

POLITECNICO DI TORINO

Collegio di Ingegneria Chimica e dei Materiali

**Corso di Laurea Magistrale in
Ingegneria dei Materiali**

Tesi di Laurea Magistrale

Lightweight per la micromobilità: un caso di Reverse Engineering



Relatore

Prof. ssa Ada Ferri

Candidato

Mattia Mireni

Dicembre 2019

Sommario

| | |
|--|-----------|
| 1. INTRODUZIONE | 4 |
| 1.1 MICROMOBILITÀ PER IL “FIRST MILE - LAST MILE (FMLM)” | 5 |
| 1.2 COMPOSITI PER IL LIGHTWEIGHT | 7 |
| 2. REVERSE ENGINEERING | 11 |
| 2.1 TECNOLOGIE PER LA PROTOTIPIA | 11 |
| 2.1.1 ADDITIVE MANUFACTURING | 11 |
| 2.1.2 TAVOLE PER MODELLAZIONE | 15 |
| 2.1.3 PROTOTIPAZIONE DA OGGETTO ESISTENTE | 17 |
| 2.2 MATERIALI | 18 |
| 2.2.1 CARBONIO | 18 |
| 2.2.2 TESSUTI | 25 |
| 2.2.3 RESINE EPOSSIDICHE | 28 |
| 2.2.4 CORE ESPANSO | 31 |
| 2.2.5 ONYX | 33 |
| 2.3 PROCESSI | 34 |
| 2.3.1 IMPREGNAZIONE MANUALE | 34 |
| 2.3.2 DRY LAY-UP | 34 |
| 2.3.3 CICLO DI CURA | 35 |
| 3. ANALISI COMPONENTI | 39 |
| 3.1 TAVOLA | 40 |
| 3.2 VANO PORTABATTERIA | 45 |
| 3.3 STRATEGIE DI LAMINAZIONE | 48 |
| 3.3.1 TAVOLA | 48 |
| 3.3.2 VANO PORTABATTERIA | 49 |
| 4. TECNOLOGIE DI REALIZZAZIONE DELLE ATTREZZATURE | 51 |
| 4.1 ATTREZZATURE | 51 |
| 4.1.1 TAVOLA | 51 |
| 4.1.2 VANO PORTABATTERIA | 56 |
| 4.2 PROTOTIPI | 61 |
| 4.2.1 TAVOLA | 61 |
| 4.2.2 PORTABATTERIA | 66 |
| 4.2.3 ASSEMBLAGGIO | 68 |
| 5. CONFRONTO DEI DUE PRODOTTI | 70 |
| 5.1 PESO | 70 |

| | |
|---------------------------|-----------|
| 5.2 PERFORMANCE | 72 |
| 5.3 COSTI | 78 |
| 5.4 PORTABILITÀ | 83 |
| 6. CONCLUSIONI | 84 |
| 7. SVILUPPI FUTURI | 85 |
| 8. FONTI | 86 |
| 9. RINGRAZIAMENTI | 89 |

1. Introduzione

L'idea di progetto di ottimizzazione di un veicolo elettrico per il trasporto individuale si è sviluppata all'interno di una spinta a livello globale, una sperimentazione avviata nel nostro capoluogo (Torino) e una netta crescita del mercato dei *"First Mile - Last Mile Vehicle"*. Analizzando i dati di vendita dell'ultimo triennio si ha un aumento vertiginoso di questi veicoli, la nascita di sistemi per lo sharing di essi nelle maggiori capitali globali e un sempre maggior interesse aziendale in questo settore.

Da possessore di uno di questi mezzi ero a conoscenza delle problematiche e dei vantaggi, e quindi con il tutor aziendale Ing. Flavio Barbieri e con il sostegno della tutor di ateneo Ada Ferri, abbiamo voluto sviluppare questo progetto per provare a risolvere alcune carenze di questo oggetto.

La mobilità dell'ultimo miglio, che va a colmare l'impossibile estrema capillarità del trasporto pubblico, sta prendendo sempre più valore soprattutto con mezzi individuali e a bassa impronta di carbonio. Skateboard elettrici, monopattini elettrici e e-bike stanno aprendo una nuova concezione di mobilità con possibilità di sviluppo economico veramente enormi.

Dopo questa premessa l'altro ingrediente fondamentale è stata la conoscenza e l'esperienza dell'azienda in cui ho avuto la possibilità e il privilegio di svolgere la tesi magistrale: la Sparco Spa, nella sezione compositi sotto la supervisione dell'Ing. Beniamino Bianco Chinto.

La loro vasta conoscenza nello sviluppo di elementi strutturali o di protezione del pilota, in ambito automotive, che avviene attraverso l'utilizzo di vari tipi e configurazioni di materiali compositi mi ha consentito di capire quale ampio margine ci fosse per sviluppare questo progetto.

1.1 Micromobilità per il “First mile - Last mile (FMLM)”

Questo particolare settore, nell’ambito dei trasporti e della mobilità, si occupa della distanza tra la fermata o stazione della rete dei servizi pubblici (treni, pullman, ecc) e la destinazione finale dell’utente. In pratica si occupa del tratto più breve dello spostamento, solitamente non coperto dal trasporto pubblico, e per questo viene chiamata “Last Mile mobility” perché si occupa dei mezzi per coprire distanze sotto il Miglio.



Figura 1.1 Rappresentazione grafica del FMLM [1]

Per questi brevissimi spostamenti si è rivelata molto utile l’utilizzo della tecnologia dei mezzi personali a batteria elettrica, per via della loro facilità di utilizzo, tempi di ricarica relativamente corti e punti di ricarica facilmente raggiungibili (solitamente nelle stesse destinazioni finali come casa, uffici, stabilimenti, ecc).

Il mercato attualmente sta spingendo soprattutto su tre categorie di mezzi di trasporto individuale: skateboard elettrici, monopattini elettrici e le bici elettriche.

Fenomeno già largamente consolidato in Nord America, Giappone e Cina e che sta avanzando dal Nord Europa verso la parte meridionale, anche l’Italia si sta mobilitando per legiferare in tema micromobilità.

Il Comune di Torino è stato uno dei primi, in Italia, a deliberare sulla possibilità di utilizzo di questi dispositivi sulle strade pubbliche, ma con alcune limitazioni:

“Abbiamo inteso aderire a questa possibilità per offrire ai cittadini altre modalità di mobilità alternative e per agevolare il cosiddetto ‘ultimo miglio’ negli spostamenti intermodali – spiega l’assessora Maria Lapietra -. Si tratta di un servizio che si può integrare con quelli già attivi contribuendo così a diminuire l’uso dei mezzi più inquinanti aiutandoci a migliorare l’ambiente e la qualità dell’aria”

Fino ad oggi vietati, monopattini e segway dovranno essere condotti esclusivamente da maggiorenni e minori in possesso della patente AM e potranno viaggiare alla velocità massima di 20 km/h utilizzando il necessario limitatore di velocità. I mezzi dovranno inoltre essere dotati di segnalatori acustici e il motore elettrico che li alimenta non potrà avere una potenza superiore a 500W.” (Torino, 2019) [2]

Questa apertura, anche legislativa, a questo settore potrebbe portare un grosso giovamento per la città stessa: dal punto di vista ambientale, con un aumento dell’utilizzo dei mezzi elettrici e/o i mezzi

pubblici e una sinergia tra essi, di vivibilità della città e una nuova possibilità di investimento e crescita.

Il futuro di questa evoluzione sicuramente si dividerà tra il mezzo di proprietà e il MaaS (mobility as a Service), quindi forme di noleggio prevalentemente attraverso Applicazioni e Internet.

Gli analisti parlano di un mercato di “\$33 miliardi entro il 2026, con un tasso annuo di crescita (CAGR) del 17.26% nei prossimi 4 anni”. [3]

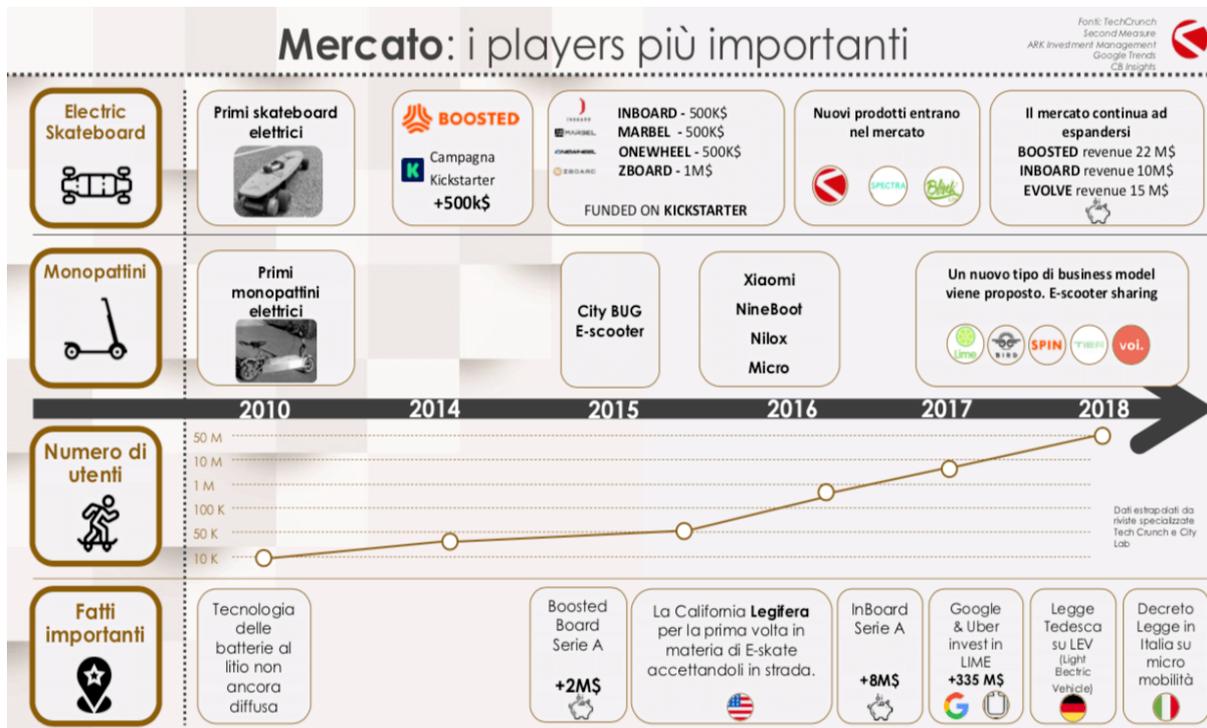


Figura 1.1.2 Prospetto sul mercato dei dispositivi per FMLM [36]

A seguito di questi dati, il progetto da noi intrapreso, ha trovato ulteriore basi sulla sua sostenibilità anche a livello economico oltre che ingegneristico.

Il caso che verrà sviluppato successivamente riguarda proprio la categoria degli skateboard.

Però prenderemo in considerazione una specifica tipologia di esse: i Longboard. Questi si distinguono per una tavola che ha dimensioni tra i 90 e 110 cm e con una sezione abbastanza larga, oltre i 20 cm, per permettere un facile utilizzo e stabilità anche in velocità.

1.2 Compositi per il Lightweight

Analizzando sempre più specificamente questo settore del FMLM con mezzi di trasporto individuali elettrici a batteria, si comprende sempre di più l'importanza del Lightweight sia per questione di rendimento meccanico (meno peso corrisponde o a una maggiore autonomia o a una maggiore velocità) sia per una questione di facilità di utilizzo o trasporto (meno peserà il mezzo più facilmente sarà trasportabile quando non verrà utilizzato, sarà più user friendly).

Attualmente nella maggior parte del mercato consumer di questi mezzi elettrici vengono utilizzati materiali convenzionali, strettamente derivanti dall'oggetto di partenza:

- Gli skateboard elettrici utilizzano tavole in multistrato di legno come le classiche tavole degli skateboard tradizionali
- I monopattini elettrici utilizzano leghe metalliche a basso contenuto tecnologico come i tradizionali corrispettivi a spinta umana,
- Le e-bike molto spesso vengono progettate utilizzando semplici kit di conversione applicati sul modello standard al massimo includendo in progetto un vano batteria.

Questa poca specificità porta ad un utilizzo di materiali solitamente ad un basso rapporto tra modulo elastico e densità (E/ρ) e perciò si hanno dei pesi relativamente alti rispetto a quello che si potrebbe ottenere con l'impiego di materiali e tecnologie più specifiche o avanzate.

Come in tutte le applicazioni che richiedono un elevato E/ρ si può ripiegare nel settore dei materiali compositi, che grazie all'unione delle caratteristiche di matrice e rinforzante, permettono una progettazione mirata al caso studio e un risparmio notevole di materiale utilizzato e peso.

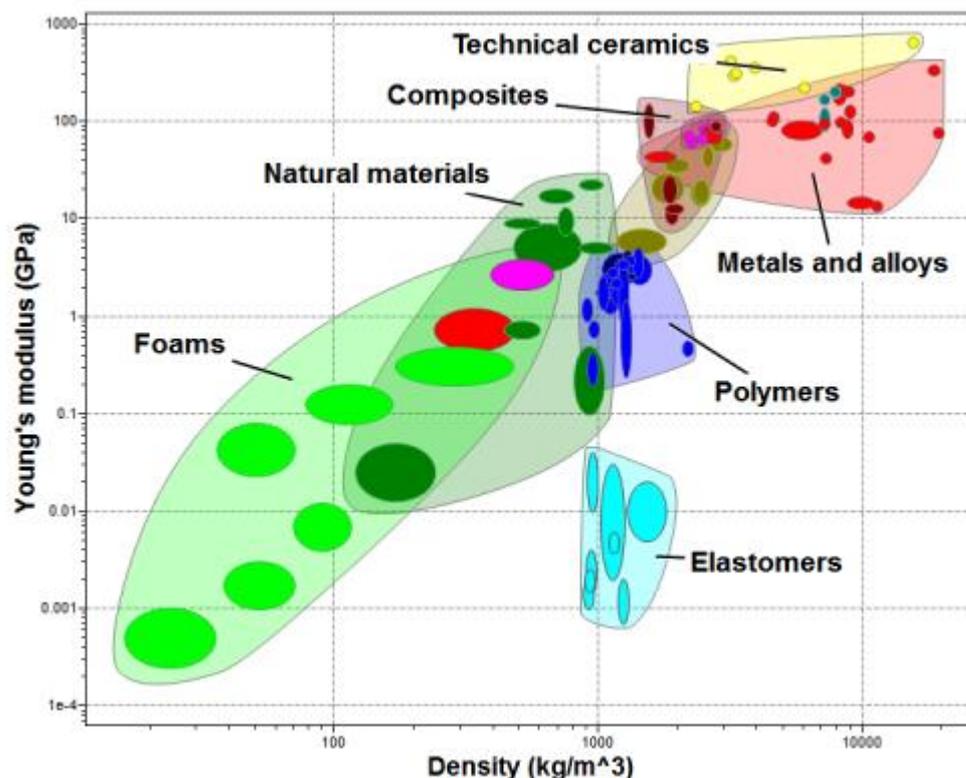


Grafico 1.2.1 Grafico Modulo di Young- Densità Tratto dal software CES Edupack

Questo grafico raggruppa tutte macrofamiglie di materiali utilizzabili per la produzione di beni materiali

Come scrematura iniziale si è utilizzato una condizione di sollecitazione molto simile a quella che avviene in fase di utilizzo della tavola: Un pannello sollecitato a flessione.

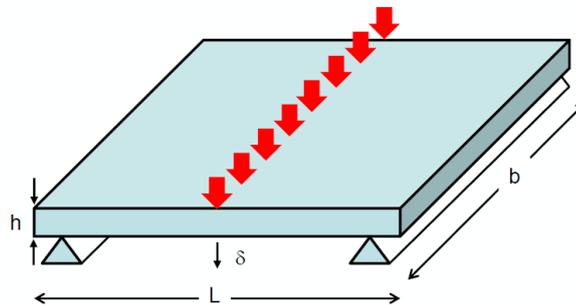


Figura 1.2.1 Rappresentazione sistema a flessione

Un pannello è una lastra piana. Sono definiti la lunghezza L e la larghezza b , ma lo spessore h è a scelta libera. Il pannello è sollecitato a flessione da un carico centrale F .

Il vincolo di rigidità richiede che esso non si fletta più del valore δ sotto il carico F e di nuovo l'obiettivo è di produrre un pannello il più leggero possibile.

La funzione obiettivo per la massa del pannello è:

$$m = AL\rho = bhL\rho$$

Equazione 1.2.1 Equivalenza sulla massa

Dove m = massa, A = area, ρ = densità del materiale.

La sua rigidità a flessione, per la relazione della linea elastica, è:

$$S = \frac{F}{\delta} = \frac{C_1 E J}{L^3}$$

Equazione 1.2.2 Equazione della freccia a flessione

Dove F = forza applicata, δ = flessione, C_1 = costante d'integrazione, E = modulo di Young e J = momento flettente.

Il momento di inerzia, per una sezione rettangolare è:

$$I = \frac{Bh^3}{12}$$

Equazione 1.2.3 Equazione del momento di inerzia di una trave rettangolare

La rigidità S_{min} , la lunghezza L e la profondità b sono definite; solo lo spessore h è una variabile libera.

Si può ridurre la massa riducendo h , ma solo garantendo che il vincolo di rigidità sia soddisfatto.

Dalle precedenti equazioni:

$$m = \left(\frac{12S_{min}}{C_1 b} \right)^{1/3} (bL)^2 \left(\frac{\rho}{E} \right)^{1/3}$$

Equazione 1.2.4 Equazione vincolo di massa

Le quantità S_{\min} , L , b e C_1 sono tutte definite e l'unico grado di libertà è legato alla scelta del materiale. I migliori materiali sono quelli con i valori inferiori. Si inverte l'espressione ricercando in tal modo l'espressione M_p per il pannello:

$$M_p = \frac{E^{1/3}}{\rho}$$

Equazione 1.2.5 Equazione dell'indice di merito

In forma logaritmica la formulazione della retta di selezione dei materiali risulta:

$$\ln M_p = 1/3 \ln E - \ln \rho$$

Equazione 1.2.6 Equazione della retta dell'indice di merito

La cui pendenza è pari a 3.

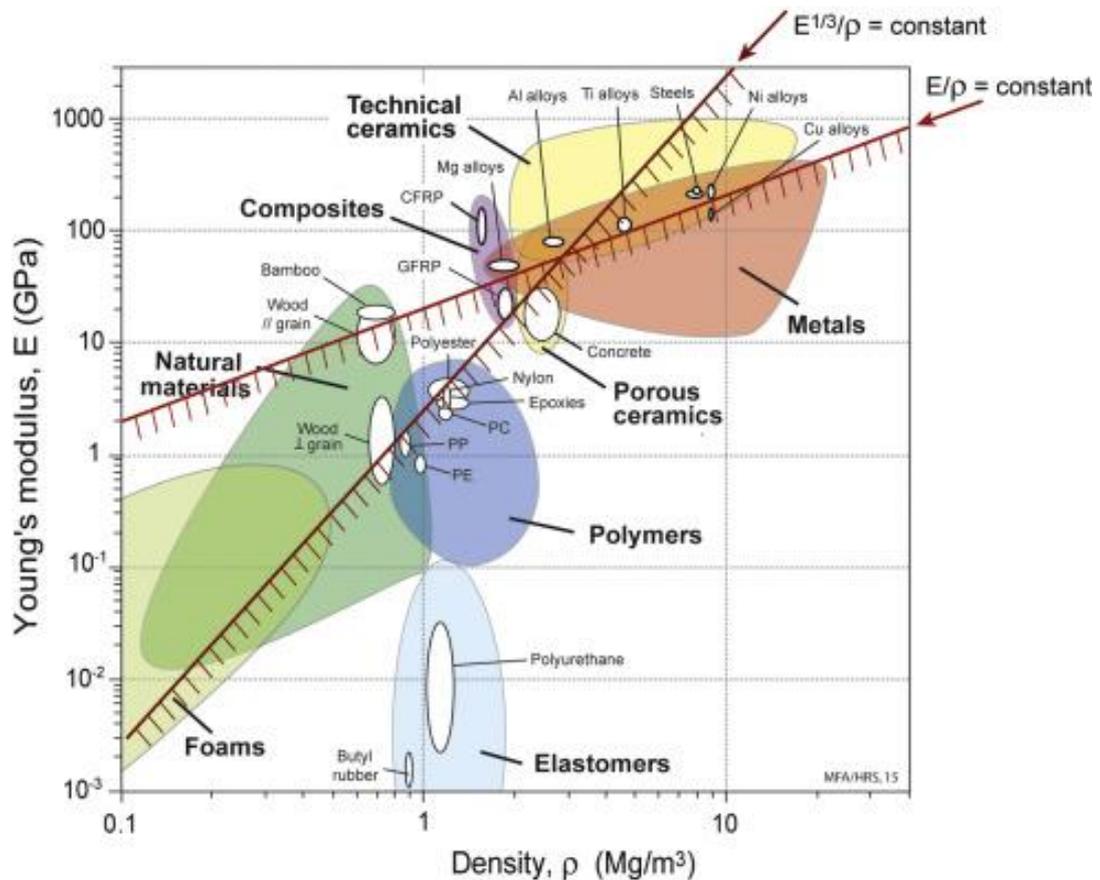


Grafico 1.2.1 Grafico Modulo di Young - Densità con retta di selezione software CES Edupack

Prendendo in considerazione l'immagine precedente e inserendo una retta con tale pendenza, se ad esempio, prendiamo in considerazione i compositi CFRP (compositi avanzati con fibre di carbonio lunghe) si collocano ampiamente al di sopra di gran parte della classe dei materiali metallici, paragonabili solo ad alcuni materiali ceramici che tuttavia possono avere problematiche di sicurezza, per via della natura fragile del materiale, che comporta un eccessivo sovradimensionamento del particolare compromettendo il vantaggio in termini di peso e sezioni.

Negli ultimi decenni l'utilizzo del concetto di Lightweight è stato ampiamente sviluppato, analizzato e impiegato in numerosi settori dal più avanzato (come l'aerospaziale) al più comune (come lo sport), questo ha reso molti tipi di compositi come quelli a base di fibre di Carbonio o Vetro materiali di larga conoscenza anche al di fuori dell'ambito scientifico. Numerosi oggetti di comune utilizzo impiegano

questi materiali per le loro eccezionali proprietà meccaniche e la loro modulabilità delle proprietà, consentendo una elevata personalizzabilità dell'oggetto stesso in base all'utilizzatore, come in ambito sportivo (ad esempio) racchette da tennis, sci e snowboard o in ambito automotive telai, sedili e altre parti strutturali per il vantaggio sul peso e sulla rigidità molto modulabile.

Sfruttando le caratteristiche di questi materiali l'obiettivo del progetto di Reverse Engineering, oggetto della presente tesi di laurea, è ottenere la riduzione minima del 30% per ogni componente riprogettato.

2. Reverse Engineering

Per poter approfondire il successivo capitolo, che sarà incentrato sulla produzione del prototipo, in questo capitolo si analizzeranno le tecnologie utilizzate per poter giungere al risultato finale. Si prenderanno in considerazione diverse tecnologie, anche diverse tra loro, seguendo il filo rosso dello schema di produzione prototipi che viene utilizzato nell'azienda presso la quale il progetto è stato implementato.

Ma con una grossa differenza: il progetto parte da un oggetto già esistente e funzionante sul quale verrà applicato un processo di “Reverse Engineering” per poterlo modificare adattandolo ai materiali accuratamente scelti per la nuova versione del Longboard.

Solitamente il concetto di Reverse Engineering viene applicata nei seguenti casi:

- Se si ottiene la forma dell'oggetto da uno già esistente,
- Da un modello fatto a mano,
- Nel caso di progetti superati o che hanno subito modifiche,
- Nel caso di replica di parti o attrezzatura.

2.1 Tecnologie per la prototipia

In questo paragrafo tratteremo le varie tecnologie che verranno impiegate in tutti gli step del progetto in modo da avere una panoramica globale e avere le basi per legittimare alcune scelte prese successivamente.

In molti casi si parte da un modello 3D realizzato al computer, dal quale si hanno tutti i features di progetto, o in fasi prettamente prototipali si può partire da un oggetto già esistente.

2.1.1 Additive Manufacturing

Tecnologia tra le più avanguardiste, molto utile e versatile soprattutto per particolari con design complessi o non facilmente riproducibili con una classica lavorazione di fresatura da pieno con una macchina a Controllo Numerico.

Per AM (Additive Manufacturing) si intende un vasto campo di tecnologie che si basano sulla stessa idea di partenza: realizzare il modello, disegnato attraverso modellazione CAD, sfruttando la deposizione di materiale lungo un asse strato per strato.

Questa idea può essere applicata, con principi chimico fisici di base differenti, utilizzando diverse classi di materiali: molti polimeri, alcune leghe metalliche e green ceramici vengono realizzati con successo.

Per l'ambito della prototipia rapida sempre più spesso vengono utilizzate stampanti per materiali polimerici che impiegano la tecnologia FDM (Fused Deposition Modeling) per polimeri termoplastici. Questa particolare tecnologia è molto flessibile e permette di creare modelli molto differenti tra loro avendo solo alcune accortezze sui piani in sottosquadro, che devono essere necessariamente forniti di supporti di stampa.

Le stampanti hanno una struttura abbastanza standard con dei componenti fondamentali come il piano di supporto, l'estrusore, Il sistema di controllo e l'alimentazione del materiale.

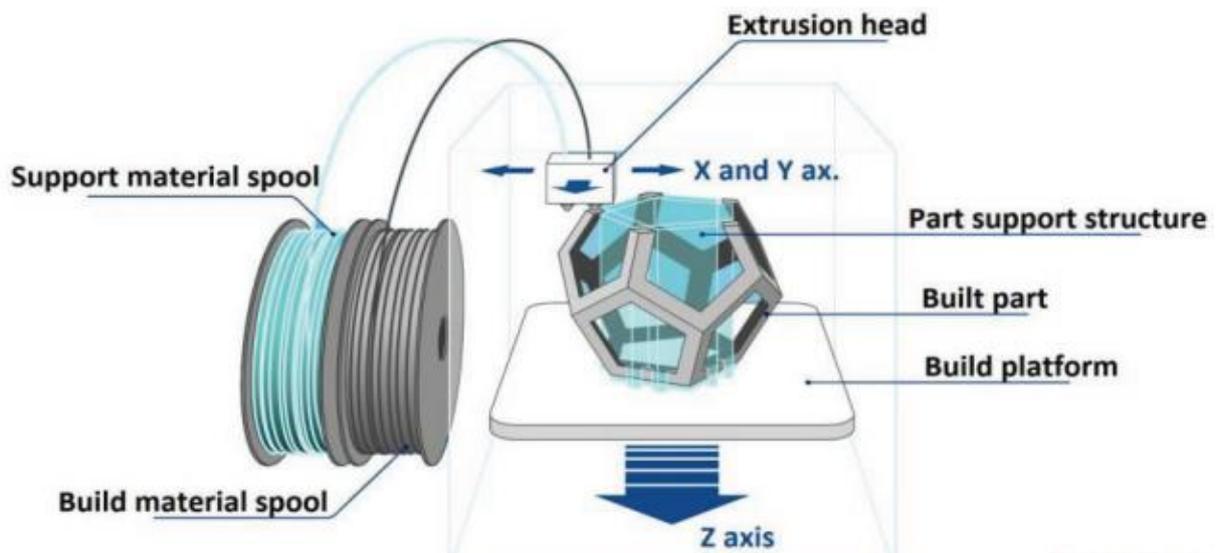


Figura 2.1.1.1 Schema Stampante FDM [22]

Le caratteristiche di questi elementi caratterizzano la qualità e la possibilità di stampare materiali polimerici differenti, partendo dall'estrusore: La temperatura che può raggiungere è la maggiore discriminata di scelta del polimero utilizzabile.

