

**UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA**

**UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA
Dipartimento di Ingegneria Industriale DII**

CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA ENERGETICA

TESI DI LAUREA MAGISTRALE

**Analisi di Life Cycle Assessment di
un'imbarcazione da regata in materiale
composito di origine riciclata e fibre di lino
pre-impregnate**

Relatore: Prof.ssa Anna Stoppato

Correlatore: Prof. Andrea Lazzaretto

Laureando: Filippo Andreani

Matricola 1227116

Anno Accademico 2022/2023

Sommario

La crescente attenzione verso le tematiche di sostenibilità e impatto ambientale ha recentemente spinto la Commissione europea a coinvolgere anche il settore del trasporto marittimo nell'obiettivo di raggiungere i target di riduzione delle emissioni di gas serra entro il 2050. Il presente lavoro di tesi ha l'obiettivo di definire le prestazioni ambientali del ciclo di vita dell'ultimo prototipo d'imbarcazione da competizione velica del gruppo didattico *Metis Vela UniPD*. L'applicazione del metodo *Life Cycle Assessment* (LCA) consente di stimare le categorie d'impatto ambientale coinvolte in tutti i processi dalla nascita allo smaltimento del prodotto in esame. La finalità del lavoro è quella di introdurre un approccio di analisi ormai consolidato e standardizzato a livello internazionale anche all'interno del settore nautico, ancora poco sensibile alle tematiche di *eco-design*. I risultati saranno analizzati al fine di verificare il contributo di tutti i processi coinvolti e fornire possibili miglioramenti nelle varie fasi del sistema complessivo, costituendo una fonte di feedback utile per il team universitario responsabile delle fasi di progettazione, costruzione ed utilizzo. Questa analisi rappresenta uno strumento aggiuntivo per esaminare in modo rigoroso le possibili scelte di ottimizzazione in relazione agli impatti ambientali, al consumo di energia, ai materiali e alle emissioni, aspetti sempre più centrali in tutti i settori industriali.

Indice

1	Nautica e Sostenibilità	1
1.1	Eco-design	3
1.2	Processi di smaltimento	6
1.3	Materiali compositi selezionati dal team Métis	9
1.3.1	PET	10
1.3.2	Lamine di alluminio	11
1.3.3	Lino pre-impregnato	11
1.3.4	Fine vita - Materiali compositi polimerici con fibre di rinforzo naturali (NFRPCs)	13
2	Prototipo in esame: Alétheia	15
2.1	Regolamento di classe	15
2.2	Caratteristiche Tecniche	17
2.2.1	Scafo	19
2.2.2	Strutture interne	20
2.2.3	Coperta	21
2.3	Scenario di fine vita	23
3	Il metodo LCA	25
3.1	Storia dell'analisi LCA	25
3.2	Considerazioni Generali	27
3.2.1	SimaPro e archivio Ecoinvent	28
3.3	Standard ISO 14040:2006	29
3.3.1	Principi introdotti dallo standard	29
3.3.2	Definizioni	30
3.3.3	Fase 1: Definizione dell'obiettivo e scopo	31
3.3.4	Fase 2: Analisi d'inventario (LCI)	34
3.3.5	Fase 3: Valutazione dell'impatto ambientale (LCIA)	36
3.3.6	Fase 4: Interpretazione	38

4	Obiettivi e scopo	39
4.1	Obiettivi	39
4.2	Campo di applicazione	40
4.2.1	Funzione e unità funzionale	40
4.2.2	Confini del sistema	41
4.2.3	Qualità dei dati utilizzati	42
4.2.4	Categorie d'impatto e metodo di caratterizzazione	45
5	Analisi d'inventario (LCI)	49
5.1	Analisi dei flussi tra le unità di processo	49
5.1.1	Master	50
5.1.2	Stampo	53
5.1.3	Scafo	56
5.1.4	Strutture interne	59
5.1.5	Coperta	61
5.2	Verifica del computo dei materiali <i>gate to gate</i>	63
5.3	Trasporto	63
6	Valutazione dell'impatto ambientale (LCIA)	65
6.1	Impatto della fase di pre-produzione	65
6.2	Impatto del ciclo produttivo	69
6.3	Impatto della fase di manutenzione e di smaltimento	72
6.4	Impatto dell'intero ciclo di vita	76
7	Interpretazione dei Risultati	81
7.1	Interpretazione degli impatti dal ciclo dei materiali	82
7.2	Interpretazione dei risultati di Trasporto	83
7.3	Interpretazione dei risultati di fine vita	84
7.4	Soluzioni di eco-design	84
7.5	Limitazioni e raccomandazioni	86
I	Piano di laminazione dello scafo	93

Introduzione

Gli organi internazionali (IMO, IPCC, ONU) e diversi Paesi nel mondo si stanno impegnando ad introdurre misure volte a mitigare gli impatti ambientali di origine antropica. La stessa Commissione europea, attraverso l'ultimo accordo (Aprile 2023, [5]) raggiunto sul cosiddetto pacchetto di riforme *Fit for 55* al 2030, ha introdotto nuove regolamentazioni che coinvolgono per la prima volta anche il settore marittimo all'interno del piano europeo a lungo termine *Green Deal* per la neutralità carbonica al 2050. Il cambiamento di paradigma per un sistema globalmente più sostenibile ed efficiente risulta complesso e affinché sia praticabile richiede azioni di analisi, di pianificazione e di sostegno da parte dei governi.

Lo stesso tessuto industriale ha una responsabilità diretta sulla transizione ecologica. Ogni settore industriale è ormai interessato dalle pressioni innescate dalle politiche di riduzione dell'impatto ambientale; nondimeno il settore marittimo si trova di fronte al momento di sua più grande trasformazione.

L'opportunità di adottare nuove misure che rispettino una *blue-sustainability* ([1]) all'interno di un contesto specializzato come quello nautico rappresenta l'ulteriore sfida da cogliere. Il contributo che può provenire da questa fetta di mercato è ampio: dall'adozione di sistemi di propulsione più efficienti, l'impiego di biocombustibili, l'attenzione alle modalità di smaltimento dei prodotti e dei loro componenti, fino a ciò che riguarda la scelta delle materie prime, la loro provenienza e le modalità di trasporto. Uno dei punti cardine che interessa la *blueprint* del mondo nautico riguarda l'inclusione delle responsabilità ambientali all'interno delle fasi iniziali di progettazione di un'imbarcazione. Scelte progettuali che consentano effettivamente l'adozione di materiali meno impattanti per l'ambiente, come ad esempio scenari di riciclo a fine vita, di riutilizzo e di riparazione, costituiscono contributi importanti per le prestazioni ecologiche di un certo prodotto o servizio.

La stessa Unione Europea si sta muovendo verso l'integrazione di un modello di economia circolare. Sono stati proposti e adottati diversi piani strategici e regolamentazioni. L'elaborazione di specifiche di *eco-design* per prodotti più sostenibili ([EU - proposta prog ecocompatibile]) e l'etichettatura energetica sono esempi di politiche

volte ad aggiornare la strategia industriale nel panorama comunitario. La ricerca di prestazioni ambientali intese come efficienza energetica, riduzione dell'estrazione di materie prime e controllo delle emissioni sono gli obiettivi principali che si vogliono includere nel tessuto produttivo europeo.

I concetti di *Economia Circolare* e di sensibilità climatica sono diventati argomenti di attualità politica e sociale. Tuttavia, ciò che ancora risulta poco evidente è il metodo attraverso cui si discretizzano le scelte di contrasto e prevenzione degli effetti antropici. Le Nazioni Unite (NU) attraverso il programma per l'ambiente (*UNEP*) rappresentano la principale autorità globale in materia di lotta al cambiamento climatico. Nel 2015 è stato pubblicato un piano d'azione con scadenza al 2030 basato sul raggiungimento di 17 obiettivi primari (*SDGs*) per l'eradicazione della povertà e lo sviluppo sostenibile. Si tratta di un'agenda definita con l'obiettivo di stimolare le nazioni e la popolazione mondiale ad intraprendere azioni per favorire la transizione ecologica e migliorare la qualità di vita nel rispetto delle generazioni future. L'agenda riconosce che il progresso e il benessere della società si fondano proprio sullo sviluppo sostenibile. L'approccio che ha determinato la pianificazione internazionale in materia, così come quella Europea, è il concetto di ciclo di vita (*Life Cycle Thinking*). Il metodo di analisi del ciclo di vita (LCA) di un prodotto (o di un servizio) ha ottenuto grande sviluppo e rilevanza negli ultimi decenni e risulta una tecnica considerata valida per identificare i punti di maggior concentrazione d'impatto ambientale di un generico sistema. L'analisi LCA consente di ricavare una comprensione olistica di un sistema globale sviluppata da un accurato studio dei flussi e delle attività interne che lo interessano. In tal modo si possono esprimere strategie solide e soluzioni più affidabili nella riduzione delle emissioni, del consumo delle risorse e nel miglioramento dell'efficienza complessiva dal punto di vista energetico-ambientale, mirando ad una conoscenza dettagliata ed estensiva dei sistemi. Il seguente elaborato di tesi è un esempio applicativo della tecnica d'analisi LCA, che punta ad evidenziare come tale strumento sia utile alla definizione di uno spettro d'azione chiaro, obiettivo e trasparente per la riduzione degli impatti ambientali del sistema studiato, nonché ad individuarne i punti critici che maggiormente gravano sulle performance di sostenibilità.

L'*International Organization for Standardization* ha uniformato il metodo LCA, favorendone così la diffusione. Gli standard internazionali a cui attualmente ci si riferisce sono la *ISO 14040* e la *ISO 14044* del 2006. Il primo tentativo di studio LCA risale al 1969 e, grazie allo sviluppo progressivo nel corso dei decenni e alla sua standardizzazione, attualmente ogni compagnia può adottare questa tecnica d'indagine in diverse applicazioni e settori. L'approccio LCT permette infatti di introdurre scelte che interessano sia l'ingegneria che la gestione di un ciclo di vita di un prodotto mediante soluzioni supportate da dati quantitativi forniti dal metodo

LCA ([2]). Inoltre, promuove modelli produttivi in cui si dichiarino informazioni trasparenti attraverso apposite certificazioni ambientali e dove l'adozione di tecnologie maggiormente sostenibili risultino valorizzate.

Il gruppo didattico *Metis Vela UniPD* dell'Università di Padova, nel contesto della competizione universitaria europea *1001Vela Cup*, si è proposto di sviluppare performance ambientali in ambito di progettazione e costruzione di prototipi da competizione velica. Pur trattandosi di prototipi unici, ai fini competitivi e di partecipazione al trofeo, si è reso necessario regolamentare la cosiddetta *stazza* a cui fa riferimento la tipologia di barca, fissando alcuni parametri come vincoli. In particolare, si è richiesto di rispettare il regolamento afferente alla classe *R3* fornito dagli organizzatori ([17]). Da ciò è nato l'interesse verso la determinazione degli impatti e delle azioni possibili per incrementare le performance ambientali, che vengono considerate una prerogativa essenziale dallo stesso regolamento di classe. Il presente lavoro di tesi affronterà nei capitoli successivi l'analisi del ciclo di vita (LCA) dell'ultimo prototipo – *Alétheia* – del gruppo universitario *Metis Vela UniPD*. A tale scopo, lo studio si pone l'obiettivo di fornire una valutazione quantitativa e trasparente dei potenziali impatti ambientali che interessano tutte le fasi del ciclo di vita dell'imbarcazione. Il software *SimaPro*, sviluppato sulle indicazioni fornite dagli standard *ISO* e arricchito da vasti database riconosciuti dalla comunità scientifica, sarà impiegato come strumento accreditato nell'esecuzione dello studio LCA.

Il primo obiettivo del presente elaborato è quello di fornire una descrizione affidabile e quantitativa dello stato attuale delle performance ambientali che il team è stato in grado di ottenere con il prototipo *Alétheia*. Dall'analisi dei risultati sarà possibile verificare le fasi che più incidono sulle prestazioni del ciclo di vita dal punto di vista ambientale, le alternative che possono essere prese in considerazione, i limiti riscontrati nello studio, nonché definire e ordinare su base gerarchica le opzioni progettuali da tenere in considerazione nell'attività preliminare di progettazione che meglio contribuiscono ad un *eco-design*. Il valore aggiunto dall'elaborato è fornito dalla possibilità di effettuare lo studio LCA sul ciclo di vita del primo prototipo velico al mondo realizzato in fibre pre-impregnate di lino.

Viene proposto un metodo d'analisi che incrementi il grado di conoscenza di un *sistema prodotto* in un settore, come quello nautico, altamente specializzato e ancora poco recettivo al *sustainable design*, anche considerando la scarsità di documentazione in letteratura, e che possa contribuire in modo significativo alla riduzione della propria parte di emissioni di CO_2 . Si vuole evidenziare quanto performance e responsabilità ambientali possano coesistere, anche in ambiti competitivi, in modo da migliorare l'impatto ambientale di un sistema di produzione.

Il metodo LCA fornisce un'indicazione valida sul coinvolgimento di questa industria in diverse filiere, interessate dai flussi di materia, di energia e rilasci in ambiente, che la

riguardano. La stima così fornita dallo studio definirà l'entità dell'impatto ambientale potenziale su diverse categorie, da cui si baseranno decisioni più solide che possono rappresentare un'opportunità, anche per le stesse aziende, verso il raggiungimento di un ottimo sociale.

Si riportano di seguito le sintesi dei capitoli trattati nella tesi:

- **Capitolo 1 - Nautica e Sostenibilità**
Si inquadra il tema della sostenibilità all'interno del panorama nautico attraverso le indicazioni che riguardano le normative introdotte nel settore, la definizione di progettazione ecocompatibile e le soluzioni tecnologiche che interessano i materiali compositi fortemente presenti in questo settore, le informazioni riguardanti i materiali selezionati dal team Metis per il progetto in esame con una breve revisione della letteratura relativa ai possibili scenari di fine vita;
- **Capitolo 2 - Prototipo in esame: Alétheia**
Si riportano sezioni del regolamento della competizione *1001VELAcup* che interessano l'idea di una progettazione sostenibile, le caratteristiche tecniche dell'imbarcazione in esame e le possibili assunzioni sullo scenario di fine vita dei materiali che la costituiscono;
- **Capitolo 3 - Il metodo LCA**
Si introduce la storia dello sviluppo che ha interessato il metodo LCA, gli standard internazionali che ne definiscono le modalità di applicazione e si presenta la struttura dell'indagine che si andrà a realizzare;
- **Capitolo 4 - Obiettivi e scopo**
Si presenta la prima fase dell'analisi LCA che interessa la definizione degli obiettivi, del sistema prodotto, delle assunzioni considerate e tutte le caratteristiche essenziali da esplicitare al fine di rendere lo studio quanto più conforme alle indicazioni degli standard ISO 14040 e 14044;
- **Capitolo 5 - Analisi d'inventario (LCI)**
Si riporta la fase che coinvolge il processo di acquisizione dati diretti, di allocazione e di utilizzo dei database reperibili mediante il software *SimaPro*, al fine di ottenere informazioni quantitative circa i flussi in ingresso ed uscita interessati dalle attività che costituiscono il ciclo di vita del modello del sistema analizzato;
- **Capitolo 6 - Valutazione dell'impatto ambientale (LCIA)**
Si descrive la terza fase dell'analisi in cui vengono evidenziati i risultati degli

impatti ambientali potenziali ottenuti attraverso il metodo di caratterizzazione scelto e in relazione ai flussi calcolati nella LCI.

- **Capitolo 7 - Interpretazione dei risultati**

Si introduce la fase finale dello studio in cui si riassumono i risultati delle fasi di LCI e di LCIA al fine di estrapolare considerazioni utili per possibili raccomandazioni, anche riguardanti miglioramenti nell'accuratezza della stessa analisi, nonché le scelte possibili e conformi all'obiettivo e allo scopo prefissati;

Al termine dell'elaborato si riporteranno le osservazioni finali riguardanti le criticità delle performance ambientali che caratterizzano il modello analizzato, i suggerimenti da proporre e gli aspetti su cui è richiesta un'ulteriore valutazione.

Capitolo 1

Nautica e Sostenibilità

Gli accordi della Conferenza delle parti di Parigi (COP21) e l'Agenda al 2030 con i 17 obiettivi per lo sviluppo sostenibile (SDGs) fissati dall'incontro delle Nazioni Unite (NU) nel 2015 hanno sancito di fatto il primo passo concreto verso un'azione globale congiunta volta al contrasto al cambiamento climatico e alla salvaguardia degli ecosistemi.

L'*International Maritime Organization* (IMO), istituita nel 1948 ed entrata in vigore nel 1958 ([20]), rappresenta il principale organismo che esamina la governance degli oceani a livello internazionale e regionale, rappresentando il principale responsabile per ciò che concerne l'attuazione degli obiettivi SDGs in relazione all'ambiente marino e al settore marittimo ([1]). La risoluzione del 7 Luglio 2023 ([11]) adottata dalla IMO, oltre a richiamare gli impegni al 2030 delle NU (SDGs) e gli accordi di Parigi (COP21), si propone di individuare gli aggiornamenti della strategia di riduzione delle emissioni dei gas ad effetto serra di cui il settore marittimo è responsabile. Tra i vari principi indicati dalla [11] nel piano d'azione al 2030 e al 2050, si evidenzia la volontà di sviluppare linee guida basate su studi LCA del settore. L'interesse evidenziato dalla IMO riguardo all'approccio LCA si fonda sulla volontà di sostenere a livello globale scelte tecnologiche – con particolare interesse al ciclo di vita dei combustibili – che prevengano una traslazione delle emissioni ad altri settori e che favoriscano effettivamente la riduzione delle emissioni di gas serra ([11]). In Figure 1.1 viene riportato lo schema del programma d'azione per raggiungere gli impegni ambientali al 2050. Nel contesto di attuazione degli accordi climatici introdotti dai diversi organi responsabili, il settore marittimo rappresenta un'opportunità importante di riduzione degli impatti ambientali ([23, Cap. 2]). La Commissione europea, nel marzo del 2023, ha dichiarato il raggiungimento dell'accordo tra Parlamento e Consiglio europeo circa la decisione di coinvolgere il settore del trasporto marittimo negli obiettivi indicati dal *Green Deal* ([5]). Ciò testimo-

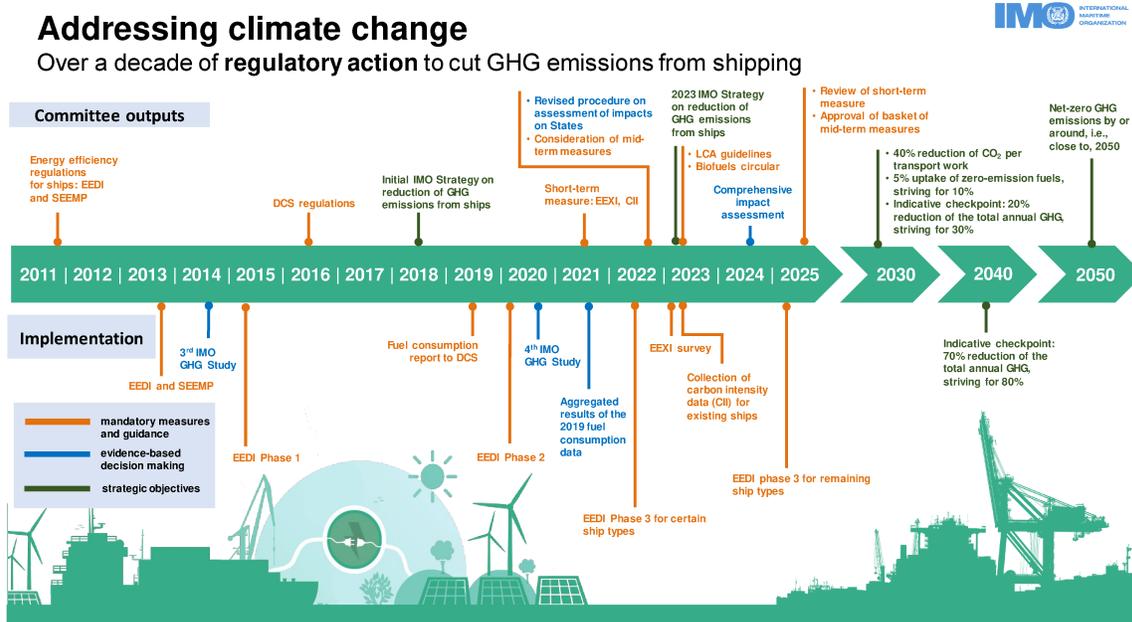


Figura 1.1: Programma degli interventi previsti da IMO fino al 2050 ([11]).

nia il potenziale della filiera alla cosiddetta *blueprint* per raggiungere la neutralità carbonica al 2050. Infatti, una *blue economy* sostenibile dipende dalla ricerca di un bilanciamento tra le azioni volte alla tutela ambientale e il supporto economico. Come evidenziato in [1], il raggiungimento di tale equilibrio risulta fondamentale al fine di raggiungere condizioni ambientali, economiche e sociali stabili e armonizzate.

