SACCO A VUOTO ULTIMATO CON PIEGHE SUPERFICIALI VISIBILI. ....	29
FIGURA 5.5: PRIMO E SECONDO STRATO DI FILM SEPARATORE. ....	30
FIGURA 5.6: LA SUPPORT CLEANING APPARATUS 1200HT. ....	32
FIGURA 5.7: GEOMETRIA DOPPIO CILINDRICA. ....	35
FIGURA 5.8: GRAFICO DEL COSTO IN FUNZIONE DEL NUMERO DI COMPONENTI. ....	39



# Capitolo 1

## Introduzione

L' *additive manufacturing*, in italiano la fabbricazione additiva è una tecnica produttiva che comporta la fabbricazione di parti e oggetti attraverso l'apporto di strati successivi di materiale. La tecnologia è stata introdotta sul mercato intorno agli anni '80 ed è ancora in continua evoluzione; si distingue dalle altre tipologie tradizionali di produzione sottrattiva, quali torni e fresatrici, che hanno come idea di base l'asportazione di materiale meccanicamente sottoforma di trucioli.

Al giorno d'oggi sono disponibili sul mercato varie tipologie di processi di produzione additiva. Quello che trova maggiori applicazioni per la sua semplicità, economicità, oltre che per la possibilità di creare geometrie complesse è la deposizione di plastiche fuse. I componenti prodotti, partendo da una versione digitale modellata mediante un software di disegno, possono essere pronti all'uso oppure trovare applicazione come stampo o supporto per la produzione di parti in materiale composito.

Questa idea è stata messa in pratica in una delle sue forme da Stratasys, un'azienda americana leader del settore. L'approccio di produzione di supporti e anime tramite la loro tecnologia FDM (*fused deposition modeling*) comporta innumerevoli vantaggi rispetto alla produzione tradizionale dei medesimi: il primo è senza dubbio il tempo necessario con una riduzione totale che può arrivare al 95%, richiedendo a volte un solo giorno dal concetto alla realizzazione della parte. Il secondo vantaggio, caratteristico della tecnologia Stratasys, su cui si è basata la campagna sperimentale in oggetto, è la possibilità di poter stampare le anime in materiale solubile, rendendo la loro rimozione, a ciclo completato, di estrema facilità.

Questi supporti solubili, come scritto in precedenza, assumono una particolare importanza nella produzione di componenti in materiale composito. Con l'avvento di questa rivoluzionaria tipologia di materiale, che fa della resistenza e della leggerezza i suoi capisaldi, è stata inevitabile la sua diffusione in tutti i settori industriali, tra cui quello aerospaziale dove queste caratteristiche sono le maggiormente ricercate.

In questa tesi vengono inizialmente presentati, in modo teorico, i concetti di materiale composito nel Capitolo 2, laminazione dei componenti nel Capitolo 3 e tecnologie additive nel Capitolo 4. Successivamente, nel capitolo 5 si descrive l'esperimento, in cui è stato impiegato l'*SR-30*, prodotto da Stratasys, come materiale per la stampa di anime sacrificali solubili. Si procede nello stesso capitolo all'analisi del processo sperimentale, tentando di evidenziarne vantaggi, limiti e criticità, e cercando di ottimizzare l'utilizzo di questa tecnologia, includendo un'analisi dei costi in relazione al metodo tradizionale stampo-controstampo di produzione di componenti in composito.

## Capitolo 2

### I materiali compositi

I materiali compositi, per definizione, sono costituiti dall'unione di due o più componenti distinti, noti come fasi, generalmente suddivisi in matrice e fibre di rinforzo. Questi materiali presentano due caratteristiche fondamentali: eterogeneità, poiché le loro proprietà variano in base alla composizione e disposizione delle fasi, e talvolta anisotropia, ovvero la dipendenza delle proprietà meccaniche dalla direzione.

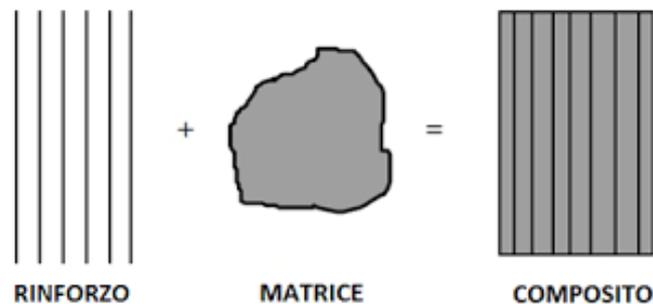


Figura 2.1: *schema composizione di un materiale composito.*

Il principio cardine dei materiali compositi è la combinazione di materiali con caratteristiche diverse, che, presi singolarmente, non offrono particolari vantaggi, ma che uniti riescono ad esaltare le proprie proprietà. La matrice costituisce la fase continua e riveste un ruolo fondamentale nel legare e proteggere le fibre, ed è anche utilizzata per classificare le varie famiglie di compositi. Le fibre di rinforzo, invece, hanno proprietà meccaniche nettamente superiori rispetto ai materiali massivi, sia in termini di resistenza che di rigidità [1].

Dal punto di vista strutturale, le performance meccaniche dei materiali compositi sono strettamente legate all'efficienza del trasferimento degli sforzi tra la matrice e il rinforzo. Per ottenere un contributo ottimale da ciascuna fase, è fondamentale che le sollecitazioni applicate siano trasmesse in modo efficace dalla matrice alle fibre. Questo processo è reso possibile da un'ampia superficie di contatto tra le due fasi e da un'interfaccia opportunamente progettata, che garantisce un'adesione robusta e massimizza la capacità di trasferimento degli sforzi, ottimizzando così le prestazioni complessive del composito.

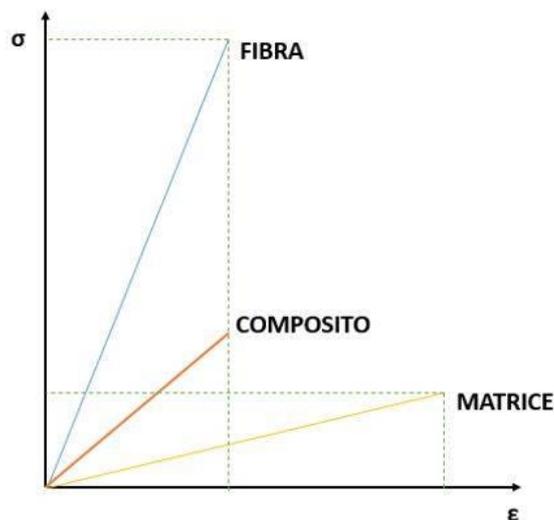


Figura 2.2: diagramma tensione-allungamento di un composito.

I materiali compositi possono essere suddivisi in diverse categorie, in base alla natura della matrice:

- Compositi a matrice metallica (ad esempio, leghe metalliche rinforzate).
- Compositi a matrice organica (come il legno multistrato).
- Compositi a matrice minerale (ad esempio, il calcestruzzo).
- Compositi a matrice polimerica, una delle famiglie più sviluppate e diffuse (ad esempio, la fibra di carbonio).

Il progresso nei materiali compositi moderni è stato trainato principalmente dall'esigenza di soddisfare le richieste sempre più complesse di settori industriali ad alte prestazioni, come quello spaziale, aeronautico, della difesa, dello sport e della biomeccanica, dove resistenza, leggerezza e prestazioni elevate sono cruciali [2].

Poiché questa tesi è focalizzata sui materiali utilizzati nel settore aeronautico, verranno trattate esclusivamente le informazioni riguardanti i materiali comunemente impiegati in tale ambito.

## 2.1 Le matrici

Le matrici utilizzate nei compositi avanzati sono estremamente diversificate, includendo materiali polimerici (sia termoindurenti che termoplastici), metallici e persino ceramici. Nell'ambito aerospaziale, la resina epossidica rappresenta attualmente la matrice termoindurente più utilizzata, grazie alle sue eccellenti prestazioni meccaniche e termiche. Nei materiali termoindurenti, la matrice viene polimerizzata mediante l'applicazione di temperatura e pressione specifiche per un tempo determinato, ottenendo una struttura densa e a basso contenuto di vuoti [3].

Un aspetto cruciale nel determinare il comportamento meccanico di un composito è la composizione della matrice, che lega le fibre di rinforzo. La formulazione della matrice non solo definisce il ciclo di cura, ma influenza anche proprietà fondamentali come:

- Resistenza al taglio, alla compressione e al *creep*.<sup>1</sup>
- Resistenza termica.
- Sensibilità all'umidità e ai raggi UV.

Queste proprietà influiscono direttamente sulla stabilità strutturale del composito.

Oltre alla sua funzione primaria di dare forma e consistenza al manufatto, la matrice ha il compito di:

1. Trasferire il carico in modo uniforme alle fibre di rinforzo.
2. Proteggere le fibre dall'esposizione all'umidità, agli agenti corrosivi e agli ossidanti, prevenendo fenomeni di infragilimento e rottura precoce.
3. Mantenere l'orientamento corretto delle fibre ed evitare il loro contatto diretto.
4. Resistere alla propagazione di fessure e ai danni da impatto, migliorando la durabilità del composito.

### ***2.1.1 Le resine epossidiche***

La resina epossidica è il prodotto adesivo più comune e versatile utilizzato in un'ampia gamma di settori, tra cui quello aerospaziale. Le resine epossidiche appartengono alla famiglia dei materiali monomeri o oligomerici e hanno eccellenti proprietà meccaniche, ottime proprietà di isolamento elettrico, notevole resistenza alla corrosione, eccellente resistenza chimica in particolare agli ambienti alcalini, e resistenza a fatica superiore. Sebbene possano avere un costo iniziale superiore rispetto ad altre resine, le loro prestazioni nel lungo periodo ne giustificano l'adozione in applicazioni critiche.

Le resine epossidiche appartengono al gruppo delle matrici termoindurenti, e la loro polimerizzazione avviene attraverso la reazione tra la resina e un agente indurente, il quale promuove la formazione di una rete tridimensionale reticolata. Questo processo, comunemente chiamato cura, viene realizzato in autoclave per compositi avanzati come la fibra di carbonio, dove il sistema è riscaldato fino a raggiungere la temperatura di reazione ottimale per attivare la polimerizzazione [4].

Al raggiungimento della temperatura di cura, segue la fase di mantenimento termico, durante la quale la temperatura viene mantenuta costante per un determinato periodo al fine di permettere la completa reazione di polimerizzazione. Questa fase è essenziale per garantire la corretta formazione della rete reticolare, necessaria per conferire al materiale le proprietà meccaniche e termiche richieste. Una caratteristica importante delle resine epossidiche è che il processo di polimerizzazione procede per mezzo di una reazione *step-growth* senza la generazione di sottoprodotti volatili. Successivamente, il processo produce strutture prive di vuoti.

Le specifiche relative alla temperatura di mantenimento e alla durata della fase di polimerizzazione sono generalmente fornite dai produttori nei manuali tecnici del materiale. In questi documenti sono spesso presenti anche tabelle che indicano il tempo di mantenimento in funzione di un intervallo di temperature, permettendo così di ottimizzare il processo di cura in base alle esigenze specifiche.

---

<sup>1</sup> Il creep, o scorrimento viscoso, è un fenomeno di deformazione plastica progressiva che si manifesta nei materiali sottoposti a uno sforzo costante per un lungo periodo di tempo, generalmente a temperature elevate.

Il processo di polimerizzazione epossidica è un fattore importante che influenza la qualità e le prestazioni della resina epossidica. Il meccanismo della fase di polimerizzazione della resina epossidica può essere tracciato seguendo il diagramma di trasformazione in tempo (TTT) come mostrato nella figura 2.3.

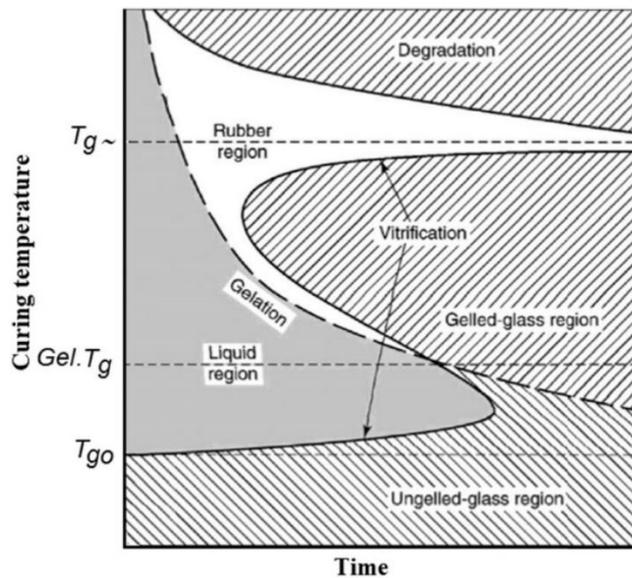


Figura 2.3: diagramma di trasformazione nel tempo.

Nel diagramma TTT, il tempo per la gelificazione e la vetrificazione è rappresentato in funzione della temperatura di polimerizzazione isotermica.

La gelificazione e la vetrificazione sono due fenomeni macroscopici che si verificano in conseguenza di reazioni chimiche che modificano lo stato del fluido per diventare solido nel processo termoidurente. Il processo di gelificazione è accompagnato da un drastico aumento della viscosità e da una diminuzione del processo di diffusione della fase condensata e della lavorabilità del materiale. La struttura molecolare del reticolo nella fase di gelificazione diventa un elastomero ad una certa temperatura se i legami intermolecolari del reticolo sono flessibili. Se questi perdono la capacità di muoversi a causa di reazioni chimiche successive o a causa del raffreddamento, la struttura passa ad una condizione vetrosa o vetrificata. Il processo di vetrificazione segue quindi generalmente la gelificazione e provoca una diminuzione del grado di libertà del tessuto strutturale. La vetrificazione avviene durante la polimerizzazione isotermica, quando la transizione vetrosa dei reagenti raggiunge la temperatura di polimerizzazione. Il processo di vetrificazione è identificato grazie ad un rallentamento delle reazioni chimiche.

Sulla base del diagramma TTT, la curva di vetrificazione a forma di S e la curva di gelificazione dividono il diagramma TTT in quattro fasi del processo di polimerizzazione del termoidurente: liquido, gomma gelatinosa, vetro non gelatinoso e vetro gelatinoso.

La temperatura di transizione vetrosa della miscela di resina non reagita viene denotata con  $T_{go}$ ,  $T_g$  è la temperatura di transizione vetrosa di una resina a polimerizzazione completa e  $Gel.T_g$  è il punto di intersezione tra le curve di vetrificazione e di gelificazione.

Nelle fasi iniziali di polimerizzazione prima della gelificazione o vetrificazione, la reazione di indurimento è controllata da meccanismi cinetici, cioè la reazione avviene rapidamente e può essere controllata. Quando avviene la vetrificazione, la resina passa da uno stato liquido a uno stato vetroso, e la reazione non è più controllata dalla cinetica, ma dal meccanismo di diffusione. In questa fase, il tasso di reazione si riduce rispetto alla fase liquida. Nella regione tra gelificazione e vetrificazione (regione della gomma), le reazioni passano gradualmente da un controllo cinetico a uno diffusivo. La concorrenza di queste reazioni determina la temperatura minima di vetrificazione che si osserva nel diagramma TTT tra  $T_g$  e  $Gel.T_g$ .