La temperatura è il parametro che governa il rammollimento del materiale, che avviene solamente con una temperatura superiore alla temperatura di transizione vetrosa (T_g) del polimero, e il suo conseguente ritiro dovuto al raffreddamento, che avviene dopo la deposizione. Un eccessivo riscaldamento potrebbe portare alla degradazione del polimero, all'opposto una temperatura troppo bassa non consentirebbe la fuoriuscita del materiale.

Il compromesso è d'obbligo, tenendo in considerazione inoltre la possibilità del riscaldamento del piano di deposizione in modo da consentire un raffreddamento più uniforme post deposizione e un ritiro più controllabile del materiale e più facilmente modellizzabile per poterlo considerare in fase di disegno CAD e di impostazione delle tolleranze. I polimeri, per via della loro bassa conducibilità termica, non consentono un totale rammollimento del filo e quindi si avrà un materiale con comportamento molto differente tra interno filo (solido) e la parte esterna (rammollita) a contatto con l'elemento riscaldante dell'estrusore. Ciò comporta i precedentemente citati problemi di ritiri non uniformi, la formazione di stati tensionali interni al componente dovuti al differente stato del materiale, con creazione di porosità e in ultimo la formazione di bolle all'interno del componente. Queste bolle hanno 3 differenti origini ma tutte hanno effetti abbastanza rilevanti nella riduzione delle proprietà meccaniche.

La prima causa è dovuta al processo fusorio in primis, difficilmente monitorabile a livello di processo industriale di estrusione (al quale si confronta per affinità e similitudine), che comporta la non uniformità della viscosità del fluido in uscita dell'estrusore e ai depositi di possibile formazione in uscita che comportano difetti sul pezzo finale.

La seconda causa è dovuta all'atmosfera esterna che può portare a un intaccamento del materiale: molto presente è l'umidità dell'aria che causa la degradazione delle catene polimeriche in materiali come il PLA e le poliammidi. È possibile realizzare un'ambiente in vuoto o atmosfera protetta ma sarebbe non vantaggioso economicamente visto il target di utilizzo di queste stampanti.

Le due immagini successive sono esplicative di tipologie di difettosità su un pezzo stampato in Onyx, una particolare poliammide rinforzata con fibre corte di carbonio, analizzato nello specifico nel

Capitolo 2.1.2.5, per poterlo utilizzare come inserto per modifica dello stampo da utilizzare in autoclave mantenendo una adeguata tolleranza dimensionale e tenacità per resistere alla pressione.

Queste difettosità sono state causate da una elevata esposizione all'umidità della bobina nonostante il controllo climatico presente nel reparto di Prototipazione rapida.



Figura 2.1.1.2 Lacune di materiale prodotte dalla stampa FDM



Figura 2.1.1.3 Rugosità eccessiva prodotte dalla stampa FDM

La terza causa di difettosità è intrinseca a molti processi di trasformazione dei materiali polimerici: la degradazione delle catene fino al frazionamento in oligomeri volatili che rimangono all'interno del materiale. Questa fase gassosa al raffreddamento crea una pressione interna che tende a infragilire meccanicamente il componente, soprattutto se questo subisce cicli termici come nel caso dell'esempio.

Ottimizzati i vari parametri della stampante, si possono sfruttare al massimo gli enormi vantaggi di questa tecnologia. La possibilità di creare particolari con geometrie complesse, poter decidere il riempimento interno del componente, poter produrre in azienda componenti di riparazione o modifica di elementi già esistenti o maschere per determinate funzioni in fase di riproduzione. Inoltre, si possono ottenere finiture e tolleranze industrialmente accettate sfruttando la possibilità di creare layer di 100 μm . [19]

Un parametro basilare è la percentuale di riempimento della figura e il tipo di riempimento dello stesso. I suoi valori solitamente variano dal 20 % al 55 % [19], al 20% si hanno tempi di stampa ridotti e proprietà meccaniche ridotte, il riempimento classico è quello rettangolare che comporta un buon compromesso tra tempo e proprietà meccaniche. Tutto ciò non è sufficiente per poterlo utilizzare in caso di cicli termici o sottoposti a pressioni esterne, come in autoclave. Quindi nel presente lavoro l'obiettivo è stato la realizzazione dei componenti utili per lo scopo aziendale, aumentando gradualmente il riempimento. Grazie a questa modifica si è riusciti ad avere una resistenza alla deformazione termica per alcuni cicli di autoclave.

2.1.2 Tavole per Modellazione

Altra metodologia, l'attuale standard per la creazione di prototipi o stampi, è l'utilizzo della modellizzazione tramite lavorazione CNC di tavole preformate di resina.



Figura 2.1.2.1 Esempio di tavola per modellazione

I modelli vengono lavorati da aziende specializzate nel settore, con macchine CNC ad alta precisione, partendo dalle superfici di un disegno CAD con opportuna considerazione del ritiro della resina durante il ciclo di produzione degli stampi in autoclave. Le ragioni di un utilizzo così vasto di questa tecnologia è la grande varietà di dimensioni e profondità ottenibili, così che si possano ottenere stampi di elementi anche di notevoli dimensioni (circa 2 m), nonostante la non economicità delle tavole stesse. Diversi produttori hanno in listino tavole con diverse caratteristiche di densità e relative proprietà meccaniche. Nel caso specifico vengono utilizzate tavole di resina epossidica con densità variabile tra lo $0,69 \text{ g/cm}^3$ e i $0,80 \text{ g/cm}^3$. La scelta della densità è una mediazione tra la riduzione del peso del modello stesso, per questioni di movimentazione e trasporto, e l'evitare la distorsione del modello durante il ciclo in temperatura e pressione dell'autoclave

Board Material

Epoxy Board for Tools & Molds

Key Properties

- Very fine surface structure
- Excellent machinability
- Good dimensional stability
- Heat resistant up to 130°C

Applications

- Lay-up tools for prepreg
- Vacuum forming molds
- High temperature applications

| Mechanical Properties | | | WB-0700 |
|----------------------------------|-----------|----------------------------------|-------------|
| Color | visual | | Light green |
| Density | ISO 1183 | g/cm ³ | ca. 0.70 |
| Shore hardness D | ISO 868 | | 65 – 70 |
| Coefficient of thermal expansion | ISO 11359 | 10 ⁻⁶ K ⁻¹ | 35 – 45 |
| Deflection temperature, HDT | ISO 75 | °C | 130 – 140 |
| Compressive strength | ISO 604 | MPa | 50 – 55 |
| Flexural strength | ISO 178 | MPa | 30 – 40 |
| Tensile strength | ISO 527 | MPa | 20 – 25 |

Tabella 2.1.2.1 Datasheet Tavola da modello [36]

Osservando i dati dei produttori si può comprendere quanto sia delicato il calcolo dell'espansione termica della massa di resina, che può superare in alcuni casi i 100 Kg, e della temperatura a cui viene svolto il ciclo di cura dello stampo stesso. Su elementi di lunghezza considerevole si possono trasformare in errori di alcuni mm che comprometterebbero poi la funzionalità e la messa in opera dell'elemento prodotto.

Il modello prima del ciclo di creazione dello stampo o master deve subire un trattamento specifico di finitura e cura della superficie attraverso un tura pori per evitare una pessima finitura superficiale dello stampo ottenuto e limitare la possibilità di creare difettosità in figura.

2.1.3 Prototipazione da Oggetto Esistente

L'ultima tecnologia utilizzata in questo progetto è molto poco utilizzata come impiego a livello industriale ovvero l'utilizzo di un oggetto già esistente, non realizzato tramite CAD, come master per la creazione di uno stampo per la sua successiva replicazione.

Questo comporta problematiche molto peculiari strettamente dipendenti dalle caratteristiche dell'oggetto di partenza. Necessita di un accurato studio della geometria di partenza e di ciò che successivamente dovrà essere replicato. La creazione dei corretti angoli di sforno per l'estrazione dello stampo stesso, ipotizzare una disposizione dei fuori figura per la successiva estrazione del componente replicato. In seconda battuta si deve analizzare la possibilità del materiale di subire, senza deformazioni eccessive, un ciclo di autoclave, la compatibilità di possibili vernici o coating con i distaccanti, i turapori e la resina indispensabili per la creazione dello stampo stesso.

Ciò comporta un nuovo approccio: se necessario, si rimuovono possibili coating che possano interferire con i successivi step di lavorazione. Se l'oggetto di partenza non può subire un ciclo termico o una sovrappressione bisognerà ovviare al problema aumentando i tempi di produzione stampo, se si deforma facilmente anche solo applicando un vuoto di 1 Bar necessario per la creazione del sacco bisognerà creare supporti o mettere in campo azioni correttive per non ottenere uno stampo differente al master di riferimento, se non può essere facilmente messo in tavole o vi sono dei gap evidenti bisognerà apportare materiale esterno, con la possibilità di dover creare scomposizioni per ricreare determinate parti dell'oggetto originale.

2.2 Materiali

In questi paragrafi si andranno ad analizzare tutte le diverse tipologie di materiale che si andranno ad utilizzare per la creazione sia delle attrezzature che dei due elementi del progetto.

Si parlerà principalmente di fibre e compositi ma vi sarà un focus su espansi e materiali per FDM.

2.2.1 Carbonio

Il materiale principale utilizzato in questo progetto su cui si basa tutto lo studio e il processo seguente è la fibra di carbonio.

La definizione IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry) delle fibre di carbonio è: “Fibre (filamenti, tessuti e fasci) contenenti al minimo il 92% (frazione massiva), solamente in stato non grafítico”.

Le fibre di carbonio e i compositi da esse derivate hanno avuto un notevole incremento di utilizzo in settori che non siano l’aeronautica, primo settore di utilizzo massiccio, come l’automotive e il settore sportivo.

La loro storia commerciale inizia dagli anni sessanta del secolo scorso con le prime fibre prodotte mediante precursori PAN (Poliacronitrile). Ora il mercato CFC (Carbon Fiber Composite) è veramente polifunzionale e di grosso interesse, soprattutto in tutti i settori in cui si necessita una riduzione di peso importante.

La richiesta mondiale di queste particolari fibre ha avuto una crescita notevole negli ultimi decenni, e come mostra il *Grafico 2.1.2.1*, si prospetta una continuazione dell’attuale trend.

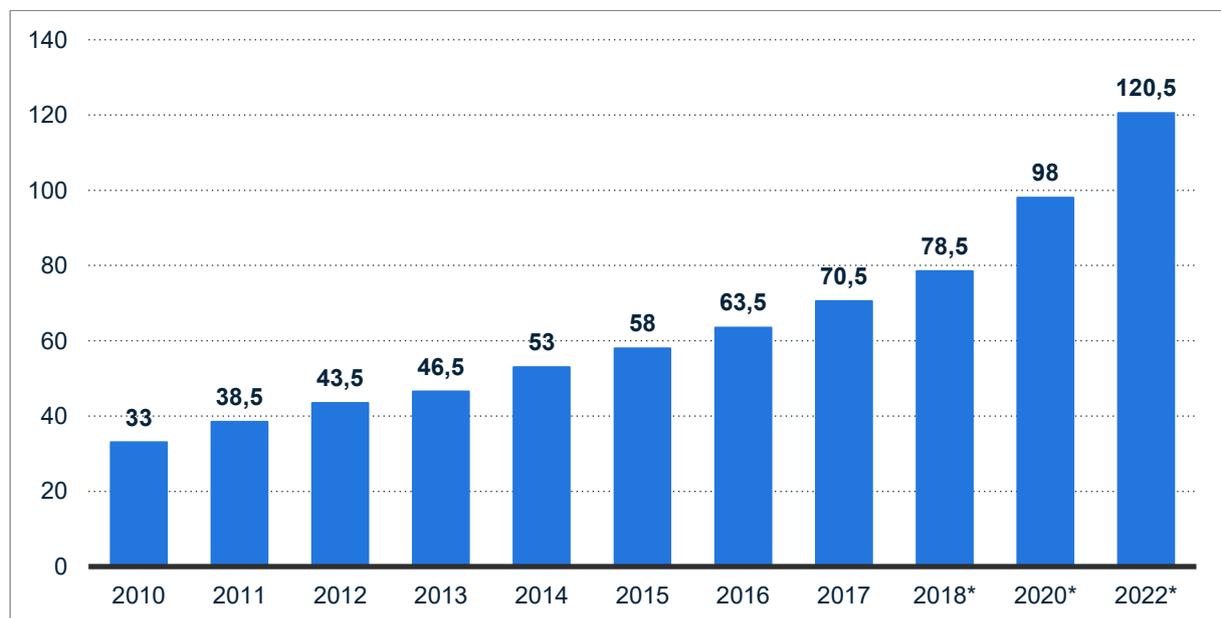


Grafico 2.2.1.1 Richiesta Globale per anno di Fibra di Carbonio dal 2010 al 2022 in migliaia di Tonnellate [37]

Essendo un mercato ancora di nicchia, anche se i numeri stanno aumentando, vi sono poche nazioni che possono vantare la produzione di questo particolare filato. Gli USA hanno la leadership del mercato insieme al Giappone, queste nazioni sono i punti di riferimento dagli anni '80 del secolo scorso per quanto riguarda la produzione industriale delle fibre di carbonio. Toray, Solvay e Hexcel dominano il mercato delle fibre di carbonio derivate dal PAN.

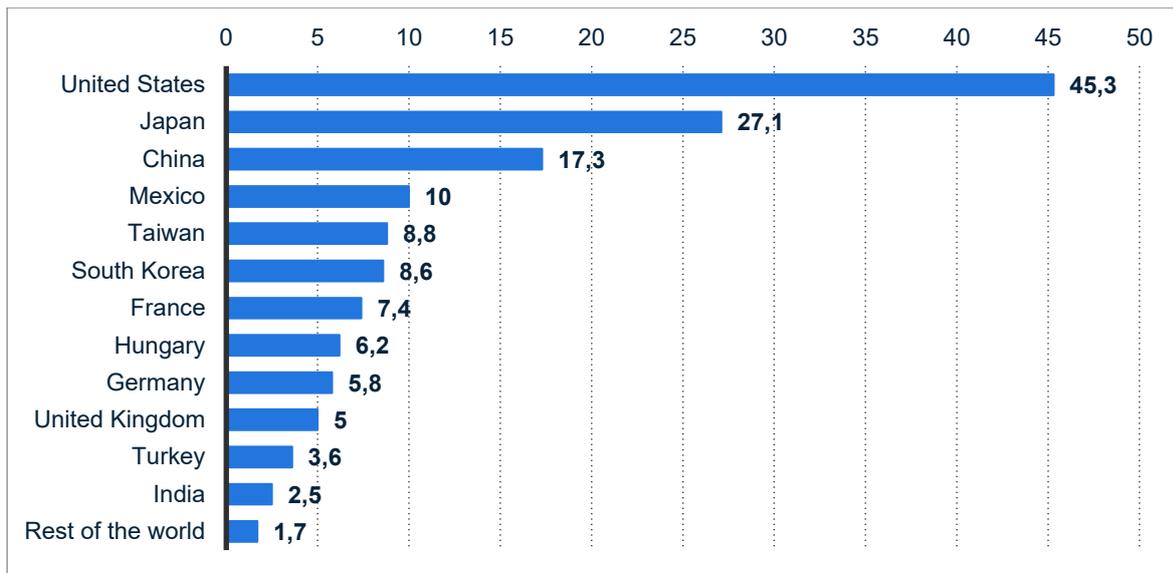


Grafico 2.2.1.2 Produzione Globale di Fibra di Carbonio nel 2018 in migliaia di tonnellate [37]

La classificazione delle fibre si basa sul metodo di produzione:

- Fibre prodotte da fibre precursori carbonizzate:
 - PAN,
 - Pece,
 - Rayon.
- Fibre sinterizzate direttamente da gas di idrocarburi. [28]

Successiva a questa vi è la classificazione attraverso i moduli di Young della fibra:

- Low modulus carbon fibers (<200 GPa),
- Standard modulus carbon fibers (\approx 230 GPa),
- Intermediate modulus (\approx 300 GPa),
- High modulus (>350 GPa),
- Ultra high modulus (>600 GPa). [28]

Tratteremo di seguito solo le fibre prodotte attraverso il sistema basato sulle fibre PAN che rappresentano il 90% del mercato. Si parte dalle Fibre di PAN (PoliAcriloNitrile) che vengono prodotte come normali fibre tradizionali, attraverso la polimerizzazione partendo da monomeri acronitrili specifici per ogni casa produttrice.

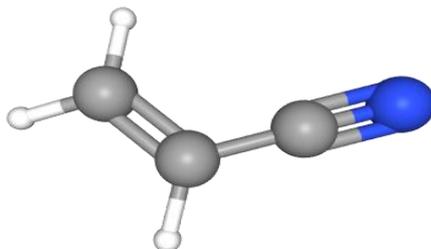


Figura 2.2.1.1 Monomero PAN, In blu Azoto, In grigio Carbonio, in bianco Idrogeno [40]

Queste fibre, che non possono essere prodotte tramite processo fusorio, vengono filate attraverso la loro dissoluzione in un solvente adeguato al processo di spinning.

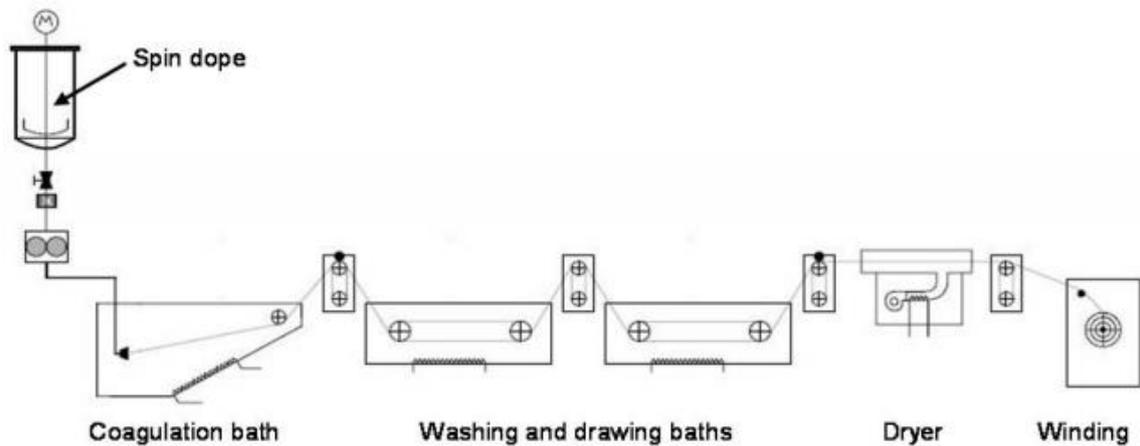


Figura 2.2.1.2 Processo di produzione Fibre PAN [18]

Lo spinning del precursore avviene tramite il processo di solvent spinning (Figura 3), il polimero viene sciolto in un solvente (DMSO) per ottenere una viscosità adeguata (30-50 Pas) per le fasi seguenti. Questa viscosità corrisponde ad una concentrazione di polimero del 20-30% nella soluzione con solventi organici, successivamente viene mescolata e deaerata per poi estruderla attraverso un estrusore con fori di diametro di 70 μm . [24]

Migliaia di questi fori vengono posti all'interno dello stesso estrusore, creando un fascio di fibre chiamato "tow", questo fascio viene messo in trazione e successivamente rimosso il solvente. Questa fase viene chiamata di coagulazione: il solvente si diffonde dalla fibra, il non solvente si diffonde nella fibra, le condizioni in questa fase del processo regolano la velocità di coagulazione della fibra e la sua struttura finale.

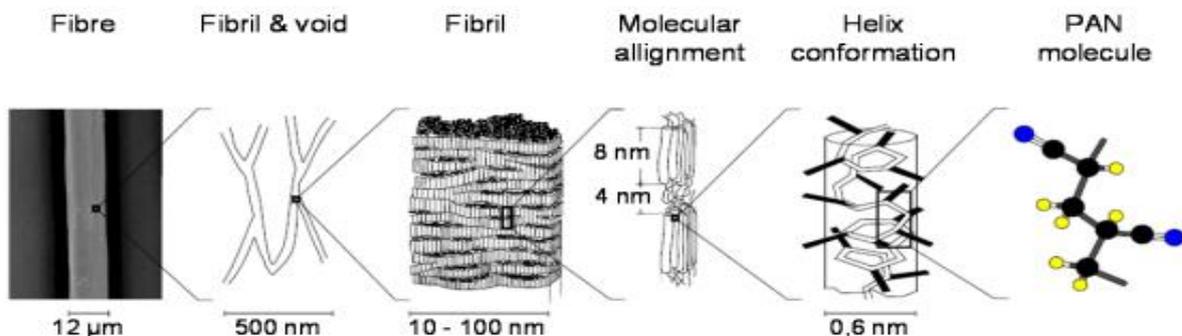


Figura 2.2.1.3 Struttura della fibra PAN, In blu Azoto, in nero Carbonio, in giallo Idrogeno [18]

Le molecole hanno una struttura elicoidale con delle zone allineate e alcune non ordinate. Queste due aree insieme formano delle fibrille, che creano il network tra le fibre, che sono separate da vuoti di 0.2 μm (nelle fibre di alta qualità) derivanti dal processo di coagulazione. Dopo questo step le fibre vengono asciugate e avvolte in bobine. [25]

Lo spinning del precursore è la chiave per poter produrre fibre di carbonio ad alta qualità e alta resistenza che poi verranno utilizzate per la produzione delle fibre ad più alte prestazioni.

Ottenute le fibre di partenza si può iniziare ad analizzare il processo vero e proprio qui successivamente sintetizzato:



Grafico 2.2.1.3 Diagramma Produzione Fibre di Carbonio da Fibre PAN [24]

Le fibre di PAN hanno un contenuto di Carbonio in massa di circa il 67 %, per poter considerare fibre di Carbonio bisogna raggiungere almeno il 92 % della definizione IUPAC.

Seguendo lo schema il primo step da affrontare è l'ossidazione delle fibre di Pan utilizzando un forno a 300°C [18] e un'atmosfera ossidante, solitamente il processo viene svolto in aria, in modo che l'ossigeno sostituisca l'idrogeno, più volatile, sulla catena che subisce una prima ciclizzazione. L'ossidazione della fibra ha lo scopo di stabilizzare la fibra ed evitarne la fusione nei successivi processi di pirolisi. È un processo estremamente esotermico, che può causare la presenza di fiamme nel forno stesso. Le fibre di PAN ossidato hanno proprietà di resistenza alla fiamma e vengono commercializzate come fibre per tessuti ignifughi. [25]

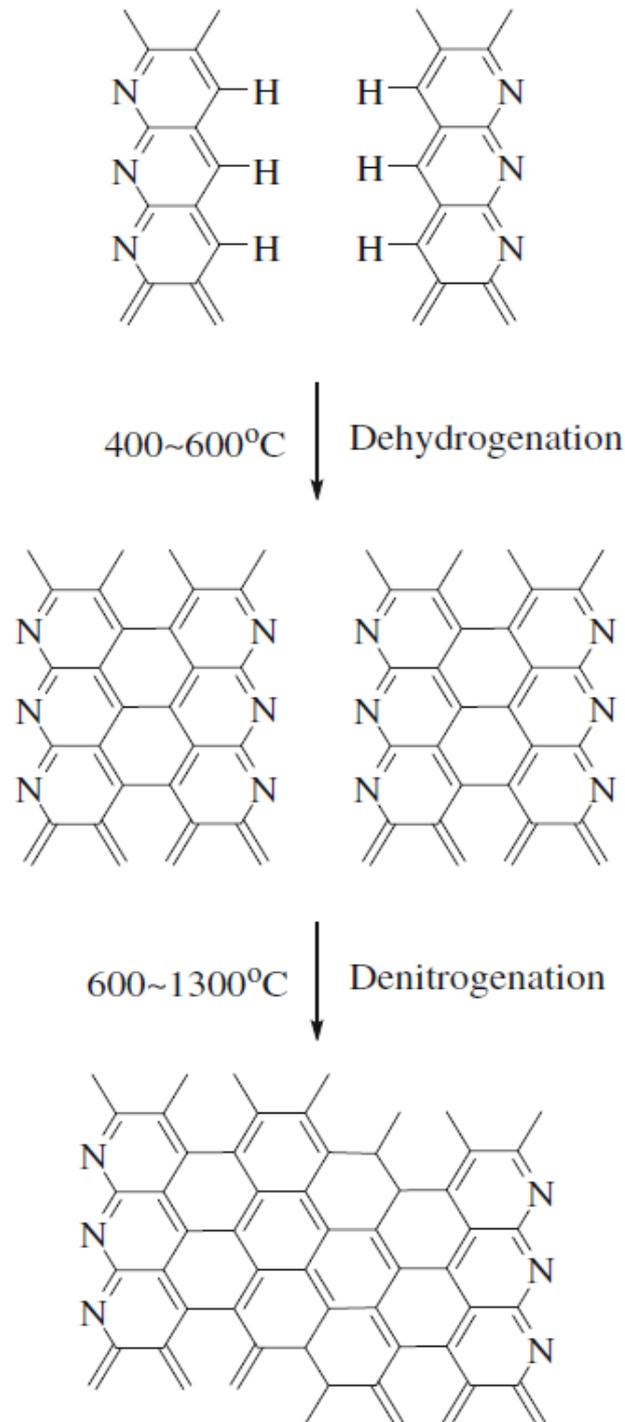


Figura 2.2.1.4 Cambio di struttura durante il processo di produzione [26]

Successivo a questo step vi è la Pre-Carbonizzazione, che consiste nel passaggio della fibra attraverso un forno a zone diversificate di riscaldamento per ottenere una temperatura finale di 1100°C, nel quale la fibra perde circa il 50 % del proprio peso. Questa perdita di peso è dovuta al rilascio di cianati gassosi, molto pericolosi per l'ambiente e l'uomo, che vengono direttamente inceneriti all'uscita dello scarico gas del forno stesso. Inoltre, attraverso un sistema di rulli, la fibra è tenuta in trazione a valori che dal tipo di fibra che si vuole ottenere.

Lo step successivo è la Carbonizzazione, con la quale la fibra acquista le proprietà meccaniche, elettriche e la densità finali. Il tutto avviene in un forno a 1800°C in atmosfera di N₂.

Per le fibre ad alto modulo a questo passaggio si aggiunge la Grafittizzazione, un ulteriore riscaldamento che si spinge fino ai 3000°C ma in una atmosfera inerte (Ar) Questo terzo trattamento consente una pressoché completa esclusione di atomi eterogenei all'interno della fibra aumentandone le proprietà meccaniche.

Un altro step molto importante è quello del trattamento superficiale, che ha lo scopo di impiantare sulla superficie della fibra gruppi funzionali che la rendano compatibile con la matrice del composito. In questo processo si sfrutta l'intrinseca conducibilità elettrica delle fibre per avere benefici sia a livello di rugosità superficiale e di compatibilizzazione superficiale per la successiva produzione del materiale composito.

La fibra viene immersa in una vasca con una soluzione di acqua e sali di Solfato di Ammonio, alla fibra diviene l'anodo di un processo elettrochimico con il catodo di grafite immerso nel bagno stesso. L'interazione tra la fibra e il bagno, dopo aver applicato una tensione continua, comporta una modifica dei gruppi superficiali in gruppi Carbonili (COOH) che rendono sia la superficie più regolare e consentono una maggior coesione tra la fibra e la resina utilizzata per la fase di impregnazione.

Immediatamente successiva al bagno elettrochimico, vi sono due step di lavaggio, la prima mediante acqua calda per rimuovere l'elettrolita in eccesso e il lavaggio finale con una serie di vasche con un ulteriore flusso d'acqua.

