



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Ingegneria Industriale DII

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria dei Materiali

**PROGETTAZIONE E REALIZZAZIONE
DI UN'IMBARCAZIONE DA REGATA IN COMPOSITO
RICICLABILE**

Relatore: Prof.ssa Alessandra Lorenzetti

Correlatori: Prof. Andrea Lazzaretto

Ing. Cristiano Battisti

Riccardo Bergamin 1147986

Anno Accademico 2017/2018

Riassunto

La nautica ha visto fin dai primi anni '60 un crescente uso di compositi a matrice polimerica. Grazie alle loro eccellenti proprietà specifiche raggiungono elevate prestazioni mantenendo basso il peso. Per questo motivo vengono utilizzati anche in molti altri campi come l'aeronautica e l'automobilismo. L'impiego sempre più massiccio di questi materiali difficilmente riciclabili ha un impatto negativo sull'ambiente poiché, i sistemi attualmente disponibili per lo smaltimento sono essenzialmente la discarica e l'incenerimento e non consentono una gestione responsabile del composito a fine utilizzo. Date le elevate proprietà meccaniche di questi materiali e la loro rapida ascesa, si propone un metodo di riciclo che consideri a monte la gestione dei rifiuti. Il metodo prevede la sostituzione, nella fase preliminare del progetto, dei materiali compositi tradizionali con compositi sostenibili ovvero che possano essere nuovamente processati a fine vita dell'oggetto o derivino da fonti rinnovabili. In questo elaborato viene esposta un'applicazione di tale soluzione per creare delle imbarcazioni da regata di classe R3 con materiali compositi riciclabili. Lo studio si è focalizzato su pannelli sandwich realizzati con una schiuma di PET, fibre naturali di lino, unite da una matrice di polimetilmetacrilato, PMMA. I materiali sono stati caratterizzati meccanicamente e i valori ricavati sono stati utilizzati in fase di progettazione. Una volta realizzati i disegni di scafo, coperta e strutture interne, si è eseguito un pre-dimensionamento strutturale verificato poi attraverso il calcolo agli elementi finiti. La resina utilizzata ha richiesto la variazione di alcuni parametri di processo come il grado di vuoto, i materiali utilizzati per la creazione dello stampo e le temperature di utilizzo dei materiali ausiliari. Tuttavia, se ne sono apprezzate le potenzialità dal momento che oltre ad essere riciclabile, la resina è termosaldabile ed indurisce rapidamente, rendendola una seria rivale delle tradizionali resine termoindurenti. Il progetto è quindi stato realizzato attraverso la tecnica dell'infusione con la quale si è riusciti a rispettare i pesi previsti.

Indice

Introduzione	1
Capitolo 1 Selezione dei materiali	3
1.1 Compositi.....	3
1.2 Fibre.....	5
1.2.1 Fibre sintetiche	5
1.2.1.1 Fibre di vetro.....	5
1.2.1.2 Fibre aramidiche	6
1.2.1.3 Fibre di Carbonio	6
1.2.2 Fibre naturali	7
1.2.2.1 Fibre di canapa.....	8
1.2.2.2 Fibre di kenaf.....	9
1.2.2.3 Fibre di sisal.....	9
1.2.2.4 Fibre di iuta	9
1.2.2.5 Fibre di lino.....	9
1.2.3 Tipi di tessuti.....	11
1.2.3.1 Mat chopped-continuos.....	11
1.2.3.2 Roving.....	12
1.2.3.3 Yarn.....	12
1.2.3.4 Tessuti	12
1.2.3.5 Unidirezionali	13
1.2.3.6 Stuoie non tessute	13
1.3 Matrice.....	13
1.3.1 Matrice termoidurente	14
1.3.1.1 Poliestere insatura	15

1.3.1.2	Vinilestere	17
1.3.1.3	Resina epossidica	18
1.3.2	Matrice termoplastica	20
1.3.2.1	Polietere etere chetone PEEK	20
1.3.2.2	Polipropilene PP	21
1.3.2.3	Poliammide PA	21
1.3.2.4	Acido polilattico PLA	22
1.3.2.5	Polimetilmetacrilato PMMA	23
1.4	Sandwich	25
1.4.1	Anime	25
1.4.1.1	Balsa	26
1.4.1.2	PVC	27
1.4.1.3	PET	27
1.4.1.4	Nido d'ape	28
1.5	Metodi produttivi	29
1.5.1	Stesura manuale	29
1.5.2	Proiezione simultanea	29
1.5.3	Compression moulding	29
1.5.4	Resin transfer moulding (RTM)	30
1.5.5	Filament Winding	30
1.5.6	Pultrusione	31
1.5.7	Infusione (VARTM)	31
1.5.8	Pre-pregs autoclave	32
1.6	Riciclabilità	32
1.7	Conclusioni	34
Capitolo 2	Caratterizzazione dei materiali	35

1.1	Prove a trazione statica	35
1.1.1	PMMA-Lino.....	42
1.1.2	PMMA Vetro.....	44
1.1.2.1	Epossidica lino	46
2.1	Prove a flessione	48
2.1.1	Laminati	48
2.1.1.1	Epossidica-lino.....	50
2.1.1.2	PMMA-lino.....	52
2.1.1.3	PMMA-vetro.....	54
1.1.3	Sandwich	57
1.1.3.1	PET-PMMA.....	59
1.1.3.2	PET-Epossidica.....	60
1.1.3.3	Balsa-PMMA	61
1.1.3.4	Balsa-Epossidica	62
1.2	Riciclabilità.....	66
1.2.1	Solvolisi.....	66
2.2	Conclusioni.....	68
Capitolo 3	Progettazione dell'imbarcazione	69
3.1	Vincoli progettuali.....	69
3.1.1	Barche precedenti del team	73
3.1.1.1	Argo	73
3.1.1.2	Aura.....	75
3.1.1.3	Aretè.....	76
3.1.1.4	Ate.....	78
3.1.1.5	Concept Athena.....	79
3.2	Verifiche strutturali.....	83

3.2.1	Verifica pannelli	83
3.2.2	Verifica alla massima pressione d'onda	90
3.2.3	Verifica a carico concentrato in coperta	97
3.3	Conclusioni	98
Capitolo 4	Realizzazione dello scafo	99
4.1	Prova di infusione	99
4.2	Realizzazione della carena	101
4.2.1	Preparazione stampo della carena	101
4.2.2	Stesura pelli della carena	102
4.2.3	Infusione della carena	105
4.2.4	Realizzazione e preparazione secondo stampo	109
4.2.5	Infusione seconda carena	111
4.3	Realizzazione coperta	113
4.3.1	Costruzione stampo coperta	113
4.3.2	Preparazione stampo della coperta	115
4.3.3	Stesura pelli coperta	116
4.3.4	Infusione coperta	117
4.4	Realizzazione strutture interne	119
4.4.1	Taglio PET	119
4.4.2	Infusione strutture interne	120
4.5	Conclusioni	121
Conclusioni		123
Bibliografia		125

Introduzione

I materiali compositi hanno preso piede in molti settori perché abbinano alle elevate proprietà, un peso contenuto. Per questo motivo vengono largamente utilizzati in campo aeronautico, automobilistico e nautico. I compositi sono costituiti principalmente da una matrice e un rinforzo a seconda dei quali il materiale viene classificato. Per applicazioni strutturali, i compositi con matrice plastica rinforzata con fibre lunghe sono certamente i più interessanti. La riduzione di peso che si ottiene dalla sostituzione dei materiali tradizionali con i più recenti materiali compositi fornisce un contributo fondamentale a livello ambientale perché diminuisce il quantitativo di carburante necessario[1]. La maggior parte di questi compositi però vengono realizzati con polimeri termoindurenti che rendono molto complessa la gestione dei rifiuti. Da molti anni si indaga sulle metodologie più adatte per fronteggiare questo problema raggiungendo dei buoni risultati su piccola scala. Tali studi però si limitano a frammentare il composito per poi riutilizzarlo come particolato, a recuperare una sola componente o a convertirli in energia bruciandoli[2][3]. Più recentemente invece, uno studio ha elaborato un metodo per rendere riprocessabile la resina epossidica modificando i tipi di legame che si creano tra le catene [4]. I legami tra le catene possono essere rotti fornendo calore al polimero che da termoindurente viene quindi trasformato in termoplastico. Un altro modo per diminuire l'impatto ambientale dannoso dei materiali riguarda la sostituzione delle fibre sintetiche con fibre di origine naturale[5][6][7]. Così si riduce leggermente la produzione di CO₂ e il consumo energetico dati dalla fabbricazione delle fibre, tuttavia rimane inalterato il problema dello smaltimento a fine vita dei prodotti. In questo senso giocano sicuramente un ruolo importante i compositi a matrice termoplastica. Per natura questi polimeri sono riprocessati fornendo loro calore dando quindi nuova vita ai materiali di scarto. Il limite principale dei polimeri termoplastici risiede nella difficoltà di produrre oggetti dalle grandi dimensioni a basse temperature. In questo senso si è rivelata particolarmente interessante la resina termoplastica a base di PMMA fornita da Arkema [8]. Tale resina è processabile a temperatura ambiente con le stesse tecnologie utilizzate per lavorare le più comuni resine termoindurenti e non richiede nessun tipo di trattamento termico post-cura.

La progettazione di una barca prevede la stesura di un disegno che rispetti le caratteristiche idrodinamiche volute dal progettista. Il disegno viene poi sviluppato da un punto di vista strutturale garantendo dei valori di rigidità e resistenza richiesti dalla normativa di

referimento. Questa lavoro non tratterà nello specifico il design idrodinamico dello scafo ma si concentrerà particolarmente sullo studio preliminare di selezione dei materiali e sulle relative verifiche strutturali oltre che alla costruzione. L'obiettivo è quello di realizzare uno skiff interamente riciclabile che possa competere con le imbarcazioni equivalenti costruite con materiali tradizionali, dimostrando che è possibile utilizzare materiali sostenibili senza rinunciare alle prestazioni meccaniche.

La tesi si inserisce in un progetto studentesco, Mètis Vela Unipd, che si occupa di progettare, realizzare e condurre skiff di classe R3 per partecipare alla regata universitaria internazionale 1001Vela Cup che si svolge annualmente.

In questo elaborato verrà esposta una panoramica sui materiali compositi, ponendo particolare attenzione ai materiali utilizzati nella nautica e sulle possibili alternative ai compositi tradizionali. Seguirà una breve descrizione dei principali metodi conosciuti per riciclare i materiali compositi. I materiali selezionati verranno confrontati e caratterizzati meccanicamente con delle prove di trazione e di flessione. Tali dati saranno utilizzati in un primo pre-dimensionamento secondo il regolamento A.B.S., che fornisce un ottimo punto di partenza per la progettazione di uno scafo da regata. I risultati ottenuti verranno poi verificati attraverso il calcolo agli elementi finiti. Infine, verrà realizzato lo scafo sfruttando la tecnica dell'infusione. Lo scafo dovrà rispettare i pesi previsti in fase di progetto.

Capitolo 1

Selezione dei materiali

Nel capitolo seguente verrà esposta una panoramica dei materiali compositi soffermandosi specialmente sui compositi a matrice polimerica. Verranno esposti i metodi produttivi più utilizzati approfondendo i più comuni nel mondo della nautica. Verrà posta particolare attenzione sulle matrici e le fibre di nuova concezione e come possano essere considerate come alternativa ai materiali tradizionali. Infine, sarà introdotto il concetto del riciclo associato al mondo dei materiali compositi.

1.1 Compositi

I materiali compositi possono essere annoverati nel mondo dei materiali ibridi, ovvero materiali formati dalla combinazione di due o più fasi che insieme, presentano delle caratteristiche che non possono essere raggiunte da nessuno dei materiali di partenza [9]. I materiali compositi vengono creati per favorire una precisa proprietà estremizzandola. Non tutte le proprietà dei materiali costituenti infatti vengono migliorate. Se si considera per esempio un composito realizzato con matrice epossidica rinforzata con fibre di carbonio, il materiale presenta delle proprietà di rigidità e resistenza a trazione paragonabili all'acciaio con un peso che è circa 7 volte inferiore, il costo di tale materiale però è decisamente elevato. Molti polimeri invece vengono addizionati con particolato, come il carbonato di calcio, che consente di abbassare nettamente i costi finali peggiorando le proprietà meccaniche della plastica.

I compositi vengono creati per incontrare le esigenze del progettista al fine di ottenere dei materiali estremamente prestanti in un preciso settore. Le proprietà più studiate sono per esempio: la densità, il modulo elastico, la resistenza, il calore specifico il coefficiente di espansione termica, la conducibilità termica, la diffusività termica, la costante dielettrica e la conducibilità elettrica.

Generalmente i compositi sono costituiti da una matrice e da un rinforzo. L'interazione tra le due fasi determinerà la qualità del materiale.

La natura della matrice solitamente classifica le tipologie di compositi che possono essere suddivise in tre grandi famiglie ovvero:

- Matrice metallica,
- Matrice ceramica,
- Matrice plastica.

In questo elaborato verranno trattati solamente compositi con matrice plastica poichè più adatti allo scopo del lavoro.

La matrice solitamente non possiede proprietà eccellenti ma possiede la funzione fondamentale di dare consistenza e continuità al materiale oltre a proteggere le fibre da eventuali danneggiamenti. La matrice deve garantire una buona adesione al rinforzo utilizzato e una buona resistenza ambientale.

Focalizzandosi su di una sola famiglia di compositi, si può ricorrere ad un'ulteriore suddivisione a seconda della forma del rinforzo utilizzato. Esistono molti tipi di rinforzo che a seconda della loro dimensione conferiscono proprietà diverse al materiale.

I rinforzi possono essere divisi in:

- Fibre lunghe;
- Fibre corte;
- Particolato.

Le fibre possono essere distinte in base alla lunghezza, in fibre lunghe e fibre corte, e in base alla direzione con il quale vengono utilizzate in fibre orientate o disorientate.

Il particolato viene spesso utilizzato per ridurre i costi del materiale. Tuttavia, può essere utilizzato come carica per migliorare la resistenza ad usura, variare le proprietà ottiche o per semplice aspetto estetico.

In campo nautico, i compositi sono largamente diffusi, con differenti usi e diversa natura. Vengono utilizzati principalmente compositi realizzati con resine rinforzate con fibre lunghe, generalmente disposte in tessuti. Non mancano però esempi di compositi di natura diversa. Lo stesso legno lamellare utilizzato per molti anni e ancora oggi molto apprezzato può essere definito composito. Esso infatti nasce dall'unione di strati orientati in diverse direzioni uniti tra loro con resine melamminiche. Un altro esempio sono le vele, recentemente vengono costruite utilizzando fibre di carbonio, Kevlar, o polietilene ad alto peso molecolare in una matrice di

Nylon. Infine, il *gel-coat*, rivestimento largamente diffuso per proteggere le imbarcazioni, è costituito dalla stessa resina che compone la barca rinforzata con microcariche ceramiche che la rendono opaca. In questo modo la resina oltre ad avere una maggior resistenza all'abrasione, le cariche possono essere utilizzate come pigmento andando così a colorare lo scafo.

1.2 Fibre

Le fibre sono particolarmente interessanti perché grazie alla loro forma che presenta una sezione molto piccola, possono raggiungere valori di resistenza molto elevati. Il materiale sotto forma di fibre presenta delle proprietà meccaniche superiori rispetto al materiale in *bulk*. La dimensione delle fibre diminuisce notevolmente la possibilità di avere difetti e questo permette il raggiungimento di valori elevati della resistenza. Eventuali difetti presenti sulla superficie della fibra abbasserebbero il valore iniziale di resistenza fino a 100 volte. Avendo una sezione negli ordini dei μm , le catene che costituiscono le fibre tendono ad essere orientate nel verso dell'applicazione del carico. Questo spiega perché le fibre possiedono un'elevata resistenza a trazione ma una bassa resistenza a taglio. Dimensione ridotta delle sezioni delle fibre inoltre permette di raggiungere alti livelli di impaccamento riuscendo a mantenere un peso specifico basso.

Di seguito verranno esposte le due famiglie di fibre differenziate in base alla loro origine. Da una parte vi sono le fibre sintetiche mentre dall'altra vi sono le fibre naturali.

1.2.1 Fibre sintetiche

1.2.1.1 Fibre di vetro

Le fibre di vetro sono il rinforzo maggiormente utilizzato nel settore delle costruzioni nautiche. Sono costituite da una miscela di sabbia silicea e ossidi metallici con proporzioni che ne garantiscono una buona lavorabilità ed elevate prestazioni meccaniche. Esistono diverse tipologie di vetro a seconda delle composizioni: vetro A ad alto contenuto di alcali, vetro E nato come isolante elettrico, vetro S dalle alte prestazioni strutturali e vetro C resistente agli attacchi chimici. Nella nautica il rinforzo di vetro più utilizzato è il vetro E che contiene circa 55% di SiO_2 , 15% di Al_2O_3 , 19% CaO , 3% MgO , 7% B_2O_3 e una percentuale inferiore all'unità di ossidi alcalini e ossidi di Ferro. Questa tipologia di vetro presenta delle modeste proprietà meccaniche come mostrato in Tabella 1.1. Inoltre, il costo del rinforzo è molto minore a quello delle altre fibre sintetiche.

1.2.1.2 Fibre aramidiche

Le fibre aramidiche sono delle fibre sintetiche organiche dall'ottima resistenza a trazione. Il prodotto più conosciuto è sicuramente il Kevlar® prodotto da Du Pont. Le fibre aramidiche possiedono una densità di 1400 kg/m^3 una delle le più basse tra tutte le fibre. Nonostante raggiungano valori di resistenza a trazione molto alti, queste fibre possiedono una rigidità paragonabile alle fibre di vetro. Vi sono però due tipologie di fibre di Kevlar: il Kevlar 29 che possiede le caratteristiche appena descritte e il Kevlar 49 che possiede il modulo elastico doppio rispetto al precedente. Grazie ai notevoli valori di resistenza a rottura, le fibre di Kevlar sono molto tenaci e resistono molto bene al taglio, per questo vengono utilizzate per creare giubbotti anti-proiettile o vengono impiegate per creare dei rinforzi nella nautica. Il più grande limite delle fibre aramidiche è sicuramente la resistenza a compressione che raggiunge appena il 20% dei valori a trazione. Per questo motivo vengono spesso utilizzate assieme ad altre fibre formando compositi ibridi. Infine, essendo igroscopiche e sensibili alla luce richiedono particolare attenzione nella fase di stoccaggio e una vernice protettiva che rivesta il laminato.

1.2.1.3 Fibre di Carbonio

Le fibre di carbonio sono le fibre più prestanti da un punto di vista meccanico. Possono raggiungere valori estremamente elevati se paragonate alle altre tipologie di fibre mantenendo una densità intermedia tra le fibre aramidiche e le fibre di vetro. Le fibre di carbonio possono essere ottenute dalla trasformazione di precursori organici come il PAN, poliacrilonitrile, il rayon e la pece con un processo di pirolisi. Le fasi comuni della produzione delle fibre in carbonio sono:

- la filatura: del precursore in cui vengono orientate le catene;
- la stabilizzazione: in cui si rendono infusibili le fibre con un processo di ossidazione che porta al termoindurimento;
- la carbonizzazione: nel quale si trasformano le fibre di precursore in fibra di carbonio per pirolisi;
- la grafittizzazione: che avviene occasionalmente trattando in atmosfera inerte a temperature sopra i 2500°C , con questa operazione si raggiungono contenuti di carbonio attorno al 99%.

Le fibre così ottenute presentano una disposizione delle catene fortemente anisotropa che giustifica le eccellenti proprietà a trazione. In questa direzione lavorano principalmente i legami

forti tra le molecole mentre trasversalmente la resistenza a taglio è molto bassa perché in quel caso lavorano i legami deboli di Van der Waals. Allo stesso modo il carbonio non si comporta bene a compressione dove raggiunge valori nettamente inferiori di quelli a trazione.

Esistono diverse tipologie di fibre di carbonio a seconda del precursore e delle caratteristiche meccaniche. Vengono suddivise per esempio in base al modulo elastico in: SM *standard modulus*, IM *intermediate modulus*, HM *high modulus* e UHM *ultra high modulus*. Allo stesso modo vengono suddivisi considerando la resistenza a trazione. I rinforzi più comuni sono gli HS *high strength* e gli IM *intermediate modulus*.

Dato il loro costo elevato, per esempio un rinforzo standard di carbonio costa 5 volte più di un rinforzo in vetro, vengono utilizzati in maniera limitata nella nautica dove le dimensioni sono generose mentre vengono ampiamente utilizzati nell'aeronautica dove i budget di spesa sono superiori e il peso fa molta differenza.

Tipo di fibra	Densità	Modulo elastico	Resistenza a trazione	Allungamento a rottura
	[kg/m ³]	[GPa]	[MPa]	[%]
Vetro E	2,55	72	2400	3,0
Carbonio T300	1,76	230	3530	1,5
Carbonio T1000	1,80	294	6370	2,2
Carbonio M40	1,77	377	4410	1,2
Kevlar 49	1,45	125	2800	2,8

Tabella 1.1 Tabella delle principali proprietà fisiche e meccaniche delle fibre sintetiche più utilizzate

1.2.2 Fibre naturali

I compositi rinforzati con fibre naturali sono conosciuti dagli inizi del '900 quando venivano creati unendo fibre di cotone o di carta con resine fenoliche o melamminiche. Questi rinforzi però non sono stati sviluppati ulteriormente fino agli anni '90 quando alcuni studiosi hanno intravisto in loro delle possibili alternative alle fibre tradizionali. Le fibre naturali sono caratterizzate da una bassa densità che le porta ad avere delle buone proprietà specifiche (faruk e bos). Inoltre, le fibre naturali sono biodegradabili, sostenibili e non sono tossiche o irritanti per l'operatore, se si aggiunge che il costo è relativamente basso si dimostrano delle valide sostitute delle fibre di vetro. Le fibre naturali a differenza delle fibre di vetro necessitano dell'83% in meno di energia per la produzione e non essendo abrasive, i macchinari adoperati per lavorarle richiedono minore manutenzione.

Le fibre naturali possono essere suddivise in base alla loro origine. Si distinguono infatti tre categorie come: fibre animali che sono principalmente costituite da proteine, vegetali costituite da polisaccaridi e minerali.

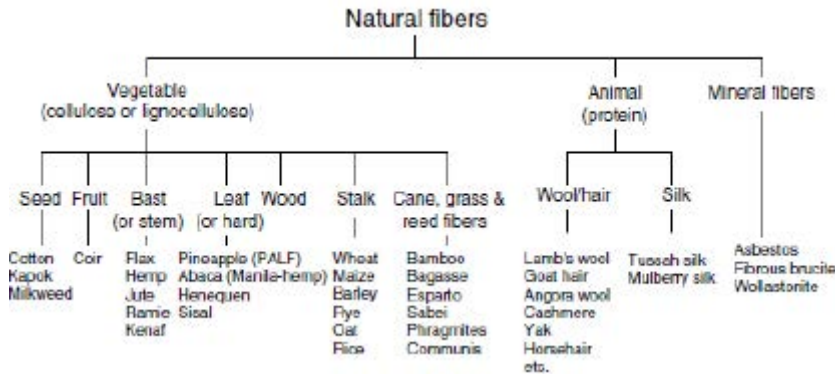


Figura 1.1 Schema di classificazione delle fibre naturali a seconda della loro origine.

Verranno trattate principalmente le fibre di origine vegetali poichè rappresentano le fibre più interessanti dal punto di vista meccanico. Queste sono di fatto dei compositi naturali dal momento che la loro struttura prevede delle microfibrille di cellulosa immerse in una matrice di lignina o emicellulosa.

Esistono sette tipi di fibre vegetali e si dividono in fibre di seme, fibre da frutti, fibre liberiane, fibre fogliari, fibre di stelo, fibre di canna e infine le fibre di legno. Tra queste le più interessanti e le più studiate sono: le fibre di lino, le fibre di canapa, le fibre di iuta, le fibre di sisal e di kenaf.

1.2.2.1 Fibre di canapa

La canapa è una pianta molto conosciuta poichè utilizzata per la produzione di stupefacenti. Il principio attivo della pianta consiste nel tetraidrocannabinolo, THC, contenuto in alte concentrazioni solamente nelle inflorescenze. Il resto della canapa ne contiene un basso tenore e quindi non viene ritenuto narcotico. Tipica dell'Asia centrale, è facilmente coltivabile e dalla rapida crescita. Le fibre di canapa possono essere molto lunghe ma le fibre elementari sono lunghe tra i 10 e i 25 mm. Le proprietà delle fibre sono interessanti dal momento che presentano una rigidità superiore alle altre fibre naturali, i valori di resistenza a trazione però non sono eccellenti.

1.2.2.2 Fibre di kenaf

Le fibre di kenaf vengono estratte dalla pianta omonima che cresce in Africa e in Asia. Le fibre di kenaf sono difficili da maneggiare, sono irregolari, e presentano un comportamento fragile. Queste fibre possiedono una caratteristica particolare dato che sono in grado di assorbire la maggior quantità di CO₂ tra tutte le fibre naturali. Le proprietà sono paragonabili alle fibre di iuta di scarsa qualità. Se si aggiunge che sono sensibili all'acqua non si presentano come una soluzione ottimale per applicazioni strutturali in campo nautico.

1.2.2.3 Fibre di sisal

Le fibre di sisal si ricavano dalla pianta di Agave Sisalana, tipica dell'America centrale, ora coltivata anche in India e Africa tropicale. Si presenta come fibra liscia e di colore giallo. Questa tipologia di rinforzo non è uniforme lungo tutta la lunghezza della foglia ma si hanno proprietà diverse a seconda della posizione dal quale viene estratta. Il materiale è facilmente degradabile se a contatto con acqua di mare perciò non è adeguato per applicazioni navali.

1.2.2.4 Fibre di iuta

Le fibre di iuta sono tra le più antiche fibre conosciute dall'uomo. Originaria della zona mediterranea, si è diffusa anche in estremo oriente. La pianta viene coltivata esclusivamente per la produzione di fibre che sono molto lunghe e molto resistenti oltre ad essere resistenti agli attacchi dei microrganismi. Nonostante la buona resistenza, queste fibre sono fragili, possiedono un basso allungamento a rottura e non resistono agli attacchi chimici e ai raggi UV. La loro resistenza al calore e la loro biodegradabilità le rendono ideali per applicazioni legate alla moda, all'arredo. Per contro, essendo sensibili all'umidità non sono adatte per applicazioni nautiche.

1.2.2.5 Fibre di lino

Il lino è una pianta utilizzata da secoli per produrre fibre tessili. Questa pianta liberiana viene coltivata nelle regioni temperate come Cina, Argentina, India ed Europa centrale. Viene utilizzato circa il 75% dell'altezza per la produzione di fibre che raggiungono valori tra 60 e 140 mm. Le fibre sono molto resistenti e flessibili e vengono considerate elastiche. Il lino resiste agli acidi diluiti a freddo ma non nel caso in cui vengano trattati a caldo o in caso di acidi concentrati. Possiede una buona resistenza termica fino 200°.

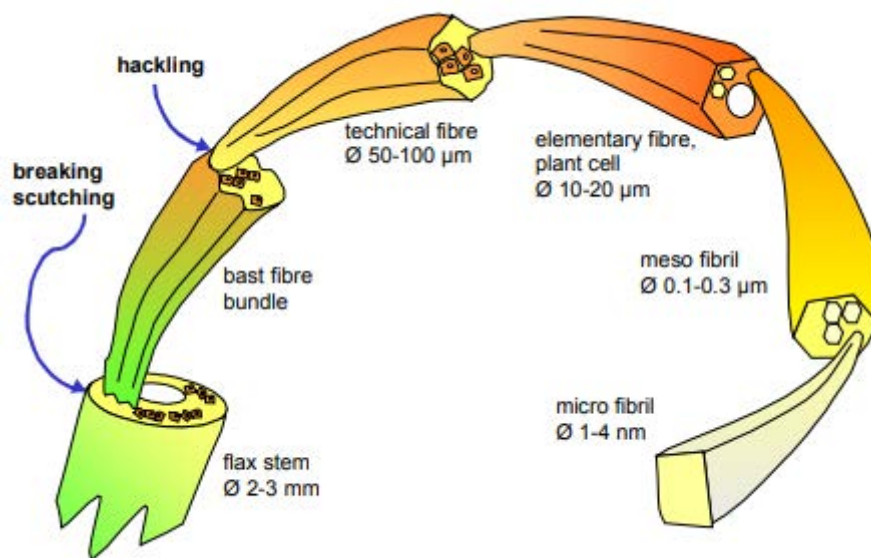


Figura 1.2 *Dallo stelo alle microfibrille di lino [10].*

Per ottenere dei rinforzi adatti alla produzione di compositi, lo stelo del lino viene lavorato con processi di rottura, stigliatura e pettinatura. In questo modo vengono separate i *bast bundles* per ottenere le fibre tecniche. I *bast bundles* sono di fatto dei compositi naturali che legano le fibre tecniche di lino con un'interfaccia debole di pectina. L'interfaccia è piuttosto debole e ciò agevola le lavorazioni di separazione che avvengono mediate pettinatura. I pettini agiscono sui punti più deboli tra le fibre dove vi è una scarsa adesione. Le fibre tecniche sono a loro volta l'insieme di fibre elementali disposte in modo da formare una sezione poliedrica con 5,6 o 7 angoli. Le fibre elementali consistono in un fascio di cellule vegetali formate da una parete cellulare primaria, una secondaria e un canale aperto al centro detto *lumen*. La parete cellulare secondaria occupa la maggior parte del volume delle cellule ed è composta prevalentemente da cellulosa ed emicellulosa. Proprio la cellulosa è caratterizzata da legami forti ad idrogeno che ne determinano le proprietà fisiche e chimiche. Questi legami conferiscono una notevole rigidità alle fibre. Le proprietà a trazione del lino sono le più alte tra le fibre naturali anche se i valori ottenuti sono molto variabili e dipendono dalle condizioni con cui è stata coltivata la pianta. In uno studio si sono indagate a fondo le proprietà della fibra dove si è scoperta la relazione tra il diametro della fibra e la rigidità. Minore è il diametro e maggiore sarà la rigidità. Il modulo elastico raggiunge un valore medio di 54 GPa. A trazione, le fibre possiedono interessanti valori di rigidità e resistenza dovuti principalmente alla struttura cristallina della parete cellulare secondaria. In direzione trasversale invece i valori ottenuti sono molto bassi a causa della presenza di zone amorfe.

In passato sono stati svolti diversi studi all'interno del team Mètis Vela Unipd riguardanti la selezione di fibre naturali ideali per la creazione di uno skiff da regata, individuando nel lino, il migliore tra questi [11][12]. Le fibre di lino hanno dimostrato di essere una buona soluzione per sostituire le fibre di vetro data la buona adesione mostrata con la resina epossidica e le buone proprietà specifiche.

Fibra	Densità	Diametro	Tensione di rottura a trazione	Modulo di Young	Allungamento a rottura
	[g/cm ³]	[μm]	[MPa]	[GPa]	%
Lino	1.5	40-600	345-1500	27.6	2.7-3.2
Canapa	1.47	25-500	690	70	1.6
Iuta	1.3-1.49	25-200	393-800	13-26.5	1.16-1.5
Kenaf			930	53	1.6
Sisal	1.45	50-200	468-700	9.4-22	3-7
Cotone	1.5-1.6	12-38	287-800	5.5-12.6	7-8
Vetro E	2.55	<17	3400	73	2.5
Kevlar	1.44		3000	60	2.5-3.7
Carbonio	1.78	5-7	3400-4800	240-425	1.4-1.8

Tabella 1.2 Proprietà fisiche e meccaniche delle fibre naturali a confronto con quelle sintetiche [5].

1.2.3 Tipi di tessuti

1.2.3.1 Mat chopped-continuos

Il *mat* è una tipologia di rinforzo molto semplice e consiste in una sorta di feltro ottenuto dalla disposizione casuale delle fibre. Non vi è intreccio tra le fibre depositate. Il *mat* può essere realizzato in due modi: *chopped mat* o *continuos filament mat*. Nel primo caso il feltro si ottiene da un ammasso di fibre lunghe circa 50 mm sparse uniformemente ma con orientazione casuale. Nel secondo caso le fibre hanno lunghezza superiore ma vengono lo stesso disposte casualmente e tenute insieme con un legante detto *binder*. Il *chopped mat* offre proprietà meccaniche scadenti e viene utilizzato per migliorare l'adesione tra due pelli o per sfavorire la delaminazione. Il *continuos filament mat* invece viene utilizzato nelle zone in cui si ha una geometria complicata perché grazie alla sua anisotropia e alla possibilità delle fibre di muoversi è possibile disporre il feltro in ogni direzione senza alterare le altre. Nonostante possieda proprietà superiori al *mat* precedente, le sue caratteristiche meccaniche rimangono basse. La

maglia poco fitta dei *mat* ammette alti livelli di impregnazione rendendoli poco adatti per scopi strutturali ma fondamentali in operazioni di finitura.

1.2.3.2 Roving

Il *roving* consiste in un fascio di fibre continue parallele non ritorte e viene distribuito in matasse. Viene usato particolarmente in processi come il *filament winding* o pultrusione o per lo *spray lay-up*, o proiezione simultanea, dove la fibra viene tagliata in situ e poi rivestita di resina.

1.2.3.3 Yarn

Lo *yarn* invece si ottiene ritorcendo più filamenti continui. Lo *yarn* può essere costituito anche da più filamenti attorcigliati per formare un trefolo dalle grammature maggiori. Questi vengono usati per rinforzi di tessuti o come fili per il *filament winding*.

1.2.3.4 Tessuti

I tessuti vengono realizzati dalla tessitura delle fibre filate. Come avviene in campo tessile, i tessuti possiedono un ordito, nella lunghezza del rotolo, e una trama, in direzione trasversale. L'armatura sarà l'intreccio fra la trama e l'ordito del tessuto e avrà caratteristiche diverse a seconda della distribuzione delle fibre. Le principali armature utilizzate sono:

- **Plain o a tela:** si tratta della tessitura più semplice con trama e ordito intrecciate in rapporto 1:1. Il tessuto risulta essere bilanciato e simmetrico. Possiede proprietà meccaniche inferiori rispetto alle altre trame a causa della piegatura delle fibre nell'intreccio e presenta dei fori nelle zone di intersezione tra i filamenti. Generalmente usato per parti non strutturali.
- **Basket o panama:** due o più fibre dell'ordito si interlacciano con 2 o più fibre della trama. Il rapporto può essere simmetrico o asimmetrico. Le proprietà meccaniche risultano migliori rispetto al *plain*.
- **Twill o diagonale:** l'ordito viene intrecciato con la trama seguendo lo schema 2/1 oppure 2/2 generando delle nervature. Questo tessuto possiede proprietà meccaniche migliori e una superficie liscia. Usato per rivestire forme complesse
- **Satin o a raso:** consiste in una armatura a twill modificata per formare meno intersezioni interlacciate. Il numero legato alla tessitura indica il numero di fili di trama sormontati dall'ordito tra un'intersezione e l'altra. Esteticamente è molto liscio come tessuto ed ha un alto grado di drappeggiabilità.

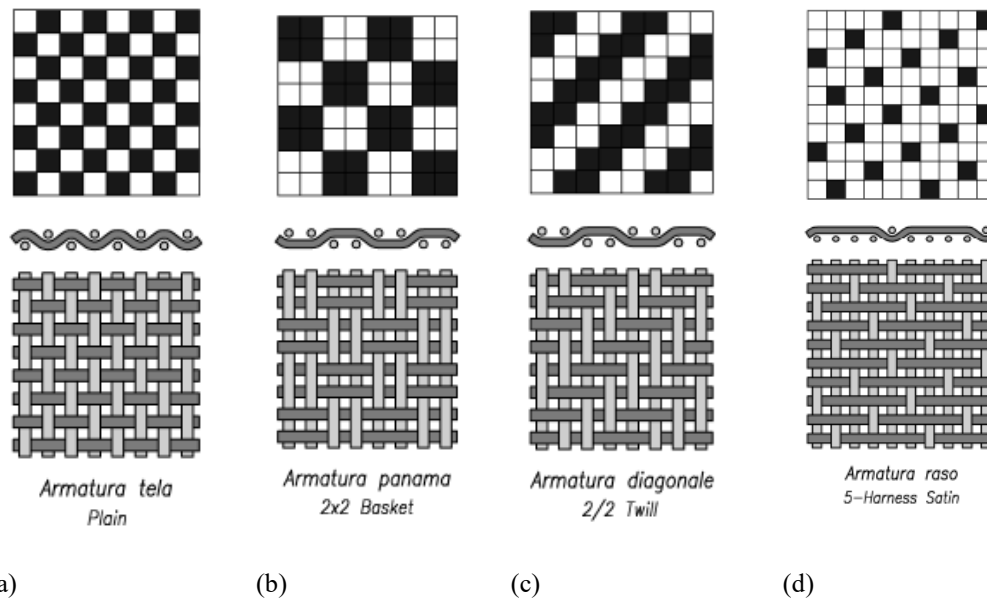


Figura 1.3 (a) schema tramatura a tela o plain; (b) tramatura panama o basket; (c) tramatura diagonale o twill con schema 2x2; (d) tramatura a raso o satin con schema 5-hardness.[13]

1.2.3.5 Unidirezionali

I tessuti unidirezionali consistono in piani di fibre parallele, orientate in un'unica direzione. Per mantenere in posizione le fibre al fine di migliorarne la manipolazione, si ricorre ad una leggera cucitura oppure vengono tessute delle fibre trasversali non strutturali. Spesso vengono utilizzate anche delle strisce di carta incollare. Questo tipo di tessuto permette la disposizione delle fibre in direzioni precise anche per oggetti dalle grandi dimensioni. Inoltre, le proprietà meccaniche sono le migliori dal momento che le fibre non vengono piegate nella tessitura.