Se la temperatura di indurimento aumenta, la velocità della reazione inizialmente cresce, e il tempo necessario per raggiungere la vetrificazione rallenta. Tuttavia, in questa fase, la reazione controllata dalla diffusione diventa dominante, superando la reazione cinetica. Quando la reazione diffusiva diventa prevalente nella fase di gomma, tutte le velocità di reazione diminuiscono, allungando ulteriormente il tempo di vetrificazione.

Al  $T_g$ , la reazione non è completamente conclusa. Durante il processo di indurimento, la viscosità del sistema epossidico aumenta con l'aumentare del peso molecolare. Alla fine, la reazione si riduce sempre più, fino a fermarsi completamente quando la resina epossidica si è vetrificata.

Dopo che la reazione si è fermata, si può procedere con il post-indurimento, aumentando la temperatura per migliorare le proprietà della resina epossidica. La post-polimerizzazione è efficace solo a temperature superiori a  $T_g$ . Va tuttavia notato che a una temperatura anche solo leggermente superiore a  $T_g$  ma con tempo di esposizione troppo lungo, si va incontro ad un degrado dei legami del sistema epossidico. Per questo motivo il controllo della temperatura e del tempo di polimerizzazione deve essere fatto con attenzione per evitare di cadere nella fase di “sovrapolimerizzazione” [5].

## ***2.2 Le fibre di rinforzo***

Il ruolo fondamentale dei rinforzi nei materiali compositi è quello di incrementarne le proprietà meccaniche, in particolare resistenza e rigidità. Le fibre possono essere presenti singolarmente o in un fascio (*roving*) che ne contiene varie centinaia arrotolate oppure attorcigliate a trefolo ed avvolte.

Le proprietà meccaniche delle fibre sono generalmente migliori di quelle della matrice che le contengono; quindi, le proprietà del composito che si otterrà dipenderanno principalmente dalle fibre stesse. Le fibre offrono un contributo diverso in base a:

1. le proprietà di base della fibra;
2. l'interazione tra superfici fibra/resina;
3. la quantità di fibra nel materiale;
4. l'orientamento delle fibre nel materiale composito.

Esistono vari materiali e tipologie di fibre, ognuna con caratteristiche differenti in termini di resistenza e rigidità. Di seguito vengono approfondite brevemente le tipologie più comunemente utilizzate: vetro, aramidiche, ceramiche e carbonio.

### ***2.2.1 Le fibre di vetro***

Le fibre di vetro sono uno dei materiali di rinforzo più diffuso nel settore dei compositi per via del loro ottimo rapporto qualità-prezzo e grazie alle buone proprietà meccaniche. Questa tipologia di rinforzo è prodotta dalla fusione del vetro e dalla filatura di questo in filamenti sottili, uniti poi in differenti modi a seconda della tipologia di fibra che si vuole andare a formare. Offrono una buona resistenza alla trazione e una rigidità elevata; se comparate ad altre tipologie di fibre però, come ad esempio le fibre di carbonio, soffrono di una densità maggiore, di una bassa resistenza a fatica e di un ridotto modulo di elasticità.

Esistono diverse tipologie di fibre di vetro, tra cui spiccano:

- Vetro E: offre un'ottima resistenza elettrica e meccanica.
- Vetro S: impiegato per applicazioni in cui si richiedono proprietà meccaniche superiori a quelle della tipologia E.
- Vetro C: utilizzato nelle applicazioni in cui è richiesta una maggiore resistenza alla corrosione dagli acidi.
- Vetro A: versione formulata specificatamente per l'isolamento termico.

Un ultimo aspetto fondamentale delle fibre di vetro, come visto nella versione C, è la loro resistenza chimica che le rende resistenti alla corrosione e perfette per lavorare in ambienti ostili particolarmente umidi o con agenti chimici aggressivi [7].



*Figura 2.4: nastri in fibra di vetro.*

## 2.2.2 Le fibre aramidiche

Le fibre aramidiche, sviluppatasi intorno ai primi anni '50 del secolo scorso, sono formate da poliammidi aromatiche. La più diffusa fibra aramidica è senza dubbio il Kevlar. Rispetto a tutte le altre fibre di rinforzo attualmente impiegate, le fibre aramidiche posseggono la densità minore e la più elevata resistenza specifica; tale fattore è dovuto alla marcata orientazione molecolare che introduce pertanto un'estrema anisotropia nelle proprietà meccaniche del materiale. Questa caratteristica, unita con il cedimento non catastrofico delle fibre quando sottoposte a sforzi, ne determina una notevole tolleranza al danno e alla resistenza ad impatti ad alta energia. Questo tipo di aramide viene utilizzato come rinforzo in compositi che richiedono particolari prestazioni, come basso peso, resistenza meccanica e rigidità elevate e resistenza al danneggiamento. Particolari matrici epossidiche, rinforzate in kevlar, vengono utilizzate in alcune parti dello Space Shuttle [6].

Esistono tre diversi tipi di fibra aramidiche che si differenziano per composizione e caratteristiche e sono:

- Kevlar 29: ad alta tenacità.
- Kevlar 49: ad alto modulo di elasticità.
- Kevlar 129: ad altissimo modulo di elasticità.

Tuttavia, questa tipologia di fibra di rinforzo possiede alcuni svantaggi non trascurabili. Hanno bassa resistenza alla compressione, difficoltà nell'essere tagliate o macinate, alta degradazione se esposte ai raggi ultravioletti in presenza di ossigeno e inoltre assorbono acqua (è richiesto l'utilizzo di una protezione per conservarle dai raggi ultravioletti, l'ossigeno e l'umidità). Per quanto riguarda il costo, sono meno economiche di altre tipologie di rinforzi a parità di caratteristiche [7].



*Figura 2.5: nastri in kevlar*

### ***2.2.3 Le fibre ceramiche***

Le fibre ceramiche, impiegate generalmente come fibre refrattarie, sono utilizzate in applicazioni che prevedono temperature di esercizio superiori ai 1000 °C. Sono dotati di una struttura policristallina e vengono utilizzati come isolanti termici per materiali che si trovano ad operare in ambienti con temperature particolarmente elevate.

Possiedono proprietà assolutamente eccezionali, superiori a quelle dell'acciaio o di altre fibre normalmente usate. Vengono utilizzati per la progettazione di compositi speciali e le tecniche di lavorazione a cui esse sono sottoposte ne aumentano il prezzo e riducono sensibilmente i campi di applicazione. Esse trovano impiego nel settore aerospaziale; più nello specifico vengono utilizzate ad esempio nel sistema di protezione termica dello Space Shuttle.

Un significativo punto debole di questo rinforzo è l'elevata fragilità: soffrono di una bassa tolleranza alla deformazione prima del cedimento, caratteristica comune di tutti i materiali ceramici [7].



*Figura 2.6: fibra ceramica*

### ***2.2.4 Le fibre di carbonio***

La fibra di carbonio è il materiale di rinforzo più comune e utilizzato nel settore dei materiali compositi grazie alle sue spiccate proprietà meccaniche e alla sua leggerezza. La fibra è composta da sottili filamenti di carbonio, con diametro di pochi micrometri, ottenuti grazie a processi di carbonizzazione e grafitizzazione di precursori polimerici, come il poliacrilonitrile (PAN), prodotti della distillazione del petrolio.

Ogni filamento viene poi unito in fasci più grandi, detti *roving*, formati da migliaia di filamenti. Queste fibre, composte da circa il 92% di carbonio, hanno resistenza meccanica molto superiore alla matrice che le contiene, come si nota anche in figura 2.2, facendo sì che le caratteristiche del materiale dipendano in gran parte dalle caratteristiche delle fibre.

Come già scritto, le proprietà meccaniche di questa fibra sono tra le migliori in assoluto: la resistenza a trazione è compresa tra i 4200 e 4800 Mpa e il modulo di elasticità che varia tra 220 e 800 GPa. Altro punto di forza da sottolineare è la loro bassissima densità a fronte delle ottime caratteristiche meccaniche; questa, infatti, è di appena 1.75 g/cm<sup>3</sup> il che la rende una concorrente alle tradizionali leghe di alluminio. Un ulteriore vantaggio è l'ottima resistenza alla fatica e alla corrosione, fondamentali se impiegate in ambienti ostili.

Lo svantaggio principale è il costo di produzione molto elevato, il che ne limita l'utilizzo a settori dove i benefici superano di gran lunga i costi come, ad esempio, l'aerospaziale o l'automobilistico di alto livello. L'aspetto più critico di queste fibre è la grande fragilità sotto impatto: l'estrema facilità con cui si fratturano, può però rivelarsi un vantaggio decisivo se si guarda il problema dal punto di vista della sicurezza, ad esempio nel motorsport; la frammentazione in piccoli detriti durante un impatto assorbe meglio l'energia e aiuta nella protezione degli occupanti del veicolo, come accade in Formula 1.

L'orientamento delle fibre, prima citato, nel materiale composito a base di carbonio è un aspetto fondamentale che influenza notevolmente la resistenza alle sollecitazioni esterne. Ad esempio, le fibre orientate parallelamente alla direzione del carico avranno un'ottima resistenza e rigidezza, ma saranno estremamente deboli se il carico è applicato perpendicolarmente, dove a sostenerlo sarà la sola matrice. Le fibre resistono ai carichi di compressione e trazione, mentre la matrice ha il compito di distribuzione del carico tra le fibre e ne impedisce il cedimento a compressione. Si ha inoltre la possibilità di avere fibre asciutte o preimpregnate con resina (*prepreg*). Il materiale *prepreg* è una forma di fibra con una quantità predeterminata di resina e, a seconda delle fibre e delle matrici, si possono avere diverse configurazioni. La configurazione intrecciata offre una maggiore malleabilità, mentre i nastri unidirezionali avranno bisogno di più strati unidirezionali con un diverso orientamento per resistere a carichi fuori dall'asse delle fibre. L'orientamento delle fibre è perciò fondamentale nella resistenza del componente finale: sarà fondamentale bilanciare la capacità di distribuzione del carico nelle diverse direzioni. Si ricorre quindi alla sovrapposizione di più fogli di materiale nelle diverse direzioni; un caso tipico è l'orientamento 0°, 45°, -45°, 90° tipicamente utilizzato in aeronautica per la sua capacità di resistenza e rigidezza lungo tutte le direzioni [3,7].

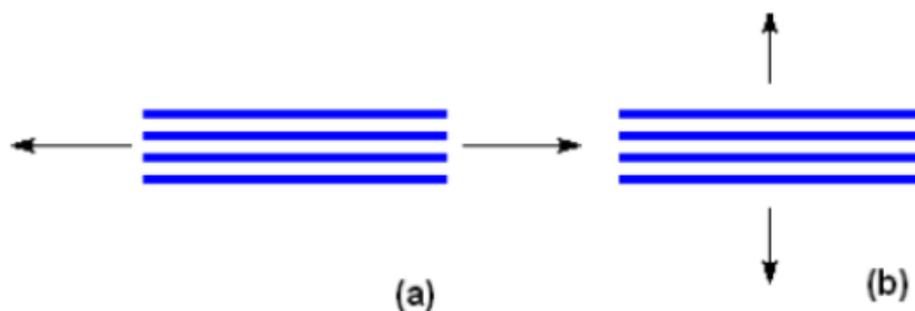


Figura 2.7: esempio di carico applicato parallelamente e perpendicolarmente alle fibre.

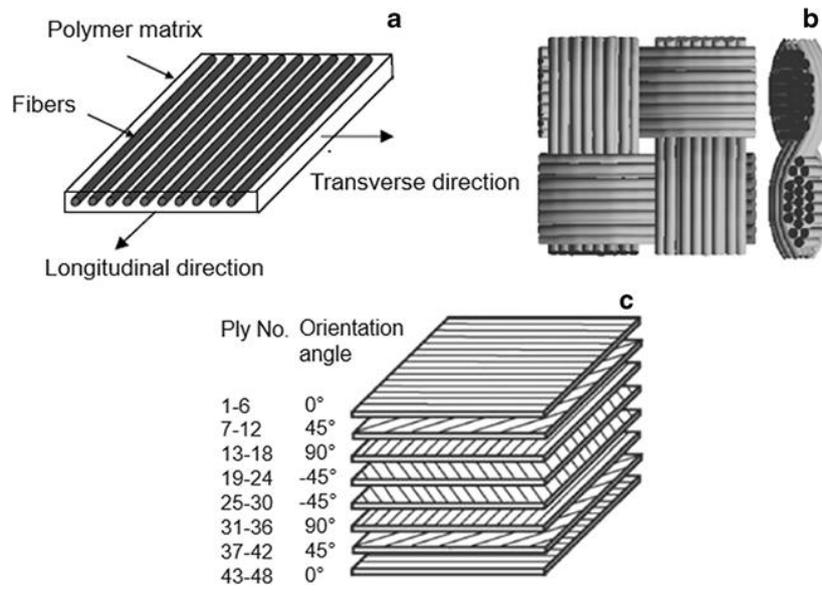


Figura 2.8: sovrapposizione di più fogli di materiale nelle differenti direzioni.

# Capitolo 3

## Laminazione di un componente in fibra di carbonio

Con il termine laminazione si intende il processo con il quale si passa dai fogli di materiale composito depositi su un opportuno stampo, al componente finito di forma desiderata a seguito di un processo di polimerizzazione.

A seconda della tecnica usata per la deposizione delle fibre sullo stampo, si possono distinguere due categorie principali:

1. *Lay-Up Processes*: si ha la sovrapposizione di un determinato numero strati di materiale. Si distinguono due ulteriori tipologie:
  - *Dry Lay-Up*: si utilizzano fogli di materiale pre-impregnati (*pre-preg*), ovvero già trattate con resina, offrendo un controllo migliore sulla quantità di resina e sulla sua distribuzione e rendendo il componente adatto a contesti in cui si richiedono alte prestazioni come il settore aerospaziale.
  - *Wet Lay-Up*: le fibre vengono impregnate di resina direttamente sullo stampo. Il processo risulta più economico ma può portare ad una distribuzione non uniforme della resina con conseguente discontinuità nelle proprietà meccaniche.
2. *Spray-Up Processes*: si ha la deposizione a spruzzo simultanea di fibre e resina sullo stampo.

Vista la disponibilità di fibre *pre-preg* nel contesto sperimentale di questa tesi, si farà riferimento solo a processi di tipo *Dry Lay-Up* e alle possibili applicazioni.