Il ciclo di vita di un'imbarcazione coinvolge diverse attività e un'intera *supply chain* su cui è possibile attuare delle analisi e delle scelte sostenibili efficienti. A tale scopo si riconosce la necessità di agire nel comparto industriale per introdurre una progettazione ecocompatibile attraverso lo studio e l'elaborazione di specifiche basate su aspetti ambientali e di circolarità. Un tentativo di miglioramento del mercato interno e di riduzione dell'impatto di un ciclo di vita negativo dei suoi prodotti appare nella proposta europea come tentativo di elaborazione di un regolamento che definisca e descriva le specifiche di progettazione ecocompatibili dei prodotti sostenibili ([8]).

Appare evidente come il metodo LCA applicato a diversi contesti possa individuare scelte e strategie solide per raggiungere gli obiettivi di economia circolare e sostenibilità di un intero settore, come per un generico prodotto o servizio.

1.1 Eco-design

Il trasporto marittimo è considerato tra i più efficienti se si considera l'energia utilizzata per miglio nautico percorso e peso delle merci o persone trasportate ([1, p. 30]). Tuttavia, come risultato delle crescenti pressioni normative introdotte nel settore, consumatori e investitori hanno maturato una progressiva sensibilità verso tematiche di salvaguardia ambientale anche all'interno dell'industria nautica. Gli stessi clienti del settore marittimo stanno assumendo un comportamento maggiormente consapevole verso i reali costi ambientali sul medio e lungo periodo. Pertanto, sta diventando sempre più evidente la necessità d'internalizzare tutti i costi risultanti, ad esempio, dalle emissioni di anidride carbonica proveniente dal commercio marittimo globale, dall'impatto ambientale delle attuali e future infrastrutture marittime (canali, porti, ecc..) per accogliere e costruire nuove tipologie d'imbarcazione.

L'*eco-design*, emerso a fine anni '90, è un approccio di progettazione sostenibile volto all'integrazione di effetti ambientali sin dalle prime fasi del processo di sviluppo del prodotto ([2]). Nasce con l'obiettivo di accrescere la competitività dei prodotti e minimizzarne gli impatti sull'ambiente e sull'uomo. Più recentemente, è stato adottato all'interno di un contesto più sistemico per lo sviluppo di una catena del valore in mercati caratterizzati da prodotti climaticamente neutri e sostenibili. Infatti l'Unione Europea, attraverso la proposta [8], sta tentando di introdurre un approccio di sostenibilità comunitario all'interno del paradigma industriale. Questa modalità d'intervento favorisce la caratteristica di circolarità, agendo sulle ripercussioni negative derivanti dalle emissioni e dall'utilizzo di risorse durante il ciclo di vita di un generico prodotto o servizio. La progettazione ecocompatibile mira a favorire il ciclo di vita dei materiali del prodotto, attraverso il miglioramento della durabilità, riparabilità e riciclabilità di un prodotto.

La migliore opportunità di riduzione degli impatti causati da un prodotto risiede nelle fasi iniziali del suo sviluppo. In [2] è indicato che una stima compresa tra 60% e 80% degli impatti complessivi di un prodotto possa essere gestito attraverso scelte e strategie adottate nelle fasi iniziali dello sviluppo di un prodotto. Da ciò si deduce l'importanza di integrare approcci ambientali per migliorare il ciclo di vita del prodotto. Ogni fase, dall'estrazione di materie prime alla loro lavorazione e processo, fino all'utilizzo e allo smaltimento, provoca dei flussi di energia e di materiale.

In accordo con quanto indicato in [2], si riportano le principali strategie coinvolte nell'integrazione delle richieste ambientali all'interno del processo di sviluppo di un generico prodotto:

- Minimizzazione del consumo di risorse (materiali ed energia);
- Minimizzazione dei consumi energetici;

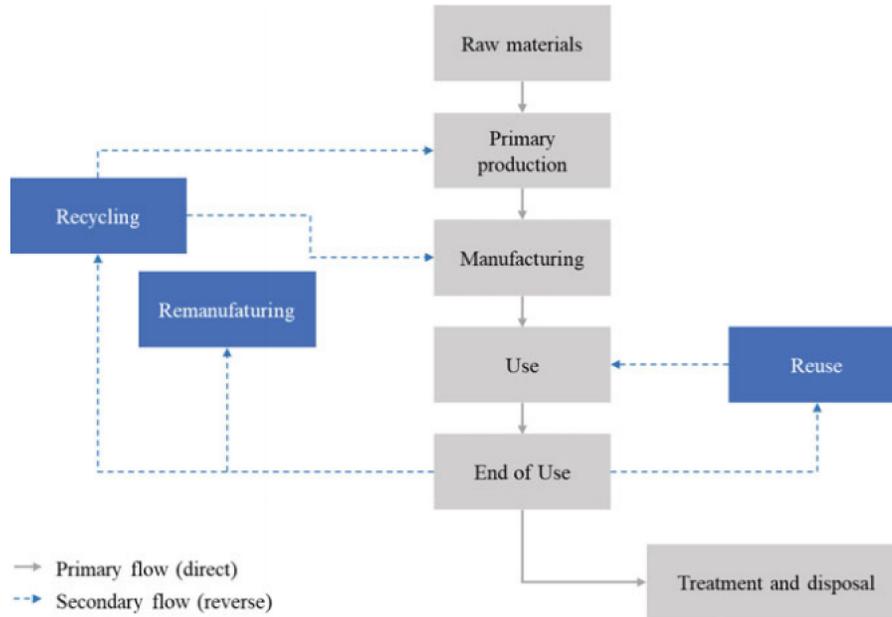


Figura 1.2: Ciclo di vita materiale di un prodotto ([2]).

- Selezione dei processi a basso impatto ambientale;
- Ottimizzazione della durata di vita del prodotto;
- Estensione della durata di vita del materiale;
- Facilitazione dell'assemblaggio.

La gerarchia funzionale di queste strategie è mostrata in Figure1.3.

I risultati dello studio LCA consentono di definire il livello di priorità delle possibili strategie da implementare. Attraverso tale approccio innovativo è possibile responsabilizzare il design, aumentandone la qualità dal punto di vista ambientale. Diversamente, se si sceglie di correggere le criticità ambientali di un prodotto già sviluppato, le alternative decisionali si riducono. Ad esempio, strategie che puntano al miglioramento dell'efficienza dei materiali, [10], o che consentano uno scenario di fine vita meno oneroso in termini di scarto ed emissioni in ambiente (riuso, riparazione, ricondizionamento, riciclo) sono difficilmente applicabili su un prodotto già sviluppato. La rivista di settore [16] riporta il progetto *Next Generation Car* (NGC) sviluppato dal Centro Aerospaziale Tedesco, che rappresenta un'applicazione che si muove verso una concezione di progettazione ecocompatibile e che mira al miglioramento

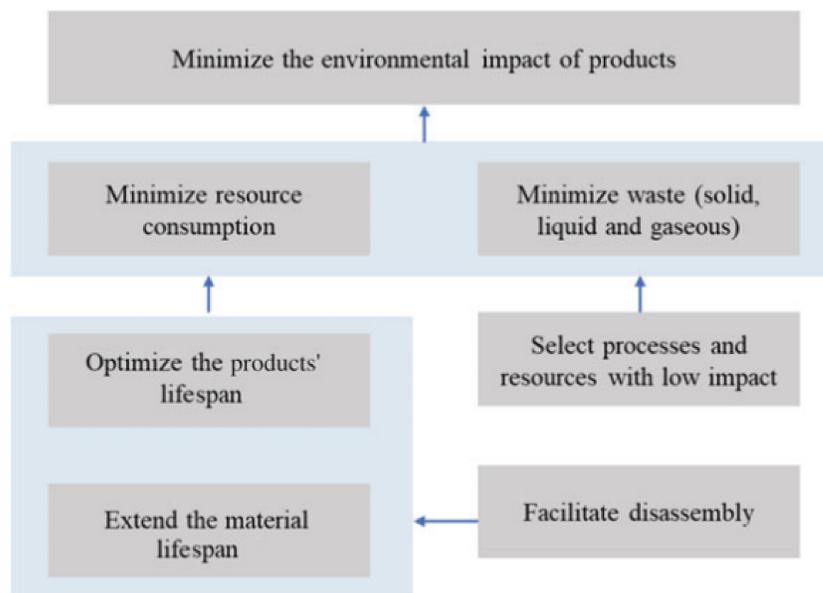


Figura 1.3: Gerarchia delle strategie in ottica LCA ([2]).

del ciclo di vita dei materiali. L'attenzione del mercato verso una nuova generazione di veicoli sostenibili ha portato il secondo più grande istituto di ricerca in Europa a sviluppare un veicolo dal concept innovativo. L'adozione di una filosofia modulare e multi-materiale per telaio e carrozzeria attraverso l'uso predominante rispettivamente di alluminio e sandwich in materiale composito ha consentito di raggiungere svariati obiettivi, tra cui l'impiego di materiali caratterizzati da un ciclo di vita meno impattante, l'incremento della compatibilità dei pezzi grazie ad un approccio di realizzazione modulare dei componenti, una migliore automazione dei processi di costruzione e assemblaggio ed una riduzione drastica del peso. Il minor peso ha portato ad un conseguente abbattimento dei consumi tale da incrementare considerevolmente l'autonomia del motore elettrico, comparabile a quella dei comuni veicoli a combustione interna. Quest'ultimo risultato evidenzia l'opportunità di sviluppo fornito dalla sostenibilità ambientale senza compromettere le performance, la funzionalità, i costi e la sicurezza del prodotto.

Ulteriori progetti di ricerca e sviluppo in ambito nautico hanno evidenziato soluzioni sostenibili e applicabili al settore del trasporto marittimo o degli yacht di grandi dimensioni. La leggerezza e la potenziale sostenibilità dei materiali compositi hanno permesso al cantiere francese *Chantiers de l'Atlantique* la costruzione di una vela rigida modulare, costituita da pannelli in materiale composito e retrattile ([16]). L'obiettivo di identificare un prodotto efficiente, leggero ed economicamente prati-

cabile si è poi tradotto in una vela in grado di introdurre una nuova generazione d'imbarcazione. Nel 2018 e nel 2019 sono stati presentati due concept di barche da crociera (*Silentseas*, *Silentseas+*) che sfruttano la combinazione di una vela modulare rigida in composito e di un motore alimentato a biocarburante come sistema di propulsione. L'utilizzo di queste soluzioni ha dimostrato come sia possibile ridurre i consumi e di conseguenza le emissioni durante la fase operativa del mezzo, oltre a contenere le opere di manutenzione e ad aumentare la vita utile dei componenti.

Una ulteriore soluzione impiegata per ridurre i costi legati al consumo di combustibile in navigazione riguarda un rotore applicabile alle navi mercantili ([16]). Il progetto riprende un'idea risalente al 1924 che, grazie allo sviluppo tecnologico nel campo dei materiali compositi, ha finalmente trovato la sua attuazione. Il *rotore velico* risulta costituito da un cilindro con superfici laterali piatte realizzato in materiale composito con anima di polietilene tereftalato (PET) riciclato. Alle estremità del rotore sono presenti delle piastre circolari da cui il sistema di controllo può agire durante la navigazione al fine di regolarne l'angolo d'incidenza del vento mediante la rotazione della vela lungo il suo asse longitudinale.

Lo sviluppo tecnologico, le richieste dei consumatori e la regolamentazione di vari settori economici stanno orientando il mercato verso soluzioni a ridotto impatto ambientale. Di conseguenza, un'impresa capace di sviluppare in modo sostenibile un suo prodotto ha una migliore possibilità di successo ([2]). L'integrazione di una progettazione ecocompatibile può essere guidata dall'analisi LCA come strumento per caratterizzare le scelte che contribuiranno agli obiettivi climatici futuri.

Nei capitoli successivi si esporrà in dettaglio il tipo d'imbarcazione presa in esame nel presente lavoro di tesi e, data l'esclusione di qualsiasi mezzo di propulsione, eccetto per il sistema velico, assume un'importanza ancora più centrale l'integrazione dell'eco-design supportata dall'analisi LCA.

1.2 Processi di smaltimento

Il settore nautico – in particolare le imbarcazioni a vela o gli yacht di medie o piccole dimensioni – risulta dominato dai materiali compositi rinforzati con fibra di vetro ([15], [28]). Tuttavia, le pressioni della comunità e delle autorità verso i problemi ambientali connessi con la gestione dei prodotti e dei componenti a fine vita hanno acceso l'interesse dei soggetti coinvolti nell'industria marittima ad una gestione più oculata dei rifiuti, a processi di riciclo validi e al riutilizzo, o alla rigenerazione dei prodotti([18]).

Lo scafo, la coperta e le stesse parti strutturali di un'imbarcazione possono essere organizzati nella consueta struttura composita a *sandwich* ([15]). In accordo con [4],

[28] e [14] la combinazione scelta di matrice e fibre di rinforzo per un generico scafo ne determina le seguenti caratteristiche e scenari di fine vita:

- Applicazione (aeronautica, marittima, automobilistica, turbine eoliche, ecc..);
- Caratteristiche Meccaniche:
carichi di rottura (a trazione, a compressione e a flessione), moduli elastici, resistenza agli impatti, resistenza a fatica, proprietà reologiche;
- Caratteristiche chimico-fisiche:
finitura superficiale, densità, comportamento igroscopico, resistenza agli agenti atmosferici, stabilità termica, dilatazione termica;
- Tipologia di Riciclaggio:
meccanica, termica e chimica.

I processi di riciclo dei materiali compositi possono essere classificati come segue ([28]):

- Primario e secondario (riciclo meccanico): riciclaggio in grado di trasformare il composito scartato, o avanzato, in sostanze di caratteristiche pari o inferiori a quelle della fibra vergine originaria;
- Terziario (pirolisi, riciclaggio supercritico e a letto fluido): riciclaggio chimico in grado di trasformare i compositi di scarto o di avanzo in altre sostanze chimiche o in combustibili;
- Quaternario (incenerimento): conversione dei compositi in energia termica attraverso processo di combustione delle sostanze organiche contenute al loro interno.

Si osserva che la pratica d'incenerimento presenta problematiche di combustione completa dei compositi, alte temperature richieste, criticità ambientali superiori rispetto alle altre categorie di riciclaggio e un 50% circa di composito – nel caso di fibre di vetro – come residuo di processo (ceneri) che dovrà comunque essere trasferito in discarica ([28]). Pertanto è richiesta fortemente un'alternativa percorribile per i principali compositi presenti nel mercato.

Le matrici più utilizzate nel settore nautico sono di tipologia polimerica termoplastica o termoindurente. La termoindurente è la resina più comune nei compositi del settore nautico presenti nel mercato. Tuttavia, a differenza della resina termoplastica – sempre più presente in ambito automotive – questa tipologia è caratterizzata da un comportamento differente alla temperatura. Infatti, la tipologia termoindurente

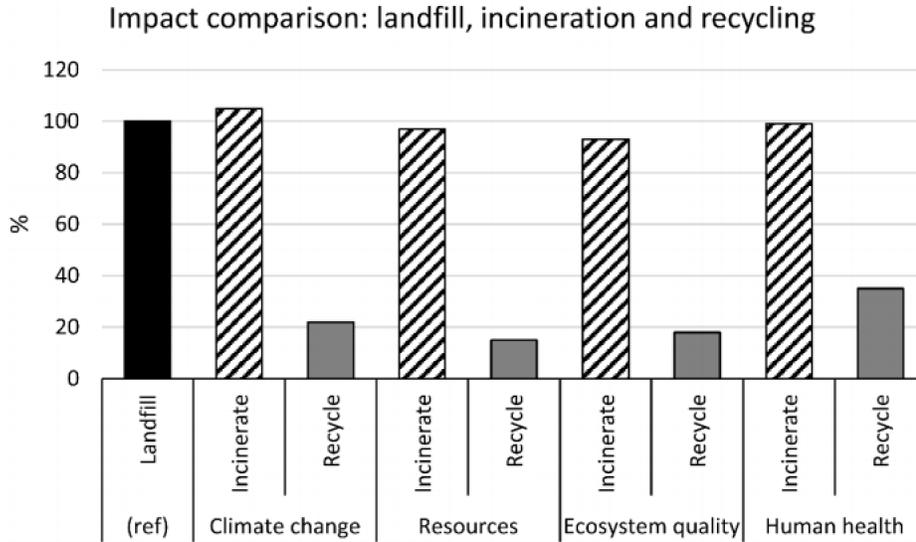


Figura 1.4: Confronto tra gli impatti ambientali dello scenario di fine in discarica con gli altri scenari di smaltimento ([14]).

quando subisce un riscaldamento tende a degradare la propria struttura polimerica senza ricostituire nuovi monomeri della catena, come invece accade nella resina termoplastica, comportando ulteriori complicazioni in chiave di riciclo.

Le fibre di rinforzo, quali la fibra di vetro e di carbonio, nelle matrici polimeriche rappresentano un'altra sfida a cui è necessario far fronte dato il loro impatto e l'incertezza sulla sostenibilità dei metodi volti al loro riciclo. Le precedenti considerazioni sono basate su [14] e in Table1.5 si mostrano i risultati revisionati dallo stesso studio.

EoL Options	Retained Tensile Strength of Recycled Fiber Compared to Virgin Fiber [%]	Reference
Mechanical	~78%	[147]
Fluidized-bed process	~50%	[148]
Pyrolysis	~52%	[149]
Microwave Assisted Pyrolysis	~52% (**)	n/a
Chemical	~58%	[150-152]
High Voltage Fragmentation	~88%	[153]

Figura 1.5: Confronto della resistenza a trazione conservata dalle fibre di vetro (GF) riciclate attraverso differenti tecnologie di riciclo rispetto a quella mostrata dalle fibre vergini ([14]).