1.2.3.6 Stuoie non tessute

Le stuoie non tessute vengono realizzate sovrapponendo più tessuti unidirezionali senza intrecciarli. Attraverso una cucitura si riesce a tenere in posizione l'insieme di tessuti. A seconda della direzione degli unidirezionali si possono avere non tessuti biassiali, triassiali, quadriassiali o multiassiali.

1.3 Matrice

Le matrici plastiche possono essere suddivise in due grandi famiglie a seconda della natura del polimero utilizzato. Esistono infatti matrici termoplastiche e matrici termoindurenti. Nell'industria nautica, le più utilizzate sono certamente le resine termoindurenti perché molto

resistenti e relativamente semplici da utilizzare. Nell'industria dell'*automotive* invece stanno prendendo sempre più piede le matrici termoplastiche grazie anche alle dimensioni ridotte dei prodotti da realizzare.

1.3.1 *Matrice termoindurente*

Le matrici termoindurenti appartengono a diverse famiglie di polimeri, ciò che le lega è la capacità di indurire formando dei legami chimici tra le catene durante la polimerizzazione. Tale processo viene detto *cross-linking* e consente al polimero di creare una maglia molto resistente. I legami formati saranno irreversibili quindi non è possibile ripristinare monomero di partenza. Le proprietà meccaniche di queste resine dipendono principalmente dalle unità molecolari che le compongono, dalla lunghezza delle catene e dalla frequenza dei legami trasversali tra le catene. I processi di polimerizzazione possono essere eseguiti a temperatura ambiente, ciò le rende particolarmente adatte per lavorazioni oggetti dalle grandi dimensioni. Alcune resine necessitano dell'ausilio del calore per completare la polimerizzazione, per questo vengono fatti dei processi detti di *post-curing* che consistono in trattamenti termici.

Generalmente il comportamento di questi polimeri è fragile ed isotropo. A differenza dei polimeri termoplastici non possono essere riprocessate riscaldandole. Fornendo calore alle resine termoindurenti si raggiunge al massimo il loro rammollimento. Sopra la temperatura di transizione vetrosa il polimero passa in uno stato amorfo perdendo le proprietà meccaniche. La T_g si trova circa 10° sopra la HDT, *heat distortion temperature*. Per conoscere la temperatura al quale possono lavorare esser fatte lavorare le resine ci si rifà all'HDT[14].

Le resine termoindurenti più utilizzate nella nautica sono le poliesteri insature, vinilestere, epossidiche e fenoliche. I vantaggi principali sono legati alla buona adesione con i classici tipi di rinforzi usati, la viscosità molto bassa che ne aumenta la processabilità, la resistenza al creep, la resistenza chimica e quella termica. Purtroppo, questi polimeri richiedono tempi di lavorazione molto lunghi, hanno bassa resistenza ad impatto e soffrono le condizioni ambientali esterne.

1.3.1.1 Poliestere insatura

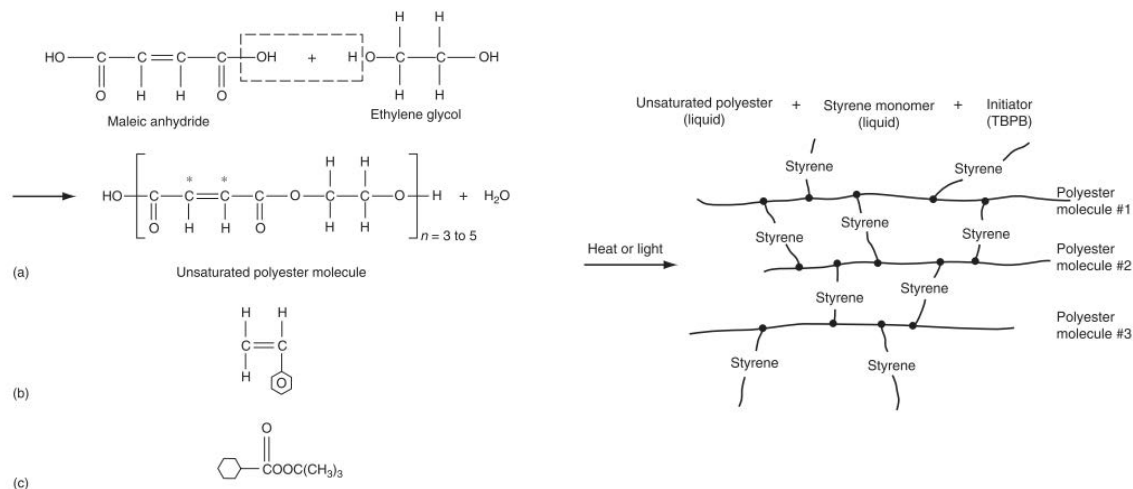


Figura 1.4 Processo di sintesi di una resina poliestere insatura con dettaglio dei legami di cross-linking.

Le resine poliesteri solitamente subiscono un processo misto che prevede una policondensazione in reattore dove vengono create le catene polimeriche insature e una successiva poliaddizione in situ dove, attraverso un iniziatore, la resina reticola fino ad ottenere il polimero solido. Le resine poliesteri insature vengono sintetizzate partendo da un acido bicarbossilico insaturo e un alcool diidrico per ottenere, attraverso un processo di esterificazione, catene di esteri insaturi. Queste catene vengono addizionate a stirene che funge da agente reticolante, esso viene particolarmente utilizzato poichè reattivo ed economico. Lo stirene però è cancerogeno e molto volatile quindi l'utilizzo di tali resine deve essere controllato. Durante il processo di laminazione alla resina vengono aggiunti dei catalizzatori, solitamente perossidi, che rompono i doppi legami delle catene di esteri e dello stirene permettendo loro di creare dei ponti trasversali tra le catene, la reticolazione porta ad un aumento della viscosità. Il processo termina quando non ci sono più molecole con doppi legami. Le poliesteri insature si possono dividere a seconda dell'acido di partenza e sono: ortoftaliche o isoftaliche. Le resine poliestere isoftaliche sono tendenzialmente migliori delle ortoftaliche che viene utilizzata per scopi generali, esse presentano migliore flessibilità e ridotto indice di assorbimento che invece nelle ortoftaliche è elevato. Mentre le ortoftaliche vengono usate per laminazioni di pezzi di scarsa qualità, le isoftaliche vengono usate sia per laminare carene che come base per il gel-coat esterno.

Vantaggi:

- reticolano a temperatura ambiente e non necessitano di trattamenti termici
- semplici da utilizzare;
- basso costo;
- rigidità;
- generalmente sono trasparenti;
- ottime proprietà isolanti;
- buona resistenza chimica.

Svantaggi:

- elevato ritiro, fino al 12%;
- stirene è cancerogeno quindi pericoloso per gli operatori;
- modeste proprietà meccaniche;
- basse temperature di esercizio (da sole resistono fino a 100°, con le fibre arrivano fino a 120°),
- a caldo sono attaccate da acidi, basi, acqua calda e non resistono alla benzina,
- facilmente infiammabili;
- bassa resistenza a raggi UV, tendono a degradare;
- igroscopiche, assorbono acqua (2-3%).

Le resine poliesteri insature sono sicuramente vantaggiose da un punto di vista economico e sono facili da utilizzare, per questo motivo hanno preso facilmente piede nella realizzazione di scafi in vetro-resina, tuttavia le loro prestazioni rimangono molto basse e i difetti dovuti al *blistering* abbassano la loro resistenza nel tempo in ambiente marino.

1.3.1.2 Vinilestere

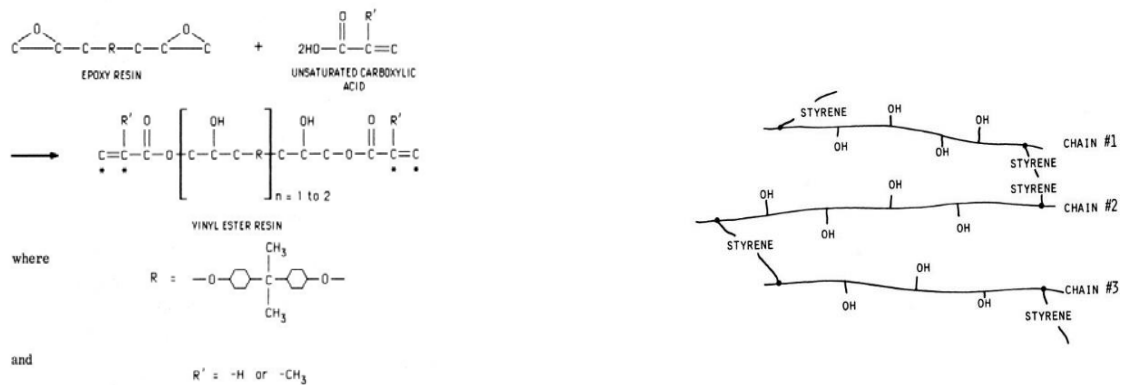


Figura 1.5 (a) Processo di reticolazione di una resina vinilestere; (b) Dettaglio dei legami formati dallo stirene

Le resine vinilesteri nascono dall'unione di un acido carbossilico, metacrilico o acrilico e un bisfenolo diepossido. Il doppio legame, che in questo caso si trova solamente alla fine delle catene, viene aperto grazie all'uso di un catalizzatore come avviene per le resine precedentemente trattate.

Le resine vinilesteri presentano in minor numero i gruppi esteri che sono suscettibili alla degradazione per idrolisi e all'attacco di agenti chimici, questo le porta ad avere una resistenza all'acqua e agli agenti chimici superiore rispetto alle poliesteri. Anche le proprietà meccaniche delle vinilesteri sono migliori, mostrando una tenacità e una resistenza a fatica superiori alle precedenti.

Vantaggi:

- Buona resistenza chimica;
- Buone proprietà meccaniche;
- Tempi di lavorazione relativamente brevi;
- bassa viscosità.

Svantaggi:

- elevato ritiro, fino 5-10%;
- moderate proprietà adesive;
- resistenza non elevata.

1.3.1.3 Resina epossidica

La resina epossidica si distingue dalle resine precedenti per le migliori proprietà meccaniche e per la minor tossicità. La resina viene composta generalmente utilizzando bisfenolo A reticolato con ammine riportate nella Figura 1.5 [14].

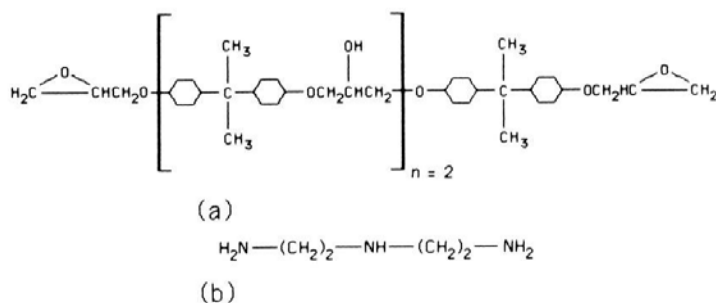


Figura 1.6 Illustrazione dei due componenti della resina epossidica, (a) bisfenolo A che presenta i due gruppi epossidi terminali e (b) diammina che ricopre il ruolo di agente reticolante.

Il bisfenolo A presenta dei gruppi epossidici alle estremità delle catene che, una volta aperti, possono reticolare fino ad ottenere un polimero solido. La reazione di condensazione, che viene illustrata nella Figura 1.6, è esotermica e produce calore ma è fortemente influenzata da fattori esterni come la temperatura. Al diminuire della temperatura infatti la reazione viene molto rallentata, viceversa per temperature sopra i 30°C la reazione avviene molto velocemente. Questo fattore influenza pesantemente la produzione di scafi dalle grandi dimensioni poiché non è facile lavorarli a temperature controllate. Il tempo di reticolazione delle resine epossidiche dipende dalla quantità di agente reticolante immesso nella soluzione oltre alla temperatura. Grazie all'uso di agenti specifici, la resina può reticolare a diverse temperature, con alcuni il processo può avvenire a temperature ambiente, con altri sono richieste temperature elevate. [14] Per la produzione di scafi solitamente si utilizzano resine epossidiche che possono reticolare a temperatura ambiente per poi essere post-curate in speciali forni.

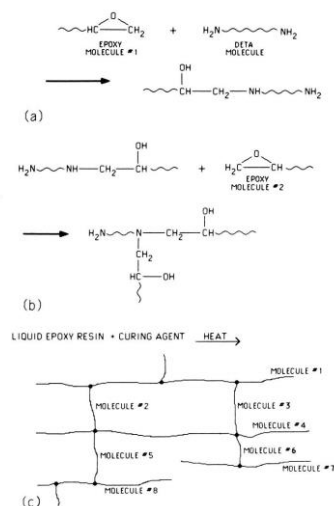


Figura 1.7 Reazione di reticolazione di una resina epossidica

Vantaggi:

- buone proprietà meccaniche;
- bassissimo assorbimento d'acqua;
- temperature di utilizzo: 150°C-200°C servizio continuo e 250°-270°C servizio intermittente,
- basso ritiro, fino al circa 2%;
- assenza di sostanze volatili pericolose;
- eccellente resistenza ai solventi;
- buona bagnabilità tra fibra e matrice;
- ottimi isolanti elettrici,
- ottima adesione a rinforzi di varia natura;
- bassa dilatazione termica;
- autoestinguenti;
- buona resistenza a creep e rilassamento delle tensioni.

Svantaggi:

- costo relativamente alto,
- problemi di lavorabilità,
- tempi di lavorazione lunghi a temperatura ambiente,
- necessarie miscelazioni accurate dei componenti,
- bassa finitura superficiale;
- bassa resistenza ad impatto.

1.3.2 Matrice termoplastica

A differenza delle resine termoindurenti, le resine termoplastiche non presentano reticolazione. La resistenza e la rigidità di un polimero è data dalla reazione che porta il monomero a formare lunghe catene dall'elevato peso molecolare. L'elevata concentrazione di *entanglements* che si formano nell'intreccio delle catene, conferisce le proprietà meccaniche al polimero. Tali legami, fisici, possono essere rimossi fornendo calore al materiale [15]. Questa categoria di plastiche solitamente viene processata ad alte temperature. Generalmente il polimero infatti viene solamente riprocessato dalle aziende e non sintetizzato partendo dal monomero. Una caratteristica fondamentale dei polimeri termoplastici riguarda la loro tendenza a deformare sotto carico nel tempo. Ciò significa che vi è una redistribuzione del carico tra le fibre e la matrice durante la deformazione [15].

1.3.2.1 Polietero etere chetone PEEK

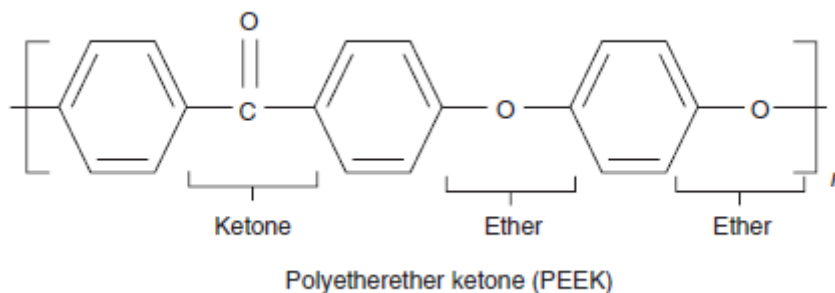


Figura 1.8 Monomero che forma il polietere eter chetone.

Il polieter-eter-chetone (PEEK) è polimero aromatico termoplastico che può raggiungere il 48% di cristallinità. La presenza di rinforzi nel PEEK ne aumenta la cristallinità. La temperatura di transizione del polimero è di 143°C e la temperatura per processarlo deve essere di 370-400°C. Le elevate proprietà meccaniche unite al basso assorbimento d'acqua rendono il PEEK un ottimo sostituto dell'epossidica per applicazioni aeronautiche [14], tuttavia l'impossibilità di lavorarlo a temperature più basse ne compromette l'uso in campo nautico.

1.3.2.2 Polipropilene PP

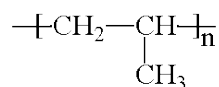


Figura 1.9 Unità monomerica del polipropilene

Il polipropilene è una poliolefina al pari a polietilene e polibutadiene e appartiene alla famiglia delle *commodities* dato il suo basso costo e il vasto impiego. Il PP può essere considerato una buona matrice grazie alle discrete proprietà meccaniche. Esso infatti è più rigido e resistente del PVC e molto leggero rispetto al polisulfone. Il problema principale è forse legato alla scarsa capacità di legare con le fibre. Il PP come le altre poliolefine, tende ad essere inerte sfavorendo l'adesione. In realtà sono stati sviluppati numerosi agenti chimici che ne aumentano il potere adesivo garantendo una buona interazione tra il rinforzo e la matrice[16]. Il polipropilene viene lavorato a temperature tra i 190 e 285°C e questo non ne facilita l'utilizzo in campo nautico. In passato sono state studiate delle tecniche per utilizzare del materiale da recupero attraverso l'*injection moulding* in campo nautico [17] ma solamente per piccoli pezzi e non per l'intero scafo. La produzione di compositi con matrice il polipropilene viene largamente utilizzata in campo automobilistico. I rinforzi naturali però sembrano non essere performanti come le fibre di vetro che opportunamente trattate garantiscono buone prestazioni ed alta ripetibilità [18]. I compositi realizzati con questa matrice però sono prevalentemente a fibre corte per sposare al meglio le tecnologie produttive dell'estrusione e dell'*injection moulding*.

1.3.2.3 Poliammide PA

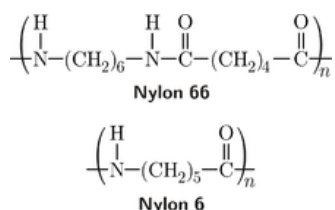


Figura 1.10 Unità monomerica del Nylon 6,6 e del Nylon 6.

Le poliammidi sono un gruppo di plastiche che si inseriscono nella famiglia dei polimeri ingegneristici perchè dotate di buone proprietà meccaniche. Le poliammidi si ottengono generalmente con reazioni di condensazione. Per esempio, la poliammide più conosciuta è il Nylon ovvero PA6,6 ottenuto dalla condensazione di esametilenediammina e acido adipico.

Il Nylon possiede una temperatura di fusione di 264°C al quale solitamente viene lavorato. Molto spesso viene utilizzato con rinforzi in fibra corta di vetro nell'*automotive*. Il polimero è resistente agli attacchi chimici e all'ambiente tuttavia, non resiste agli acidi forti. Le poliammidi in genere sono fortemente igroscopiche. In presenza di umidità il polimero assorbe molta acqua che agisce come lubrificante abbassando drasticamente la temperatura di transizione vetrosa [16]. Questa caratteristica rende le poliammidi sconsigliate per applicazioni strutturali, viste le ovvie condizioni ambientali ma l'uso di tale polimero non è distante dal mondo della nautica visto che molte vele vengono realizzate utilizzando questo materiale.

Vantaggi:

- Discrete proprietà meccaniche;
- Relativamente basso costo;
- Bassa viscosità allo stato fuso;
- Buona adesione con fibre.
- Buona resistenza agli attacchi chimici

Svantaggi:

- Igroscopico;
- Temperature per formatura circa 300°C;
- Bassa resistenza agli acidi forti.

1.3.2.4 Acido polilattico PLA

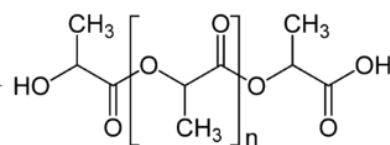


Figura 1.11 Unità monomerica dell'acido polilattico.

L'acido polilattico è un polimero termoplastico molto studiato di recente perchè tra le bioplastiche sembra essere il più promettente [19]. Esso infatti abbina buone proprietà alla sostenibilità. Oltre ad essere biodegradabile, può essere ottenuto attraverso fonti rinnovabili. Di sicuro è promettente come sviluppo per settori come il packaging e l'industria farmaceutica [19]. Il PLA rinforzato con fibre naturali è stato studiato recentemente ma i risultati dimostrano

che il composito non possiede prestazioni molto elevate e non è adatto per utilizzi prolungati come nel mondo della nautica [20]. Inoltre, per essere processato lo si riscalda a circa 170° il che lo rende poco utilizzabile per realizzare oggetti dalle grosse dimensioni.

Vantaggi:

- biodegradabile
- sostenibile
- Discrete proprietà meccaniche se rinforzato
- Basso costo

Svantaggi

- Scarse proprietà long-term
- Temperatura di lavorazione sopra i 170°

1.3.2.5 Polimetilmetacrilato PMMA

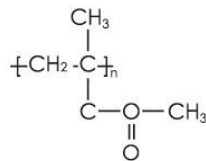


Figura 1.12 Unità monomerica del polimetilmetacrilato.

Il PMMA è un polimero termoplastico amorfo molto utilizzato per le sue proprietà ottiche e per la sua leggerezza. Viene usato principalmente in lastre senza l'aggiunta di rinforzi perchè grazie all'elevata resistenza ad impatto e alla sua trasparenza è un ottimo sostituto del vetro. Il monomero di partenza è il metilmetacrilato e attraverso una reazione di addizione, si raggiunge la polimerizzazione. La reazione può essere attivata in diversi modi per esempio utilizzando dei perossidi, raggi UV o il calore.

Recentemente l'azienda Arkema ha sviluppato una resina acrilica liquida che può essere processata con le stesse tecnologie utilizzate per le resine termoindurenti ovvero senza l'asilo di pressioni elevate e lavorando a temperatura ambiente [8]. Il prodotto infatti si presenta come monomero in forma liquida che con l'aggiunta di una bassa percentuale di perossidi avvia la reazione di addizione formando lunghe catene fino ad indurire. L'azienda per dimostrare l'efficacia del prodotto ha realizzato un Mini 6,50 utilizzato per le traversate oceaniche dimostrando che è possibile utilizzare tale resina per realizzare non solo imbarcazioni

performanti ma anche riciclabili [21]. I vantaggi della resina non si limitano alla processabilità infatti il PMMA possiede una resistenza ai raggi UV e agli attacchi atmosferici superiore alle resine termoidurenti. Meccanicamente possiede delle proprietà leggermente inferiori alle resine epossidiche ma per contro ha la capacità di resistere agli impatti assorbendo molta energia. La resina è stata testata con diverse tipologie di fibre e presenta una buona adesione anche con le fibre naturali come il lino [20,21].

Vantaggi:

- Processabile a basse temperature;
- Trasparente;
- Resistente ad UV e agenti atmosferici;
- Riciclabile
- Biocompatibile;
- Discrete proprietà meccaniche;
- Basso costo.

Svantaggi:

- bassa resistenza ai solventi;

Eliminando le matrici non processabili a temperatura ambiente, in Tabella 1.3, vengono confrontate le resine utilizzabili in infusione.

	Densità	Resistenza Trazione	Modulo elastico	HDT	Allungamento a rottura
	[Kg/m ³]	[MPa]	[GPa]	[°C]	%
Poliesteri insature	1,2-1,5	40-90	2-4,5	50-110	2
Vinil-estere	1,12-1,32	73-81	3-3,5	93-135	3,5-5,5
Epossidica	1,1-1,4	35-100	3-6	50-300	1-6
Elium®	1,19	76	3,3	109	6

Tabella 1.3 Proprietà fisiche e meccaniche delle principali resine per infusione.

Come si può facilmente notare, le proprietà non sono eccessivamente differenti. Andrebbero valutati tutti i casi dal momento che nel mercato esistono moltissime combinazioni che rendono le resine adatte a qualsiasi tipo di applicazione. La resina epossidica rimane in ogni caso la matrice più prestante, sia grazie alle sue proprietà meccaniche che alle sue proprietà fisiche. In questo contesto la resina Elium dimostra di avere delle proprietà molto simili all'epossidica pareggiando i valori del modulo e dell'allungamento conservando una densità mediamente minore.

1.4 Sandwich

I pannelli sandwich sono costituiti solitamente da due pelli che contengono un'anima interna unite da un adesivo. I sandwich vengono utilizzati in diversi settori a seconda delle proprietà. In questo caso vengono descritti i pannelli per applicazioni strutturali. Questi materiali nascono dall'idea di avere delle strutture molto resistenti al minor peso possibile. Al fine di ottenere una struttura resistente a flessione, viene massimizzato il momento d'inerzia come avviene nelle travi a sezione a I.

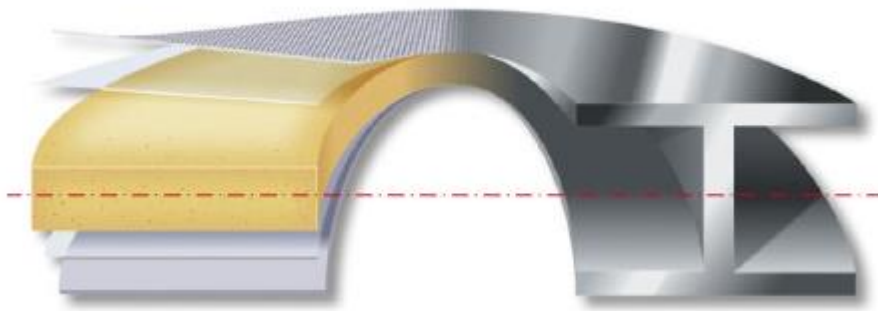


Figura 1.13 Similitudine tra composto sandwich e trave a I [24]

Le pelli, ovvero dei laminati, vengono poste nelle zone più esterne della sezione mentre al centro viene posto un *core* avente bassa densità per garantire leggerezza. L'anima ha lo scopo di impedire alle pelli di collassare sotto l'azione del carico e sarà sottoposta prevalentemente a sollecitazioni di taglio.

Le pelli vengono realizzate con i materiali precedentemente esposti mentre le principali tipologie di anima vengono descritte in seguito.

1.4.1 Anime

Le anime hanno il compito primario di distanziare le pelli esterne senza che queste collasino sotto la pressione applicata. Per fare ciò si utilizzano diverse soluzioni, illustrate in Figura 1.14.

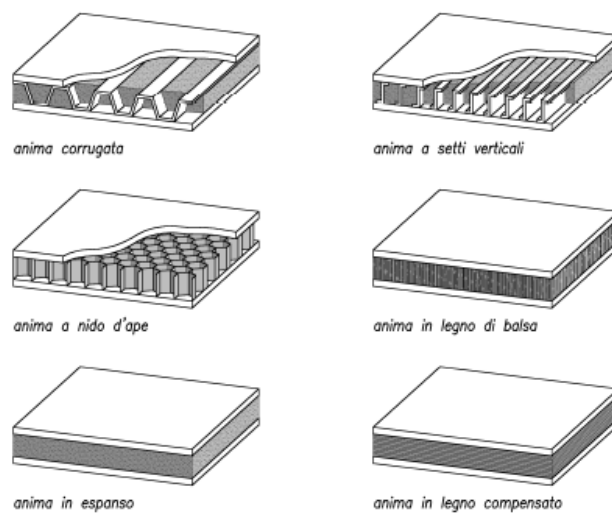


Figura 1.14 *Principali tipologie di anime per sandwich*

1.4.1.1 Balsa

La balsa è un albero tipico dell'Equador dal legno particolarmente leggero. Il legno di balsa utilizzato per la realizzazione dei pannelli sandwich possiede una venatura molto fine con una struttura alveolare. Il legno viene tagliato in un verso preferenziale, trasversalmente alla direzione dei canali linfatici. In questo modo si ottiene un materiale dalle elevate proprietà a compressione, sicuramente il più performante nel settore. La densità della balsa oscilla tra 90-155 e 200 kg/m³. Nonostante sia un materiale molto leggero, è molto svantaggiato rispetto alle schiume polimeriche che possono raggiungere densità molto inferiori. Inoltre, anche se possiede una struttura piena, la balsa tende ad assorbire notevoli quantitativi di resina aumentando notevolmente il peso del prodotto. Come tutti i legni è fortemente sensibile all'acqua. Viene largamente utilizzata in ambito navale, soprattutto per zone sopra il livello dell'acqua quindi in coperta dove è richiesta una maggiore resistenza a compressione.

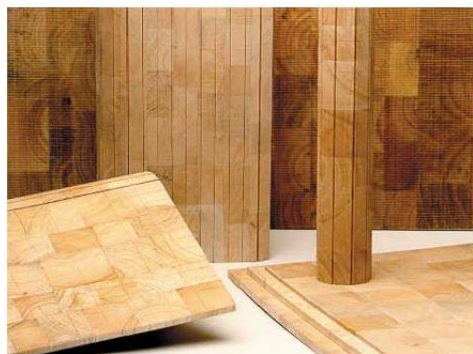


Figura 1.15 *Esempio di pannelli di balsa. Il pannello è formato da più tasselli tenuti assieme da una rete per facilitare il posizionamento del rinforzo su superfici curve.[24]*

1.4.1.2 PVC

Le schiume di PVC sono realizzate attraverso la combinazione di copolimeri polivinilici, stabilizzatori, agenti schiumogeni, agenti reticolanti e plastificanti. Il prodotto finale si presenta a celle chiuse, tale aspetto riduce l'assorbimento di resina della schiuma e rende l'anima meno suscettibile all'umidità. Queste schiume possono essere prodotte alla densità desiderata controllando il grado di espansione. Il PVC può essere sia cross-linked che linear, la differenza sta nel grado di reticolazione tra le catene del polimero. Nel primo caso si ha un prodotto reticolato che si presenta come un espanso rigido e fragile mentre nel secondo caso il polimero è più flessibile e in grado di sopportare deformazioni significative.



Figura 1.16 Esempi di pannelli di PVC espanso. [24].

1.4.1.3 PET

Le schiume di PET vengono ottenute con dall'espansione tramite agenti schiumogeni del polietilentereftalato. Il polimero espanso viene trasportato ed estruso con sezione rettangolare imponendo una direzione preferenziale delle celle create. La lastra prodotta viene quindi sagomata e tagliata in modo da avere le celle parallele alla direzione del carico. La schiuma di PET presenta caratteristiche meccaniche molto simili alle schiume in PVC.

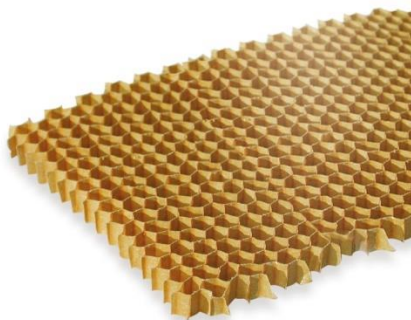


Figura 1.17 Pannello di PET espanso fornito da Diab.

1.4.1.4 Nido d'ape

Le anime a nido d'ape sono costituite da una struttura formata da più celle regolari unite tra loro per formare un reticolo. Le celle possono essere di diversa forma ma le più utilizzate sono le celle esagonali, che richiamano la forma di un alveare, dal quale prendono il nome.

I materiali con cui vengono costruiti questi rinforzi sono molteplici: alluminio, polimeri termoplastici come il Nomex®, carta. A seconda del materiale si avranno determinate caratteristiche meccaniche ma una cosa che accomuna certamente questa tipologia di core è l'elevato rapporto rigidità e resistenza a taglio/peso oltre all'eccellente rigidità nella direzione perpendicolare alle pelli esterne. In questo senso sono superiori alle altre tipologie di anima presentate. In realtà esistono anche molti problemi legati alle anime alveolari. Esse presentano una superficie di incollaggio molto bassa e quindi possono essere utilizzati solamente con resine dall'alto potere adesivo, inoltre avendo una struttura a celle chiuse non possono essere usati nei processi come l'infusione e l'RTM. Per lo stesso motivo sono suscettibili all'infiltrazione di acqua. La loro estrema anisotropia li porta a non essere molto resistenti se sollecitati in direzione trasversale. Un ulteriore difetto riguarda la scarsa resistenza ad impatto. Una volta deformati l'anima non recupera la forma iniziale presentando deformazioni irreversibili. Se le facce invece possiedono una tenacità superiore, può avvenire il distacco del core dalle pelli. Il costo è sicuramente un limite di questi materiali che a differenza delle altre anime è molto alto arrivando a costare anche 5 volte di più della balsa.



(a)



(b)

Figura 1.18 Esempi di anime alveolari , (a) honeycomb di Nomex, (b) honeycomb di alluminio. [25]

1.5 Metodi produttivi

1.5.1 Stesura manuale

Questa tecnica prevede l'uso di fibre o tessuti secchi stesi sullo stampo e poi impregnati con la resina liquida utilizzando dei rulli. Il processo è molto versatile e largamente utilizzato nella pratica. I valori del volume di fibre finale è molto basso quindi i valori del composito non sono elevati.

1.5.2 Proiezione simultanea

La proiezione simultanea era una tecnica molto utilizzata per produrre le imbarcazioni in composito utilizzando fibre corte di vetro e resina poliestere insatura. Il roving di vetro veniva tagliato e spruzzato dall'operatore mediante una pistola con la quale veniva gettata anche la resina premiscelata. La tecnica è molto semplice e immediata ma le proprietà meccaniche sono molto basse poichè il risultato finale è paragonabile ad un *chopped-mat*.

1.5.3 Compression moulding

Il processo di *compression moulding* viene utilizzato principalmente per la formatura di SMC (*sheet mould compound*) e BMC (*bulk mould compound*) e consiste semplicemente nel coprire lo stampo con una preforma di fibre bagnate dal giusto quantitativo di resina che vengono pressate utilizzando un controstampo.

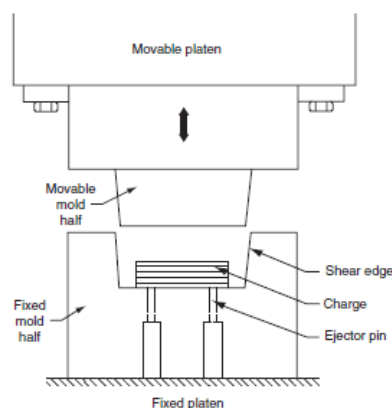


Figura 1.19 Schema del processo di compression moulding.[14].

La tecnica è limitata nelle dimensioni e nei costi dei macchinari, viene molto usata per lavorazioni di grandi volumi di prodotti.

1.5.4 Resin transfer moulding (RTM)

Il processo di *resin transfer moulding* prevede l'uso di uno stampo chiuso all'interno del quale vengono inserite le fibre secche. La resina premiscelata viene immessa nello stampo attraverso un sistema di iniezione a pressione. Per velocizzare la reticolazione, si usa riscaldare sia gli stampi che la resina. Questa tecnica viene molto usata per prodotti dai volumi molto alti, i costi iniziali degli stampi e dell'impianto sono elevati.

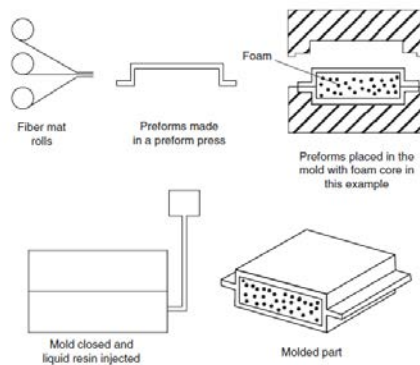


Figura 1.20 Schema del processo di RTM [14].

1.5.5 Filament Winding

Il *filament winding* è una tecnica utilizzata per creare serbatoi o tubi tramite l'utilizzo di mandrini rotanti. In questo caso si utilizza del roving impregnato e poi avvolto secondo precisi schemi.

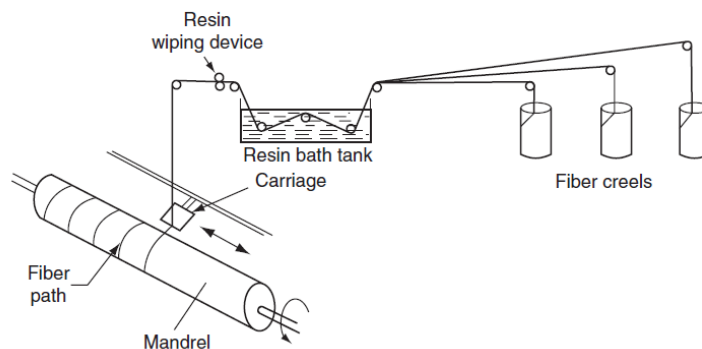


Figura 1.21 Schema del processo di filament winding. [14].