La produzione di un componente in composito si suddivide in tre fasi distinte: il taglio, la laminazione e la polimerizzazione. La fase del taglio è quella in cui i fogli di materiale vengono sagomati delle dimensioni e geometrie richieste. Si passa quindi alla fase di laminazione dove le lamine sagomate vengono posizionate sugli stampi appositi seguendo l'orientamento voluto in modo da garantire le proprietà meccaniche secondo specifiche direzioni di carico. La fase finale è quella di polimerizzazione, dove il composito trasforma la sua struttura rendendola rigida. Questa trasformazione avviene attraverso un controllo di temperatura e pressione molto preciso, permettendo alla resina di polimerizzare e formare i legami. Nel caso dei materiali pre-impregnati, l'aumento della temperatura è un fattore fondamentale per velocizzare il processo e migliorare le caratteristiche della resina.

### 3.1 Processo di laminazione

Esistono diversi processi per la produzione di un componente finito, nel caso di studio si è utilizzato quello del sacco a vuoto (*vacuum bagging*). Il *vacuum bagging* è una tecnica utilizzata per produrre manufatti di alta qualità mantenendo il processo relativamente semplice [8]. Questa tecnica si compone di vari passaggi. Si inizia con la creazione dello stampo o dell'anima, che viene poi ricoperto con un film o una resina distaccante per facilitare l'estrazione del manufatto alla fine del processo. I fogli di composito vengono tagliati nella forma desiderata e applicati su uno dei lati dello stampo o

attorno all'anima. Prima che la fase di indurimento della resina diventi irreversibile, si procede con l'applicazione del *vacuum stacking*, una serie di strati aggiuntivi che non faranno parte del prodotto finale, ma che servono a distribuire il vuoto, mantenerlo costante e rimuovere l'eccesso di resina. Gli strati principali del *vacuum stacking* includono:

- *Peel ply*: una trama in materiale plastico che permette il passaggio dei gas volatili generati durante l'indurimento della resina e l'evacuazione della resina in eccesso. Al termine del processo, questo strato può essere facilmente rimosso, lasciando una superficie ruvida e opaca.
- *Release film*: un sottile film termoplastico con numerose aperture che consente il passaggio di resina e volatili, creando una barriera aggiuntiva tra il *peel ply* e il *breather*.
- *Breather o bleeder*: uno strato realizzato generalmente in feltro o tessuto organico, che ha una doppia funzione: assorbire l'eccesso di resina e aiutare nella distribuzione uniforme del vuoto in tutto il manufatto.
- *Mesh*: una rete fatta di filamenti di polimero termoplastico intrecciati tridimensionalmente, utile per migliorare la distribuzione del vuoto, soprattutto in manufatti complessi e con curvature marcate.

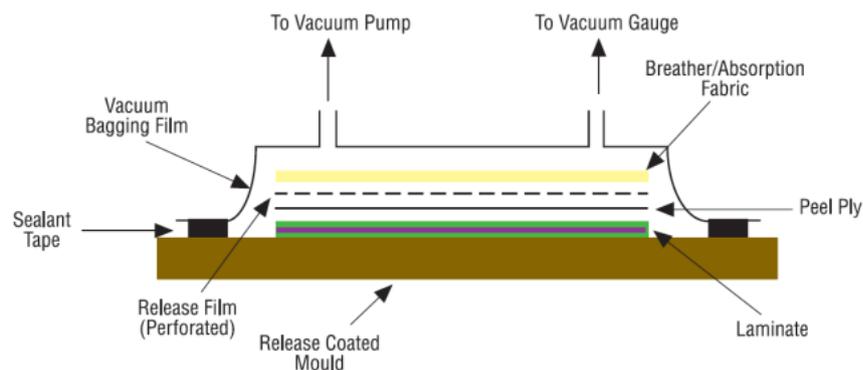


Figura 3.1: schema della tecnica vacuum bagging.

### 3.2 Il sacco a vuoto

Il sacco a vuoto è un elemento molto importante al fine della riuscita del successivo ciclo in autoclave con lo scopo finale di produzione di un componente in composito [8]. Questo ha tre funzioni fondamentali:

- Rimozione dell'aria: il sacco a vuoto serve per rimuovere le bolle di aria intrappolate fra le varie lamine del composito, evitando la creazione di vuoti e difetti strutturali.
- Rimozione delle sostanze volatili: durante la polimerizzazione della resina in autoclave, i prodotti volatili della resina potrebbero compromettere la qualità del componente; il sacco aiuta la rimozione di queste attraverso il circuito del vuoto.
- Compattazione delle lamine: il sacco favorisce l'adesione delle lamine e della resina, riducendo la presenza di vuoti o imperfezioni.

### ***3.2.1 Creazione del sacco a vuoto***

Una volta terminata la fase di laminazione, si procede alla creazione del sacco a vuoto (*vacuum bagging*); questo è essenzialmente un sottile film resistente alle alte temperature, con il compito di mantenere il vuoto al suo interno, ma consentire la fuoriuscita dell'aria.

La chiusura del sacco, dopo aver inserito al suo interno il componente laminato comprensivo di tutti gli strati descritti, avviene attraverso un nastro adesivo sigillante, detto mastice, che garantisce la tenuta. Si applica poi un foro su un lato per l'installazione della valvola di fuoriuscita, attraverso la quale si collega la pompa del vuoto.

L'aria viene aspirata attraverso la valvola creando la depressione voluta che favorisce l'adesione delle lamine eliminando vuoti interni o bolle d'aria. Il sacco a vuoto, con all'interno il laminato, è quindi pronto per il ciclo di cura che avverrà in autoclave.



*Figura 3.2: sacco a vuoto ultimato prima della messa a vuoto.*

### ***3.3 L'autoclave***

Un'autoclave è un dispositivo industriale usato per la produzione di materiali compositi come fibra di carbonio, fibra di vetro o altri materiali rinforzanti. È formata principalmente da una camera a pressione, un sistema di riscaldamento e di pressurizzazione, un sistema di vuoto, un sistema di controllo e una struttura esterna.

Le autoclavi per la produzione di questi componenti sono progettate specificamente per cicli di pressione e temperatura controllati; infatti, durante la polimerizzazione il macchinario applica pressione e calore al pezzo per ottenere una perfetta adesione delle fibre. Hanno notevoli dimensioni in modo che possano ospitare anche grandi componenti. Il sistema di vuoto, oltre all'impianto di pressurizzazione e di temperatura, risulta essere molto importante in modo da mantenere il sacco,

precedentemente svuotato dall'aria, il più vuoto possibile. Questo previene la presenza di bolle che potrebbero minare l'integrità strutturale del pezzo.



*Figura 3.3: allestimento autoclave.*

### ***3.4 Gli stampi e le anime***

Nella produzione di un componente in composito gli stampi e le anime, chiamati anche mandrini per analogia con i *core* solubili utilizzati per la produzione di parti in composito tramite *Filament Winding*, sono componenti fondamentali per la definizione della geometria del prodotto finale. Durante la progettazione del manufatto devono essere sempre considerati alcuni aspetti fondamentali di valenza generale, così da scegliere la tipologia di supporto con le caratteristiche più adatte. In particolare, serve prestare attenzione ad alcuni aspetti come il ritiro dimensionale e la dilatazione termica sia dello stampo che del composito, alla rigidità dello stampo, alla sua finitura superficiale e alla presenza o meno di raggi di curvatura e angoli di sforno. Oltre a queste voci, di fondamentale importanza è la valutazione della geometria stessa, soprattutto laddove siano presenti forme complesse.

Come già anticipato, la scelta del materiale con cui realizzare gli attrezzi (stampi e mandrini) dipende da molteplici fattori ed è un aspetto di cruciale importanza sulle caratteristiche e proprietà possedute da essi. Generalmente si utilizzano metalli, quali acciaio o alluminio, per la loro economicità e durezza nel primo e per la bassa densità e la facilità di lavorazione nel secondo.

Nella produzione di attrezzi per la formatura in autoclave, il progettista deve spesso effettuare un compromesso fra i requisiti di rigidità e quelli di inerzia termica; se da un lato si vuole garantire la miglior rigidità degli stampi, sia per soddisfare la lavorabilità della fase di laminazione sia per la cura in autoclave, dall'altro si cerca di rendere maggiormente pronta la risposta termica degli stessi, in modo che i tempi di riscaldamento e raffreddamento non siano eccessivamente lunghi. Questo fattore, che va contenuto e limitato, oltre a provocare un aumento dei tempi del ciclo, e quindi dei

costi di produzione, può compromettere anche la qualità finale dei laminati in quanto, al fine di ottenere una compattazione ottimale, i parametri di pressione e temperatura devono essere applicati secondo i tempi e le modalità imposte dalla reticolazione della resina. Per questo motivo, piuttosto che attrezzi ottenuti secondo tecniche di lavorazione tradizionali, si adottano stampi di lamiera opportunamente irrigiditi mediante una struttura esterna, che prende il nome di struttura *eggcrate* [9].

Generalmente la precisione dimensionale dei prodotti ottenuti tramite processi di produzione in autoclave dipende direttamente dal grado di finitura superficiale degli stampi. Esistono tipicamente tre tipologie di stampi utilizzati:

- *Stampi aperti*: vengono utilizzati quando è necessario trasferire con precisione la forma al componente su una sola faccia come si nota in figura 3.4. Sono adatti per la produzione di superfici molto grandi e semplici. La superficie dello stampo determina la qualità superficiale del pezzo ottenuto. A seconda del tipo di faccia che deve presentare la finitura superficiale maggiore, si progettano stampi di tipo maschio o femmina.
- *Stampi chiusi*: detti anche stampi a conchiglia, trasferiscono un'ottima finitura su ambo i lati del pezzo. Sono composti dalle due parti chiamate stampo e controstampo, visibili in figura 3.4. La compattazione del composito si ottiene attraverso una manica. Si tratta di un'apertura all'interno del sacco a vuoto che garantisce l'efficace pressione sul manufatto grazie alla differenza di pressione tra esterno e interno. In alcuni casi è preferibile usare o una sacca gonfiabile o un mandrino.

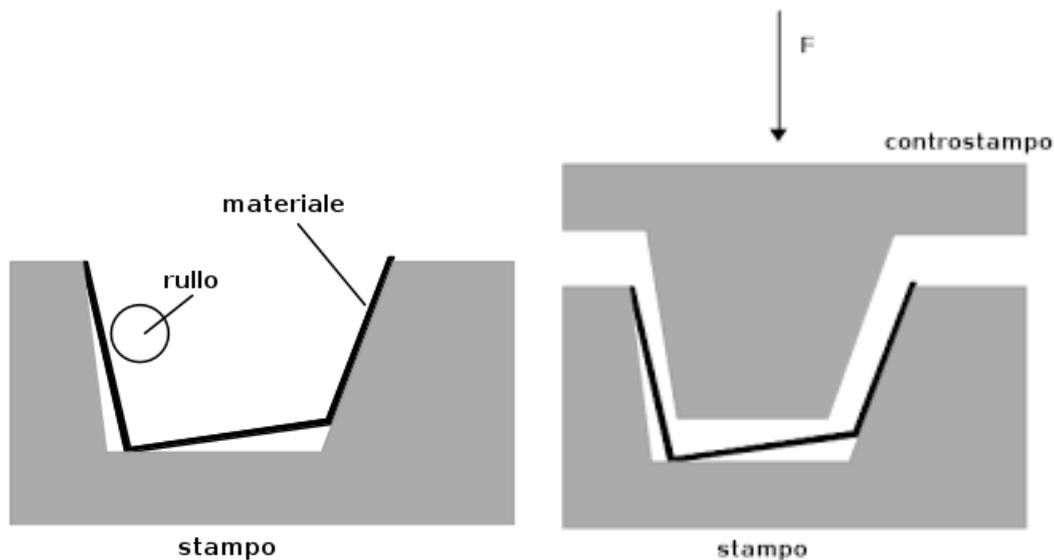


Figura 3.4: stampo aperto a sinistra, stampo chiuso a destra.

- *Mandrini*: detti anche anime, sono utilizzati per tutti quei componenti che presentano cavità interne, possono garantire quindi la stessa modalità di trasferimento della finitura superficiale degli stampi aperti. Esistono mandrini smontabili, composti generalmente da due parti dove la sformatura del manufatto avviene rimuovendo le parti singolarmente, e mandrini spendibili, dove il supporto viene distrutto meccanicamente o chimicamente durante l'operazione di sformatura, un esempio è visibile in figura 3.5. La via chimica garantisce più sicurezza nel mantenimento delle caratteristiche del prodotto rispetto alla via meccanica; infatti, durante la

distruzione del mandrino meccanicamente si potrebbe danneggiare anche il componente. L'eliminazione "dell'anima" per via chimica è proprio il percorso che sta alla base dello studio in oggetto in questa tesi.



*Figura 3.5: esempio di mandrino con corrispondente geometria in composito.*

# Capitolo 4

## Le tecnologie additive

La manifattura additiva, *additive manufacturing (AM)* in inglese, rappresenta una tecnologia rivoluzionaria nel settore della produzione industriale e negli ultimi tempi è stata soggetta ad un ampio sviluppo e diffusione. In contrapposizione ai metodi tradizionali di lavorazione alle macchine utensili che prevedono la rimozione di materiali e la formazione di uno scarto chiamato truciolo, la manifattura additiva costruisce gli oggetti in strati, chiamati *layer*, partendo da un modello digitale. Questo metodo permette di passare in poco tempo da una versione concettuale, rappresentata dal modello 3D, ad un oggetto fisico, con un processo produttivo semplice e veloce. Originariamente conosciuta come prototipazione rapida (RP), questa tecnologia era utilizzata per creare prototipi, parti di sistemi o attrezzature di produzione, come stampi e utensili, in modo rapido, in particolare negli ambiti della produzione a basso volume, dove i tempi giocano un aspetto fondamentale [10]. Grazie allo sviluppo di questa tecnologia, oggi le applicazioni vanno ben oltre la semplice produzione di prototipi; in molti settori industriali come quello automobilistico e aerospaziale si è passati alla produzione di componenti finiti grazie alla possibilità di creare geometrie complesse ad alta precisione [11].

### 4.1 Processo di stampa

Il grande vantaggio della manifattura additiva è la semplicità del processo di produzione rispetto ai metodi tradizionali; in quest'ultimi, infatti, molto spesso è necessario passare per diverse lavorazioni di taglio, fresatura e tornitura prima di arrivare ad un prodotto finito. Utilizzando la tecnologia AM, il pezzo viene costruito strato per strato in un unico processo, riducendo la difficoltà di produzione ma anche tempi e costi. In genere, i passaggi necessari per ottenere il componente finale, partendo da un modello digitale, sono:

- *Modello digitale*: si tratta di un modello digitale tridimensionale della geometria da produrre attraverso un software di disegno e progettazione. Nel caso di studio di questa tesi il software utilizzato è stato *SolidWorks*.
- *Slicing*: il modello digitale viene convertito in un formato leggibile dalla stampante 3D, solitamente STL. Si effettua poi l'importazione del file con il formato corretto sul software di *slicing*, nel caso di studio Insight [12], dove vengono decisi e impostati i parametri di stampa più importanti come materiale, spessore degli strati e densità del riempimento. Il programma calcola poi il numero di strati necessari alla costruzione dell'oggetto ed il percorso che l'estrusore dovrà seguire.
- *Stampa*: è la fase principale dove viene creato direttamente il componente. Dopo aver sistemato le cartucce di materiale nella stampante, si lancia la stampa. La macchina, seguendo le direttive calcolate al punto precedente, inizia la deposizione strato per strato del materiale.