1.3 Materiali compositi selezionati dal team Métis

A fronte dell'assenza di metodi di riciclaggio dei materiali compositi che non ne compromettano le caratteristiche chimico-fisiche e funzionali, il team Métis ha percorso una scelta di progettazione ecocompatibile attraverso l'utilizzo di fibre di rinforzo di origine naturale e un core riciclato e riciclabile. In particolare, lo studio [4] ha consentito l'individuazione di una fibra che potesse rispettare le caratteristiche meccaniche e di leggerezza comparabili a quelle del vetro. La campagna di test effettuata su vari lotti di provini costituiti da diversi materiali ha verificato come la fibra di lino permettesse il migliore compromesso di proprietà meccaniche, tra cui anche resistenza a fatica (come osservato da [32]), sostenibilità, un ottimo rapporto rigidità-peso e un costo contenuto ([4], [3, Tab 1.2]). La sostenibilità delle fibre di origine naturale si concretizza in un minore impatto ambientale legato alla loro origine vegetale. In accordo con [4] e [14], le fibre naturali contribuiscono di fatto ad una serie di vantaggi ambientali ottenuti grazie a: cattura di anidride carbonica dall'atmosfera durante la fase di crescita; processi di realizzazione delle fibre meno onerosi rispetto alle tipologie sintetiche (vetro e carbonio); ottima biodegradabilità traducibile in una ridotta quantità di incombusti nel caso di incenerimento; sviluppo di sostanze meno nocive rispetto alle fibre sintetiche in seguito ad incenerimento. I materiali principali selezionati per la realizzazione dello scafo in sandwich di composito di *Alétheia* sono i seguenti:

- fibra di lino pre-impregnata da resina epossidica (*Lino WR 300*);
- tessuto di vetro pre-impregnato di tipo E (*E-WR 50*);
- fibra di vetro unidirezionale di tipo S (*S-UD 180*);
- lamina di alluminio;
- PET espanso (schiuma di polietilene tereftalato);

La decisione di impiegare la tecnologia delle fibre pre-impregnate ha apportato un valore aggiunto al progetto didattico Metis anche in termini di ricerca e sviluppo poichè *Alétheia* risulta il primo prototipo velico da regata al mondo realizzato in fibra di lino *prepreg*.

Nel capitolo successivo si riporteranno in dettaglio la disposizione delle pelli di tessuto nel sandwich composito e i parametri tecnici che contraddistinguono i materiali utilizzati. Si rimanda al lavoro di tesi magistrale di Riccardo Bergamin ([3, cap. 1, 2]) per una descrizione accurata dei materiali impiegati nel sandwich di composito.

Di seguito si descrivono le caratteristiche e le peculiarità dei materiali scelti funzionali all'approccio LCA.

1.3.1 PET

Il materiale di riempimento interno che caratterizza l'anima (o *core*) della struttura a sandwich rappresenta un ulteriore fattore d'incremento di sostenibilità. Con riferimento agli studi e ai relativi test riportati in [4] effettuati dal gruppo Métis vela dell'Università degli Studi di Padova, si evidenzia l'adozione di materiali naturali e meno impattanti, quali la fibra di lino e il legno di balsa. Lo studio pubblicato nel 2017 ha consentito di identificare la combinazione di core e fibre di rinforzo che meglio garantivano il compromesso tra prestazioni meccaniche e prestazioni ambientali per il prototipo *Areté*.

L'intenzione di apportare ulteriori miglioramenti del progetto sotto il profilo di eco-design ha spinto il team ad impiegare fibre di lino pre-impregnate e un'anima in PET espanso. Tale scelta si è basata sulla possibilità di ridurre le quantità di resina termoindurente, come sopraccitato difficile da manipolare in fase di riciclo, grazie all'adozione dell'innovativa tecnica del pre-impregnaggio combinata alla ridotta tendenza del PET ad assorbire resina. Infatti, a differenza della balsa, il PET permette un risparmio di resina garantendo comunque una buona adesione con le pelli esterne che si concretizza con un risparmio in peso. Inoltre, il PET risulta riciclabile e riciclato, contribuendo ad una riduzione degli impatti provenienti dalla sua produzione ed evitando la generazione di rifiuti. Non da meno, esistono applicazioni di riutilizzo del PET in ambito edilizio: dai risultati sperimentali in [25] e in [6] si può considerare rispettivamente un possibile sostituto parziale della sabbia nella miscela di calcestruzzo plastico e come core di compositi utilizzabili per strutture quali ponti pedonali.

1.3.2 Lamine di alluminio

Le lamine d'alluminio rappresentano l'ulteriore novità adottata nella realizzazione della coperta e delle strutture interne in configurazione sandwich di composito per il prototipo *Alétheia*. La scelta dell'alluminio combinato all'anima di PET è stata determinata in fase di progettazione con l'intenzione di incrementare ulteriormente la componente di materiali riciclabili. Inoltre, come riportato su [17], l'alluminio e il PET consentono di aumentare considerevolmente il contenuto in peso dei materiali riciclati o riciclabili di cui è costituita complessivamente la barca.

I componenti dell'imbarcazione saranno oggetto di future analisi, in particolare

durante la fase operativa e al momento della dismissione, per verificare lo stato di degradazione del composito.

1.3.3 Lino pre-impregnato

La tecnologia dei tessuti naturali pre-impregnati rappresenta un'applicazione potenzialmente valida nel campo dei materiali compositi. Tuttavia, affinché possa essere considerata un'alternativa efficace alle fibre sintetiche, risulta opportuno individuarne le caratteristiche fondamentali.

Generalmente, nel caso di compositi con fibre pre-impregnate, si preferisce eseguire un preciso ciclo termico in pressione mediante autoclave in modo da ottenere un buon grado di controllo sul delicato processo di polimerizzazione finale della matrice. Per tale processo il composito deve essere preventivamente imbustato sottovuoto.

Lo studio in [26] descrive il processo di polimerizzazione in autoclave come la fase più critica che determina le caratteristiche finali del composito. Si vogliono analizzare le criticità derivanti dalla scelta del composito pre-impregnato, nonché quelle dei processi coinvolti, trascurando i dettagli del ciclo di polimerizzazione che avviene in autoclave e quello di produzione del tessuto pre-impregnato.

Dalle analisi riportate in [26] e in [22] è possibile individuare sia le problematiche inerenti ai processi di produzione del *prepreg* che quelle relative al processo di polimerizzazione in autoclave, entrambi aspetti determinanti per le caratteristiche del composito. I fattori principali che preoccupano i fornitori dei tessuti pre-impregnati e i cantieri navali riguardano la difficoltà di compattamento del tessuto tra ordito e trama (processo di tessitura e *prepreg*) e il contenuto di umidità sia nelle fibre di rinforzo – specialmente nel caso di fibre naturali – che nella resina.

Il ridotto impacchettamento delle fibre e quindi la presenza di zone vuote implicano una richiesta eccessiva di resina. Questa caratteristica si esprime attraverso il parametro di densità superficiale (g/m^2): un ridotto valore di questa grandezza equivale ad una concentrazione non trascurabile di spazi vuoti tra i filamenti del tessuto. Di conseguenza, durante il processo di polimerizzazione in autoclave si possono riscontrare porzioni di composito troppo asciutte. La concentrazione di zone vuote nel tessuto aumenta inoltre la tendenza della matrice ad assorbire acqua, pregiudicando sia la finitura superficiale che le performance meccaniche.

Infine, [26] suggerisce di prestare particolare attenzione al valore di temperatura che si sviluppa durante il processo in autoclave sulla faccia del composito a contatto con lo stampo, con riferimento al caso in cui lo stampo risulti in materiale metallico. Infatti, temperature non uniformi sul composito possono comportare effetti indesiderati sul processo di reticolazione della matrice e zone esterne eccessivamente asciutte.

Diventa essenziale, al fine di diffondere efficacemente l'applicazione di questa tecnologia, comprendere i fattori sopracitati sia dal punto di vista produttivo del prodotto pre-impregnato, sia da quello qualitativo del processo di polimerizzazione in autoclave. Gli esperimenti riportati in [26] e in [22] mostrano l'esigenza particolare di evacuare propriamente aria e umidità dal composito pre-impregnato durante il processo di reticolazione della matrice. Inoltre sottolineano la validità della scelta di eseguire il processo in autoclave per esigenze di compattazione delle fibre, nonché la cura richiesta durante la loro disposizione sullo stampo per evitare arricciamenti nel tessuto.

Lo studio [32] evidenzia come un'appropriata tecnica di realizzazione del tessuto è essenziale per minimizzare l'arricciamento dei filati di lino e al contempo esprimere la migliore resistenza a fatica. Lo stesso studio osserva l'influenza dei parametri di densità e di forma del filamento nello stabilire il giusto compromesso tra compattazione trama-ordito (minori vuoti e maggior frazione volumetrica di fibra) e resistenza al carico. Infatti, risulta importante raggiungere un compromesso ottimale tra la dimensione delle fibre (densità lineare) e la forma geometrica trasversale delle stesse. Una densità lineare elevata produce una resistenza meccanica generalmente migliore, ma se eccessiva può causare la riduzione della densità superficiale del tessuto e portare ad una forma circolare del filamento. Di conseguenza si favorisce la tendenza all'arricciamento delle fibre e la formazione di cricche trasversali e d'interfaccia che determinano delaminazioni e una riduzione della resistenza alla fatica del composito. Infine, [32] suggerisce l'adozione di laminati ibridi di lino e vetro come una possibile soluzione funzionale nel caso in cui siano richieste maggiori prestazioni meccaniche. In tal modo si può sfruttare la combinazione di maggiori prestazioni meccaniche della fibra di vetro con la stabilità alla fatica del lino. Quest'ultimo dimostra infatti un miglior comportamento alla fatica dovuto a riduzioni del modulo elastico durante i cicli di sforzo.

Il grande vantaggio fornito dalla tecnologia di pre-impregnaggio risiede nella facilità di modellazione dei tessuti durante l'applicazione delle pelli sullo stampo. Le superfici di uno scafo di un'imbarcazione realizzata in composito sono caratterizzate da un'elevata complessità geometrica che si evolve nello spazio. La tecnica del *prepreg* apporta vantaggi significativi durante l'operazione di laminazione rispetto alla tecnica alternativa d'infusione sottovuoto (o *VARTM*). Ciò è stato verificato direttamente dallo stesso team Métis durante la fase di realizzazione dello scafo di *Alétheia* e risulta ulteriormente espresso in [15].

La semplicità di applicazione delle pelli e il rapporto ottimale di resina controllato in fase di produzione del tessuto sono vantaggi importanti per una laminazione più accurata che può determinare una migliore durabilità dell'oggetto. In relazione a quanto espresso in questo paragrafo si renderà opportuno studiare e verificare

nel tempo il composito ottenuto per stabilirne le proprietà reali, poiché la fase di polimerizzazione e le caratteristiche delle fibre stesse risultano fattori essenziali per la qualità finale dell'oggetto. Queste saranno fonti importanti di ulteriori studi per il team.

1.3.4 Fine vita - Materiali compositi polimerici con fibre di rinforzo naturali (NFRPCs)

Sebbene le necessità di riciclo dei materiali compositi abbiano maturato un interesse concreto nei vari settori industriali, emerge l'esigenza di sviluppare dei metodi economicamente fattibili che contribuiscano ad un risparmio energetico e che non degradino eccessivamente le proprietà e le prestazioni dei materiali [14]. Come espresso nel precedente paragrafo, le caratteristiche di sostenibilità, di leggerezza, di grande disponibilità e di minor costo stanno portando ad un crescente utilizzo di compositi di origine naturale. Tuttavia, come si evidenzia anche in [4] e in [14], i compositi che impiegano fibre di rinforzo naturali presentano degli svantaggi dovuti alle caratteristiche intrinseche di quest'ultimi. I principali sono:

- la dispersione delle proprietà meccaniche, che compromette un'attendibilità dei test di sforzo;
- una ridotta adesione tra matrice e fibre, che richiede l'adozione di resine non propriamente sostenibili (resine termoindurenti);
- l'assorbimento di acqua e umidità (comportamento igroscopico);
- la particolare sensibilità agli agenti atmosferici;

Le strategie di riutilizzo, di rigenerazione, nonché i tentativi di riciclo risultano difficilmente applicabili quando si utilizzano le fibre naturali. Infatti, basandoci su [28], è importante comprendere a fondo le proprietà dei compositi in relazione ai propri costituenti e alle disposizioni nella configurazione a sandwich. Inoltre, per ragioni di inattendibilità e dispersione del comportamento meccanico dei compositi, in [4] e in [28], si evidenzia la necessità di adottare modelli che definiscano margini di sicurezza su cui basare le scelte progettuali, le applicazioni e il riutilizzo/riciclaggio dei materiali.

Si vogliono ora riportare le principali conclusioni espresse dalla revisione [34] che interessano i materiali compositi rinforzati con fibre naturali (NFRPC). Ciò che limita tecnicamente il loro riutilizzo o la riciclabilità risulta essere la durabilità del composito, in quanto sensibile alle condizioni ambientali (umidità, variazioni di

temperatura, esposizione a raggi UV), soprattutto quando impiegato in applicazioni esterne durante la sua fase di utilizzo. Le condizioni ambientali causano la degradazione delle caratteristiche chimiche e meccaniche della matrice e delle fibre naturali. Queste variazioni sono difficili da caratterizzare e da prevedere e pertanto sono fonte importante di ricerca scientifica. Tuttavia, dalla revisione [34] si può ritenere non preoccupante il comportamento igroscopico dei NFRCP, così come la dispersione delle fibre a seguito di eventuali processi di riciclaggio.

Ciò che preoccupa maggiormente i ricercatori riguarda un'adeguata comprensione delle proprietà meccaniche del composito e il miglioramento dell'adesione fibre-matrice al fine di ottenere degli scenari di fine vita più chiari per questi materiali.

Lo studio LCA consentirà di stabilire in quale entità la scelta dei materiali possa favorire le performance ambientali ricercate dal progetto.

Capitolo 2

Prototipo in esame: *Alétheia*

L'obiettivo primario del progetto didattico supportato dall'Università di Padova è realizzare un prototipo d'imbarcazione velica in grado di sviluppare scelte e approcci ambientali sostenibili preservando la propria competitività e risultare vincitore dell'edizione *1001VELAcup 2023* prevista dal 27 Settembre al 1 Ottobre 2023 presso la località siciliana di Mondello (PA). Il prototipo *Alétheia*, varato solo il giorno precedente l'inizio della competizione, ha dimostrato subito ottime potenzialità di performance risultando vincitore del trofeo Maneschi grazie alla combinazione dei risultati progettuali e di regata.

In questo capitolo si vuole chiarire brevemente il contesto operativo del gruppo didattico-sportivo *Metis Vela UniPD* coinvolto nella progettazione, realizzazione e conduzione di prototipi di barche a vela da regata che partecipano alla competizione universitaria *1001VELAcup* ([website]). A tale proposito si riporterà un paragrafo dedicato al regolamento di classe *R3* imposto dagli organizzatori della manifestazione. Successivamente, si evidenzieranno le caratteristiche del progetto dell'imbarcazione *Alétheia* su cui si è basata la fase di costruzione avvenuta durante l'anno accademico 2022/2023.

2.1 Regolamento di classe

Nel gergo nautico il termine *classe* identifica la tipologia d'imbarcazione e ne definisce i parametri progettuali. La classificazione viene adottata solitamente nelle competizioni – o regate – per garantire prestazioni comparabili tra le barche e garantire quindi una competizione equa. In questo paragrafo si riportano estratti del regolamento [17] che l'associazione *1001VELAcup* impone a tutti gli atenei partecipanti alla competizione. Di seguito sono citati il paragrafo 1, il paragrafo 2 e il paragrafo

6 che regolano rispettivamente *Dimensioni, Materiali e Costruzione e Scafo* delle imbarcazioni.

1- Dimensioni

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

Materiali e costruzione

Definizioni:

Materiali naturali: per materiale 'naturale' o 'fibra naturale' si intende qualsiasi materiale che provenga da piante o animali e che non sia stato sintetizzato chimicamente;

Bio materiali: per materiale 'bio' si intende qualsiasi materiale che possa essere decomposto da attività biologica;

Materiali riciclabili: per materiale riciclabile si intende qualsiasi materiale che possa essere trattato in modo da riacquisire le proprietà originarie;

Materiali riciclati: per materiale riciclato si intende un qualsiasi materiale ottenuto da rifiuti che è stato ri-processato per riacquisire le proprietà chimico-fisiche originali.

L'alluminio è da considerarsi indifferentemente riciclabile o riciclato.

- a) L'insieme scafo, strutture e sovrastrutture dovrà essere realizzato con un contenuto in materiali 'naturali' e/o 'bio' e/o riciclabile e/o riciclato non inferiore a: 70% del peso se si tiene conto solo dei materiali 'naturali'; 75% del peso se si tiene conto dei materiali 'bio' e/o materiali riciclabile e/o riciclato.
- b) E' ammesso l'uso di terrazze nel rispetto dei limiti dimensionali e costruttivi definiti.
- c) Salvo quanto menzionato in d) non sono ammessi i seguenti materiali: fibre ad 'alto modulo' con modulo di Young superiore a 100 GPa, ed titanio, fibre aramidiche e carbonio.
- d) E' ammesso l'utilizzo di fibre ad alto modulo per la realizzazione delle appendici.
- e) Le vele non possono essere realizzate in fibre ad alto modulo e dovranno

essere accompagnate da una dichiarazione del velaio in accordo con quanto descritto negli allegati C e C1.

f) L'albero e il boma devono essere realizzati in materiali 'naturali' e/o 'bio' e/o riciclabile e/o riciclato come da regola 2a).

6- 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 multi-scafi.

c) Lo scafo non deve presentare sezioni trasversali asimmetriche.

d) Lo scafo deve poter garantire una riserva di galleggiamento sufficiente alla sicurezza dell'imbarcazione e del suo equipaggio, pari ad almeno 80 l, sotto forma di schiuma, espanso, sacchi d'aria, compartimenti stagni ispezionabili. I tappi di ispezione dovranno essere minimo due, avere diametro minimo di 12 cm ed essere posizionati uno nella zona posteriore e uno nella zona anteriore della coperta e comunque secondo logica in modo da permettere un'adeguata ispezione.

e) E' obbligatorio assicurare le appendici.

Dall'estratto del regolamento appare evidente l'intento degli organizzatori di introdurre soluzioni sostenibili nella progettazione di prototipi di barche a vela da regata. L'attenzione del regolamento all'origine dei materiali, contrapposta alla libertà d'azione sulle forme dello scafo, strutture, appendici e piano velico, evidenzia l'interesse a voler incentivare soluzioni tecniche ecocompatibili che possano essere da monito a scelte affini all'economia circolare nel contesto nautico.

2.2 Caratteristiche Tecniche

Questo paragrafo riporta i parametri progettuali e il render del prototipo *Alétheia*. In Figure 2.1 è possibile apprezzare il prospetto finale ottenuto attraverso il software di modellazione *Rhino3D*.

Il processo di design e i dati in seguito riportati sono il risultato del lavoro di progettazione dell'intero gruppo *Métis Vela UniPD*, in cui il professore Andrea Lazzaretto svolge il ruolo di responsabile del progetto didattico. Inoltre, si fa riferimento ai lavori di tesi magistrale di Giovanni Pagnon ([21, Cap. 4]) e di Riccardo Bergamin ([3]), e al testo [15] per una descrizione completa delle fasi di progettazione del prototipo in esame.

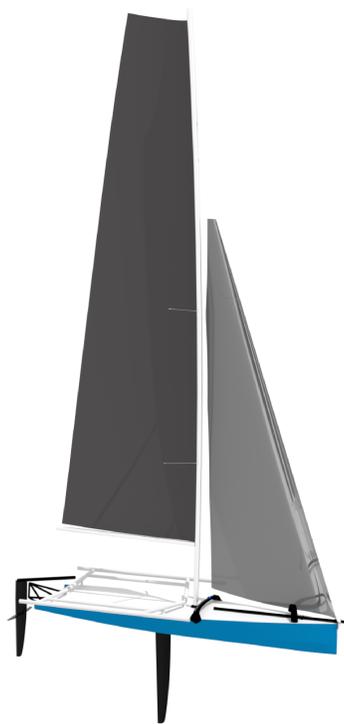


Figura 2.1: A sinistra il rendering di Alétheia ottenuto dalla fase di progettazione; a destra l'esposizione del prototipo reduce dalla vittoria del trofeo Maneschi all'edizione 1001VELAcup 2023.