Vi è una pre-asciugatura con aria calda, poi vi è la fase di dimensionamento. Le fibre vengono immerse in un bagno di acqua e piccole molecole di resina epossidica, in modo che si depositino sulla fibra. La fibra viene estratta dal bagno e fatta essiccare, in modo che la resina formi un film uniforme, molto utile nel caso la fibra successivamente venga utilizzata per la preparazione di preimpregnati.

Nelle *Figure 2.2.1.4 e 2.2.1.5* vi sono rappresentate schematicamente le strutture che possono essere assunte da una fibra di carbonio, si può notare la grande direzionalità della fibra stessa e la non trascurabile presenza di difetti che influenzano le proprietà della fibra stessa. Essendo comunque un materiale che lavora in campo elastico la presenza di una difettosità può causare la rottura di schianto prima del limite di rottura della fibra.

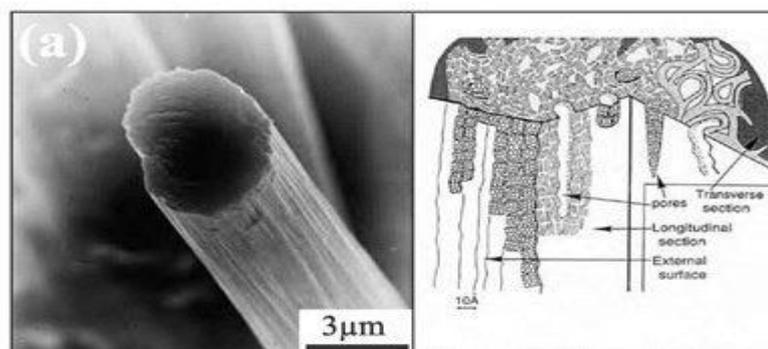


Figura 2.2.1.4 Struttura concentrica(a) [18]

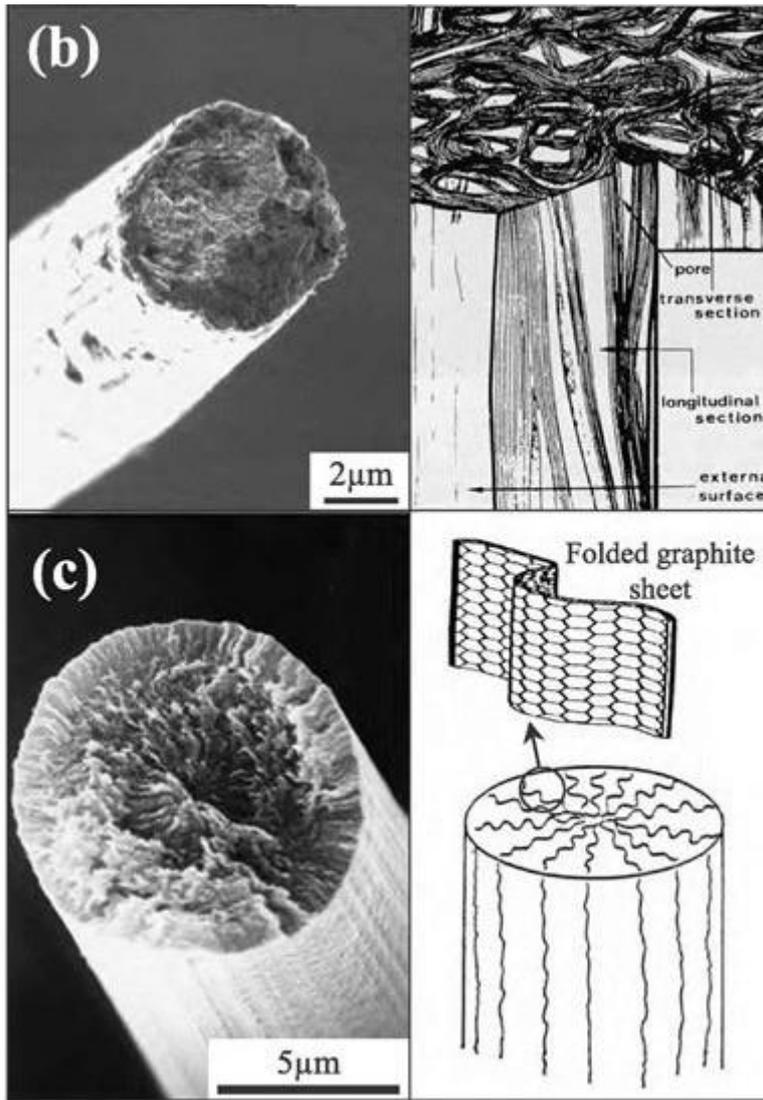


Figura 2.2.1.5 Struttura radiale(b) o ripiegata(c) [18]

2.2.2 Tessuti

I tessuti, generalmente, possono essere divisi in quattro grosse categorie:

- Unidirezionali: Si classificano come tali i tessuti nei quali le fibre vengono disposte uniformamente lungo una sola direzione,
- Bidirezionali: Si classificano come tali i tessuti nei quali le fibre incrociate formando un angolo tra di esse (BID),
- Multi-assiali: Si classificano come tali i tessuti nei quali vengono disposti parallelamente più strati di fibre sovrapposte ed orientate in diverse direzioni,
- I glass Mat, tessuti di nuova concezione utilizzati soprattutto per batterie AGM.

Con la fibra di carbonio solitamente vengono prodotti sia tessuti unidirezionali che i bidirezionali ma la maggior parte del mercato è composta da tessuti 0/90° bi direzionali.

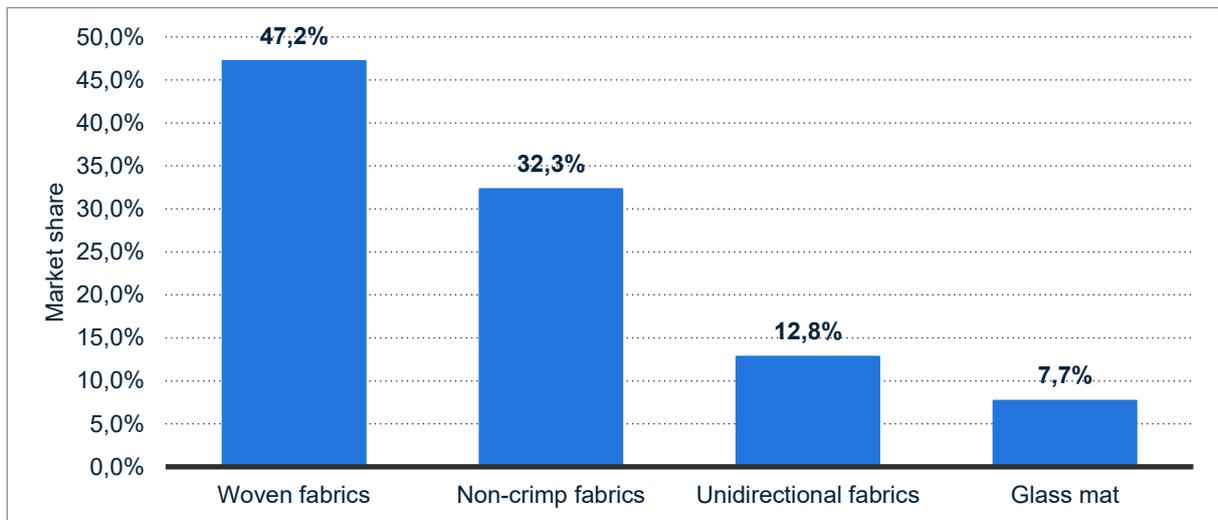


Grafico 2.2.2.1 Previsione della divisione del mercato delle fibre continue mondiali nel 2022. [37]

Gli unidirezionali permettono di realizzare compositi con il massimo delle proprietà lungo una sola direzione, affidandosi alla matrice per le altre direzioni, con una modulabilità pressoché ottimale ma sono caratterizzati da una bassa drappabilità, ovvero la capacità di deformarsi per seguire le forme di uno stampo o di una superficie, a seguito di ciò, vengono utilizzati soprattutto su superfici piane o poco complesse. Altra problematica è la bassa stabilità del tessuto durante la lavorazione, nonostante la presenza di collanti o di fili di cucitura trasversali. Il loro elevato grado di allineamento consente conseguentemente un elevato grado di impacchettamento (fino al 70%). Per ovviare alle problematiche degli unidirezionali molto rilevanti in fase di laminazione, stabilità e drappabilità, si ricorre all'impiego dei tessuti (woven fabric).

Nei tessuti i fasci (tow) di fibre, che possono variare dalle 1000 (1 K) alle 160000 (160 K), vengono intrecciati in modo da avere diversi stili di tessitura, altro tipo di classificazione è la grammatura per m² che dipende sia dal tow delle fibre che dal diametro delle stesse. Solitamente nei tessuti utilizzati per la produzione di preimpregnati in tessuto di carbonio si utilizzano fasci di 12 K o 24K.



Figura 2.2.2.1 Tow di Carbonio [41]

Partendo da questi presupposti si possono discriminare vari tipi di trama:

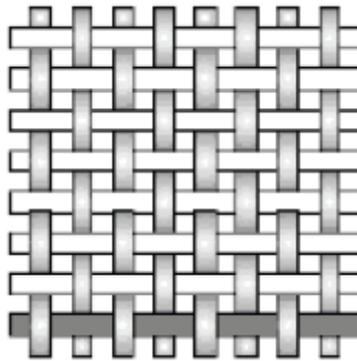


Figura 2.2.2.2 Tessuto Plain [34]

Il Plain è caratterizzato da un rapporto 1 a 1 tra trama e ordito, questo rapporto consente al tessuto di avere una buona stabilità, ovvero mantiene la distanza tra i fili anche sotto stress, e di avere una drappabilità non eccezionale ma comunque migliore di quella di un unidirezionale. L'elevato numero di punti di contatto tra le fibre rende difficile lo scorrimento del tessuto e la sua adattabilità, questo influisce anche sulle proprietà meccaniche del tessuto, che non sono le migliori ottenibili.

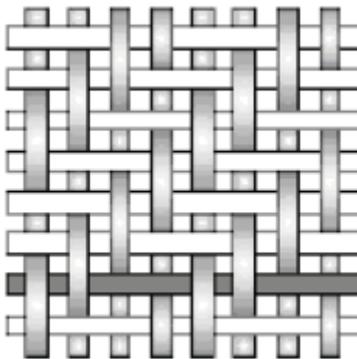


Figura 2.2.2.3 Tessuto Twill [34]

Nel Twill invece, uno o più fili di ordito si intrecciano con due o più fili di trama, creando un effetto visivo a diagonale. Questa riduzione dei punti di contatto permette una maggiore bagnabilità del tessuto e una migliore drappabilità a scapito di una leggera perdita di stabilità. Quest riduzione delle zone di contatto consente anche una superficie più regolare e un aumento delle proprietà meccaniche.

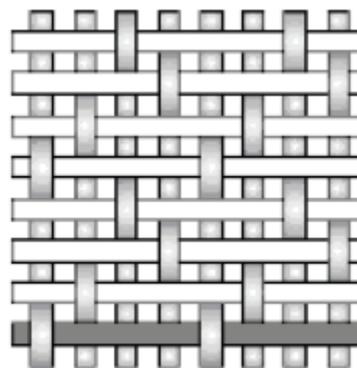


Figura 2.2.2.4 Tessuto 4-Satin [34]

Il n-Satin varia dal Twill solo per il numero di intrecci tra trama e ordito, dove n sale da 2 a 4 o 5 o 8 solitamente, con la conseguente perdita di stabilità dimensionale del tessuto e incremento di drappabilità. Questa bassa stabilità si ripercuote con una non simmetria finale e una notevole difficoltà in fase di laminazione.

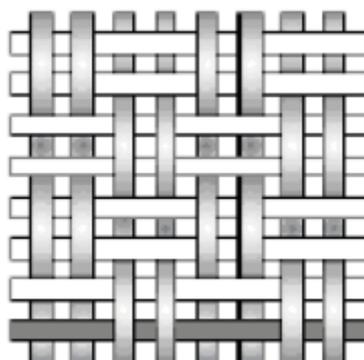


Figura 2.2.2.5 Tessuto Basket [34]

Il basket è molto simile al tessuto Plain solo che due o più fibre dell'ordito si intrecciano con due o più fibre della trama, nel caso siano due si ha un basket del tipo 2x2.

Questa tipologia vanta una maggiore resistenza e linearità ma riduce la stabilità. I Tessuti basket vengono utilizzati per creare particolari tessuti ad alto peso.

Da scheda tecnica dei tessuti in fibra di carbonio si possono ricavare caratteristiche meccaniche, dopo il processo di cura della resina epossidica a 135°C tramite hot pressing a 3 Bar:

| Articolo | Resistenza a flessione ASTM D790 [Mpa] | Modulo Elastico a flessione ASTMD790 [GPa] | G1c mod. ASTM D5528 [J/m ²] | ILSS ASTM 2344 [N/mm ²] | Volume di fibra nel laminato [%] |
|----------|--|--|---|--|-------------------------------------|
| GG630T | 730 | 57 | 800 | 56 | 64 |
| GG428T | 800 | 52 | - | 64 | 59 |
| GG205T | 810 | 55 | 750 | 68 | 58 |
| GG245T | 800 | 54 | 760 | 65 | 56 |
| GG380T | 800 | 55 | 730 | 64 | 62 |
| GG90P | 655 | 52 | - | 70 | 65 |
| GG204P | 810 | 53 | - | 66 | 59 |

Tabella 2.2.2.1 Datasheet Tessuti di Carbonio Impregnatex Compositi [20]

Analizzando questi dati si possono notare le leggere differenze tra i dati dei prodotti tessuti in Plain (P) o Twill (T). Prendendo in considerazione dati riguardanti grammature simili ma con tessiture differenti (come il 205 T e il 204 P), si può notare il leggero incremento utilizzando la prima tessitura.

numerosi da aver creato una struttura che ne impedisce lo scorrimento ma non è ancora completamente reticolata. Il tempo che la resina impiega per giungere a questo stadio di gelificazione rappresenta il tempo limite di lavorabilità del compound resina e agente reticolante. Il tempo di vetrificazione invece, determina la completa reazione dei gruppi funzionali attivi dei due componenti in modo da ottenere una matrice completamente reticolata e consolidata.

Per l'utilizzo a livello industriale si utilizzano resine differenti tra preimpregnato e impregnazione manuale, in modo da poter modulare i tempi di gelo e di vetrificazione compatibilmente con il metodo di produzione e il processo di cura.

Di seguito in *Tabella 2.2.3.1* sono riportate le caratteristiche della resina IMP503Z, utilizzata successivamente per la realizzazione dei prototipi, compresi parametri prettamente dedicati alla laminazione. Il TACK, ad esempio, rappresenta la capacità del laminato ad aderire allo stampo attraverso la adesività della resina esposta alla temperatura di laminazione, tipicamente tra 18 e 21 °C. Altro parametro influente a livello di laminazione è la percentuale di resina rilasciata in aria durante l'esposizione del preimpregnato.

| TYPE | | TOUGHENED |
|--|--------------------|----------------------------|
| Densità resina curata | gr/cm ³ | 1,15 ÷ 1,25 |
| Gel Time at 125 °C (257 °F) | minuti | 6'-9' |
| Gel Time at 110 °C (221 °F) | minuti | 20 ÷ 26 |
| TACK | | MEDIO/ALTO (adattabile) |
| Resin VOC on prepreg | % | < 1 |
| Tg fully cured (Tan Delta DMA) | °C (°F) | 120 (248) |
| Shelf life a temperature ambiente (23 °C) | weeks | 5 |
| Shelf Life (-18°C approx) | years | 1 |

Tabella 2.2.3.1 Datasheet Resina IMP503Z [20]

Invece, successivamente la *Tabella 2.2.3.2* con i dati tecnici della resina da impregnazione manuale SR 1700:

SR 1700 epoxy resin physical properties

| | | SR 1700 |
|-------------------------------|---------|--|
| Aspect / colour | | Yellow liquid |
| Viscosity (mPa.s) | @ 15 °C | 3 800 ± 400 |
| Rheometer | @ 20 °C | 1 950 ± 200 |
| CP 50 mm | @ 25 °C | 1 100 ± 150 |
| Shear rate 10 s ⁻¹ | @ 30 °C | 640 ± 100 |
| | @ 40 °C | 250 ± 100 |
| Density | @ 20 °C | 1.16 ± 0.01 |
| Picnometer ISO 2811-1 | | |
| Storage | | No crystallisation Avoid long storage periods at temperatures over 40 °C |

Tabella 2.2.3.2 Datasheet Sicomin SR8100/SD882X [30]

Questa resina bicomponente, studiata appositamente per impregnazione manuale di parti di medie e grandi dimensione, ha una viscosità molto bassa a temperatura ambiente che permette una lavorabilità molto buona a discapito di una Tg molto più bassa rispetto alla IMP503Z. L'adattamento ad un

metodo di produzione più articolato e lungo non consente di avere una resina altrettanto prestazionale quanto quella precedente, ciò implica cicli di cura e di autoclave (se utilizzata come resina da stampi) più limitanti e dai tempi maggiori. Richiede una post cura ad almeno 40°C ed è studiata appositamente per attrezzature in materiale composito ad alte prestazioni che subiranno cicli termici.

Se per la IMP503 Si parla di cicli di 2/2,5 ore a temperature superiori ai 120 °C per la resina da impregnazione manuale invece si parla di 24 ore a temperatura ambiente e successive 8 ore a 80 °C se accoppiato all'indurente appropriato.

Mechanical properties on pure cast resin

| Cure schedule | | SR 1700 / SD 2801 | | |
|----------------------------------|-------------------|------------------------------|-------------------------------|------------------------------|
| | | 24 h 23 °C + 24 h 40°C | 24 h 23 °C + 16 h 60° C | 24 h 23 °C + 8 h 80 °C |
| Tensile | | | | |
| Modulus of elasticity | N/mm ² | 3050 | 3200 | 3100 |
| Maximum resistance | N/mm ² | 65 | 78 | 80 |
| Resistance at break | N/mm ² | 64 | 76 | 80 |
| Elongation at maximum resistance | % | 3 | 3.7 | 4.4 |
| Elongation at break | % | 3 | 4.1 | 4.6 |
| Flexion | | | | |
| Modulus of elasticity | N/mm ² | 3248 | 3460 | 3320 |
| Maximum resistance | N/mm ² | 108 | 121 | 123 |
| Elongation at maximum resistance | % | 4.6 | 5.1 | 5.5 |
| Elongation at break | % | 6.3 | 6 | 6.9 |
| Charpy Impact strength | | | | |
| Resilience | kJ/m ² | 18 | 16 | 15 |
| Glass transition | | | | |
| Tg1 | °C | 67 | 83 | 97 |
| Tg1 max. | °C | | | 98 |

Tabella 2.2.3.3 Datasheet Sicomin SR8100/SD882X [30]

2.2.4 Core Espanso

Ultima tipologia di materiale utilizzata per il progetto è un core interno caratterizzato da una bassa densità e una discreta resistenza meccanica. Nel caso particolare si tratta di una schiuma a celle chiuse di Polimetacrilimmide (PMI). La schiuma di PMI è costituita da due copolimeri, Metilmetacrilato (MAA) e Metacrilonitrile (MAN), è caratterizzata da una stabilità chimica, una alta temperatura di distorsione e ottime proprietà meccaniche che lo rendono perfetto per la creazione di strutture “sandwich” per compositi.

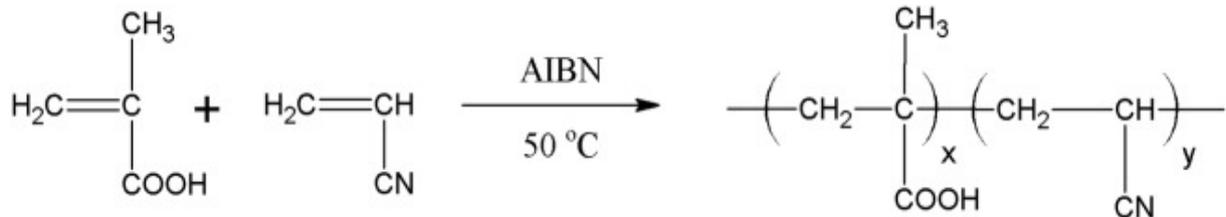


Figura 2.2.4.1 Reazione di formazione di una schiuma di PMI [17]

Le strutture a sandwich sono molto utilizzate in molti ambiti, dal miliare al settore sportivo, hanno delle problematiche di compatibilizzazione e di costi di alcuni core come ad esempio quelli in PMI, dovuti alla sua difficile copolimerizzazione e al costo elevato del precursore Metacronitrile.

Per i core in PMI nel caso dei compositi in fibra di carbonio, bisogna applicare uno strato di adesivo tra lo stesso e il preimpregnato per consentire il trasferimento del carico tra i due componenti. Il metodo di produzione è simile a quello di un qualsiasi altro espanso polimerico, necessita solo di una attenta calibrazione per ottenere una struttura a celle chiuse con dimensione ottimale.

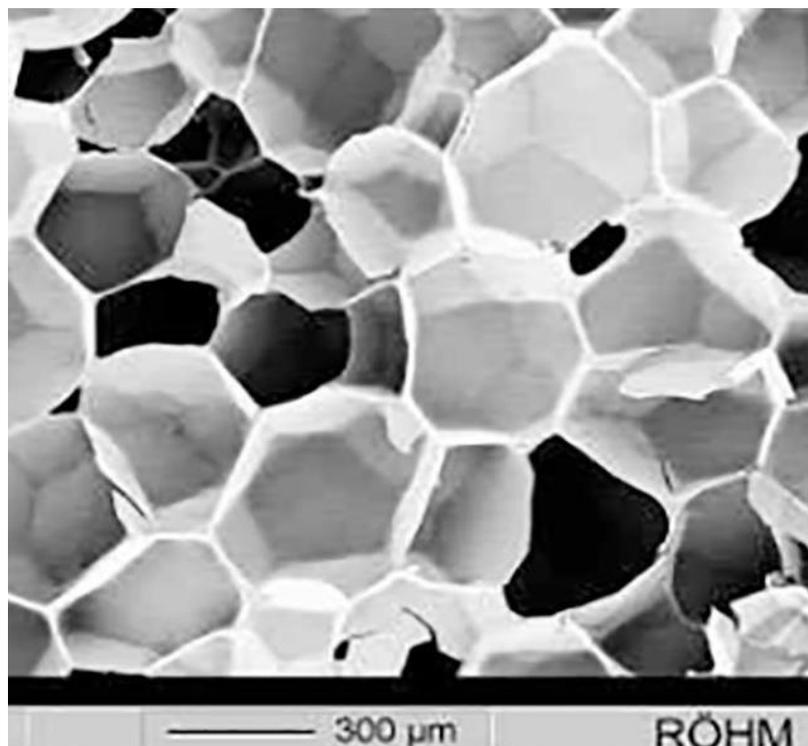


Figura 2.2.4.2 Struttura della schiuma di PMI a celle chiuse [17]

Il core utilizzato nel progetto è il Rohacell IG-F 51 nella configurazione con spessore di 8 mm, che permette di avere un buon compromesso tra la sua densità e l'incremento delle proprietà meccaniche del pezzo. L'aggiunta di un core di questo spessore consente di aumentare anche il momento flettente della tavola e a limitare la freccia risultante dall'applicazione del carico.

Ecco le proprietà meccaniche ricavate dal Datasheet del produttore:

| Property | Test Method* | Unit | ROHACELL® 31 IG-F | ROHACELL® 51 IG-F |
|-------------------------------------|-------------------------|--|-----------------------|------------------------|
| Density** | ISO 845 ASTM D 1622 | kg/m ³ lbs/ft ³ | 32 ± 7 2.00 ± 0.44 | 52 ± 12 3.25 ± 0.75 |
| Compressive Strength | ISO 844 ASTM D 1621 | MPa psi | 0.4 58 | 0.9 130 |
| Compressive Modulus | ISO 844 ASTM D 1621 | MPa psi | 17 2,470 | 43 6,240 |
| Tensile Strength | ISO 527-2 ASTM D 638 | MPa psi | 1.0 145 | 1.9 275 |
| Tensile Modulus | ISO 527-2 ASTM D 638 | MPa psi | 36 5,220 | 70 10,150 |
| Shear Strength | DIN 53294 ASTM C 273 | MPa psi | 0.4 58 | 0.8 116 |
| Shear Modulus | DIN 53294 ASTM C 273 | MPa psi | 13 1,885 | 19 2,755 |
| Coefficient of Thermal Expansion | | 1/K*10E-5 | 5.03 | 4.71 |

Figura 2.2.4.2 Datasheet Rohacell IG-F [13]

Il film adesivo invece è un film supportato da un glass mat finissimo con resina epossidica appositamente studiato per la compatibilizzazione tra core e fibra di carbonio e consente il perfetto trasferimento degli sforzi dalle due superfici del composito al core interno per ottenere la massima resa meccanica.

2.2.5 Onyx

L'Onyx è un materiale composito, studiato appositamente dalla Markforged, per stampa FDM. È stato realizzato appositamente per le loro stampanti 3D e ottimizzato per questa tecnologia e per poter surclassare la concorrenza del classico Nylon.

MATERIAL DATASHEET

Composites

| Plastic Matrix | Test (ASTM) | Onyx | Nylon |
|-------------------------------|-------------------|------|-------|
| Tensile Modulus (GPa) | D638 | 1.4 | 0.94 |
| Tensile Stress at Yield (MPa) | D638 | 36 | 31 |
| Tensile Strain at Yield (%) | D638 | 25 | 27 |
| Tensile Stress at Break (MPa) | D638 | 30 | 54 |
| Tensile Strain at Break (%) | D638 | 58 | 260 |
| Flexural Strength (MPa) | D790 ¹ | 81 | 32 |
| Flexural Modulus (GPa) | D790 ¹ | 2.9 | 0.84 |
| Heat Deflection Temp (°C) | D648 B | 145 | 49 |
| Izod Impact - notched (J/m) | D256-10 A | 330 | 1000 |
| Density (g/cm ³) | — | 1.2 | 1.1 |

Tabella 2.2.5.1 Datasheet Onyx Markforged [27]

Nella tabella sovrastante si possono notare i notevoli incrementi rispetto al materiale concorrente. Soprattutto per quanto riguarda la temperatura di distorsione, notevolmente incrementata e che consenti di utilizzarlo anche in cicli di autoclave, come già detto nel *Capitolo 2.1.1.1*, o per resistere alla temperatura di un forno di cura per accelerare il tempo di cura di una colla strutturale senza che si perdano le tolleranze richieste. Sicuramente i dati, soprattutto del Nylon, vanno presi un attimo in analisi poiché è il produttore del materiale a fornirli però è indiscutibile l'ottimo comportamento che questo materiale ha in temperatura e sottoposto a cicli termici.

Queste prestazioni sono state raggiunte inserendo nel Nylon preso di riferimento fibre corte di Carbonio ad alta resistenza. Oltre alle proprietà meccaniche, *“le fibre corte di carbonio con cui è rinforzato modificano il comportamento del materiale al raffreddamento, inducendo meno deformazioni termiche, in modo che le dimensioni dei pezzi stampati riproducano fedelmente il modello prodotto in CAD”*. [43]

Gli aspetti negativi di questo materiale per FDM sono: la maggior usura dell'ugello dovuta alla presenza delle fibre di Carbonio e della loro durezza e il costo del materiale stesso. Tutto ciò però se il materiale viene utilizzato per scopi di elevato valore commerciale passano nettamente in secondo piano.

2.3 Processi

Dopo la descrizione dei materiali utilizzati, ora passiamo a descrivere i processi con i quali successivamente produrremo sia gli stampi che i componenti stessi.

2.3.1 Impregnazione manuale

Partendo dagli stampi si è utilizzato un metodo di impregnazione manuale, per via della impossibilità di introdurre i modelli master dei componenti in un vero e proprio processo in autoclave e per una questione di limitazione dei costi.