Nel caso di studio, la stampante a disposizione era una *Fortus 250mc* equipaggiata con *ABSplus P430* come materiale principale e *SR-30* come materiale di supporto, entrambi di produzione Stratasys [12].

- *Verifiche*: quando la stampa è terminata, il componente viene rimosso dalla tavoletta di costruzione. Successivamente può essere sottoposto a processi di pulizia e rimozione dei supporti. Nel caso di studio, il processo è reso più semplice dalla solubilità del materiale di supporto. Terminati questi passaggi il componente è pronto all'uso [10].

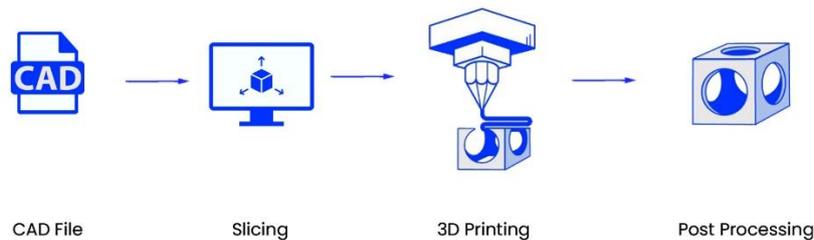


Figura 4.1: fasi di produzione con tecnologia additiva.

## 4.2 Classificazione

Con l'evoluzione della tecnologia, i materiali e il processo sono migliorati notevolmente, consentendo di utilizzare una varietà di stati fisici durante la deposizione. Attualmente si possono classificare le stampanti in tre macrocategorie principali a seconda dello stato del materiale al momento della deposizione:

- **Stato Solido**: quando si parla di stampanti 3D a stato solido, come quelle che utilizzano la tecnologia FDM (*Fused Deposition Modeling*) o FFF (*Fused Filament Fabrication*), si intendono quelle macchine che impiegano filamenti di materiale solido, di solito plastica, che vengono fusi e depositati strato dopo strato. Questa tecnologia presenta alcuni vantaggi decisivi come la velocità di stampa e il costo relativamente basso; infatti, è molto utilizzata per prototipi rapidi e componenti funzionali. I materiali di uso comune sono Nylon, ABS e PLA ma esistono anche varianti rinforzate che utilizzano fibra di carbonio o di vetro. A discapito dei vantaggi prima citati si contrappongono una finitura superficiale e una risoluzione non sempre delle migliori, con linee di strato visibili sui pezzi stampati.
- **Stato Liquido**: la tecnologia SLA (*Stereolithography*) e DLP (*Digital Light Processing*) fanno uso di resine liquide che, trattate con luce UV o laser, induriscono. Questa tecnica permette di ottenere dettagli molto precisi e superfici lisce, rendendola ideale per applicazioni che richiedono alta precisione. Il processo di stampa risulta più lento e costoso, il materiale finale può risultare più fragile rispetto a quello prodotto con tecnologia FDM [13].

- **Stato Granulare:** le tecnologie SLS (*Selective Laser Sintering*) e SLM (*Selective Laser Melting*) fanno uso di polveri metalliche, plastiche o ceramiche che vengono fuse strato per strato da un laser ad alta intensità. Questa tipologia di stampa è molto versatile; infatti, ha la possibilità di produrre geometrie anche complesse senza la necessità di supporti aggiuntivi. La qualità della stampa è molto elevata, ma da considerare sono i costi molto elevati e i tempi di produzione lunghi.

La stampante utilizzata nel caso di studio oggetto di questa tesi utilizza la tecnologia FDM con filamenti di materiale plastico in *ABSplus P430* e *SR-30*. In tabella 4.1 vengono riassunte e messe a confronto le tre tecnologie sopra descritte.

*Tabella 4.1: tabella riassuntiva delle caratteristiche delle tre tecnologie descritte.*

<b>Caratteristica</b>	<b>Stato Solido (FDM/FFF)</b>	<b>Stato Liquido (SLA/DLP)</b>	<b>Stato Granulare (SLS/SLM)</b>
<b>Materiale</b>	Filamento solido (PLA, ABS, Nylon, ecc.)	Resina liquida fotosensibile	Polvere (metallo, plastica, ceramica)
<b>Flessibilità dei Materiali</b>	Media (limitata ai filamenti disponibili)	Alta (varietà di resine)	Molto alta (metalli, plastiche, ceramiche)
<b>Qualità Superficiale</b>	Media (linee di strato visibili)	Alta (superficie liscia e dettagliata)	Alta (superficie liscia ma richiede post-elaborazione)
<b>Precisione</b>	Media (dipende dalla stampante)	Molto alta (risoluzione fine)	Alta (dettagli complessi possibili)
<b>Velocità di Stampa</b>	Alta (adatta per prototipi rapidi)	Media (tempo di polimerizzazione per ogni strato)	Bassa (dipende dal materiale e dalla geometria)
<b>Costo</b>	Basso (stampanti e materiali economici)	Medio-alto (stampanti e resine costose)	Alto (stampanti e materiali molto costosi)

### **4.3 FDM**

La tecnologia FDM è la più semplice e accessibile tra quelle descritte nella sezione 4.2. In questa tipologia di stampa, un filamento di materiale termoplastico passa attraverso un ugello riscaldato, fondendosi ad una temperatura controllata. Il materiale viene depositato strato dopo strato sulla tavoletta apposita di stampa, dove si solidificherà. Come descritto nel processo di stampa, nella fase di *slicing* viene determinato il percorso che compirà l'estrusore, la velocità e la pressione con cui il

materiale fuso uscirà da esso, regolando anche lo spessore dello strato di conseguenza. La costruzione e la buona riuscita di uno strato può avvenire controllando che la temperatura nel momento della deposizione sia sufficientemente alta per garantire la corretta adesione strato per strato, oppure tramite l'ausilio di un agente chimico che funge da colla.

Nella testina della stampante sono presenti due estrusori, uno per ogni tipologia di materiale; questo è utile quando la geometria da riprodurre presenta forme particolari, con ad esempio parti sospese, e quindi è necessario aggiungere un supporto di materiale invertito per evitare di far collassare il materiale ancora fuso. L'eventuale cambio di materiale per costruire questo tipo di geometrie, per quanto versatile e utile, comporta un aumento della quantità di materiale utilizzato inevitabilmente ma anche del tempo di stampa in quanto ad ogni inversione del materiale l'estrusore che si andrà ad utilizzare necessita di essere pulito nell'apposita spazzola per eliminare il truciolo di materiale solidificato rimasto attaccato all'uscita dal precedente utilizzo.

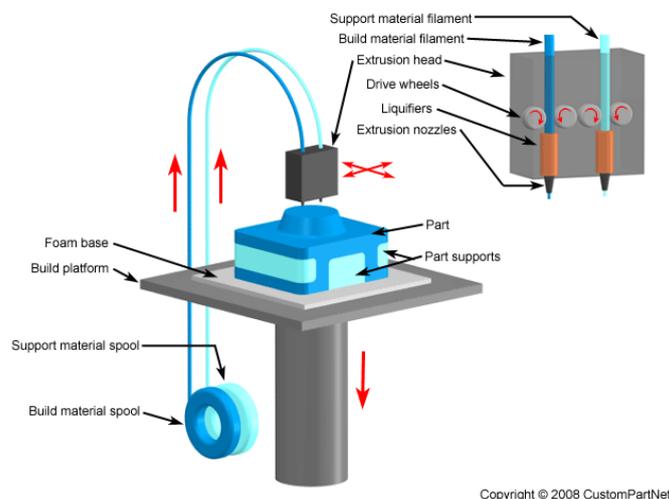


Figura 4.2: schema tecnologia di stampa FDM.

I vantaggi di questa tecnologia sono numerosi, spiccano infatti la semplicità costruttiva e il basso costo dei materiali. Non mancano però gli svantaggi, tra cui la finitura superficiale non eccellente. Altro punto a cui prestare attenzione è la velocità di movimento della testina: se troppo veloce, oltre alla finitura superficiale, viene influenzata negativamente anche l'accuratezza e potrebbero incorrere problemi sulla ancora non perfetta solidificazione dello strato precedente al momento della deposizione. Una testina più lenta porta ovviamente ad un aumento dei tempi di stampa [14].

#### 4.4 Materiali di supporto solubili

I materiali di supporto solubili, come l'*SR-30* prodotto da Stratasys, risultano particolarmente utili nella stampa con tecnologia FDM per la produzione di geometrie complesse come componenti sospesi, vuoti o con cavità interne difficili da raggiungere. La loro principale caratteristica è che, una volta terminata la stampa, possono essere rimossi semplicemente sottoponendo l'insieme composito più supporto ad un ciclo di lavaggio in una soluzione alcalina, generalmente acqua e idrossido di

sodio, che scioglie il supporto senza necessità di interventi manuali e senza il rischio di danneggiare il pezzo.

Un'applicazione interessante di questo processo è l'utilizzo di materiali di supporto come anime sacrificali. In questo caso, il materiale di supporto viene utilizzato come materiale principale della struttura temporanea, mentre l'*ABSplus P430* funge da materiale di supporto: la stampa risulta a materiali invertiti. Una volta terminato il ciclo in autoclave, la parte temporanea in *SR-30* viene sciolta nella soluzione basica lasciando la struttura in composito intatta e senza residui.

Questo approccio permette di creare forme interne complesse, riducendo tempi e costi di produzione e assicurando che la rimozione del supporto non comprometta la qualità del pezzo.

L'utilizzo di anime sacrificali mediante tecnologia FDM presenta però anche alcune limitazioni. Il primo punto da considerare è che ogni mandrino è di natura monouso, rendendo il processo economicamente vantaggioso solo per bassi volumi di produzione. Inoltre, essendo il materiale di origine plastico, i parametri di cura in autoclave avranno grossi limiti a livello di pressione e temperatura per evitare deformazioni. Un ultimo punto non trascurabile è il coefficiente di dilatazione abbastanza alto del materiale, circa sei volte quello dell'alluminio e fino a dieci volte quello dell'acciaio, che deve essere considerato durante il processo per garantire la precisione del risultato.

Oltre all'*SR-30* di Stratasys, esistono altri materiali di supporto solubili utilizzati per la creazione di strutture complesse. Tra questi, troviamo l'*SR-35* e l'*SR-100*, entrambi della linea Stratasys, ideali per ambienti ad alta temperatura e particolarmente resistenti in fase di stampa. Un'altra opzione è l'*ULTEM Support* per materiali ad alta resistenza come l'*ULTEM 9085*. Un'altra opzione è il PVA (alcool polivinilico), comunemente usato nelle stampanti di piccole dimensioni, solubile in acqua ma meno resistente rispetto all'*SR-30*, risultando poco adatto per applicazioni industriali [12,14,15].



*Figura 4.3: componente laminato in fibra di carbonio su mandrino solubile.*

# Capitolo 5

## Analisi Sperimentale

### 5.1 Contesto

Negli anni 2018-2019, il team UniBo Motorsport dell'Università di Bologna affidò al reparto di aerodinamica di Forlì il progetto di un nuovo condotto freno in materiale composito per le ruote anteriori della vettura UBM19 EVOLUTA [16]. La geometria del componente, cava e non assial-simmetrica, creò diverse difficoltà nella realizzazione dell'attrezzo di formatura tramite il metodo tradizionale utilizzato dalle macchine utensili. Si pensò quindi, attraverso il *Rapid Tooling*, di produrre l'anima solubile del componente così da poter semplificare il ciclo produttivo ed inoltre contenere i costi produttivi. Grazie alla collaborazione con il gruppo di ricerca in Prototipazione Rapida dell'Università di Bologna, venne impiegata la stampante FDM Stratasys *Fortus 250mc*. In particolare, si scelse di sfruttare il materiale di supporto *SR-30*, che ha la proprietà di essere solubile in una soluzione basica. La tecnologia ha riscontrato diversi vantaggi: con la manifattura additiva è stato possibile ottenere un'anima con geometria complessa difficilmente ottenibile con metodi di lavorazione per asportazione di truciolo, abbattendo i tempi e i costi di produzione, e una volta terminato il ciclo, non si correva il rischio di danneggiare il componente durante la rimozione dell'anima, perché sarebbe stato sufficiente dissolverla nella soluzione basica. In commercio sono disponibili materiali progettati con lo scopo di essere utilizzati come supporto solubile per la laminazione dei compositi, caratterizzati da proprietà meccaniche e termiche spesso superiori rispetto all'*SR-30*. Tuttavia, uno dei principali punti di forza di questo materiale risiede nella sua economicità, un fattore che risulta vincolante in tutte quelle applicazioni con limiti di budget o nella produzione di larga scala inoltre è utilizzabile con diversi tipi di stampanti. Mancando riferimenti bibliografici e letteratura tecnica con informazioni, limiti operativi e parametri ottimali per l'utilizzo di questa tecnologia, si è avviata una campagna sperimentale per colmare queste lacune tentando di identificare condizioni operative ideali e vincoli associati all'*SR-30* in questo particolare caso d'utilizzo. Negli anni 2019-2020, sono state condotte diverse prove di compressione uniassiale quasi statica, da cui sono state ottenute curve forza-spostamento a temperatura ambiente [17]. Successivamente dall'anno 2022, si è iniziato a studiare accoppiamenti di parametri di pressione-temperatura tali da far indurire il *Pre-Preg Fabric* senza far collassare o deformare l'anima [18]. Questo tipo di studio è ancora in corso durante l'anno corrente, dove si sta cercando di ampliare la tabella di dati mancanti relativi agli accoppiamenti prima citati [19]. In questa tesi si è andati ad individuare le criticità che accompagnano la tecnologia ed il processo produttivo, tentando di fornire soluzioni volte all'ottimizzazione delle sperimentazioni in corso. Al fine di rilevare queste criticità, è stato applicato il processo produttivo ad alcuni casi di studio, in particolare due cilindri semplici e due cilindri con corpo centrale di diametro maggiore.

## 5.2 Casi di studio e produzione provini

Come descritto nella sezione 5.1, si è deciso di applicare il processo produttivo al fine di analizzare vantaggi e svantaggi a due geometrie differenti; la prima è un cilindro con *Aspect Ratio*<sup>2</sup> 2.5 (lunghezza 100 mm, diametro 40 mm), prodotta per la sua semplicità sia in fase di stampaggio sia in fase di laminazione. Questa prima tipologia di provino richiede bassi tempi di produzione e non necessita di alta manualità durante il processo di laminazione il che la rende una geometria molto affidabile per valutare eventuali deformazioni dovute al ciclo di cura in autoclave. La seconda geometria prodotta è stata un cilindro con doppio diametro di lunghezza totale 200 mm e diametro 60 mm nel corpo centrale e 40 mm nelle due sezioni laterali (50 mm di lunghezza). Questa configurazione evidenzia chiaramente i vantaggi di avere un mandrino solubile e sul perché sia stata scelta questa come secondo caso applicativo di studio: il diametro maggiore nel tratto centrale comporterebbe, nel caso di mandrino non solubile, una difficoltà non indifferente nella rimozione del supporto. Si procederebbe con la rottura dell'anima interna con la possibilità di danneggiamento del componente in composito: un'operazione rischiosa che comporta anche una notevole manualità richiesta. L'utilizzo di un mandrino solubile sventa queste difficoltà e rischi, riducendo il post-ciclo di cura ad un semplice passaggio in una soluzione basica, che scioglie il materiale.