Nei seguenti paragrafi sono riportate le quote e i materiale dello scafo, delle paratie e della coperta relative alla barca *Alétheia*. Queste informazioni saranno impiegate nei capitoli successivi per eseguire l'analisi LCA.

2.2.1 Scafo

Il documento in appendice ([33]) descrive in dettaglio la disposizione di tutte le pelli e l'anima del composito per quanto concerne lo scafo. In Figure2.2 sono riportate le quote dimensionali dello scafo di *Alétheia* nelle diverse proiezioni tecniche.

I materiali selezionati per lo scafo sono:

- tessuto di fibra di lino prepreg (*LINO WR 300*) AmpliTex™, gentilmente fornito dal partner tecnico *Angeloni Group*;
- tessuto di fibra di vetro tipo E prepreg (*E-WR 50*);
- fibra di vetro tipo S unidirezionale (*S-UD 180*);
- PET espanso.

Si evidenzia l'esempio di sostenibilità fornito da *Angeloni Group* in collaborazione con l'azienda svizzera *Bcomp* – riferimento nel settore dei compositi di origine naturale – attraverso il prodotto AmpliTex™ per la realizzazione dello scafo del team Metis. *Bcomp* propone tessuti naturali di elevata qualità per fornire alternative alle fibre sintetiche quali vetro e carbonio. *Angeloni Group* ha svolto il delicato processo di pre-impregnaggio richiesto in questo caso per le fibre di lino. Come riporta l'articolo [16, p. 34, 35] della rivista *JEC Composites*, specializzata nel settore dei materiali compositi, si osservano già svariate applicazioni del prodotto ampliTex™, utilizzato ad esempio nel motorsport (ad esempio in campionati automobilistici GT4 e in superformula), sci estremo, yacht di lusso e come materiale per la costruzione di alcune tipologie di ponti, pannelli per satelliti o turbine eoliche. Queste applicazioni rappresentano un importante passo nel processo di trasformazione di diversi settori produttivi verso la decarbonizzazione.

In appendice I ([33]) sono evidenziate le specifiche tecniche di tutti i materiali utilizzati per la realizzazione dello scafo così come la disposizione delle pelli nella struttura a sandwich.

2.2.2 Strutture interne

Le paratie sono l'elemento essenziale che conferisce la resistenza strutturale di uno scafo. In Figure2.3 è possibile apprezzare i 5 elementi trasversali e l'elemento

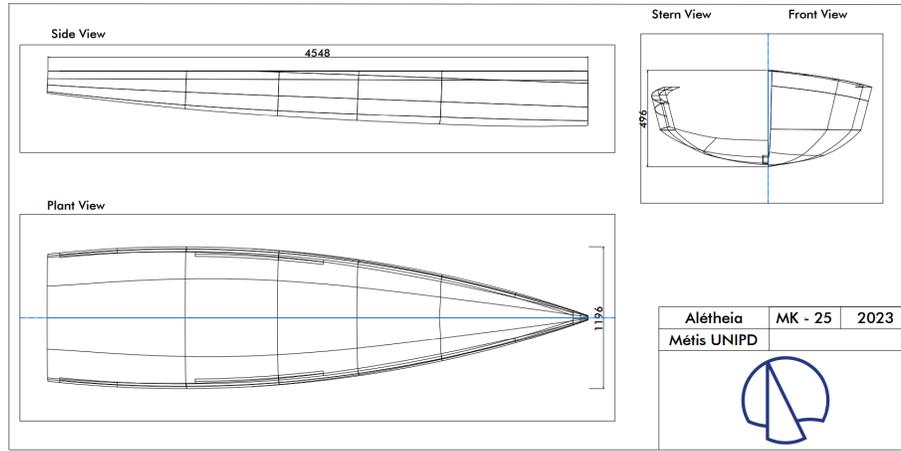


Figura 2.2: Proiezioni tecniche dello scafo (I).

Livello ply	Rinforzo	Grammatura [kg/m ²]	N.°ply	Direzione fibre
1	Lamina di alluminio	1.340		-
0	PET	0.805		-
-1	Lamina di alluminio	1.340		-

Tabella 2.1: Piano di laminazione delle pelli che compongono il sandwich delle strutture interne.

longitudinale, denominato *longherone* o *paramezzale*, fissati allo scafo.

Le paratie sono costituite dai seguenti materiali:

- lamiera di alluminio;
- fibre di vetro di tipo S unidirezionale (*S-UD 180*) disposte a 0° e a 90°;
- PET espanso;
- resina epossidica.

In Table2.1 sono indicati i dati e la disposizione dei materiali impiegati per le strutture interne.

2.2.3 Coperta

La coperta rappresenta la superficie calpestabile dall'equipaggio durante le manovre di navigazione su cui si fissano i componenti funzionali dell'armo (*rig*) dell'imbarcazione. Si trova accoppiata alle strutture interne e allo scafo chiudendo il volume di



Figura 2.3: Foto delle strutture interne del prototipo Alétheia.

quest'ultimo.

Con riferimento a [29], il sandwich composito che caratterizza la coperta deve essere dimensionato in modo da resistere agli sforzi derivanti dall'azione dei bozzelli e dei carrelli installati sulla coperta attraverso l'azione dinamica esercitata dal vento sul piano velico e contemporaneamente al carico dell'equipaggio presente a bordo. I materiali utilizzati per la coperta di *Alétheia* sono:

- lamiera di alluminio;
- 2 strati di fibre di vetro unidirezionale di tipo S orientati a 0° e 90° ;
- PET espanso (core);
- resina epossidica.

La Table2.2 riporta il layout del sandwich composito e le principali grandezze.

Per ragioni di chiarezza espositiva si osserva che la coperta è stata accoppiata mediante un collante bi-componente allo scafo e alle strutture interne grazie all'area di fissaggio fornita dalle flange di alluminio precedentemente applicate sulle stesse paratie e dalle flange laminate in lino che interessano tutto il bordo superiore dello scafo. In Figure2.3 si possono notare in dettaglio le zone di contatto per l'incollaggio, mentre in Figure2.4 si osserva il processo di laminazione con sacco a vuoto della

Livello ply	Rinforzo	Grammatura [kg/m ²]	N.°ply	Direzione fibre
3	Lamina di alluminio	1.340	1	-
2	vetro S (UD)	0.170	1	90°
1	vetro S (UD)	0.170	1	0°
0	PET	0.805	1	-
-1	Lamina di alluminio	1.340	1	-

Tabella 2.2: Piano di laminazione delle pelli che compongono il sandwich della coperta.

coperta.

I processi di realizzazione ed assemblaggio saranno trattati nel capitolo 5.



Figura 2.4: Foto della coperta in fase di laminazione.

2.3 Scenario di fine vita

Alla luce di quanto trattato nel paragrafo 1.2, gli scenari di fine vita attualmente praticati e maggiormente diffusi per le fibre di rinforzo dei materiali compositi sono il deposito in discarica e l'incenerimento. Dato l'impatto di questi scenari di smaltimento in termini ecologici e di salute umana, si prevede che i settori coinvolti nell'utilizzo dei compositi accelerino lo sviluppo di metodi di riciclaggio sicuri, sostenibili ed

economicamente competitivi ([14]). Considerato l'interesse suscitato anche in campo accademico, si è deciso di adottare la seguente strategia come scenario di utilizzo e di fine vita per il prototipo (*Alétheia*):

- **Manutenzione ordinaria e straordinaria:** controllo periodico che precede e segue i momenti di utilizzo dell'imbarcazione, caratterizzato da sostituzione componenti, riparazione ed eventuali lavori straordinari di laminazione che consentano un mantenimento delle condizioni operative del mezzo ed un'estensione ottimale della vita utile;
- **Disassemblaggio:** studio degli effetti della fase operativa sul materiale (assorbimento d'acqua, stato di adesione tra i componenti del sandwich, deterioramento della struttura, efficacia del processo di polimerizzazione in autoclave), ricerca di metodi efficaci di separazione dei componenti compositi (di core e matrice) e tentativi di potenziale riciclo della matrice;
- **Riciclo e incenerimento:** per alluminio e PET si prevede il riciclo, mentre per la fibra di lino e la matrice ibrida di lino e vetro l'incenerimento con materiale incombusto stoccato in discarica.

Sarà oggetto di verifica LCA stabilire se la combinazione di materiali scelti consentirà un buon bilanciamento degli impatti ambientali di cui l'alluminio, il PET e i compositi di origine naturale sono responsabili. E' fonte di interesse valutare se i crediti ambientali, risultanti dalla riduzione degli impatti dei processi di estrazione ottenuta grazie l'impiego di fibre naturali e dagli scenari di fine vita di riuso o rilavorazione dell'alluminio e di riciclo del PET, possano fornire globalmente una soluzione sostenibile.

Capitolo 3

Il metodo LCA

In questo capitolo sarà esaminato l'origine e lo sviluppo del metodo di analisi noto come *Life Cycle Assessment* (LCA), utilizzato nella valutazione degli impatti ambientali di un prodotto o di un servizio lungo tutto l'arco della propria vita. Si procederà a tracciare il percorso che ha portato a definire gli standard internazionali che ne regolano struttura, caratteristiche e conformità.

3.1 Storia dell'analisi LCA

Lo sviluppo e la prima applicazione documentata della metodologia LCA risalgono alla fine degli anni '60, quando cominciò a prendere forma l'interesse per un metodo di analisi finalizzato a valutare l'impatto ambientale derivante dal ciclo di vita completo di un prodotto. La prima analisi comparativa degli effetti ambientali di un prodotto risale al 1969 [13] nello studio denominato *REPA* (*Resource and Environmental Profile Analysis*) condotto dal Midwest Research Institute (MIR). Lo studio, effettuato negli Stati Uniti per la multinazionale *Coca-Cola*, mirava a quantificare e confrontare il consumo di risorse - sia materiali che energetiche - e le emissioni di diversi contenitori per bevande. Secondo [2], lo sviluppo dello studio REPA proseguì e nel 1974 l'autorità statunitense USEPA commissionò quella che in quel momento rappresentava l'analisi REPA più complessa ed ambiziosa mai effettuata. In questa occasione, l'analisi comparativa non si limitava solo al processo produttivo dell'imballaggio per la bevanda, bensì estendeva l'indagine anche ai processi di distribuzione, alla fase di utilizzo del prodotto e alla catena di produzione a monte dei diversi materiali utilizzati. Nonostante in quegli anni fosse maturato un interesse verso la valutazione dei flussi materiali e le emissioni coinvolte nelle produzioni industriali, non era ancora stata compresa appieno la potenzialità di queste procedure d'analisi nella valutazione degli

impatti ambientali applicabile ad un generico sistema. Tuttavia, nei decenni successivi i crescenti problemi riguardanti lo smaltimento dei rifiuti, l'imballaggio, la produzione energetica e le emissioni da combustibili fossili hanno acceso l'interesse verso lo studio di un bilancio ecologico anche in Europa. Ciò ha portato alla costituzione di una società no profit denominata SETAC (*Society of Environmental Toxicology and Chemistry*), che riunisce compagnie industriali (ad esempio Procter and Gamble (P&G), Tetra Pak), istituti di ricerca pubblici (EMPA, CML) e gruppi di studiosi in materia LCA [13].

L'impegno di SETAC su entrambi i fronti atlantici - SETAC (Nord America) e SETAC-Europa - ha permesso lo sviluppo decisivo della metodologia LCA. L'acronimo LCA (*Life Cycle Assessment*) venne usato per la prima volta negli Stati Uniti nei primi anni '90 in seguito all'organizzazione e pubblicazione di workshop ideati da SETAC sui diversi aspetti dell'approccio LCA. Questo diede lo slancio definitivo allo sviluppo della metodologia.

La principale ragione che ha permesso la diffusione dell'analisi LCA in ambito scientifico è stata la decisione dell'Organizzazione Internazionale per la Standardizzazione (ISO) di normare il metodo, al fine di fornire una descrizione rigorosa della tecnica di valutazione ambientale. L'ISO istituì un Comitato Tecnico suddiviso in 5 gruppi incaricati a definire tutte le fasi coinvolte nell'indagine LCA e i relativi standard ISO:

gruppo 1) ISO 14040:1997

gestione ambientale, valutazione del ciclo di vita, principi e struttura di riferimento;

gruppo 2), 3) ISO 14041:1998

gestione ambientale, valutazione del ciclo di vita, definizione di degli obiettivi e degli scopi dell'analisi, analisi d'inventario;

gruppo 4) ISO 14042:2000

gestione ambientale, valutazione del ciclo di vita, valutazione dell'impatto del ciclo di vita;

gruppo 5) ISO 14043:2000

gestione ambientale, valutazione del ciclo di vita, interpretazione del ciclo di vita.

Questi standard – validi fino al 2005 – sono stati sostituiti e raggruppati dalle versioni successive:

- **ISO 14040:2006** - gestione ambientale, valutazione del ciclo di vita, principi e struttura di riferimento;

- **ISO 14044:2006** - gestione ambientale, valutazione del ciclo di vita, requisiti e linee guida.

Grazie allo sforzo per sviluppare e uniformare la metodologia LCA nel corso dei decenni, oggi un'azienda è in grado di adottarla in diverse applicazioni. In questo modo si è fornito un approccio rigoroso tramite cui si possono analizzare gli effetti del ciclo di vita di un generico prodotto o servizio che hanno sul clima, sull'ambiente e sulla salute umana.

3.2 Considerazioni Generali

In accordo con gli standard ISO ([30], [12]), la LCA è definita come una tecnica di analisi per la compilazione e valutazione degli ingressi, delle uscite e dei potenziali impatti ambientali di un sistema prodotto durante il suo ciclo di vita. L'approccio di questa metodologia si basa sulla quantificazione di tutti i flussi di materia ed energia e le emissioni che interessano l'intero ciclo di vita - *dalla culla alla tomba* - di un sistema prodotto, inteso anche come un processo o un servizio. Pertanto si propone la definizione chiara, trasparente e il più oggettiva possibile di un modello del sistema in grado di descrivere la totalità dei flussi e delle emissioni che realmente lo coinvolgono durante ogni fase di vita. Pertanto, lo studio racchiude tutte le operazioni, dall'estrazione e approvvigionamento delle materie prime richieste, fino allo smaltimento, passando attraverso l'utilizzo e il consumo. L'intento è quello di fornire una valutazione estensiva e rigorosa degli impatti ambientali che interessano tutte le attività coinvolte nel sistema, in funzione agli obiettivi e al campo di applicazione prefissati.

L'analisi LCA risulta strutturata in 4 fasi [30]:

1. fase di definizione dell'obiettivo e dello scopo;
2. fase di analisi d'inventario;
3. fase di valutazione degli impatti ambientali;
4. fase di interpretazione.

Lo standard ISO 14040:2006 fornisce le definizioni necessarie e descrivere la struttura dell'indagine, mentre lo standard ISO 14044:2006 si occupa di approfondire le indicazioni generali fornite dalla norma precedente e lo sviluppo di ognuna delle quattro fasi obbligatorie previste nell'analisi LCA.

L'indagine prevede un approccio iterativo durante le varie fasi in modo da integrare o affinare lo studio, in modo che risulti quanto più attinente agli scopi e agli obiettivi inizialmente fissati. La Figure3.1 riporta schematicamente la relazione che intercorre tra le 4 fasi di LCA.

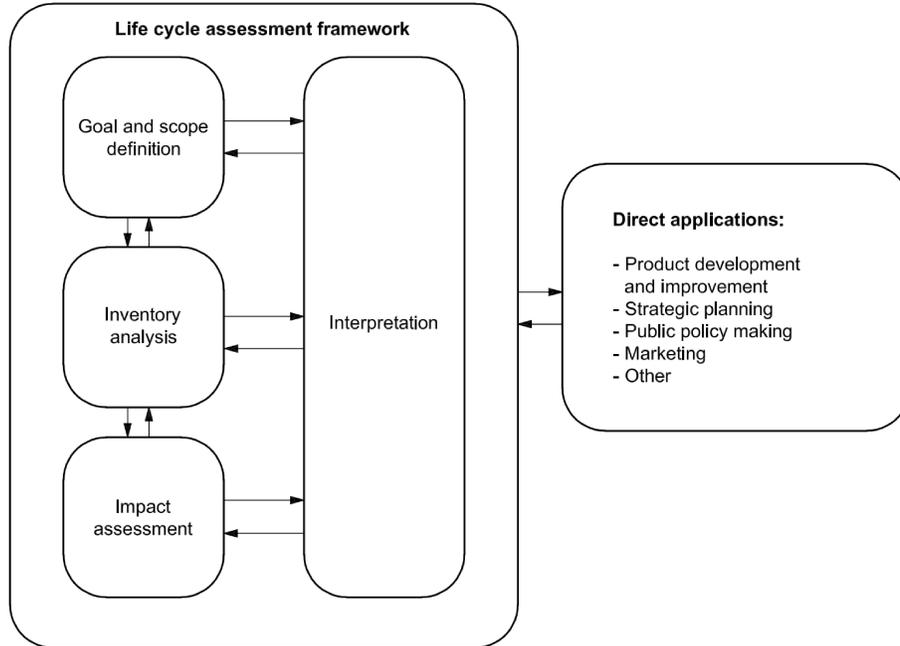


Figura 3.1: La struttura dell'indagine LCA ([30]).

3.2.1 SimaPro e archivio Ecoinvent

Esistono diversi software per l'implementazione di algoritmi per la modellazione dell'analisi LCA. Il più diffuso e accreditato, utilizzato anche nel presente elaborato di tesi, è il software *SimaPro*.

SimaPro è uno strumento professionale che offre la possibilità di modellare e analizzare gli impatti ambientali di cicli di vita complessi in modo trasparente e sistemico grazie ad un'interfaccia utente strutturata sulle varie fasi dell'indagine LCA. Il maggiore vantaggio di questo software è dato dall'integrazione degli archivi e dei metodi di calcolo più recenti e riconosciuti in campo scientifico. In particolare, tra i vari database presenti su SimaPro, si sottolinea *Ecoinvent*, che verrà utilizzato in questo elaborato di tesi. Ecoinvent permette di attingere ai dati secondari associati ad una vasta gamma di processi o attività su cui non sono stati registrati direttamente i flussi

durante la fase d'inventario (LCI). Il database consente agli utenti di coprire svariati settori a livello globale e regionale. Inoltre, riporta i metodi di caratterizzazione ambientale (ReCiPe 2016, IPCC 2021) per valutare l'effetto ambientale potenziale dei dati raccolti nella fase d'inventario su certe categorie d'impatto e indicatori durante un determinato orizzonte temporale.

3.3 Standard ISO 14040:2006

Come già sottolineato, la struttura e le richieste della tecnica di analisi LCA sono fissate dalle normative ISO 14040:2006 e 14044:2006. Di seguito si analizzano in dettaglio i principi, le definizioni e le quattro fasi che interessano tale metodo.