1.5.6 Pultrusione

La pultrusione è un processo continuo che prevede di tirare le fibre attraverso una maschera che decreta la geometria finale dell'oggetto, passando prima per un serbatoio di resina catalizzata. In questo modo è possibile ottenere un materiale composito con un alto contenuto di fibre. La tecnologia è limitata nelle geometrie ottenibili, di fatto vengono prodotti oggetti come tubi e aste con fibre unidirezionali.

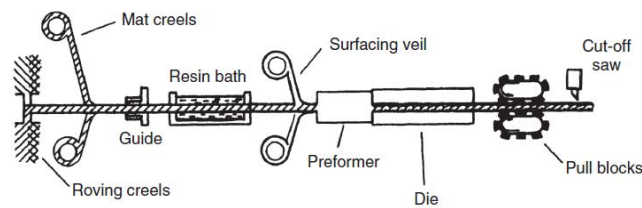


Figura 1.22 Schematizzazione del processo di pultrusione [14].

1.5.7 Infusione (VARTM)

L'infusione è una tecnica dove le fibre vengono poste sullo stampo ancora asciutte come nella RTM ma a differenza di quest'ultima, non viene usato un controstampo bensì viene imposta la condizione di vuoto. Sulle fibre vengono adagiati dei tessuti consumabili che fungono da distaccante e da diffusori del vuoto. Il tutto viene chiuso con un sacco per portare il preformato sottovuoto. La resina viene collegata tramite dei tubi al sacco che per differenza di pressione aspira la resina impregnando le fibre tenute in posizione dal sacco. Con questa tecnica si riesce a diminuire la quantità di resina assorbita ottenendo compositi più performanti. Inoltre, il processo può essere condotto a temperatura ambiente per poi trattare il pezzo in un secondo momento. In questo modo vengono ridotti notevolmente i costi rispetto al RTM. L'utilizzo del sacco fa sì che eventuali esalazioni di gas pericolosi, prodotti dalle resine, siano controllati, senza nuocere agli operatori. Questa tecnica è sicuramente un metodo versatile per costruire pezzi singoli, non è adatta per la produzione in serie visti i lunghi tempi di preparazione e l'elevato quantitativo di scarto dovuto dall'uso dei consumabili. L'infusione viene molto utilizzata nel campo della nautica vista la possibilità di realizzare oggetti di grandi dimensioni operando a temperatura ambiente. Il processo verrà descritto nel dettaglio nei capitoli seguenti.

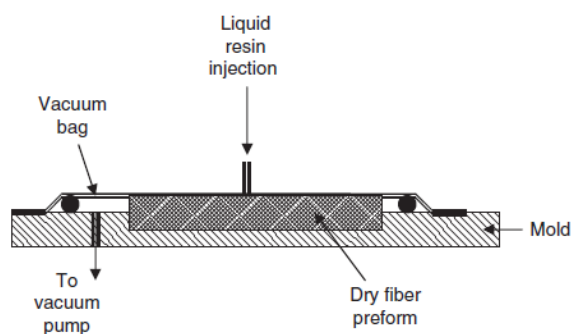


Figura 1.23 Schematizzazione del set-up del processo VARTM [14].

1.5.8 Pre-pregs autoclave

I pre-pregs sono dei semilavorati di fibre pre impregnate con resina epossidica. In questo caso si usano resine *B-staged* aventi la caratteristica di essere più appiccicose delle resine iniziali ma meno rigide di quelle reticolate. Così facendo è possibile posizionare i semilavorati direttamente sullo stampo. Vengono aggiunti anche in questo caso i tessuti ausiliari come peel-ply, microforato e l'aeratore. Viene aggiunto anche un feltro per assorbire la resina in eccesso. Il tutto viene chiuso con un sacco resistente ad alte temperature e si procede con il trattamento termico in autoclave. L'autoclave consente di raggiungere pressioni e temperature elevate che porteranno ad un iniziale rammollimento della resina che si compatterà e il rapido processo di reticolazione quindi all'indurimento finale. In questo modo si raggiungono le massime percentuali volumetriche di fibre, quindi compositi molto prestanti. Per contro i pre-pregs non possono essere conservati a lungo e necessitano di essere stoccati a temperature di circa -18°C per un massimo di un anno. Inoltre, i trattamenti termici in autoclave sono lunghi e dispendiosi da un punto di vista energetico e le dimensioni del pezzo sono legate alla dimensione dell'autoclave.

1.6 Riciclabilità

Da molto tempo si discute la necessità di trovare un metodo efficace per riciclare i compositi a matrice termoindurente prodotti in questi anni. Da tempo vengono studiate diverse soluzioni, dai processi meccanici, come la macinazione, ai processi termici come la pirolisi o processi chimici, con la solvolisi. Alcune tecniche sono riuscite ad avanzare fino a livello industriale tuttavia non se ne conoscono ancora gli effettivi benefici.[2]. Alcuni studi mostrano il livello di sviluppo di sistemi di riciclo efficienti decretando come tecnologia più avanzata quella della

macinazione meccanica [3]. Altre tecnologie alternative però stanno prendendo sempre più piede poichè la macinazione, e il conseguente uso del particolato, non permette il riutilizzo delle materie prime ma evita solamente che i prodotti vengano lasciati in discarica. Le tecnologie più interessanti da un punto di vista del riutilizzo sono certamente i trattamenti a letto fluido e la solvolisi poichè consentono di conservare le fibre separandole dalla matrice. Queste tecniche danneggiano parzialmente le fibre che non possono quindi essere riutilizzate per lo stesso scopo e degradano il polimero che una volta riprocessato o diminuisce le sue proprietà perciò i prodotti riciclati vanno utilizzati per un fine meno nobile. [26][27]

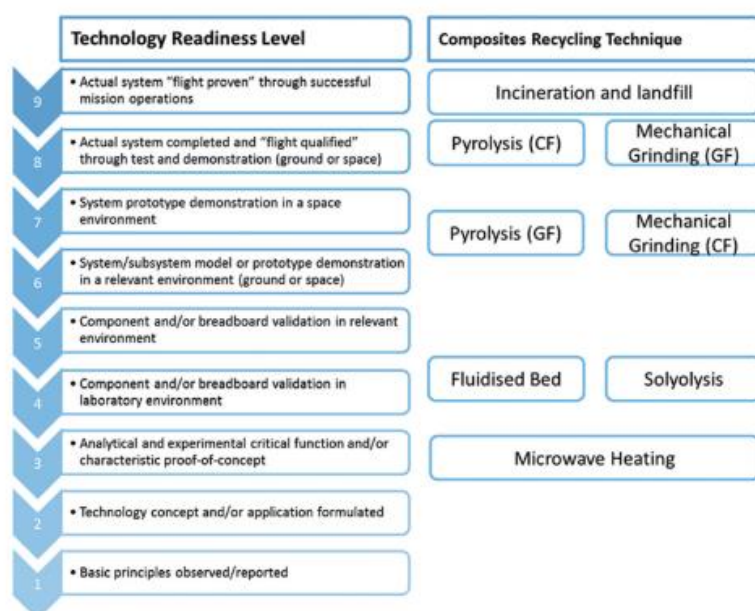


Figura 1.24 Principali metodi di riciclo di materiali composito ordinati in base alla disponibilità tecnologica [3]

L'altissima resistenza ai solventi delle resine termoindurenti, in particolare la resina epossidica, la loro forte interazione con i rinforzi e la loro stabilità anche ad alte temperature non rendono semplice il loro riciclo.

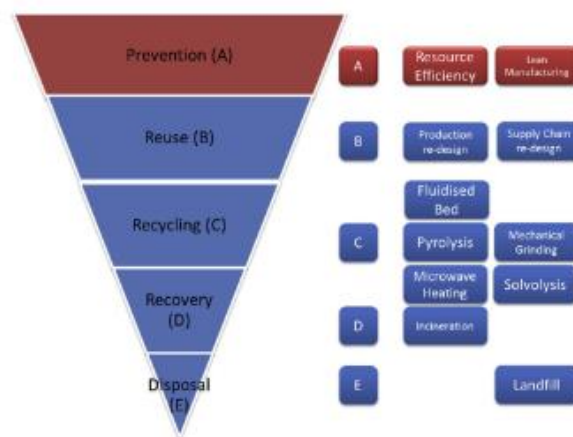


Figura 1.25 Ordine delle strategie per la gestione dei compositi a fine vita [3]

Il lavoro di prevenzione e di gestione dei rifiuti a monte della progettazione risulta essere essenziale per ottenere i migliori risultati in termini di riciclo [3].

1.7 Conclusioni

Alla luce di quanto esposto non vi è dubbio che per poter riciclare, con alte percentuali di recupero, un prodotto complesso come può essere una barca, c'è bisogno di intervenire preventivamente in fase preliminare del progetto individuando le modalità di separazione e le tecniche necessarie per poter recuperare il materiale di scarto. La resina acrilica prodotta da Arkema è una valida sostituta della resina epossidica che consentirebbe di realizzare un composito riciclabile. Il riciclo potrebbe avvenire non solo attraverso la macinazione quindi l'iniezione in stampo o l'estrusione, bensì sarebbe possibile separare le fibre dalla matrice recuperando la maggior parte dei costituenti del composito. La fibra di lino essendo biodegradabile e sostenibile è già di per sé un'ottima soluzione per sostituire le fibre sintetiche, meno riprocessabili. Va detto che esistono diversi lavori che studiano il riciclo dei compositi con fibra di carbonio dato l'elevato costo di queste fibre e i risultati sono promettenti anche se non ancora applicabili su larga scala, tuttavia il regolamento di classe R3 non consente l'uso di queste fibre. La balsa invece si presenta come un materiale rinnovabile e sostenibile ma la gestione di questo legno a fine vita non è banale. La balsa infatti è difficile da smaltire per incenerimento data la sua resistenza al fuoco. La balsa inoltre assorbe alte percentuali di resina innalzando il peso finale della barca. Per questo motivo si è scelto di optare per un'anima più leggera che non richieda particolari trattamenti e che possa essere riciclato. La scelta è ricaduta sul PET.

Capitolo 2

Caratterizzazione dei materiali

Una parte fondamentale nel processo di progettazione di un prototipo riguarda la caratterizzazione dei materiali che si vogliono utilizzare durante la produzione. Le informazioni ricavate attraverso analisi chimiche e fisiche consentono al progettista di conoscere infatti le proprietà esatte dei materiali. In questo modo è possibile dimensionare l'oggetto a seconda delle richieste tecniche progettuali. Nel caso dei materiali selezionati per la realizzazione dell'imbarcazione, i dati forniti dai vari produttori non possono essere considerati per le verifiche necessarie poiché ottenuti con diverse condizioni ambientali e con tecniche molto più accurate e precise. Si procede quindi con una serie delle prove meccaniche statiche, indispensabili per ottenere le proprietà meccaniche di sandwich e laminati, e con delle prove chimiche che accertino le caratteristiche dichiarate dal produttore.

1.1 Prove a trazione statica

Le prove sono state effettuate con lo strumento Sun 2500 presso il laboratorio di Ingegneria dei polimeri del DII. Lo strumento è fornito di ganasce meccaniche e non idrauliche, questo porta ad avere una minore precisione dovuta a un leggero scivolamento del provino durante la fase di carico.

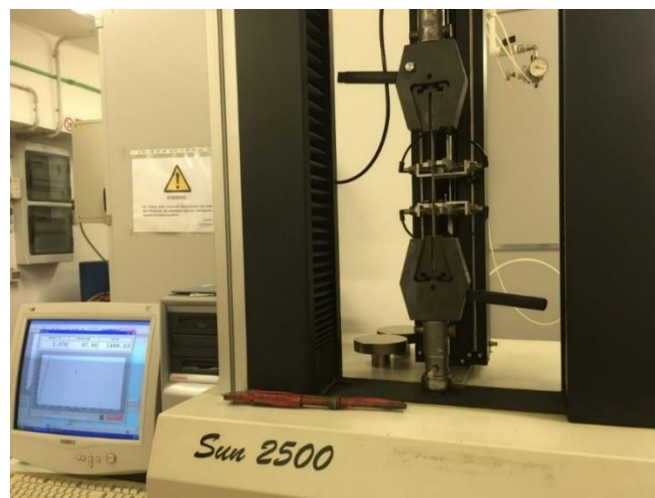


Figura 2.1 *Strumento utilizzato per le prove statiche.*

I test statici a trazione sono stati eseguiti secondo la normativa ISO527-5 che tratta la caratterizzazione dei compositi anisotropi a matrice polimerica rinforzati con fibre lunghe.

Le dimensioni dei campioni da normativa sono diverse in base alla direzione delle fibre. Il tipo A riguarda i provini con fibre parallele alla asse di trazione mentre il tipo B ha le fibre ortogonali all'asse.

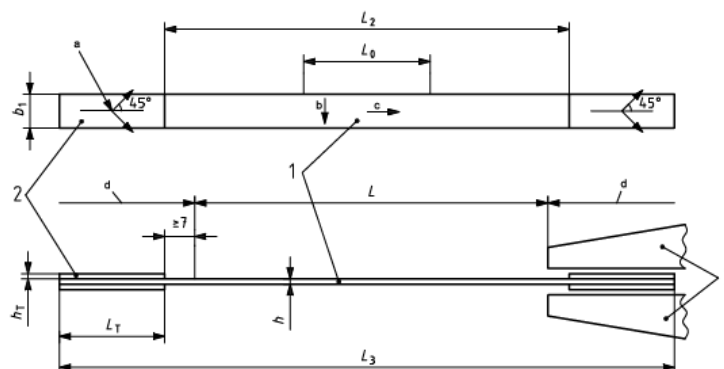


Figura 2.2 Schema illustrativo per la preparazione dei campioni.

Simbolo	Grandezza	Tipo A	Tipo B
L_3	Lunghezza totale	250	250
L_2	Distanza tra i tab	150	150 1
b_1	Larghezza	15	25
h	Spessore	1	2
L_0	Distanza estensometro	50	50
L	Distanza iniziale ganasce	136	136
L_T	Lunghezza tab	>50	>50
h_T	Spessore tab	0,5-2	0,5-2

Tabella 2.1 Dati relativi alle dimensioni dei due diversi tipi di provini utilizzati nelle prove a trazione

A differenza dei tipici provini a forma di osso di cane, nei compositi unidirezionali non è possibile utilizzare tale geometria poichè la zona di restrizione costituirebbe un'interruzione delle fibre, nonché un punto debole. Per questo motivo la geometria per polimeri rinforzati con fibre unidirezionali è un rettangolo rinforzato con dei tab.

I tab sono dei rinforzi realizzati in fibra di vetro a 45° posizionati nelle estremità dei provini. I rinforzi vengono smussati nella parte più interna per distribuire gli sforzi così da non far risentire effetti di concentrazione degli sforzi. Il gradino formato tra tab e provino risulterebbe una zona debole dal quale si può avere innesco di cricca che porterebbe a rottura per valori di resistenza inferiori a quelli effettivi, falsando la misura. Per unire i rinforzi con il corpo del

provino, la normativa impone l'uso di un adesivo ad alta resistenza, nel caso in esame è stata usata una comune colla cianoacrilata.

Le prove a trazione riguardano solamente i laminati, in particolare sono stati studiati i comportamenti delle seguenti coppie matrice-rinforzo:

- Resina epossidica- fibre di lino,
- Resina acrilica- fibre di lino,
- Resina acrilica-fibre di vetro.

I provini sono stati ricavati da dei pannelli realizzati tramite metodo dell'infusione presso i laboratori di macchine termiche e aerauliche del DII. A seconda della tipologia di provino è stato necessario produrre dei pannelli che seguissero le linee guida dettate dalla normativa. I pannelli sono stati realizzati su di una superficie di vetro. La superficie in vetro, oltre ad essere un ottimo distaccante, garantisce una finitura perfetta al provino senza così dover ricorrere alla lucidatura della faccia del provino. La tecnica utilizzata è la stessa pensata per la produzione dello scafo, quindi i provini vengono realizzati tramite infusione a vuoto. La preparazione inizia con l'applicazione di un sigillante butilico attorno all'area interessata, all'interno della quale viene applicato un distaccante, in questo caso si è utilizzata una cera resistente ad alte temperature. Successivamente vengono depositati i rinforzi secondo il piano di laminazione previsto per il campione come illustrato in Figura 2.3. Infine vengono aggiunti i consumabili, che permettono di rimuovere più facilmente il materiale al termine del processo oltre che ad aiutare a distribuire la resina ed il vuoto uniformemente.

In Figura 2.3 vengono riportate le immagini che raffigurano i vari passaggi appena elencati. La fase più delicata, come spiegato nel capitolo precedente, risiede nella chiusura del sacco che deve garantire un isolamento totale con l'esterno.

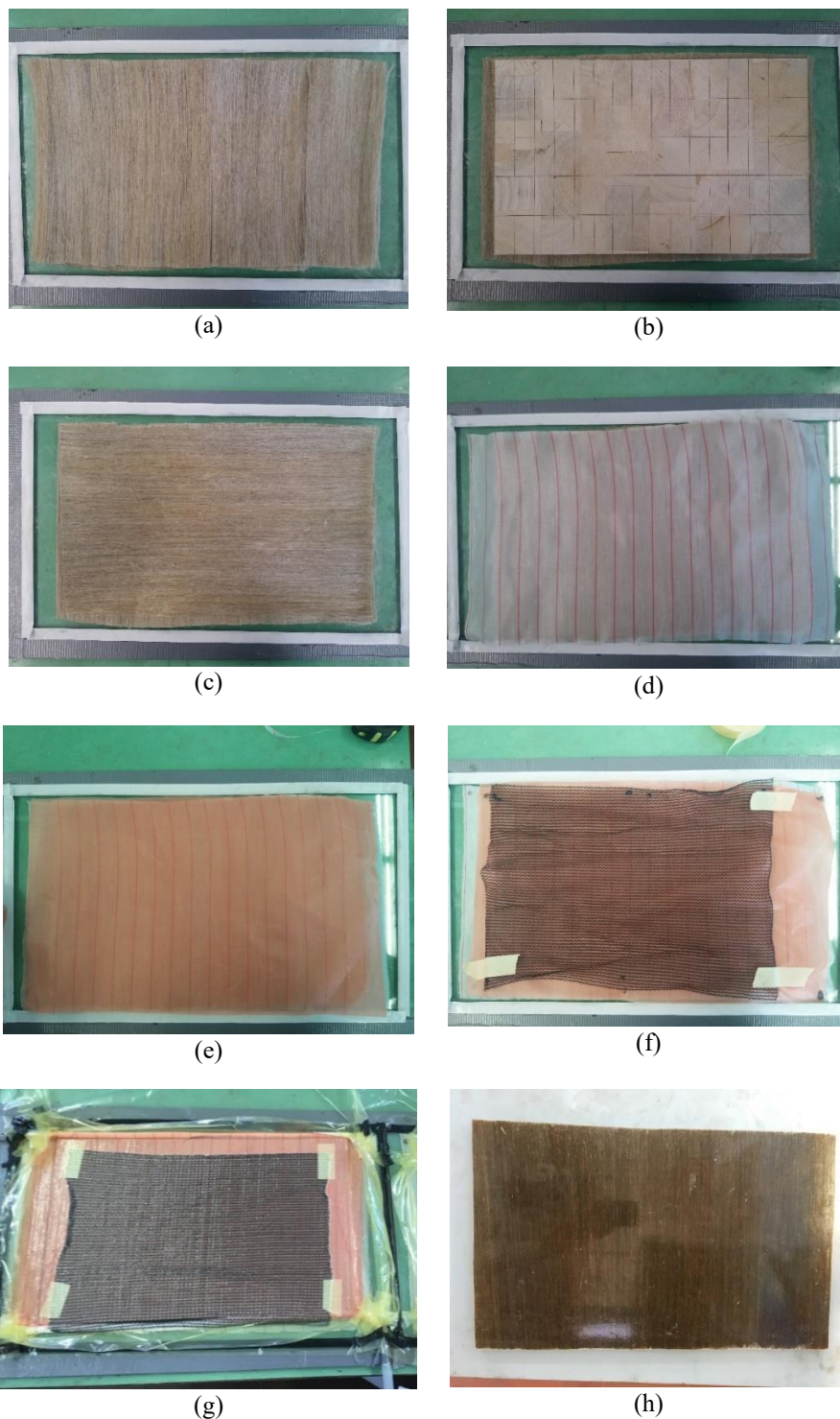


Figura 2.3 Sequenza di laminazione durante la preparazione del processo di infusione: (a) e (c) posizionamento delle fibre secondo piano di laminazione; (b) posizionamento del core, in questo caso legno di balsa; (d) applicazione del tessuto distaccante ovvero peel-ply; (e) applicazione del microforato in ELA; (f) stesura del flow-mesh nonchè distributore di resina e diffusore del vuoto; (g) chiusura del sacco a vuoto; (h) risultato del processo, superficie del provino con finitura a specchio.

La caratteristica più importante nella realizzazione dei provini è certamente lo spessore. Come riportato in Tabella 2.1 i provini di tipologia A devono avere uno spessore di 1 mm mentre i provini di tipologia B di 2 mm. Per ottenere lo spessore richiesto sono stati eseguiti dei test per conoscere il numero di strati ottimale. Il lino utilizzato è il FlaxTape110 fornito dall'azienda francese Lineo e consiste in tessuto unidirezionale. Il vetro invece è anch'esso un tessuto unidirezionale fornito dall'azienda turca Metyx. Per quanto riguarda le matrici, le resine utilizzate sono l'epossidica Prime 20LV slow di Gurit e la termoplastica acrilica Elium 188 XO fornita da Arkema. La resina fornita da Gurit è particolarmente indicata per l'infusione poiché presenta una viscosità di circa 230 cP ad una temperatura di 25°C. Vengono utilizzate delle ammine per indurire la resina in rapporto pari allo 0,26. Il pot-life per 500g è di 1 ora e un gel-time di 8h. La resina acrilica invece presenta una viscosità di 100 cP perciò nettamente inferiore alla resina epossidica. Il tempo di lavorazione oscilla da 45 a 60 min in base alle quantità di agente indurente che in questo caso è il benzoin perossido, Perkadox CH50 X, venduto da AkzoNobel. Nel nostro caso sono stati utilizzati i perossidi al 3% in peso. Con tale quantitativo si raggiunge la velocità massima di reazione. Nella tabella seguente vengono riportate il numero di strati necessari per realizzare i campioni secondo normativa.

Provino	Tipologia	Spessore	Grammatura	N° strati	Volume fibre
		[mm]	[g/m ²]		%
Resina acrilica-fibra di lino	A	1	110	4	0,35
	B	2	110	8	0,39
Resina epossidica-fibra di lino	A	1	110	4	0,40
	B	2	110	8	0,40
Resina acrilica-fibra di vetro	A	1	300	2	0,48
	B	2	300	8	0,5

Tabella 2.2 Descrizione del numero di strati e della grammatura dei provini realizzati.

Nella Tabella 2.2 è stata inserita una colonna contenente il volume di fibre del composito ottenuto. Osservando tali valori, si nota subito come vi sia una differenza nel contenuto di fibre tra i diversi compositi. Utilizzando le fibre di lino si ottengono contenuti di fibre inferiori rispetto alla fibra di vetro. Questo aspetto è principalmente dovuto alla natura dei tessuti utilizzati. Nonostante tutti siano tessuti unidirezionali, quelli di vetro sono molto più regolari, quindi più facilmente impaccabili. Le fibre di lino invece non sono regolari; inoltre avendo una grammatura inferiore consentono un maggior ristagno di resina tra i diversi strati.

Una seconda osservazione doverosa riguarda le condizioni di vuoto al momento dell'infusione. Nei provini realizzati con epossidica, si è utilizzata una pressione negativa di 1 bar mentre per

i compositi realizzati con resina acrilica di 0,5 bar. Data la volatilità dei perossidi utilizzati per iniziare la reazione di polimerizzazione, è necessario diminuire la depressione altrimenti la quantità di iniziatore non sarebbe sufficiente. Questa differenza di pressione porta ad avere un'infiltrazione maggiore di resina, per questo motivo il provino di Elium presenta un volume di fibre inferiore rispetto agli altri. Il provino realizzato con 4 strati mostra la percentuale di fibre in volume minore, il motivo è analogo alla prima osservazione, all'aumentare degli strati disposti, vi è una diminuzione della resina presente nel prodotto finale. Il volume di fibre è un indice delle performance del composito, all'aumentare di questo indicatore si hanno performance migliori del laminato poichè a prevalere saranno le proprietà meccaniche delle fibre e non quelle della resina.

Tale campagna di provini è stata pensata per permettere di confrontare il comportamento della matrice e delle fibre di lino più recenti con valori noti. Da diversi anni il Team lavora con le fibre di lino e ne conosce le proprietà meccaniche, in questo modo è possibile capire quanto si discosta il composito a matrice termoplastica dal composito in epossidica. Il vetro costituisce invece un campione di riferimento. Oltre ad essere un materiale molto più regolare rispetto alle fibre naturali, nella scheda tecnica della resina sono riportati dei valori ottenuti con fibre di vetro, in questo modo è possibile conoscere la differenza in termini di prestazione tra i valori ottenuti dall'azienda e i valori ottenibili dal team.

Per ogni coppia di materiali è necessario testare almeno 3 campioni per ciascuna tipologia di provino; perciò 3 campioni sono ricavati seguendo il verso longitudinale delle fibre e altrettanti seguendo il verso trasversale. I provini con le fibre parallele all'asse seguiranno la tipologia A, i provini con le fibre trasversali saranno realizzati come la tipologia B.

I tab vengono incollati al pannello e poi vengono tagliati insieme come indicato in Figura 2.5.

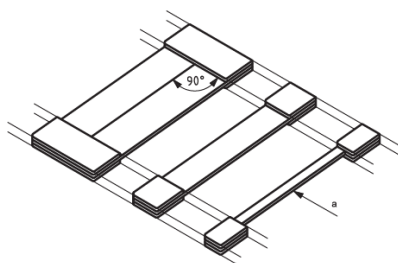


Figura 2.4 Schema di taglio dei provini con tallone.

Una volta tagliati i provini, si procede con la lucidatura dei bordi. Nelle zone più esterne infatti, il provino potrebbe essere danneggiato favorendo l'innesco quindi la propagazione di cricche. La rottura causata da questi difetti falserebbe la misura.

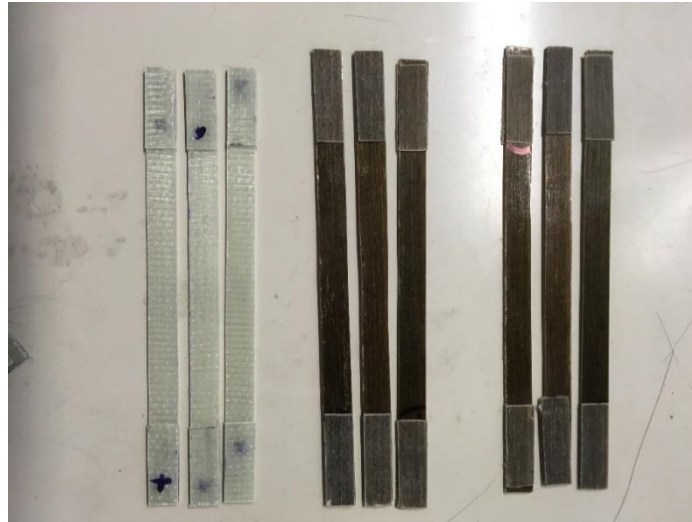


Figura 2.5 Esempio di provini di tipo A.

Terminata la preparazione dei campioni si procede con la prova di trazione statica. Per migliorare la presa delle ganasce dello strumento, si sono irruvidite le facce dei talloni così da favorire l'interferenza fisica tra i due.



Figura 2.6 Dettaglio dell'afferraggio delle ganasce.

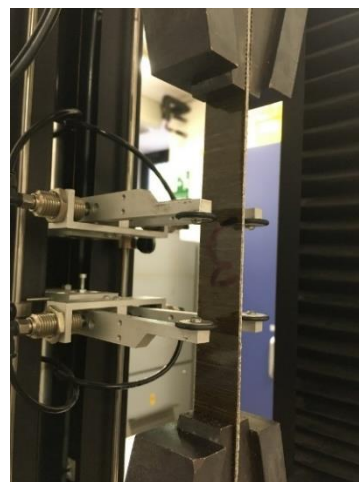


Figura 2.7 Estensometro usato durante i test.

In Figura 2.7 viene riportato un'immagine che mostra la configurazione utilizzata nella prova.

Per analizzare gli spostamenti è stato utilizzato un estensimetro pneumatico integrato allo strumento. La distanza dei bracci dell'estensimetro è fissata da normativa e deve essere di 50 mm come riportato in Tabella 2.1.

1.1.1 PMMA-Lino

I primi test sono stati effettuati sui campioni in fibra di lino a matrice termoplastica di PMMA (Elium). Di seguito verranno esposti i grafici significativi e le relative tabelle con i dati ottenuti.

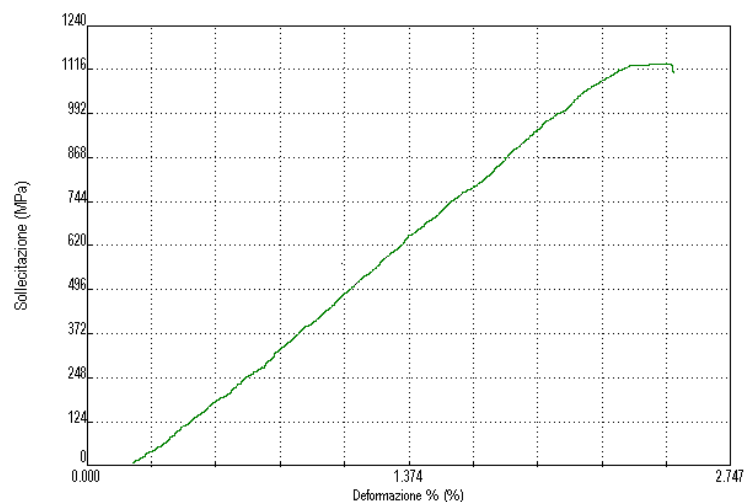


Figura 2.8 Grafico sforzo-deformazione caratteristico per laminato resina acrilica-lino con fibre unidirezionali a 0°.

Osservando il grafico per il laminato PMMA-Lino si può notare come l'andamento sia tipico dei materiali fragili, presentando una crescita lineare-elastica. Questo comportamento è scontato per materiali compositi rinforzati con fibre parallele alla direzione della sollecitazione.

Trazione	Spessore	Larghezza	σ	E	ε
	[mm]	[mm]	[MPa]	[MPa]	%
PMMA-Lino-0 1	1	15	255	17300	1,85
PMMA-Lino-0 2	1	15	213	16280	1,93
PMMA-Lino-0 3	1	15	248	17610	1,76
Media			239	17063	1,84
Dev.std			22	696	0,08

Tabella 2.3 Risultati prova a trazione provini in matrice termoplastica rinforzati con fibre di lino $[0_2]_s$.

I dati ottenuti dalla prova a trazione mostrano un buon comportamento a trazione da parte del laminato, infatti la resistenza a frattura arriva a circa 240 MPa.

Di seguito invece vengono riportati i valori ottenuti dai campioni aventi le fibre trasversali rispetto alla direzione del carico.

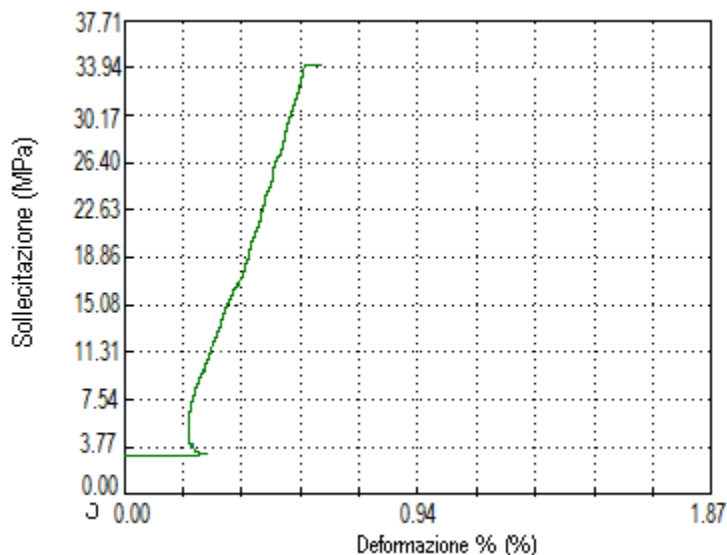


Figura 2.9 Grafico sforzo-deformazione caratteristico per laminato resina acrilica-lino con fibre unidirezionali a 90°.

Trazione	Spessore	Larghezza	σ	E	ϵ
	[mm]	[mm]	[MPa]	[MPa]	%
PMMA-Lino-90 1	2	25	21,3	4075	0,51
PMMA-Lino-90 2	2	25	34,4	4990	0,62
PMMA-Lino-90 3	2	25	21,5	4540	0,40
Media			25,7	4535	0,50
Dev.std			7,5	457	0,11

Tabella 2.4 Risultati prova a trazione provini in matrice termoplastica rinforzati con fibre di lino [90₄]_s.

Anche i valori dei provini con le fibre poste trasversalmente seguono i valori, mostrando una curva leggermente arrotondata nella parte iniziale. Questo comportamento è dovuto ad un difetto della misura attribuibile allo strumento, probabilmente dovuto ad uno scivolamento in fase di applicazione del precarico. I valori di rottura sono decisamente bassi poichè con questa configurazione viene caratterizzata la matrice. Si può ritenere legittimo un comportamento plastico. Le fibre hanno un basso impatto sulle proprietà della matrice dal momento che la resina pura possiede un modulo elastico di 3,3 GPa mentre il composito presenta in media un modulo di 4,5 GPa.

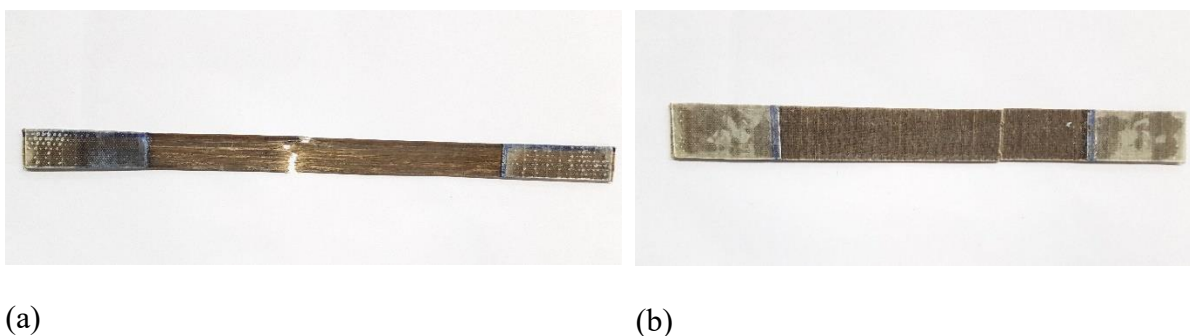


Figura 2.10 Esempio di rottura a trazione dei provini realizzati in fibra di lino e resina acrilica. (a) Provino con fibre disposte a 0°; (b) provino con fibre disposte a 90°.

1.1.2 PMMA Vetro

I test condotti per i laminati realizzati con matrice termoplastica e rinforzati con fibre di vetro fungono da riferimento per capire la qualità dei processi produttivi all'interno dei laboratori. Inoltre, come anticipato nell'introduzione del capitolo, le fibre di vetro sono estremamente regolari e costanti, questo consentirà di osservare più facilmente le proprietà della resina acrilica. Di seguito vengono riportati i grafici ottenuti ponendo le fibre a 0°.

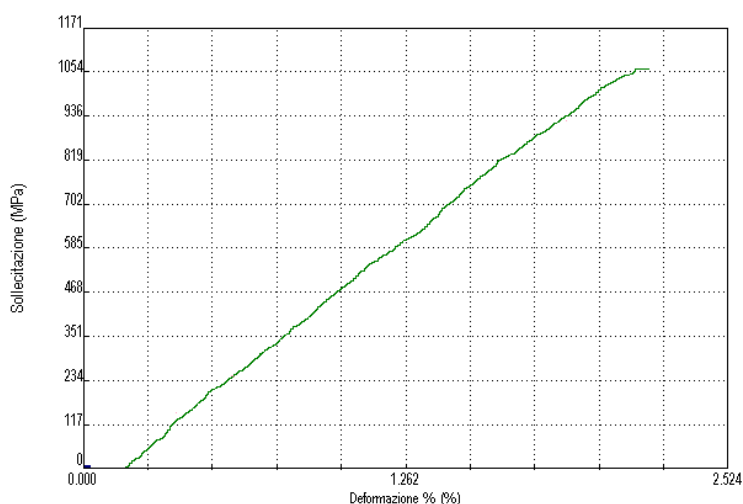


Figura 2.11 Curva sforzo-deformazione di un provino PMMA-Vetro [0₂].