L'impregnazione manuale è una metodologia di stratificazione molto flessibile e adattabile alle esigenze dello specifico componente. Necessita di una lunga preparazione del modello con l'utilizzo di prodotti con la funzione di ottimizzazione della superficie del modello (turapori di tipo filmogeno) e un ciclo di distaccanti per la successiva separazione del modello dallo stampo. È un processo che richiede molte ore di realizzazione, non permette una riproducibilità molto elevata dipendendo da un operatore manuale e poco standardizzabile.

Questo processo non consente di ottenere frazioni di fibra molto alte (25-30%) con le conseguenti basse proprietà meccaniche e una non uniformità di permeazione della resina.

La resina gioca un ruolo molto importante: è la resina che detta i tempi e le modalità di impregnazione. La temperatura della zona di lavoro deve essere compatibile con la resina e ne permette la impregnazione anche dopo aver miscelato i due componenti della resina. Si utilizzano solitamente resine epossidiche, compatibili con le fibre di carbonio e con buone proprietà meccaniche e una resistenza in temperatura compatibile con i successivi cicli di autoclave che andrà a subire.

Questo processo è bastato sulla sovrapposizione successiva di diverse lamine di tessuto di fibre lunghe con diverse tessiture e grammature con la possibilità di direzionare il tessuto stesso lungo le zone di maggiore sollecitazione. In questo caso in cui la lamina viene impregnata direttamente sullo stampo si parla di processi di Wet Lay-up (ovvero laminazione in umido).

Si otterrà una buona finitura superficiale solo dal lato stampo, l'altro lato non finito rimarrà esposto al sacco, applicato successivamente allo scopo di creare il vuoto al complessivo di stampo e laminato per poter rimuovere l'aria e i gas intrappolati nella resina.

In questo processo completamente manuale anche il taglio del tessuto secco è lasciato all'operatore che utilizza dime preconfezionate durante la fase di progettazione del tagliato per soddisfare le proprietà meccaniche richieste dal componente.

2.3.2 Dry Lay-up

Processo molto simile al precedente ma ha notevoli vantaggi in termini di tempo e replicabilità dello stesso, è il Dry Lay-up che utilizza materiale preimpregnato o prepreg. Il notevole vantaggio dell'utilizzo del prepreg è la possibilità di avere già un tessuto che contiene sia le fibre lunghe che la resina in quantità che vengono definite in fase di produzione (solitamente si ha circa il 40 % di fibre). Il tessuto preimpregnato fatto consente una maggiore facilità di stesura perché la resina, esposta alla temperatura dell'ambiente controllata tra i 18 e 21 °C, ha un TACK che permette una aderenza tra i vari strati del laminato e ciò agevola la stesura della stessa sulle superfici anche con forme complesse.

La preimpregnazione però comporta alcune controindicazioni inevitabili: i rotoli di materiale hanno limitati tempi di vita a determinate temperature, che variano dalla settimana ai tre giorni (alla temperatura di 18 °C) fino ai 12 mesi a meno -18 °C, superati i quali la polimerizzazione della resina epossidica di cui sono impregnati è così avanzata da renderli inutilizzabili. Questo comporta un grosso

costo a carico del sistema di trasporto e di stoccaggio che viene effettuato a -18°C , per allungare la durata della vita del materiale fino ad un anno.

Il tagliato di questo materiale, reso ostico dalla presenza della resina, solitamente viene demandato a una macchina tagliatrice che sfrutta un file che comprende sia le dime che l'orientamento delle stesse, così da velocizzare tutto il processo successivo aumentando l'efficienza nell'utilizzo del materiale e la conseguente riduzione dello sfrido e della perdita economica, perché il prepreg ha un costo abbastanza elevato: un materiale con una densità planare di circa 200 g/m^2 ha un costo di circa 25 € al metro quadro, invece uno di grammatura decisamente superiore e per utilizzi strutturali come il 630 g/m^2 si attesta intorno ai 30 €.

Dopo aver posizionato tutti gli strati del laminato sullo stampo, si procede nello stesso modo per entrambi i metodi di Lay-Up.

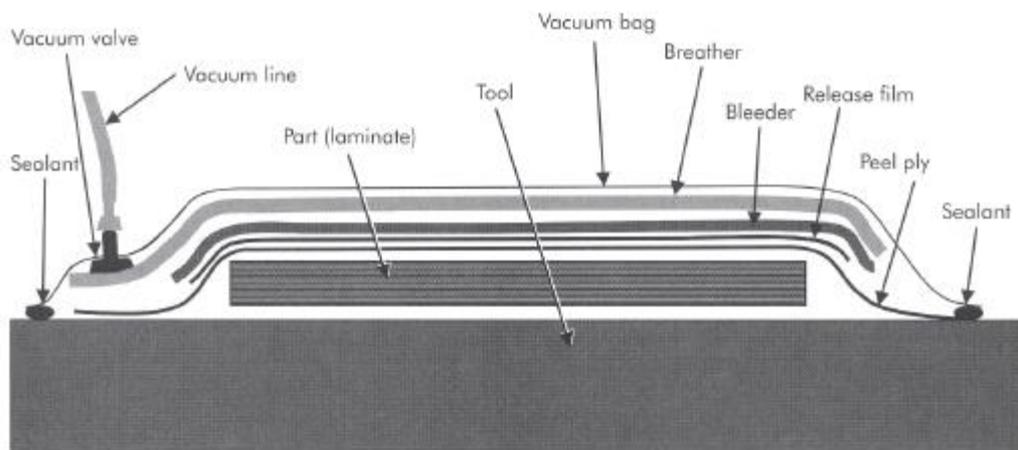


Figura 2.3.2.1 Esempio di prodotto ottenuto da tecnica Dry Lay Up [44]

In Figura 2.3.2.1 vi è un classico esempio del risultato di un processo di laminazione:

- Il laminato è a contatto con lo stampo,
- Uno strato chiamato peel ply, uno strato di vetro tessuto che viene applicato in zone di successivo incollaggio o foratura come rinforzo e per avere una rugosità che permetta la presa della colla,
- Appena sopra vi è una pellicola forata di materiale plastico (PTFE) incompatibile con la resina stessa, che evita la coesione tra bleeder o aeratore e laminato,
- Un Bleeder, un materassino di poliestere, vetro o cotone che assorbe gli eccessi di resina,
- Un altro strato di PTFE ma questa volta non forato che costituisce una Barriera per la resina,
- uno strato di aeratore che permette la massima distribuzione del vuoto, evita che possibili spigoli dello stampo vadano a compromettere il sacco,
- lo strato esterno, ovvero il sacco a vuoto, che ha il compito di resistere alla pressione e alla temperatura del successivo ciclo di cura della resina in autoclave, solitamente un film di Nylon.

Per garantire il vuoto nei punti di congiunzione tra sacco e stampo o tra sacco e sacco si utilizza un sigillante, solitamente mastice, che garantisce una tenuta in temperatura di un vuoto che solitamente in ciclo si attesta tra gli 0.8 e 1 Bar di vuoto. [44]

2.3.3 Ciclo di Cura

Dopo aver realizzato il laminato bisogna procedere con il ciclo che porti a completa reticolazione della resina e compatti il laminato. Per svolgere questa funzione verrà utilizzata una autoclave. I vari tipi di resine richiedono cicli con temperature, rampe e pressioni differenti per via delle differenti viscosità delle resine stesse al variare della temperatura. Prendendo sempre come riferimento la resina IMP

503Z utilizzata per i preimpregnati, il suo andamento rispetto alla temperatura andrà a determinare tutto il ciclo successivo.

Di seguito è riportato il grafico dell'andamento della viscosità al variare della Temperatura, che è stato svolto con reometro con configurazione con piastra dalla temperatura di 60°C, con velocità di rotazione 12 giri/min e rampa di riscaldamento a 3 °C/min.

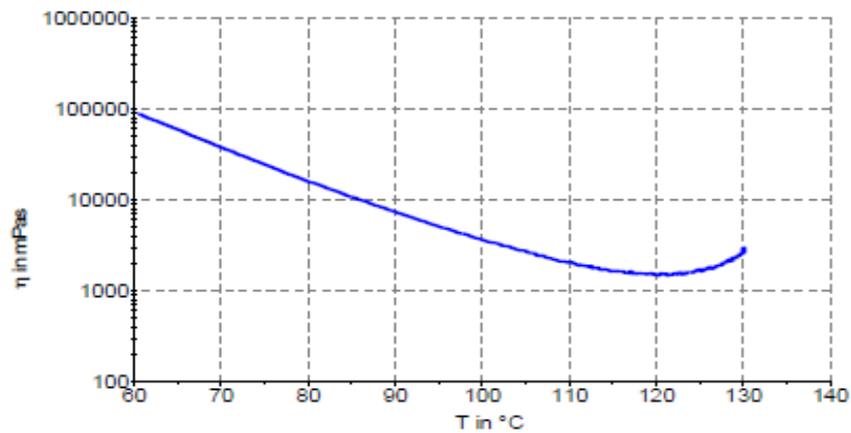


Grafico 2.3.3.1 Viscosità Cono/Piastra Vs Temperatura Resina IMP503Z [20]

Questo grafico suggerisce due possibili cicli di cura consigliati dal produttore: il primo a 110°C per 2 ore di durata e il secondo a 125°C per 1 ora.

E ciò comporta un ciclo di autoclave, suggerito dal fornitore del preimpregnato, a 125 °C del tipo:

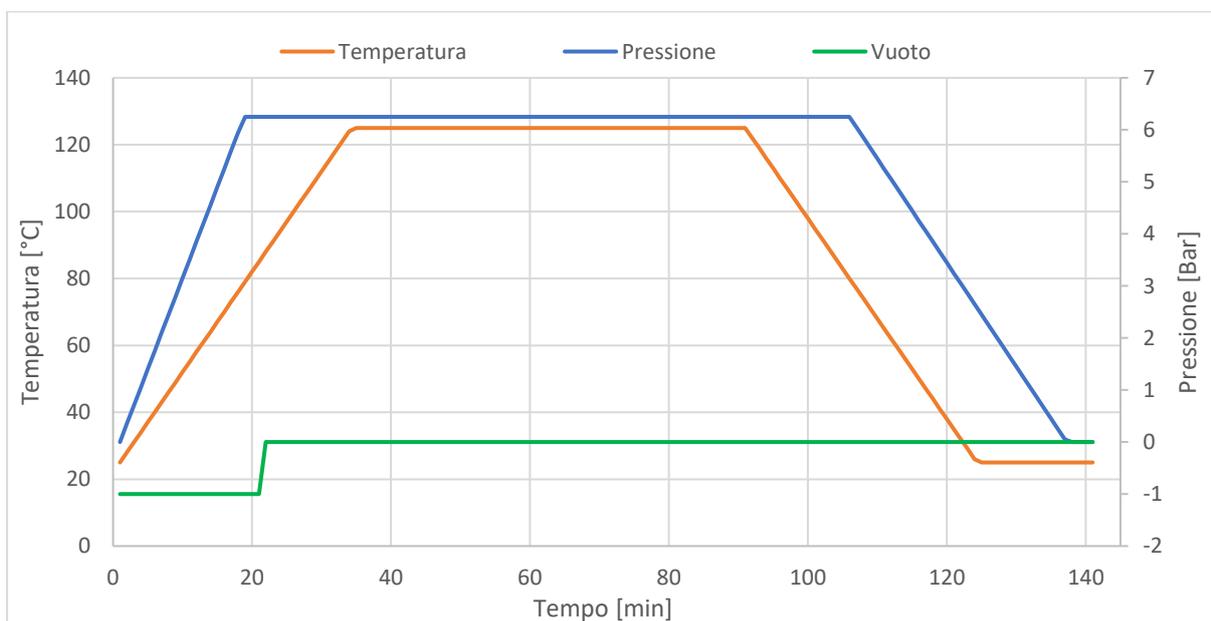


Grafico 2.3.3.2 Ciclo di Cura in autoclave fornito dal produttore Impregnatex Compositi [20]

I punti saldi di questo ciclo sono:

1. Dopo aver preparato il sacco applicare -0,9-1,0 Bar di vuoto ed inserire in autoclave,
2. Riscaldare a 125°C alla velocità di 1-3°C/min,
3. Applicare pressione, con una rampa tale da raggiungere il valore massimo possibile (es. 4÷7 Bar) prima degli 80 °C,
4. Raggiunta la pressione massima di processo è eventualmente possibile ridurre il valore di vuoto fino a -0.2 Bar,

5. A 125°C mantenere la temperatura e la pressione per 1 ora,
6. Raffreddare fino a 60°C sotto pressione, poi portare a pressione atmosferica l'autoclave,
7. A temperatura ambiente estrarre il pezzo dall'autoclave.

Questo è il ciclo teorico fornito nella scheda tecnica della resina, che poi va a essere modificato e ottimizzato minuziosamente durante la fase di messa in produzione. Solitamente vengono utilizzati come linee guida e riferimento.

Ma viste le proprietà termomeccaniche inferiori del tipo di stampi utilizzati solitamente per la produzione, che vengono prodotti o in carbonio preimpregnato per stampi o alluminio, si è dovuto creare e testare un ciclo che tenesse in considerazione le caratteristiche sia della resina da impregnazione manuale (SR 1700) sia quella presente nel preimpregnato (IMP503Z). Le maggiori limitazioni sono dovute alla Tg della resina SR1700, che utilizzando l'appropriato indurente, si attesta a 98°C [30]. A quella temperatura bisogna stare attenti alle possibili alterazioni che lo stampo può subire nel ciclo d'autoclave dovuta alla pressione applicata, quindi il range di 4- 7 Bar consigliato da Impregnatex Compositi non è utilizzabile. La maggior pressione applicata permette una migliore compattazione del laminato ma ostacola il movimento della resina all'interno del componente stesso, per agevolare ciò viene innalzata la temperatura fino al minimo di viscosità della resina del preimpregnato.

Non potendo sfruttare la temperatura si è puntato a raggiungere la massima temperatura possibile, ovvero 100 °C considerando anche la leggera non uniformità di temperatura all'interno della camera, ma applicare una pressione inferiore (2 Bar) per non ostacolare la resina. Essa, anche se avrà maggiore viscosità, vista la minor pressione potrà riempire uniformemente il laminato, a coadiuvare tutto ciò vi è un aumento della durata del mantenimento in pressione e temperature massime (180 minuti) e la continua applicazione del vuoto al componente, in modo da avere comunque una resa ottimale del ciclo. Vi è una unica problematica rilevante nell'utilizzo di questo ciclo: all'aumentare del numero di cicli subiti dagli stampi comporta una serie di leggeri e superficiali rammollimenti dal lato esterno dello stampo che possono causare, dopo 15/20 stampate, cricche e danneggiamento degli stessi. Il danneggiamento avviene maggiormente dal lato esterno, perché nel lato stampo a contatto con il laminato lo strato di gel coat epossidico, che ha una Tg di circa 140 °C, mantiene le proprietà meccaniche adeguate a non deformarsi durante il ciclo. Per ridurre questa problematica si utilizza inoltre, una salita di pressione e di temperatura molto lenti e graduali per evitare di creare sollecitazioni troppo elevate allo stampo stesso. Ricapitolando il ciclo dedicato è rappresentato successivamente:

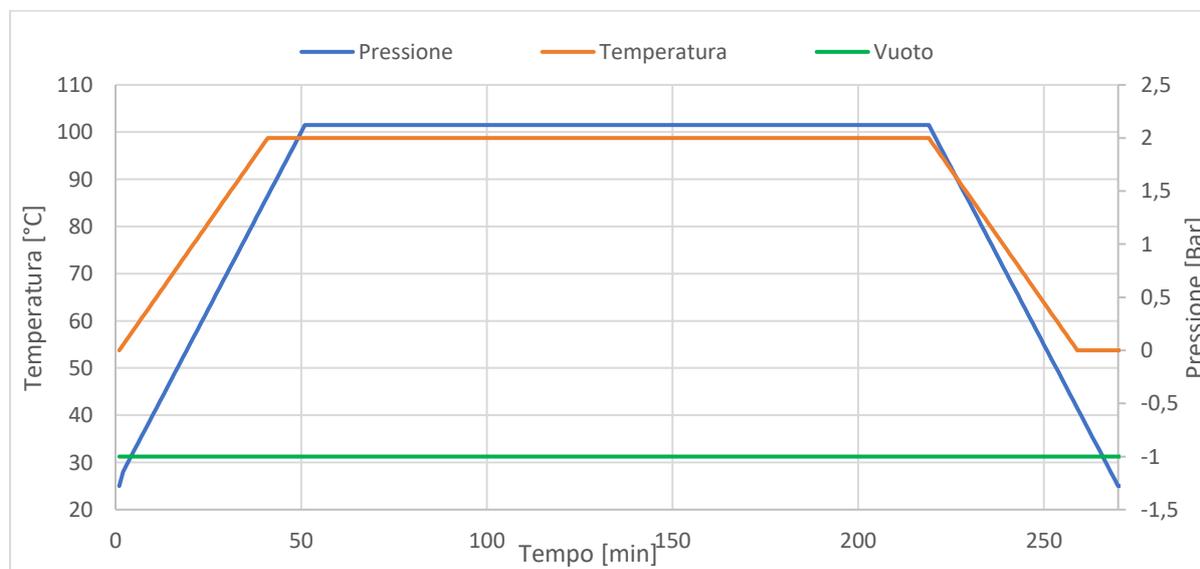


Grafico 2.3.3.3 Ciclo di cura proposto per le attrezzature disponibili

Questo ciclo è caratterizzato da:

- Salita termica molto lenta 1,5 °C/min,
- Aumento pressione molto graduale 0,05 Bar/min,
- Mantenimento molto lungo 180 min,
- Diminuzione di temperatura e pressione molto graduale,
- Vuoto sempre inserito ad -1 Bar.

Dopo i primi cicli di prova su entrambi gli stampi è stato mantenuto senza modifiche, poiché si sono ottenuti pezzi di buona qualità e non sono state rilevate problematiche eccessive sugli stampi, anche dopo qualche ciclo di autoclave

L'autoclave che verrà utilizzata per tutti i cicli citati si tratta di una versione a volume ridotto rispetto a quelle per la produzione, ha un piano interno di 1,30 per 1 m e un'altezza di 1 m. Ha un sistema indipendente di vuoto e un controller elettronico che consente di monitorare qualsiasi parametro inerente al ciclo in tempo reale. Può raggiungere pressioni di 6 Bar e temperature prossime ai 200 °C, abbondantemente superiori alle necessità del progetto. La possibilità di avere una autoclave al di fuori del grosso flusso produttivo aziendale ha permesso di poter sperimentare e utilizzarla come banco di prova e sperimentale.



Figura 1.3.3.1 Autoclave utilizzata per i cicli proposti

3. Analisi Componenti

In questa si analizzeranno i vari componenti dell'oggetto di partenza del progetto di reverse engineering e sul dimensionamento delle varie componenti per ottenere i risultati della riduzione minima del 30% per ogni componente riprogettato. Di seguito una tabella con i componenti singoli, i loro pesi e la loro influenza sul peso totale dell'oggetto finito, dove per Truck si intende il complessivo tra assali e staffe che forniscono il collegamento tra la tavola e le ruote.

| Componente | Peso [g] | Frazione rispetto al peso totale [%] |
|---|----------|--------------------------------------|
| Tavola | 2021 | 25,91 |
| Truck Anteriore completo di ruote | 1056 | 13,54 |
| Batteria | 1287 | 16,50 |
| Truck Posteriore con Ruota e Motore elettrico | 2032 | 26,05 |
| Elettronica | 80 | 1,03 |
| Vano Portabatteria | 767 | 9,83 |
| Accessori | 556 | 7,13 |
| TOTALE | 7799 | 100,00 |

Tabella 3.1 Riepilogo pesi e frazione in peso dei vari componenti del Longboard

L'analisi preliminare sulla tavola di partenza ha restituito una fotografia della situazione di partenza: in base a questa tabella ci si è focalizzati sui componenti che potevano essere modificati e che avessero il maggior impatto a livello di peso.

Perciò come primo elemento preso in considerazione è stata la tavola. In secondo luogo, il vano portabatteria visto il sovradimensionamento notato nella fase di smontaggio.

Per l'analisi dei singoli componenti verranno utilizzati strumenti di analisi computerizzata, per poter stimare e comprendere lo sforzo esercitato sul componente. Un ostacolo a questa analisi sarà la particolarità dei laminati e la loro anisotropia intrinseca che porterà problematiche con le analisi che applicheremo. Purtroppo, non si è potuti accedere a software di analisi FEM specifici, perciò si è cercato di ottenere dati più veritieri possibili prima di inserirli come base per l'avvio dell'analisi.

3.1 Tavola

La tavola sicuramente è il componente che sia per estensione e che per massa influenza di più tutto il complessivo, quindi è stato l'elemento focale del progetto.

Quella originale, utilizzando i dati ottenuti dal produttore, è composta da una serie di lamine di legno più dei rinforzi in fibra di vetro intermezzati all'interno. Questa composizione le permette sia di resistere al peso di 120 kg e comunque di avere una freccia massima di un paio di cm.

Ha uno spessore di 13,4 mm, una lunghezza di 97 cm e una larghezza che varia dai 10 cm ai 25 cm.



Figura 3.1.1 Tavola originale

Per avere una stima preliminare delle proprietà meccaniche della tavola si è utilizzato un software di modellazione 3D per ricreare una tavola equivalente per dimensioni, spessore e simmetria. Una volta ottenuto il rendering si è studiato quale fosse lo sforzo principale a cui viene sottoposta la tavola in fase di utilizzo.

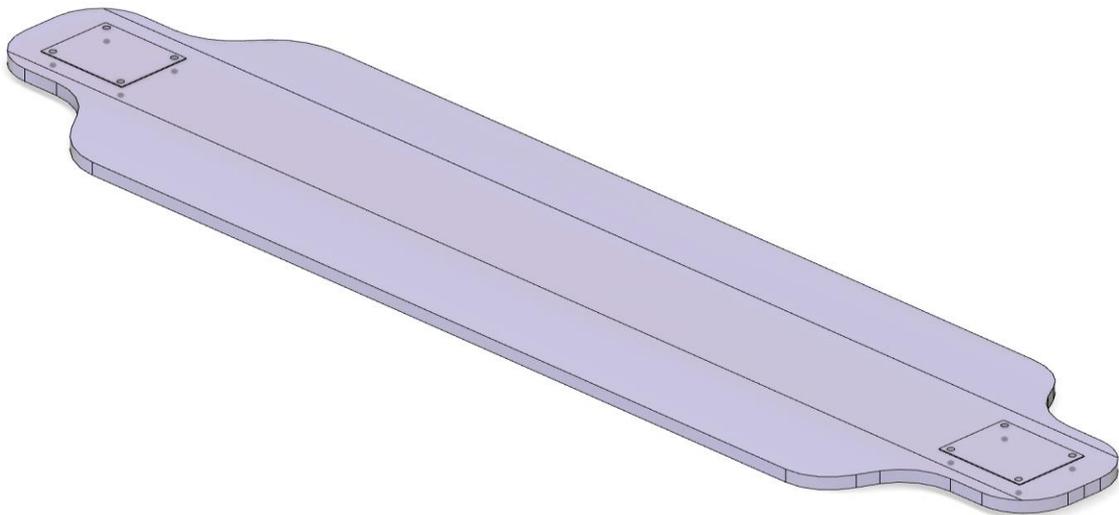


Figura 3.1.2 Rendering 3D Tavola, Rendering Fusion 360 Autodesk

Con un'osservazione accurata attraverso esperienza personale e analisi video, si è potuti dedurre che lo sforzo maggiore deriva dall'applicazione del peso dell'utilizzatore sulla tavola attraverso i piedi del soggetto stesso. Quindi si è partiti dall'ipotizzare uno studio di una flessione a punti con i due vincoli corrispondenti agli assali del Longboard o detti truck.



Figura 3.1.3 Schematizzazione Forze applicate nel test, Fusion 360 Autodesk

Questi vincoli influiranno sulla struttura solo lungo l'asse Z, ovvero quello verticale, e ci permetteranno la lieve salita della tavola nella zona opposta a quella di massima freccia. Le zone di appoggio sono state modellizzate quanto più simili a quelle reali con una zona di vincolo che comprenda sia i quattro fori sia la zona di contatto tra gli assali e tavola. La tavola reale è perfettamente simmetrica e questo semplifica di molto la computazione di tutta simulazione successiva. Sia per il disegno che per la simulazione è stato utilizzato il pacchetto Autodesk che ha consentito l'ottenimento di risultati accettabili rispetto alla situazione reale. È stato utilizzato in larga parte il software Fusion 3D soprattutto per l'analisi FEM su cui baseremo un primo dimensionamento della successiva tavola in carbonio. Un libro di ingegneria descriva l'analisi FEM come:

“Il Metodo degli Elementi Finiti, ovvero FEM (Finite Element Method), una tecnica dell'Analisi Numerica volta ad ottenere, come anticipato, soluzioni approssimate per una molteplicità di problemi, non solo di Ingegneria Strutturale, ma anche di Fisica, Bioingegneria, Astronomia. Benché originariamente sviluppato per studiare il campo tensionale nelle strutture aeronautiche, è stato poi esteso ed applicato al vasto campo della Meccanica dei continui. Per la sua varietà di impiego e duttilità quale strumento di analisi, è stato sviluppato ed è attualmente utilizzato nelle Università e nell'Industria. In numerosi problemi fisici e ingegneristici risulta sufficiente ottenere soluzioni numeriche approssimate, piuttosto che soluzioni analitiche esatte di difficile utilizzo pratico.” [45]

Questo tipo di analisi utilizza elementi tetraedrici o triangolari per poter approssimare la forma dell'oggetto analizzato e andare a calcolare nei nodi di contatto le forze risultanti. La dimensione e la forma di questi elementi fornisce una maggiore o una minore precisione della simulazione.



Figura 3.1.4 Rappresentazione Mesh su modello Fusion 360 Autodesk

Nella immagine vi è una esemplificazione del sistema di approssimazione matematica che si ottiene tramite la creazione di una mesh ad elementi tetragonali, questi hanno una dimensione abbastanza elevata per una motivazione di rappresentazione grafica, per l'analisi strutturale sono stati implementati elementi di dimensione notevolmente inferiori.

Invece per le caratteristiche del materiale si sono utilizzati una serie di parametri stimati dalla mediazione di dati in letteratura e di dati della libreria del software:

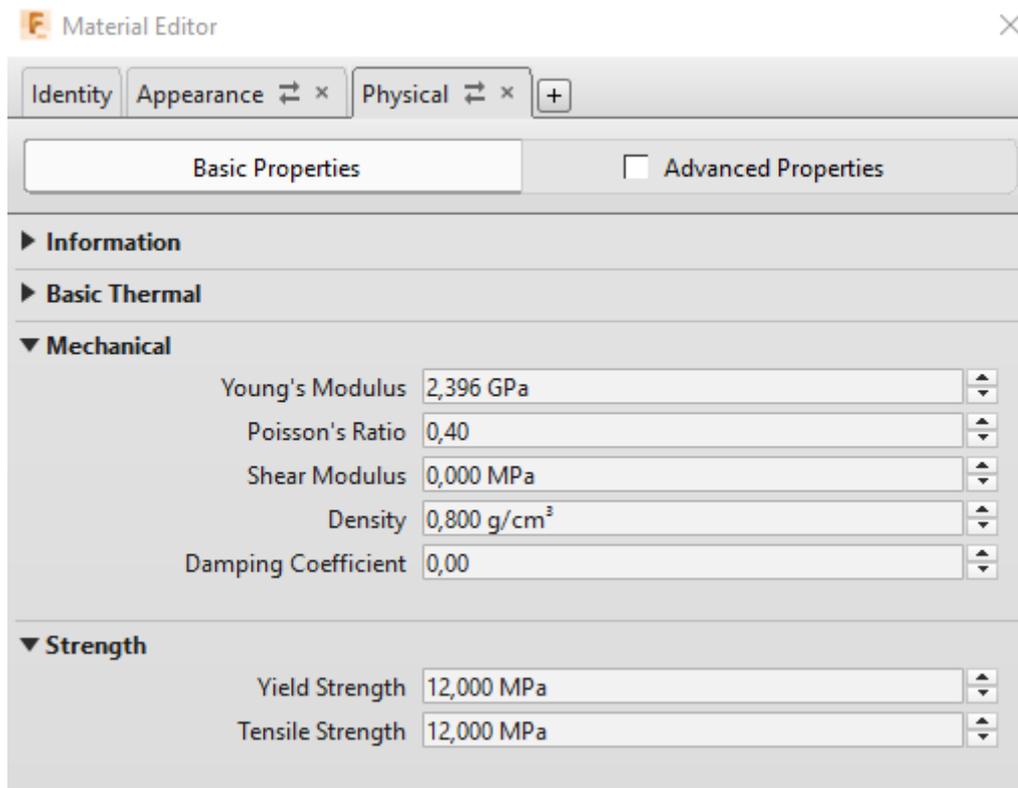


Figura 3.1.5 Proprietà meccaniche Legno inserite nella simulazione di Fusion 360 Autodesk

Dopo aver posto, come accennato precedentemente, sia i vincoli che le forze di carico, che sono state applicate simmetricamente e ad una distanza ideale per l'utilizzo della tavola e una area equivalente all'impronta di una persona nella media. Il carico applicato è stato impostato utilizzando il carico limite di utilizzo dichiarati dal venditore, ovvero 120 kg, equamente divisi su entrambi gli appoggi.