3.3.1 Principi introdotti dallo standard

I principi guida su cui si basa l'esecuzione di una LCA sono:

Attenzione all'ambiente: la LCA affronta gli aspetti e gli impatti ambientali di un sistema prodotto. Le valutazioni economiche e gli aspetti sociali non fanno parte tipicamente dello scopo dell'analisi LCA;

Trasparenza: data la complessità del metodo, la trasparenza è un principio essenziale da rispettare durante l'esecuzione dello studio al fine di una corretta interpretazione dei risultati;

Completezza: considerate le interrelazioni tra diversi sistemi, è necessario includere tutti gli aspetti e gli elementi dell'ambiente naturale, della salute umana e delle risorse per mantenere una comprensione precisa e globale del sistema e valutare i possibili compromessi o le soluzioni;

Priorità all'approccio scientifico: lo studio LCA deve preferire sempre approcci e assunzioni basati su criteri scientifici. Solo nel caso non fosse presente alcun metodo o suggerimento scientifico, allora sarebbe possibile adottare approcci - comunque appropriati e giustificati - basati su una scelta di valore sociale o economico.

3.3.2 Definizioni

Le principali definizioni utilizzate dall'analisi LCA e riportate dalla ISO 14040:2006 sono:

- **prodotto** - qualsiasi bene o servizio;
- **processo** - insieme di attività interconnesse che trasformano gli ingressi in uscite;
- **rifiuto** - sostanza od oggetto che si vuole o si deve smaltire;
- **flusso elementare** - materia o energia prelevata dall'ambiente senza una precedente trasformazione umana, materiale o energetica, che entra nel sistema oggetto di studio e successivamente viene rilasciata da esso in ambiente senza una ulteriore trasformazione. Comprende l'uso di risorse e l'emissione in aria, acqua e suolo relativi al sistema prodotto;
- **flusso di energia** - ingresso o uscita a/da un processo elementare o sistema prodotto, misurato in unità di energia;
- **materia prima** - materiale primario o secondario utilizzato per produrre un prodotto;
- **unità funzionale** - quantifica le prestazioni di un sistema prodotto da utilizzare come unità di riferimento;
- **input, output** - prodotto, materiale o energia che entra/esce in/da un processo elementare;
- **flusso intermedio** - flusso di prodotti, materiali o energia che si verifica tra processi unitari del sistema prodotto oggetto di studio;
- **emissioni** - emissioni in aria e scarichi nell'acqua e nel suolo;
- **confine del sistema** - insieme di criteri per identificare quali processi elementari fanno parte di un sistema prodotto;
- **processo elementare** - il più piccolo elemento considerato nell'analisi d'inventario del ciclo di vita per il quale sono misurati i dati di ingresso e di uscita;
- **categoria finale** - (*category endpoint*) caratteristica o aspetto dell'ambiente naturale, della salute umana o delle risorse, che identifica un problema ambientale fonte di preoccupazione;
- **fattore di caratterizzazione** - fattore derivato da un modello di caratterizzazione e utilizzato per convertire un risultato dell'analisi d'inventario all'unità di misura adottata dall'indicatore di categoria ambientale;

- **categoria d'impatto** - classe che rappresenta un insieme di problemi ambientali a cui possono essere associati i risultati dell'analisi d'inventario del ciclo di vita;
- **indicatore di categoria d'impatto** - quantificazione di una categoria d'impatto;
- **meccanismo ambientale** - sistema di processi fisici, chimici e biologici per una determinata categoria d'impatto, che collega i risultati dell'analisi d'inventario del ciclo di vita di un sistema prodotto agli indicatori della categoria e alla categoria finale (endpoint);

Sistema prodotto

Lo standard ISO 14040:2006 pone particolare attenzione alla definizione del *sistema prodotto* in grado di fornire il prodotto o il servizio oggetto di studio della LCA.

Per sistema prodotto s'intende un sistema caratterizzato da una o più funzioni specifiche che non può essere definito solo in termini di prodotto finale. In particolare, il sistema prodotto è identificato da confini precisi e al suo interno risulta composto da un insieme di processi e di attività riportate in forma di processi elementari. Questi processi elementari sono interconnessi tra loro da flussi intermedi, mentre i flussi di prodotto collegano altri sistemi prodotto. Il sistema prodotto e l'ambiente esterno interagiscono attraverso flussi elementari. Si riporta in Figure 3.2 una rappresentazione generale.

Un sistema così modellizzato presenta flussi elementari e di prodotto in ingresso e in uscita dai suoi confini. Tale organizzazione interna dei processi facilita la realizzazione di un modello analogico con un livello di dettaglio da stabilire in funzione allo scopo e all'obiettivo dell'analisi LCA.

3.3.3 Fase 1: Definizione dell'obiettivo e scopo

La fase di definizione dello scopo e degli obiettivi di uno studio LCA riveste un'importanza cruciale in quanto costituisce il momento in cui si delineano le decisioni di massima rilevanza. In accordo con le intenzioni e gli interessi specifici, si delimita il contesto dell'indagine e si stabiliscono le linee guida per le successive fasi di analisi. Questo processo implica la determinazione del grado di dettaglio dello studio, la qualità dei dati richiesta, la selezione dei parametri per la stima dell'impatto ambientale e le possibili interpretazioni all'interno del quadro valutativo. Il risultato è determinato da iterazioni ripetute nel corso dell'indagine LCA per raggiungere una descrizione quanto più realistica e affidabile del sistema in esame. Tra le molteplici considerazioni, si deve decidere se – e in che modo – una commissione di esperti debba

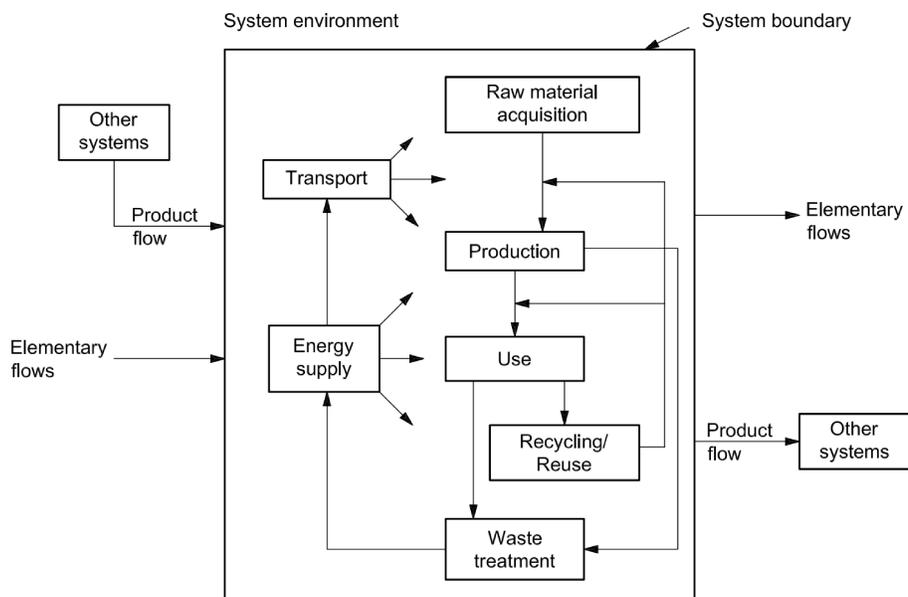


Figura 3.2: Schema generale di un sistema prodotto ([30]).

redigere una valutazione esterna (analisi critica), come previsto dalle normative ISO 14040. Infatti, tale procedura si dimostra particolarmente utile per condurre studi comparativi aperti alla consultazione pubblica.

Obiettivo dello studio

La fase di definizione degli obiettivi prevede di stabilire il campo di applicazione e gli interessi specifici che motivano lo studio LCA. Allo stesso modo è necessario indicare in modo chiaro i soggetti a cui si rivolge l'analisi.

Nel caso risulti necessario, occorre mettere in luce il contributo che la LCA apporta al processo decisionale e valutare se l'indagine sia interconnessa con altre, ad esempio di natura economica, tecnologica o sociale. In fine, quando si comunicano i risultati, è essenziale esplicitare quali sono le questioni a cui la LCA può fornire risposte adeguate e quali non rientrano nel suo ambito di applicazione.

Scopo dello studio

La definizione dello scopo dall'analisi LCA prevede che vengano identificati i seguenti aspetti relativi al caso studio:

- Sistema prodotto;

- funzioni del sistema prodotto;
- unità funzionale;
- confini del sistema - definiscono l'interfaccia con l'ambiente esterno e gli altri sistemi di prodotto; indicano quali processi elementari e quali flussi da misurare sono inclusi o esclusi dall'indagine in funzione dello scopo e obiettivo;
- procedura di allocazione;
- metodo LCIA e tipi d'impatto;
- interpretazione da utilizzare;
- requisiti dei dati;
- assunzioni;
- limitazioni;
- qualità dei dati;

Inoltre, possono essere introdotti principi di allocazione, criteri di *cut-off* (criterio di massa, di energia o di rilevanza ambientale) per eventuali esclusioni di flussi elementari in ingresso e uscita, ed assunzioni. E' necessario stabilire anche il livello finale dello studio: *gate to gate*, che interessa le operazioni interne al ciclo produttivo; *cradle to gate*, in cui vengono inclusi anche le operazioni secondarie a monte come l'estrazione di materie prime; *cradle to grave*, dove si coinvolge tutto il ciclo di vita globale del prodotto e non solo la sua produzione. L'analisi LCA più completa considera quindi tutte le attività e i flussi di un prodotto dalla nascita fino alla morte, intesa come scenario di fine vita.

3.3.4 Fase 2: Analisi d'inventario (LCI)

La prima fase permette di indicare in modo chiaro e quanto più univoco possibile tutte le intenzioni e i presupposti dell'analisi LCA, fornendo una pianificazione iniziale per la seconda fase: l'analisi d'inventario.

Nell'analisi d'inventario si registrano e si calcolano tutti i dati relativi ai flussi che intercorrono tra le operazioni elementari incluse nei confini del sistema prodotto. Per facilitare l'organizzazione dei dati raccolti, è possibile creare un diagramma di flusso che rappresenta la struttura del modello complessivo.

Una volta definita la rete di connessioni tra le varie parti e processi del sistema, si passa a tracciare il bilancio di massa e di energia del sistema complessivo. Tutti i flussi di materia e di energia che attraversano i confini del sistema devono essere misurati e riferiti all'unità funzionale. Siccome la fase d'inventario permette una conoscenza approfondita del sistema in esame, è possibile introdurre in modo iterativo nuovi requisiti sui dati e nuove assunzioni che permettono di conseguire in modo più pertinente gli scopi e gli obiettivi prefissati nella fase 1.

L'analisi d'inventario inizia con una fase preliminare in cui si sviluppa un diagramma di flusso che mette in evidenza le unità di processo da includere nel modello. Successivamente, si procede con una descrizione approfondita di ciascuna unità. È essenziale fornire un elenco delle unità di misura, accompagnato da una dettagliata esposizione delle metodologie adottate per la raccolta dei dati. Il processo di acquisizione dati può richiedere un investimento significativo di risorse e di tempo.

Origine dei dati

La ISO 14044:2006 classifica le fonti di raccolta dati in 3 tipologie:

- *fonte primaria*: dati raccolti direttamente dal sito del processo, questionari e interviste;
- *fonte secondaria*: dati forniti da dataset (ad esempio, Ecoinvent), rapporti ambientali, articoli scientifici e precedenti analisi LCA;
- *fonte terziaria*: dati ottenuti da stime o coefficienti tecnici. Per ragioni di accuratezza dell'indagine LCA, sono sempre preferibili – quando disponibili – le fonti primarie. In particolare per i processi giudicati particolarmente importanti al fine delle conclusioni dello studio, si devono indicare se sono rispettati i seguenti parametri di qualità di informazione imposti sui dati: periodo temporale; località geografica, tecnologia, precisione, completezza, rappresentatività del processo, riproducibilità, fonte dei dati, incertezza.

Allocazione

In genere i processi industriali presentano diversi prodotti e non sono basati su uno sviluppo lineare degli ingressi e uscite. Infatti possono presentare cicli interni o recuperi di energia.

Il processo di *allocazione* viene definito da [30] come "la procedura di ripartizione degli ingressi e uscite di un processo elementare (o di un sistema prodotto) a diversi prodotti". Quando si individuano dei processi condivisi da diversi sistemi prodotto è opportuno rispettare i seguenti passaggi:

1. quando possibile evitare l'allocazione dei flussi – attraverso una suddivisione del processo in sottoprocessi con i relativi flussi da registrare, oppure un'espansione dei confini del sistema includendo altre funzionalità e co-prodotti;
2. se l'allocazione non può essere evitata, gli ingressi e le uscite dovrebbero essere ripartiti tra i differenti prodotti secondo una relazione fisica che li lega – ad esempio seguendo un principio di responsabilità sui flussi che sia proporzionale alla frazione di peso con cui ogni prodotto del sistema contribuisce;
3. se non è possibile un'allocazione basata su relazioni fisiche tra flussi e prodotti, allora si può adottare un principio economico in cui la base di proporzionalità degli ingressi e delle uscite su un certo prodotto dipende per esempio dal valore economico (profitto).

Sebbene la norma ISO 14044 descriva la procedura d'allocazione, al contempo raccomanda di evitarla quando possibile poiché riduce l'accuratezza della fase d'inventario. Piuttosto, suggerisce di aumentare il grado di dettaglio con cui analizzare i processi elementari interessati.

Allocazione per riuso o riciclo La procedura esposta nel precedente paragrafo risulta applicabile anche nei casi di riuso e riciclo. Tuttavia, in questi scenari è necessario considerare eventuali variazioni delle proprietà intrinseche dei materiali e descrivere come si sono scelti i confini del sistema prodotto.

In caso di riciclo, riuso o di recupero di energia (rigenerazione) è importante stabilire come gli ingressi e le uscite associate ai processi elementari – per l'estrazione e la trasformazione delle materie prime o lo smaltimento finale – sono condivisi tra i diversi sistemi prodotto.

Le procedure di allocazione nel caso di riuso o riciclo sono riassunte concettualmente dalla ISO 14044:

- a) allocazione *ad anello chiuso* – si evita l'allocazione quando viene utilizzato materiale secondario (materiale riutilizzato o riciclato) invece di materiale *vergine*; rientrano in questa casistica anche i sistemi prodotto *ad anello aperto* dove il processo di riciclo non altera le proprietà dei materiali, mentre in quelli in cui si effettua il primo uso di materiale vergine si segue l'allocazione ad anello aperto;
- b) allocazione *ad anello aperto* – procedura applicata a sistemi prodotto ad anello aperto dove i materiali sono riciclati attraverso altri sistemi prodotto e subiscono delle variazioni nelle proprietà intrinseche.

In Figure 3.3 si visualizza lo schema concettuale delle procedure applicabili in questi scenari di fine vita.

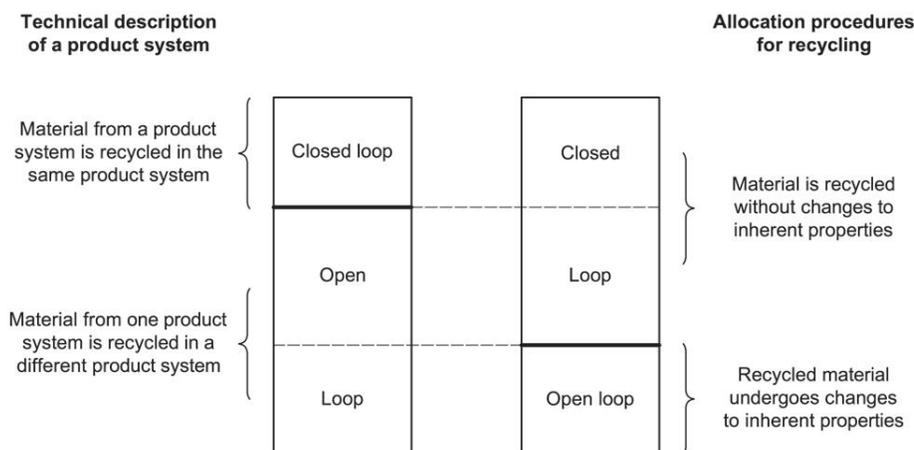


Figura 3.3: Schema di distinzione tra descrizione tecnica di un sistema prodotto e le procedure di allocazione per il riciclo.

3.3.5 Fase 3: Valutazione dell'impatto ambientale (LCIA)

La fase di valutazione degli impatti (LCIA) consente di stimare gli impatti ambientali potenziali associati ai flussi di massa ed energia descritti dall'inventario del sistema prodotto (LCI).

Questa fase richiede un modello di caratterizzazione che esprima una relazione tra un certo flusso e l'entità di alterazione ambientale da esso introdotta. Permette, quindi, di tradurre i risultati d'inventario della LCI in specifici effetti ambientali. Per tale ragione è necessario includere i seguenti passaggi:

1. selezione delle categorie d'impatto, degli indicatori di categoria e del modello di caratterizzazione ambientale (con relativa letteratura o spiegazione);
2. assegnazione dei risultati della LCI alle categorie d'impatto scelte (*classificazione*);
3. calcolo degli indicatori di categoria d'impatto (*caratterizzazione*).
4. calcolo dell'entità dei risultati degli indicatori di categoria rispetto alle informazioni di riferimento (*normalizzazione*);

Si osserva che il passaggio 1 deve essere motivato e descritto in funzione dello scopo e dell'obiettivo dello studio LCA. La selezione delle categorie d'impatto dovrebbe interessare un insieme completo di effetti ambientali coinvolti con il sistema studiato. Si osserva che gli indicatori di categoria misurano i rispettivi meccanismi ambientali

a cui si riferiscono e consentono di mettere in relazione le categorie d'impatto e le categorie d'impatto finali (*endpoint*). La [12] raccomanda l'adozione di una metodologia di valutazione ambientale riconosciuta a livello internazionale.

Esistono anche altri passaggi facoltativi come la normalizzazione, l'aggregazione, la ponderazione dei risultati e analisi che interessano la qualità dei dati.

Modelli di caratterizzazione

- **IPCC 2021 (GWP) 100**: definisce la cosiddetta impronta carbonica attraverso opportuni fattori di caratterizzazione delle emissioni d'aria che causano potenzialmente un effetto diretto sul riscaldamento globale considerando un orizzonte temporale di 100 anni.
- **ReCiPe 2016 Midpoint (H)**: suddivide gli effetti ambientali del ciclo di vita di un sistema prodotto in 18 categorie d'impatto, dove il termine *midpoint* si riferisce agli effetti diretti dei rilasci in ambiente e *H* indica un approccio di tipo gerarchico.

Classificazione I risultati d'inventario (LCI) sono associati a specifiche categorie d'impatto che possono avere anche flussi in comune. Ad esempio le emissioni in aria di gas CFC implicano sia riscaldamento globale sia riduzione dello strato di ozono in atmosfera.

Caratterizzazione Il calcolo degli indicatori viene effettuato seguendo un metodo di caratterizzazione – documentato e riconosciuto – in grado di convertire i risultati della LCI in risultati numerici utilizzando fattori di caratterizzazione che riportano ad una certa unità di misura. Questa procedura consente di ottenere la stima quantitativa del potenziale d'impatto sulle varie categorie.

Normalizzazione Si tratta di un calcolo volto a stabilire la rilevanza degli indicatori di categoria rapportandoli ad un valore di riferimento, ad esempio gli ingressi e le uscite complessive riferite ad una certa area geografica.

Il processo di normalizzazione può migliorare la comprensione dei risultati degli indicatori delle categorie d'impatto relative al sistema analizzato.

3.3.6 Fase 4: Interpretazione

La fase finale d'interpretazione ha lo scopo di presentare i risultati delle fasi di LCI e LCIA, nonché di chiarire il loro significato e le possibili limitazioni. Le conclusioni

dello studio emerse dai risultati dell'analisi d'inventario e dalla stima dell'impatto ambientale, devono essere identificati e valutati in termini di completezza, sensibilità e coerenza con riferimento allo scopo e all'obiettivo. Le ipotesi e le assunzioni formulate nella prima fase dell'analisi devono essere richiamate al fine di esprimere conclusioni e fornire raccomandazioni appropriate in merito al sistema prodotto in esame.