Trazione	Spessore	Larghezza	σ	E	ε
	[mm]	[mm]	[MPa]	[MPa]	%
PMMA-Vetro-0 1	1	15	1140	53781	2,21
PMMA-Vetro-0 2	1	15	1050	51827	2,45
PMMA-Vetro-0 3	1	15	1100	65916	2,40
Media			1096	57174	2,35
Dev.std			45	7633	0,12

Tabella 2.5 Risultati delle prove a trazione sui provini PMMA-Vetro [0₂].

I valori ottenuti nella prova a trazione con le fibre parallele sono decisamente alti, ma concordi ai dati esposti nel datasheet del produttore.; i provini, infatti, mostrano un andamento pressoché lineare e l'andamento della curva indica con precisione la natura elastica del materiale. I valori della scheda tecnica riportano una resistenza a trazione di 1005 MPa e un modulo elastico pari a 47 GPa. La differenza tra i ottenuti e quelli del datasheet sono attribuibili al rinforzo in vetro, proveniente da due fornitori diversi. La rottura, come riportato in Figura 2.13, avviene in maniera corretta a testimonianza della perfetta interazione tra le fibre di vetro e la resina utilizzata.

Pe quanto riguarda i provini con le fibre trasversali si sono ottenuti i seguenti risultati:

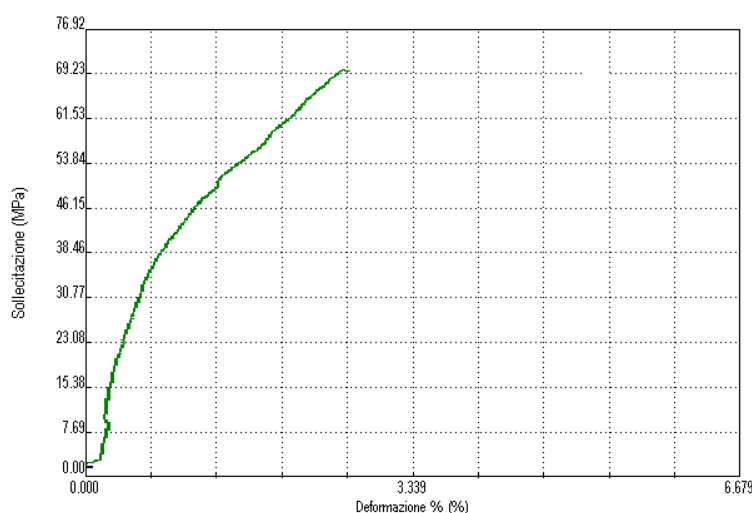


Figura 2.12 Curva sforzo-deformazione di un provino PMMA-Vetro $[90_2]_s$.

Trazione	Spessore	Larghezza	σ	E	ϵ
	[mm]	[mm]	[MPa]	[MPa]	%
PMMA-Vetro-90 1	2	25	67	5124	2,80
PMMA-Vetro-90 2	2	25	68	4639	2,57
PMMA-Vetro-90 3	2	25	70	7351	2,60
Media			68	5704	2,65
Dev.std			2	1446	0,12

Tabella 2.6 Risultati delle prove a trazione di un provino PMMA-Vetro $[90_2]_s$.

In questo caso si osserva un comportamento plastico più evidente. I valori del modulo elastico e della resistenza a trazione sono leggermente diversi dai valori ottenuti dal produttore per un materiale analogo poichè nel loro caso la resistenza a trazione è pari a 53 MPa mentre il modulo elastico risulta essere 12 GPa. I valori non eccedono di molto e quindi confermano la buona interazione tra le fibre di vetro e la resina acrilica. I valori più alti della resistenza potrebbero

essere imputabili al fatto che il tessuto utilizzato conteneva una bassissima percentuale di vetro in direzione trasversale per maneggiare il tessuto con più facilità mentre i valori del modulo inferiori sono legati ad un possibile scivolamento del provino.



Figura 2.13 Esempio di rottura a trazione dei provini realizzati in fibra di vetro e resina acrilica. (a) Provino con fibre disposte a 0° ; (b) provino con fibre disposte a 90° .

1.1.2.1 Epossidica lino

Di seguito vengono esposti i risultati ottenuti con le prove a trazione del laminato a matrice epossidica e fibre di lino. Queste prove sono state condotte solamente per provini con fibre parallele poiché, si era già in possesso dei dati riguardanti questo materiale grazie ai lavori di tesi svolti da membri precedenti del team[12][28] Tuttavia, per conoscere la differenza tra questo composito e il composito PMMA-lino si è deciso di testarli insieme. Il test con le fibre trasversali serve principalmente per ricavare il coefficiente di Poisson che in questo caso era già noto.

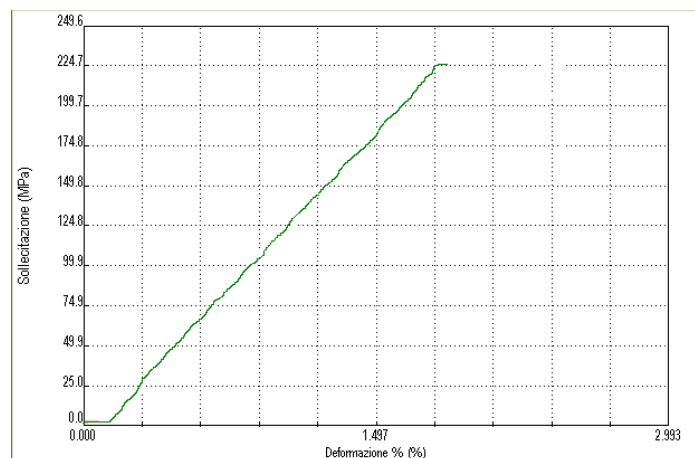


Figura 2.14 Curva sforzo-deformazione di un provino epossidica-lino $[0_2]_s$.

Trazione	Spessore	Larghezza	σ	E	ε
	[mm]	[mm]	[MPa]	[MPa]	%
Epoxy-Lino-0 1	1	15	226	16570	1,81
Epoxy-Lino-0 2	1	15	227	18918	1,71
Epoxy-Lino-0 3	1	15	220	15061	1,90
Media			224	16849	1,80
Dev.std			4	1943	0,09

Tabella 2.7 Risultati delle prove a trazione di un provino epossidica-lino $[0_2]_s$.

Il grafico in Figura 2.14 testimonia l'andamento lineare elastico del composito. I valori ottenuti sono leggermente inferiori ai dati in possesso del team per quanto riguarda il modulo elastico mentre i valori della resistenza a trazione coincidono con i valori ottenuti nei lavori di Basile e Pizzato[12] [28]. Il fenomeno può essere attribuito ad un leggero scivolamento dei provini nella fase di carico.

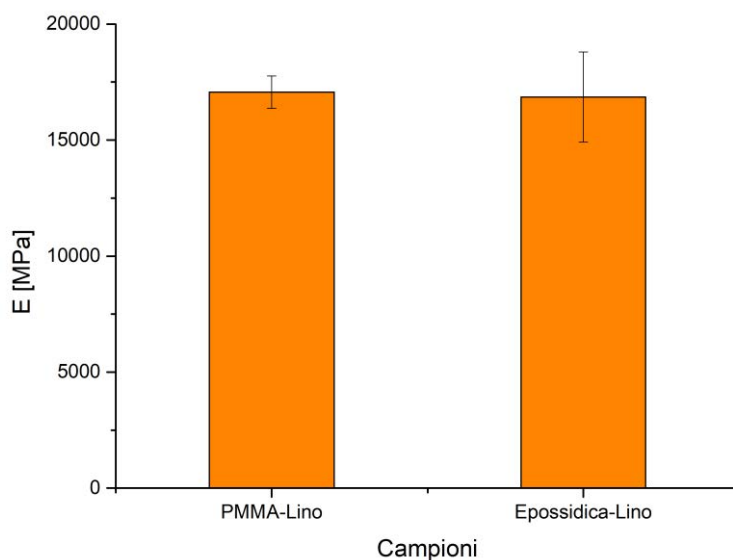


Figura 2.15 Istogramma di confronto tra i moduli elastici dei due compositi rinforzati in fibra di lino con matrice differente.

Confrontando i risultati con i campioni PMMA-Lino, possiamo constatare come i due materiali non differiscano di molto. Statisticamente i valori del composito termoplastico possono ritenersi confrontabili con i valori del composito a matrice termoindurente. Nel diagramma in Figura 2.15 si nota come, considerando la deviazione standard delle due distribuzioni, i due materiali siano paragonabili.

2.1 Prove a flessione

2.1.1 Laminati

Per completezza sono stati svolti anche dei test volti a caratterizzare i laminati con dei test a flessione.

In particolare, la prova effettuata è una prova a flessione a 3 punti. La normativa di riferimento è stata la ISO 14125. Il test opera in controllo di deformazione applicando una velocità di deformazione costante nel tempo. Sfruttando lo stesso strumento usato nelle prove a trazione è possibile svolgere dei test a flessione semplicemente cambiando i supporti, riportati in Figura 2.16.

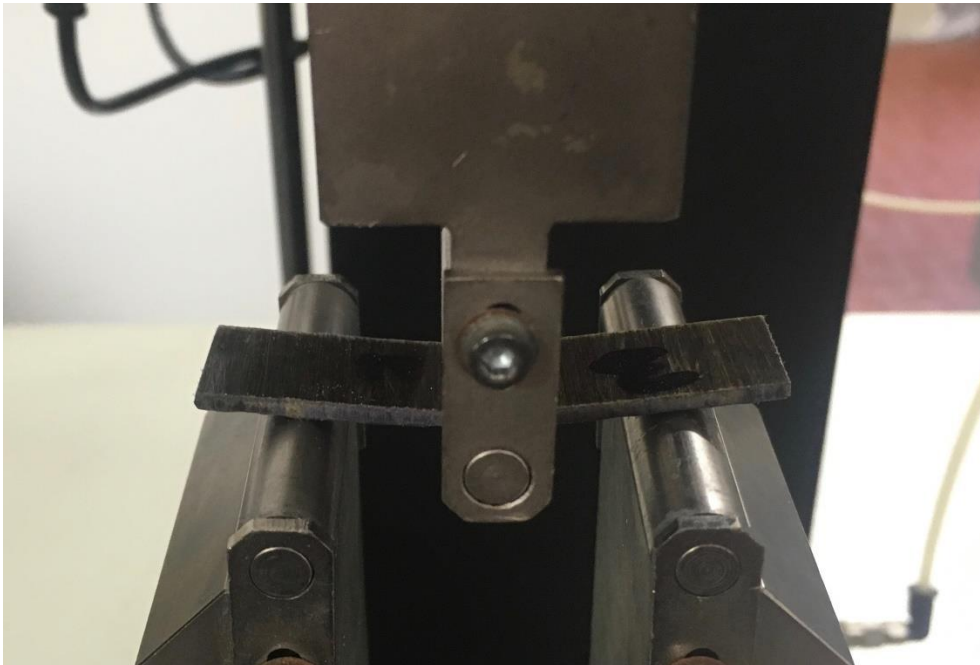


Figura 2.16 Dettaglio dei supporti usati nella prova a flessione a tre punti.

Nello specifico la velocità è di 2 mm/min per i provini orientati parallelamente alle fibre e di 1 mm/min per i provini trasversali all'orientazione delle fibre.

Anche in questo caso, come per le prove a trazione, sono stati testati 3 diversi accoppiamenti dei materiali. Per ciascuno si sono ricavati dei provini con le fibre parallele e trasversali all'asse. In questa prova non vi è distinzione nella geometria dei provini, infatti tutti avranno le stesse dimensioni.

Simbolo	Grandezza	[mm]
L_t	Lunghezza totale[mm]	60
L	Distanza tra gli appoggi [mm]	40
b_1	Larghezza [mm]	15
h	Spessore [mm]	2

Tabella 2.8 Dimensioni dei provini per la prova a flessione.

I campioni sono stati ricavati con procedimento analogo a quello usato per i laminati sottoposti al test a trazione. Lo spessore, di 2 mm, è stato ricavato con lo stesso piano di laminazione indicato in Tabella 2.2. I risultati possono essere utilizzati per confrontare l'effettivo comportamento a flessione dei laminati. I valori ottenuti serviranno non solo per confrontare i diversi materiali a flessione ma per capire l'effettivo comportamento in tali condizioni di carico. La flessione è la principale azione compiuta sul composito utilizzato.

Prima di analizzare i risultati però, vengono riportate le equazioni necessarie per ricavare le proprietà meccaniche indicate nella normativa.

$$\sigma_f = \frac{3FL}{2bh^2} \quad (2.1)$$

- σ_f : resistenza a flessione, [Mpa]
- F : carico della traversa, [N].

$$E_f = \frac{L^3}{4bh^3} \left(\frac{F}{s} \right) \quad (2.2)$$

- E_f : modulo elastico a flessione, [MPa];
- s : corsa della traversa, [mm];

I termini di resistenza a flessione e il modulo elastico a flessione non vanno confusi con le relative grandezze ricavate a trazione poichè non sempre sono uguali. In fase progettuale non verranno utilizzati i valori a flessione, si preferisce infatti lavorare con i valori a trazione.

Durante la prova non sono previsti sensori applicati al provino, lo strumento infatti rileva solamente la corsa della traversa e il carico applicato per ottenere la deformazione imposta.

2.1.1.1 Epossidica-lino

I primi test sono stati condotti sul laminato realizzato in resina epossidica rinforzata con fibre di lino.

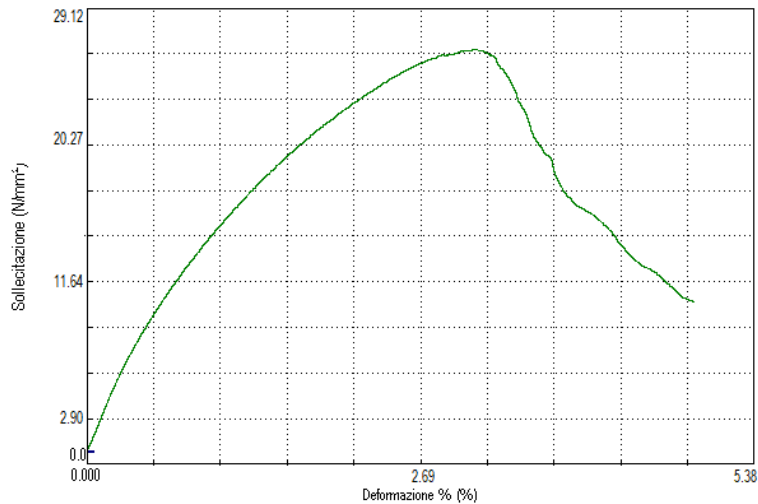


Figura 2.17 Grafico sforzo-deformazione a flessione di un laminato $[0_2]_s$ epossidica-lino.

Flessione Laminato	Spessore	Larghezza	σ_f	E_f	ϵ
	[mm]	[mm]	[MPa]	[MPa]	%
Epoxy-Flax-0 1	2	15	26,4	13916	3,3
Epoxy-Flax-0 2	2	15	28,0	12722	3,2
Epoxy-Flax-0 3	2	15	24,7	12474	3,5
Epoxy-Flax-0 4	2	15	23,7	12154	3,6
Epoxy-Flax-0 5	2	15	24,7	11742	3,7
Media			25,5	12601	3,5
Dev.std			1,7	821	0,2

Tabella 2.9 Risultati dei test a flessione di un laminato $[0_2]_s$ epossidica-lino.

I risultati seguono il tipico andamento di una curva sforzo-deformazione di un materiale elasto-plastico. Inizialmente si ha un tratto lineare-elastico, superato lo snervamento si nota invece un comportamento plastico. Il laminato si rompe nella zona a compressione, le fibre non possiedono infatti ottime caratteristiche se sollecitate in questo modo.

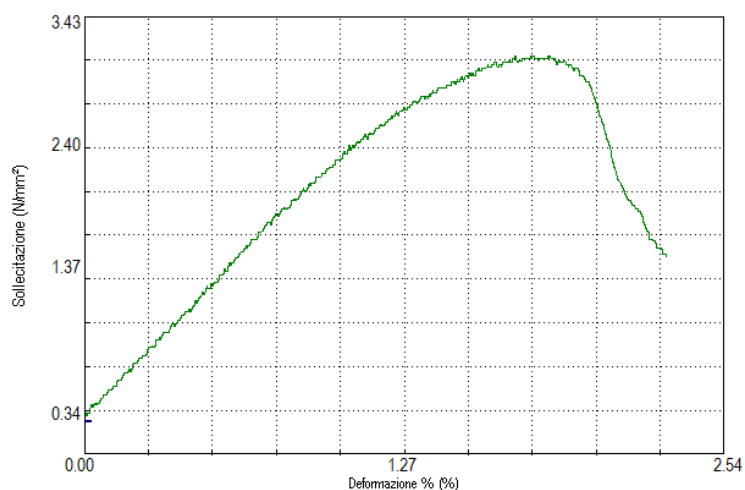


Figura 2.18 Grafico sforzo-deformazione a flessione di un laminato $[90_4]_s$ epossidica-lino.

Flessione Laminato	Spessore	Larghezza	σ_f	E_f	ε
	[mm]	[mm]	[MPa]	[MPa]	%
Epoxy-Flax-90 1	2	15	2,03	1123	1,79
Epoxy-Flax-90 2	2	15	3,12	1623	1,98
Epoxy-Flax-90 3	2	15	2,23	1183	1,56
Epoxy-Flax-90 4	2	15	2,01	1124	1,50
Epoxy-Flax-90 5	2	15	2,25	1253	1,51
Media			2,32	1261	1,70
Dev.std			0,46	209	0,21

Tabella 2.10 Risultati della prova a flessione a tre punti di un laminato $[90_4]_s$ epossidica-lino.

Nella prova a flessione con fibre trasversali, i valori di rottura sono molto bassi perchè il campione viene sollecitato nella zona più debole dal momento che le fibre fungono da difetto all'interno della matrice. In questo caso il comportamento elastico tipico della resina epossidica è ben visibile nel grafico di Figura 2.18.

La prova a flessione del composito formato da epossidica rinforzata con fibre di lino non era ancora stata considerata nel team. I valori ottenuti non possono essere utilizzati per dimensionare lo scafo dal momento che il pannello sandwich viene studiato utilizzando le proprietà a trazione. Tuttavia, i risultati ottenuti possono essere utili per confrontare i dati sperimentali con i dati della scheda tecnica fornita dai produttori

2.1.1.2 PMMA-lino

Si procede con la caratterizzazione del composito a matrice termoplastica rinforzato con fibre di lino. In questo caso lo studio del comportamento a flessione interessa particolarmente perché verrà utilizzato per verificare i risultati delle simulazioni del software di calcolo.

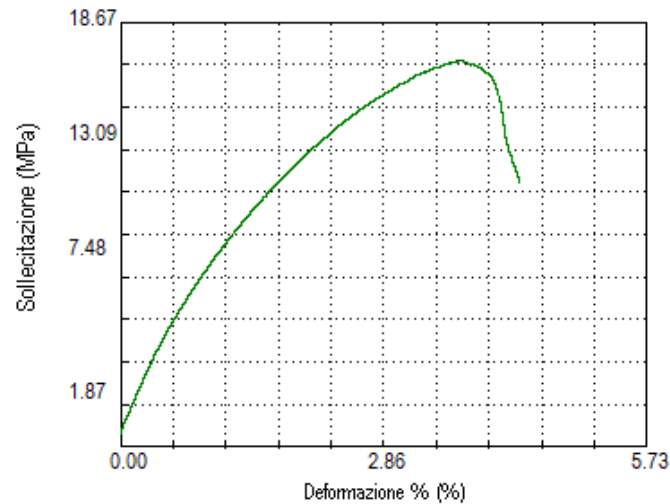


Figura 2.19 Grafico sforzo-deformazione a flessione di un laminato $[0]_s$ PMMA-lino.

Flessione Laminato	Spessore	Larghezza	σ_f	E_f	ϵ
	[mm]	[mm]	[MPa]	[MPa]	%
PMMA-Flax-0 1	2	15	12,4	4379	4,5
PMMA-Flax-0 2	2	15	16,0	6825	4,2
PMMA-Flax-0 3	2	15	12,8	4740	4,5
PMMA-Flax-0 4	2	15	16,9	6931	4,1
PMMA-Flax-0 5	2	15	16,5	7005	3,9
Media			14,9	6100	4,2
Dev.std			2,2	1226	0,3

Tabella 2.11 Risultati della prova a flessione a tre punti di un laminato $[0]_s$ PMMA-lino.

Anche in questo caso la frattura non è stata catastrofica e la parte danneggiata si trovava in compressione. I valori ottenuti in questa serie sono nettamente inferiori rispetto alla prova condotta con resina termoindurente. Ciò dimostra che il laminato precedente possiede una rigidità superiore. Un dato da non trascurare però risiede nell'allungamento a rottura. Nel provino a matrice termoplastica tale valore è superiore al primo, ciò testimonia una resistenza ad impatto superiore e un vantaggio da un punto di vista progettuale dal momento che progettare con materiali che deformano prima di arrivare a rottura, quindi duttili, consente di intervenire in caso di danneggiamento della struttura.

Di seguito vengono riportati anche i risultati della prova con le fibre trasversali.

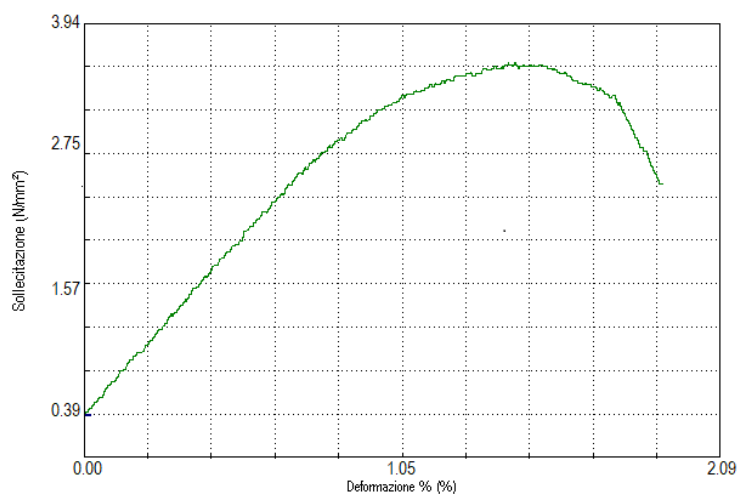


Figura 2.20 Grafico sforzo-deformazione a flessione di un laminato $[90_4]_s$ PMMA-lino.

Flessione Laminato	Spessore	Larghezza	σ	E	ε
	[mm]	[mm]	[MPa]	[MPa]	%
PMMA-Flax-90 1	2	15	2,16	1817	1,13
PMMA-Flax-90 2	2	15	3,58	2314	1,78
PMMA-Flax-90 3	2	15	3,35	2245	1,85
PMMA-Flax-90 4	2	15	3,36	1876	1,70
PMMA-Flax-90 5	2	15	3,57	2306	1,77
		Media	3,20	2111	1,60
		Dev.std	0.59	244	0.29

Tabella 2.12 Risultati della prova a flessione a tre punti di un laminato $[90_4]_s$ PMMA-lino.

In questo caso sono evidenti le basse proprietà del laminato date dall'orientazione delle fibre. I valori sono paragonabili a quelli ottenuti con matrice termoindurente, ciò significa che la resina acrilica conferma di avere delle proprietà simili a quella epossidica anche a flessione.

2.1.1.3 PMMA-vetro

Analogamente viene caratterizzato il laminato composto dalla resina acrilica rinforzata con fibre di vetro.

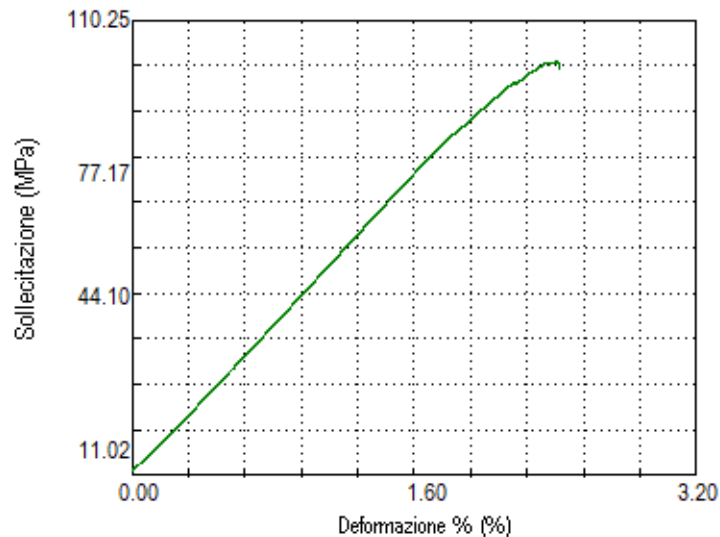


Figura 2.21 Grafico sforzo-deformazione a flessione di un laminato $[0_2]$ PMMA-vetro.

Flessione Laminato	Spessore	Larghezza	σ_f	E_f	ε
	[mm]	[mm]	[MPa]	[MPa]	%
PMMA-glass-0 1	2	15	95,8	33033	2,70
PMMA-glass-0 2	2	15	100,1	33567	2,43
PMMA-glass-0 3	2	15	95,3	26476	2,58
PMMA-glass-0 4	2	15	97,7	30425	2,60
PMMA-glass-0 5	2	15	96,5	28667	2,54
		Media	97,1	30433	2,60
		Dev.std	1,9	2973	0,10

Tabella 2.13 Risultati della prova a flessione di un laminato $[0_2]$ PMMA-vetro.

I risultati ottenuti con il laminato orientato a 0° sono positivi ed indicano una resistenza a rottura elevata da parte del composito. Il modulo elastico a flessione supera di gran lunga i valori ottenuti con il lino. Il comportamento del provino è decisamente elastico con conseguente frattura fragile. Ciò porta ad immaginare un'interfaccia matrice-rinforzo molto forte. Non sempre questo aspetto è ben visto in progettazione dal momento che, oltre a non essere prevedibile, la rottura avverrebbe per basso assorbimento di energia.

Di seguito invece vengono riportati i valori ottenuti con i provini aventi direzione perpendicolare.

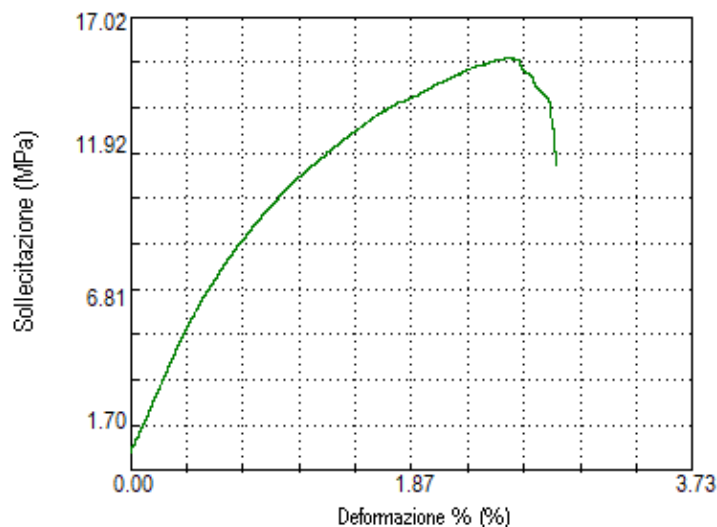


Figura 2.22 Grafico sforzo-deformazione a flessione di un laminato $[90_4]$ PMMA-vetro.

Flessione Laminato	Spessore	Larghezza	σ_f	E_f	ϵ
	[mm]	[mm]	[MPa]	[MPa]	%
PMMA-Glass-90 1	2	15	14,4	8342	3,28
PMMA-Glass-90 2	2	15	14,9	8147	2,92
PMMA-Glass-90 3	2	15	15,5	9667	2,83
PMMA-Glass-90 4	2	15	14,7	8520	3,12
PMMA-Glass-90 5	2	15	15,1	8963	2,84
Media			14,9	8727	3,00
Dev.std			0,4	605	0,19

Tabella 2.14 Flessione di un laminato $[90_4]$ PMMA-vetro.

I valori di rigidità rimangono superiori alle aspettative perché, come precedente discusso per i laminati testati a trazione, nel tessuto sono presenti dei *bundle* utilizzati per tener in posizione le fibre unidirezionali che altrimenti sarebbero difficili da maneggiare. I valori di resistenza sono in linea con i valori attesi.

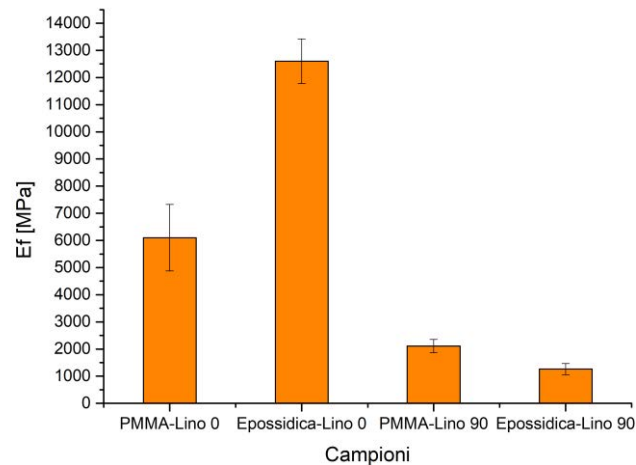


Figura 2.23 Istogramma di confronto del modulo elastico per i compositi rinforzati con fibre di lino al variare della matrice con fibre rispettivamente orientate a 0° e a 90° .

In Figura 2.23 vengono riportati i valori del modulo elastico dei laminati rinforzati con le fibre di lino. La differenza nell'uso della matrice è evidente nel caso delle fibre orientate a 0° . Nel test condotto con le fibre trasversali invece il composito realizzato con PMMA mostra valori leggermente superiori. La ragione di un simile comportamento è sicuramente attribuibile all'interazione presente tra le fibre e la matrice.

1.1.3 Sandwich

In passato il team non era mai ricorso alla caratterizzazione dell'intero pannello sandwich rifacendosi solamente ai valori disponibili delle schede tecniche dei vari componenti inserendoli nelle simulazioni agli elementi finiti. In questo elaborato però si vuole studiare attentamente il comportamento meccanico del pannello realizzato con materiali riciclabili andando a confrontare tale comportamento coi materiali più conosciuti. Trattandosi di un composito realizzato con materiali recentemente sviluppati, quindi poco conosciuti, si è ritenuto opportuno testare il pannello sandwich riproducendo le caratteristiche dello scafo. In questo modo è stato possibile confrontare anche i dati sperimentali con quelli teorici.

I provini sono stati realizzati con il piano di laminazione più fedele possibile a quello utilizzato per lo scafo. La disposizione delle fibre si ripete per tutte le combinazioni di materiali.

livello ply	Rinforzo	grammatura	N°ply	Direzione fibre
3	Flaxtape	110	2	0
2	Flaxtape	110	2	0
1	Flaxtape	110	1	90
0	core	-	-	-
-1	Flaxtape	110	1	90
-2	Flaxtape	110	2	0
-3	Flaxtape	110	2	0

Tabella 2.15 Piano di laminazione delle pelli che compongono il sandwich.

Codice provino	Rinforzo	Matrice	Anima
6	Lino	PMMA	PET
7	Lino	PMMA	Balsa
8	Lino	Epossidica	Balsa
9	Lino	Epossidica	PET

Tabella 2.16 Schema riassuntivo dei materiali di produzione dei sandwich da caratterizzare.



(a)



(b)

Figura 2.24 Provini dei sandwich utilizzati nelle prove a flessione: (a) provini usati nella prova a flessione, (b) Dettaglio della vista orizzontale dei sandwich, da notare i diversi spessori della resina all'interfaccia pelli-anima

Mentre i test precedenti sono stati preparati seguendo normative europee, per questo test si è seguita una normativa americana in quanto più completa nella caratterizzazione del pannello oltre ad essere la normativa di riferimento del regolamento A.B.S. usato in fase di progettazione. La normativa interessata è ASTM C393 e studia il comportamento a flessione di pannelli sandwich. Anche in questo caso la prova consiste in un test a flessione a 3 punti. La distanza tra gli appoggi della prova a flessione è rilevante per studiare propriamente il pannello. Al variare della distanza tra gli appoggi (*span*) infatti, si avrà una sollecitazione diversa sul *core*, aumentandola si accentuano gli effetti di taglio agenti nell'anima mentre riducendola si valuteranno principalmente le proprietà a compressione. Anche la larghezza del provino è fondamentale e va scelta a seconda dello spessore. I limiti sulla larghezza permettono di trattare il caso come una trave e non come un pannello con le relative semplificazioni.

La velocità della traversa è indicata da normativa e deve essere di 6 mm/min.

Le dimensioni dei provini non potevano seguire la configurazione standard della normativa poichè la distanza massima tra i supporti a disposizione vincolava la misura.

Si è quindi seguita la procedura non-standard che ha portato ai seguenti valori:

Simbolo	Grandezza	Provino PET	Provino Balsa
		[mm]	[mm]
L	Lunghezza totale[mm]	170	170
S	span[mm]	120	120
b	Larghezza[mm]	37.5	37.5
h	Spessore[mm]	11.5	7.7

Tabella 2.17 Dimensioni provini dei sandwich da testare a flessione.

Il valore dello *span* rappresenta il punto di partenza poiché vincolato alla distanza massima degli appoggi dello strumento; a questo consegue la definizione della lunghezza che viene definita sommando 50 mm alla distanza degli appoggi come indicato in normativa. Come si può vedere vi è una differenza sullo spessore dei campioni a seconda dell'anima usata. La balsa a disposizione aveva uno spessore di 6,35 mm rispetto al PET che possedeva uno spessore di 10 mm. Lo spessore totale coinvolge anche le due facce del sandwich.

1.1.3.1 PET-PMMA

Il primo test tratta il campione realizzato con PMMA rinforzato con fibre di lino e PET come anima.

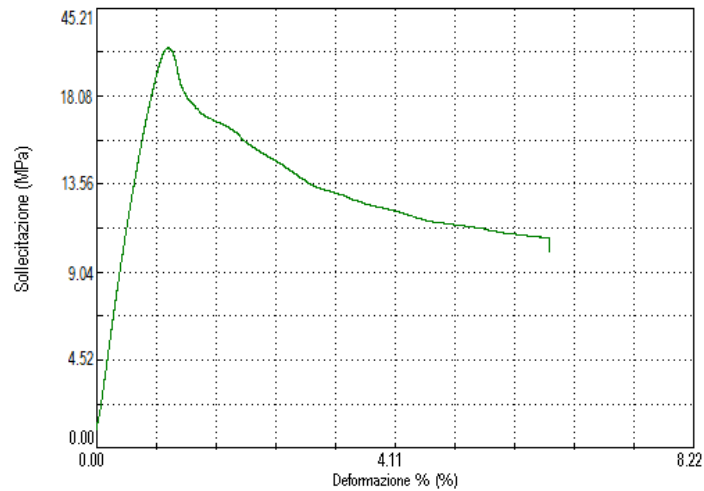


Figura 2.25 Curva sforzo-deformazione a flessione di un sandwich con anima in PET e facce in PMMA rinforzato con fibre di lino.

Flessione Laminato	Spessore	Larghezza	σ_f	E_f	ε
	[mm]	[mm]	[MPa]	[MPa]	%
PMMA-PET 6.1	11,5	37,5	34,13	1503	6,21
PMMA-PET 6.2	11,5	37,5	33,59	1306	6,21
PMMA-PET 6.3	11,5	37,5	33,49	1345	1,66
PMMA-PET 6.4	11,5	37,5	35,40	1484	6,23
PMMA-PET 6.5	11,5	37,5	34,98	1413	6,22
		Media	34,32	1410	6,21
		Dev.std	0,85	85	0,01

Tabella 2.18 Risultati prova a flessione del sandwich lino-epossidica-PET.

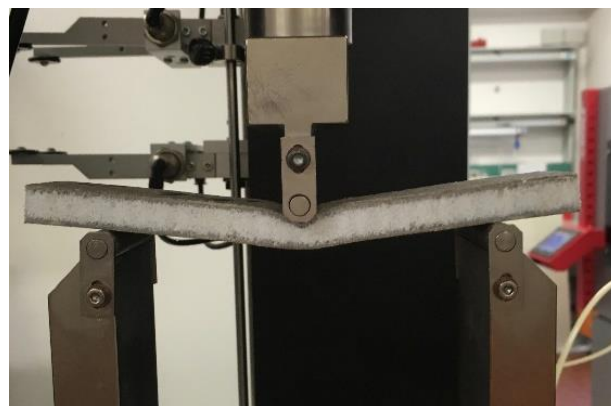


Figura 2.26 Rottura per indentazione di un sandwich con anima in PET e pelli in PMMA rinforzata con lino.