Come prima analisi ci si è concentrati sulla freccia di deformazione sull'asse Z, ottenendo dati molto simili a quelli rilevati in messa in utilizzo. Le zone colorate in rosso, come ci si aspettava, hanno il massimo della deformazione che si attesta a 11,23 mm quindi pienamente tollerabile considerando un'altezza minima dell'oggetto rispetto al piano di utilizzo di 100 mm.

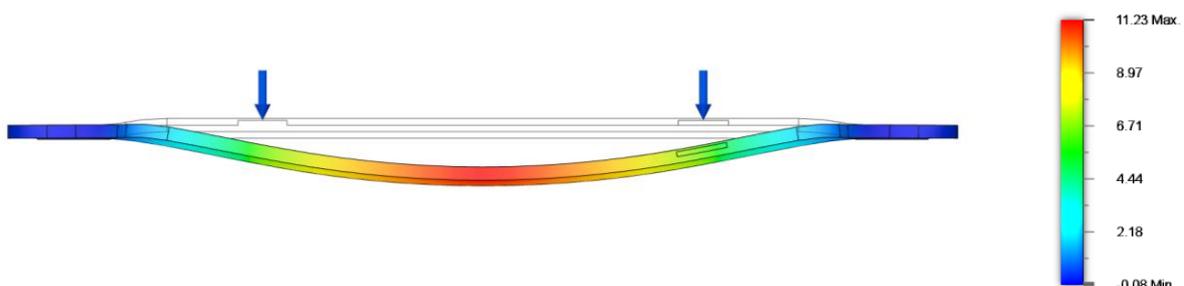


Figura 3.1.6 Risultati simulazione FEM sulla deformazione lungo Asse Z Fusion 360 Autodesk

In seguito per analizzare la possibilità di rottura della tavola si è effettuato un'analisi del coefficiente di sicurezza.

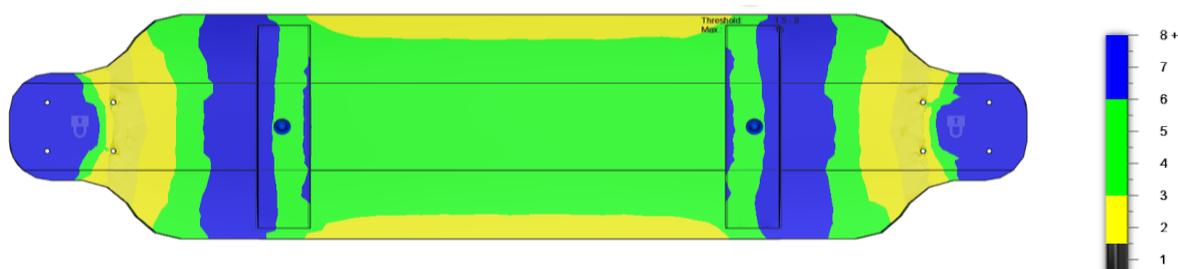


Figura 3.1.7 Risultati simulazione FEM sul coefficiente di sicurezza Fusion 360 Autodesk

Da questa analisi si notano le zone più significative di sollecitazione, in giallo, che hanno il rapporto tra il carico applicato e la resistenza del materiale intorno a 2. Questo valore, visto la non criticità dell'elemento studiato e il materiale preso in considerazione, è accettabile anche se abbastanza risicato. Sicuramente l'analisi è effettuata al livello non massimo di precisione e quindi potrebbe avere risultati non totalmente affidabili, ma indica anche una tirata progettazione che ha risalto anche in altri elementi del Longboard. Dopo aver visto questi dati si è iniziato ad ipotizzare possibili tipi di laminazione di progettazione per la tavola in carbonio. Per poter iniziare a stimare le proprietà del laminato si è ricorso ad una equazione empirica ma con notevole supporto a livello di progettazione: il fattore di Krenkel in aggiunta all'equazione di Voight.

$$E_c = \eta_{\theta} E_f V_f + E_m V_m$$

Equazione 3.1.1 Equazione di Voight con l'aggiunta del fattore di Krenkel [28]

Dove:

- E_c = Modulo di Young del composito,
- η_{θ} = Fattore di Krenkel,
- E_f = Modulo di Young delle fibre,
- V_f = Frazione in volume delle fibre,
- E_m = Modulo di Young della matrice,
- V_m = Frazione in volume della matrice.

Prendendo la scheda tecnica del preimpregnato:

| Materiale | Resistenza a Flessione ASTM D790 [Mpa] | Modulo elastico a flessione ASTM D790 [Gpa] | ILSS ASTM 2344 [N/mm ²] | Volume di fibra nel laminato [%] |
|-----------|--|---|-------------------------------------|----------------------------------|
| GG204P | 810 | 53 | 66 | 59 |
| GG205T | 810 | 55 | 68 | 58 |
| GG630T | 730 | 57 | 56 | 64 |

Tabella 3.1.1 Datasheet Preimpregnati Impregnatex Compositi [20]

I test a flessione, per resistenza e modulo di Young, sono praticamente gli stessi dei materiali tradizionali mentre invece, il test ILSS si tratta di una prova specifica per i materiali compositi: viene utilizzato per determinare la resistenza al taglio interlaminare delle fibre parallele. È applicabile a tutti i tipi di materiali plastici rinforzati e ai compositi.

Utilizzando i dati ricavati dalla scheda tecnica del materiale che utilizzeremo in laminazione e scegliendo un valore del parametro di Krenkel appropriato di 0.375, per via della multi-direzionalità delle fibre nel laminato, si è ricavato un valore di $E_c = 14,58$ GPa e di resistenza a rottura di 200 Mpa e inseriti nel software.

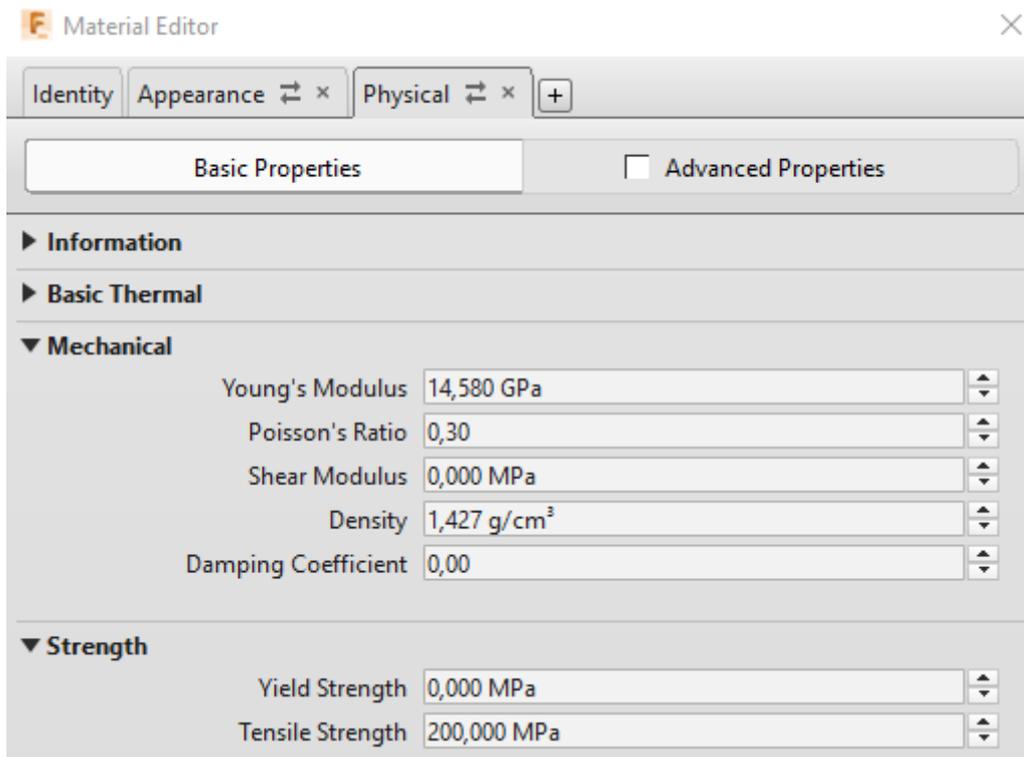


Figura 3.1.8 Proprietà meccaniche Carbonio inserite nella simulazione

Vista la diversa metodologia di produzione dei componenti in composito a fibre lunghe si è voluto cambiare la tipologia di elemento da analizzare: si è creata una struttura a guscio, vuota all'interno, con uno spessore di 1,2 mm, quello ipotizzabile dal numero di pelli che successivamente verranno poi applicate.

Di seguito le analisi ottenute:

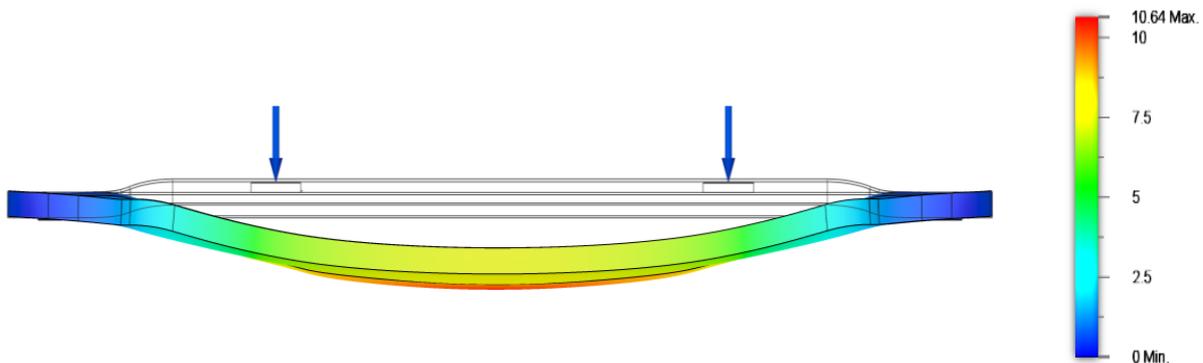


Figura 3.1.9 Risultati simulazione FEM sulla deformazione lungo Asse Z Fusion 360 Autodesk

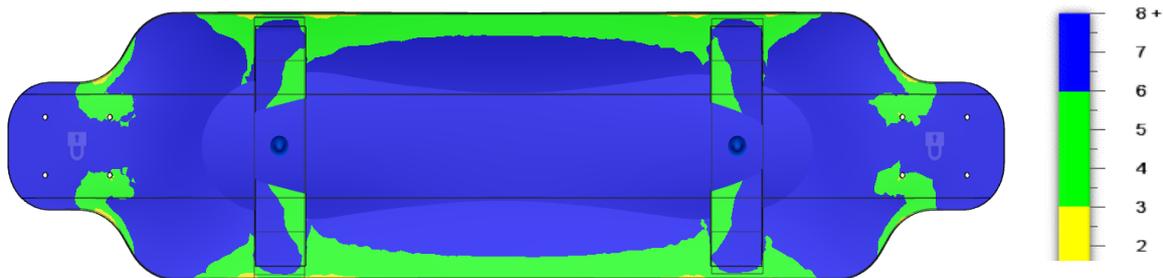


Figura 3.1.10 Risultati simulazione FEM sul coefficiente di sicurezza Fusion 360 Autodesk

Queste analisi valorizzano l'idea iniziale del progetto, andando ad utilizzare un quantitativo di materiale molto minore si possono ottenere caratteristiche molto simili a quelle del componente originale. In queste immagini si nota un leggero collasso della struttura a guscio dovuta alla mancanza di un qualsiasi supporto interno, cosa che poi non avverrà nella messa in produzione vista la presenza di un ore.

Non prendendo come completamente veritiere queste simulazioni ci forniscono comunque una idea di possibile comportamento dell'elemento sotto l'applicazione di questo sistema di carico.

3.2. Vano Portabatteria

Il secondo oggetto preso in analisi è il vano portabatteria, molto esteso e in materiale plastico che conteneva la parte elettronica e la grossa batteria di alimentazione. La batteria è l'unico elemento che potrebbe creare sollecitazioni di tipo strutturale, ma essendo un carico distribuito e comunque molto ridotto (1.2 Kg) non è stata ritenuta come elemento di una possibile criticità strutturale.



Figura 3.2.1 Fronte del Vano portabatteria

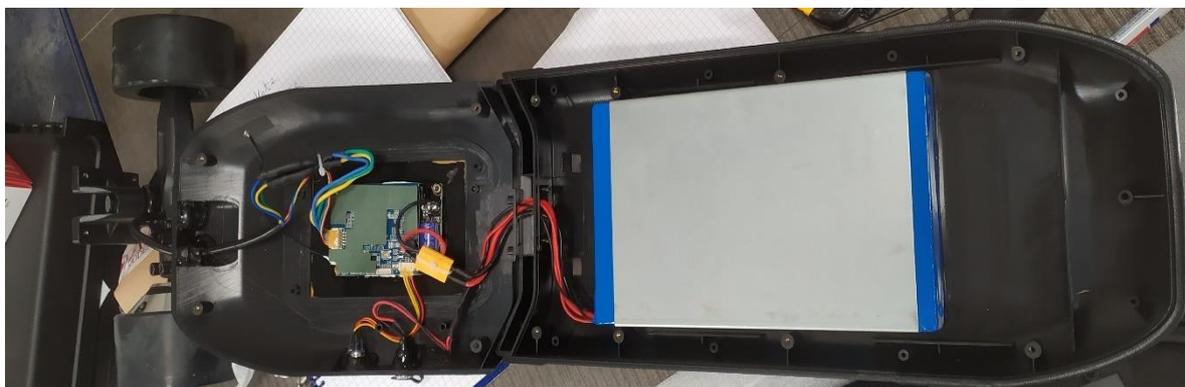


Figura 3.2.2 Retro del Vano portabatteria

Molto più interessante è stato il lavoro di redesign del vano stesso: dopo aver notato le ridotte dimensioni delle componenti interne (la scheda elettronica di controllo del motore e la batteria) è stato deciso un notevole ridimensionamento. Si sono analizzati i componenti interni e le possibili problematiche della riduzione del vano. Come viene mostrato nell'immagine successiva, questa forma a doppia variazione di larghezza che è stata pensata per lasciare spazio sia per le placchette che verranno utilizzate per il montaggio finale sia per poter ospitare la batteria, in una condizione del tutto simile al vano originale.

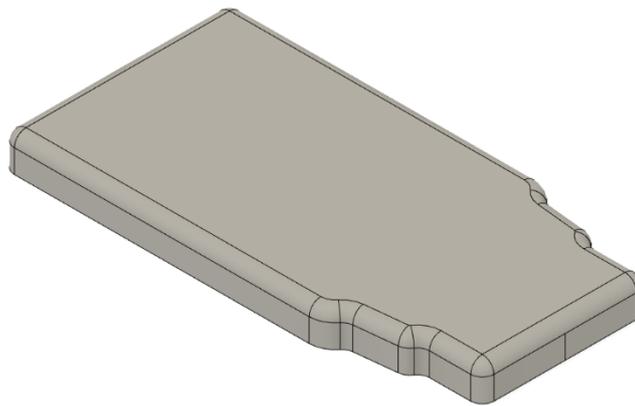


Figura 3.2.3 Rendering 3D del nuovo Vano portabatteria, Rendering Fusion 360 Autodesk

Invece, la doppia riduzione di larghezza è dovuta sia al posizionamento finale nel componente, la parte più rastemata andrà nella zona di riduzione della larghezza della tavola, e sia alla necessità di avere superfici piane dove poter applicare il pulsante di accensione e la presa di ricarica.

In figura sottostante il confronto tra i due vani:

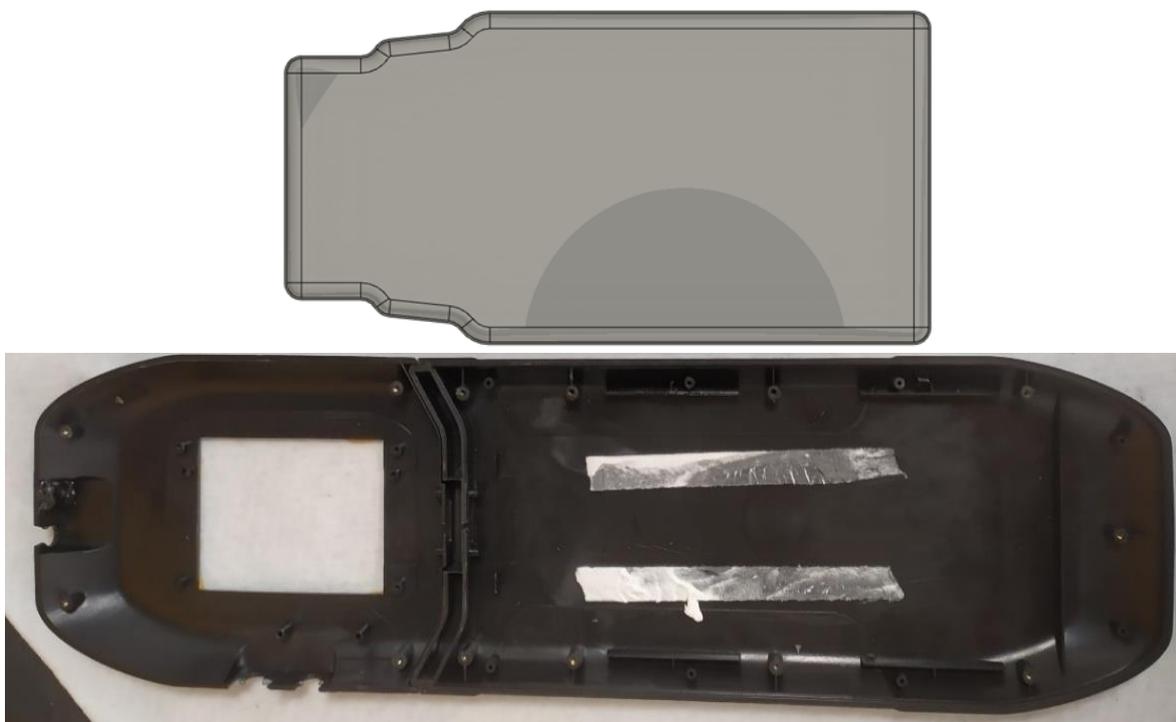


Figura 3.2.4 Confronto dei due vani

Il vano originale ha delle dimensioni di 670 mm per 190 mm, quello ridisegnato lascia intatta la dimensione laterale ma si riduce in lunghezza a 380 mm.

A livello meccanico non vi sono evidenti differenze tra i due elementi, bisognerà solo aver cura di creare un isolamento tra carbonio e elettronica per evitare di avere possibili problematiche di natura elettrica. Il sistema di montaggio sarà il medesimo visto sulla tavola originale solo utilizzando delle placchette filettate di fissaggio incollate sul vano in AISI 316L per prevenire qualsiasi forma di corrosione galvanica.

3.3 Strategie di Laminazione

Dopo aver eseguito una attenta analisi strutturale si sono ipotizzate alcune possibili laminazioni per soddisfare le proprietà meccaniche richieste, oltre ad alcune laminazioni di warm up per capire se vi fossero problematiche con il nuovo ciclo di cura sia per i laminati sia per gli stampi.

3.3.1 Tavola

Dopo aver analizzato i dati derivanti dall'analisi strutturale sono state formulate possibili laminazioni per poter ottenere dei risultati paragonabili alla tavola originale avendo un risparmio di peso sfruttando le migliori caratteristiche meccaniche delle fibre di carbonio.

Per il primo prototipo gli obiettivi sono stati la massima leggerezza e la facilità di laminazione per poter monitorare il comportamento dello stampo e del materiale laminato, ai fini di avere la completa polimerizzazione e minimizzare i possibili punti di eccesso di resina o di imperfezione estetica.

Per il primo prototipo si è utilizzata una laminazione simili a quella di componenti paragonabili prodotti in azienda: come prima pelle, lato stampo, è stato scelto un preimpregnato in carbonio di una grammatura di 204 g/m² con una tessitura di tipo Plain, puramente per scelta di resa estetica, nonostante la struttura Plain possa creare una leggera difficoltà nella stesura dovuta alla minore drappabilità intrinseca al Twill o Satin.

Si è passati a un tessuto di tipo Twill, meccanicamente più prestazionale, da 630 g/m² per fornire sia maggior rigidità alla tavola che per creare maggiore spessore per evitare l'eccessiva flessione. Continuando con questa logica il secondo strato è orientato a 0°, ovvero il tessuto non subisce una rotazione rispetto alla figura dello stampo, per poter direzionare ottimamente le fibre nella direzione di massimo sforzo.

Il terzo strato viene invece posto a 45° rispetto al precedente in modo da soddisfare gli sforzi a torsione che si hanno durante la fase di sterzata.

Per la quarta pelle si è ritornati all'orientamento 0° per dar maggior resistenza lungo l'asse della sollecitazione e per conferire una simmetria alla laminazione, la quale comporta una minor anisotropia nell'oggetto finale.

Riepilogando quindi si è proceduto con una laminazione costituita:

- Prima pelle di 204 g/m² Plain con orientamento 0°,
- Seconda pelle di 630 g/m² Twill con orientamento 0°,
- Terza pelle di 630 g/m² Twill con orientamento a 45°,
- Quarta pelle di 630 g/m² Twill con orientamento a 0°.

Lo spessore dopo ciclo di cura di questo laminato intorno ai 1,5 mm, veramente esiguo, con un peso del finito intorno ai 670 g. È risultata una laminazione eccessivamente ottimistica, a livello di prestazioni meccaniche, ma ha avuto soprattutto la funzione di prova dell'attrezzatura, dell'ottimizzazione del ciclo di autoclave e della verifica della completa reticolazione della resina all'interno del preimpregnato, visti i parametri completamente differenti e sperimentali rispetto ai cicli standard utilizzati in azienda.

Per il prototipo numero 2, dopo aver verificato le necessità di modifica del primo prototipo, si è proceduto all'inserimento di un core interno in modo da poter aumentare la sezione senza aumentare significativamente il peso e le tempistiche di laminazione.

Oltre al core interno da 10 mm, per poter avere una simmetria nel laminato è stata aggiunta una ulteriore pelle di 630 in modo da avere una struttura a sandwich completamente simmetrica.

Quindi si è proceduto con una laminazione costituita:

- Prima pelle di 204 g/m² Plain con orientamento 0°,
- Seconda pelle di 630 g/m² Twill con orientamento 0°,
- Terza pelle di 630 g/m² Twill con orientamento a 45°,
- Inserimento del core da 10 mm rivestito con lo strato superiore e inferiore di adesivo,
- Quarta pelle di 630 g/m² Twill con orientamento a 45°,
- Quinta pelle di 630 g/m² Twill con orientamento a 0°.

Il risultato di questa laminazione è stato una tavola molto più rigida e capace di sostenere carichi molto elevati ma con una certa mancanza di capacità torsionale indispensabile per la direzionabilità del longboard. Si è saliti ad uno spessore di 12 mm, paragonabile praticamente alla tavola iniziale, ma con un peso finale di 1242 g, molto inferiore a quello di riferimento.

Essendoci avvicinati molto al risultato finale con la laminazione precedente, si è puntato a piccole modifiche in modo da poter risparmiare sul peso e sullo spessore, e andando ad aumentare la flessibilità a livello torsionale.

Quindi si è proceduto con una laminazione costituita:

- Prima pelle di 204 g/m² Plain con orientamento 0°,
- Seconda pelle di 630 g/m² Twill con orientamento 45°,
- Terza pelle di 630 g/m² Twill con orientamento a 0°,
- Inserimento del core da 8 mm rivestito con lo strato superiore e inferiore di adesivo,
- Quarta pelle di 630 g/m² Twill con orientamento a 0°,
- Quinta pelle di 630 g/m² Twill con orientamento a 45°.

Si è realizzata una inversione delle pelli a 0° e a 45° del preimpregnato di grammatura superiore in modo da allontanare dall'asse neutro la componente del laminato che influisce sulla componente torsionale, ottenendo un risultato più compatibile con l'uso finale. Si è inoltre utilizzato un core più sottile e meno denso in modo da ridurre, anche se in piccola parte, sia i costi che il peso del manufatto finale.

Il risultato dopo il ciclo di cura è una tavola dallo spessore di circa 10 mm, con una deformazione torsionale che ne permetta l'utilizzo in opera senza avere una freccia di deformazione a flessione che ne comprometta l'utilizzo. Dopo la rifila si è arrivati ad un peso di 1048 g, inferiore della precedente, e la maggior torsione permessa permette un miglior feeling di utilizzo. Si è applicato un controstampo di gomma vulcanizzata per poter ottenere la planarità e una finitura superficiale migliore anche per il lato che rimane a contatto con il sacco a vuoto.

3.3.2 Vano portabatteria

Il vano portabatteria, vista la non problematicità del componente, è stato utilizzato come campione sia per testare il ciclo che per scegliere la resa estetica che si voleva ottenere.

Quindi il primo prototipo è stato laminato con due tessuti entrambi Twill ma di due grammature differenti, 204 g/m² e 630 g/m², per poter vedere la resa di questa tipologia di tessitura meno utilizzata per la finitura estetica. La prima pelle è stata applicata a 0° e la seconda a 45° in modo da bilanciare il laminato. Il risultato è stato ottimo già dal primo ciclo.

Nel secondo invece, proprio per poter confrontare le differenze di resa estetica, è stata cambiata la prima pelle: si è passati ad un 204 g/m² Plain.

Come poi verrà mostrato successivamente la resa estetica è diversa e dopo una piccola ricerca di mercato interna all'azienda si è preferiti rimanere sul tessuto Plain.

Ma dopo la prima prova di assemblaggio si è notato una eccessiva rigidità in senso trasversale del vano che impediva un completo accoppiamento tra tavola e vano perciò si è passati alla laminazione finale che è strutturata con:

- Prima pelle di 204 g/m² Plain con orientamento 0°,
- Seconda pelle di 630 g/m² Twill con orientamento 0°.

Si è applicato anche qui un controstampo di gomma vulcanizzata per poter ottenere la planarità necessaria alla successiva fase di incollaggio.

Tutti e tre i vani hanno uno spessore intorno ai 1,15 mm e un peso da rifilato di 130 g.

4. Tecnologie di Realizzazione delle Attrezzature

Dopo aver spiegato in maniera preliminare i passaggi precedenti alla messa in produzione della tavola, ora si passerà alla descrizione dei vari procedimenti per la realizzazione in primis delle attrezzature necessarie, poi dei componenti finiti.