Una volta creati i modelli digitali su *SolidWorks*, sono stati caricati su *Insights*, il software di pre-processing della *Fortus 250mc*, e convertiti in formato STL leggibile dalla stampante Fortus. Il software calcola il numero di strati da eseguire e il percorso dell'estrusore per costruire i mandrini, fornendo i dati su volumi di materiale utilizzato e tempo stimato di stampa. Per il cilindro semplice e il doppio cilindro sono stati stampati due provini per ciascun tipo mentre per il profilo NACA la stampa è stata unica. Per tutti i modelli, è stata utilizzata una densità di stampa *Sparse High Density*.

Come si nota in figura 5.1, la particolare geometria dei doppi cilindri, con un diametro maggiore nella parte centrale, porterebbe ad avere alcune parti in *SR-30* in sospensione che ovviamente collasserebbero per gravità durante la stampa essendo il materiale fuso. Grazie sempre al software *Insight*, viene, in automatico, progettata e inserita una struttura in materiale invertito (nel nostro caso *ABSplus P430*) che funge da supporto e rende possibili stampe di questo tipo. La separazione del solo mandrino dagli eventuali supporti costruiti e dalla tavoletta di stampa, su cui viene sempre creata una piccola struttura in materiale invertito, è favorita, oltre che dall'incompatibilità di legarsi definitivamente dei due materiali, anche dai vuoti lasciati nel progetto della struttura di rinforzo, che viene costruita utilizzando meno materiale possibile sia per evitare consumi eccessivi sia per permettere appunto una separazione ottimale.

---

<sup>2</sup> *Aspect Ratio*, letteralmente *rapporto d'aspetto*, indica il rapporto fra le due dimensioni principali di una figura.



Figura 5.1: tavoletta di stampa con mandrini in SR-30 prodotti.

### 5.3 Regolazione esperimento

Ottenuti i mandrini in SR-30, si è passati alla fase di laminazione. I provini sono stati ricoperti con un materiale plastico (di colore azzurro) che ha la funzione di evitare che la resina dei fogli di composito penetri nei pori del materiale solubile alterando la composizione e facendolo aderire alla fibra di carbonio. Su questo strato separatore viene poi posato il *layer* di composito cercando di farlo aderire completamente senza creare pieghe o sovrapposizioni in alcuni punti che renderebbero non omogeneo lo strato. La resina del *pre-preg* favorisce il fissaggio di tutto il foglio di materiale; successivamente è stato ricoperto il tutto ancora con il materiale separatore. Viene poi fissato un ulteriore strato, il *breather material*, che favorisce la fuoriuscita dell'aria durante la formazione del vuoto, evitando la formazione di bolle tra i vari strati e in prossimità del pezzo. Come già anticipato si inserisce il tutto all'interno del sacco a vuoto e si rimuove l'aria attraverso una valvola montata sul sacco. In questa fase si tenta di avere una distribuzione della pressione quanto più uniforme possibile su tutta la superficie per favorire l'adesione dei vari strati uno sull'altro. Una volta rimossa l'aria, il pezzo all'interno del sacco è pronto per il ciclo di cura in autoclave.

Basandosi sull'elaborato [18] e sulla documentazione tecnica del materiale fornita da Stratasys [12], sono stati scelti i parametri del test in autoclave. La scheda tecnica indica un punto di infiammabilità di 350 °C circa, al di sopra delle temperature raggiunte in autoclave, e pressioni limite di 5.5 bar. La temperatura di transizione vetrosa si aggira intorno a 180-190 °C, mentre non ha una vera e propria temperatura di fusione, essendo un termoplastico amorfo. Tuttavia, inizia ad ammorbidirsi e a degradarsi oltre la sua temperatura di transizione vetrosa. Si è perciò optato per eseguire i test ad una temperatura di 90°C e pressione di 2.5 bar per una durata di 240 minuti. L'approccio adottato si è basato sull'obiettivo di eseguire un test in condizioni di sicurezza, evitando di avvicinarsi ai limiti operativi del processo. Questa strategia è stata scelta per garantire l'ottenimento di un risultato

positivo, che potesse poi essere analizzato in dettaglio al fine di valutarne le implicazioni e identificare eventuali margini di ottimizzazione del processo.

Una volta completato il ciclo di cura, i provini laminati passano alla fase finale: la dissoluzione del mandrino solubile. Questo processo prevede l'immersione dei provini in una soluzione basica, all'interno di una lavatrice apposita, la *Support Cleaning Apparatus 1200HT* prodotta da *Stratasys*, dove vengono sottoposti a un ciclo di lavaggio mirato. Al termine di questa operazione, si ottiene esclusivamente il componente in fibra di carbonio privo del mandrino. La dissoluzione dei mandrini ha richiesto due cicli di lavaggio, ciascuno della durata di nove ore.



*Figura 5.2: stampante Fortus 250mc.*

## ***5.4 Film separatore***

Durante il ciclo sperimentale compiuto, in particolare durante la fase di dissoluzione del mandrino, si è notato che, al termine del lavaggio, soprattutto nel provino a doppio cilindro, il film separatore azzurro di origine plastica tendeva in alcuni punti a rimanere attaccato, quasi incollato al componente in composito ottenuto come risultato del processo produttivo. Questo fenomeno di adesione residua durante la dissoluzione può dipendere da diversi fattori tecnici. Una delle cause potrebbe essere la compatibilità chimica e termica tra il film separatore e i materiali coinvolti nel processo di laminazione. Ad esempio, un'esposizione prolungata alla soluzione basica o al calore potrebbe alterare le proprietà del film, aumentando la tendenza a aderire al composito.

Un secondo possibile motivo potrebbe risiedere nella scorretta applicazione del film. Se quest'ultimo non viene posizionato in maniera uniforme o se si creano bolle d'aria tra esso e il *core*, possono verificarsi aree in cui il distacco risulta più difficile. L'aver trovato questo fenomeno nel provino con geometria più complicata, con raggi di curvatura piccoli, e quindi difficili da ricoprire uniformemente senza formare pieghe supporta questa teoria; infatti, un operatore poco esperto con bassa manualità unito ad una geometria non semplice da rendere uniforme con il film rende questa seconda ipotesi molto plausibile.

Per risolvere questa problematica, è possibile considerare alternative come l'uso di cere distaccanti o liquidi separatori. Questi prendono il nome generico di distaccanti e sono sostanze applicate alle superfici per evitare l'adesione indesiderata di altri materiali durante i processi di produzione.

Le cere sono state il primo agente distaccante sviluppato, disponibili in forma liquida o di pasta, sia in varianti naturali o sintetiche. Solitamente vengono applicate a mano, ma possono essere anche spruzzate su utensili o stampi. Dopo l'applicazione, la cera viene lasciata asciugare all'aria e poi lucidata per creare una barriera lucida. Può essere facilmente rimossa con un prodotto sgrassante ed è compatibile con resine in poliestere ed epossidiche. Tra i prodotti più comuni si trova la *Meguiar's Mirror Glaze* che fornisce una pellicola protettiva con un'elevata lucentezza e permette più cicli di distacco senza dover riapplicare il prodotto. Resiste a temperature fino a 121°C. Un altro prodotto di ampio utilizzo, e di alta qualità, è la *Honey Wax*: una cera di alta qualità a base di cera di carnauba, che garantisce maggiore durata e resistenza all'abrasione. Crea una superficie robusta adatta per utilizzi multipli. Inoltre, cere di quest'ultimo tipo, a base organica, sono generalmente inerti e non reagiscono con la soluzione basica utilizzata per la dissoluzione del mandrino. Potrebbero però avere conseguenze sull'efficienza della soluzione [21].

Una seconda alternativa sono gli agenti distaccanti a base di PVA (alcool polivinilico) che possono essere spruzzati o applicati con un panno su superfici diverse e offrono una barriera affidabile per compositi a matrice epossidica. L'agente PVA lascia una texture che deve essere lucidata, rendendolo utile in situazioni dove il rischio di adesione è maggiore. Gli agenti PVA sono spesso colorati di blu per identificare chiaramente le aree già trattate. È importante pulire accuratamente lo stampo prima di ogni applicazione, utilizzando semplicemente acqua e un panno privo di lanugine.

Gli agenti chimici offrono una finitura ad alta lucentezza e una bassa accumulazione residua, rendendoli una scelta popolare come distaccanti semi-permanenti. Questi agenti funzionano con resine in poliestere, epossidiche e vinilestere e possono essere utilizzati su superfici di lavoro standard, anche a temperature elevate. Si applicano a mano con un panno privo di lanugine e offrono numerosi cicli di distacco prima che sia necessario riapplicare il prodotto. Gli agenti chimici semi-permanenti migliorano la produttività e la qualità delle superfici, riducendo la frequenza di applicazione e la necessità di spazio di archiviazione. Sono disponibili in varianti a base d'acqua, a base di solventi, con o senza silicone, per adattarsi a diverse esigenze operative.

Oltre ad un utilizzo di queste alternative al film plastico una serie di ottimizzazioni del processo potrebbe includere una verifica preliminare della compatibilità tra i materiali e un'accurata distribuzione del distaccante, oltre a un monitoraggio più preciso dei tempi e delle condizioni del ciclo di dissoluzione. Tali misure consentirebbero di evitare problemi futuri e di garantire un risultato più pulito e uniforme.



Figura 5.3: dall'alto: film separatore in azzurro, materiale per il sacco a vuoto in verde, breather material in bianco. Dietro: secondo materiale per sacco a vuoto rosa.

## 5.5 Finitura Superficiale

Dai componenti finiti ottenuti successivamente alla dissoluzione del mandrino è stato possibile effettuare valutazioni sul grado di finitura superficiale ottenuta durante il processo. La qualità di questa caratteristica, nei componenti in composito prodotti con mandrini solubili, è un aspetto fondamentale che influenza la qualità e l'estetica del pezzo finito. Durante l'analisi, su tutti i componenti prodotti, si è riscontrato che la superficie interna, a contatto con il mandrino, risulta generalmente più uniforme e liscia rispetto alla superficie esterna, che può presentare pieghe o ondulazioni più o meno marcate a seconda della geometria considerata. Questo fenomeno può essere attribuito a una serie di fattori correlati sia ai materiali che ai parametri di processo utilizzati.

La superficie interna riflette direttamente le caratteristiche del mandrino solubile. Se il mandrino presenta irregolarità o una finitura rugosa, questi difetti si trasferiscono al composito. Inoltre, la qualità del distaccante applicato al mandrino gioca un ruolo cruciale. L'utilizzo di un separatore plastico non ha portato a deficit importanti di finitura mentre l'utilizzo di cere, come la *Honey Wax*, o di agenti polivinilalcolici (PVA), potrebbe garantire un'efficace separazione, ma un'applicazione non uniforme potrebbe compromettere la qualità della superficie interna. La scelta del distaccante deve tenere conto sempre della compatibilità chimica con il mandrino e della resistenza termica durante il ciclo di cura.

La superficie esterna, esposta all'ambiente del sacco a vuoto, è invece influenzata da variabili come lo spessore e la distribuzione del materiale *breather*, nonché dalla qualità del film separatore. Un materiale *breather* troppo spesso o mal posizionato può causare una pressione disomogenea, generando pieghe nel laminato. Il film separatore plastico, se non perfettamente aderente o se soggetto a pieghe durante il processo, lascia segni visibili sulla superficie del composito. La scelta di materiali

più rigidi o di film trattati per ridurre la deformazione durante la cura potrebbe mitigare questi problemi.



*Figura 5.4: sacco a vuoto ultimato con pieghe superficiali visibili.*

Confrontando questo metodo con la tecnica tradizionale dello stampo rigido, emergono differenze significative. Lo stampo rigido offre una finitura esterna superiore, replicando fedelmente la superficie dello stampo, ma comporta costi più elevati (per piccoli volumi di produzione) e una minore flessibilità geometrica. Al contrario, l'approccio con mandrino solubile permette di ottenere geometrie complesse con cavità interne, semplificando la rimozione del mandrino e riducendo i tempi post-laminazione.

Per migliorare la qualità complessiva dei componenti realizzati con mandrini solubili, è necessario ottimizzare sia i materiali che i parametri di processo. Trattamenti specifici per migliorare la finitura del mandrino e una gestione più accurata del sacco a vuoto potrebbero ridurre significativamente i difetti. Un accorgimento che si propone per i provini laminati è quello di utilizzare, tra il separatore e la fibra di carbonio, una guaina termorestringente. Lo scopo è quello di evitare che nella fase di compressione gli strati di separatore/carbonio slittino tra di loro e vadano a creare pieghe indesiderate sulla fibra. Inoltre, per applicazioni in cui la qualità della superficie esterna è critica, si potrebbe adottare un approccio ibrido, utilizzando un cuore solubile per l'interno e uno stampo rigido per l'esterno.

La finitura superficiale rappresenta un aspetto importante nella progettazione di componenti in composito, influenzando sia la funzionalità che l'estetica del pezzo. Un'analisi approfondita delle esigenze tecniche legate all'applicazione specifica permette di ottimizzare il processo produttivo, evitando lavorazioni superflue e riducendo i costi. Nella maggior parte dei casi, la destinazione d'uso del componente determina quale superficie richieda una qualità superiore: ad esempio, per un profilo esposto a un flusso d'aria, sarà fondamentale ottenere una finitura impeccabile sulla superficie esterna, mentre per un condotto interno, dove scorre un fluido, la priorità sarà data alla finitura della superficie interna. Solo in rari casi viene richiesta una qualità elevata su entrambe le superfici.

Nel caso in cui sia necessario migliorare la finitura superficiale dopo la dissoluzione del mandrino, è possibile intervenire con tecniche di lavorazione mirate. Per correggere imperfezioni o irregolarità, si può iniziare con una sgrezzatura utilizzando materiali abrasivi adatti, garantendo una preparazione uniforme della superficie. In applicazioni specifiche, come nelle zone destinate al fissaggio con altri componenti, è utile adottare la mascheratura per proteggere le aree non interessate dalla lavorazione.

Quando l'obiettivo è migliorare l'estetica del pezzo, si ricorre spesso a un processo combinato che include l'uso di abrasivi fini seguito dalla deposizione di lucidanti, i quali esaltano la trama delle fibre di carbonio, donando al componente un aspetto professionale e rifinito. Questa fase può essere ulteriormente perfezionata attraverso tecniche di lucidatura meccanica o l'applicazione di strati protettivi trasparenti, che non solo valorizzano la superficie ma ne migliorano anche la resistenza a usura e agenti esterni.