Il sandwich studiato arriva a cedimento per *wrinkling*, come si vede dalla Figura 2.26 le pelli a compressione vengono deformate localmente. Il comportamento è sintomo di una scarsa resistenza a compressione dell'anima unita ad una bassa rigidezza delle pelli. Per migliorare le performance del pannello è possibile aumentare il modulo a compressione della schiuma preferendone una a maggior densità oppure aumentando il modulo elastico delle lamine. Il materiale dimostra di sopportare ampie deformazioni senza arrivare a rottura, aspetto particolarmente utile in fase di progettazione oltre a indicare che il materiale assorbe molta energia prima di arrivare a rottura, sintomo di una buona resistenza agli urti. Nel grafico in Figura 2.25 è apprezzabile il comportamento elastico del materiale. Si osserva che il valore dello snervamento è prossimo al valore massimo di tensione.

1.1.3.2 PET-Epossidica

I campioni analizzati, rispetto ai precedenti, sono realizzati con matrice termindurente. Ci si aspetta un comportamento a flessione leggermente superiore rispetto ai provini in termoplastica alla luce dei risultati osservati nel paragrafo dedicato alla flessione dei laminati.

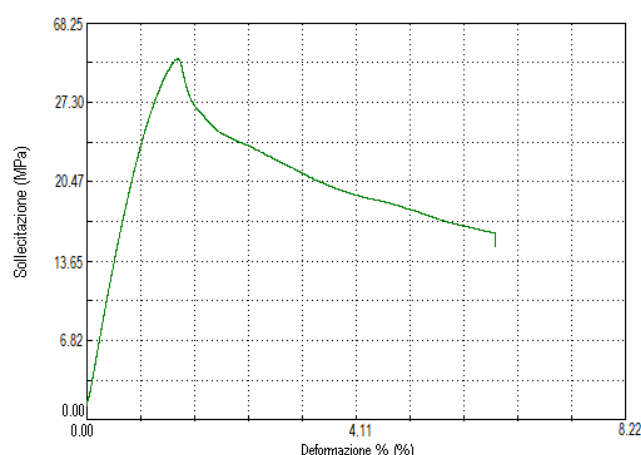


Figura 2.27 Curva sforzo-deformazione a flessione di un sandwich con anima in PET e facce in epossidica rinforzata con fibre di lino.

Flessione Laminato	Spessore	Larghezza	σ_f	E_f	ϵ
	[mm]	[mm]	[MPa]	[MPa]	%
Epoxy-PET 1	11,5	37,5	44,44	1734	6,22
Epoxy-PET 2	11,5	37,5	49,75	1769	2,68
Epoxy-PET 3	11,5	37,5	48,27	1374	3,35
Epoxy-PET 4	11,5	37,5	51,46	1782	6,22
Epoxy-PET 5	11,5	37,5	40,82	1457	6,22
		Media	46,95	1623	4,93
		Dev.std	4,29	193	1,77

Tabella 2.19 Risultati prova a flessione del sandwich lino-epossidica-PET.



Figura 2.28 Rottura a taglio per sandwich con anima in PET e pelli in epossidica rinforzata con lino.

In Figura 2.28 è facilmente osservabile come il PET si rompe a 45° rispetto alla direzione del carico. Tale frattura indica una scarsa resistenza a taglio da parte del materiale che compone l'anima del sandwich. In questo caso l'interfaccia tra pelli e core è molto fragile perchè costituita da uno strato spesso di resina epossidica. Un'interfaccia troppo facile può peggiorare le prestazioni del composito.

1.1.3.3 Balsa-PMMA

Di seguito vengono riportati i risultati ottenuti dai campioni aventi il core in balsa e le lamine esterne realizzate con matrice termoplastica rinforzata lino.

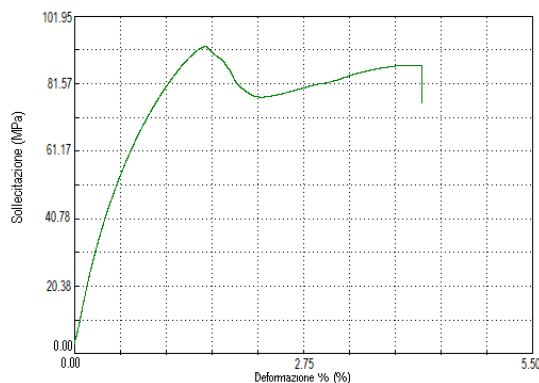


Figura 2.29 Curva sforzo-deformazione a flessione di un sandwich con anima in balsa e facce in PMMA rinforzata con fibre di lino.

Flessione Laminato	Spessore	Larghezza	σ_f	E_f	ε
	[mm]	[mm]	[MPa]	[MPa]	%
PMMA-Balsa 9.1	7,7	37,5	92,57	6013	4,17
PMMA-Balsa 9.2	7,7	37,5	68,00	4968	3,24
PMMA-Balsa 9.3	7,7	37,5	65,72	5196	4,17
PMMA-Balsa 9.4	7,7	37,5	75,49	4900	4,17
PMMA-Balsa 9.5	7,7	37,5	74,35	5359	4,17
		Media	75,23	5287	3,98
		Dev.std	10,54	445	0,41

Tabella 2.20 Risultati prova a flessione del sandwich lino-PMMA-balsa.

I risultati ottenuti dimostrano sicuramente migliori proprietà meccaniche rispetto ai precedenti, soprattutto un'ottima rigidezza del pannello. L'andamento della curva in Figura 2.29 mostra un tratto lineare elastico iniziale dovuto dalle fibre esterne, una leggera variazione della pendenza dovuta dalla matrice e infine un comportamento plastico. Anche in questo caso il provino assorbe molta energia prima di cedere ma i valori di deformazione sono inferiori in confronto ai provini realizzati con il PET.



Figura 2.30 Sandwich con anima in balsa e pelli esterne in PMMA rinforzata con fibre di lino, giunto a rottura.

La rottura avviene in modo netto per cedimento a taglio della balsa che, nonostante le elevate proprietà a compressione non possiede eccellenti proprietà a taglio.

1.1.3.4 Balsa-Epossidica

Infine, viene testato il materiale ottenuto ponendo la balsa tra due facce di resina epossidica rinforzata con fibre di lino.

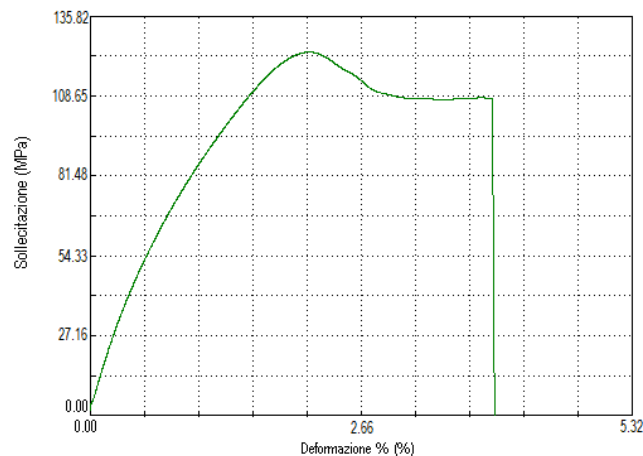


Figura 2.31 Curva sforzo-deformazione a flessione di un sandwich con anima in balsa e facce in epossidica rinforzata con fibre di lino.

Flessione Laminato	Spessore	Larghezza	σ_f	E_f	ε
	[mm]	[mm]	[MPa]	[MPa]	%
Epoxy-balsa 1	7,7	37,5	113,55	3900	4,20
Epoxy-balsa 2	7,7	37,5	120,39	1390	5,50
Epoxy-balsa 3	7,7	37,5	109,16	5363	4,10
Epoxy-balsa 4	7,7	37,5	129,50	5510	4,10
Epoxy-balsa 5	7,7	37,5	123,48	5729	3,90
		Media	119,22	4378	4,36
		Dev.std	8,04	1819	0,64

Tabella 2.21 Risultati prova a flessione del sandwich lino-epossidica-balsa.



Figura 2.32 Sandwich con anima in balsa e pelli esterne in epossidica rinforzata con fibre di lino, giunto a rottura.

Il comportamento è simile al precedente. La rottura avviene anche in questo caso per cedimento del *core* a taglio.

Nel confronto tra i due pannelli, notiamo che, sia per la balsa sia per il PET, al variare della matrice la rigidezza è sostanzialmente la stessa. Nonostante si ottengano risultati leggermente inferiori con la schiuma termoplastica, i valori del modulo elastico sono confrontabili.

Il PMMA non possiede di certo le stesse proprietà della resina epossidica però i risultati dei test a flessione testimoniano che la differenza di performance non è sufficiente per scartare l'uso della matrice termoplastica anzi, i valori possono definirsi statisticamente uguali.

La differenza sostanziale tra i pannelli sandwich testati risiede per certo nel materiale usato come anima. Confrontando il legno di balsa e la schiuma di PET possiamo definire senza dubbio più performante il legno di balsa. La balsa infatti, come spiegato nell'introduzione è ancora oggi un materiale molto utilizzato per le elevate prestazioni in rapporto al peso. Nel caso specifico però non è richiesto un materiale estremamente prestante poichè gli sforzi applicati allo scafo non sono eccessivi quindi è possibile ammettere anche l'uso di materiali più leggeri, con minori proprietà meccaniche.

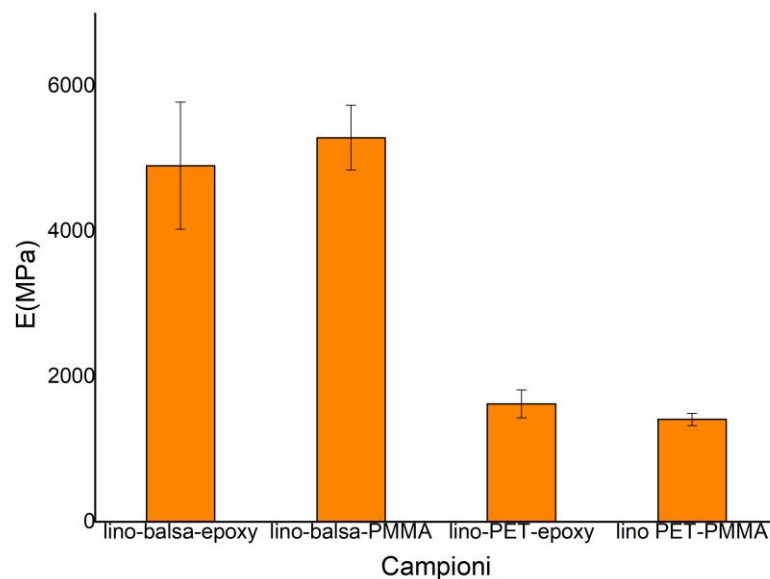


Figura 2.33 Istogramma dei moduli elastici dei pannelli caratterizzati nella prova a flessione.

Il test condotto è particolarmente utile per capire il comportamento del legame tra le pelli e l'anima formato dalla resina. In tutti i casi trattati, i cedimenti sono stati classificati idonei e non hanno indicato una scarsa adesione tra le facce e il core. Il PMMA quindi si è dimostrato una valida alternativa alla resina epossidica per la fabbricazione di pannelli sandwich. La scelta del PET non può competere con la balsa per quanto riguarda la costruzione dei pannelli sandwich.

Viene quindi studiata la rigidità con valori normalizzati rispetto alla densità. In questo modo è possibile vedere, a parità di peso, le performance del pannello.

Dall'istogramma di Figura 2.34 si osserva che il pannello più rigido si otterrebbe con la combinazione balsa-PMMA-lino anche se statisticamente, il pannello realizzato con resina epossidica può essere considerato alla pari. L'aspetto più interessante è sicuramente il divario tra la configurazione balsa-PMMA-lino e PET-PMMA-lino che risulta nettamente inferiore. Ciò dimostra che, al netto del peso, il piano di laminazione pensato non ha prestazioni molto minori rispetto ai precedenti del team. Con i dovuti accorgimenti in fase progettuale sarà possibile quindi risparmiare complessivamente del peso.

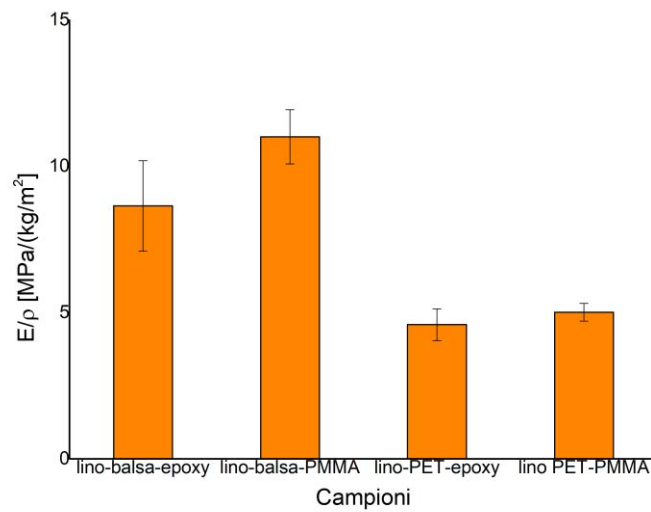


Figura 2.34 Istogrammi dei moduli elastici normalizzati per i diversi sandwich testati.

La diminuzione del peso e la riciclabilità rimangono i due capisaldi della progettazione della nuova imbarcazione.

Va ricordato che l'intento delle prove non è quello di decretare il miglior materiale da utilizzare nella realizzazione dell'imbarcazione bensì conoscere la differenza nelle prestazioni dei due *set-up* così da poter correggere eccessi o mancanze durante la progettazione.

1.2 Riciclabilità

Lo studio della resina acrilica fornita da Arkema non si limita alla sola caratterizzazione meccanica bensì sono stati svolti dei test qualitativi che ne verificassero l'effettiva natura termoplastica e la possibilità di separare le varie fasi del composito.

1.2.1 Solvolisi

Durante la fase di caratterizzazione è stato effettuato un test che studiasse l'effettiva riprocessabilità della resina. Sono stati scelti dei materiali considerati significativi per la prova:

- Laminato PMMA-Lino;
- Laminato PMMA-vetro;
- PMMA puro;
- Sandwich PMMA-Lino-PET.

In Figura 2.35 sono riportati i campioni prima di essere riprocessati.



Figura 2.35 *Preparazione dei provini prima di essere trattati con acetone.*

Una volta immersi in un contenitore ermetico, contenente dell'acetone puro, sono stati lasciati a bagno per un paio di giorni. Il PMMA non resiste agli attacchi chimici come la resina epossidica e quindi è possibile sciogliere il polimero riuscendo così a separare le fibre di rinforzo.

Nelle immagini in Figura 2.36a e Figura 2.36b sono visibili i *bundle* di fibre dispersi in acetone. La resina viene completamente sciolta dall'acetone riuscendo così a separare le fasi del composito. Nell'immagine in Figura 2.36d è dimostrato questo comportamento. Non è

possibile distinguere infatti la fase di PMMA nell'acetone. In Figura 2.36c si nota invece il risultato più atteso, la separazione netta tra core e pelli. Tale risultato è fondamentale per ritenere riciclabile l'intera barca che si andrà a realizzare.

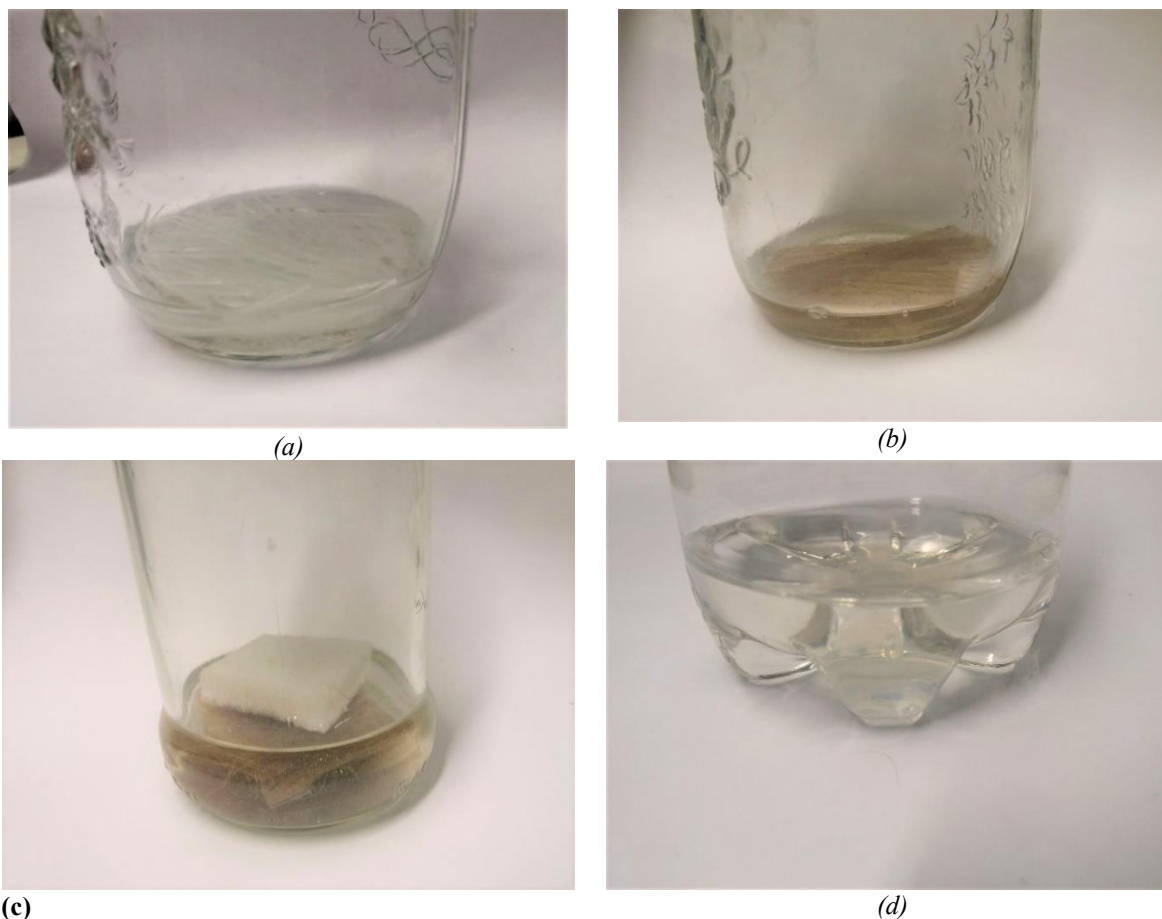


Figura 2.36 Risultati della dissoluzione dei provini in acetone: **(a)** Provino di PMMA-vetro sciolto in acetone; **(b)** Provino di PMMA-lino sciolto in acetone; **(c)** Sandwich di PMMA-lino-PET sciolto in acetone; **(d)** Provino di PMMA sciolto in acetone.

Ovviamente il processo di solvolisi non è il processo più semplice ed economico per affrontare il riciclo del sandwich, tuttavia rimane una valida dimostrazione della riprocessabilità dei materiali coinvolti nella costruzione della barca. In questo modo non sarà possibile recuperare solo le fibre ma anche la matrice e l'anima del composito.

2.2 Conclusioni

La caratterizzazione ha dimostrato che la resina Elium può essere considerata come una valida alternativa alla resina epossidica. I provini a trazione mostrano un comportamento di fatto analogo con un leggero vantaggio dell'epossidica sul PMMA. A flessione la resina epossidica dimostra di avere proprietà superiori di rigidezza ma con allungamenti mediamente più bassi. Ciò dimostra quanto atteso, il PMMA infatti deforma molto di più dell'epossidica richiedendo più energia prima di arrivare a rottura. Indice di una resistenza ad impatto superiore.

I pannelli sandwich invece hanno mostrato come le proprietà della balsa, come anima, siano largamente superiori alla schiuma di PET ma, considerando l'assorbimento di resina superiore da parte della balsa e le proprietà al netto del peso, si osserva che il sandwich realizzato con fibre di lino, resina acrilica e PET è una valida alternativa al composito fibre di lino, resina epossidica e balsa.

Capitolo 3

Progettazione dell'imbarcazione

Di seguito verranno esposti i metodi utilizzati per progettare strutturalmente lo scafo dell'imbarcazione Athena. I dati riguardanti i materiali ricavati nel capitolo precedente sono stati prima elaborati attraverso il regolamento A.B.S. e poi verificati con il metodo degli elementi finiti. Lo scopo della progettazione in questo caso è di sfruttare la meglio i materiali riciclabili selezionati senza compromettere la scafo in termini di peso e prestazioni strutturali.

3.1 Vincoli progettuali

La progettazione di Athena, come tutte le imbarcazioni realizzate dal team Mètis Vela Unipd, rientra nella categoria R3, una classe appositamente creata per regatare nel circuito internazionale universitario 1001VelaCup. Il regolamento di classe prevede regole specifiche riguardanti l'armo, gli equipaggi ma soprattutto la costruzione dello scafo. Lo scopo di tali regole è quello di creare una sorta di *box rule* che dia delle precise linee guida ai diversi progettisti ma che allo stesso tempo lasci spazio alla creatività e all'ingegno degli studenti che si applicano in questo campo.

Di seguito vengono riportate alcune regole riguardanti lo scafo[29]:

Dimensioni

- a) Lunghezza massima fuori tutto: 4,60 metri.
- b) Larghezza massima fuori tutto: 2,10 metri.
- c) Per la misurazione delle dimensioni definite ai punti a) e b) è prevista una tolleranza max di 15 millimetri.
- d) Il timone e il suo sistema di aggancio all'imbarcazione sono esclusi dalla misura della lunghezza massima fuori tutto.
- e) E' ammesso l'uso di un bompresso o di un tangone, escluso dalle dimensioni massime, solo se necessario alla manovra delle vele.

Materiali e costruzione

a) Per gli scopi didattico formativi che si pone il presente regolamento, l'insieme scafo-coperta-terrazze dovrà prevedere un contenuto in legno o materiali di origine vegetale e/o animale (in seguito detti anche "naturali"), espresso in peso, non inferiore al 70% o un contenuto in materiali riciclabili, dai quali sono esclusi collanti e/o matrici non "BIO", non inferiore al 75% del peso. Il collante può rientrare nel calcolo dei materiali naturali solo se necessario all'incollaggio tra questi e non sia utilizzato come materiale strutturale.

b) E' ammesso l'uso di terrazze nel rispetto dei limiti dimensionali e costruttivi definiti

c) Ad eccezione di quanto specificatamente consentito, nella realizzazione di scafo, coperta, terrazze appendici, albero e boma non sono ammessi i seguenti materiali: fibre aramidiche, fibre di carbonio, titanio.

d) E' ammesso l'utilizzo di fibre ad alto modulo per la realizzazione del solo bompresso e delle appendici.

e) E' ammesso l'uso di polietilene per il sartame.

f) Le vele non possono essere realizzate in fibre aramidiche, carbonio o altre fibre ad alto modulo e dovranno essere accompagnate da una dichiarazione del velaio riportante le misure di stazza come descritte negli allegati C e C1. g) L'albero e il boma devono essere realizzati con estruso in alluminio o, ad esclusione della matrice, in fibre di origine vegetale e/o animale.

Appendici

a) Le appendici sono libere in numero, sagoma e superfici e materiali.

b) Le appendici devono rientrare nei limiti di lunghezza e larghezza massime.

Scafo

a) Lo scafo non deve presentare concavità nelle sezioni trasversali al di sotto della linea di galleggiamento.

b) Lo scafo deve essere unico; non sono ammessi multiscafi.

c) Lo scafo non deve presentare sezioni trasversali asimmetriche.

Lo studio di questa tesi di focalizzerà sulla creazione del solo scafo. Per completezza vengono riportati i metodi realizzativi di tutti i componenti della barca.

Le appendici sono state precedentemente studiate e progettate da un membro del team, poi realizzate dal settore tecnico. Le appendici sono in fibra di carbonio, e sono state ottenute

attraverso il metodo dell'infusione su degli stampi in multistrato di pioppo fresati con fresatrice CNC da un'azienda padovana.

L'albero è in alluminio estruso, per motivi tecnici non è possibile realizzarlo presso le strutture del team e quindi è stato acquistato da una ditta specializzata. Così come il bompresso, un tubo realizzato in fibra di carbonio utilizzato per permettere al gennaker di avere un punto di scotta più avanzato, che è stato comprato da un'azienda esterna.

Le vele sono state realizzate da una veleria che ha assistito il team nella fase di progettazione al fine di ottenere i profili richiesti dagli equipaggi.

Le terrazze sono particolari strutture sporgenti dallo scafo per permettere all'equipaggio di avere un momento sbandante maggiore così da poter bilanciare la forza esercitata dal il piano velico. Queste sono state realizzate con dei tubolari di alluminio opportunamente tagliati e saldati da una ditta vicentina.

Lo scafo è suddiviso principalmente in 3 parti:

- La carena;
- La coperta;
- Strutture interne.

La carena è la parte inferiore dello scafo e si suddivide in “opera viva” e “opera morta”. La parte immersa viene chiamata opera viva mentre la parte fuori dall'acqua opera morta. Il disegno della carena segue linee precise dettate dal progettista. Solitamente il metodo di progettazione parte ricavando dei coefficienti adimensionali e parametri idrodinamici che prescindono dalla forma finale e dagli ingombri fondamentali dello scafo Per procedere con il disegno vengono tracciate tre famiglie di curve che definiscono la geometria finale:

- linee d'acqua, curve ottenute intersecando la carena con piani paralleli all'acqua equidistanziati in verticale. La linea principale è la linea di galleggiamento che separa la parte immersa dalla parte emersa;
- linee longitudinali, che si ottengono intersecando lo scafo con piani verticali paralleli al piano di simmetria;
- Le ordinate, si ricavano sezionando lo scafo con piani equidistanti perpendicolari al piano di simmetria [30].

Partendo da queste curve, il progettista le modella conferendo alla carena le caratteristiche curvature a seconda del comportamento desiderato.

Assieme al piano di carena il progettista deve considerare anche il piano di deriva che costituisce l'elemento di stabilità del natante. L'insieme di deriva e timone contribuiranno al bilanciamento della spinta laterale delle vele e alla stabilità di rotta.

In questo lavoro di tesi non si è approfondito il design della carena poiché molto complesso oltre a necessitare di una profonda conoscenza fluidodinamica si è piuttosto lavorato sul piano di coperta.

La coperta costituisce la parte superiore dello scafo. Su di essa viene fissato l'armo di coperta che consente all'equipaggio di governare la barca.

Infine, le strutture interne consistono in dei pannelli alleggeriti che fungono da scheletro per la barca, esse infatti consentono di suddividere carena e coperta in pannelli più piccoli conferendo una maggiore rigidezza allo scafo.

Prima di iniziare la progettazione meccanica dello scafo è necessario conoscere come agiscono le principali forze sulla barca. Nell'immagine seguente si può osservare la posizione e l'intensità dei carichi che sollecitano l'imbarcazione.

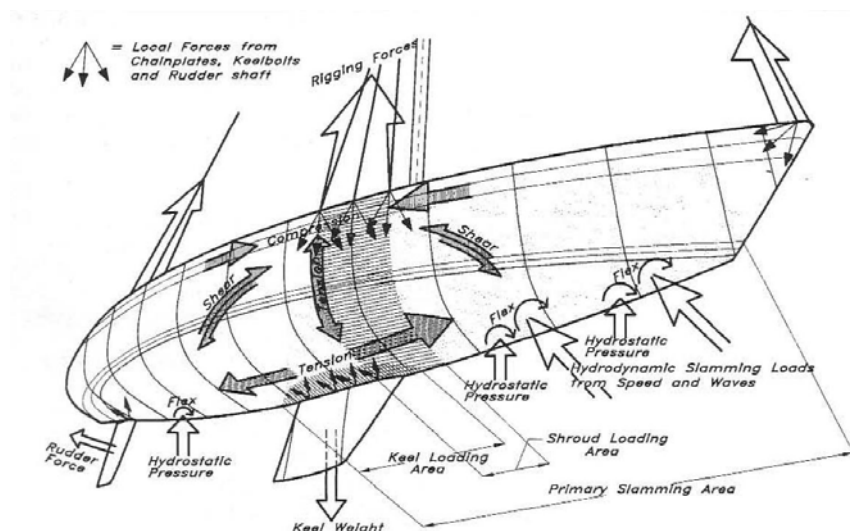


Figura 3.1 *Illustrazione delle principali tensioni agenti su di una barca a vela [31]*

I carichi principali sono sicuramente:

- le forze di trazione applicate dalle sartie e dallo strallo di prua necessarie per sorreggere l'albero,
- la forza di taglio e il momento flettente della deriva
- torsione generale dello scafo.

Uno scafo per essere performante, deve torcere il meno possibile, così da trasmettere in maniera ottimale le tensioni applicate asimmetricamente sullo scafo.

3.1.1 *Barche precedenti del team*

3.1.1.1 Argo

Il primo scafo realizzato è stato Argo, lo scafo è stato progettato per competere nel campo di regata prescelto per il 2008 ovvero Porto Santo Stefano (GR) dove ci si aspettava vento medio, 9 nodi, e onda media. Tali condizioni hanno influenzato pesantemente i requisiti progettuali. Argo è sicuramente la più voluminosa tra le carene realizzate dal team. I volumi esagerati di Argo gli consentono di affrontare condizioni di vento ed onda sostenuti garantendo una maggiore stabilità in navigazione. Tale vantaggio dal punto di vista della conduzione viene però controbilanciato da un peso notevole dell'imbarcazione che supera i 100 kg.

Lunghezza al galleggiamento	4,59 m
Larghezza al galleggiamento	1,107 m
Pescaggio	0,119 m
Coefficiente prismatico	0,576
LCB da specchio di poppa	2,085 m
Dislocamento	247 kg

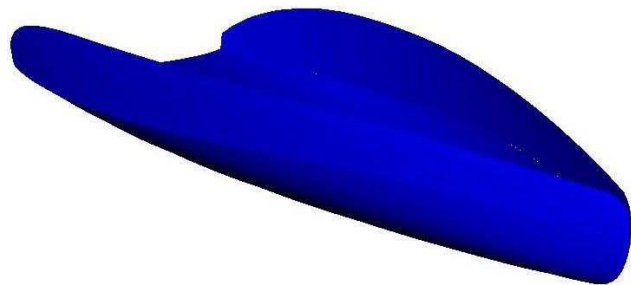


Figura 3.2 *Design e caratteristiche idrodinamiche di Argo.*

Le sezioni di Argo sono tondeggianti lungo tutto lo scafo e ciò gli consente di soffrire meno il moto di beccheggio in presenza d'onda. La barca risulta stabile anche grazie alla distribuzione dei volumi che risulta essere bilanciata rispetto alla sezione maestra. Le caratteristiche

geometriche dello scafo gli consentono di essere la barca della flotta più adatta a condizioni pesanti di regata.

Argo è stata costruita presso i laboratori della Cantieristica Minore di Venezia grazie all'aiuto del maestro d'ascia Ugo Pizzarello. Per costruirla si è seguita la tecnica classica a fasciami. Si crea uno scheletro in legno partendo dal paramezzale, asse longitudinale, al quale vengono fissate le ordinate e servirà come stampo sul quale verranno incollati gli strati esterni. La struttura diventerà parte integrante dello scafo. Su di esso vengono quindi incollati con resina epossidica dei fasciami di multistrato di legno marino, Okoumé, disposti a 45° rispetto all'asse longitudinale e fissati con dei chiodi che verranno rimossi successivamente. Si utilizzano due ordini di fasciami sfalsati uno rispetto all'altro di 90°. All'interno, la struttura di Argo è stata rinforzata con del tessuto di vetro e resina epossidica.



Figura 3.3 *Dettaglio della costruzione di Argo*

Terminato il lavoro di rivestimento, l'opera viene levigata, stuccata con resina epossidica caricata e infine si riveste lo scafo con resina epossidica rinforzata con un tessuto bidirezionale di vetro. Quest'ultimo non viene utilizzato per conferire proprietà meccaniche alla barca bensì per migliorarne la finitura, per proteggere il legno dall'acqua e per permetterne un successivo lavoro di carrozzeria. Al momento del varo Argo pesava più di 100 kg.

3.1.1.2 Aura

Aura viene progettata diversamente, questa volta lo scopo è quello di ottenere una barca più snella e leggera.

Lunghezza al galleggiamento	4,59 m
Larghezza al galleggiamento	1,108 m
Pescaggio	0,119 m
Coefficiente prismatico	0,576
LCB da specchio di poppa	2,085 m
Dislocamento	247 kg

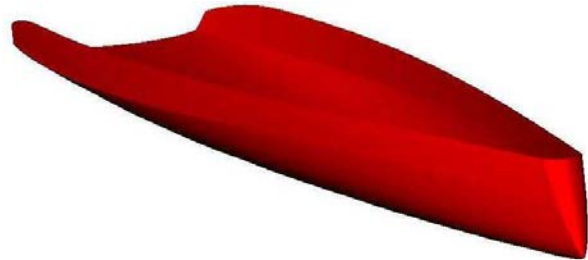


Figura 3.4 *Design e caratteristiche idrodinamiche di Aura.*

La carena viene riprogettata cercando di alleggerirla il più possibile. Il bordo libero infatti viene abbassato e vengono diminuiti i bordi immersi. Le linee d'acqua vengono snellite riducendo quindi i volumi. Una caratteristica particolare di Aura è stata la prua negativa. Inizialmente infatti avrebbe dovuto favorire lo scafo a penetrare l'onda in maniera più agevole riducendo il beccheggio tuttavia, a causa del bordo libero troppo basso, l'ingresso dell'acqua in coperta era eccessivo.

Per questo motivo la prua è stata modificata successivamente con una prua positiva.

Aura viene realizzata con la stessa tecnica di Argo utilizzando compensato marino e rinforzi in fibra di vetro. La progettazione delle strutture interne è stata rivisitata portando ad un alleggerimento complessivo dello scafo. Aura infatti fu la prima barca della flotta della competizione a scendere sotto il quintale.



Figura 3.5 Dettaglio della costruzione di Auta.

Il peso di Aura è di circa 85 kg. Aura è stata l'unica barca del team che è riuscita a conquistare l'ambito premio, riuscendoci ben due volte. Tale risultati hanno dimostrato la bontà del progetto iniziale portandola ad essere fonte di ispirazione anche per gli altri atenei.

3.1.1.3 Aretè

Aretè è stata progettata per rispondere a delle condizioni di regata diversa dalle prime due imbarcazioni, vento a 4 nodi e mare calmo. Il risultato ha portato a uno scafo veloce, con una geometria molto più snella ma sicuramente più instabile.

Lunghezza al galleggiamento	4,58 m
Larghezza al galleggiamento	1,107 m
Pescaggio	0,115 m
Coefficiente prismatico	0,55
LCB da specchio di poppa	1,882 m
Dislocamento	222 kg

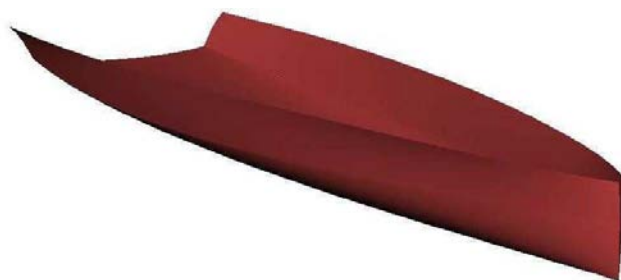


Figura 3.6 Design e caratteristiche idrodinamiche di Aretè.

Aretè dimostra di essere molto più vicina agli skiff australiani più recenti. La tecnica di costruzione è una novità per il team che per la prima volta decide di produrre una barca in

composito sfruttando l'infusione sottovuoto. Durante gli studi preliminari del team, si era notato un eccessivo assorbimento di resina da parte del core in legno di balsa. Per evitare peso eccessivo, si è deciso di suddividere la produzione in 3 diversi step. Per prima cosa sono state infuse le pelli esterne, poi si è laminato sottovuoto il core di balsa rivestendolo con un tessuto di vetro molto leggero ed infine si sono infuse le pelli interne. Lo scafo arriva a pesare circa 65 kg diventando così lo scafo più leggero dei 3. Il coefficiente prismatico indica come le estremità dello scafo siano poco piene migliorando così le prestazioni dello scafo a basse velocità. Il coefficiente LCB è sicuramente più a poppa rispetto alle barche precedenti conferendo ad Aretè caratteristiche più adatte per andature portanti.

In navigazione la barca si dimostra molto instabile ma allo stesso tempo vi è un miglioramento delle performance in planata. Nonostante Aretè possieda delle linee molto snelle la superficie bagnata rimane elevata. Nel complesso lo scafo, anche se difficile da governare, si dimostra molto competitivo riuscendosi a piazzarsi più volte sul podio senza raggiungere però il primo posto.