Capitolo 4

Obiettivi e scopo

Il presente capitolo richiama le principali motivazioni che hanno portato all'elaborazione del lavoro di tesi. Nei seguenti paragrafi si descrivono gli obiettivi e le informazioni richieste dalle norme ISO 14040 e 14044 al fine di definire in modo univoco e trasparente la prima fase dell'analisi LCA sul ciclo di vita del prototipo *Alétheia*.

Come anticipato nel precedente capitolo, si utilizzerà il software *SimaPro 9.5* per il computo degli impatti ambientali relativi ai dati primari d'inventario registrati nelle varie fasi di produzione e ai dati secondari provenienti dagli archivi *Ecoinvent 3* e *ELCD* per le restanti fasi del ciclo di vita.

4.1 Obiettivi

L'obiettivo primario dello studio effettuato secondo il metodo LCA è fornire la valutazione delle prestazioni ambientali relative all'intero ciclo di vita del prototipo da competizione velica *Alétheia*. E' la prima volta che il gruppo Metis può contare su una valutazione quantitativa degli impatti ambientali complessivi di una sua imbarcazione. Infatti l'elaborato di tesi si auspica di fornire una fonte d'informazione preziosa per futuri studi LCA utili al team. Inoltre lo studio LCA fornisce un esempio di applicazione del metodo all'interno del settore nautico ed accresce la comprensione del legame che intercorre tra la progettazione e il tema della sostenibilità.

Si evidenziano in dettaglio le ragioni che hanno condotto all'elaborazione dello studio LCA:

- calcolare l'entità degli impatti ambientali connessi all'intero ciclo di vita dell'imbarcazione in esame;

- ottenere delle indicazioni quantitative circa gli impatti ambientali interessati nelle varie fasi del sistema prodotto in esame, in particolare delle fasi di pre-produzione, di produzione e di fine vita;
- individuare gli *hot-spots* critici dal punto di vista ambientale delle varie fasi del ciclo di vita;
- esprimere una gerarchia ambientale delle azioni possibili da intraprendere in fase di progettazione che possano condurre ad un miglior *eco-design* di un successivo prototipo;
- fornire un esempio di applicazione del metodo LCA come strumento valido per migliorare la sostenibilità del settore nautico;
- riportare le strategie di acquisizione dati adottate durante la fase d’inventario e i limiti riscontrati in modo da fornire una base iniziale per strutturare una campagna di acquisizione affidabile che ottimizzi le risorse investite;

Le informazioni acquisite dallo studio sono pertanto rivolte al team come soggetto direttamente coinvolto e interessato all’analisi.

4.2 Campo di applicazione

4.2.1 Funzione e unità funzionale

La funzione del sistema prodotto in esame è la realizzazione di un prototipo di barca a vela da competizione di classe *R3*, come descritto nel capitolo 2. L’unità funzionale di riferimento dell’intero studio LCA è l’imbarcazione *Alétheia*, costituita dai seguenti elementi:

- master;
- stampo;
- scafo;
- strutture interne;
- coperta.

I sopracitati componenti costituiscono i 5 elementi fondamentali per realizzare la funzione del sistema prodotto.

L'orizzonte temporale assunto per tutti i componenti risulta pari a 7 anni. La stima temporale si basa sui materiali utilizzati, sui processi di realizzazione dei vari componenti, sulle modalità di manutenzione e sulla vita utile riscontrata dai precedenti prototipi del team.

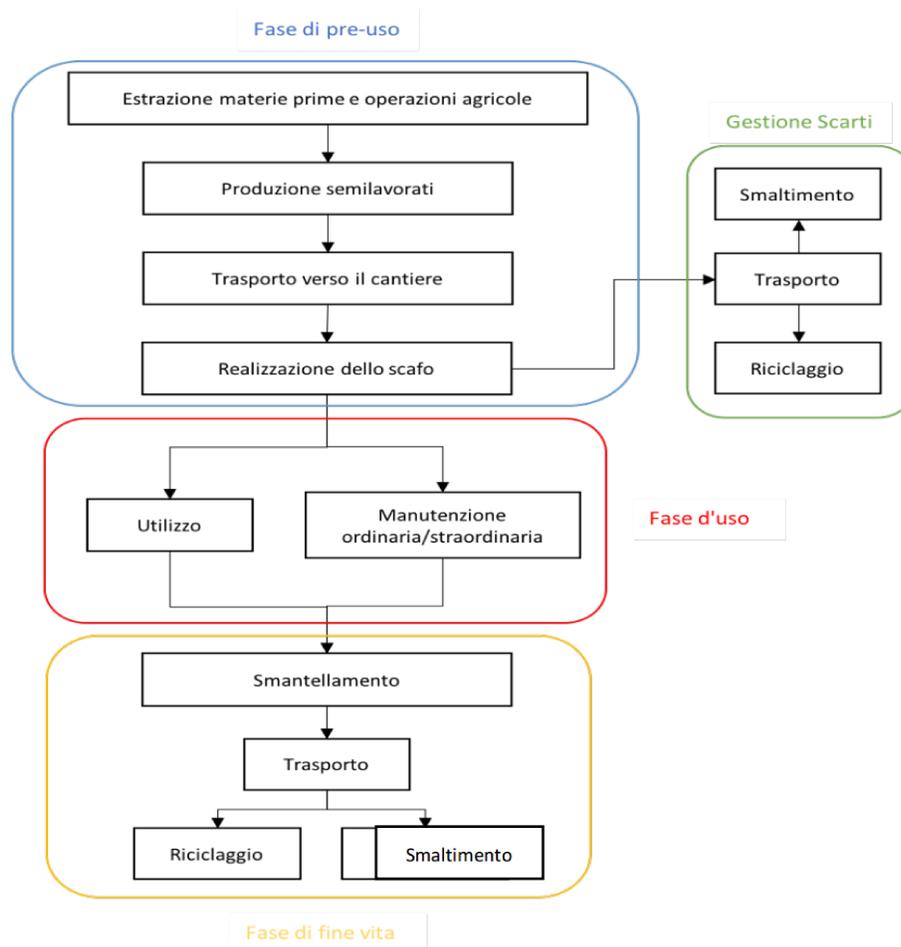


Figura 4.1: Confini del sistema relativo al ciclo di vita in esame.

4.2.2 Confini del sistema

I confini del sistema individuano la sfera d'inclusione dei vari sottosistemi coinvolti nell'indagine. Il sistema prodotto e gli altri sistemi coinvolti durante il corso della

vita dell'oggetto esaminato sono caratterizzati da flussi elementari (materie prime estratte, rilasci, energia) di scambio con l'ambiente naturale esterno.

L'obiettivo fissato per lo studio prevede di adottare confini che considerino i sistemi coinvolti nell'intero ciclo di vita dell'unità funzionale. L'approccio adottato è denominato *from cradle to grave* per indicare proprio l'inclusione di tutti i processi previsti dal momento dell'estrazione delle materie prime fino al momento dello smaltimento e quindi *morte* del prodotto. In Figure4.1 si rappresentano le 4 fasi principali racchiuse dal ciclo di vita del sistema.

La disponibilità di archivi d'inventario dei processi interessati nelle varie fasi di vita di un prodotto consente di includere attraverso dati secondari i processi che riguardano l'estrazione delle materie prime necessarie al sistema prodotto – *from cradle to entry gate* – e di modellare i flussi che accompagnano le fasi di utilizzo e di fine vita del prodotto stesso – *from exit gate to grave*.

I dati primari registrati nella tesi fanno riferimento al solo sistema produttivo interno ai laboratori didattici dell'università – *from gate to gate* – e ai processi di trasporto coinvolti nella ricezione dei materiali.

4.2.3 Qualità dei dati utilizzati

Dati primari

I dati primari sono caratterizzati dall'insieme delle misurazioni effettuate nel sito produttivo attraverso la compilazione di schede di acquisizione e dei dati di progetto disponibili. L'inserimento dei dati primari ha previsto in alcuni casi l'utilizzo dei documenti di progettazione (file CAD) al fine di facilitare l'inclusione dei dati d'inventario complessi da determinare. Nonostante la scelta possa introdurre una fonte d'incertezza sui flussi reali di alcuni processi, si è deciso di impiegare questa strategia considerando il grado di accuratezza progettuale fornito dal reparto progettazione del team Metis e i limitati mezzi di acquisizione utili allo scopo d'inventario. La modalità d'inserimento dati attraverso valori di progetto si reputa conforme agli obiettivi prefissati dall'analisi e risulta supportata anche dallo studio LCA riportato in [9].

Si osserva che la procedura di registrazione dei materiali coinvolti nella fase di costruzione dei diversi prodotti ha previsto una verifica a valle di alcuni processi attraverso il riscontro dei materiali rimasti in eccesso e gli ordini richiesti ai fornitori. Le motivazioni che riguardano questa modalità di registrazione dei dati è dovuta ad una discordanza tra l'inizio del presente lavoro di tesi con l'inizio dei primi processi effettuati sul master.

Dati secondari

La modellazione dei processi compresi nelle fasi di estrazione delle materie prime, di lavorazione delle stesse (intese come fasi di pre-produzione) e di smaltimento si basano sull'archivio d'inventario *Ecoinvent 3*. Infatti per lo studio LCA si preferisce un database largamente riconosciuto e in continua fase di validazione e ampliamento. Ecoinvent riporta i dati acquisiti da varie filiere (energetica, agricola, trasporti, ecc. . .) e descrive l'inventario del ciclo di vita di ogni processo rispetto a dei precisi confini geografici ed ipotesi riportate all'interno dei *process record* accessibili attraverso il software SimaPro.

La tipologia dei dati reperiti dall'archivio è di tipo *unit*. La scelta di utilizzare dati di tipo *unit* è dovuta all'interesse di aumentare il grado di dettaglio dell'indagine facendo eseguire a SimaPro il calcolo dei vari flussi d'inventario in ingresso e in uscita ai processi elementari che caratterizzano il modello analogico del sistema.

Il metodo di allocazione utilizzato dall'archivio è noto come *Allocation at Point Of Substitution* (o APOS). Ne consegue la scelta di un approccio d'allocazione in cui la responsabilità sui rifiuti (oneri) è condivisa tra i produttori e gli utenti successivi che beneficiano dei processi di trattamento utilizzando prodotti generati da questi ([7]). I processi introdotti dal database rappresentano i mercati di prodotti o servizi a livello regionale, nazionale, o globale. I processi riportati nella sezione *Market* includono i flussi d'ingresso della produzione in uno o più Paesi, oltre ai flussi richiesti in ingresso ai processi di trasporto. Si utilizza questa tipologia di dati secondari quando non si conoscono i dati provenienti dai fornitori. In SimaPro vengono riportati separatamente nella sezione *Transformation* i processi relativi agli ingressi per la produzione di prodotti o servizi e le emissioni ed estrazioni delle risorse associate, escludendo i processi di trasporto.

Il secondo database utilizzato per l'analisi LCA è l'archivio *ELCD (the European reference Life Cycle Database)* che comprende dati sull'inventario del ciclo di vita provenienti da associazioni imprenditoriali a livello europeo e da altre fonti per i principali materiali, vettori energetici, trasporti e gestione dei rifiuti. Tuttavia quando presenti, si preferiscono i dati provenienti dall'archivio Ecoinvent.

L'archivio *Methods* riporta i metodi di caratterizzazione dei dati d'inventario per il calcolo dei rispettivi impatti ambientali.

Periodo temporale

Il periodo temporale della procedura di registrazione dati primari d'inventario è compreso tra il giorno 20/03/2022, attraverso i processi che hanno interessato il

master, e il giorno 16/09/2023, quando si sono ultimati i lavori di realizzazione della coperta di Alétheia.

Area geografica I dati primari sono stati acquisiti all'interno dei laboratori del dipartimento di ingegneria industriale della Università degli Studi di Padova.

Assunzioni e limitazioni

Il calcolo d'inventario e dei rispettivi impatti ambientali è stato eseguito in funzione delle seguenti ipotesi conformi agli obiettivi fissati per lo studio LCA:

- l'analisi comprende solo i 5 componenti precedentemente indicati e si trascurano tutti gli altri componenti utili al completamento dell'imbarcazione in esame (appendici, scassa deriva, armo, piano velico);
- si trascurano tutti i processi e i rispettivi flussi necessari alla realizzazione e al trasporto dei macchinari e degli strumenti utilizzati all'interno dei confini dei laboratori fissati per il ciclo produttivo;
- si trascura l'utenza dell'edificio intesa come illuminazione e riscaldamento;
- si trascura l'infrastruttura del dipartimento che ospita i laboratori;
- si trascurano le emissioni in aria avvenute nel corso dei processi elementari interni ai laboratori dell'ateneo;
- si trascurano i materiali di piccola dimensione reputati non significativi (guanti, viti, bulloni, consumabili, carta abrasiva, spatole, seghetti a mano, nastro da pacchi);
- si trascura il pianale d'appoggio del master;
- si trascura la fase di parcheggio dell'imbarcazione all'interno dell'edificio del dipartimento durante il periodo di inattività da allenamenti e dalle regate;
- si considerano i processi *transformation* per modellare le operazioni di trasporto dei materiali richiesti dal ciclo produttivo;
- si sono registrati solo i trasporti intercorsi con i fornitori presenti fuori dalla località di Padova;

- si trascurano dal conteggio d’inventario i materiali in eccesso di cui si farà effettivamente riutilizzo, o utilizzati anche per altri processi non pertinenti agli elementi indicati, in modo da evitare una responsabilità ambientale eccessiva che potrebbe falsare la fase d’interpretazione dei risultati.

Le limitazioni che interessano l’analisi LCA corrente riguardano i processi industriali di produzione delle fibre pre-impregnate impiegate nella realizzazione dello scafo su cui è richiesto un ampliamento degli attuali database d’inventario. Inoltre si è riscontrata un’incompletezza dei dati raccolti dal fornitore del processo di cottura dello scafo in autoclave. Le limitazioni evidenziate sono frutto di processi tecnologici recenti nel settore nautico ancora poco approfonditi in ottica LCA.

A fronte di queste osservazioni si suggerisce una maggiore attenzione nella raccolta dati per i suddetti processi in modo da incrementare l’accuratezza di future analisi.

4.2.4 Categorie d’impatto e metodo di caratterizzazione

Gli impatti ambientali riferiti ai consumi e ai rilasci in ambiente registrati durante l’intero ciclo di vita sono stati calcolati con il supporto di SimaPro 9.5 attraverso i metodi di caratterizzazione presenti nell’archivio *Methods*.

I metodi scelti sono:

- ReCiPe 2016 Midpoint (H);
- IPCC 2021 GWP 100.

I metodi indicati per la valutazione degli impatti si considerano affini agli obiettivi prefissati. Come indicato nel capitolo precedente, i metodi di caratterizzazione esprimono degli indicatori per ogni categoria d’impatto associati ai relativi fattori di caratterizzazione al fine di tradurre i risultati d’inventario in impatti ambientali potenziali.

Il metodo *ReCiPe Midpoint (H)* consente di definire 18 indicatori d’impatto associati ad altrettante categorie d’impatto (*midpoint*). I fattori di caratterizzazione sono scelti secondo una prospettiva *gerarchica*, ovvero si assumono delle aspettative temporali, di sviluppo tecnologico e di miglioramento nella gestione degli impatti rispettando una visione bilanciata, né ottimista né pessimista ([27]). In seguito sono state selezionate 14 categorie d’impatto che si sono reputate più significative in relazione agli obiettivi e al campo di applicazione dello studio. La selezione delle categorie si è basata anche sui risultati di normalizzazione, competenti al capitolo successivo, e sulle scelte assunte da studi LCA analoghi in ambito nautico ([24], [19], [31]). Le categorie d’impatto che si reputano significative per l’analisi sono le seguenti:

- *Global warming;*
- *Human cancerogenic toxicity*
- *Terrestrial ecotoxicity*
- *Freshwater ecotoxicity*
- *Marine ecotoxicity*
- *Terrestrial acidification*
- *Freshwater eutrophication*
- *Marine eutrophication*
- *Fine particulate matter formation*
- *Ozone formation: human health*
- *Ozone formation: terrestrial ecosystems*
- *Stratospheric ozone depletion*
- *Water consumption*
- *Fossil resource scarcity*

In Table4.1 si riportano le unità di misura degli indicatori d'impatto appartenenti alle categorie scelte. Il metodo *IPCC 2021* sviluppato dall'*Intergovernmental Panel on Climate Change* viene considerato come una metodologia ad impatto singolo con cui si valuta il danno ambientale di riscaldamento globale (o *global warming*) associati al meccanismo di riscaldamento per effetto serra. La caratterizzazione degli effetti ambientali viene definita su un orizzonte temporale di 100 anni. Nella versione 2021 del metodo disponibile su SimaPro è possibile esprimere i risultati sia in termini complessivi, attraverso l'usuale indicatore di massa di anidride carbonica equivalente ($kg CO_2eq$), sia suddividerli in 4 sottocategorie che discretizzano le fonti di appartenenza delle emissioni. In Table4.2 si evidenziano le categorie fornite dal metodo.

Categoria d'impatto	Unità
Global warming	kg CO2 eq
Stratospheric ozone depletion	kg CFC11 eq
Ozone formation, Human health	kg NOx eq
Fine particulate matter formation	kg PM2.5 eq
Ozone formation, Terrestrial ecosystems	kg NOx eq
Terrestrial acidification	kg SO2 eq
Freshwater eutrophication	kg P eq
Marine eutrophication	kg N eq
Terrestrial ecotoxicity	kg 1,4-DCB
Freshwater ecotoxicity	kg 1,4-DCB
Marine ecotoxicity	kg 1,4-DCB
Human carcinogenic toxicity	kg 1,4-DCB
Fossil resource scarcity	kg oil eq
Water consumption	m3

Tabella 4.1: Categorie d'impatto del metodo ReCiPe 2016 Midpoint (H).

Categoria d'impatto	Unità
GWP100 - fossil	kg CO2-eq
GWP100 - biogenic	kg CO2-eq
GWP100 - land transformation	kg CO2-eq

Tabella 4.2: Sottocategorie d'impatto di *global warming* del metodo IPCC 2021.

Capitolo 5

Analisi d’inventario (LCI)

La fase d’inventario dello studio LCA è stato sviluppata seguendo le indicazioni riportate dalle norme ISO14040 e ISO14044 ([30],[12]). I dati primari raccolti durante la fase LCI si riferiscono ai processi appartenenti al ciclo produttivo dei 5 componenti:

- master;
- stampo;
- scafo;
- strutture interne;
- coperta;

Per ogni insieme dei processi elementari su cui si è basata l’acquisizione dei dati primari. Le informazioni generali riguardanti la qualità dei dati fanno riferimento al capitolo 4 e di seguito sono riportate le principali assunzioni sui dati d’inventario per ogni fase di produzione. I dati primari relativi alle 5 fasi di produzione sono stati inseriti nel software SimaPro per essere successivamente caratterizzati attraverso i metodi di valutazione degli impatti scelti. Le assunzioni prese nella fase d’inventario sono dettate dai limiti riscontrati sul sistema di acquisizione dati dei laboratori ospitanti il ciclo produttivo.

5.1 Analisi dei flussi tra le unità di processo

In questo paragrafo si analizzano tutti i processi elementari che concorrono a descrivere il ciclo produttivo. I processi sono organizzati in 5 macro-fasi, ognuna delle quali è

associata al rispettivo componente. I piani di laminazione dello scafo, delle strutture interne e della coperta sono stati introdotti al capitolo 2.