4.1 Attrezzature

Per attrezzature si intendono tutti gli elementi che permettono la produzione del pezzo finito: gli stampi, i controstampi, le dime di rifila incollaggio e montaggio. In prima istanza analizzeremo le attrezzature create per la tavola, poi il vano portabatteria.

4.1.1 Tavola

La creazione dell'attrezzatura per la tavola ha creato alcune difficoltà per via del metodo utilizzato per creare lo stampo: utilizzare la tavola originale come master per lo stampo stesso.

Primo test che è stato effettuato riguardava la compatibilità tra la verniciatura della tavola, una normale vernice spray lucida per legno e i successivi trattamenti utilizzati per ottimizzarne la superficie.

Questo passaggio ha richiesto numerose prove in parti differenti della tavola per poter valutare eventuali reazioni tra vernice e il turapori e il distaccante utilizzato successivamente. Le suddette prove hanno causato un lieve danneggiamento dello strato di vernice della tavola che ha dovuto comportare una riverniciatura dell'elemento stesso con una vernice compatibile.

Un'altra problematica è emersa a causa della flessibilità della tavola e il poter garantire la stabilità dimensione della stessa durante il processo di creazione stampo in modo da poter avere una esatta replica.

Ad una prova preliminare del completamento del modello per la creazione del fuori figura con l'angolo di sforno, indispensabile per la successiva fuori uscita sia per i prototipi che del modello, si è notato una notevole deformazione della tavola anche solo sotto l'effetto di 1 Bar di vuoto.

Per verificare l'entità del problema della deformazione della tavola durante la formazione dello stampo, si è proceduto ad effettuare una prova applicando blocchetti di plastilina nel framezzo tra tavola e il piano utilizzato per il fuori figura.



Figura 4.1.1.1 Applicazione blocchetti di controllo sulla tavola

Successivamente è stato applicato il vuoto attraverso la realizzazione del sacco come se fosse lo step conclusivo della produzione dell'attrezzatura.

Il risultato dell'applicazione del vuoto è stato il completo appiattimento dei blocchi di plastilina, che prima del vuoto erano alti 1,5 cm. Una deformazione inaccettabile per la replicabilità del prototipo.



Figura 4.1.1.2 Risultato prova di deformazione dovute al vuoto

Questa deformazione verticale si ripercuoteva in un allargamento laterale della figura della tavola di 0.5 cm per lato nella zona di maggiore estensione.

Ciò era dovuto alla tasca che si formava tra tavola e piano di riferimento che causava una zona di differenza di pressione dovuta sia al sacco, che inglobando completamente sia il piano che la tavola applicava forza su entrambi i lati del complessivo, sia alla curvatura della tavola stessa nella parte centrale. Questa non planarità tra i due oggetti creava un gap di circa 1 cm che causava l'applicazione della forza derivante dal vuoto su un'area abbastanza riguardevole che provocava la successiva deformazione.

Per ovviare a ciò si è dovuti ricorrere ad una operazione di apertura di una zona del piano di riscontro in corrispondenza della zona centrale della tavola per poter avere uniformità di pressione da entrambi i lati della tavola stessa.



Figura 4.1.1.3 Creazione foro sul piano sottostante per evitare deformazioni dovute al vuoto della tavola

Successivamente per colmare il gap tra la tavola e il piano si è dovuti provvedere all'applicazione di uno stucco poliestere ad alta resistenza per creazione sia del raccordo tra i due piani che per l'angolo di sforno dello stampo.



Figura 4.1.1.4 Creazione raccordo tra tavola e piano fuori figura

Dopo consolidato il sistema, si è applicato uno stato di turapori, in modo da ottenere la miglior finitura possibile, e successivamente un ciclo di distaccanti per poter poi procedere alla separazione stampo-master. Lo step successivo (il primo della creazione dell'attrezzatura) è il rivestimento del master con uno strato di gel coat epossidico in modo da avere la miglior finitura superficiale possibile.

Il gel coat crea una superficie dura e compatta a bassa porosità. Fatto reticolare il gel coat si è passati al tessuto di carbonio secco da 200 g/m² tessuto Plain in modo avere la miglior drappabilità possibile vista la presenza di quattro mezzelune a spigolo che potevano presentare problemi ad essere riportate sullo stampo, in seguito è stata applicata la resina epossidica da impregnazione manuale SR 1700 fino al completo rivestimento della fibra. Dopo aver steso la prima pelle si è passati al tessuto 800 g/m² per dare resistenza e struttura allo stampo. Sono stati applicati 6 strati di 800 con orientazione alternata tra 0° e 45° in modo da ottenere un buon bilanciamento del laminato e per evitare possibili distorsioni dello stampo nei cicli di cura successivi.

La stratifica risulta quindi:

- Prima pelle 200 g/ m² con orientamento 0°,
- Seconda pelle 800 g/ m² con orientamento 0°,
- Terza pelle 800 g/ m² con orientamento a 45°,
- Quarta pelle 800 g/ m² con orientamento 0°,
- Quinta pelle 800 g/ m² con orientamento a 45°,
- Sesta pelle 800 g/ m² con orientamento 0°,
- Settima pelle 800 g/ m² con orientamento a 45°.



Figura 4.1.1.5 Laminazione dello stampo

Conclusa la laminazione si è passati all'applicazione del film forato in PTFE, per consentire la fuoriuscita della resina in eccesso, dell'aeratore e del sacco a vuoto.

Per precauzione e per evitare il possibile danneggiamento sia della tavola che dello stucco si è preferito effettuare il ciclo di cura a temperatura e pressione ambiente per 24 ore per poi utilizzare un ciclo di post cura più spinto all'estrazione del master.



Figura 4.1.1.6 Applicazione sacco per ciclo di post-cura dello stampo

Il ciclo di post cura è stato effettuato in autoclave per 8 ore a 110 °C e 5 Bar di pressione. Il sacco a vuoto è stato applicato solo nella parte in figura dello stampo in modo da creare una variazione maggiore di pressione, in assoluto si è arrivati a 6 Bar, in modo da manifestare eventuali vuoti o imperfezioni dello stampo.

La temperatura così alta è stata una scelta meditata: una temperatura superiore alla Tg della resina (da scheda tecnica intorno alla temperatura di 100 °C) consente una maggiore compattazione del laminato dello stampo colmando in parte il ciclo di cura molto blando e consente la manifestazione delle possibili imperfezioni nel ciclo di post cura in modo che, dopo una attenta riparazione e finitura superficiale, non si verifichi durante il ciclo di cura del componente finito e crei imperfezioni estetiche o difetti strutturali.

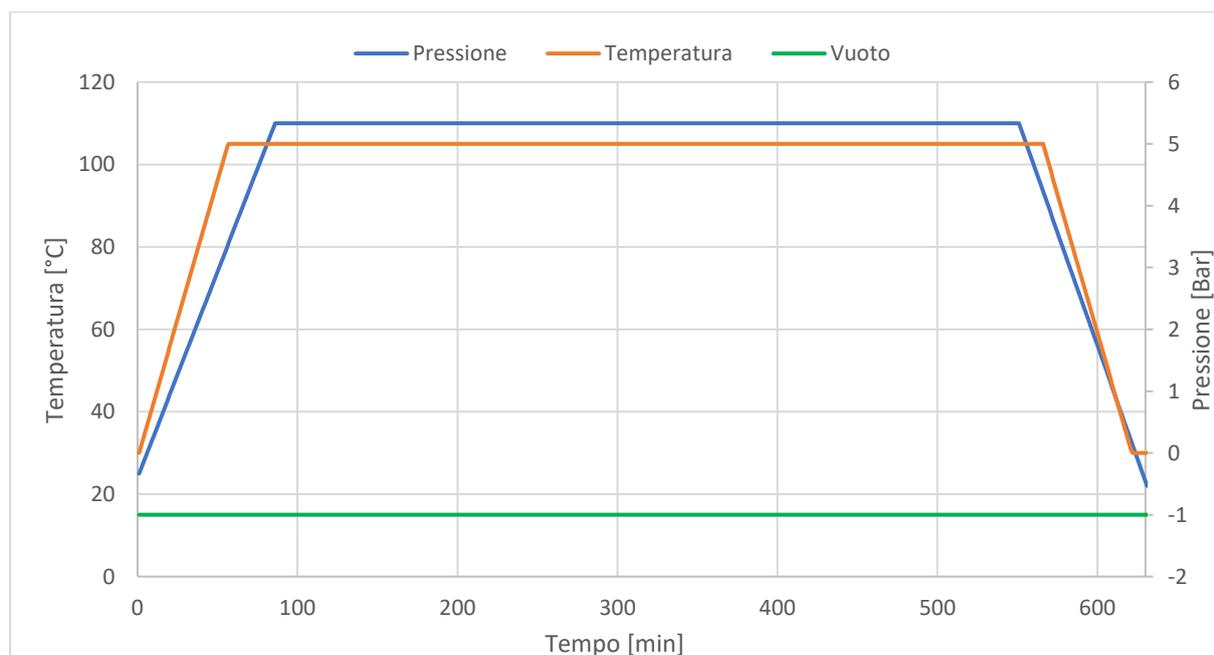


Tabella 4.1.1.1 Ciclo di Post Cura dello stampo

Effettivamente, come preventivato, si sono manifestate come zone di particolare difettosità proprio le quattro mezzelune in rilievo rispetto al piano principale dello stampo.



Figura 4.1.1.7 Vuoti nello stampo rilevati solo dopo il ciclo di post cura

Queste difettosità sono state dovute sia a una non perfetta laminazione dei vari strati di carbonio sia dal blando ciclo di cura a cui è stato sottoposto lo stampo. Comunque, le difettosità manifestatesi rientrano nella norma per stampi di questa fattura e non influenti sulla componente strutturale dello stesso.

Dopo aver utilizzato uno strumento di analisi a onde sonore per individuare tutti gli eventuali vuoti dello stampo, si è proceduto con una attenta e delicata opera di riparazione e finitura fino alla lucidatura a specchio della figura.

Operazioni nelle quali la presenza del gel coat da stampi ha consentito una ottima resa, soprattutto in figura, in modo da poi ottenere pezzi già di una qualità superficiale ottima e praticamente pronti alla rifinitura e lucidatura.



Figura 4.1.1.8 Stampo dopo il lavoro di rifinitura e pronto per la laminazione

4.1.2 Vano Portabatteria

Per la realizzazione del vano portabatteria, avendolo voluto ridisegnare completamente, si è partiti da un blocco di resina per modelli, per poi ricavare il master da utilizzare per lo stampo.



Figura 4.1.2.1 Tavola per modellazione

Dopo un lungo lavoro di modellazione manuale si è ottenuto un modello di partenza con alcune aggiunte di materiale per ottenere una figura stilisticamente accettabile ma soprattutto con i corretti angoli di sforno. Si è optati per una modellazione manuale dopo aver potuto esaminare in maniera accurata il rendering e avendo questa tavola direttamente a disposizione, senza dover acquistare una tavola specifica, con una altezza perfettamente compatibile con quella finale dell'oggetto.

Ciò ha permesso una maggiore velocità di messa in opera del progetto perché nel caso in cui si fosse dovuti ricorrere ad un fornitore esterno ci sarebbero volute tempistiche che avrebbero inficiato tutto il resto del progetto, tra l'approvvigionamento del materiale e la successiva lavorazione meccanica.



Figura 4.1.2.2 Tavola da modello dopo una prima sbazzatura

A questo punto si è passati alla costruzione del modello per poter ricavare il fuori figura dello stampo e allo stesso tempo ottenere una finitura superficiale, utilizzando uno stucco poliesteri, che consentisse di avere un componente finito accettabile esteticamente, poiché il componente è completamente a vista



Figura 4.1.2.3 Tavola da modello dopo la rifinitura

Ottenuto ciò si è passati ad applicare un prodotto turapori specifico per i modelli in resina per limitare le loro porosità. Si tratta di una resina polimerica compatibile con la tavola in resina epossidica disciolto in una resina organica che gli consente di penetrare in eventuali pori o graffi e creare una superficie più regolare e liscia, così da evitare il trasferimento di imperfezioni nel processo di creazione dell'attrezzatura.



Figura 4.1.2.4 Applicazione turapori

Successivamente si è applicato il ciclo completo di distaccanti filmogeni per poter avere una completa e facile separazione. Alla avvenuta presa del distaccante si è proceduto con un ciclo di lavorazione esattamente uguale a quello della tavola. Primo strato di gel coat per poter avere la ottimale finitura dello stampo:



Figura 4.1.2.5 Applicazione gel coat

Poi se continuato con la laminazione del tessuto di carbonio secco:



Figura 4.1.2.6 Laminazione carbonio

Con una stratifica:

- Prima pelle 200 g/m² con orientamento 0°,
- Seconda pelle 800 g/m² con orientamento 0°,
- Terza pelle 800 g/m² con orientamento a 45°,
- Quarta pelle 800 g/m² con orientamento 0°,
- Quinta pelle 800 g/m² con orientamento a 45°,
- Sesta pelle 800 g/m² con orientamento 0°,
- Settima pelle 800 g/m² con orientamento a 45°.

Successivamente viene applicato il film forato di PTFE, l'aeratore e il sacco a vuoto per procedere al processo di cura. Nella Figura successiva si nota la fuoriuscita della resina in eccesso durante il lungo processo di cura durato 24 ore, sempre con il vuoto applicato ed a una temperatura costante di 25 °C in una apposita camera climatizzata.



Figura 4.1.2.7 Fuoriuscita resina nel ciclo di cura

Appena estratto lo stampo risulta di ottima fattura con solamente qualche lieve irregolarità sul piano principale.



Figura 4.1.2.8 Stampo appena finito il ciclo di cura

Per verificare questa ottima finitura, lo stampo viene collocato in autoclave per poter effettuare il ciclo di post cura nello stesso ciclo di autoclave dello stampo della tavola per poter avere la maggior ottimizzazione energetica possibile.



Figura 4.1.2.8 Stampo pronto per il ciclo di postcura

Il ciclo di post cura, grazie ai parametri già descritti nel sottocapitolo precedente, ha mostrato tutte le difettosità dello stampo nelle zone di variazione di curvatura e negli spigoli superiori. Il piano invece non ha mostrato grandi problematiche tranne una non perfetta planarità, corretta successivamente in fase di finitura stampo, e una lieve porosità in alcune zone.

Successivamente in dettaglio le difettosità.



Figura 4.1.2.9 Problematica dopo il ciclo di postcura



Figura 4.1.2.10 Problematica dopo il ciclo di postcura

Dopo un processo di riempimento dei difetti e di finitura a specchio dello stampo si è arrivati ad un risultato soddisfacente per poter produrre il primo prototipo.



Figura 4.1.2.11 Stampo pronto per la laminazione

4.2 Prototipi

Avendo ora tutte le attrezzature necessarie si è proceduto a progettare e ottimizzare la laminazione e successivamente il montaggio finale della tavola.

4.2.1 Tavola

La laminazione della tavola è stata man mano modificata per poter andare incontro alle modifiche necessarie per l'utilizzo finale come spiegato nel capitolo 2.2.2 *Strategie di Laminazione*.

La parte che rimane in comune a tutti i prototipi è sicuramente la prima pelle: si tratta di un preimpregnato da 204 g/m² tessuto con trama Plain, Questo strato, essendo per la maggior parte di funzione estetica, necessita una notevole cura nel posizionamento e nell'evitare possibili stramature. Per stramature si intendono possibili distorsioni della trama dovute a uno scorrimento della trama sull'ordito.

Il tipo di tessuto scelto, grazie alla sua grande stabilità, non è così sensibile alla stramatura ma ha uno svantaggio: ha una drappabilità non ottimale, per questo nelle zone delle quattro mezzelune dello stampo. Perciò viene effettuato un taglio di apertura e la successiva applicazione di una striscia dello stesso materiale per colmare il taglio.

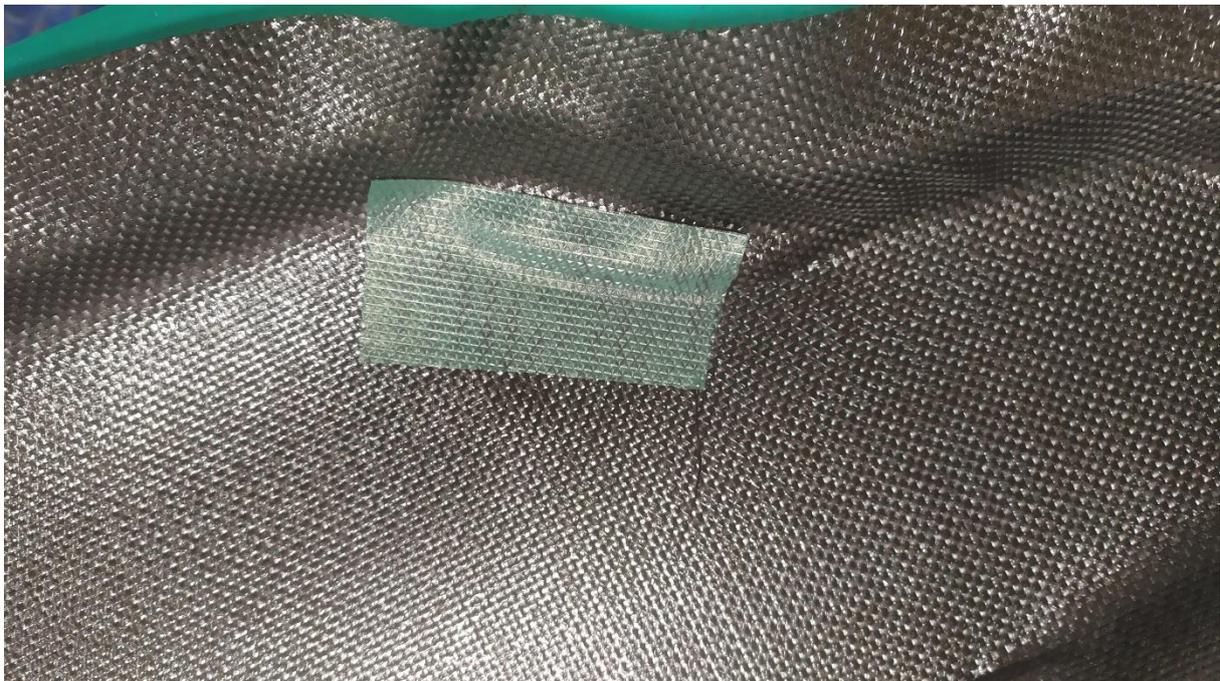


Figura 4.2.1.1 Laminazione prima pelle e apertura sulle mezzelune

Questa tecnica permette di prevenire la formazione di possibili accumuli di resina negli spigoli, come nel caso dei rilievi di questo stampo. Inoltre, in una zona di forte cambio di angolazione non si noterà la giunta delle due pelli. Invece, per il resto dello stampo si è cercato di utilizzare la pelle intera, con il minor numero di tagli. Purtroppo, nelle due estremità curve sarà indispensabile creare due piccoli tagli per far girare e accoppiare nella miglior maniera possibile la pelle allo stampo, il tutto viene consolidato attraverso lo step di prevuoto: ovvero lo stampo con solamente la prima pelle applicata viene inserito in un sacco a vuoto e tenuto in vuoto per 20 minuti.

Per le successive pelli di 630 g/m² invece, vista la maggior rigidità del tessuto sia per l'aumento della grammatura che per il cambio della tessitura (Twill), si è optato per una strategia di laminazione

completamente diversa: una pelle di carbonio solamente per la parte piana più una striscia per arrivare a riempire tutta la figura dello stampo e una parte del fuori figura per creare delle alette di estrazione.

Per questo scopo sono state create alcune dime in modo da poter tagliare in maniera precisa e ottimizzata, come consumo del materiale, tutti gli step successivi. La prima pelle di 630 viene tagliata in modo che sia perfettamente a filo della parte piana dello stampo e successivamente viene posta una striscia dello stesso tessuto e nella stessa direzione che va ad accavallarsi per circa 5 mm sulla pelle precedente e finisce al di fuori dello stampo.

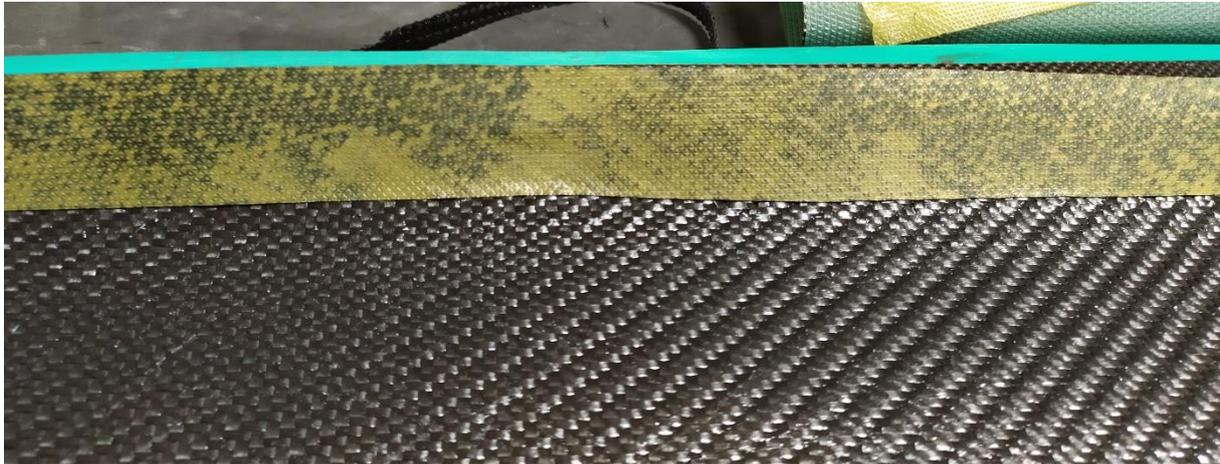


Figura 4.2.1.2. Laminazione seconda pelle con sormonto con la striscia aggiuntiva

Per evitare difettosità, negli strati successivi questo accavallamento verrà spostato: nella seconda pelle di 630 g/m² la pelle finirà a metà della zona di salita dello stampo e la striscia risulterà più esigua. Ciò evita possibili accumuli di resine nelle zone di accavallamento quindi ad avere un composito più resistente e stabile.

Il primo prototipo (SN1) ha una laminazione del tipo:

- Prima pelle di 204 g/m² Plain con orientamento 0°,
- Seconda pelle di 630 g/m² Twill con orientamento 0°,
- Terza pelle di 630 g/m² Twill con orientamento a 45°,
- Quarta pelle di 630 g/m² Twill con orientamento a 0°.

E il risultato ottenuto è stato:



Figura 4.2.1.3 Prototipo SN1

Questo pezzo è stato utilizzato anche come verifica del nuovo ciclo di autoclave realizzato appositamente per questi stampi e per la resina di questi specifici preimpregnati come descritto nel *Capitolo 2.3 Processi*.

Per il secondo prototipo è stato aggiunto, come già accennato, un core interno per poter aumentare la sezione senza aumentare troppo il peso.

L'inserimento del core comporta una serie di step aggiuntivi: il taglio del core e l'applicazione di due strati di film adesivo, con l'utilizzo di una dima leggermente modificata in modo da evitare di creare ulteriore spessore sulle quattro mezzelune. Inoltre, l'inserimento del core comporta l'aggiunta di una fase di prevuoto, oltre a quella standard dopo la prima pelle per far aderire il core agli strati precedenti di carbonio.



Figura 4.2.1.3 Adattamento del core allo stampo



Figura 4.2.1.4 Rivestimento del core con il film adesivo

Il secondo prototipo quindi (SN2) ha una laminazione del tipo:

- Prima pelle di 204 g/m² Plain con orientamento 0°,
- Seconda pelle di 630 g/m² Twill con orientamento 0°,
- Terza pelle di 630 g/m² Twill con orientamento a 45°,
- Primo strato di film adesivo,
- Inserimento del core,
- Secondo strato di film adesivo,
- Quarta pelle di 630 g/m² Twill con orientamento a 45°,
- Quinta pelle di 630 g/m² Twill con orientamento a 0°.

E il risultato ottenuto è stato:

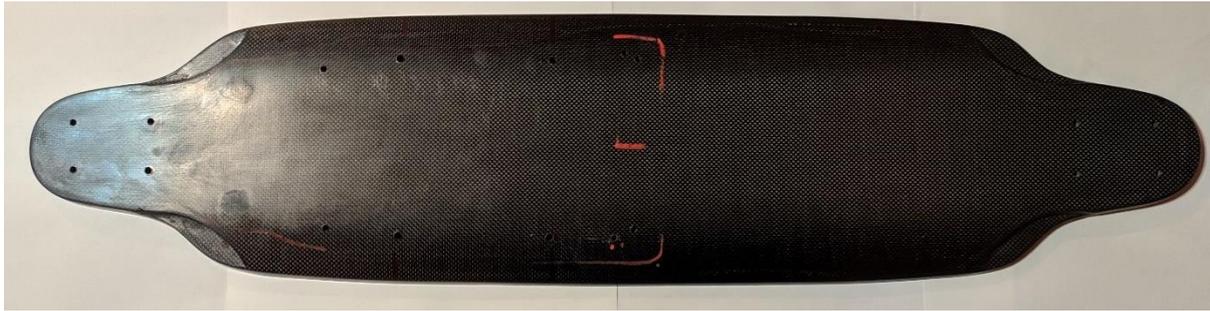


Figura 4.2.1.4 Prototipo SN2

L'inserimento del core, così creando una struttura a sandwich, ha comportato una necessaria aggiunta di una pelle supplementare di 630, per poter ottenere una struttura bilanciata ed evitare possibili failure

La tavola risultante ha alcune difettosità estetiche, dovute soprattutto ad un leggero collasso del core in alcune zone, e una notevole resistenza sia a torsione che a flessione.

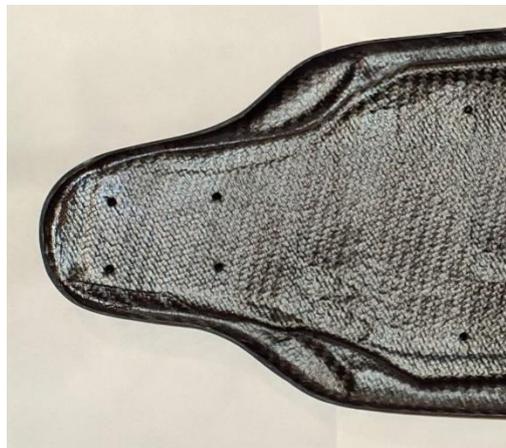


Figura 4.2.1.5 Prototipo SN2 Difettosità del core

Per ovviare a queste piccole imperfezioni si è proceduto ad alcune modifiche nel SN3.

Si è inserito un'altra tipologia di core, più resistente al calore per evitare il suo collasso all'interno del ciclo di cura, e si è invertito la stratificazione delle pelli: le pelli di 630 orientate a 45° sono state messe come prima e ultima in modo da allontanare il più possibile dall'asse neutro le pelli che contrastano la torsione della tavola e aumentarne la sollecitazione in modo da avere una maggiore deformazione sotto carico.

Quindi la laminazione risulta:

- Prima pelle di 204 g/m² Plain con orientamento 0°,
- Seconda pelle di 630 g/m² Twill con orientamento 45°,
- Terza pelle di 630 g/m² Twill con orientamento a 0°,
- Primo strato di film adesivo,
- Inserimento del core,
- Secondo strato di film adesivo,
- Quarta pelle di 630 g/m² Twill con orientamento a 0°,
- Quinta pelle di 630 g/m² Twill con orientamento a 45°.

Questa laminazione ha portato i risultati sperati sia in termini di resistenza torsionale e flessionale sia in termini di qualità estetica. Questo miglioramento, soprattutto dal lato sacco, è dovuto a due modifiche: il nuovo core e l'applicazione di un controstampo.