Figura 3.7 Dettaglio della costruzione di Aretè

3.1.1.4 Ate

Ate nasce dall'idea di trovare uno scafo che potesse competere in condizioni di vento e onda medie, interponendosi tra le caratteristiche da vento forte e tanta onda di Argo e di vento debole e poca onda di Aretè. Il campo di regata ideale avrebbe dovuto essere il Lido di Venezia, sede della competizione 2016.

Lunghezza al galleggiamento	4,58 m
Larghezza al galleggiamento	1,045 m
Pescaggio	0,115 m
Coefficiente prismatico	0,604
LCB da specchio di poppa	1,882 m
Dislocamento	223 kg

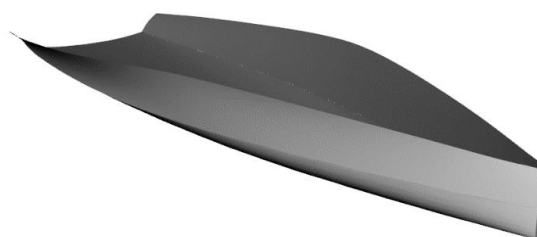


Figura 3.8 Design e caratteristiche idrodinamiche di Ate.

Il progetto di partenza è stato Aura al quale vengono gonfiate le sezioni di prua per migliorare le performance in planata, inoltre il profilo della prua è stato stretto per permettere allo scafo di penetrare l'onda. A poppa sono stati minimizzati notevolmente i volumi sia dell'opera viva che dell'opera morta, nel primo caso per migliorare la planata minimizzando la superficie bagnata mentre il secondo aspetto è fondamentale per ridurre i pesi lontani dal baricentro rendendo lo scafo più veloce.

La costruzione di Ate segue la tecnica vista con Aretè. Anche in questo caso si è ricorsi alla tecnica di infusione sottovuoto per creare un composito formato da fibre di lino in matrice epossidica e anima in legno di balsa. A differenza di Aretè però, Ate è stata realizzata in un unico step infondendo quindi pelli esterne ed interne assieme alla balsa precedentemente impermeabilizzata.

3.1.1.5 Concept Athena

L'idea iniziale, riguardo la costruzione di questo nuovo scafo, è stata quella di stravolgere il progetto iniziale di Ate sfruttando solamente il design della carena. Il motivo alla base di tale scelta risiede nella vocazione puramente didattica del progetto Athena. Sfruttando il recente cambiamento di regolamento si è deciso di intraprendere il percorso dei materiali riciclabili, innovativi nel mondo della nautica. Oltre ai materiali innovativi per il settore, si voleva realizzare una barca più leggera. Tuttavia, il progetto non si limita a cambiarne solamente i materiali di costruzione bensì l'intento è quello di ottimizzare lo scafo di Ate migliorandone alcuni aspetti negativi evidenziati in navigazione. Per fare ciò si è pensato di realizzare uno scafo privo di coperta che andasse ad agevolare l'equipaggio nelle manovre e che riducesse sensibilmente il peso totale. L'assenza di una coperta però compromette notevolmente la rigidità della barca richiedendo delle strutture interne più resistenti così da sopportare i vari carichi agenti.

Per rinforzare la struttura si è quindi pensato di sfruttare le terrazze, parti insostituibili dell'attrezzatura di coperta, dando loro un duplice scopo. Le terrazze solitamente sono costituite da un tubo di alluminio unito alla coperta tramite due bracci realizzati sempre con tubi di alluminio alle estremità. Vincolando diversamente i bracci della terrazza è possibile aiutare le strutture interne a resistere alla compressione indotta dalle sartie che tendono a "chiudere" lo scafo.

Al fine di irrigidire la carena, si era pensato di aumentare in numero di rinforzi. Dividendo ulteriormente la superficie si richiederebbero minori proprietà meccaniche. Di seguito viene riportato il concept pensato per Athena.

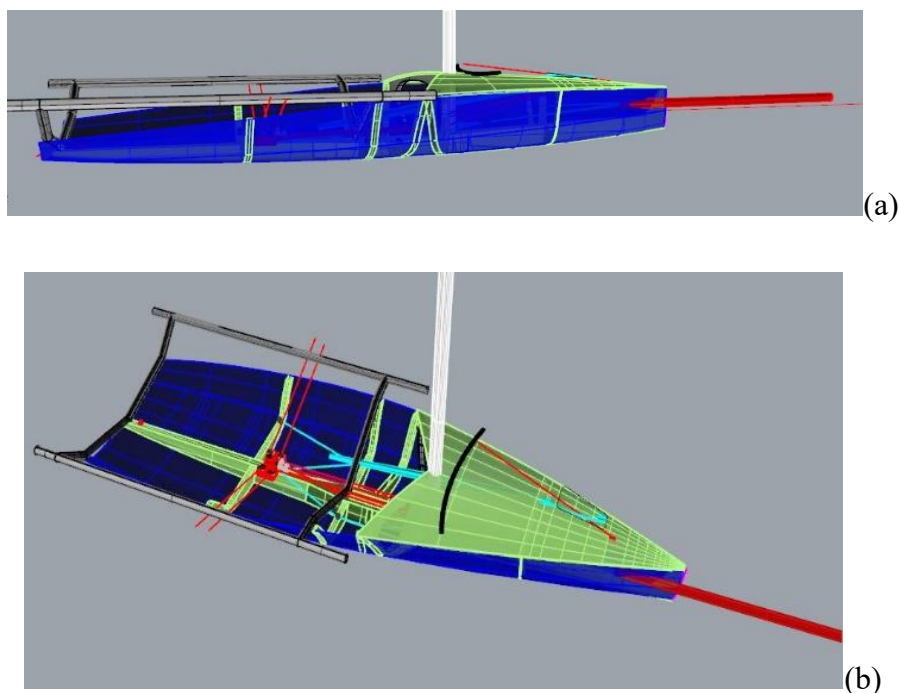


Figura 3.9 Progetto CAD del primo concept di Athena completo di armo.

In prua si propone un cupolino rigido che agevoli la manovra di ammaina gennaker e che allo stesso tempo favorisca l'interazione tra scafo e vele aumentando l'efficienza aerodinamica. L'armo presente in coperta tende solitamente a "sporcare" l'aria creando delle turbolenze sfavorevoli al fiocco.

Dopo attente analisi del progetto e dopo essersi confrontati con l'Ing. Cristiano Battisti, si è optato per rivedere alcuni cardini del progetto. Purtroppo, l'idea di escludere la coperta avrebbe portato sicuramente dei vantaggi dal punto di vista del peso ma avrebbe potuto comportare altrettanti danni in campo di regata. L'entrata di acqua nello scafo lo avrebbe appesantito notevolmente e la rimozione di tale acqua non sarebbe stata agevole o almeno immediata, facendo perdere così il vantaggio acquisito con la riduzione del peso. Si è pensato quindi di realizzare una nuova coperta che apportasse dei miglioramenti a quella precedente.

Assieme al settore agonistico del team, è stata studiata una soluzione alternativa per la realizzazione della coperta. Una barca senza coperta possiede limitate zone in cui è possibile fissare l'attrezzatura. Questo aspetto è fondamentale se si pensa che avendo poco spazio a disposizione, l'equipaggio deve avere la possibilità di muoversi più liberamente possibile. Creare una nuova coperta ha dato un'ampio margine di manovra sulla progettazione dell'armo. Parallelamente allo studio della disposizione dell'armo, assieme al settore tecnico si è pensato

come progettare e realizzare lo stampo della coperta che, per la prima volta nella storia del team è stato costruito interamente nei laboratori del DIM. Una caratteristica fondamentale della nuova coperta è sicuramente l'altezza rispetto alla chiglia che è stata abbassata da 350 a 260 mm comportando un abbassamento del baricentro dello scafo. Per facilitare la realizzazione dello stampo si è necessario evitare più possibile doppie curvature. Inizialmente si è pensato di usare una superficie curvata su di un solo asse che si estendesse lungo tutta la barca.



Figura 3.10 *Concept 6 di Athena con coperta curva.*

Tale scelta però non avrebbe favorito l'accoppiamento con lo scafo e tanto meno non avrebbe agevolato il fissaggio dei vari componenti dell'armo. Si è pensato di utilizzare una superficie piana leggermente inclinata nella zona centrale per agevolare il passaggio da un lato all'altro dello scafo e per facilitare il fissaggio dell'armo. I fianchi invece sono stati disegnati in modo da avere una curvatura più regolare possibile in direzione longitudinale. Nella zona di accoppiamento tra scafo e coperta si è deciso di minimizzare la falchetta, ovvero la parte terminare della murata che impedisce all'acqua di entrare nella barca quando è in sottovento. Dopo diversi disegni di prova, si è arrivati ad un concept finale riportato in Figura 3.11b:

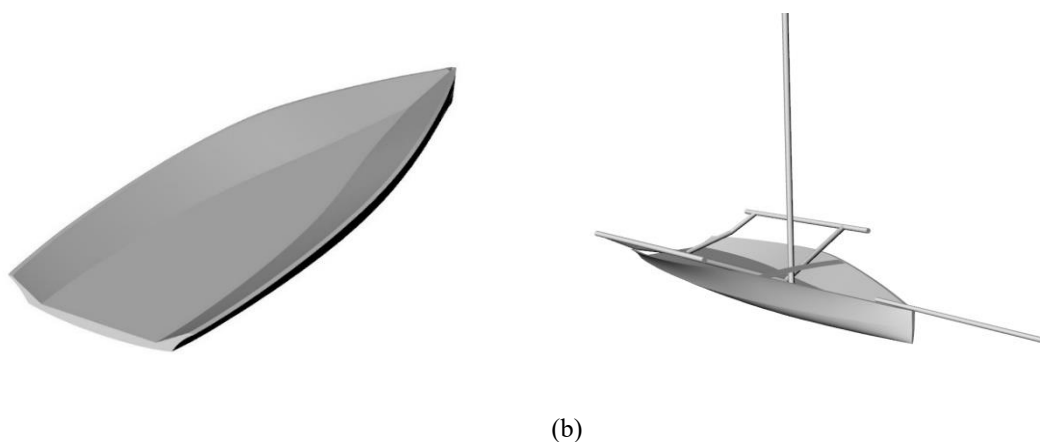


Figura 3.11 *(a) concept 10 della coperta di Athena; (b) rendering dello scafo completo di terrazze, bompresso e albero.*

Per quanto riguarda le strutture interne si è pensato di aumentare leggermente il numero attuale così da poter diminuire il piano di laminazione necessario per realizzare i pannelli dello scafo. Le paratie e il paramezzale di questo progetto devono essere riciclabili e soprattutto garantire performance migliori in navigazione. Nella precedente imbarcazione sono stati utilizzati dei pannelli di multistrato marino da 4 mm alleggeriti con dei fori nella parte centrale della struttura. Il peso complessivo si aggirava sui 6 kg totali tenendo conto della scassa.

La scassa di derivadi Ate ha presentato un grave difetto realizzativo poichè in regata si è verificato il distacco di un pannello dalla struttura centrale durante la sua prima regata comportando un'enorme entrata d'acqua nello scafo che ha quasi portato la barca ad affondare. Nonostante le efficienti riparazioni, si è pensato di rivedere la costruzione della stessa andando a creare una scassa di deriva integrata allo scafo. Inoltre, si sono osservati pesanti limiti nell'adesione dei pannelli di compensato dati dall'esigua superficie di incollaggio tra le paratie e la coperta. 4 mm di compensato non sono sufficienti per garantire un'adesione performante. Si è deciso quindi di intervenire aumentando lo spessore del pannello utilizzando un sandwich costituito da PET rivestito da pelli di vetro e PMMA. La creazione di tali pannelli verrà fatta in infusione per permettere un'elevata percentuale di fibre nel composito. A differenza di Ate, i pannelli interni non verranno alleggeriti. Per alleggerirli bisognerebbe procedere in due modi:

- Infondere il pannello intero e ritagliare il foro successivamente;
- Sagomare il PET per poi infondere le pelli sulla sagoma forata.

Nel primo caso si incorrerebbe in un tipico errore tecnologico. I materiali compositi, a differenza dei metalli, o del legno, risentono fortemente della concentrazione degli sforzi nelle zone in cui si interrompono le fibre. Per questo motivo nella pratica si ricorre all'uso di boccole o inserti o aumento localizzato quando si vuol forare un composito a fibre lunghe. Nel secondo caso invece, bisognerebbe rivestire gli estremi del foro con delle fibre che garantiscano continuità alle fibre delle due pelli. Questo comporta però un lavoro estremamente complicato ed inutile dal momento che il risparmio in peso dovuto dal foro sarebbe esiguo rispetto al pannello intero. Per questi motivi si è optato per realizzare un pannello intero senza alleggerimenti perchè il sandwich stesso rappresenta un alleggerimento. Infine, per aumentare la superficie di incollaggio si è pensato di realizzare dei rinforzi ad L in vetro e PMMA che verranno incollati da un alto sulla parete verticale delle paratie e dall'altro sulla superficie della coperta.

3.2 Verifiche strutturali

3.2.1 Verifica pannelli

Viene fatto un calcolo preliminare seguendo il regolamento A.B.S. “Offshore Racing Yachts” del 1994 [32], trattasi di un regolamento utilizzato per la progettazione delle imbarcazioni a vela. Il dimensionamento di tale regolamento è più conservativo rispetto ad altri, ma garantisce un buon punto di partenza, prima di raffinare l'analisi per mezzo degli elementi finiti.

Il regolamento stabilisce che il primo passaggio necessario al dimensionamento consiste nel definire la curva di carico agente sulla carena.

L'intento di questo primo predimensionamento è quello di avere un piano di laminazione di base che resista principalmente alla pressione dell'acqua esercitata sullo scafo. Verranno verificati tutti i pannelli che costituiscono lo scafo anche se alcuni di essi non sono a contatto con l'acqua durante la navigazione. Tale procedimento segue la linea conservativa della progettazione. Prima di descrivere i carichi applicati sullo scafo è opportuno stabilire il significato del parametro LWL (Length Water Line). Per semplicità la linea di galleggiamento viene considerata costante.

La curva di carico viene definita con il metodo seguente:

$$H = 3d + 0,14L + 1,62 = 2,65 \text{ m} \quad (3.1)$$

- d : l'immersione dello scafo
- L : la lunghezza dello scafo.

Successivamente il regolamento illustra come distribuire la colonna di carico lungo lo scafo:

$0,8H$ a 5% LOA (da prua);

$1,2H$ da 5% LOA a 35% LOA ;

$0,7H$ a 100% LOA (poppa).

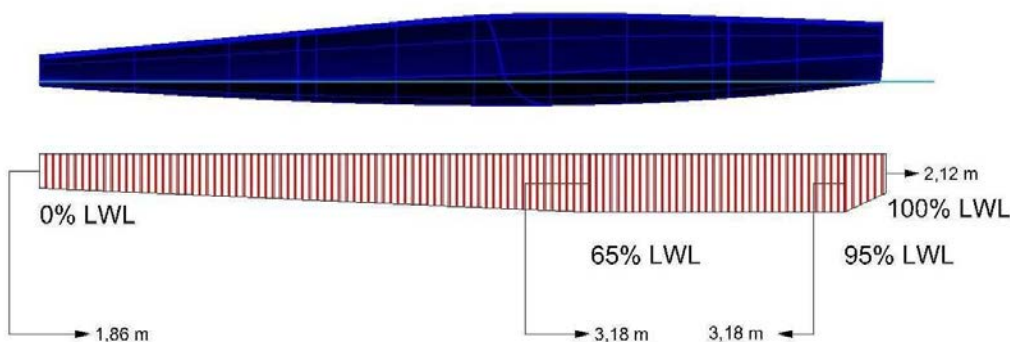


Figura 3.12 Distribuzione del carico lungo lo scafo.

Vi sono due possibili approcci possibili alla progettazione:

1. strutture di rinforzo molto fitte e fasciami sottili;
2. strutture di rinforzo diradate e fasciami spessi o in sandwich

La seconda scelta risulta essere la più appropriata. Prevedendo di utilizzare dei pannelli sandwich che di fatto sono dei pannelli con dei rinforzi molto fitti, la soluzione ricade sui rinforzi diradati. L'uso di strutture di rinforzo molto fitte è tipica per i classici materiali da costruzione come legno e acciaio.

Osservando le soluzioni adottate su *Aretè ed Ate* si procede con una struttura di primo tentativo illustrata in Figura 3.13. La struttura a differenza delle barche precedenti vuole rinforzare maggiormente la zona più sollecitata ovvero la zona centrale racchiusa tra: scassa di deriva, sartie-terrazze e piede d'albero. Lo studio del nuovo piano velico pensato per Athena ha portato a volere una posizione dell'albero poppiera rispetto ad Ate, ciò comporta uno spostamento della paratia sottostante così da garantire la giusta rigidezza nella zona in cui verrà fissato il piede d'albero.

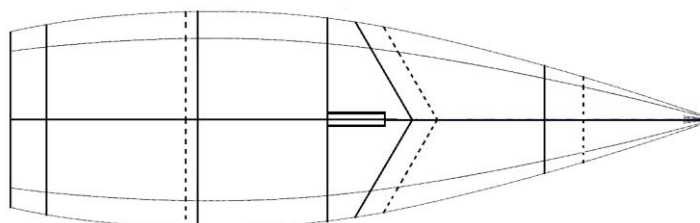


Figura 3.13 Illustrazione del posizionamento delle strutture interne. Le linee tratteggiate corrispondono alla posizione delle strutture interne di Ate mentre le linee piene a quelle di Athena

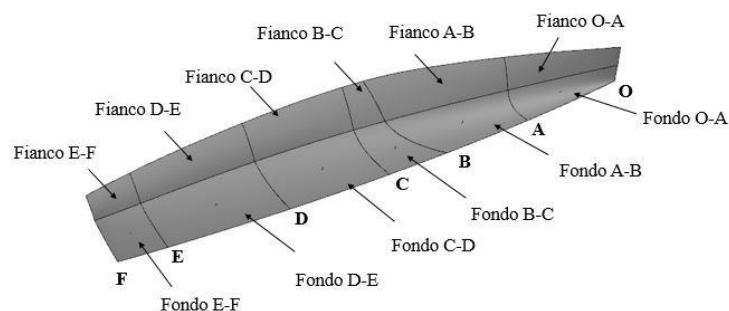


Figura 3.14 *Nomenclatura dei pannelli che compongono la carena.*

I pannelli che compongono lo scafo risultano allora delimitati longitudinalmente dal paramezzale e dallo spigolo fianco-fondo, lateralmente dalle paratie. A questo punto si ricavano le caratteristiche geometriche dei pannelli: larghezza media, lunghezza media, centroide, freccia. La freccia consiste nella la distanza tra centroide del pannello e la proiezione normale al quadrilatero generato dall'unione dei quattro vertici del pannello. Tale valore indica la curvatura del pannello. Per ciascun pannello sono state ricavate la posizione del centroide, la larghezza media, la lunghezza media e la freccia in corrispondenza del centroide. I dati di partenza per verificare il dimensionamento strutturale per ciascun pannello sono forniti in Tabella 3.1 ordinati a partire da prua in direzione poppa:

Pannello	Distanza da prua [mm]	Lunghezza media [mm]	Larghezza media [mm]	Freccia [mm]
Fondo 0-A	645	1076	247	35
Fianco 0-A	612	1071	232	4
<u>Fondo A-B</u>	1640	1011	463	44
Fianco A-B	1713	1214	331	0
Fondo B-C	2310	556	417	36
Fianco B-C	2400	363	233	6
Fondo C-D	2949	533	237	38
Fianco C-D	2936	710	319	5
Fondo D-E	3815	899	521	22
Fianco D-E	3803	902	265	11
Fondo E-F	4434	470	329	12
Fianco E-F	4430	332	203	9

Tabella 3.1 *Dimensioni caratteristiche di ogni pannello.*

Una volta tabulati i dati geometrici dei pannelli e definiti i criteri di verifica si inseriscono i layer che compongono il piano di laminazione. La verifica consiste nel confrontare i valori richiesti dei moduli di sezione delle pelli e il momento d'inerzia con quelli effettivi del piano proposto, di seguito vengono riportate le relazioni che li descrivono:

$$SM_O = \frac{t_a^2 F}{600 T} \quad [cm^3] \quad (3.1)$$

$$SM_i = \frac{t_a^2 F}{600 C} \quad [cm^3] \quad (3.2)$$

$$t_a = sc \sqrt{\frac{pk}{\sigma_a}} \quad (3.3)$$

Sostituendo la (3.3) nella (3.2):

$$SM_i = \frac{t_a^2 F}{600 C} = \frac{(sc)^2 p k F}{0,5 F 600 C} = \frac{(sc)^2 p k}{300 C} \quad (3.4)$$

- SM_O : modulo di sezione della pelle esterna
- SM_i : modulo di sezione della pelle interna
- I : momento d'inerzia delle pelli rispetto all'asse neutro del pannello
- F : σ di rottura a flessione [MPa]
- T : σ di rottura a trazione della pelle esterna [MPa]
- C : σ di rottura a compressione della pelle interna [MPa]
- $t_{a,b}$: spessori minimi delle pelli
- E_{TC} : media dei moduli elastici a compressione e a trazione
- s : distanza delle strutture di rinforzo;
- A distanza perpendicolare alla corda s tra due rinforzi
- $c = 1 - \frac{A}{s}$ fattore di correzione (mai $<0,7$)
- $p = 0,01Fh$ pressione che considera il battente idrostatico
- k riduzione del carico che coonsidera la forma del pannello, per calcolarla vengono usati valori tabulati al variare dell'*aspect ratio*;
- $\sigma_a=0,5 F$: *design stress*

Dovendo ottimizzare il piano di laminazione utilizzato per Ate e volendo ridurre notevolmente il peso di quest'ultimo si è deciso di suddividere il piano in rinforzi di grammatura inferiore.

Per semplicità vengono attribuiti dei codici ai materiali utilizzati nei diversi piani di laminazione:

- RE120 tessuto bidirezionale bilanciato 0-90° di vetro E; grammatura 120 g/m^2
- TWILL200 tessuto twill 2x2 di vetro E, grammatura 200 g/m^2
- BIA350 non tessuto biassiale bilanciato, grammatura 350 g/m^2
- PLAIN300 tessuto bidirezionale 0/-90° di vetro E. grammatura 300 g/m^2
- UD300 tessuto unidirezionale di vetro E, grammatura 300 g/m^2
- FLAX110 fibre unidirezionali di lino, grammatura 110 g/m^2
- FLAX180 fibre unidirezionali di lino, grammatura 180 g/m^2
- PB65 tasselli retinati di legno di balsa orientata
- PET80 schiuma di PET, densità 80 kg/m^3

Il piano di laminazione dello scafo di Ate prevedeva:

Ordine ply	Materiale	Numero di layer	Grammatura	Orientazione fibre
			[g/m^2]	[°]
4	RE120	1	120	-
3	FLAX180	1	180	0
2	FLAX180	1	180	90
1	RE120	1	120	0
0	PB65	1	100	-
-1	RE120	1	120	0
-2	FLAX180	1	180	90
-3	FLAX180	1	180	0

Tabella 3.2 Piano di laminazione del sandwich base di Ate.

Si è quindi optato per ridurre inizialmente la quantità di lino posto a 90°. Per seguire l'obiettivo di realizzare una barca riciclabile si è scambiata l'anima di balsa con l'anima di PET. A differenza dell'anima in balsa si è scelto di aumentare lo spessore del core perchè questo aumenta notevolmente le proprietà a flessione del pannello, compensando così le basse proprietà delle pelli. Va ricordato che l'aumento di spessore è consentito dal momento in cui il

core possiede una densità circa pari alla metà della densità della balsa. Questo margine consente di non risentire di un aumento di peso nonostante lo spessore passi da 6,35 a 10 mm.

L'anima in PET porta inoltre a un secondo vantaggio, i vari test eseguiti in fase di caratterizzazione dimostrano come vi sia un assorbimento di resina minore per il PET rispetto all'anima in balsa. Nonostante quest'ultima abbia una struttura piena, a differenza del PET che viene utilizzato sotto forma di schiuma, al termine del processo di infusione i provini in balsa hanno un peso superiore. I provini al netto del peso dell'anima e delle fibre contengono più resina nel caso della balsa. Il fenomeno può essere descritto dall'assorbimento capillare della balsa che, grazie all'ausilio del vuoto, attira la resina nella sua struttura tubolare. Come riporta la Tabella 3.3 il risparmio di peso può arrivare anche a 1 kg/m² e considerando che l'imbarcazione presenta una superficie di circa 13 m² il risparmio in peso è notevole.

Rinforzo	Anima	Matrice	Peso	Area	Densità superficiale
			[kg]	[m ²]	[kg/ m ²]
Lino	Balsa	Epossidica	0,0675	0,0154	4,38
Lino	Balsa	Elium	0,0580	0,0156	3,72
Lino	PET	Epossidica	0,0656	0,0150	4,35
Lino	PET	Elium	0,0514	0,0155	3,30

Tabella 3.3 Calcolo della densità superficiale delle 4 tipologie di provini realizzate.

La riduzione del peso in questo caso coincide con un peggioramento delle proprietà meccaniche, tuttavia, i test meccanici esposti nel capitolo precedente dimostrano che la riduzione di peso giustifica ampiamente le performance inferiori del composito.

Il piano pensato risulta essere quindi:

	Materiale	Numero di layer	Grammatura	Orientazione fibre	Spessore
			[g/m ²]	[°]	[mm]
3	RE200	1	200	0	0,02
2	FLAX110	2	110	0	0,04
1	FLAX110	1	110	90	0,02
0	PET80	1	800	0	10
-1	FLAX110	1	110	90	0,02
-2	FLAX110	2	110	0	0,04

Tabella 3.4 Piano di laminazione di Athena

I valori che si ottengono dal primo pre-dimensionamento sono:

Pannello	SM_0 trazione finale		SM_0 compressione finale		SM_i compressione media		SM_i trazione mediae		I	
	ideale	reale	ideale	reale	ideale	reale	ideale	reale	ideale	reale
Fondo 0A	0,037	0,091	0,015	0,091	0,029	0,062	0,019	0,062	0,003	0,042
Fianco 0A	0,037	0,091	0,014	0,091	0,029	0,062	0,018	0,062	0,003	0,042
Fondo AB	0,102	0,091	0,040	0,091	0,081	0,062	0,051	0,062	0,016	0,042
Fianco AB	0,068	0,091	0,027	0,091	0,054	0,062	0,034	0,062	0,008	0,042
Fondo BC	0,077	0,091	0,030	0,091	0,060	0,062	0,038	0,062	0,010	0,042
Fianco BC	0,032	0,091	0,013	0,091	0,025	0,062	0,016	0,062	0,002	0,042
Fondo CD	0,027	0,091	0,011	0,091	0,021	0,062	0,014	0,062	0,002	0,042
Fianco CD	0,052	0,091	0,021	0,091	0,041	0,062	0,026	0,062	0,006	0,042
Fondo DE	0,090	0,091	0,035	0,091	0,071	0,062	0,045	0,062	0,016	0,042
Fianco DE	0,032	0,091	0,012	0,091	0,025	0,062	0,016	0,062	0,003	0,042
Fondo EF	0,042	0,091	0,016	0,091	0,033	0,062	0,021	0,062	0,004	0,042
Fianco EF	0,016	0,091	0,006	0,091	0,012	0,062	0,008	0,062	0,001	0,042

Tabella 3.5 Risultati della verifica dei pannelli secondo regolamento A.B.S.

Osservando la Tabella 3.5 è possibile verificare il dimensionamento pannello per pannello così da scegliere in modo opportuno le pelli che compongono il laminato e gli spessori dello stesso. Si è voluto mantenere un piano di laminazione omogeneo per i vari pannelli che minimizzasse l'uso di materiali. Il piano di laminazione pensato soddisfa quasi tutti i pannelli ad eccezione del Fondo AB e del fondo DE. I due pannelli infatti sono tra i pannelli più grandi ed era quindi facilmente prevedibile che avrebbero richiesto più materiale. Dopo alcuni tentativi si è osservato che per verificare tali pannelli è sufficiente porre un ulteriore layer di FLAX110 in direzione 0 nelle pelli interne allo scafo.

Nella Tabella 3.6 viene riportata la verifica dei pannelli, ottenuta con il layer aggiuntivo.

FondoAB	0,102	0,091	0,040	0,091	0,081	0,062	0,051	0,062	0,016	0,042
Fondo DE	0,082	0,086	0,032	0,086	0,065	0,081	0,041	0,081	0,014	0,049

Tabella 3.6 Risultati corretti con l'aggiunta di un layer di lino al piano di laminazione.

I valori che si calcolati con tale metodo però non possono ritenersi definitivi. A questo pre-dimensionamento seguirà un'analisi più dettagliata agli elementi finiti che validerà i dati ottenuti da questo dimensionamento preliminare.

3.2.2 Verifica alla massima pressione d'onda

Una volta dimensionati i pannelli secondo il regolamento A.B.S. si procede con la verifica agli elementi finiti. Le simulazioni sono state eseguite sfruttando la piattaforma Workbench di Ansys attraverso la quale è stato possibile creare uno schema di calcolo, illustrato in Figura 3.15.

Il software dispone di moduli specializzati nel trattare i diversi materiali o le diverse condizioni di lavoro. In questo caso si è ricorso all'uso del modulo ACP, specifico per i materiali compositi. ACP pre viene configurato a monte dello schema e con esso è possibile inserire i valori ingegneristici dei materiali, definire la geometria e i relativi piani di laminazione. ACP Pre viene collegato allo strumento Static Structural con il quale è possibile svolgere le operazioni di calcolo strutturale. Infine, i risultati vengono inviati al modulo ACP Post con il quale è possibile analizzare i calcoli effettuati, layer per layer.

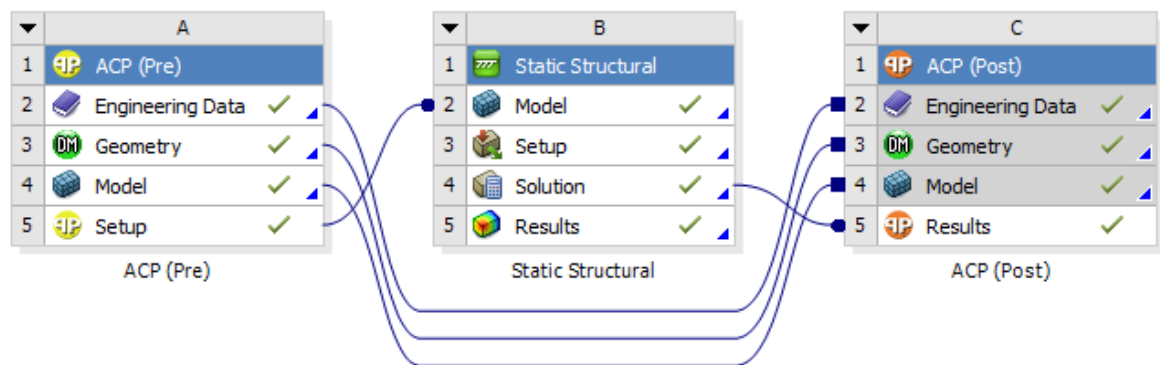


Figura 3.15 Schema di calcolo utilizzato in Workbench.

La verifica viene eseguita solamente su metà imbarcazione poiché sia la geometria che le condizioni di carico sono simmetriche. In questo modo si semplifica il calcolo diminuendo il numero di elementi velocizzando i tempi della simulazione.

Dovendo simulare i materiali compositi è consigliato utilizzare degli elementi *shell*, questi sono particolarmente indicati per simulare membrane dagli spessori ridotti come i materiali usati in questa simulazione.

Uno degli aspetti fondamentali su quale si basa l'analisi degli elementi finiti è sicuramente la definizione della *mesh*. La *mesh* è una particolare mappatura della superficie che si occupa di discretizzare, secondo i criteri voluti dall'utente, la geometria da simulare.

In questa occasione ci si è affidati al *modeler* implementato nel software. La miglior *mesh* ricavata si è ottenuta con una dimensione degli elementi di 20 mm. La forma degli elementi è gestita dal software, tuttavia come ci si poteva aspettare, vengono utilizzati elementi quadrangolari, adatti alle condizioni di stress piano.

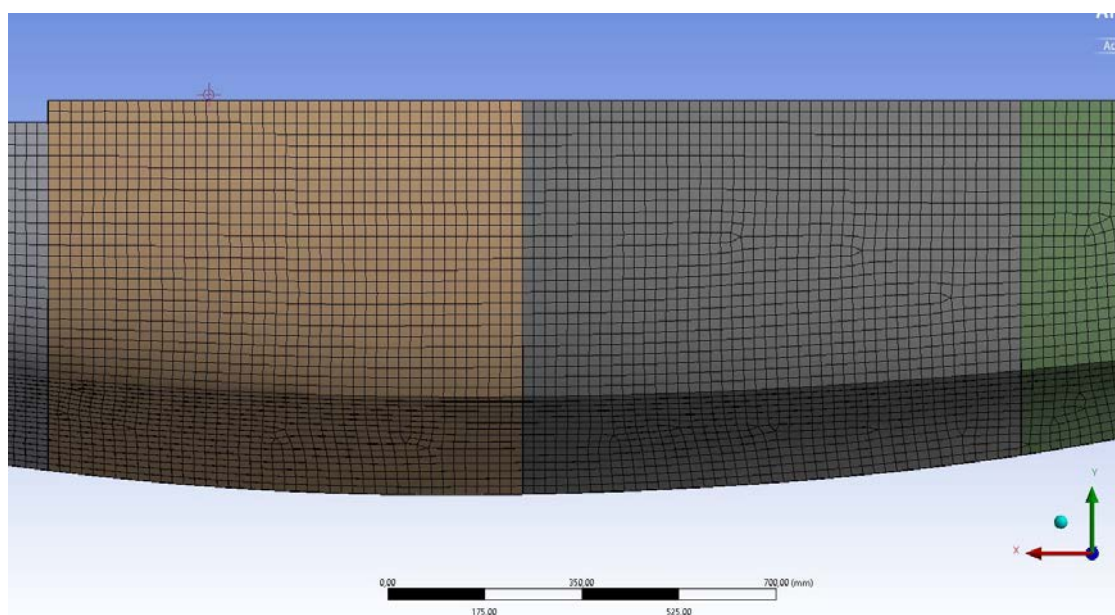


Figura 3.16 Dettaglio della *mesh* utilizzata.

Per semplicità viene simulato un solo tipo di materiale, ovvero il sandwich. I materiali che lo costituiscono però non saranno costanti infatti alcune parti che differiranno da altre come le paratie e il longherone che avranno le pelli costituite da soli fogli di vetro a differenza delle pelli della coperta che saranno prevalentemente di lino. Nella realtà le estremità superiori del fianco della carena e della coperta vengono realizzati con il solo laminato. Al fine di far lavorare nelle migliori condizioni possibili le fibre, i bordi dei pannelli sandwich necessitano di essere smussati con un angolo di circa 45° , in questo modo le fibre esterne ed interne vengono a contatto senza significative variazioni di curvatura. Inoltre, nelle zone a prua non è necessario avere un'elevata rigidità, infatti vi è già una certa rigidità fornita dalla geometria. Per questo motivo viene rimossa una parte del *core* nella parte più a prua, così da alleggerire localmente il piano di laminazione.

Nella simulazione, oltre al piano di laminazione illustrato nella Tabelle 3.7 e 3.8 sono stati aggiunti i piani di laminazione di paratie, paramezzale e coperta.

PARATIE PARAMEZZALE	Materiale	Numero di layer	Grammatura	Orientazione fibre	Spessore
			[g/m ²]	[°]	[mm]
2	RE200	1	200	45	0,02
1	RE200	1	200	-45	0,02
0	PET80	1	800	0	10
-1	RE200	1	200	-45	0,02
-2	RE200	1	200	45	0,02

Tabella 3.7 Piano di laminazione delle paratie e del paramezzale

COPERTA	Materiale	Numero di layer	Grammatura	Orientazione fibre	Spessore
			[g/m ²]	[°]	[mm]
3	RE200	1	200	0/90	0,02
2	FLAX110	1	110	45	0,04
1	FLAX110	1	110	-45	0,02
0	PET80	1	800	0	10
-1	FLAX110	1	110	-45	0,02
-2	FLAX110	2	110	45	0,04

Tabella 3.8 Piano di laminazione della coperta

Bisogna porre particolare attenzione al sistema di riferimento degli elementi in quanto l'orientazione delle fibre è strettamente legata terna levogira di ciascun elemento e non al sistema di orientazione degli assi assoluto. La direzione della normale di ogni elemento dovrà essere concorde a tutti gli altri elementi per la stesura corretta del piano di laminazione. La normale è quindi stata posta con verso entrante alla barca. Tale particolare è fondamentale nella stesura del piano di laminazione, utilizzando questo sistema di riferimento le pelli andranno depositate con un ordine *bottom to top*.