Di seguito verrà descritta brevemente la lavorazione compiuta in ogni processo elementare. Il computo dei materiali e dell'energia dei processi verrà esposto al termine del paragrafo di ogni elemento.

Siccome la realizzazione dei 5 elementi fondamentali avviene su una pianificazione delle operazioni sviluppata sequenzialmente, è stato possibile evitare il problema di allocazione dei flussi a due o più processi. Al termine di ogni paragrafo verrà riportata la sintesi della sequenza dei processi elementari seguiti in fase di lavorazione.

Si osserva che la fase di registrazione dati ha considerato solo gli scarti dei materiali effettivamente non riutilizzabili ed ha previsto una verifica delle quantità grazie ai valori forniti dai documenti di progetto (modalità suggerita anche da [9]) e dagli ordini richiesti ai fornitori. Questa procedura è stata adottata quando le caratteristiche del processo elementare non hanno consentito una registrazione puntuale dei flussi. Infine, i consumi di energia elettrica avvenuti durante i processi di produzione rappresentano una stima fornita dagli stessi operatori.

5.1.1 Master

Il master è il primo elemento realizzato dal ciclo produttivo ed essenziale per la produzione successiva dello stampo. Il processo di realizzazione prevede il taglio delle stese e del paramezzale – le misure degli elementi sono state fornite dai documenti di progetto del team – di pioppo da 10mm che costituiscono la struttura interna del master. Si procede all'assemblaggio dei pezzi realizzati e al fissaggio dell'assieme al pianale. In Figure 5.1 si visualizza il risultato ottenuto. Successivamente si passa al taglio con seghetto manuale dei pannelli in compensato flessibile di pioppo da 5mm in modo da ricoprire tutte le porzioni della struttura interna precedentemente assemblate. Il fissaggio dei pannelli di legno alla struttura avviene per mezzo della colla vinilica. Le operazioni che interessano l'applicazione dello stucco consentono di chiudere le fessure tra pannelli. In Figure 5.2 si mostra quanto descritto.

Al termine della fase di stuccatura e levigatura è prevista l'applicazione del fondo epossidico. Questo processo ha richiesto una notevole quantità di ore di lavoro in quanto l'applicazione delle mani di fondo si alternavano a fasi di levigatura con carta abrasiva a differente grana. La figura Figure 5.3 mostra il risultato finale di tali operazioni. Una volta ottenuta una superficie adeguatamente liscia si può procedere con l'applicazione di 2 mani di smalto poliuretano bicomponente all'interno di una camera dotata di cappa d'aspirazione. Si prosegue con la fase di lucidatura mediante lucidatrice con carta abrasiva a grana fine. In Figure 5.4 si può osservare il master lucidato.



Figura 5.1: Struttura interna del master in seguito l'assemblaggio delle seste e paramezzale.



Figura 5.2: Operazione di stuccatura della superficie esterna del master chiusa dai pannelli flessibili.

#	processo elementare	materiali coinvolti	materiali usati	strumenti	fornitore
1	fresatura seste e paramezzale	compensato di pioppo sp.10mm		cnc	Pianiga (VE)
2	assemblaggio	"		operatori	
3	fresaggio a pianale	"	colla vinilica	seghetto a mano	Padova
4	taglio pannelli	pannelli di compensato multilix di pioppo sp. 5mm			
5	incollaggio pannelli	"	colla vinilica		
6	Stuccaggio fessure pannelli	"	stucco poliestere per legno	spatola	Padova
7	levigatura	"	carta abrasiva		
8	applicazione fondo epossidico	"	fondo epox PF15030, catalizzatore al 20% (PF01505), diluente polivalente al 20%	rullo	Verona
9	camera di aspirazione per verniciatura	"	tubi pvc x telaio		Vicenza
10	levigatura	"	carta abrasiva	operatore	
11	2 mani di smalto poliuretano (colore blu)	"	smalto poliuretano (RAL 5015), diluente al 10%	rullo	Torviscosa (UD)
12	lucidatura	"		lucidatrice (400W x 2h)	
13	taglio pannelli multilix di scarto	"		seghetto a mano	
14	incollaggio pannelli x barriere	"	colla vinilica		Padova
15	applicazione del distaccante	"	nastro distaccante (scotch da pacchi)		
16	1 mano di cera distaccante	pannelli multilix (barriere)	cera distaccante (FR16/1000P alte temperature)	panno	Milano
17	7 mani di distaccante	"	distaccante semipermanente (CR1 Easy-Lease Chemical Release Agent)	panno	Olanda

Tabella 5.1: Processi elementari della fase di realizzazione del master.

La fase finale del processo produttivo del master prevede: il taglio di pannelli flessibili di pioppo per realizzare le barriere ai margini del master, l'incollaggio delle stesse sui bordi del master, l'applicazione di 1 mano di cera sulla superficie delle barriere e 7 mani di agente distaccante semipermanente sulla superficie del master.

La Table5.1 riporta la sequenza dei processi che si susseguono nel ciclo produttivo del master e in Table5.2 si riporta il computo dei materiali.

Assunzioni Le seste e il paramezzale sono ottenuti da un taglio cnc eseguito da un fornitore esterno. La stima della quantità di compensato di pioppo da 5mm e da 10mm si è basata sui valori di superficie forniti dai documenti CAD. Siccome non è stato possibile registrare i flussi sul processo di taglio, si è deciso di stimare



Figura 5.3: Risultato ottenuto al termine del processo di carteggiatura.



Figura 5.4: Master lucidato all'interno della camera d'aspirazione.

l'operazione attraverso i dati secondari riportati nel database Ecoinvent per un macchinario (*power sawing*) dotato di sega elettrica impegnata per un tempo di lavoro di 45 minuti. La quantità di pannelli flessibili di pioppo consumata per realizzare l'involucro del master e le barriere è stata stimata dai dati di progetto forniti dal team.

Nel computo dei materiali si sono trascurati: la carta abrasiva, il nastro distaccante e le viti autofilettanti.

MATERIALE	Componente	unità [#]	Area [m2]	Sp. [mm]	Volume [m3]	densità [kg/m3]	M in[kg]	M usata [kg]	M scarto [kg]	fornitore
compenato di pioppo	seste e paramenzale		4.9	10	0.0486	420	20.40	20.40	0	Padova
Compensato multilix di pioppo	superficie master		6.2	5	0.0312	450	14.03	14.03	0	Padova
Compensato multilix di pioppo	superficie master		3.3	5	0.0165	420	6.93	6.93	0	Padova
Colla NPC Vinavil per legno	superficie master	2					2	1.74	0.26	Padova
stucco per legno	superficie master						7.09	7.09	0	Padova
catalizzatore	superficie master						0.21	0.21	0	Padova
							tot.	7.30		kg
fondo epox (PF015030)	superficie master	2					10.00	10.00	0	Verona
catalizzatore al 20% per fondo epox (PF1505)	superficie master	2					2.05	2.05	0	Verona
diluyente per fondo epox LT.1 al 20%	superficie master	2					2.00	2.00	0	Verona
							tot.	14.05		kg
tubi PVC	camera di verniciatura				0.0038	1370		5.27		
smalto poliuretano (RAL 5015)	superficie master	2					2.00	1.31	0.69	Verona
diluyente poliuretano 10%	superficie master						0.13	0.13		
distaccante (CR1 Easy-Lease Chemical Release Agent 500ml)	superficie master	2			0.0010	792	0.792	0.475	0	Olanda
cera distaccante FR16/1000P alte temperature - 411 gr	superficie master	1					0.22	0.22	0	Milano
Massa Tot.	master						72.8	71.8	1.0	

Tabella 5.2: Computo dei materiali coinvolti nei processi elementari associati al master.

5.1.2 Stampo

Lo stampo interessa la seconda fase del ciclo produttivo e richiede in ingresso il master descritto al paragrafo precedente. I materiali utilizzati nella realizzazione dello stampo andranno applicati sulla superficie del master in modo da ottenere il negativo della sua forma geometrica.

Il primo processo elementare riguarda la stesura di 2 strati di gelcoat (*Uni-Mould Tooling Gelcoat*) in miscela con il catalizzatore *MEKP* (Methyl Ethyl Ketone Peroxide) al 2% in peso attraverso l'apposita pistola a spruzzo, intervallando l'operazione da un'attesa di circa 3 ore. In seguito ad una fase di riposo di circa mezza giornata dall'applicazione dell'ultimo strato di gelcoat, si passa alla stesura di uno strato di resina vinilestere miscelata (*Uni-mould coupling coat*) con catalizzatore *MEKP* (2% in peso). Una volta steso opportunamente attraverso l'ausilio di un pennello lo strato iniziale di resina, si stende lo strato di vetro *Emulsion Bound Chopped Strand Matt* (grammatura da $100g/m^2$) conferendo maggiore rigidità allo stampo e lo si impregna con un ulteriore strato di resina. Le immagini riportate in Figure5.5 e in Figure5.6 documentano i processi appena descritti. Il ciclo produttivo prosegue con la laminazione a mano di quattro strati di vetro di tipo *Emulsion Bound Chopped Strand Matt* (grammatura da $450g/m^2$) impregnati da resina poliestere *Uni-Mould Tooling Resin* miscelata con catalizzatore *MEKP* all'1% in peso. Il processo di laminazione alterna l'applicazione della resina effettuata con il pennello, o il rullo, alla stesura dello strato di vetro. Al termine di una giornata di attesa per consentire l'indurimento di tutti gli strati dello stampo si può procedere alla separazione meccanica dello stampo e del master. Infine si effettua il test sottovuoto per verificare eventuali perdite nello stampo. Per il test sono stati impiegati dei materiali consumabili (sacco, 2 strati di *peel ply*, nastro sigillante butilico) e la pompa d'aspirazione attiva per 30 minuti. La Figure5.7 mostra lo stampo ultimato.

La Table5.3 riassume i processi elementari per la realizzazione dello stampo. In



Figura 5.5: Applicazione dello strato di gelcoat sullo stampo.



Figura 5.6: Laminazione a mano dello stampo.

Table5.4 si riporta il computo dei materiali utile all'inserimento dei dati sul software SimaPro.

Assunzioni I dati sulle quantità di massa delle diverse tipologie di resine sono stati definiti attraverso la misurazione del materiale inutilizzato riscontrato al termine dei processi e il valore inizialmente disponibile riportato dagli ordini di acquisto. La quantità di materiale utilizzato è stata pertanto ottenuta indirettamente dalla differenza tra la misura del peso dei materiali rimasti inutilizzati e i dati riportati dagli ordini d'acquisto.

La quantità di fibra di vetro utilizzata nelle operazioni di laminazione è stata stimata attraverso i valori di superficie ottenuti dai file CAD del reparto di progettazione del team.

Sono stati trascurati dall'analisi i materiali consumabili per il test di tenuta del vuoto. Il consumo di energia elettrica della pompa d'aspirazione è stato calcolato assumendo



Figura 5.7: Lo Stampo ottenuto al termine della seconda fase del ciclo produttivo.

#	Processo elementare	Materiali coinvolti	Materiali usati	strumenti	fornitore
1	spruzzo 2 strati di Gelecoat	superficie master	UCI Uni-Mould Tooling Gelecoat + 2% MEKP catalyst	pistola a spruzzo	Paesi Bassi
	<ul style="list-style-type: none"> ⌋ 3h di tempo d'attesa tra stesura strati ⌋ 12h di attesa dopo ultimo strato 				
2	laminazione a mano di vetro 100 x 1 strato totale	"	100g/m2 Emulsion Bound Chopped Strand Matt + Uni-Mould Coupling Coat + 2% MEKP catalyst	pennello	Paesi Bassi
	<ul style="list-style-type: none"> ⌋ applicare strato di rivestimento (Coupling Coat) ⌋ stendi 1 strato di vetro 100 "CSM" ⌋ riapplica ultimo strato di Coupling Coat 				
3	laminazione a mano di vetro 450 x 4 strati	"	450g/m2 Emulsion Bound Chopped Strand Matt + UTI Uni-Mould Tooling Resin + 1% MEKP catalyst	pennello e rullo	Paesi Bassi
	<ul style="list-style-type: none"> ⌋ applica strato di resina ⌋ 1 strato di vetro 450 "CSM" ⌋ ripetere per 4 strati di vetro 450 "CSM" ⌋ ultimo strato di resina ⌋ strizzare con rullo 				
4	separazione master - stampo	stampo		operatori	
5	test del vuoto	stampo	Sacco a vuoto + peel ply (bianco a righe rosse)	pompa d'aspirazione (0.7 kW x 0.5h)	
	<ul style="list-style-type: none"> ⌋ posizionare peel ply 2 strati ⌋ secco a vuoto 				

Tabella 5.3: Processi elementari della fase di realizzazione dell stampo.

MATERIALE	Componente	unità [#]	Area [m ²]	Spec. [mm]	Volume [m ³]	densità [kg/m ³]	M in [kg]	M usata [kg]	M scarto [kg]	fornitore
100g/m ² Emulsion Bound Chopped Strand Matt	stampo		9.7	0.1		1000	0.97	0.97	0	Paesi Bassi
450g/m ² Emulsion Bound Chopped Strand Matt	stampo		35.2				15.82	15.82	0	Paesi Bassi
UCI Uni-Mould Tooling Gelcoat (5kg)	stampo	2				1100	10.00	9.07	0.93	Paesi Bassi
Uni-Mould Coupling Coat (5kg)	stampo	2				1100	10.00	6.56	3.44	Paesi Bassi
UTI Uni-Mould Tooling Resin (5kg)	stampo	13			28.48	1440	65.00	63.28	1.72	Paesi Bassi
MEKP (2L)	stampo	1			0.02		0.945	0.945	0	Paesi Bassi
						tot.	85.95	79.85	6.09	kg
Massa Tot.	stampo						102.74	96.65	6.09	kg

Tabella 5.4: Computo dei materiali coinvolti nei processi elementari associati allo stampo.

la macchina in funzione a potenza nominale (700W) per l'intervallo di tempo richiesto dal processo (30minuti).

5.1.3 Scafo

La terza fase del ciclo produttivo prevede la realizzazione dello scafo, ovvero la carena soggetta direttamente all'azione idrodinamica dell'acqua e responsabile della galleggiabilità dell'imbarcazione.

La costruzione dello scafo inizia con il processo di taglio delle flange. Questi elementi consentiranno in fase di laminazione di realizzare dei bordi superiori dello scafo al fine di incrementare l'area d'incollaggio utile per l'accoppiamento della coperta. Le flange sono ricavate dal compensato marino (Okoumè) e le operazioni di taglio si effettuano tramite un seghetto alternativo (400W di potenza nominale). Gli elementi realizzati si fissano attraverso il nastro da pacchi sui bordi superiori dello stampo.

Il processo di laminazione dello scafo è preceduto dall'applicazione dell'agente distaccante (7 strati) sulla superficie interna dello stampo su cui verranno disposte le pelli di lino pre-impregnato. Una volta steso il distaccante è possibile procedere alla disposizione delle fibre pre-impregnate e del core di PET come indicato dal piano di laminazione presente in appendice I. La Figure5.8 e la Figure5.9 riportano rispettivamente i risultati del processo di realizzazione delle flange e del processo di laminazione. Al termine della fase di laminazione è necessario sigillare lo scafo mediante l'ausilio dei materiali consumabili (*flowmesh*, microforato, sacco d'aspirazione) per poi compattare i vari strati di materiale composito attraverso la pompa d'aspirazione che resta in funzione per 1 ora. Il processo a vuoto consente la compattazione dalle pelli del tessuto composito e favorisce l'espulsione di aria e umidità.

Il trasporto dello scafo – ancora vincolato allo stampo – fino al partner tecnico situato a Vicenza è avvenuto utilizzando un veicolo di proprietà di un componente del team. Si osserva che il sacco che racchiude lo scafo deve mantenere il vuoto per tutto il tragitto. Raggiunta la località prevista per il processo di reticolazione finale in autoclave si sostituiscono i materiali consumabili (microforato, *peel ply*, *breather*). In Figure5.10 e in Figure5.11 si visualizzano i sacchi necessari alla fase di trasporto e di



Figura 5.8: Applicazione delle flange ai bordi dello stampo.

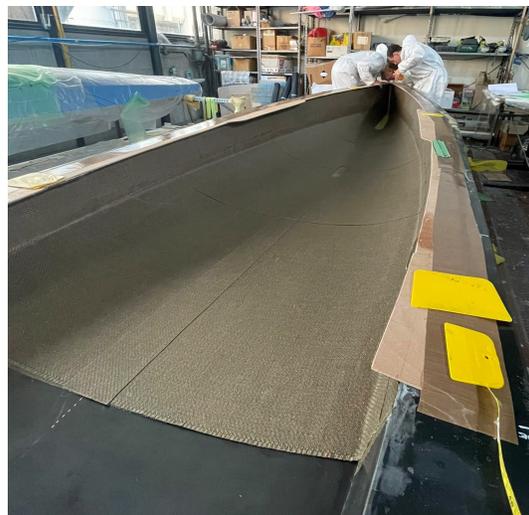


Figura 5.9: Processo di laminazione dello scafo.

#	processo elementare	materiali coinvolti	materiali usati	strumenti	fornitore
1	taglio flange		compensato marino (okoumbè)	seghetto alternativo (400W x 0.2h)	Padova
2	fissaggio flange	su bordo superiore stampo	nastro da pacchi		
3	trasporto lino e vetro prepreg			macchina autonoma	Milano
4	deposito distaccante (7 mani)	superficie utile stampo	CRI Easy-Release Chemical Release Agent	panno	Paesi Bassi
5	taglio del PET	superficie utile stampo	PET espanso sp.7mm	tagliere	Paesi Bassi
6	laminazione tessuti preimpregnati		lino prepreg (WR 300), vetro E (WR 50), vetro S (WR 180), PET	spatola	Milano
	sacco sottovuoto	scafo	1 set di consumabili	pompa d'aspirazione (0.7 kW x 1h)	Paesi Bassi
	a) flowmesh (tessuto retinato nero)				
	b) posizionamento microforato (blu)				
	c) sacco (rosso)				
7	trasporto in compositex	scafo + stampo		trasporto autonomo	Vicenza
8	sacco sottovuoto pre-cottura	scafo + stampo	1 set di consumabili	pompa d'aspirazione (0.8 kW x 1 h)	Paesi Bassi
	a) microforato (blu)				
	b) peel ply (verde o bianco a righe rosse)				
	c) breather (panno bianco)				
9	cottura in autoclave x 18h a 90°C, 3 atm	scafo + stampo		autoclave (18h a 90°C, 3 atm), pompa d'aspirazione (0.8 kW x 5 h)	Vicenza
10	separazione scafo-stampo	scafo + stampo		operatori	

Tabella 5.5: Processi elementari della fase di realizzazione dello scafo.

cottura. Il processo in autoclave ha richiesto 18 ore a temperatura controllata con una rampa iniziale d'incremento fino al valore target di 90°C e una pressione interna alla camera della macchina mantenuta a 2atm. La pompa a vuoto che aspirava il sacco dello scafo è stata mantenuta attiva per 5 ore. Poiché la pompa è in grado di produrre un valore di vuoto pari a -1atm, la pressione equivalente sullo scafo ottenuta durante le ore di funzionamento della stessa è risultata pari a 3atm. La Figure5.13 riporta il grafico del processo in autoclave. L'ultimo processo di questa fase del ciclo produttivo prevede la separazione dello scafo dalla sede dello stampo. In Table5.5 sono riportati le operazioni appena descritte.



Figura 5.10: Scafo sottovuoto prima del trasporto al partner tecnico.