Figura 5.5: primo e secondo strato di film separatore.

## 5.6 Tempi di dissoluzione mandrini

Gli esperimenti condotti in laboratorio, una volta terminato il ciclo di cura in autoclave, e passati alla fase di dissoluzione dei mandrini, hanno mostrato tempi eccessivamente lunghi se confrontati a quelli delle precedenti fasi descritte. Facendo riferimento al provino doppio cilindrico (quello più caratteristico per utilità della geometria nel comprendere i vantaggi della tecnologia) si è riscontrato che per far avvenire una completa dissoluzione del supporto in *SR-30* si è dovuti procedere con due lavaggi da 9 ore ciascuno. La lunghezza di questa fase suggerisce possibili criticità nel processo. Il principale fattore che influenza questo dilatamento del tempo può essere attribuito alla rapida saturazione della soluzione basica all'interno della lavatrice *Support Cleaning Apparatus 1200HT*.

Il liquido comunemente utilizzato per dissolvere l'*SR-30* è una soluzione diluita di idrossido di sodio (NaOH). Questa soluzione viene solitamente riscaldata a circa 70-80°C per favorire una dissoluzione efficace del materiale, garantendo al contempo condizioni operative sicure. L'*SR-30*, durante la dissoluzione, rilascia sottoprodotti che, accumulandosi nel liquido, ne riducono progressivamente

l'efficacia. Il rapporto tra il volume del liquido e il materiale da dissolvere è un parametro critico, e una quantità insufficiente di soluzione comporta un rallentamento del processo. In presenza quindi di grandi volumi di materiale o di geometrie complesse si richiede un maggiore tempo di immersione. La capacità di solubilità della soluzione si riduce progressivamente man mano che i residui polimerici si accumulano, rendendo necessaria una sostituzione parziale o completa del liquido. Inoltre, il ciclo di cura in autoclave può influenzare negativamente la risposta dissolutiva del materiale. Durante la polimerizzazione, le proprietà superficiali dell'*SR-30* possono alterarsi, portando a una maggiore resistenza alla dissoluzione. Le alte temperature e pressioni dell'autoclave possono alterare la struttura del materiale, creando una superficie più densa o reticolazioni parziali che riducono la reattività del mandrino alla soluzione alcalina. Questo comportamento è coerente con i risultati di studi su polimeri simili, che evidenziano come i cicli termici possano modificare le proprietà di solubilità.[22]

Un'altra variabile significativa riguarda l'agitazione della soluzione all'interno della lavatrice. Un flusso non uniforme o aree di stagnazione del liquido possono rallentare il processo, soprattutto in geometrie che presentano cavità o angoli difficili da raggiungere.

Anche le caratteristiche dei provini, come lo spessore elevato o geometrie complesse, possono incidere negativamente sulla dissoluzione. Le zone interne del mandrino, meno accessibili, tendono a dissolversi più lentamente, prolungando i tempi complessivi del ciclo. Tuttavia, è possibile lavare più componenti contemporaneamente in un unico ciclo ed il processo avviene in maniera completamente automatica. Questo permette un'ottimizzazione dei tempi complessivi di produzione.

La scelta della soluzione basica e il controllo dei parametri operativi sono fondamentali per migliorare l'efficacia del processo. Il pH e la temperatura della soluzione devono essere mantenuti a livelli ottimali, poiché una diminuzione di questi fattori riduce la velocità delle reazioni chimiche necessarie per la dissoluzione. In alternativa, l'adozione di liquidi più performanti, con concentrazioni di NaOH ottimizzate o additivi specifici, potrebbe ridurre il numero di cicli necessari. Infine, l'ottimizzazione del design del mandrino, con una riduzione degli spessori o della densità di stampa e una semplificazione delle geometrie, può contribuire significativamente a migliorare la rapidità di dissoluzione. Si è quindi alla ricerca di un compromesso: tentare di eliminare più materiale in eccesso possibile senza andar a compromettere le caratteristiche strutturali e di resistenza del provino [20].

Stratasys fornisce delle pastiglie chiamate EcoWorks progettate apposta per la dissoluzione di materiale come l'*SR-30* prodotto sempre da essa. Devono essere sciolte in acqua e favoriscono la rimozione del supporto; un sovradosaggio di queste pastiglie porta effetti limitati o nulli perché la chimica della soluzione è già massimizzata con la dose consigliata e al contrario aumenta gli sprechi, i costi e favorisce la creazione di residui di pastiglia non dissolta. Infatti, l'ottimizzazione dei tempi dei tempi dipende solamente dalla temperatura e la circolazione del liquido, il monitoraggio della saturazione e la sostituzione regolare della soluzione e dall'ottimizzazione dei provini. La sostituzione del liquido deve avvenire in base al volume e alla complessità dei mandrini trattati, oltre che alla concentrazione massima di residui polimerici che la soluzione può contenere senza perdere efficacia. L'ottimizzazione del processo non solo migliorerebbe l'efficienza produttiva, ma garantirebbe anche una migliore qualità dei componenti finali in composito [23,24].



Figura 5.6: la Support Cleaning Apparatus 1200HT.

## 5.7 Fattibilità e spazio di stampa

La fase di valutazione della fattibilità tra l'utilizzo di cuori solubili e il metodo tradizionale a stampo si articola in un'analisi attenta della geometria e delle dimensioni del componente, seguita da una comparazione dei metodi e, se necessario, da prove preliminari.

Si parte con un'analisi preliminare della geometria, durante la quale vengono identificate le caratteristiche chiave del componente, come curvature o cavità interne eccessi di materiale in sezioni centrali. In questa fase, si considera anche il livello di simmetria del componente, poiché i corpi di rivoluzione si prestano meglio all'utilizzo di cuori solubili, mentre le superfici ampie e piane possono suggerire l'impiego di uno stampo rigido. Ovviamente deve essere effettuato anche un confronto dimensionale tra mandrino e camera di stampa per garantire che il modello sia realizzabile.

Successivamente, si passa a un confronto diretto tra i due metodi. Per geometrie particolarmente complesse che includono cavità interne difficilmente accessibili, i cuori solubili rappresentano una soluzione più pratica e innovativa, in grado di semplificare il processo di rimozione del materiale interno. Tuttavia, nel caso di superfici piane, ampie o regolari, il metodo tradizionale a stampo si rivela spesso più vantaggioso, garantendo una maggiore efficienza in termini di costi e una qualità estetica superiore. Inoltre, il limite dimensionale imposto dalla stampante *Fortus 250mc* rimane un fattore determinante: per componenti di grandi dimensioni, la necessità di suddividere il core in più sezioni può aumentare la complessità del processo e il rischio di difetti.

La stampante *Fortus 250mc* dispone di una camera di stampa con un volume massimo pari a 254 x 254 x 305 mm. Tale dimensione, pur sufficiente per molte applicazioni industriali, pone vincoli significativi nella produzione di provini o componenti di grandi dimensioni, soprattutto se complessi o di forma irregolare. Stratasys propone, nel suo catalogo, anche stampanti di dimensioni maggiori, come la *Fortus 450mc* che offre un volume di costruzione di 406 x 355 x 406 mm e la *Fortus 900mc* con dimensioni volumetriche della camera pari a 914 x 610 x 914 mm. Queste versioni di macchine con dimensioni maggiori, in grado anch'esse di stampare in *SR-30*, rendono meno stringenti i limiti sulle dimensioni. Le basi di stampa, che fungono da base su cui vengono costruiti i cuori solubili,

hanno dimensioni standardizzate di 254 x 254 mm, corrispondenti alla larghezza e alla profondità massima della camera della *Fortus 250mc*. Tuttavia, lo spazio effettivo disponibile può essere ridotto a causa della necessità di lasciare margini di sicurezza per il movimento della testina di stampa e per garantire una buona adesione dei pezzi alla tavoletta. I provini cilindrici e doppio-cilindrici prodotti sono di dimensioni comprese tra i 100 e 200 mm di lunghezza e tra i 40 e 60 mm di diametro, quindi compatibili con la camera di stampa e le basi [12].

Questi limiti dimensionali si traducono in difficoltà operative specifiche: la realizzazione di componenti di grandi dimensioni richiede spesso la suddivisione del core in più parti, che devono poi essere assemblate. Questo approccio introduce complessità aggiuntive, come la necessità di giunti di collegamento e potenziali imperfezioni nel processo di laminazione a causa delle discontinuità tra le sezioni unite.

## ***5.8 Limiti strutturali e di temperatura***

Due limiti fondamentali dell'*SR-30* nella produzione di cuori solubili sono la pressione e la temperatura a cui l'anima plastica può essere sottoposta durante i cicli di cura in autoclave. In questa sezione verrà descritta brevemente la problematica, non essendo oggetto di studio di questa tesi lo studio dei limiti termici e di pressione. Per uno studio più approfondito di questi parametri, si rimanda agli elaborati di tesi citati qui di seguito [18-20]. Attualmente altre campagne sperimentali stanno approfondendo lo studio dei limiti termici e di pressione. In particolare, in [18], si è individuato un limite di pressione, per i provini con densità "*Sparse High Density*", di 4 bar tenendo la temperatura costante a 90°C, avendo dalla documentazione un range di utilizzo ottimale compreso tra 70°C-105°C. In [20] è stata analizzata l'integrazione di anime rinforzate composte da *ABS* e *SR-30*, sono stati definiti in [19] gli accoppiamenti pressione-temperatura sotto i limiti identificati in [18].

Con i dati noti dalla letteratura e citati precedentemente è possibile effettuare un confronto tra materiale *SR-30* e stampi in lega di alluminio, in cui emergono differenze significative. Gli stampi in alluminio, noti per una gamma di temperature operativa superiore (tra i 200 e i 400 gradi), gestiscono pressioni più elevate grazie alla loro maggiore resistenza strutturale e stabilità termica. Le pressioni possono superare anche alcune centinaia di bar a differenza dei *core* in *SR-30*. Esistono anche stampi realizzati in materiali come l'acciaio, noti per la loro elevata resistenza meccanica, durata nel tempo e capacità di operare in condizioni estreme di pressione, temperatura e ambienti aggressivi. Tuttavia, per una produzione di bassa-media scala, come quella prevista in questa campagna sperimentale, in cui i valori di pressione e temperatura non sono particolarmente elevati, l'alluminio si rivela una scelta più economica e vantaggiosa. Questo materiale offre infatti leggerezza, una conducibilità termica superiore, e costi di lavorazione più contenuti rispetto all'acciaio. Sebbene quest'ultimo garantisca una maggiore resistenza all'usura e migliori prestazioni in condizioni estreme, le esigenze specifiche di questo contesto sperimentale non giustificano il suo utilizzo, rendendo lo stampo in alluminio la soluzione più pratica ed efficiente. In generale, la pressione e la temperatura di laminazione vengono scelte in base al tipo di resina (termoindurente o termoplastica), al tipo di fibra e alla geometria del componente da produrre. Il controllo preciso della pressione e della temperatura è essenziale per garantire la qualità del composito, evitando difetti come vuoti o bolle d'aria e favorendo la polimerizzazione della resina. L'*SR-30*, nonostante sia possibile migliorarne le caratteristiche attraverso trattamenti termici superficiali, sviluppo di leghe, modifica della composizione chimica, oppure cambiando i parametri di stampa, ha limiti meccanici e termici molto

più severi rispetto ad un metallo, circoscrivendo la sua applicazione a casi d'uso dove la resistenza strutturale non è critica.

## ***5.9 Confronto costi di produzione***

In questa sezione verrà effettuata una stima dei costi di produzione dei due componenti in fibra di carbonio di tipo doppio cilindro, utilizzando due metodi di produzione differente. Si è deciso di condurre questa analisi sul provino con la geometria che meglio rappresenta i vantaggi offerti dalla tecnologia con manifattura additiva. Il primo metodo analizzato sarà la laminazione del componente sul mandrino solubile in *SR-30* dove, in questo caso, verranno considerati tutti i costi legati alla produzione, inclusi quelli per il materiale del mandrino solubile, l'energia consumata dalla stampante, e il costo della fibra di carbonio impiegata per la laminazione, l'energia consumata dalla lavatrice per la dissoluzione del mandrino. Il secondo metodo di produzione analizzato sarà quello tradizionale di laminazione su stampo e controstampo: anche in questo caso verranno analizzati i costi di produzione, tra cui quelli per la realizzazione dello stampo, comprensivo di manodopera, i materiali e le attrezzature necessarie.

### ***5.9.1 Metodo di produzione con mandrino solubile***

In questo sottocapitolo si calcolerà e analizzerà il totale dei costi di produzione del metodo protagonista di questo elaborato di tesi. Nel conteggio verrà considerato il costo dei materiali *SR-30* utilizzato per il mandrino e dell'*ABS* per il supporto alla geometria, il costo dell'elettricità utilizzata per far funzionare la stampante *Fortus* e la lavatrice *Support Cleaning Apparatus 1200HT* e il costo della quantità di fibra di carbonio utilizzata. Per semplicità non sono stati considerati i costi relativi all'utilizzo dell'autoclave, e i costi dei materiali "di contorno" utilizzati, come ad esempio quelli per costruire il sacco a vuoto, perché presenti circa in egual misura in entrambi i metodi e comunque difficilmente valutabili.

In primo luogo, il costo principale riguarda il materiale del mandrino, nello specifico l'*SR-30*. Il provino analizzato ha le dimensioni e la geometria descritte nella sezione 5.2 ovvero lunghezza totale 200 mm, diametro 60 mm nel corpo centrale (100 mm di lunghezza) e 40 mm nelle due sezioni laterali (50 mm di lunghezza), per maggiore chiarezza si fa riferimento alla figura 5.7.

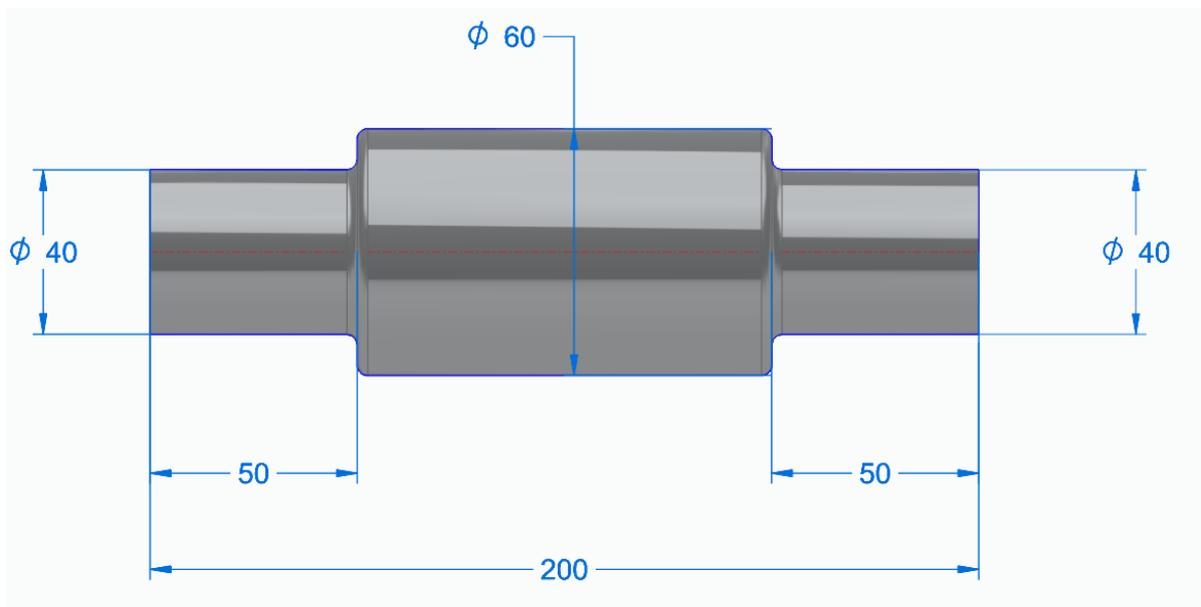


Figura 5.7: geometria doppio cilindrica.