Lo scafo è stato suddiviso in diverse zone per permettere una configurazione più comoda dei piani di laminazione.

Una volta fissati i materiali e la *mesh*, è necessario definire le condizioni al contorno, ovvero i carichi agenti e i vincoli.

Per quanto riguarda i carichi, si vuole simulare l'azione della colonna d'acqua massima definita con il metodo A.B.S. Il calcolo della pressione distribuita sullo scafo viene riportato nell'equazione seguente:

$$p = \frac{\rho gh}{10^6} = \frac{1000 \cdot 9,81 \cdot 2,65}{10^6} = 2,6 \cdot 10^{-2} MPa \quad (3.5)$$

- ρ : densità dell'acqua, [kg/m³];
- g : accelerazione di gravità [m/s²];
- h : altezza del battente idrostatico [m].

Sono stati inseriti dei vincoli che bloccano le traslazioni in corrispondenza delle estremità delle paratie e del paramezzale, così facendo sarà possibile studiare il comportamento di carena, coperta e strutture interne sotto l'effetto della pressione.

Attraverso il calcolatore *Static Structural* è stato possibile studiare le deformazioni dei pannelli. I risultati soddisfano le aspettative ottenendo una freccia massima di 20 mm in corrispondenza del pannello Fianco AB. Ate, conservando la stessa geometria e gli stessi carichi, aveva presentato una freccia di circa 24 mm. Come ci si poteva aspettare, i pannelli più sollecitati, sono i pannelli Fianco AB e Fondo DE, apprezzabili in Figura 3.17. Va ricordato che il pannello Fianco AB quasi mai sarà a contatto con l'acqua ed inoltre, la verifica alla pressione esercitata dalla colonna d'acqua è molto superiore alla pressione reale esercitata sullo scafo. Il coefficiente di sicurezza del registro A.B.S. infatti è pari a 2 e ne consegue una progettazione conservativa.

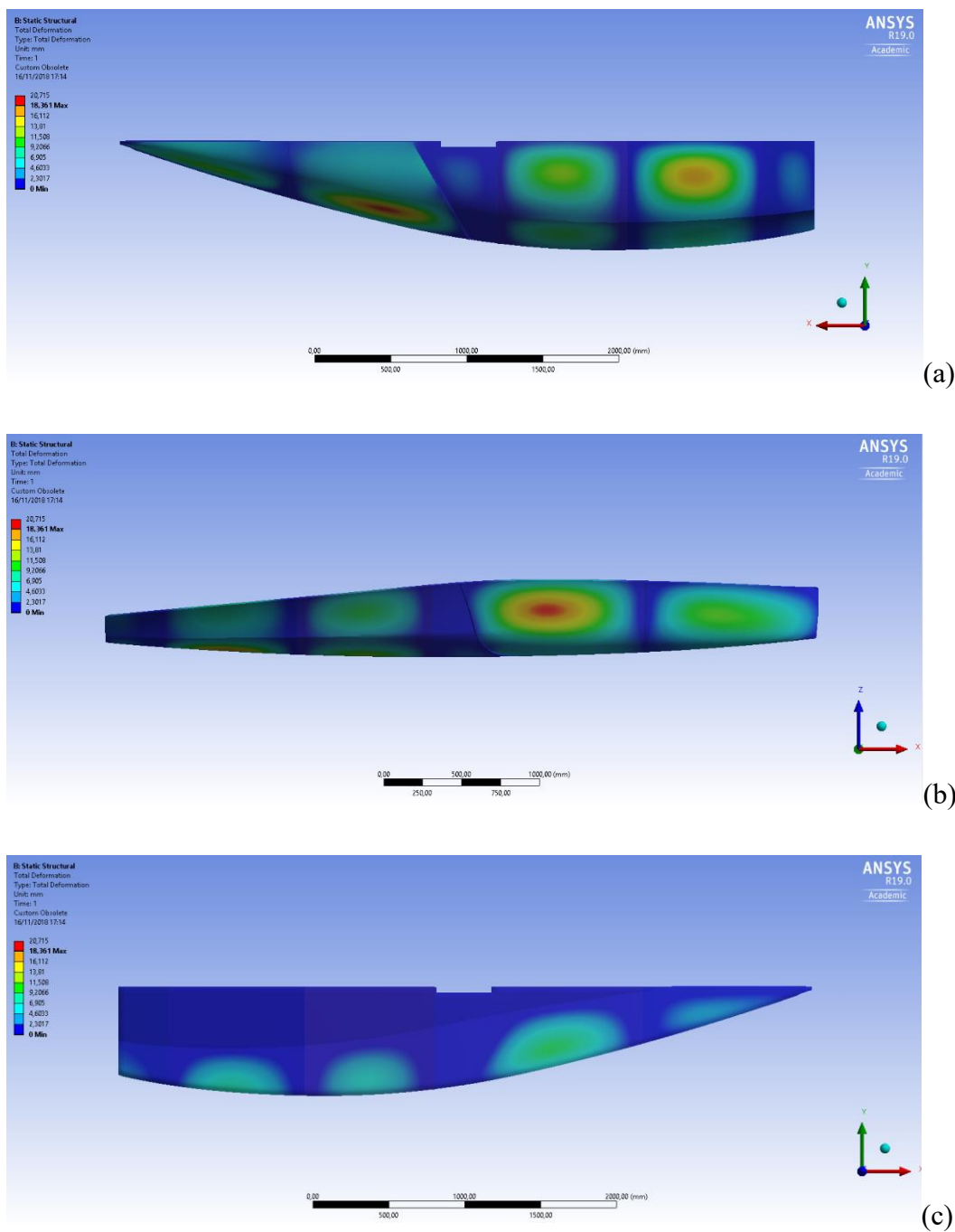


Figura 3.17 Deformazione dello scafo alla massima pressione d'onda.

Il materiale composito è stato verificato utilizzando il criterio di rottura di Tsai-Wu. Esistono molti criteri validi per verificare a rottura i compositi, nel caso in esame però trattandosi di materiali anisotropi con variazioni della resistenza a compressione rispetto alla resistenza a trazione il criterio di Tsai-Wu. Questo criterio è particolarmente adatto perché tiene conto di entrambi i comportamenti del composito infatti è uno dei più fedeli ai dati sperimentali. Per

verificare il laminato, è necessario che la somma dei contributi sia minore di 1. Di seguito viene riportata la disequazione del criterio:

$$f = F_i \cdot \sigma_i + F_{ij} \cdot \sigma_i \sigma_j + F_{ijk} \cdot \sigma_i \sigma_j \sigma_k \geq 1 \quad (3.6)$$

I termini F_i, F_{ij} e F_{ijk} tengono conto delle tensioni massime di rottura della lamina dove i, j, k assumono valori interi da 1 a 6 nel caso tridimensionale mentre i termini $\sigma_i, \sigma_j, \sigma_k$ rappresentano le tensioni lungo le direzioni principali. Vengono trascurati i termini del terzo ordine e si annullano contributi di taglio, F_4, F_5, F_6 , poichè la rottura del materiale non risente della variazione di segno degli sforzi di taglio.

$$f = F_1 \cdot \sigma_1 + F_2 \cdot \sigma_2 + F_{11} \cdot \sigma_1^2 + F_{22} \cdot \sigma_2^2 + F_{44} \cdot \sigma_{23}^2 + F_{55} \cdot \sigma_{13}^2 + F_{66} \cdot \sigma_{12}^2 + 2F_{12} \cdot \sigma_1 \cdot \sigma_2 \geq 1 \quad (3.7)$$

$$F_1 = \frac{1}{\sigma_{1T}^u - \sigma_{1C}^u}; \quad (3.8)$$

$$F_2 = \frac{1}{\sigma_{2T}^u - \sigma_{2C}^u}; \quad (3.9)$$

$$F_{11} = \frac{1}{\sigma_{1T}^u \cdot \sigma_{1C}^u}; \quad (3.10)$$

$$F_{11} = \frac{1}{2 \cdot \sqrt{\sigma_{1T}^u \cdot \sigma_{1C}^u \cdot \sigma_{2T}^u \cdot \sigma_{2C}^u}}; \quad (3.11)$$

$$F_{22} = \frac{1}{\sigma_{2T}^u \cdot \sigma_{2C}^u}; \quad (3.12)$$

$$F_{44} = \frac{1}{\sigma_{23}^u{}^2}; \quad (3.13)$$

$$F_{55} = \frac{1}{\sigma_{13}^u{}^2}; \quad (3.14)$$

$$F_{66} = \frac{1}{\sigma_{12}^u{}^2}; \quad (3.15)$$

- $\sigma_{iT}^u, \sigma_{iC}^u$: tensioni di rottura normali per le 3 direzioni principali;
- σ_{ij}^u : tensioni di rottura a taglio nei piani ij .

Di seguito vengono riportati i risultati ottenuti dall'analisi FEM:

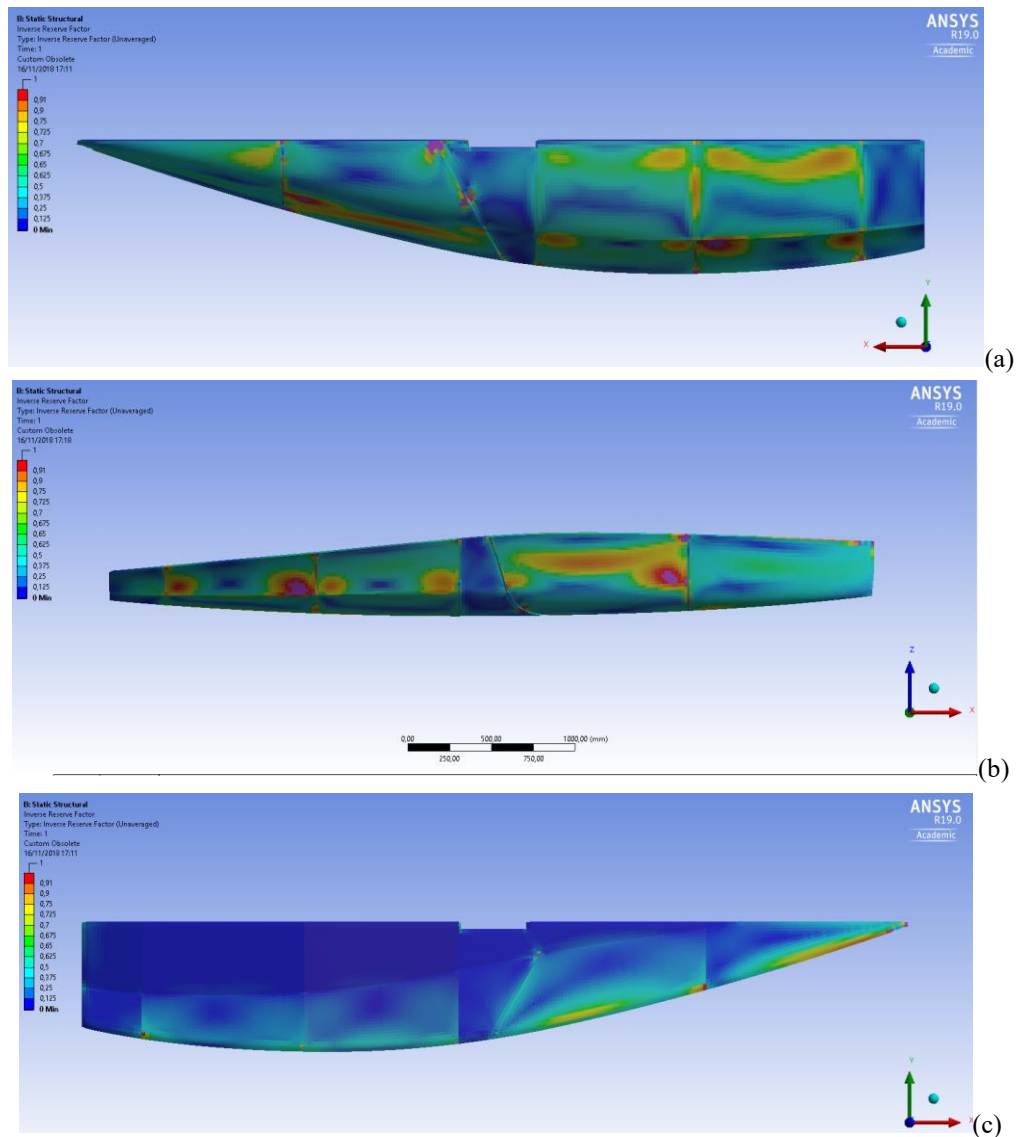


Figura 3.18 *Indice di Tsai-Wu del layer di vetro esterno alla massima pressione d'onda.*

Complessivamente il piano di laminazione viene verificato poichè i valori ottenuti sono inferiori a 1. Tuttavia vi sono delle zone in cui la condizione di resistenza non è verificata. La Figura 3.18 mostra lo strato più sollecitato che in questo caso è lo strato di vetro più esterno, lo strato di lino successivo invece risulta completamente verificato.

Tali risultati sono viziati dalle concentrazioni di sforzo in corrispondenza di giunti e spigoli vivi presenti nel disegno. Nella pratica gli effetti locali vengono minimizzati attraverso smussi con raggi maggiori. Per questo motivo il risultato della simulazione non può essere considerato senza le dovute osservazioni. Nonostante la simulazione sia viziata da alcuni difetti geometrici, si decide di aggiungere localmente dei rinforzi in fibra di vetro in corrispondenza del ginocchio

che separa il fianco dal fondo. Queste correzioni non necessitano un'ulteriore verifica perciò si decide di intervenire direttamente in opera come verrà illustrato nel capitolo seguente.

3.2.3 Verifica a carico concentrato in coperta

Per verificare anche il piano di laminazione della coperta, è necessario calcolare le deformazioni prodotte dal carico previsto. L'equipaggio esercita sui pannelli della coperta un carico concentrato stimabile considerando il peso dell'equipaggio distribuito in un'area molto piccola quale quella di un piede. Secondo il regolamento A.B.S. infatti per stimare il carico si esegue un calcolo molto semplice:

$$p = f \frac{F_p}{A} = 2 \frac{80 \cdot 9,81}{2 \cdot 250 \cdot 100} = 0,031 \text{ MPa} \quad (3.16)$$

- f : fattore di amplificazione dinamica ed è pari a 2;
- F_p : forza peso dell'equipaggio data da una massa corporea di 80 kg;
- A : superficie di appoggio di 2 piedi.

Per conoscere gli effetti del carico, lo si applica nei pannelli più grandi della coperta che coincidono con le zone di calpestio dell'equipaggio. Nella progettazione infatti non viene tenuto conto del peso degli equipaggi come carico gravoso in quanto produce degli effetti molto minori rispetto ad altri carichi agenti sullo scafo. Per questo motivo non ci si aspetta di ottenere valori elevati delle deformazioni.

Viene utilizzato ancora una volta lo schema di *Workbench* di Figura 3.15 utilizzato nella simulazione precedente. La geometria rimane infatti la stessa e con essa anche la *mesh* realizzata.

I piani di laminazione erano stati già inseriti per verificare lo scafo alla pressione d'onda e rimangono invariati. Vanno però rivisti i carichi e i vincoli dello scafo. In questo caso si procede a vincolare le traslazioni in corrispondenza della superficie inferiore delle paratie e del longherone. Viene mantenuta la pressione idrostatica esercitata sulla carena. Il carico sarà invece una pressione distribuita nell'area definita precedentemente. Va ricordato che la simulazione riguarda solamente metà scafo, di conseguenza viene considerato un solo piede agente.

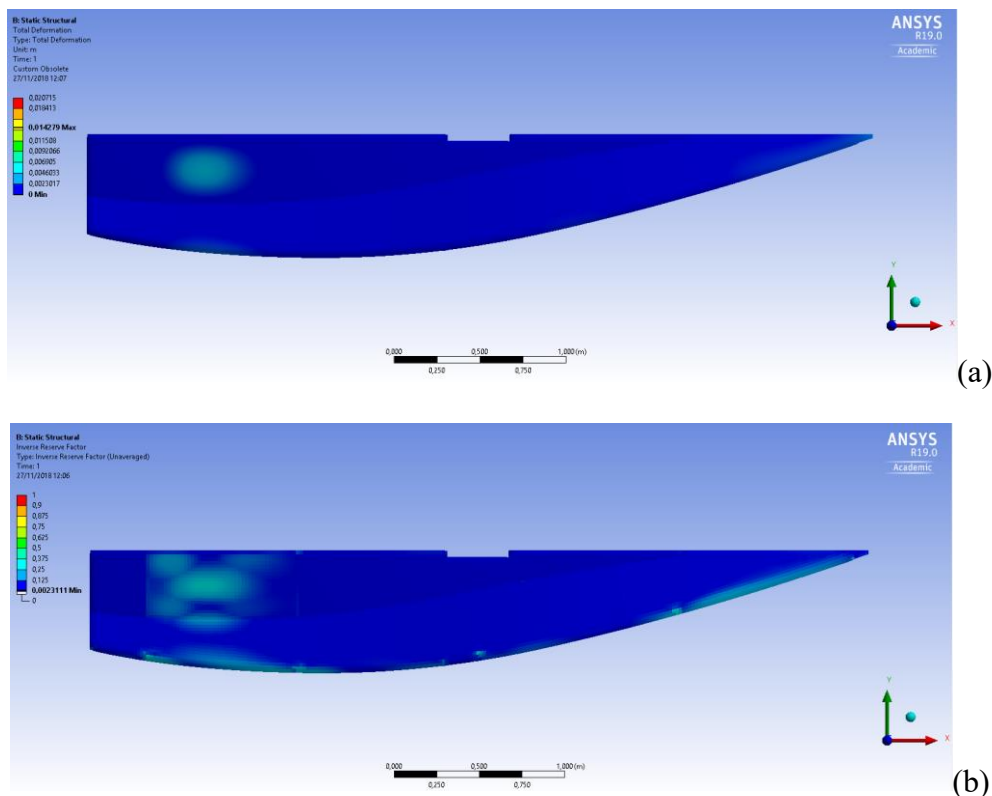


Figura 3.19 (a) deformazione della coperta al carico concentrato; (b) indice di Tsai-Wu per lo strato d vetro esterno.

Come ci si aspettava le tensioni dovute al carico puntuale non sono gravose anzi sono abbondantemente verificate. Il piano di laminazione potrebbe essere dunque alleggerito, tuttavia si comprometterebbe la rigidità torsionale dello scafo intero. In questo lavoro non si considerano infatti i carichi asimmetrici e le condizioni dinamiche di navigazione. Seguendo le indicazioni dell'Ing. Battisti e dell'equipaggio vi è la necessità di irrigidire l'intera struttura per garantire uno scafo performante. Uno scafo più rigido trasmette meglio la propulsione data dal piano velico che viene scaricata attraverso l'albero e inoltre migliora la risposta dell'imbarcazione al variare dell'angolazione del timone da parte del timoniere.

3.3 Conclusioni

Il pre-dimensionamento secondo regolamento A.B.S. è stato verificato interamente attraverso il calcolo agli elementi finiti. Il piano di laminazione proposto non solo soddisfa i criteri di rottura ma mostra anche una deformazione leggermente inferiore a quella osservata negli scafi precedenti. In fase realizzativa verranno rinforzate ulteriormente delle zone sensibili secondo il know-how del settore tecnico del team. Al fine di ottenere un dimensionamento completo dello scafo sarebbero necessarie ulteriori verifiche che non verranno trattate da chi scrive.

Capitolo 4

Realizzazione dello scafo

Nel capitolo seguente verranno esposte le tecniche utilizzate per realizzare lo scafo. Verranno infusi separatamente coperta, carena e strutture interne seguendo i piani di laminazione verificati in fase progettuale. I tre componenti verranno uniti incollando inizialmente le paratie allo scafo che successivamente saranno accoppiati alla coperta. Lo scopo di questo capitolo è di esportare su di una scala più ampia i risultati ottenuti nei test durante la caratterizzazione.

4.1 Prova di infusione

Prima di infondere lo scafo definitivo sono stati eseguiti dei test aventi delle condizioni molto simili alle condizioni reali dell'infusione. In particolare, si sono utilizzati gli stessi *layer* di lino e lo stesso materiale per il core. I provini realizzati sono stati fatti volutamente di grandi dimensioni per conoscere il comportamento della resina in tali condizioni. Si sono quindi osservati i tempi necessari alla completa impregnazione delle fibre, la distribuzione della resina nel sacco e i tempi di ramificazione della matrice. Il provino questa volta è stato realizzato su di uno stampo avente le stesse caratteristiche dello stampo utilizzato per realizzare lo scafo. Il materiale usato per la produzione dello stampo è poliuretano espanso denso 250 Kg/m^3 rivestito con un particolare stucco metallico. In questo modo è stato possibile osservare anche il comportamento dello stampo.



(a)



(b)

Figura 4.1 (a) Preparazione del primo test di infusione; (b) primo test di infusione fallito.

La prima prova realizzata non ha soddisfatto le attese. Durante il processo di infusione si è registrata una perdita del sacco con conseguente entrata di aria. In questo modo i perossidi non hanno agito correttamente poichè in minore concentrazione rispetto al dovuto.

La seconda prova invece è stata fatta con dimensioni minori ma mantenendo costanti i materiali utilizzati e il substrato sul quale si è svolto il test.



(a)



(b)

Figura 4.2 (a) secondo test di infusione; (b) secondo test di infusione riuscito.

4.2 Realizzazione della carena

4.2.1 Preparazione stampo della carena

La preparazione dello stampo è una parte fondamentale nel processo di infusione poiché oltre a determinare la finitura superficiale finale dell'oggetto che si vuole realizzare, deve garantire la perfetta impermeabilità all'aria dello stampo. Nel 2016 il team ha portato a termine Ate, imbarcazione realizzata con il medesimo processo realizzativo. La costruzione di Ate ha lasciato in eredità gli stampi realizzati in schiuma poliuretanica rivestiti con un particolare stucco metallico carteggiato a mano per conferire un'ottima finitura superficiale. Visto il progetto di Athena e le discrete condizioni dello stampo dello scafo si è optato per recuperarlo, visti anche i costi sostenuti per acquistarlo. L'intervento di recupero prevedeva la riparazione delle zone danneggiate durante il *demoulding* di Ate utilizzando dello stucco metallico, il rifacimento del bordo e l'aggiunta di un inserto per la realizzazione di una scassa di deriva integrale allo scafo. Tale zona infatti è costantemente sollecitata e in passato le zone di giunzione tra scafo e coperta hanno subito notevoli danni con conseguenti entrate d'acqua considerevoli. Per evitare tali inconvenienti si è deciso di dare continuità alle fibre dello scafo rendendo quindi la scassa di deriva, parte integrante dello stesso. Sostituendo inoltre la struttura in balsa con un sandwich di fibre di vetro e PET si sono migliorate le proprietà meccaniche della struttura irrigidendola.

L'inserto è stato realizzato accoppiando diversi strati di schiuma di PVC e due tavole di compensato marino fino a raggiungere le dimensioni della deriva, successivamente è stato rivestito il tutto con del nastro da pacchi, perché è impermeabile all'aria, possiede una discreta finitura superficiale ed inoltre è un ottimo distaccante. Si è quindi laminato manualmente l'inserto nella posizione prevista da progetto utilizzando delle fibre di vetro e della resina epossidica.



Figura 4.3 Realizzazione dell'inserto della scassa.

Una volta asciugato, lo stampo è stato interamente carteggiato a mano per ottenere una superficie liscia e priva di impurità. Successivamente è stato ripulito con acetone ed è stato rivestito con quattro mani di turapori. Il turapori viene largamente utilizzato per eliminare la porosità superficiale data dalle lavorazioni di levigatura. L'uso di questo prodotto consente una minore possibilità di ancoraggio fisico della resina una volta indurita e quindi una maggiore facilità di rimozione dell'oggetto finito.

Una volta steso il turapori è stato applicato il distaccante ovvero un particolare rivestimento che consente di staccare il prodotto infuso facilmente garantendo però una buona finitura. Vista l'aggressività della resina e la difficoltà nello staccare una geometria leggermente complessa come lo scafo utilizzando solamente della cera distaccante, si è deciso di utilizzare il PVA, polivinil-alcol in combinazione con la resina. Si sono depositate 4 strati di PVA e successivamente 2 strati di cera.

4.2.2 Stesura pelli della carena

Lo stampo realizzato viene chiamato in gergo “stampo femmina” dal momento che le prime fibre depositate saranno le fibre più esterne del composito, ovvero le fibre esposte all'acqua in questo caso.

Prima di passare alla stesura dei rinforzi fibrosi è stato necessario sagomare e forare l'anima scelta in fase di progettazione.

Solitamente le aziende produttrici di anime per sandwich forniscono il materiale trattato a seconda del tipo di lavorazione che subirà il sandwich. Per il processo di infusione il materiale viene intagliato per permettere ai laminatori di posizionare l'anima facendola aderire allo stampo inoltre, la griglia formata dagli intagli favorisce la distribuzione della resina che per scafi di notevoli dimensione è sempre difficoltosa. I fori servono esclusivamente per favorire il passaggio della resina nelle due facce del sandwich.

Diversi test condotti in passato dal team dimostrano come tali trattamenti aumentino drasticamente l'assorbimento di resina a sfavore del peso complessivo e della performance del composito. Si è quindi pensato di utilizzare dei pannelli di schiuma grezzi e una volta ritagliata e forata manualmente si sono sfruttate le proprietà termoplastiche del polimero per termoformare l'anima facendola aderire allo scafo senza dover incidere la superficie o suddividere eccessivamente i pannelli. Per fare ciò è stata utilizzata una pistola termica da

carrozziere ad una temperatura di circa 400°C ed imprimendo una pressione locale sul pannello fino al raggiungimento della curvatura desiderata. Utilizzando questa tecnica si sono quindi tagliati e sagomati i vari pannelli di PET fino a rivestire tutta la superficie dello scafo. Al fine di poter assicurare continuità del core e per evitare spostamenti dello stesso nel momento in cui si imponeva il vuoto. Si è termosaldato il PET utilizzando uno stagnatore. Sfruttando le proprietà termoplastiche del polimero è stato possibile unire i pannelli sagomati garantendo una discreta continuità dell'anima evitando cavità che potevano riempirsi di resina. Una volta termosaldate le varie parti dell'anima si sono stuccate le imperfezioni e le fessure con lo stucco di microsferi cave e resina epossidica.

Seguendo il piano di laminazione suggerito in progettazione sono quindi stati stesi i seguenti tessuti secchi:

Ordine ply	Tipo di rinforzo	Numero di layer	Grammatura rinforzi	Direzione
			$\left[\frac{g}{m^2}\right]$	[°]
5	RE200	1	200	0/90
4	FLAX110	1	110	0
3	FLAX110	1	110	0
2	UD300	1	300	60
1	FLAX110	1	110	90
0	PET80	1	800	-
-1	FLAX110	1	110	90
-2	UD300	1	300	-60
-3	FLAX110	1	110	0
-4	FLAX110	1	110	0

Tabella 4.1 Piano di laminazione della carena.

I rinforzi sono stati aggiunti per tutelare le zone maggiormente sollecitate e nelle zone in cui è richiesta una maggiore rigidità. Molti di questi accorgimenti non sono strettamente richiesti dalla verifica strutturale piuttosto da esplicite richieste dell'equipaggio che predilige un'imbarcazione più rigida. Per facilitare la deposizione delle fibre è stata usata una particolare colla spray molto utilizzata in questo campo così da fissare nella corretta posizione i tessuti.

Si sono infine posizionati i tessuti per la scassa e i relativi rinforzi:

Ordine ply	Tipo rinforzo	Numero di layer	Grammatura	Direzione
			$\left[\frac{g}{m^2}\right]$	$[^\circ]$
2	BIAX300	1	300	0-90
1	RE200	1	200	0-90
0	PET80	1	800	
-1	RE200	1	200	0-90
-2	BIAX300	1	300	0-90

Tabella 4.2 Piano di laminazione della scassa.

Una volta stesi tutti i rinforzi si sono posizionati i materiali ausiliari del processo di infusione. Il primo strato sarà il peel-ply, tessuto realizzato in Nylon, usato come distaccante, il secondo strato invece sarà il microforato, ovvero un film di ELA forato che funge sia da distaccante sia da regolatore di flusso, attraverso il microforato infatti siamo in grado di ridurre l'afflusso di resina verso le fibre. Il terzo strato riguarda il flow-mesh, esso funge da distributore di resina e impedisce al vuoto di strozzare localmente il sacco permettendo il passaggio dell'aria all'interno.

Sistemati tutti i tessuti ausiliari, si posizionano i tubi, le spirali e le torrette necessarie a immettere la resina ed ad aspirare l'aria nel sacco. I tubi non devono avere diametro maggiore di 10mm altrimenti l'elevato spessore di resina locale provoca un innalzamento eccessivo di temperatura dovuto dalla reazione esotermica di ramificazione del PMMA. In corrispondenza delle spirali usate per distribuire la resina, si posiziona l'enka-channel, una particolare calza di fibre di vetro e poliestere con all'interno una rete che facilita il trasporto della resina.



(a)

(b)

(c)

Figura 4.4 (a) *Stesura delle pelli di lino*; (b) *posizionamento del PET*; (c) *Chiusura del sacco*.

La disposizione delle torrette e dei tubi deriva dal know-how del team che negli anni ha studiato l'andamento della resina durante le infusioni e dal particolare comportamento osservato nei diversi provini realizzati utilizzando la resina acrilica. Lo schema è pensato per minimizzare il percorso fatto dalla resina così che non servano tempi prolungati per bagnare tutte le fibre e in modo che il fronte di avanzamento della resina sia omogeneo. Sarà importante che la resina arrivi alla spirale di aspirazione così da limitare lo spreco di matrice.

4.2.3 *Infusione della carena*

Durante l'infusione della carena, dopo circa 45 minuti, giunti ormai al termine, si sono registrate delle perdite di vuoto quando la resina aveva completamente bagnato le fibre. Le elevate temperature esterne e l'eccesso di resina nei canali di diffusione sommato al diametro del tubo, hanno provocato un aumento localizzato della temperatura che hanno danneggiato localmente il sacco comportando l'entrata di aria. Così facendo, la resina si è depositata nel punto più in basso accumulandosi con spessori superiori ai 20 mm. A questo punto l'aumento di temperatura è stato ingestibile e lo stampo, in poliuretano, ha cominciato a degradarsi formando delle bolle al di sotto del rivestimento in poliestere. Questo comportamento non era previsto dal momento che il sacco aveva passato i test del vuoto necessari e poteva essere utilizzato fino a temperature attorno ai 155°. Dopo alcune ore, è stato possibile aprire il sacco per esaminare i danni provocati

dalla infusione fallita. Nella Figura 4.5c è visibile la bolla data dal rigonfiarsi dello stampo che ha poi influito sulla geometria dello scafo.

La resina, a differenza di altri provini falliti, è riuscita a catalizzare completamente tanto che è stato possibile rimuovere la carena infusa dallo stampo.

Dopo un'attenta analisi si è decretata l'inutilizzabilità di tale carena e quindi si è deciso di produrne una seconda con i dovuti accorgimenti.

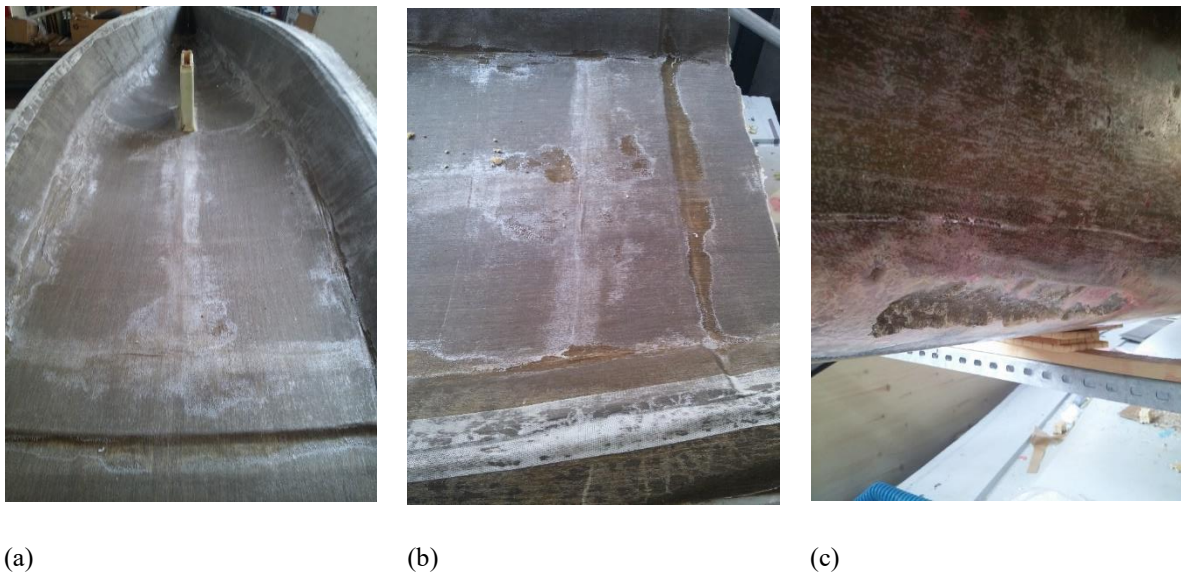


Figura 4.5 *Dettagli dei difetti riscontrati nell'infusione della carena.*

Al fine di comprendere meglio il comportamento della resina si è svolta una analisi gpc, *gel permeation chromatography*. In questo modo è possibile capire il grado di polimerizzazione della resina andando a misurare il peso molecolare del polimero formato. In un primo momento si è pensato che il problema potesse essere legato ad un errato stoccaggio dei perossidi che non hanno permesso di completare la polimerizzazione, così si sono confrontati tre diversi campioni di Elium: un campione indurito correttamente, un campione indurito con perossidi scaduti e un campione prelevato dall'infusione fallita della carena.

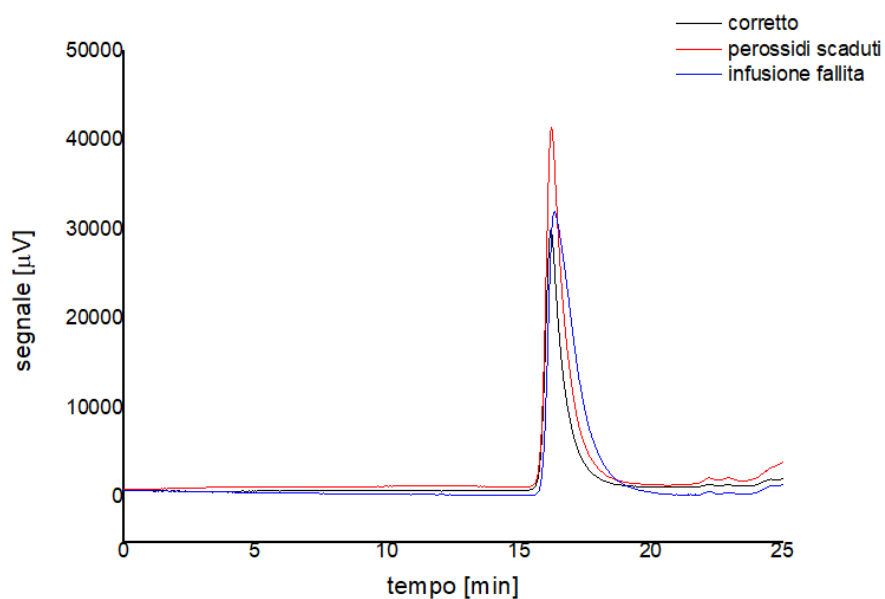


Figura 4.6 Grafico della prova gpc dei campioni di resina acrilica reicolata in diverse condizioni.

Lo strumento registra un picco dopo un tempo di circa 16 minuti. Dopo aver calibrato il metodo con uno standard di PS si sono calcolati i relativi pesi molecolari utilizzando la retta di calibrazione in Figura 4.7

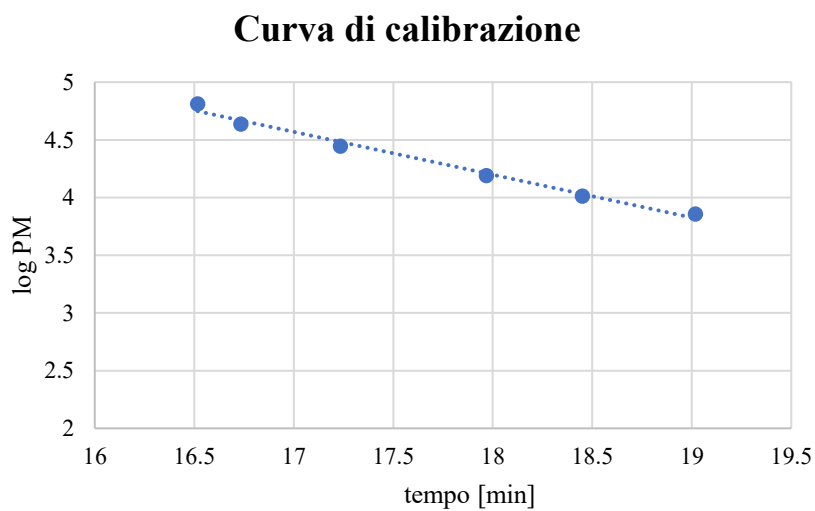


Figura 4.7 Grafico di calibrazione per il calcolo del peso molecolare.