Il nuovo core è simile al precedente ma di uno spessore minore e con una maggiore compatibilità con il ciclo di autoclave e non collassando non ha creato quelle ondulazioni presenti nel SN2:



Figura 4.2.1.6 Core da 8 mm per il SN3

Per quanto riguarda il controstampo si tratta di una lamina di gomma già vulcanizzata di 5 mm formata a mano per adattarsi completamente e perfettamente alla tavola. Il controstampo permette una distribuzione uniforme della pressione e del vuoto sulla superficie esterna e permette una uniformità della resina e otticamente risulta trasparente e senza difettosità come se si fosse applicata una lavorazione di lucidatura e verniciatura successiva. Le difettosità vengono accumulate alla fine del controstampo in zone che poi verranno eliminate nella successiva lavorazione di rifilatura manuale. Il controstampo viene applicato dopo il film di PTFE.



Figura 4.2.1.7 Inserimento del controstampo

Tutte queste accortezze hanno portato ad una tavola con una quantità di difetti veramente limitati:



Figura 4.2.1.8 Lato sacco SN3



Figura 4.2.1.9 Lato Stampo SN3



Figura 4.2.1.9 Mezzaluna SN3

Come si può vedere dalle foto si sono riusciti ad ottenere ottimi risultati a livello estetico e la riduzione di sezione ha portato il risultato sperato, consentendo una maggiore maneggevolezza della tavola. Perciò questa configurazione è stata scelta per provvedere al confronto con quella originale. Si ha uno spessore di circa 10 mm e un peso dopo rifilatura di 1084 g.

4.2.2 Portabatteria

Per il vano portabatteria si sono provate laminazioni per lo più estetiche e di ottimizzazione nella fase di montaggio. Per questo i primi due componenti sono stati utilizzati come campioni estetici per scegliere la trama della pelle, visto la loro ridotta superficie rispetto a quella della tavola.

Come prima prova si è utilizzato un tessuto di grammatura 204 g/m² di tipo Twill con orientamento 0°, quindi diverso da quello utilizzato per la tavola, e lo stato successivo di tessuto 630 g/m² sempre Twill orientata a 45° per garantire le minime proprietà meccaniche richieste. Per la prima pelle estetica si è cercato di non creare interruzioni della pelle anche se vi sono state alcune difficoltà. Necessariamente però si sono dovuti effettuare quattro tagli nei quattro spigoli raggiati per poter laminare l'oggetto. Per lo strato successivo dal peso superiore invece si è dovuto ricorrere alla stessa procedura della tavola: si è tagliata una pelle unica solo per la parte planare dello stampo e successivamente è stata applicata una

striscia con lo stesso orientamento per creare la parte verticale del pezzo. Il secondo pezzo invece è stato laminato variando solo la prima pelle, utilizzando lo stesso 204 g/m² Plain della tavola, per avere una uniformità estetica con la tavola.



Figura 4.2.2.1 Confronto tra le due tessiture: a sinistra Twill a destra Plane

Il terzo componente ha avuto invece una modifica sull'orientamento della pelle strutturale, da 45° a 0°, in modo da consentire una maggior adattabilità tra tavola e vano.

Questa modifica ha consentito una riduzione della luce che si creava in fase di montaggio tra le due superfici laterali dei componenti.

Anche nel caso del prototipo numero tre si è inserito un controstampo, ma per una diversa motivazione rispetto alla tavola: la lamina in gomma ha consentito di avere una superficie molto più regolare e planare, fondamentale per il successivo step di incollaggio delle piastrine.



Figura 4.2.2.2 Controstampo del vano



Figura 4.2.2.3 Vano controstampato

4.2.3 Assemblaggio

Per l'assemblaggio sono stati necessari alcuni accorgimenti per mantenere la protezione IP per la parte elettronica e la batteria e un corretto accoppiamento tra scocca e portabatteria.

Per preservare la parte elettronica è stato necessario applicare uno strato di vinile adesivo per isolare i circuiti dal carbonio per evitare possibili correnti parassite trasmesse attraverso le fibre di carbonio (possibilità molto remota visto il basso voltaggio della corrente e la presenza della resina all'interno del composito).

Oltre a questo, si sono inserite delle strisce con funzione di guarnizione in schiuma poliuretanicca per evitare la possibilità di ingresso di acqua o polvere.

Invece per l'assemblaggio si è optato ad un sistema molto simile a quello della tavola originale ovvero quattro inserti in AISI 316L vengono incollati direttamente nella parte interna del vano portabatteria e in corrispondenza vengono effettuati quattro fori sulla tavola per permettere l'inserimento di quattro viti sempre in AISI 316L di lunghezza adeguata.



Figura 4.2.3.1 Inserito Femmina M5 in AISI 316L

Stesso metodo verrà poi utilizzato per l'assemblaggio dei truck anteriore e posteriore con l'aggiunta di una lamina di gomma preformata adatta per i truck in questione per assorbire parte delle sollecitazioni della superficie di utilizzo e non trasmetterle alla tavola in maniera eccessiva.

Per l'incollaggio si è utilizzato una colla di tipo epossidico bicomponente a basso tempo di presa e viene utilizzata una maschera di incollaggio e foratura prodotta tramite stampa FDM per poter avere un corretto montaggio delle parti.



Figura 4.2.3.2 Maschera di incollaggio prodotta tramite FDM

5. Confronto dei due prodotti

Ora si analizzeranno sotto diversi punti di vista delle differenze delle due tipologie di tavole: in legno e in composito. Prenderemo in considerazione per il carbonio sia la tavola numero 2 che la numero 3 per poter avere una maggiore precisione nelle analisi successive. La prima tavola viene trascurata vista la sua impossibilità ad essere utilizzata per l'utilizzo finale.

5.1 Peso

Inizieremo l'analisi dal componente più influente ovvero la tavola. Di seguito sono riportati i pesi relativi:

| Tipo | Peso [g] | Differenziale tra Legno e Carbonio [g] | Percentuale di riduzione [%] |
|---------------|-----------------|---|-------------------------------------|
| Legno | 2021 | 0 | |
| SN 2 Carbonio | 1242 | 779 | 38% |
| SN 3 Carbonio | 1084 | 937 | 46% |

Tabella 5.1.1 Confronto pesi tavole

Entrambe le tavole in carbonio prodotte hanno raggiunto l'obiettivo di ridurre del 30% il peso della tavola in legno. Entrambe sicuramente potranno supportare un carico statico maggiore dei 120 Kg dichiarati dal produttore.

La seconda versione avrà capacità meccaniche abbastanza elevate e probabilmente limitanti l'utilizzabilità del mezzo: la sua eccessiva rigidità potrebbe significare un minor raggio di sterzata del Longboard e la conseguente perdita di praticità nell'utilizzo urbano.

La terza invece dovrebbe avere quelle caratteristiche meccaniche intermedie che ne permettano sia un ottimo utilizzo a livello dinamico che la possibilità di ampliare il mercato di vendita.

Per il vano portabatteria invece il discorso non può essere di mero confronto poiché ha subito un completo ridisegnamento e una variazione importante di spessore (dai 4 mm iniziali ai 1,25 mm del vano attuale) e di dimensione (dai 670 mm a 380 mm). Queste modifiche hanno sicuramente influito sulla diminuzione del peso.

Dopo queste precisazioni, il risultato è stato l'ottenimento di un vano con un peso di 130 g rispetto al peso iniziale di 767 g.

Il componente finale è l'83 % più leggero e consente una maggiore protezione della componentistica interna per via della assenza di superfici di giunzione sul piano esposto alla superficie di utilizzo.

Dopo aver fatto le valutazioni sui singoli componenti si è proceduto al montaggio di entrambi gli elementi con la componentistica in comune tra i due progetti e si è potuto fare un confronto a livello

globale delle differenze di peso generate dal nuovo assemblaggio e dai nuovi elementi in carbonio appositamente progettati.

| Originale | | | Carbonio | | |
|---|-----------------|-----------------------------|---|-----------------|-----------------------------|
| Componente | Peso [g] | Frazione in peso [%] | Componente | Peso [g] | Frazione in peso [%] |
| Tavola | 2021 | 25,91 | Tavola | 1084 | 18,47 |
| Truck Anteriore completo di ruote | 1056 | 13,54 | Truck Anteriore completo di ruote | 1056 | 17,99 |
| Batteria | 1287 | 16,50 | Batteria | 1287 | 21,93 |
| Truck Posteriore + Ruota + Motore elettrico | 2032 | 26,05 | Truck Posteriore + Ruota + Motore elettrico | 2032 | 34,63 |
| Elettronica | 80 | 1,02 | Elettronica | 80 | 13,63 |
| Vano Portabatteria | 767 | 9,83 | Vano Portabatteria | 130 | 22,15 |
| Accessori | 556 | 7,13 | Accessori | 200 | 34,08 |
| TOTALE | 7799 | 100 | TOTALE | 5869 | 100 |

Tabella 5.1.2 Prospetto Pesi finali

Grazie alle varie migliorie applicate nel processo di Reverse Engineering si è riuscito ad ottenere una riduzione del 24,75%. Un risultato molto buono considerando che il peso dei componenti che non hanno subito interventi ha una influenza superiore al 50 %.

5.2 Performance

Per valutare le differenze di performance tra i due prodotti si è andati a ricercare una metodologia più rigorosa possibile, nonostante la difficoltà oggettive dell'avere una serie di dati confrontabili in maniera inopinabile. Per poter ridurre al minimo le variabili in gioco si sono effettuati i test in un ambiente controllato, nella stessa giornata e con condizioni della superficie di prova e meteo pressoché identiche.

Come campo di prova è stata utilizzata una pista di atletica, gentilmente concessami per i test dalla A.S.D. Atletica Team Carignano, che purtroppo era leggermente umida, il ciò dovuto alle notevoli precipitazioni avvenute nei giorni precedenti al test.

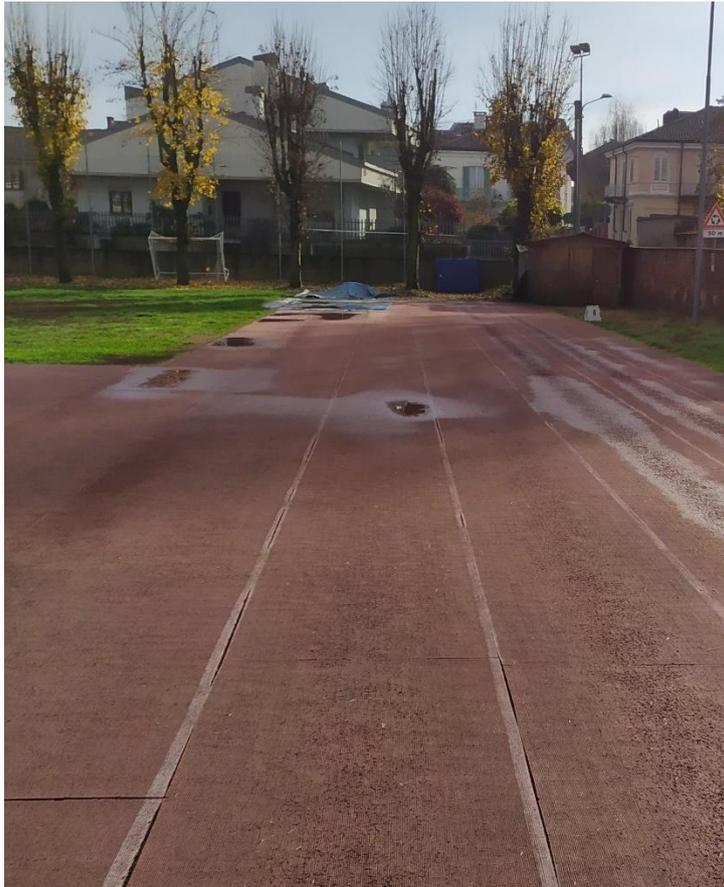


Figura 5.2.11 Il luogo dei test

Questa leggera umidità unita alla condizione non perfetta della mescola in gomma che ricopre la pista ha creato una superficie con un grip meccanico non elevatissimo e ciò ha causato problemi di slittamento della ruota che fornisce trazione. Per ovviare il più possibile a ciò si è provveduto ad un'accurata pulizia e asciugatura delle ruote ad ogni prova e si è utilizzata la zona della pista con le condizioni di aderenza maggiori.

I test sono stati effettuati cronometrando i Longboard assemblati, il modello originale e il prototipo 3 con i componenti descritto nel capitolo precedente, sui 10 m con varie configurazioni di carico:

- Carico assente,
- Carico di 40 Kg,
- Carico di 80 Kg,
- Carico di 120 Kg (massima portata sella tavola originale).

Per applicare i suddetti carichi sono stati utilizzati dei dischi da sollevamento pesi di tipo olimpionico con un peso verificato.



Figura 5.2.2. Pesi olimpionici utilizzati per simulare il carico

I pesi sono stati disposti distribuendoli sulla la superficie disponibile suddividendoli in due pile uniformi:



Figura 5.2.3. Metodo di posizionamento del carico

Si è scelto di utilizzare dei carichi statici e non soggetti di diversa corporatura per due problematiche: per una questione di difficoltà di reperibilità di soggetti esperti nell'utilizzo di dispositivi simili e per poter valutare con maggiore precisione la variazione di prestazione al variare del carico applicato utilizzando degli step di carico regolari.

Sono stati rilevati per ogni configurazione tre cortometraggi manuali, effettuati tramite un cronometro da gara, solo delle corse completate perfettamente e senza variazioni di traiettoria. La distanza è stata scelta in base alle caratteristiche del controller wireless della tavola, che garantisce una copertura di circa 15 m, e dalle difficoltà di far procedere in traiettoria lineare la tavola senza una correzione in tempo reale data dall'utilizzatore.

Tutte e due le serie di test si sono effettuate a batteria pienamente carica all'inizio della serie di prove cronometrate.

Superati questi ostacoli iniziali si sono potuti rilevare le suddette prestazioni:

| Legno | Tempo [s] | | | |
|-----------------------|------------------|-----------------|-----------------|--------------|
| Configurazione | 1° prova | 2° prova | 3° prova | Media |
| Longboard | 3,86 | 4,35 | 4,18 | 4,13 |
| Longboard + 40 kg | 4,91 | 4,57 | 5,06 | 4,85 |
| Longboard + 80 kg | 5,62 | 5,10 | 5,25 | 5,32 |
| Longboard + 120 kg | 6,60 | 6,57 | 6,52 | 6,56 |
| Carbonio | Tempo [s] | | | |
| Configurazione | 1° prova | 2° prova | 3° prova | Media |
| Longboard | 3,04 | 3,21 | 3,11 | 3,12 |
| Longboard + 40 kg | 4,23 | 4,53 | 4,46 | 4,41 |
| Longboard + 80 kg | 4,69 | 5,03 | 4,74 | 4,82 |
| Longboard + 120 kg | 6,32 | 6,11 | 6,06 | 6,16 |

Tabella 5.2.1 Prove cronometrate

I tempi sopra indicati sono solo una esemplificazione delle tre prove più significative delle 10 effettuate per ogni configurazione di prova.

Utilizzando un veicolo dotato di motore elettrico si è potuti ipotizzare che accelerasse costantemente fino alla fine del tragitto di prova.

È un'ipotesi un po' semplificativa ma avendo ottenuto i dati di entrambi i longboard nelle stesse condizioni e avendo applicato successivamente lo stesso metodo di analisi dati è stato ritenuto un metodo di confronto utilizzabile.

Considerando che i test si sono tenuti con partenza da fermo e su una distanza misurata di 10 m si sono ricavati velocità finale e accelerazione, derivanti dall'ipotesi di analisi di accelerazione costante:

| | Legno | | Carbonio | |
|-----------------------|------------------------|--|------------------------|--|
| Configurazione | Velocità [km/h] | Accelerazione [m/s²] | Velocità [km/h] | Accelerazione [m/s²] |
| Longboard | 8,71 | 0,59 | 11,54 | 1,03 |
| Longboard + 40 kg | 7,43 | 0,43 | 8,17 | 0,51 |
| Longboard + 80 kg | 6,76 | 0,35 | 7,47 | 0,43 |
| Longboard + 120 kg | 5,49 | 0,23 | 5,84 | 0,26 |

Tabella 5.2.2 Velocità e accelerazione ricavate dai dati sperimentali

I dati più significativi sono i differenziali di prestazione ottenuti, soprattutto quelli dei tempi cronometrati perché non hanno subito nessun tipo di manipolazione se non una media matematica.

| Differenziali Carbonio-Legno | Tempi [s] (%) | Velocità [km/h] | Accelerazione [m/s²] |
|-------------------------------------|----------------------|------------------------|--|
| Longboard | -1,01 (25 %) | 2,83 | 0,44 |
| Longboard +40 kg | -0,44 (9 %) | 0,74 | 0,09 |
| Longboard +80 kg | -0,50 (9 %) | 0,70 | 0,08 |
| Longboard + 120 kg | -0,40 (6 %) | 0,36 | 0,03 |

Tabella 5.2.3 Differenziali tra i due Longboard

Creando alcuni grafici utilizzando i dati ricavati dalle presenti analisi, si possono notare alcune similitudini:

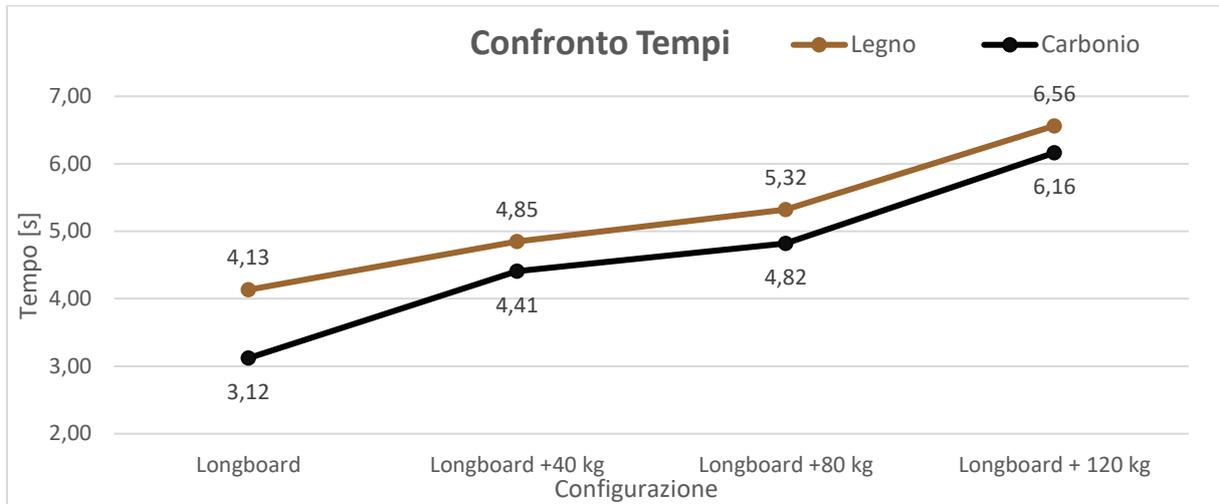


Grafico 5.2.1 Confronto Velocità

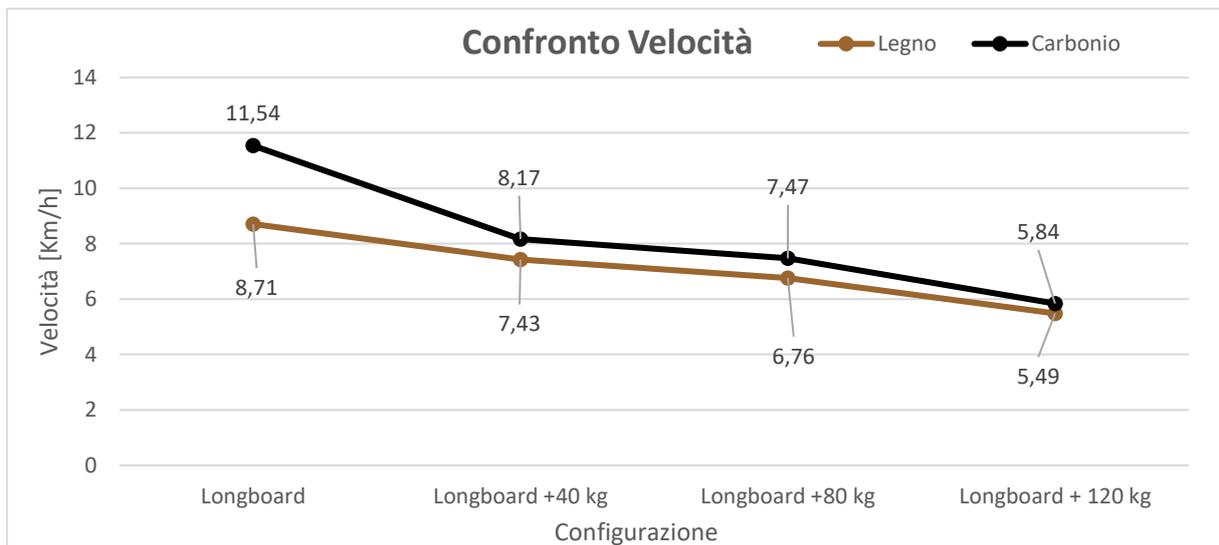


Grafico 5.2.2 Confronto Velocità

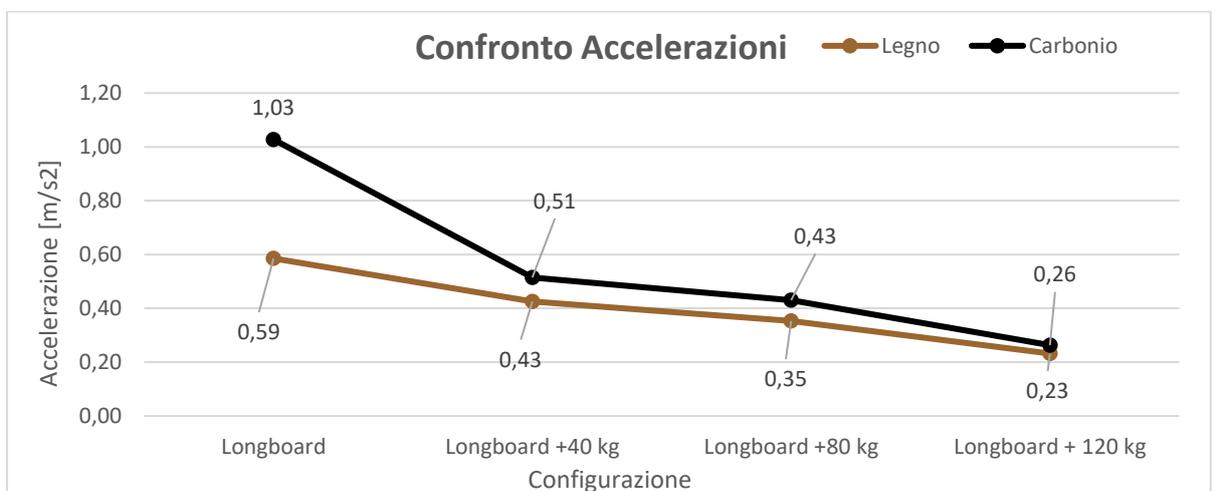


Grafico 5.2.3 Confronto Accelerazione

Analizzando i dati si nota un incremento prestazione del prototipo in carbonio che va a diminuire man mano che la percentuale del peso rimosso attraverso l'utilizzo di CFRP è meno influente sul peso totale. Il maggior focus è stato posto sul differenziale dei tempi, poiché sono i dati con minor manipolazione rispetto a quelli reali. Si ha avuto in picco nel caso della sola tavola dove l'alleggerimento ottenuto di circa il 25 % in peso ha comportato una diminuzione del tempo di un secondo e un aumento di quasi 3 km\h di velocità massima in 10 m. Nella seconda configurazione si è avuto una riduzione importante delle prestazioni del nuovo assemblato dovuta al minor carico trasmesso alla ruota motrice per via della maggior rigidità della tavola in composito e ciò ha comportato una resa prestazionale inferiore. Anche nel caso del massimo carico si è manifestata una criticità ma nell'utilizzo della tavola originale al suo limite di carico: in alcuni tentativi il motore non è riuscito ad applicare la forza necessaria a far muovere il longboard. ciò con il prototipo in carbonio non è avvenuta.

Se consideriamo il caso di carico più comune, ovvero gli 80 Kg, una diminuzione impiegato che si è attestata sul 10 % nel caso del tempo. Questo significa che per un utilizzo cittadino con le conseguenti variazioni di velocità, il nuovo prototipo consente un risparmio a livello di consumo energetico e una maggiore efficacia della funzione di freno elettrico di cui è dotato il controller del motore.

Tutte le prove sono state effettuate con il motore impostato sulla massima potenza erogabile.

5.3 Costi

Purtroppo per la tavola originale possiamo solo supporre dei costi dei componenti presenti, che si sono basati su componentistica paragonabile sia a livello di qualità che di potenza, e una percentuale di guadagno andando a sottrarre i costi presunti. Il problema di una ricerca di questo tipo è l'effettivo costo del componente ad un privato e il costo reale del componente all'azienda produttrice. Ipotizzando un margine di guadagno del 33 % dei fornitori si possono ottenere i seguenti dati:

| Componente | Costo al privato [€] | Costo effettivo [€] |
|--|----------------------|---------------------|
| Tavola | 50 | 33 |
| Elettronica | 40 | 26,4 |
| Batteria | 80 | 52,8 |
| Truck anteriore e posteriore con ruote | 90 | 59,4 |
| Vano portabatteria | 10 | 7 |

Tabella 5.3.1 Costi stimati

Con un costo stimato della componentistica di circa 180 €, arrotondando per eccesso, con un costo di assemblaggio stimato in circa 10 €, considerando paese di produzione e il conseguente costo orario della manodopera. Sommando tutto ciò si arriva a 190 € e applicando lo stesso ricarico ipotizzato per i fornitori si otterrebbe un prezzo di vendita di 250 €. Considerando il prezzo di acquisto reale di 300 € il calcolo sembra pienamente all'interno delle leggi di mercato e commercialmente sostenibile. Probabilmente queste stime di costo sono leggermente errate in eccesso ma utilizzando la stessa ipotesi per entrambe le analisi è possibile una comparazione a pari livello.

Per la stima dei costi di produzione della versione in composito di carbonio si considerino fissi i costi per le componenti che non subiranno variazione, che sono l'elettronica, la batteria e i truck anteriore e quello posteriore compreso di motore.

Ora tratteremo nello specifico il costo della tavola e poi successivamente del vano.

In particolare, per la tavola si sono ipotizzati i dati sottostanti:

| MATERIALE | Costo [€] |
|-------------------------------|-----------|
| Distaccanti Stampo | 0,50 |
| Preimpregnato e Core | 55,12 |
| Film in PTFE | 2,12 |
| Aeratore | 1,60 |
| Sacco a vuoto | 0,66 |
| Sigillante per sacchi | 0,30 |
| Abrasivi per rifila | 0,01 |
| LAVORAZIONE / PROCESSO | |
| Taglio Materiali | 3,00 |
| Ciclo Autoclave | 3,20 |
| LAVORAZIONE / UOMO | |
| Ciclo Distaccanti | 1,93 |
| Taglio materiali | 3,85 |
| Stratifica manuale | 34,65 |
| Vacuum bagging | 11,55 |

| | |
|--------------------------|---------------|
| Carico/scarico autoclave | 1,93 |
| Estrazione | 1,93 |
| Sbavatura | 5,78 |
| CONTROLLO QUALTA' | |
| Controllo grezzo | 1,93 |
| Controllo sbavato | 1,93 |
| Controllo incollato | 1,93 |
| TOTALE COSTO | 132,33 |

Tabella 5.3.2 Costi produzione tavola

Per la stratifica manuale si è considerato un tempo di realizzazione di 90 minuti, tempo pienamente attuabile da un addetto esperto visto la bassa complessità del pezzo da realizzare, avendo tutto il materiale già pronto e tagliato a macchina. Stesso ragionamento viene applicato ad ogni operazione che impiega manodopera. Il costo della manodopera è stato considerato di 0,35 €/minuto.