Il volume utilizzato è stato di 276.166 cm<sup>3</sup>; questo dato, calcolato dal software *Insight*, non corrisponde al volume pieno che si avrebbe per un solido di queste dimensioni, ma fa riferimento al volume di cartuccia di materiale utilizzato considerando il riempimento scelto. Considerando il prezzo delle cartucce per stampante, il costo per una cartuccia di *SR-30* da 923 cm<sup>3</sup> varia tra 270 € e 276 €. Per calcolare il costo del materiale per il volume utilizzato, possiamo determinare il costo per centimetro cubo e moltiplicarlo per il volume effettivo del core. Se utilizziamo il prezzo medio di 273 € per la cartuccia, il costo per cm<sup>3</sup> di *SR-30* sarà di circa 0.296 €/cm<sup>3</sup>. Moltiplicando per il volume utilizzato, otteniamo:

$$276.166\text{cm}^3 \times 0.296\text{€/cm}^3 = \mathbf{81.68\text{€}}$$

Il volume di ABS P430 utilizzato per i supporti è di 13.324 cm<sup>3</sup>. Il costo di una cartuccia da 923 cm<sup>3</sup> di ABS varia tra 276 € e 278 €. Considerando il prezzo medio di 277 €, possiamo calcolare il costo per centimetro cubo di ABS come segue:

$$277\text{€}/923\text{cm}^3 = 0.300\text{€/cm}^3$$

Moltiplicando il costo per centimetro cubo per il volume utilizzato di 13.324 cm<sup>3</sup> otteniamo:

$$13.324\text{cm}^3 \times 0.300\text{€/cm}^3 = \mathbf{3.99\text{€}}$$

A questo si aggiunge il costo dell'elettricità necessaria per il funzionamento della stampante *Fortus 250mc*, utilizzata per la fabbricazione del core stesso. Considerando che la stampante ha lavorato per 9 ore e 21 minuti, con un consumo energetico di 1.2 kW (da scheda tecnica), il consumo totale di energia è stato pari a 14.025 kWh. Moltiplicando il consumo per il costo dell'elettricità di 0.135 €/kWh (tariffa media), otteniamo un costo di energia pari a:

$$11.22\text{kWh} \times 0.135\text{€/kWh} = \mathbf{1.51\text{€}}$$

Un ulteriore contributo al costo energetico è dato dall'utilizzo del dispositivo *Support Cleaning Apparatus 1200HT* di Stratasys, impiegato per rimuovere il core solubile dopo la laminazione. Anche in questo caso, il consumo energetico è stato stimato moltiplicando la potenza massima del

riscaldatore, pari a 1.7 kW (da scheda tecnica), per il numero di ore necessarie a completare il processo di dissoluzione. Per un utilizzo di 18 ore (2 lavaggi da 9 ore ciascuno), il consumo totale di energia è stato di 30.6 kWh, con un costo pari a:

$$30.6\text{kWh}\times 0.135\text{€/kWh}=\mathbf{4.13\text{€}}$$

Infine, è stato considerato il costo della fibra di carbonio prepreg utilizzata per laminare il componente. Per calcolare la superficie laminata, consideriamo la geometria descritta in precedenza, segnalando che nelle prove sperimentali sono state laminate solamente circa metà delle due sezioni laterali da 40 mm di diametro: si considererà nel calcolo una lunghezza laminata di 25 mm. Oltre alle superfici laterali delle sezioni cilindriche, si è considerato anche la superficie aggiuntiva generata dal passaggio di diametro tra le sezioni. Questa transizione crea una corona circolare visibile tra la prima e la seconda sezione, e tra la seconda e la terza. Si procede quindi al calcolo: la prima e la terza sezione hanno un diametro di 40 mm, quindi un raggio di 20 mm (ossia 0.02 m), e sono laminate su una lunghezza di 25 mm (ossia 0.025 m). La seconda sezione ha un diametro di 60 mm, quindi un raggio di 30 mm (ossia 0.03 m), ed è laminata interamente per 100 mm (ossia 0.1 m). La superficie laterale di ciascuna sezione è calcolata utilizzando la formula della superficie laterale del cilindro:

$$S=2\cdot\pi\cdot r\cdot h$$

Dove  $r$  è il raggio e  $h$  la lunghezza laminata. Per la prima e la terza sezione, questa formula fornisce una superficie laterale di 0.00314 m<sup>2</sup> ciascuna, che sommate danno 0.00628 m<sup>2</sup>. Per la seconda sezione, la superficie laterale è pari a 0.01885 m<sup>2</sup>.

A queste superfici si aggiungono quelle delle corone circolari che derivano dalla differenza di diametro tra la prima e la seconda sezione e tra la seconda e la terza. La superficie di una corona circolare si calcola come:

$$S_{\text{corona}}=\pi\cdot (r_{\text{esterno}}^2-r_{\text{interno}}^2)$$

Con un raggio esterno di 30 mm (0.03 m) e un raggio interno di 20 mm (0.02 m), ciascuna corona ha una superficie pari a 0.00157 m<sup>2</sup>. Poiché vi sono due corone, la superficie totale aggiuntiva è 0.00314 m<sup>2</sup>.

Sommando tutte le superfici, otteniamo la superficie totale laminata:

- Superficie laterale della prima e terza sezione: 0.00628 m<sup>2</sup>
- Superficie laterale della seconda sezione: 0.01885 m<sup>2</sup>
- Superficie delle corone circolari: 0.00314 m<sup>2</sup>

La superficie totale risulta quindi:

$$S_{\text{totale}}=0.00628+0.01885+0.00314=0.02827\text{ m}^2$$

Convertendo in centimetri quadrati, otteniamo 282.7 cm<sup>2</sup>. Si considera un costo al metro quadrato di circa 50€ per una tipologia di fibra come quella utilizzata nelle prove sperimentali con una grammatura di 450g/m<sup>2</sup>. Per ottenere il costo del materiale necessario, moltiplichiamo la superficie laminata (in metri quadrati) per il costo al metro quadrato:

$$\text{Costo}=0.02827\text{cm}^2\cdot 50\text{€/m}^2=\mathbf{1.41\text{€}}$$

Sommando tutti questi elementi, ovvero il costo del materiale solubile e dell'ABS, il consumo elettrico delle attrezzature, il costo della fibra prepreg, si ottiene una stima complessiva del costo di produzione del componente. Il totale per la produzione del componente risulta essere:

- Costo del mandrino solubile *SR-30*: 81.68 €
- Costo dell'ABS per i supporti: 3.99 €
- Costo dell'elettricità (stampante e *support cleaning*): 1.51 € + 4.13 € = 5.64 €
- Costo della fibra di carbonio pre-preg: 1.41 €

La somma totale dei costi di produzione per il componente è quindi di **92,72 €**. Questo fornisce una base chiara per valutare la sostenibilità economica della tecnologia con core solubile e confrontarla con metodi di fabbricazione alternativi come quello analizzato nella sezione 5.9.2.

### ***5.9.2 Metodo di produzione tradizionale (stampo e controstampo)***

Per valutare il costo di produzione del componente in fibra di carbonio utilizzando il metodo tradizionale con stampo e controstampo, è stata eseguita una stima economica basata sui principali fattori di costo coinvolti. Non avendo sperimentato direttamente il processo, l'analisi si concentra sui costi principali, escludendo quelli relativi all'uso dell'autoclave e del sacco a vuoto. I costi considerati riguardano principalmente la costruzione dello stampo e il materiale composito impiegato.

Per la realizzazione dello stampo, è stata richiesta una stima dei costi all'azienda O.M.F. (Officina Meccanica Faentina), con sede a Faenza, specializzata nella lavorazione meccanica mediante macchine utensili. È stato fornito il modello 3D del componente, doppio cilindro, e richiesto di valutare sia la fattibilità tecnica che i costi di produzione di uno stampo in lega di alluminio (*7075 Ergal*). La progettazione ha tenuto conto delle tolleranze dimensionali, per compensare lo spessore del *layer* di fibra di carbonio durante il processo di laminazione, e delle tolleranze geometriche, necessarie per garantire un'elevata precisione nel pezzo finale.

La costruzione dello stampo prevede l'utilizzo di un blocco di alluminio grezzo con dimensioni standard di 100x100x250 mm, opportunamente lavorato per ottenere la geometria femmina destinata al laminato. La lavorazione comprende la realizzazione di spine di centraggio e fori filettati passanti, indispensabili per assicurare la precisione geometrica e la chiusura ottimale dello stampo con il controstampo. Il costo totale, comprensivo del materiale grezzo e della lavorazione meccanica, è stato stimato in 550 euro.

In aggiunta, è stato considerato il costo della fibra di carbonio prepreg necessaria per laminare la geometria del componente, stimata in base alla superficie della struttura cilindrica come già calcolato nella sezione 5.9.1. Per il laminato si utilizza la stessa quantità di materiale del metodo con core solubile, con una superficie totale di 282.7 cm<sup>2</sup>. Il prepreg di fibra di carbonio, con un costo di 50 €/m<sup>2</sup>, comporta un costo aggiuntivo di 1.41€, trascurando eventuali scarti.

Sommando i costi della costruzione dello stampo e del materiale composito, il costo complessivo stimato per il metodo tradizionale risulta essere:

$$550\text{€}(\text{stampo})+1.41\text{€}(\text{fibra di carbonio})=\mathbf{551.41\text{€}}$$

Questo metodo richiede comunque l'uso di un sacco a vuoto interno che risulta essenziale per garantire l'adesione del materiale composito alla superficie dello stampo, rimuovere le bolle d'aria e per prevenire il collasso del componente durante il ciclo di cura, assicurando così una corretta forma e qualità del pezzo finito. Come nel metodo precedente, il costo del sacco a vuoto non è stato considerato.

Questa analisi evidenzia l'importanza di considerare attentamente i costi fissi iniziali associati alla fabbricazione dello stampo, che rendono questo metodo competitivo solo per produzioni di medio-alto volume, in cui il costo dello stampo viene ammortizzato su un numero elevato di pezzi. Lo stampo, infatti, non presenta un'usura elevata, almeno per i volumi di pezzi in gioco; quindi, non sarebbe necessaria la produzione di un secondo stampo.

### ***5.10 Considerazioni e sviluppi futuri***

Nel confronto tra i due metodi di produzione, quello con cuore solubile si è rivelato significativamente meno costoso per un singolo pezzo, con un costo totale di 92.72 €, rispetto al metodo tradizionale con stampo e controstampo, che ha comportato un costo di 551.41 € per il primo pezzo. Tuttavia, questa differenza iniziale non riflette appieno le dinamiche economiche legate alla produzione di un maggior numero di componenti. Nel caso del metodo tradizionale, il costo elevato dello stampo è legato principalmente al suo sviluppo iniziale, ma esso può essere ammortizzato su più pezzi. Al contrario, il cuore solubile non è recuperabile poiché si dissolve durante il processo, rendendo i costi proporzionali al numero di pezzi prodotti. Si sottolinea che su un volume di produzione superiore all'unità, nel caso dei cuori solubili, la possibilità di dissolvere più mandrini contemporaneamente, farebbe diminuire leggermente i costi, rispetto al caso singolo considerato. Inoltre, sempre nel metodo di produzione con mandrino solubile (sezione 5.9.1), non è stato considerato il costo del personale, di difficile quantificazione nel contesto universitario, cosa che invece è stata inserita nel preventivo dello stampo fornito dall'azienda O.M.F.

Si è riusciti, importando i dati e le funzioni dei costi a trovare il punto di pareggio dove un metodo equivale all'altro; resta che lo studio eseguito è stato oggetto di alcune ipotesi semplificative. Dalla figura 5.8 si nota che il punto di intersezione fra le due curve (in rosso la funzione che rappresenta il costo del metodo con core solubile ed in blu quella con stampo e controstampo) si trova tra i due e i tre componenti prodotti; questo risultato comporta che per pezzi unici o al massimo in coppia il metodo con core solubile è vantaggioso dal punto di vista economico, per volumi di produzione che vanno da 3 unità in poi il metodo più vantaggioso economicamente risulta essere quello con stampo. È importante considerare che questo risultato è fortemente dipendente dalla geometria doppio-cilindrica studiata: potrebbero esistere componenti con geometrie ancor più complesse e troppo complicate per produrre uno stampo, laminare il componente, ed estrarlo dallo stampo. In questi la soluzione di laminazione su core solubile risulterebbe indispensabile e molto efficace.