L'equazione della retta di calibrazione è la seguente:

$$y = -0,3715x + 10,884 \quad (4.1)$$

Di seguito, in Tabella 4.3 vengono riportati i risultati ottenuti.

Campioni	tempo	$\log_{10} PM$	PM
	[min]		[g/mol]
Provino perossidi scaduti	16,22	4,858	72155
Provino corretto	16,2	4,865	73400
Infusione fallita	16,33	4,817	65675

Tabella 4.3 Calcolo del peso molecolare dei tre diversi campioni di resina.

L'analisi dimostra che i perossidi non sono determinanti per la riuscita della polimerizzazione infatti il campione con perossidi scaduti mostra un peso molecolare circa pari a quello indurito correttamente, mentre il campione dell'infusione fallita presenta un peso molecolare più basso di circa 7500 g/mol. Il peso molecolare inferiore indica che le alte temperature raggiunte hanno eccessivamente accelerato la reazione impedendo la completa polimerizzazione.

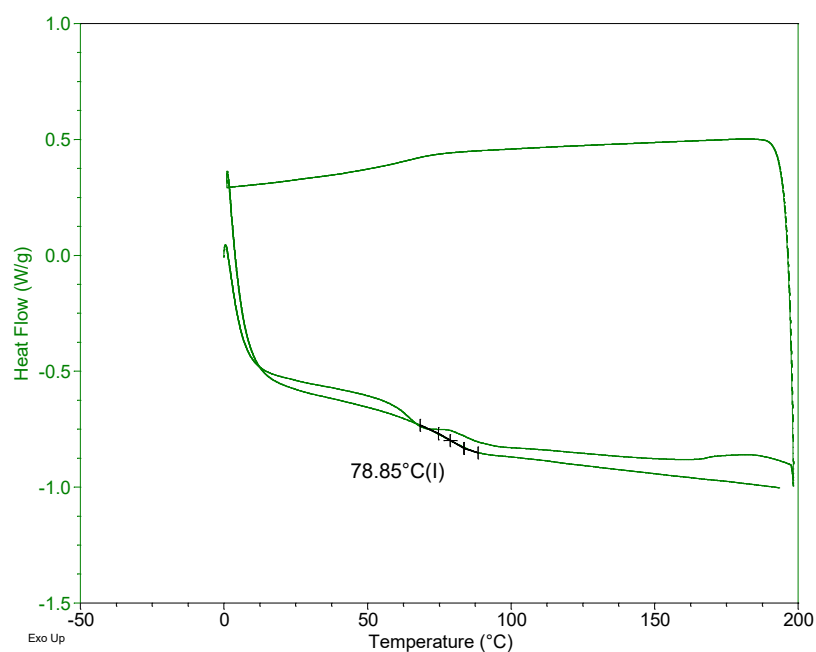


Figura 4.8 DSC per un campione di resina acrilica.

Dall'analisi calorimetrica differenziale a scansione (DSC) della resina polimerizzata in condizioni corrette si osserva che il materiale ha una temperatura di transizione vetrosa di circa 80°C.

4.2.4 Realizzazione e preparazione secondo stampo

Non potendo più utilizzare lo stampo in poliuretano si è deciso di realizzarne un secondo utilizzando Ate come modello. Prima di eliminare lo stampo però si sono laminati due strati di vetro bidirezionale $\pm 45^\circ$ sul bordo per creare un piccolo stampo da poter utilizzare successivamente. Ate è stata quindi cerata e ricoperta con uno strato di vetro di bassa grammatura e due strati di *mat* di vetro. La superficie però necessita una rigidità sufficiente per poter essere rimossa senza perdere la corretta geometria. Si è pensato quindi di creare un sandwich posizionando dei pannelli di balsa e ulteriori strati di vetro e resina epossidica all'esterno. La balsa è stata scelta perché non soffre le elevate temperature come il poliuretano che pur essendo un buon isolante non può operare a temperature troppo elevate, anche se rivestito. Una volta cerata, Ate è stata rivestita con due strati di *mat* di vetro per garantire una buona finitura superficiale e una completa copertura di resina su tutta la carena. Si è continuato aggiungendo la balsa richiudendola sulle pelli interne con altri due *ply* di vetro. Il solo sandwich però non basta per svolgere il ruolo di stampo, quindi sono state disegnate al CAD delle seste realizzate poi con multistrato di pioppo. Le seste oltre a garantire un solido appoggio in piano allo stampo laminato, conferisce ulteriore rigidità che risulta essere fondamentale per la creazione degli stampi.

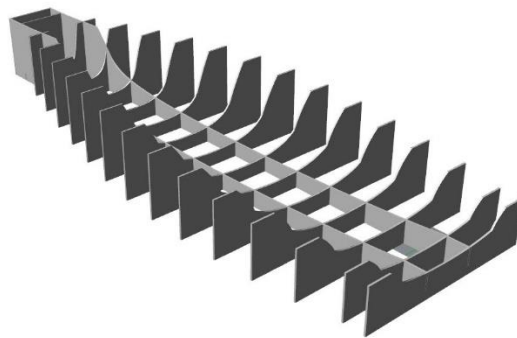


Figura 4.9 Rendering delle seste per lo stampo della carena.

Le seste ed i longheroni sono stati tagliati seguendo dei modelli di carta. I modelli sono stati incollati direttamente sul multistrato. Questa tecnica consente di velocizzare la produzione delle seste senza avvalersi di macchinari come frese a controllo numerico o a taglio laser che farebbero lievitare anche i costi di produzione. Terminata la fase di taglio sono stati incollati i

vari pezzi utilizzando della colla vinilica. Successivamente le seste sono state ruotate di 180° e appoggiate allo stampo in sandwich laminato precedentemente.



Figura 4.10 Incollaggio delle seste e dei longheroni allo stampo laminato su Ate.

Così facendo verrà preservata la geometria originale della carena di Ate senza il rischio di avere delle distorsioni date dallo spostamento dello stampo. Lo scheletro formato da seste e longheroni è stato fissato utilizzando dei pezzi di vetro laminati a mano con resina epossidica.

Una differenza sostanziale tra Ate ed Athena è sicuramente il bottazzo. In Ate era stato previsto un bordo decisamente incurvato che consentisse di auto-centrare la coperta. La creazione di questo bottazzo ha creato diversi problemi nella precedente infusione poiché la netta variazione di curvatura del bordo ha permesso la formazione di accumuli di resina e a una erronea disposizione delle fibre. tale risultato ha reso molto difficoltoso l'unione tra scafo e coperta. Per questi motivi si è deciso di realizzare una flangia ortogonale al fianco così da agevolare l'incollaggio utilizzando dei pannelli di multistrato da 4 mm.

Per raggiungere lo stesso offset dato dal sandwich, si sono sovrapposti due pannelli. La mancanza di una guida fisica per il centraggio della coperta richiederà una particolare attenzione nella fase di accoppiamento.

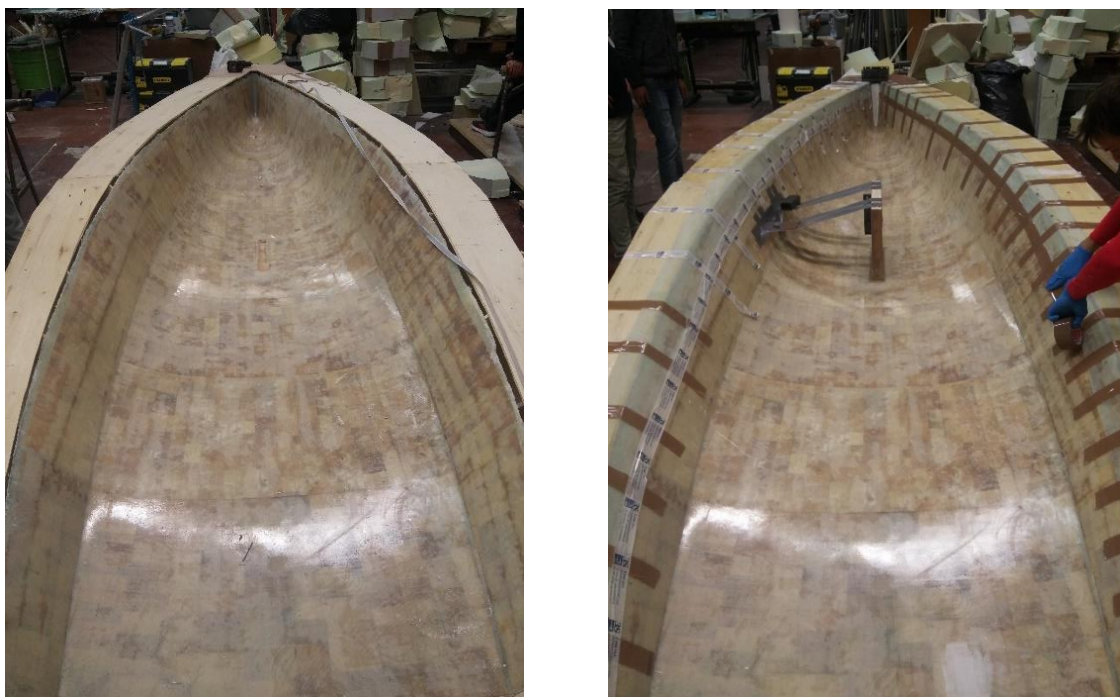


Figura 4.11 *Incollaggio e laminazione del bordo della carena.*

I pannelli che costituiscono il bordo e lo stampo della carena sono stati collegati laminando a mano tre strati di tessuto di vetro da 170 g/m^2 con resina epossidica. Per preservare la geometria del bordo precedente sono stati utilizzati i controstampi descritti all'inizio del corrente capitolo. Contemporaneamente è anche stato posizionato il nuovo inserto per la scassa di deriva sfruttando dei riferimenti ottenuti dalla laminazione di Ate.

Terminato l'incollaggio del bordo si sono effettuate le dovute operazioni di carrozzeria per levigare lo stampo omogeneamente garantendo una superficie più liscia possibile. Infine, si sono ripetute le operazioni di stesura dei distaccanti passando due mani di PVA e altre due di cera.

4.2.5 *Infusione seconda carena*

Prima di procedere alla deposizione delle pelli, si è effettuata una prova del vuoto per verificare che lo stampo non presentasse perdite con ottimi risultati. Lo stampo infatti ha soddisfatto i requisiti di vuoto imposti dal produttore della resina e si è deciso quindi di procedere. Sono state disposte le varie pelli seguendo lo stesso piano di laminazione utilizzato per la prima infusione. Variando solamente la configurazione dei consumabili. Per evitare spessori eccessivi è stato rimosso il distributore di resina, enka-channel, in corrispondenza delle spiruline. In questo modo le spiruline sono state a contatto diretto con il flow-mesh. Per velocizzare il

processo di infusione si sono aggiunti due canali di resina in più rispetto alla volta precedente. E sono state aggiunte delle torrette lungo le canaline così la resina è stata distribuita omogeneamente. La resina è arrivata alla spirulina di aspirazione nello stesso tempo in tutte le zone della carena limitando gli sprechi. Nel caso in cui ci fossero state delle zone carenti di matrice sarebbe stato necessario continuare ad immettere resina fino al riempimento totale sprecando molto materiale inutilmente.



Figura 4.12 Seconda infusione della carena.

Il processo è stato relativamente veloce, terminando in poco più di 40 minuti. Dopo 70 min si sono registrate delle piccole perdite di vuoto e contemporaneamente la resina a centro barca ha iniziato a produrre molto calore, indice che la reazione stava avvenendo. A due ore dal termine dell'infusione, il processo è terminato con l'indurimento della resina su tutto lo stampo. Una volta aperto il sacco si sono però evidenziati dei difetti in corrispondenza del bordo superiore a prua nella zona in cui sono state riscontrate le perdite di vuoto durante l'infusione. La carena doveva pesare circa 25 kg poiché formata da un pannello sandwich di densità superficiale pari a $3,5 \text{ kg/m}^2$ per una superficie di 7 m^2 sommato alla scassa integrata formata da un sandwich di $2,5 \text{ kg/m}^2$ avente una superficie di $0,3 \text{ m}^2$. Nel calcolo non sono stati considerati le sovrapposizioni tra i vari tessuti stesi e non sono stati considerati i pesi dei rinforzi. Il peso reale è di 27,5 kg leggermente superiore alle attese.

4.3 Realizzazione coperta

4.3.1 Costruzione stampo coperta

Diversamente dallo scafo, la coperta è stata interamente ridisegnata come spiegato nel capitolo dedicato alla progettazione. Per realizzare lo stampo si è pensato di ricorrere ad un metodo tradizionale utilizzato nella maggior parte dei cantieri navali. Il metodo consiste nel realizzare una struttura in legno, multistrato di pioppo da 15 mm e da 4 mm, con un procedimento simile al secondo stampo della carena.

La struttura prevede delle dime realizzate tagliando il pannello di legno da 15 mm seguendo dei cartamodelli stampati da CAD e dei longheroni sempre con lo stesso legno. Longheroni e dime sono stati disegnati con degli incastri così da facilitarne l'assemblaggio. La distanza tra le seste è vincolata al pannello che rivestirà lo stampo. Il rivestimento dovrà essere rigido per evitare di flettere una volta applicato il vuoto. Per questo motivo si impone una distanza di circa 250 mm a fronte di un pannello di 4 mm. Il pannello avrà una certa inclinazione rispetto alla parte superiore delle seste che sarà circa parallela al basamento. Perciò non vi sarà un contatto perfetto tra il rivestimento e le seste ma sarà solamente in un punto. Fondamentale che la sesta venga disposta internamente al pannello, in quest'ottica la distanza non sarà costante ma varierà in funzione dell'inclinazione del piano. In Figura 4.13 viene esplicitato quanto appena descritto.

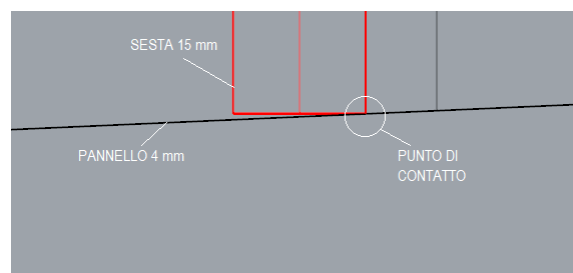


Figura 4.13 Dettaglio dei punti di contatto tra seste e pannelli.

In questo modo vengono disposte tutte le seste per poi creare degli incastri con i longheroni. Gli incastri sono dei semplici intagli in entrambi i componenti da unire, larghi tanto quanto lo spessore del multistrato quindi 15 mm e alti 50 mm.

Lo stampo terminato viene riportato in Figura 4.14b.

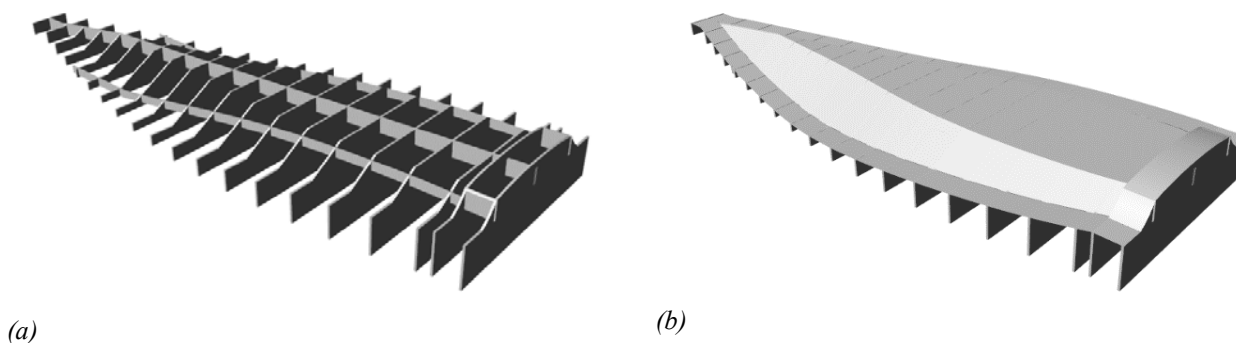


Figura 4.14 (a) rendering stampo con seste e longheroni; (b) rendering dello stampo completo di pannelli.

Le seste e i longheroni dello stampo sono stati tagliati a mano seguendo dei cartamodelli stampati con un plotter. Una volta tagliati le sagome di compensato, sono state unite appoggiando i longheroni sulle seste in corrispondenza degli incastri. Sugli incastri si è applicata della colla vinilica.



Figura 4.15 Realizzazione dello stampo della coperta con seste e longheroni.

Una volta fissata la struttura con della colla vinilica è stata tagliata e fissata la superficie con il pannello flessibile da 4 mm. In questo caso il multistrato è realizzato tenendo conto dell'orientazione delle fibre. In questo modo è possibile favorire la flessione del pannello in una direzione piuttosto dell'altra. Per fissare il pannello sulla struttura si è usata anche in questo caso la colla vinilica per legno, mantenendo in posizione il pannello con delle graffette, successivamente rimosse.



Figura 4.16 Incollaggio e stuccatura dei pannelli superficiali dello stampo.

Terminato l'incollaggio della superficie dello stampo, è stato necessario rifinire i vari bordi e gli smussi. Nelle zone con raggi di curvatura più severi si è aggiunto uno stucco formato da resina epossidica e microsferiche cave di vetro. In questo modo è possibile aumentare il raggio di raccordo così da favorire la stesura delle fibre ed evitando accumuli di resina durante l'infusione.

4.3.2 Preparazione stampo della coperta

Per rendere impermeabile all'aria lo stampo sono stati applicati tre strati di resina epossidica ed è stato fatto un test del vuoto.

In un primo momento il sacco non ha soddisfatto i requisiti di vuoto del produttore di resina perciò si è optato per rivestire lo stampo con un layer di vetro biassiale di bassa grammatura laminandolo a mano utilizzando resina epossidica a disposizione in magazzino. Quindi è stato aggiunto un secondo strato di sola resina che poi è stato levigato per garantire una superficie sufficientemente liscia. L'intervento si è reso necessario dal momento che non sapendo le zone dal quale proveniva la perdita si è preferito intervenire omogeneamente su tutto lo stampo.

Si è quindi passati ad una seconda verifica del vuoto, questa volta riuscendo a soddisfare i requisiti del produttore di resina.

Nel caso della coperta, la preparazione è stata molto meno esigente avendo effettuato un'attenta verifica di impermeabilità all'aria e osservando che usando il PVA la richiesta di distaccante era minore. Lo stampo è stato coperto con 2 strati di PVA e 2 strati di cera.

4.3.3 Stesura pelli coperta

Le pelli della coperta risultano essere in numero inferiori e hanno direzioni diverse per permettere alla struttura finale della barca di resistere anche a torsione.

Anche in questo caso prima di disporre le fibre è stato preparato il *core* sagomando, forando e stuccando i vari pannelli di PET. Analogamente allo scafo sono anche stati inseriti dei rinforzi di fibra localizzati atti ad aumentare la rigidità dello scafo nella zona sottostante tra sartie e albero utilizzando delle striscie di tessuto unidirezionale largo 200 mm.



Figura 4.17 Taglio e sagomatura del PET espanso della coperta.

L'ordine di stesura delle pelli è il seguente:

Ordine dei ply	Tipo di rinforzo	Quantità ply	Grammatura rinforzi	Direzione
			$\left[\frac{g}{m^2}\right]$	$[^\circ]$
4	BIAX200	1	200	0
3	FLAX110	1	110	45
2	FLAX110	1	110	-45
1	UD300	1	300	60
0	PET80	1	800	-
-1	UD300	1	300	-60
-2	FLAX110	1	110	-45
-3	FLAX110	1	110	45

Tabella 4.4 Piano di laminazione della coperta



Figura 4.18 *Posizionamento delle fibre e dei consumabili.*

Terminata la stesura dei tessuti di lino e dei tessuti ausiliari, si sono posizionate le canaline per la diffusione della resina. Anche in questo caso per evitare spessori elevati ed accumuli di resina localizzati, si sono minimizzati i prodotti ausiliari utilizzando la sola spirulina posizionata sul *flow-mesh*. Posizionate le torrette di ingresso ed uscita della resina, si è chiuso il sacco procedendo all'ultimo test del vuoto.



Figura 4.19 *Chiusura del sacco della coperta.*

4.3.4 *Infusione coperta*

Il processo di infusione della coperta è stato terminato in 40 minuti senza registrare nessuna perdita del sacco. Come per lo scafo sono state aperte per prime le mandate centrali per poi passare a quelle più esterne seguendo il flusso della resina.

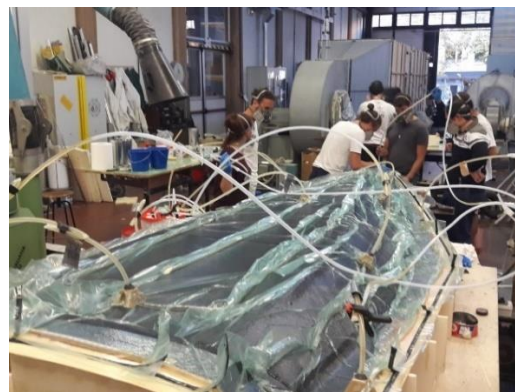


Figura 4.20 *Infusione della coperta.*

Dopo 24 ore, si è aperto il sacco e rimossa la coperta dallo stampo. Il prodotto finale presenta delle imperfezioni nelle zone con raggi di curvatura più severi dove la resina fatica a scorrere omogeneamente. A poppa invece si è registrato un accumulo di resina anomalo dovuto probabilmente dal sacco che non era perfettamente aderente alle fibre. Ciò dipende dal posizionamento del sacco che se non viene opportunamente distribuito non riesce a seguire il profilo corretto.



Figura 4.21 *Demoulding della coperta.*

I Difetti verranno riparati aggiungendo localmente della resina Elium 351 SO appositamente formulata per le riparazioni. Questa resina tricomponente può catalizzare a temperatura ambiente senza l'ausilio del vuoto ed è adatta alle operazioni di laminazione manuale. La coperta è stata pesata registrando un peso di 20 kg a fronte di un peso teorico di 16,5 kg. L'eccesso di 3,5 kg va rivisto considerando l'accumulo di resina anomalo registrato a poppa della coperta e lo sfrido ancora da rimuovere. Vanno considerati anche i rinforzi aggiunti localmente che hanno sicuramente inciso sul peso finale della coperta. Rimane comunque un peso superiore al previsto.

4.4 Realizzazione strutture interne

Una delle differenze rispetto alla costruzione di Ate, risiede nella costruzione delle strutture interne. Abbandonata l'idea di realizzare dei rinforzi in compensato marino, si è scelto di virare verso una soluzione più rigida, meno sensibile all'acqua e più sicura nell'incollaggio.

Per questo motivo si è scelto di passare ai materiali compositi come i sandwich. In fase di progettazione di sono studiati gli spessori necessari per rimpiazzare i pannelli si okoumè con il sandwich riciclabile ricavando il piano di laminazione essenziale riportato in Tabella 3.7.

Per semplificare la realizzazione delle strutture interne si è scelto di infondere direttamente l'anima in PET avvolta da due stuoie non tessute di vetro bidirezionale orientato a $\pm 45^\circ$.

L'incollaggio delle strutture interne viene eseguito utilizzando un adesivo strutturale fornito da Bostik a base dello stesso monomero della resina Elium, ovvero PMMA. In questo modo si creeranno dei legami molto forti tra le catene dell'adesivo e la matrice poichè altamente compatibili. Le paratie e il longherone non vengono attaccati nello stesso modo allo scafo e alla coperta. In un primo momento vengono posizionate le paratie sullo scafo utilizzando della colla a caldo per tenerle in posizione, vagliata la correttezza della loro posizione si procede all'applicazione dell'adesivo formando due cordoli di resina alla base del pannello. Una volta asciugato l'adesivo acrilico, iniziano le operazioni di verifica di accoppiamento. La coperta viene posizionata sulla carena per misurare il gioco tra la superficie superiore delle paratie e la parte interna della coperta. Nella pratica si utilizza della plastilina. Il posizionamento delle strutture interne riveste un ruolo decisamente delicato e molto laborioso poichè, non conoscendo a priori la superficie interna esatta dello scafo, vanno rifilate a mano.

4.4.1 Taglio PET

Per limitare le operazioni di rifinitura, sono state ricavate dal CAD le sezioni delle paratie. Attraverso l'uso di un plotter si sono stampate le maschere per ritagliare su misura la schiuma di PET, successivamente la schiuma è stata forata per permettere il passaggio della resina dalla parte superiore a quella inferiore.

4.4.2 Infusione strutture interne

Si è preparato un sacco tubolare che ha rivestito completamente i pezzi da stampare. Le sagome in PET sono state coperte con il vetro e infine con i relativi materiali ausiliari come spiegato in precedenza. Una volta chiuso il sacco si è completato il processo infondendo la resina.



(a)



(b)

Figura 4.22 (a) infusione dei longheroni; (b) risultato dell'infusione prima di sfridare.

Una volta terminata l'infusione le paratie sono state sfridate e levigate preparando la superficie che andrà ad essere incollata sullo scafo.

Prima di procedere all'incollaggio si sono verificati i pesi finali dei pannelli realizzati. I provini realizzati hanno indicato un peso teorico delle paratie attorno ai $2,5 \text{ kg/m}^2$. Avendo una superficie di $2,70 \text{ m}^2$, il peso stimato è di $6,5 \text{ kg}$. Al termine delle operazioni di sfido le paratie sono arrivate a pesare $6,7 \text{ kg}$. Il peso può ritenersi rispettato considerando che i pesi teorici sono stati ricavati da provini di piccole dimensioni.

4.5 Conclusioni

La realizzazione dello scafo si è rivelata molto più complessa del previsto poiché il processo richiede un grado di vuoto costante per almeno tre ore, nonostante la resina acrilica ramifichi in tempi molto brevi rispetto alla resina epossidica. Su grandi dimensioni è molto più difficile garantire tale vuoto e questo dipende fortemente dalla qualità dello stampo. La realizzazione della coperta e delle strutture interne soddisfa le attese raggiungendo un peso di poco superiore rispetto a quello previsto. Nonostante alcuni difetti estetici dovuti all'inesperienza tecnica del team, si è dimostrato che è possibile realizzare uno scafo riciclabile utilizzando fibre naturali unite a una matrice e un'anima termoplastiche senza compromettere le prestazioni fisiche e meccaniche dell'imbarcazione.

Conclusioni

L'obiettivo di questa tesi era riuscire a progettare e quindi realizzare un'imbarcazione da regata con materiali riciclabili che potesse competere con le barche esistenti. Per poter riciclare un oggetto complesso come una imbarcazione, bisogna intervenire preventivamente nella fase preliminare del progetto proponendo dei materiali che possano essere recuperati a fine vita. Le barche precedenti del team sono state realizzate utilizzando fibre di lino, resina epossidica e legno di balsa. Il lino è già una buona soluzione perché oltre ad essere sostenibile e biodegradabile, presenta proprietà meccaniche paragonabili alle fibre di vetro. La resina epossidica è stata sostituita con una resina termoplastica acrilica (polimetilmetacrilato, PMMA) prodotta da Arkema, una valida sostituta della resina epossidica che consentirebbe di realizzare un composito riciclabile. Il riciclo potrebbe avvenire non solo attraverso la macinazione quindi riprocessato con l'iniezione in stampo o l'estrusione, bensì sarebbe possibile separare le fibre dalla matrice recuperando la maggior parte dei costituenti del composito. Nonostante la balsa si presenti come un materiale rinnovabile e sostenibile, la gestione di questo legno a fine vita non è banale. La balsa infatti è difficile da smaltire per incenerimento data la sua resistenza al fuoco. La balsa inoltre assorbe alte percentuali di resina innalzando il peso finale della barca. Per questo motivo si è scelto di optare per un'anima più leggera che non richieda particolari trattamenti e che possa essere riciclato. La scelta è ricaduta sul PET espanso.

La caratterizzazione ha dimostrato che la resina acrilica può essere considerata come una valida alternativa alla resina epossidica. Nelle prove a trazione entrambe le matrici rinforzate con le fibre di lino hanno raggiunto un modulo elastico di 17 GPa e la loro resistenza a trazione corrisponde a 240 MPa nel primo caso e 230 MPa nel secondo. A flessione la resina epossidica dimostra di avere proprietà superiori di rigidità ma con allungamenti mediamente più bassi. Ciò dimostra quanto atteso, il PMMA infatti deforma molto di più dell'epossidica richiedendo più energia prima di arrivare a rottura. Questo rappresenta indirettamente un indice di una resistenza ad impatto superiore in quanto la tenacità è maggiore. Indice di una resistenza ad impatto superiore.

Nei test a flessione dei sandwich si è visto che, considerando le proprietà specifiche dei materiali, il pannello realizzato con fibre di lino, PMMA e schiuma di PET, possiede una rigidità molto prossima alla rigidità ottenuta con il pannello di fibre di lino, epossidica e

balsa. Si osserva che il sandwich realizzato con fibre di lino, resina acrilica e PET è un valido concorrente del composito fibre di lino, resina epossidica e balsa.

Attraverso il pre-dimensionamento secondo il regolamento A.B.S. è stato possibile individuare un piano di laminazione di base, verificato poi agli elementi finiti. Si sono indagate le resistenze alla massima pressione d'onda sulla carena e al massimo carico concentrato sulla coperta soddisfacendo in entrambi i casi sia la massima deformazione ammessa e il criterio di rottura di Tsai-Wu.

La realizzazione dello scafo si è rivelata molto più complessa del previsto poiché su grandi dimensioni è molto più difficile garantire un grado di vuoto costante e ciò dipende fortemente dalla qualità dello stampo. La realizzazione dello scafo ha soddisfatto le attese raggiungendo un peso di poco superiore rispetto a quello previsto. Solo nel caso della coperta si è registrato un eccesso di resina di circa il 12 %. Nonostante alcuni difetti estetici dovuti dalle lavorazioni, si è dimostrato che è possibile realizzare uno scafo riciclabile utilizzando fibre naturali unite a una matrice e un'anima termoplastiche senza compromettere le prestazioni fisiche e meccaniche.

Utilizzando la tecnica dell'infusione si producono elevati volumi di scarti, soprattutto di resina che si infiltra nei materiali ausiliari e viene gettata una volta terminato il processo. A seconda delle dimensioni dell'oggetto prodotto, la resina scartata oscilla tra il 20 e il 30% in massa della resina totale utilizzata. Il recupero di questa resina potrebbe sicuramente abbassare i costi di produzione che generalmente sono alti.

In futuro sarebbe interessante sviluppare un processo di recupero dei materiali a fine vita completo che abbinasse il metodo di separazione più adeguato alle rispettive tecniche di riciclo dei singoli materiali estendendolo ad una realtà industriale.

Bibliografia

1. J. R. Duflou, J. De Moor, I. Verpoest, & W. Dewulf, Environmental impact analysis of composite use in car manufacturing. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, **58** (2009) 9–12. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2009.03.077>.
2. G. Oliveux, L. O. Dandy, & G. A. Leeke, Current status of recycling of fibre reinforced polymers: Review of technologies, reuse and resulting properties. *Progress in Materials Science*, **72** (2015) 61–99. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2015.01.004>.
3. J. Rybicka, A. Tiwari, & G. A. Leeke, Technology readiness level assessment of composites recycling technologies. *Journal of Cleaner Production*, **112** (2016) 1001–1012. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.08.104>.
4. G. Cicala, E. Pergolizzi, F. Piscopo, D. Carbone, & G. Recca, Hybrid composites manufactured by resin infusion with a fully recyclable bioepoxy resin. *Composites Part B: Engineering*, **132** (2018) 69–76. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.08.015>.
5. F. P. La Mantia & M. Morreale, Green composites: A brief review. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, **42** (2011) 579–588. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2011.01.017>.
6. N. Jauhari, R. Mishra, & H. Thakur, Natural Fibre Reinforced Composite Laminates - A Review. *Materials Today: Proceedings*, **2** (2015) 2868–2877. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2015.07.304>.
7. S. V. Joshi, L. T. Drzal, A. K. Mohanty, & S. Arora, Are natural fiber composites environmentally superior to glass fiber reinforced composites? *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, **35** (2004) 371–376. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2003.09.016>.
8. Elium resins for composites. (n.d.). <https://www.arkema.com/en/products/product-finder/range-viewer/Elium-resins-for-composites/>.
9. M. F. Ashby, *Material Selection in Mechanical Design*, fourth edi (elsevier, 2011).
10. H. Bos, *The potential of flax fibres as reinforcement for composite materials. PhD Thesis* (2004). <https://doi.org/10.6100/IR575360>.
11. S. Castegnaro, C. Gomiero, C. Battisti, M. Poli, M. Basile, P. Barucco, U. Pizzarello, M. Quaresimin, & A. Lazzaretto, A bio-composite racing sailboat: Materials selection, design, manufacturing and sailing. *Ocean Engineering*, **133** (2017) 142–150. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2017.01.017>.
12. M. Basile, sviluppo e realizzazione di una barca da regata in composito naturale. (2012).
13. A. Marino', Costruzioni navali in composito. (2016).
14. P.K. Mallick, *Fiber-Reinforced Composites: Materials, Manufacturing and Design*, Edition, T (2007).
15. D. Hull, *An introduction to composite materials*, Cambridge (Cambridge University

- Press, 1985).
16. J. Bunsell, A., Renard, *Fundamentals of Fibre Reinforced Composite Materials* (Institute of Physics Publishing Bristol and Philadelphia, 2005).
 17. M. E. Otheguy, A. G. Gibson, E. Findon, R. M. Cripps, A. O. Mendoza, & M. T. A. Castro, Recycling of end-of-life thermoplastic composite boats. *Plastics, Rubber and Composites*, **38** (2009) 406–411. <https://doi.org/10.1179/146580109X12540995045642>.
 18. A. Arbelaiz, B. Ferna'ndez, G. Cantero, R. Llano-Ponte, A. Valea, & I. Mondragon, Mechanical properties of flax fibre/polypropylene composites. Influence of fibre/matrix modification and glass fibre hybridization. *Experimental and Clinical Cardiology, Composites* (2005) 1637–1644. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2005.03.021>.
 19. M. Murariu & P. Dubois, PLA composites: From production to properties. *Advanced Drug Delivery Reviews*, **107** (2016) 17–46. <https://doi.org/10.1016/j.addr.2016.04.003>.
 20. A. Couture, G. Lebrun, & L. Laperrière, Mechanical properties of polylactic acid (PLA) composites reinforced with unidirectional flax and flax-paper layers. *Composite Structures*, **154** (2016) 286–295. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.07.069>.
 21. A boat made from recyclable thermoplastic composite. www.jeccomposites.com, (2016). <http://www.jeccomposites.com/knowledge/international-composites-news/boat-made-recyclable-thermoplastic-composite>.
 22. M. Haggui, A. El Mahi, Z. Jendli, A. Akrou, & M. Haddar, Damage analysis of flax fibre/epoxy composite under static and fatigue testing. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, (2018) 681–691. https://doi.org/10.1007/978-3-319-66697-6_66.
 23. A. Monti, A. El Mahi, Z. Jendli, & L. Guillaumat, Mechanical behaviour and damage mechanisms analysis of a flax-fibre reinforced composite by acoustic emission. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, **90** (2016) 100–110. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2016.07.002>.
 24. Diab, DIAB guide to core and sandwich. (2016) 48.
 25. No Title. (n.d.). <https://www.celcomponents.com>.
 26. M. Roux, N. Egué Mann, C. Dransfeld, F. Dé, R. Thié Baud, & D. Perreux, Thermoplastic carbon fibre-reinforced polymer recycling with electrodynamical fragmentation: From cradle to cradle. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, **30** (2017) 381–403. <https://doi.org/10.1177/0892705715599431>.
 27. D. S. Achilias, Chemical recycling of poly(methyl methacrylate) by pyrolysis. Potential use of the liquid fraction as a raw material for the reproduction of the polymer. *European Polymer Journal*, **43** (2007) 2564–2575. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2007.02.044>.
 28. G. Pizzato, Studio del processo degradativo di un materiale biocomposito in ambiente aggressivo. (2013) 157.
 29. 1001 Vela Cup, *Regolamento di Classe R3* (2017).
 30. F. Fossati, *Teoria dello yacht a vela* (Polipress, 2007).
 31. L. Larsson & R. E. Eliasson, *Principles of yacht design*, 3 ed (McGraw-Hill, 2007).

32. American Bureau of Shipping, Guide for building and classing offshore racing yachts. *New York*, (1994).