Per quanto riguarda il materiale invece, il calcolo si basa sul relativo costo al metro quadro (un materiale con una densità planare di circa 200 g/m² ha un costo di circa 25 € al metro quadro, invece uno di grammatura decisamente superiore e per utilizzi strutturali come il 630 g/m² si attesta intorno ai 30 €) e dimensionato sul consumo per rivestire la superficie del pezzo finale, considerando anche l'efficienza nel taglio del materiale. Questa correzione è dovuta al posizionamento della forma del particolare all'interno del rotolo di dimensione predefinite del preimpregnato. Solitamente i compositi di questa tipologia vengono prodotti in rotoli con altezza variabile da 1 m a 1,25 m con una lunghezza di alcune decine di metri e perciò bisogna ottimizzare la disposizione delle dime in modo da ridurre il più possibile lo sfrido derivante del taglio meccanizzato.

Si è effettuato uno studio sul tagliato analogo a quello utilizzato per la messa in produzione di componenti aziendali e vista semplicità e la regolarità delle pelli si è raggiunta una efficienza molto alta pari al 90 %. Questo fattore è tra i più importanti di tutto il processo perché una minore efficienza si ripercuote, oltre che su uno spreco di materiale ancora utilizzabile, sull'aumento dello spazio di immagazzinamento del preimpregnato.

Per poter sostenere una produzione continua, si deve mantenere in magazzino una quantità minima dei vari materiali, che deve essere mantenuti a -18° C all'interno di frigoriferi industriali. Questa esigenza particolare di stoccaggio comporta costi esosi a livello infrastrutturale ed energetico.

Stesse valutazioni si possono attuare al calcolo del costo del ciclo di autoclave per il processo di cura necessario per la produzione del componente in composito. Considerando la durata abbastanza elevata del ciclo, che in termini energetici, viene compensata da una temperatura non troppo elevata (100 °C) e una pressione di soli 2 Bar e 1 Bar di vuoto si può stimare un costo ciclo per valvola di circa 3,20 €. Il costo ciclo viene inteso per valvola poiché pezzi di grandi dimensioni necessitano dell'utilizzo di più valvole per poter assicurare una equa distribuzione del vuoto, ma nel caso preso in esame vista la planarità e la dimensione ridotta del componente è sufficiente l'utilizzo di un solo collegamento alla linea di vuoto. Considerando un costo di 0,06 €/kWh (dati ARERA) e un ciclo che ha durata 270 minuti, l'autoclave necessita di circa 15 kWh per poter effettuare il suddetto ciclo e quindi si ottiene un costo di 2,80 € solo di energia elettrica (il costo è stato mediato considerando che il valore dichiarato è un picco di assorbimento per la fase di salita dell'autoclave e in fase di mantenimento si ha un minor consumo energetico) più la quota per il rientro del costo dell'infrastruttura.

Considerando di rientrare del costo delle attrezzature nel primo anno e di vendere tutto il lotto ipotizzato e prendendo come realistico il dato risultante dalla tabella della pagina precedente e aggiungendo il ricarico del 33 % utilizzato anche per la stima dei costi della tavola originale si arriverebbe ad un prezzo finale di 175 € solamente per la tavola.

Il vano portabatteria invece ha un processo di laminazione più veloce, di circa 30 minuti, e un costo materiale preimpregnato molto inferiore vista la ridotta superficie e il ridotto numero di pelli da applicare sullo stampo.

Utilizzando la stessa tabella per la parte del vano si ottiene:

| MATERIALE | Costo [€] |
|-------------------------------|------------------|
| Distaccante | 0,50 |
| Preimpregnato | 4,89 |
| Film in PTFE | 0,42 |
| Aeratore | 0,34 |
| Sacco a vuoto | 0,14 |
| Sigillante per sacchi x2 | 0,18 |
| Inseriti | 16,00 |
| Abrasivi | 0,01 |
| Cartuccia per adesivo | 0,14 |
| Adesivo | 2,44 |
| LAVORAZIONE / PROCESSO | |
| Taglio Materiali | 3,00 |
| Ciclo Autoclave | 3,20 |
| LAVORAZIONE / UOMO | |
| Ciclo Distaccanti | 1,93 |
| Taglio materiali | 3,85 |
| Stratifica manuale | 11,55 |
| Vacuum bagging | 5,78 |
| Carico/scarico autoclave | 1,93 |
| Estrazione | 1,93 |
| Sbavatura | 5,78 |
| Incollaggio | 7,70 |
| CONTROLLO QUALITA' | |
| Controllo grezzo | 1,93 |
| Controllo sbavato | 1,93 |
| Controllo incollato | 1,93 |
| TOTALE COSTO | 77,58 |

Tabella 5.3.2 Costi produzione vano portabatteria

Quindi un ricarico coerente con quello utilizzato nelle precedenti valutazioni si può stimare il costo del vano inferiore in 105 €, considerando in questa lavorazione sia il costo dei quattro inserti in AISI 316L che l'incollaggio sul vano stesso.

Ipotizzando il costo di uno stampo definitivo sempre in fibra di carbonio e paragonandolo a stampi simili presenti in azienda e aggiungendo tutta la parte di progettazione e di creazione del modello in resina si può stimare il costo di primo avviamento intorno ai 10000 €.

Questa cifra è stata calcolata includendo maschere di incollaggio e foratura ottenute tramite stampa 3D, modelli e stampi sia per la tavola che per il vano per poter sostenere una produzione di almeno 500 pezzi annui. In questa cifra vengono considerati i vari step di processo e il costo maggiore sia del materiale preimpregnato per stampi, causato da una resina adatta a subire ripetuti stress termici ripetuti, che del modello di partenza che verrà fornito e lavorato esternamente. Inoltre, vi è tutta la progettazione e ottimizzazione del piazzamento del tagliato a macchina. Ciò avviene digitalizzando le

dime utilizzate anche per le versioni prototipali creando così una pista di taglio della macchina per il taglio dei tessuti.

Il numero di stampi è stato calcolato su una produzione su 5 giorni lavorativi e quindi si necessitano di almeno 4 stampi per tipo per evitare possibili disguidi e per poter avere margine di produzione considerando anche i pezzi che verranno scartati al controllo qualità.

Il business plan è stato calcolato su una produzione di circa 500 esemplari per anno, questo dato comporta una percentuale di ammortizzazione del costo delle attrezzature abbastanza elevato, se si pone l'obiettivo di rientrare dell'investimento nel primo lotto. Questa scelta si ripercuoterà per circa 20 €/pezzo sul costo finale. Per il costo del prodotto finito si utilizzeranno i dati estrapolati dalle analisi precedenti aggiungendo costi di assemblaggio e rifinitura stimati in circa 60 minuti che equivalgono a 21 €.

Ultima voce di spesa è relativa a tutto ciò che è indispensabile per il funzionamento del prodotto finito: il telecomando di controllo del motore, il caricabatteria, l'imballaggio e un piccolo tool di manutenzione contenuto anche nel prodotto iniziale, che è stata stimata in una spesa aggiuntiva di circa 30 €.

Non vengono conteggiati eventuali ricarichi dovuti ai costi di marketing o sponsorizzazioni.

Riepilogando:

| Voce di Spesa | Costo effettivo [€] |
|--|----------------------------|
| Tavola | 132,33 |
| Elettronica | 26,40 |
| Batteria | 52,80 |
| Truck anteriore e posteriore con ruote | 59,40 |
| Vano portabatteria | 77,58 |
| Assemblaggio | 21,00 |
| Accessori necessari al funzionamento | 30,00 |
| Costo attrezzature per pezzo | 20,00 |
| Costo totale al produttore | 418,78 |
| Minimo di Vendita | 577,10 |

Tabella 5.3.2 Riepilogo costi e prezzo di vendita

Questo è un prezzo al netto della possibile verniciatura esterna. Quindi il nuovo assemblato si posizionerà in una fascia di mercato superiore a quello precedente, con buoni margini di profitto e con feature completamente inedite per il mercato attuale soprattutto essendo tra i pochissimi a vantare una tavola completamente in carbonio e la possibilità di poter supportare un carico superiore ai 120 kg.

Questo business case è stato ipotizzato per una azienda che ha già come produzione in loco compositi in fibra di carbonio e possiede sia le infrastrutture che le figure professionali di cui andremo poi ad usufruire: laminatori, rifinitori stampi, rifilatori, incollatori e addetti al controllo qualità, un Product Manager che possa seguire tutto il flusso e i fornitori necessari per tutto questo.

L'investimento iniziale, che comprenderebbe le infrastrutture e la formazione del personale, non sarebbe sostenibile per la sola produzione di questo oggetto. L'unica possibilità sarebbe quella di far espandere poi l'orizzonte aziendale su tutto ciò che ricade sulla mobilità elettrica personale e con un maggior pubblico di vendita come e-bike e monopattini elettrici.

Il costo rispetto alla tavola originale ha avuto un incremento di prezzo del 92%, quasi raddoppiato, ma si è creato un prodotto nettamente più leggero e prestazionale con caratteristiche quasi inedite per questo tipo di mercato. Poi vi è da considerare il maggior pregio e quindi prezzo di vendita che un oggetto in carbon look ha rispetto ad una classica tavola in legno senza alcun tipo di personalizzazione o velleità estetica. Quindi questo aumento di prezzo può essere compreso e commercialmente accettabile anzi potrebbe comportare guadagni maggiori di quello originale in legno studiato per la fascia medio bassa del mercato.

Parlando con il relatore aziendale di questo business case si è poi giunti alla conclusione che fosse possibile ridurre di almeno un altro 20 % i costi della tavola in carbonio utilizzando materiali, soprattutto a livello di core, meno pregiati e eseguendo alcune ottimizzazioni all'intero processo, non si è potuto espandere questo campo di ricerca per la mancanza di queste tipologie di materiale in azienda. Quindi volendo affrontare un processo di industrializzazione che porti a livelli produttivi più elevati di quelli ipotizzati nel caso ivi rappresentato, 500 pezzi/anno, vi è un netto margine di riduzione dei costi attraverso l'utilizzo di tecnologie di produzione differenti dall'autoclave come ad esempio un ciclo di cura in una pressa riscaldata, riducendo tempistiche e costi del ciclo produttivo.

5.4 Portabilità

La riduzione di peso introdotta con il nuovo prototipo influenzerà, in modo significativo, sull'ergonomia nella fase di trasporto pre e post utilizzo del Longboard.

Molto spesso questo tipo di oggetto viene trasportato collegandolo o ad uno zaino con una particolare predisposizione o viene trasportato a mano, come mostrato in foto.



Figura 2.4.1 Metodo di trasporto pre-post utilizzo Longboard [46]

Considerando che il peso massimo trasportabile, per utenti non abituati, che non influisca sulla postura nel trasporto di oggetti in uno zaino o in strutture simili viene considerato intorno al 10% [47] del peso corporeo.

Quindi considerando il confronto tra le due tavole si avrebbe che:

- Per l'oggetto iniziale, il pubblico che potrebbe trasportare senza alcun tipo di conseguenza il Longboard anche per lunghi tragitti dovrebbe avere un peso di almeno 78 Kg: considerando il peso della tavola di 7,8 Kg.
- Invece per il nuovo prodotto, si amplia molto la possibile clientela che possa usufruire con minor problematiche visto che il target inizierebbe dai 58 Kg.

Tutto questo è un altro punto a favore di questo nuovo progetto e all'aumento della possibile clientela.

Inoltre, la maggior capacità di carico, che si sono manifestate nella giornata di test, è un altro punto di forza che amplia notevolmente le possibilità di vendita soprattutto in alcuni mercati specifici.

6. Conclusioni

Al termine di tutto il progetto, che è nato sotto l'insegna della completa inesperienza nel settore specifico e presa di petto come una sfida da portare a termine ed ottenere i risultati sperati, è stata una vittoria sicuramente a livello personale: potendo applicare molte delle conoscenze pregresse e maturate nel corso di studio e allo stesso tempo di impararne di nuove e di doversi ingegnare per risolvere ogni piccolo problema che si parava ad ogni nuovo step.

Inoltre, l'esperienza aziendale è stata alquanto formativa per le successive opportunità sia a livello formativo che lavorativo.

Detto ciò, il progetto, nella sua interezza, ha dimostrato quanto possa essere valido e competitivo sfruttare il processo di reverse engineering per oggetti orientati alla mobilità sostenibile. La riduzione di peso è importantissima per poter aumentare il rendimento di questi veicoli e ampliarne il numero di utilizzatori. Sicuramente la fascia di mercato a cui viene rivolta il nuovo Longboard è più alta rispetto a quella dell'oggetto iniziale ma, considerando la crescita attualmente prevista per mercato della micromobilità elettrica e la mancanza di prodotti di categoria premium, con un prodotto che impiega materiali ad alta tecnologia e prestazioni si può creare un business sostenibile e affermarsi come azienda leader nel settore.

Si possono ottenere incrementi di prestazioni notevoli senza dover necessariamente riprogettare completamente tutto il veicolo ma solamente ottimizzandone alcune parti, come nel progetto con la tavola e il vano. Aumentando range e prestazioni, il prezzo dell'oggetto può anche aumentare perché non si dovrà più confrontare con skateboard normali o rimanere nel mercato dei gadget elettronici ma può diventare un mezzo di locomozione che, unito al trasporto pubblico ed a una serie di infrastrutture, sostituisca nei centri densamente abitati le automobili o altri mezzi simili. Si andrebbero ad eliminare, almeno nei centri storici non adatti all'attuale numero di veicoli circolanti, traffico e inquinamento e permettendo una nuova vivibilità dei grandi centri urbani.

Poi si è ottenuto a livello estetico, anche se non era tra le priorità principali del progetto, un bell'oggetto, accattivante e comunque nuovo nel panorama attuale.

Il progetto ha pienamente soddisfatto le dichiarazioni iniziali avendo una percentuale di riduzione del peso dei componenti presi in esame minima del 46 %, una riduzione sul componente complessivo di quarto e un incremento massimo della prestazione del 33%.

Si potrebbero ottenere ulteriori vantaggi andando ad analizzare in maniera completa e specifica le proprietà a flessione e torsionali di un longboard di riferimento per poi riprodurle esattamente con una laminazione ad hoc. Produrre un oggetto di questo tipo potendosi svincolare dall'isotropia dei comuni materiali, come il legno, e puntare a sfruttare l'anisotropia modulabile dei CFRP è la carta vincente. Poiché si può procedere ad uno scarico delle pelli nelle zone e nelle direzioni meno sollecitate rimuovendo peso ma soprattutto il costoso materiale impiegato per la realizzazione.

Quindi, mi ritengo soddisfatto dell'intera collaborazione e della verificata bontà del progetto iniziale che è partito da una esperienza personale, si è evoluto tramite le conoscenze tecniche aziendale e ingegneristiche per terminare in un prototipo funzionante, che con qualche lieve modifica, potrebbe iniziare ad essere prodotto in tempi relativamente brevi.

7. Sviluppi Futuri

Alla fine di questo intenso lavoro si è giunti alla convinzione che, con progetti attentamente studiati e qualche ingegnosa trovata, questo settore potrebbe avere un futuro ed un successo commerciale.

Per quanto riguarda strettamente il progetto appena descritto, il primo passo da affrontare sarebbe l'applicazione della stessa metodologia agli assali del prototipo. Si potrebbero ottenere ottimi risultati creando un design ottimizzato per l'utilizzo dei materiali compositi. Stessa idea per il reparto ruote.

Allargando l'orizzonte invece bisognerebbe puntare a creare una serie di prodotti, in modo da ottenere un family feeling, con alla base l'idea di questo progetto e creare un nuovo segmento premium per i veicoli personali elettrici. In commercio vi sono già delle versioni ricoperte oro o con personalizzazioni estreme a cifre molto importanti. Bisogna sfruttare la possibilità di poter personalizzare la trama e inserire possibili fibre colorate per rendere unica la tavola che si va a produrre.

In più la fibra di carbonio ha, ormai, l'immagine di un materiale premium, e che viene utilizzato solo su vetture di pregio in finitura a vista; e sfruttando tutte queste possibilità e personalizzazioni si punterebbe a creare un mercato di nicchia ma redditizio. Difficilmente potrebbe essere il main product di una azienda, come Sparco, ma sicuramente potrebbe essere una nuova divisione che potrebbe essere utilizzata anche a fini di marketing.

Un'altra via potrebbe essere quella della produzione di una linea low cost utilizzando fibre di vetro al posto di quelle di carbonio. Le fibre di vetro hanno maggiore densità e minor proprietà meccaniche ma hanno un costo di circa la metà che le potrebbe rendere industrialmente competitive.

8. Fonti

1. The First Korean-Made It Convergence Electric Skateboard; Sunghun Jung; Dongshin University; March 2017. Doi: 10.15207/Jkcs.2017.8.3.031.
2. Articolo 573; Comunicati Comune di Torino; 2019.
3. Light Electric Vehicles: Substitution and Future Uses; Kaarina Hyvönen, Petteri Repo, Minna Lammi; University of Helsinki Consumer Society Research Centrekaarina; 2011.
4. <https://www.idtechex.com/en/research-report/last-mile-electric-vehicles-2018-2028/545>.
5. Project in Electrical Engineering Electric Skateboard; Anthon Jonsson, Vincent Ricknell; Uppsala; 2017-05-31.
6. Design and Fabrication of Electric Skateboard for Off Road Application; P.Viswabharathy, P.Boobalan, M.Arun Wingston; International Journal Of Emerging Technologies In Engineering Research; Volume 5, Issue 3; 2017.
7. Electric Vehicles Personal Transportation for the Future; Grant A. Covic, John T. Boys, Mickel Budhia, Chang-Yu Huang; World Electric Vehicle Journal Vol. 4; Wewa; 2010.
8. An Analysis of Consumer Incentives in support of Electric Vehicle Uptake: An Australian Case Study; Gail Helen Broadbent, Graciela Metternicht, Danielle Drozdowski; World Electric Vehicle Journal; 2019.
9. E-Mobility Trends and Targets, Partnership on Sustainable Low Carbon Transport; 2019.
10. Development of A New Concept Electric Vehicle for Last Mile Transportations; L. Andaloro, G. Napoli, F. Sergi, S. Micari, G. Agnello, V. Antonucci; World Electric Vehicle Journal Vol. 7; 2015.
11. Last Mile Electric Vehicles 2018-2028 Evs Taking Goods or People to Their Final Destination; Peter Harrop; 23/10/2019.
12. SR 8100 / SD 882x Infusion System; Sicomin Composites; V 2.0; 2019.
13. Product Information Rohacell® Ig-F; Evonik Resource Efficiency GmbH; 2019.
14. Esercitazione: Misura Della Linea Elastica; Dipartimento Di Ingegneria Meccanica E Aerospaziale; Politecnico di Torino.
15. Materiali Per La Fabbricazione Additiva; Paolo Fino; Dispense Corso di Materiali per Additive Manufacturing; 2019.
16. Esercizi Di Meccanica Strutturale; Valentina Benetello; Tecnologos; 2013.
17. Research on the Dynamic Mechanical Properties of Polymethacrylimide Foam Sandwich Structure; Jia Qua, Dianwei Jua, Shenrou Gaob, Jiawei Chena; Composite Structures 204 pag. 22–30; 2018.
18. The Relationship between Process Technology, Structure Development and Fibre Properties in Modern Carbon Fibre production; Christian Wilms, Gunnar Seide, Thomas Gries; Chemical Engineering Transactions Vol. 32; 2013.
19. Product Specifications Onyx One; Markforged.Com; Rev 3,1 2019.

20. Matrix Product Data IMP503Z; Impregnatex Compositi; Rev 06 20/10/2014.
21. Matrix Product Data IMP503Z-HT; Impregnatex Compositi; Rev 08; 2017.
22. Reconstruction and Development of a 3D Printer Using FDM Technology; Krisztián Kuna
Procedia Engineering 149; pag. 203 – 211; 2016.
23. I Materiali Compositi nei Mezzi di Trasporto; F. Grasso, C. Calabretta; Università Degli Studi
Di Catania Facoltà di Ingegneria; 2011.
24. Precursors and Manufacturing of Carbon Fibers, Soo-Jin Park and Gun-Young Heo, Carbon
Fibers, Springer Materials Science 210, 2015. Doi 10.1007/978-94-017-9478-7_2
25. The Pan Carbon Fiber Process; Vince Kelly; Carbon-Fiber.Com.
26. Chemicals and Methods for Conservation and Restoration: Paintings, Textiles, Fossils, Wood,
Stones, Metals, and Glass; Johannes Karl; Proquest Ebook Central; 2015.
27. Onyx Composites Material Descriptions; Markforged.Com; Rev 3.2; 2019.
28. Materiali Compositi Per L'ingegneria; Claudio Badini; Celid; 2013.
29. Appunti Di Meccanica Strutturale; Paolo Angelozzi; Tecnologos Editore; 2008.
30. SR 1700 High Performance Epoxy Laminating System; Sicomin Technical Datasheet; 2015.
31. Polymethacrylimide Plastic Foam Materials with Reduced Inflammability in Addition to a
Method for the Production Thereof; Peter Stein, Traisa; Werner, Geyer, Muehltal;
Thomasbarthel Heppenheim; US 2005/0090568A1; Apr. 28, 2005.
32. Materiali Compositi: Legge Costitutiva Ortotropia, Tecnologie e Materiali Aerospaziali Ver.
01; G. Sala, L. Di Landro, A. Airoidi, P. Bettini; Dipartimento di Ingegneria Aerospaziale,
Politecnico Di Milano.
33. Materiali Compositi: Rigidezza e Resistenza, Tecnologie e Materiali Aerospaziali Ver. 01; G.
Sala, L. Di Landro, A. Airoidi, P. Bettini; Dipartimento Di Ingegneria Aerospaziale;
Politecnico di Milano.
34. Materiali Compositi Tipologie e Tecnologie di Produzione dei Rinforzi e dei loro
Semilavorati, Tecnologie e Materiali Aerospaziali Ver. 01; G. Sala, L. Di Landro, A. Airoidi,
P. Bettini; Dipartimento di Ingegneria Aerospaziale; Politecnico di Milano.
35. Tecnologie e Materiali per le Strutture Sandwich, Tecnologie e Materiali Aerospaziali Ver.
01; G. Sala, L. Di Landro, A. Airoidi, P. Bettini; Dipartimento di Ingegneria Aerospaziale;
Politecnico di Milano.
36. Raku Tool WB-0700 Board Material; Rampf Tooling solution; 2015.
37. Statista.
38. Mamacrowd.com/article/cresce-il-mercato-della-mobilit-dell-ultimo-miglio.
39. Medium.com/@ONNBikes/possibilities-of-first-and-last-mile-travel-72216c511305.
40. Pan copolymer; Pub Chem; 2019.
41. velozephyr.com/carbon-fiber.

42. Molecular dynamics simulation of crosslinked epoxy resins: Curing and mechanical properties; Tomonaga Okabea, Yutaka Oyaa, Koichi Tanabea, Gota Kikugawab, Kenichi Yoshioka; European Polymer Journal 80; pag. 78-88; 2016.
43. <https://interplast.it/stampa-3d-tecnica>.
44. Tecnologie di Formatura in Pressa, In Forno ed in Autoclave; Tecnologie E Materiali Aerospaziali Ver. 01; G. Sala, L. Di Landro, A. Airoidi, P. Bettini; Dipartimento Di Ingegneria Aerospaziale; Politecnico Di Milano.
45. Introduzione al Metodo degli Elementi Finiti e alla Modellazione Fem; A. Bacchetto; Adepron
46. [Monarksupply.com/it/42-zaino-longboard](https://monarksupply.com/it/42-zaino-longboard).
47. Effects of backpack weight on the performance of basic short-term/working memory tasks during flat-surface standing; Minseok Son, Soomin Hyun, Donghyun Beck, Jaemoon Jung, Woojin Park; Pages 548-564; 2019.

9. Ringraziamenti

Devo veramente ringraziare di cuore un gran numero di persone e non vorrei cadere nelle banalità ma è giusto ed è il minimo che io debba fare.

In primis tutta la mia famiglia, mio papà Antonio, mia mamma Silvana e mia sorella Viviana, che mi ha sostenuto per tutto il percorso di studio e di tesi, con il loro dolce e instancabile sostegno.

Per la parte accademica, la relatrice, la professoressa Ada Ferri, che mi ha consentito in prima battuta di visitare l'azienda, durante il suo corso di studi, e successivamente di poterne far parte, anche se solo come tesista, e del sostegno fornito all'interno di tutto il progetto compresa l'enorme possibilità concessami nel far parte di un interessantissimo workshop all'interno della serie di manifestazioni del Festival della Tecnologia 2019 promosso quest'anno dal Politecnico:

IMPACTO
SPORT
INNOVAZIONE
FUTURO

POLITECNICO DI TORINO
Festival della
TECNOLOGIA

Venerdì 8 novembre
ore 14:30

Centro Congressi Torino Incontra
Via Nino Costa 8
TORINO

Workshop – Sala Sella
SPORT, RICERCA E PRODUZIONE INDUSTRIALE

«Eccellenza e innovazione nello Sport: imprese e trasferimento tecnologico»

Modera: Ada Ferri, Politecnico di Torino

Umani più veloci delle macchine
Paolo Baldissera, World Human Powered Speed Challenge

Sport paralimpico? Quanta tecnologia..!
Valeria Rosso e Taian Vieira, Politecnico di Torino

Vestirsi per il Polo Sud... e non sudare
Ada Ferri, Politecnico di Torino

Dalle spedizioni polari, o ad alta quota, allo sport outdoor
Filippo Pavesi, Design Consultant

Da Eva a Calipso: esplorazione della nautica nel cuore di Torino
Valeria Cantini, POLITO Sailing Team

La stampa 3D in metallo al servizio dell'America's Cup
Enrico Orsi, Renishaw

Skateboarding everywhere... più leggerezza, più performance
Flavio Barbieri, Sparco S.p.A.

Snow is green
Proglide, Politecnico di Torino

sportinnovationhub@gmail.com
www.sportinnovationhub.it

SH
SPORT
INNOVATION
HUB

UNIVERSITÀ DI TORINO
enterprise
europe
network
alps
CAMERA DI COMMERCIO
INDUSTRIA, ARTIGIANATO E AGRICOLTURA
DI TORINO

Figura 3.1 Locandina Workshop

Subito dopo devo ringraziare l'Ing. Flavio Barbieri che mi ha istruito e supportato in tutte le fasi del mio progetto, anche se sempre molto impegnato sul fronte lavorativo. Ho potuto imparare i processi di produzione e prototipazione innovativi e di elevata qualità, stando a stretto contatto con lui. Oltre ad un eccellente rapporto instaurato a livello personale.

Devo ringraziare tutta la Sparco S.p.a., soprattutto lo stabilimento di produzione dei materiali compositi sito a Leini, e la figura dell'Ing. Beniamino Bianco Chinto per avermi concesso di far parte integrante dell'azienda; e tutti i dipendenti che, senza alcuna remora, mi hanno aiutato e insegnato le

piccole malizie del mestiere. Roberto, Giancarlo, Alessio, Tonino, Rosalba sono solo alcuni che hanno reso possibile la realizzazione di questo progetto.

La società di Atletica ASD Atletica Team Carignano per avermi consentito di poter usufruire dei suoi impianti e delle sue attrezzature per svolgere i test sui due veicoli.

E infine tutti i miei affetti e amici, che mi hanno sostenuto e aiutato nella realizzazione del progetto e nei momenti di sconforto o difficoltà. In particolare, un grosso grazie è da destinare ad Amanda e Fabio che hanno permesso di ottenere la completezza di questo lavoro di tesi.