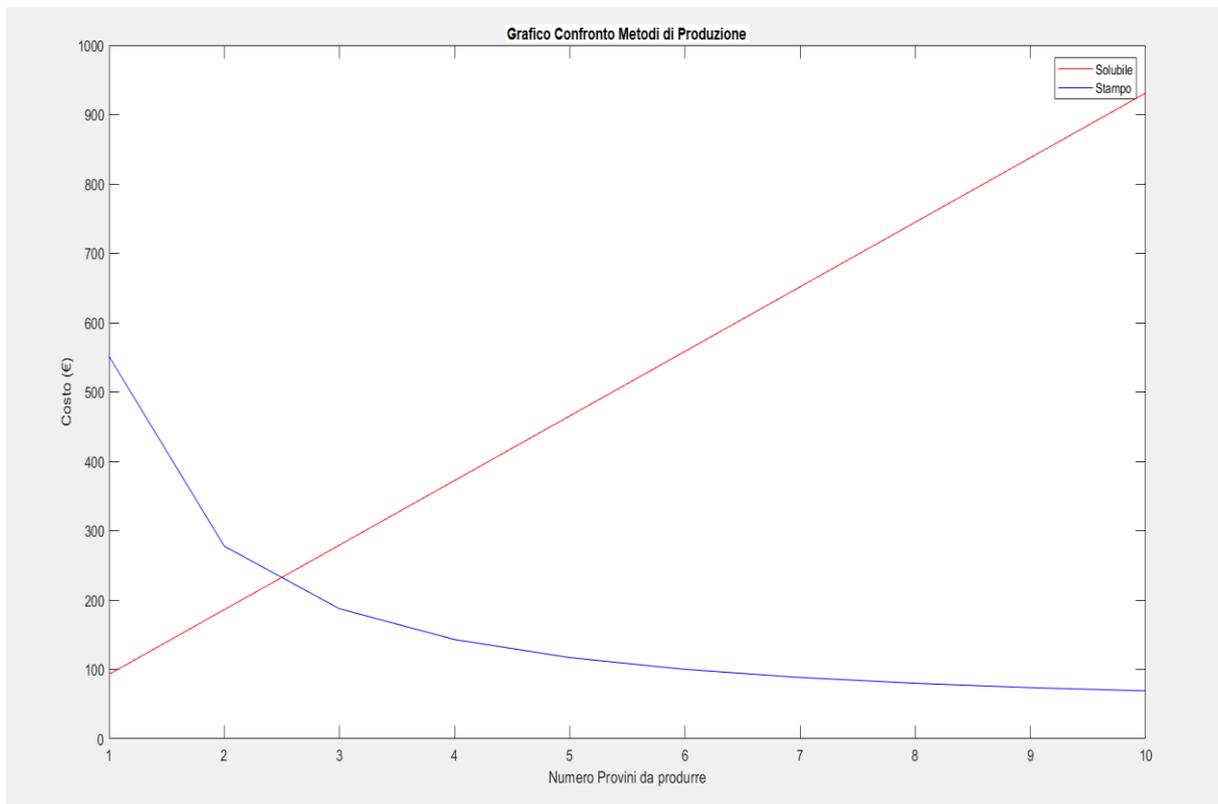


Figura 5.8: Grafico del costo in funzione del numero di componenti.

Oltre al costo, il tempo necessario per la produzione rappresenta un elemento cruciale. Il metodo con cuore solubile richiede 9 ore e 21 minuti di stampa, a cui si aggiungono almeno 5 ore di laminazione e cura in autoclave e 18 ore di dissoluzione. Quest'ultimo dato è particolarmente significativo, poiché il tempo di dissoluzione risulta amplificato dalla probabile saturazione del liquido dissolvente. Al contrario, con il metodo tradizionale con stampo e controstampo, l'azienda ha stimato che il processo di produzione del supporto richiederebbe circa 8 ore, cui vanno aggiunte le 5 ore di laminazione e cura, per un totale sensibilmente inferiore al metodo con mandrino solubile.

Un aspetto interessante da considerare per il metodo con stampo è la possibilità di progettare stampi con più geometrie femmine per aumentare il volume di produzione. Questa soluzione comporterebbe un incremento del costo iniziale dello stampo, ma consentirebbe di ridurre significativamente i tempi di produzione per ciascun componente, rendendo questo metodo molto vantaggioso per produzioni in serie.

Dal punto di vista tecnico, il metodo con stampo richiede una maggiore manualità ed esperienza, poiché la laminazione risulta più complessa: in alcune aree del componente, i *layer* di materiale devono essere sovrapposti e compensati dal *layer* del controstampo per garantire un risultato uniforme. Inoltre, la gestione del sacco a vuoto è più complicata, poiché deve essere posizionato non solo attorno al componente, ma anche all'interno dello stampo stesso. Al contrario, il metodo con cuore solubile è più semplice e accessibile anche per operatori meno esperti, grazie alla facilità di laminazione attorno al mandrino solubile.

Le considerazioni emerse in questa tesi aprono la strada a numerose prospettive di sviluppo futuro, finalizzate all'ottimizzazione della produzione di componenti mediante mandrini solubili in SR-30.

Un primo ambito di studio potrebbe riguardare la stampa di mandrini a densità inferiore, con l'obiettivo di ridurre il consumo di materiale, essendo quello dell'*SR-30* il costo preponderante, e rendere la produzione di un singolo componente più economica. Sarebbe comunque importante mantenere adeguate proprietà meccaniche e strutturali, cercando un equilibrio tra economicità e applicabilità dei risultati ottenuti.

Un secondo filone di ricerca potrebbe concentrarsi sull'applicazione del processo ottimizzato a una geometria più complessa e rilevante nel settore aeronautico, come un tratto di profilo alare. Questo studio consentirebbe di valutare la fattibilità di stampare forme complesse, caratterizzate da rastremature e angoli tipici di un profilo reale, senza ricorrere a stampi o controstampi convenzionali.

In particolare, sarebbe interessante analizzare la qualità della finitura superficiale ottenibile, con un focus specifico sulla superficie esterna del profilo alare, essendo questa la parte più critica in quanto esposta al flusso aerodinamico. Questo parametro rappresenta un aspetto cruciale per verificare la validità della tecnologia in applicazioni ad alte prestazioni, dove la qualità superficiale influisce direttamente sull'efficienza e sulle prestazioni aerodinamiche del componente.

Una terza campagna di studio potrebbe trattare la verifica meccanica e strutturale dei componenti in composito ottenuti, approfondendo la qualità del prodotto finale per capire se rispetta i requisiti richiesti nel settore aeronautico. Si potrebbe pensare di incrementare le proprietà meccaniche, aumentando se necessario gli strati di materiale in fase di laminazione, oppure di applicare il processo a componenti reali, al fine di verificare la qualità della produzione su scala industriale e confermare la fattibilità dell'impiego di questi manufatti in applicazioni concrete. Questo approccio permetterebbe di comprendere più a fondo le potenzialità e i limiti della tecnologia, contribuendo a definire le sue applicazioni utili nel settore aeronautico.

# Conclusioni

In questa tesi si era posto come obiettivo l'analisi del processo produttivo di un componente in fibra di carbonio attraverso la tecnologia a mandrino solubile con materiale *SR-30* prodotto da Stratasys. In particolare, è stata condotta un'analisi delle varie fasi, partendo dall'utilizzo della tecnologia additiva per la stampa dei mandrini, passando per la fase di laminazione e infine alla parte di dissoluzione del core, per ricercare un'ottimizzazione del processo, tentando di incrementare la qualità del prodotto finale. Inoltre, è stata effettuata un'analisi dei costi in relazione alla tecnica tradizionale a stampo e controstampo per verificare se e quando questa tecnologia poteva presentare un vantaggio economico.

A tale scopo si sono prodotti una serie di componenti di geometria differente e rilevante per i vantaggi attesi. L'analisi dei vantaggi ne ha fatti emergere tre su tutti: i) l'economicità del materiale *SR-30* rispetto ai suoi simili solubili e rispetto al metodo tradizionale, particolarmente per bassi volumi di produzione, ii) la semplicità nella rimozione del supporto anche da zone non accessibili con utensili, e iii) la flessibilità nella produzione di forme e geometrie complesse partendo da un modello virtuale 3D.

A fronte di questi tre vantaggi decisivi, l'analisi del processo ha portato alla luce alcune criticità, prima su tutte la finitura superficiale non sempre ottimale, i lunghi tempi di dissoluzione, gli svantaggi che porta un materiale separatore di tipo plastico, i limiti termici e meccanici, la fattibilità e lo spazio di stampa. A queste, ove possibile, sono state avanzate ipotesi di ottimizzazione al fine di ridurre i tempi di produzione, i costi e incrementare la qualità del prodotto finito.

Si sono riusciti a stimare i costi di produzione di un componente con geometria complessa che favorisce e presuppone l'utilizzo della tecnologia a cuore solubile. A questa analisi dei costi, sono seguiti dei risultati che dimostrano che, per casi di produzione di componenti unici o in coppia, la tecnologia presenta un vantaggio economico ed è quindi preferibile.

A questo è seguita una valutazione sui tempi di totali di produzione di un componente che ha evidenziato essere vantaggiosa con il metodo tradizionale, a parità di geometria. La tecnologia solubile è fortemente penalizzata dai tempi di dissoluzione che sono risultati essere particolarmente lunghi; si sottolinea che questa fase è ancora molto ottimizzabile, ambendo ad una riduzione del tempo che renderebbe la tecnologia competitiva anche sotto questo aspetto.

I risultati ottenuti gettano un'ottima base da cui partire per studi futuri tra cui la possibilità di applicare tutti quegli accorgimenti menzionati in questa tesi e la possibilità di applicazione del processo a casi reali per valutarne l'utilità e i vantaggi in vari settori, tra cui aeronautico, spaziale, meccanico e sportivo.

# Ringraziamenti

Alla fine di questo elaborato, mi sembra doveroso dedicare uno spazio per ringraziare tutte le persone che, con il loro supporto di ogni tipo, mi hanno aiutato in questo mio percorso universitario. Innanzitutto, un grande ringraziamento alla Prof.ssa Sara Bagassi e al mio correlatore l'Ing. Martino Carlo Moruzzi, sempre disponibili e pronti a guidarmi in ogni fase della realizzazione di questa tesi, fin dalla scelta dell'argomento. Grazie a voi ho accresciuto le mie conoscenze e le mie competenze nel settore, di mio grande interesse, dei materiali compositi e della manifattura additiva. Desidero inoltre ringraziare l'Ing. Paolo Proli che ha guidato me e il gruppo di ricerca durante le fasi sperimentali, dandomi consigli e indicazioni su come laminare al meglio un componente in fibra di carbonio e aiutandoci nell'allestimento dell'autoclave. Un grande ringraziamento va all'azienda Officina Meccanica Faentina per avermi ascoltato e risposto ad ogni quesito che ho posto, dedicandomi tempo e risorse.

In fondo finiscono i ringraziamenti più personali, non me ne vogliono queste persone, so che capiranno. Voglio innanzitutto dire grazie alla mia famiglia, senza la quale tutto questo sarebbe stato impossibile. Grazie per avermi sempre sostenuto, non solo con il supporto morale, ma anche economico. Mi avete sempre guidato nelle scelte migliori e mi avete dato la forza di continuare a spingere sempre più in là verso questo traguardo. Un ringraziamento speciale al mio babbo, che ogni volta che superavo un esame, metteva una X accanto al nome del corso sul suo foglietto: finalmente le hai messe tutte.

Un grazie di cuore va a Nicole. Sei stata sempre al mio fianco, nei momenti difficili e in quelli belli, festeggiando ogni piccola vittoria insieme a me. Grazie per aver sacrificato il tuo tempo interrogandomi o ascoltarmi ripetere cose che a te nemmeno sembravano italiane. Grazie per la pazienza, per avermi sopportato nei momenti di stress, per avermi fatto ridere quando ne avevo più bisogno, e per aver sempre trovato il modo giusto di darmi la spinta quando mi sentivo giù.

Un grazie enorme ai miei amici, che nei momenti di stress sono riusciti a regalarmi un po' di svago e leggerezza. I vostri consigli sono sempre stati preziosi e ogni semplice domanda tipo "com'è andato l'esame?" o "come sta andando la tesi?" mi ha fatto sentire importante, pensato e supportato.

E infine, un grazie anche a chi magari mi sono dimenticato di citare direttamente, ma che in qualche modo ha contribuito a farmi tagliare questo traguardo.

# Bibliografia

- [1] R. M. Jones, *Mechanics of composite materials*, Taylor & Francis Group, 1975.
- [2] Paolo Vannucci. *Materiali compositi per impiego strutturali: Metodi di analisi e di progetto. Doctoral*. Università di Pisa, Italy. 2007.
- [3] Beatrice Pasquini, *Scarti di compositi termoindurenti fibrerinforzati: tecnologie per la valorizzazione delle fibre di carbonio*, Tesi di Laurea Magistrale, Università Politecnica delle Marche, 2018-2019.
- [4] M. J. Marks, H. Q. Pham, *Epoxy Resins*. Wiley Online Library, 2005.
- [5] Michael Baldea, *Industrial & Engineering Chemistry Research*. ACS Publications, 2020.
- [6] G. Losco, L. Brandini, G. Carfagna, *Design per l'abitabilità microgravitazionale*, UNICAM Edizioni, Camerino, 2016.
- [7] Antonio Cosentino, *Compositi e fibre di carbonio: innovazioni in campo aerospaziale*, Tesi di Laurea Magistrale, Università della Calabria, 2017-2018.
- [8] R. Geerts, *Vacuum Bagging Basics*. 2019. <https://www.epoxyworks.com/index.php/vacuum-bagging-basics/>. Data: 15/01/2025.
- [9] Giuseppe Sala, *Capitolo 42: Attrezzi di formatura e materiali di consumo per le tecnologie dei compositi. Tecnologie e Materiali Aerospaziali – Ver. 01*. 2010.
- [10] Gibson, Ian and Rosen, David W. and Stucker, Brent, *Additive Manufacturing Technologies: Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing*, Springer US, 2010.
- [11] J. C. Vasco, *Chapter 16 - additive manufacturing for the automotive industry*, in *Additive Manufacturing* (J. Pou, A. Riveiro, and J. P. Davim, eds.), Handbooks in Advanced Manufacturing, Elsevier, 2021.
- [12] *Stratasys*. <https://www.stratasys.com/it/>. Data:15/01/2025.
- [13] X. Zhang and F. Liou, *Chapter 1 - introduction to additive manufacturing*, in *Additive Manufacturing* (J. Pou, A. Riveiro, and J. P. Davim, eds.), Handbooks in Advanced Manufacturing, Elsevier, 2021.
- [14] G. Cilia, *Produzione stampa 3D: Anime sacrificali con la tecnologia FDM di Stratasys*. Stratasys, 2016.
- [15] F. Gualdo, *Mandrini/core per la lavorazione della fibra di carbonio*. Spring srl, 2020.
- [16] *Unibo Motorsport*. <https://motorsport.unibo.it/>. Data:15/01/2025.
- [17] G. Semprini Cesari, *Materiali compositi: analisi sperimentale per la realizzazione di anime sacrificali mediante tecnologie additive*. Tesi di Laurea Magistrale, Università di Bologna, 2020.
- [18] Simone Borsari, *Materiali compositi: studio di anime solubili realizzate tramite tecnologia additiva*, Tesi di Laurea Triennale, Università di Bologna, 2023-2024.
- [19] Athanasios Siagkas, *Soluble cores for composite manufacturing: process optimization through design of experiment method*, Tesi di Laurea Magistrale, Università di Bologna, 2024-2025

- [20] Giacomo Suffritti, *Studio di cuori solubili rinforzati per la laminazione di strutture in composito*, Tesi di Laurea Triennale, Università di Bologna, 2024-2025
- [21] *Stoner Formulating Excellence*, <https://stonersolutions.com/brands>. Data:15/01/2025.
- [22] Toby A.M. Ferenczi, P. Cicuta, *Shear and Compression Viscoelasticity in Polymer Monolayers*, University of Cambridge, 2005. <https://arxiv.org/abs/cond-mat/0506640> Data:15/01/2025.
- [23] Brown, J. T., *Dissolution Kinetics of Thermoplastic Supports in Alkaline Solutions*. Additive Manufacturing Review, 2019.
- [24] Wang, F., & Zhang, Y., *Optimization of Dissolution Processes for Complex Geometries in Composite Manufacturing*. Composite Materials Science, 2020