Figura 5.11: Scafo sottovuoto pronto per il processo di reticolazione finale in autoclave.

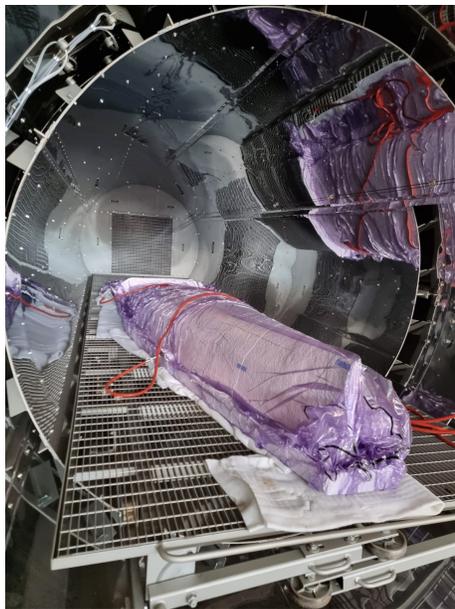


Figura 5.12: Fase di cottura in autoclave.

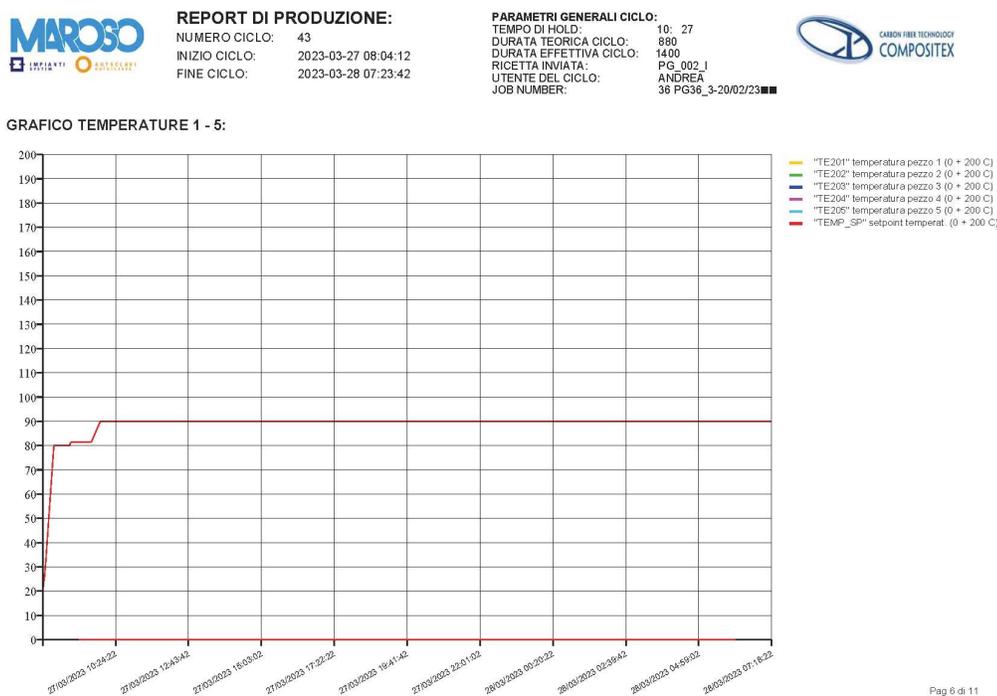


Figura 5.13: Grafico dell'andamento della temperatura in autoclave durante il processo di cottura in pressione.

Assunzioni Analogamente a quanto espresso in precedenza, si trascurano i seguenti materiali: nastro da pacchi, consumabili, spatole, strumenti manuali.

Le quantità di tessuto pre-impregnato e di PET espanso indicate in Table5.6 si riferiscono ai valori riportati dal piano di laminazione in appendice I. Si trascurano gli scarti per i materiali pre-impregnati. La quantità di resina epossidica utilizzata nei tessuti pre-impregnati è stata stimata a partire dalla percentuale in peso pari al 60% garantita dal fornitore.

Siccome non è stato possibile ottenere i consumi di energia dell'autoclave e sufficienti informazioni richieste per stimarli, si è deciso di considerare il contributo della pompa a vuoto durante il processo di cottura.

5.1.4 Strutture interne

La fase di realizzazione delle strutture interne inizia con il processo di taglio delle lamiere d'alluminio e prosegue con la levigatura dei bordi mediante l'orbitale. Successivamente si passa alla sagomatura del PET espanso (da 9mm di spessore). Ultimati

MATERIALE	Componente	unità [#]	Area [m ²]	Spes. [mm]	Volume [m ³]	densità [kg/m ³]	M.in[kg]	M.usata [kg]	M.scarto [kg]	fornitore
compensato marino (Okoumé)	scafo		1.8	4	0.0074		3.54	3.54	0	
lino prepreg (WR 300)	scafo		33.0			0.300	9.90	9.90	0	Milano
vetro E (WR 50)	scafo		12.4			0.050	0.62	0.62	0	Milano
vetro S (WR 180)	scafo		0.7			0.180	0.13	0.13	0	Milano
PET sp 7mm	scafo	2	5.5	7	0.0385	0.805	5.10	4.43	0.67	Paesi Bassi
distaccante (CRI Easy-Release Chemical Release Agent 500ml)	scafo						0.317	0.317	0	Paesi Bassi
resina epossidica (pre-impregnata)	scafo						15.6	15.6	0	Milano
Massa Tot.	scafo						35.21	34.54	0.67	

Tabella 5.6: Computo dei materiali coinvolti nei processi elementari associati allo scafo.

questi primi processi si passa alla fase di laminazione a mano dei pannelli sagomati (Table2.1). L'operazione richiede l'utilizzo di resina epossidica applicata attraverso la spatola. La laminazione a mano accoppia gli strati del sandwich composito e attraverso la procedura del sacco a vuoto collegato alla pompa d'aspirazione è possibile fissarli, eliminando l'eventuale resina rimasta in eccesso.

Gli elementi laminati devono essere fissati allo scafo mediante l'applicazione della resina epossidica sulle zone di contatto delle strutture interne. Al fine di migliorare la tenuta con lo scafo, si applicano due strati di tessuto in fibra di vetro su ogni delle strutture interne (seste e paramezzale). In Figure5.14 si può apprezzare la vista ravvicinata delle strutture interne.

Una volta fissate le strutture allo scafo si passa alla levigatura dei bordi superiori in



Figura 5.14: Immagine delle strutture interne fissate allo scafo.

modo da renderli complanari ai bordi dello scafo, considerando anche un margine di circa 2mm previsto per l'incollaggio degli angolari di alluminio (Figure2.3). Gli angolari sono stati precedentemente tagliati in relazione alla lunghezza dei bordi

#	processo elementare	materiali usati	strumenti	fornitore
1	taglio lamiera di alluminio	lamina di alluminio sp. 0.5mm	cesoia	Vicenza
2	levigatura con orbitale		orbitale (400W per 0.3h)	
3	sagomatura pannelli di PET	PET sp. 9mm	taglierino	
4	laminazione a mano	lamina alluminio, PET + SX10 resina epox con Catalizzatore al 26%	spatola	Milano
5	sacco a vuoto	consumabili	pompa d'aspirazione (0.7 kW x 1h)	
6	fissaggio paratie-scafo	SX10 resina epox con Catalizzatore al 26% + (microsfere)		Paesi Bassi
7	fascettatura paratie (laminazione a mano)	SX10 resina epox con Catalizzatore al 26% + nastro di vetro 220 largo 5cm		Paesi Bassi
8	levigatura bordi superiori strutture a filo scafo		orbitale (400W per 0.6h)	
9	angolare di alluminio	L di alluminio sp. 2mm	orbitale (400W per 0.3h)	Vicenza
10	incollaggio con colla bicomponente	Elantas [®] ADH 96.97 (400 mL x2)		Paesi Bassi

Tabella 5.7: Processi elementari della fase di realizzazione delle strutture interne.

MATERIALE	Componente	unità [#]	Area [m2]	Spes. [mm]	Volume [m3]	densità [kg/m3]	M in[kg]	M usata [kg]	M scarto [kg]	fornitore
Lamiera d'alluminio	strutture interne		4.0	0.5	0.0112	1.340	2679	7.91	5.41	2.50
(fiangia) angolare d'alluminio	strutture interne			2	0.0035	5.669	2834	6.50	5.67	0.83
vetro E (plain 220)	strutture interne		2.7			0.220		0.59	0.59	0
PET sp 9mm	strutture interne	1	2.0	9		0.805	115	3.48	2.09	1.39
sistema epossidico SX10 EVO	strutture interne						1061	1.02	1.02	0
catalizzatore (SX10)	strutture interne							0.27	0.27	0
Massa Tot.	strutture interne						19.77	15.05	4.72	kg

Tabella 5.8: Computo dei materiali coinvolti nei processi elementari associati alle strutture interne.

di ogni sesta e delle varie porzioni del paramezzale. Questi elementi consentono di incrementare ulteriormente la superficie di incollaggio utile alla coperta.

In Table5.7 si riassumono i processi descritti e in Table5.8 i flussi di materiale.

Assunzioni In questa fase è stata trascurata la colla bicomponente utilizzata per fissare gli angolari di alluminio alle strutture interne. La quantità di tessuto di vetro impiegato durante il processo di fascettatura è stato stimato misurando la lunghezza dei bordi di contatto delle strutture interne e la larghezza del nastro di tessuto. Le quantità di alluminio sono state stimate a partire dai valori di superficie disponibili sui documenti di progetto.

5.1.5 Coperta

La coperta segue dei processi analoghi a quelli descritti per le strutture interne in quanto condivide un piano di laminazione simile. L'unica eccezione che interessa il sandwich composito della coperta riguarda lo spessore del core di PET espanso da 7mm e due strati di vetro S unidirezionale orientati ortogonalmente come indicato in Figure2.2. La Figure5.15 riporta il processo di fissaggio degli strati di composito appena laminati attraverso l'impiego della pompa d'aspirazione.

In Table5.9 si trova la sintesi dei processi elementari associati alla coperta e in Table5.10 viene riportato il computo dei materiali utilizzati.



Figura 5.15: Coperta all'interno del sacco a vuoto aspirato per mezzo della pompa.

#	processo elementare	materiali usati	strumenti	fornitore
1	taglio lamiera di alluminio	lamina di alluminio sp. 0.5mm	cesoia	Vicenza
2	levigatura con orbitale		orbitale (400W per 0.4h)	
3	sagomatura pannelli di PET	PET sp. 7mm	taglierino	
4	laminazione a mano	lamina alluminio + PET + SX10 resina epox con Catalizzatore al 26%	spatola	Milano
5	sacco a vuoto	consumabili	pompa d'aspirazione (0.7 kW x 1h)	
6	incollaggio coperta	Elantas (R) ADH 96.97 (400 mL x2)		Milano

Tabella 5.9: Processi elementari della fase di realizzazione della coperta.

Assunzioni La quantità di materiale utilizzato per il piano di laminazione presente in Table5.10 è stato determinato in relazione al valore di superficie definito dai documenti di progetto. Il computo dei materiali trascura la quantità di colla bicomponente impiegata per fissare la coperta allo scafo.

MATERIALE	Componente	unità /#	Area [m2]	Spes. [mm]	Volume [m3]	densità [kg/m3]	M in[kg]	M usata [kg]	M scarto [kg]	fornitore
Lamiera d'alluminio	coperta	2	4.0				12.99	10.72	2.27	Vicenza
vetro S (WR 170)	coperta		8.0				1.36	1.36	0	Milano
PET sp 7mm	coperta	2	4.0	7	0.0280		3.60	3.22	0.38	Milano
sistema epossidico SX10 EVO (indurente (26%))	coperta					1061	5.43	5.43	0	Milano
catalizzatore (SX10)	coperta						1.38	1.38	0	Milano
Massa Tot.	coperta						24.76	22.11	2.65	kg

Tabella 5.10: Computo dei materiali coinvolti nei processi elementari associati alla coperta.

	M in [kg]	M usata [kg]	M scarti [kg]
master	72.8	71.8	1.0
stampo	102.7	96.6	6.1
scafo	35.2	34.5	0.7
strutture interne	19.8	15.1	4.7
coperta	24.8	22.1	2.7
<i>TOT - Barca</i>	255.3	240.2	15.1

Tabella 5.11: Bilancio di massa complessivo dei prodotti ottenuti dal ciclo produttivo.

	PET	Alluminio
strutture interne	2.09	11.08
coperta	3.22	10.72
scafo	4.43	
M tot [kg]	9.74	21.80

Tabella 5.12: Bilancio di massa complessivo dei materiali riciclabili.

5.2 Verifica del computo dei materiali *gate to gate*

Si riportano in Table5.11 i valori di massa totale registrati per i 5 componenti al fine di verificare la correttezza dei bilanci. In Table5.12 viene espresso il valore in massa di ogni componente riciclabile appartenente allo scafo, alle strutture interne e alla coperta insieme al contenuto percentuale del PET e dell'alluminio.

5.3 Trasporto

I processi di trasporto del materiale richiesto alla produzione sono stati inclusi all'interno del ciclo produttivo e organizzati per ogni componente. I trasporti interni ai confini nazionali sono stati trattati attraverso il processo *Road, Transformation, Transport, passenger car, diesel RER* disponibile su Ecoinvent per le seguenti tratte di trasporto autonomo: trasporto delle fibre pre-impregnate (veicolo EURO4 di piccole dimensioni) da Milano a Padova e trasporto dello scafo e dello stampo per la cottura in autoclave situata a Vicenza (veicolo EURO5 di medie dimensioni).

Le consegne del materiale effettuate dai corrieri sono state stimate mediante il processo *Road, Transformation, Transport, freight, lorry* di Ecoinvent ipotizzando un mezzo da 3.5 – 7.5ton e da 7.5 – 16ton rispettivamente per spedizioni interne ed esterne ai confini nazionali. Nel caso della spedizione proveniente dalla località situata nei Paesi

Tratta	[km]
Milano - Padova	233
Paesi Bassi - Milano	947
Verona - Padova	83
Vicenza - Padova	32
Torviscosa (UD) - Padova	136

Tabella 5.13: Tratte previste per le operazioni di trasporto del materiale richiesto durante la fase di produzione.

Bassi si è ipotizzato uno snodo di interscambio a Milano da cui la merce prosegue sui mezzi di trasporto scelti per confini italiani. In Table5.13 si riportano le tratte tra i diversi fornitori e la località del sito produttivo.

Capitolo 6

Valutazione dell'impatto ambientale (LCIA)

La fase di valutazione d'impatto è stata preceduta dall'organizzazione dei dati d'inventario all'interno del software SimaPro in modo da estrarre agilmente le informazioni e soddisfare gli obiettivi esposti nel capitolo 4. Si presentano i risultati d'impatto ambientale ottenuti applicando i metodi di caratterizzazione *IPCC 2021 GWP 100* e *ReCiPe 2016 Midpoint (H)*. I risultati degli impatti potenziali sulle categorie ambientali scelte nel precedente capitolo sono forniti sia in termini quantitativi, attraverso i valori degli indicatori di categoria, sia in termini percentuali. I risultati ambientali relativi alle fasi del ciclo di vita sono le fasi di pre-produzione dei materiali, di produzione, di uso e di smaltimento dei prodotti (fine vita).

I risultati riportati nella forma grafica a *rete*, tipica di SimaPro, si riferiscono al metodo IPCC e riportano i diversi effetti ambientali dei processi analizzati che impattano sul meccanismo di riscaldamento globale. Le categorie d'impatto assunte dal metodo ReCiPe si riferiscono alle definizioni riportate in [27].

6.1 Impatto della fase di pre-produzione

La fase di pre-produzione si riferisce a tutti i processi e ai flussi *from cradle to gate* necessari a presentare i materiali al ciclo produttivo per la costruzione dei componenti: master, stampo, scafo, strutture interne, coperta.

Siccome un obiettivo fissato dallo studio è stabilire gli effetti ambientali derivanti dai materiali scelti per la realizzazione dell'imbarcazione *Alétheia*, si riporta la valutazione ambientale che coinvolge i processi di estrazione e lavorazione delle materie prime a monte del ciclo produttivo.

In Figure6.1 sono rappresentati i flussi del ciclo di pre-produzione dei materiali richiesti in ingresso al sistema prodotto. Questa forma di rappresentazione viene denominata a *rete* e consente di apprezzare i flussi di scambio tra i processi coinvolti, evidenziando la traiettoria di tutti gli ingressi ed uscite. I processi elementari che rappresentano le unità fondamentali che concorrono a descrivere il modello del sistema sono organizzate in macro processi (o fasi). In Figure6.1 vengono mostrate le operazioni di estrazione e di lavorazione dei materiali richiesti dai vari prodotti nella fase di pre-produzione (PP). I processi di assemblaggio in blu richiedono in ingresso i flussi dal ciclo produttivo di ogni componente, mentre i processi in verde e in bianco includono tutte le operazioni associate all'estrazione, al trasporto e alla lavorazione dei materiali. All'interno di ogni riquadro caratterizzante un insieme di processi è

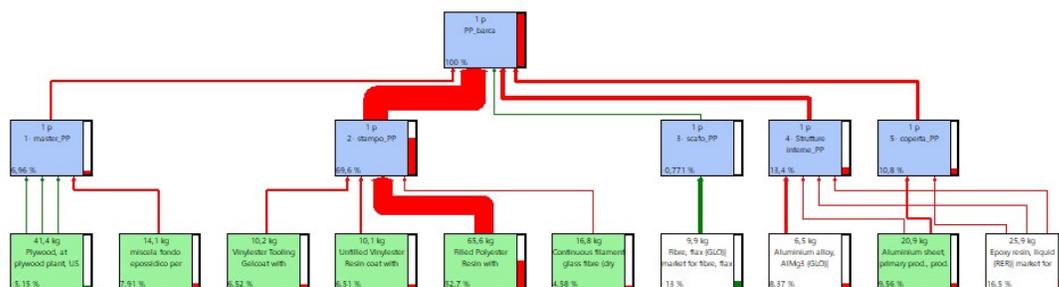


Figura 6.1: Rappresentazione a rete delle emissioni di CO_2eq provenienti dai processi di pre-produzione secondo il metodo IPCC (valore di esclusione a 2%).

riportato l'indicatore di categoria riferito al riscaldamento globale potenziale – definito dal metodo IPCC – insieme ad una colonna a termometro che raffigura il contributo percentuale di ogni fase sul valore complessivo in ingresso al processo di produzione della barca.

In Table6.1 si riportano gli indicatori di categoria per il metodo *IPCC 2021 GWP 100*. Il metodo distingue l'indicatore generale del riscaldamento climatico globale in 4 sottocategorie: fossile, biogenica, assorbimento di CO_2 , trasformazione del territorio; in funzione alla sorgente di provenienza delle emissioni di gas ad effetto serra.

Lo stampo riporta la quantità maggiore di emissioni ad effetto serra. Infatti come si è appurato anche durante la fase d'inventario, l'elevata richiesta di resina poliestere induce degli impatti significativi nella fase di pre-produzione diventando la componente dominante nella categoria associata alle emissioni provenienti da risorse fossili. Tuttavia, l'utilizzo di fibra di lino consente di ottenere un effetto di riduzione delle emissioni grazie all'assorbimento di CO_2 equivalente nelle fasi di coltivazione a inizio vita (al netto di tutti i processi coinvolti). Il contributo dato dalla scelta di

Categoria d'impatto	Unità	Totale	1- master_PP	2- stampo_PP	3- scafo_PP	4- Strutture interne_PP	5- coperta_PP
GWP100 - fossil	kg CO2-eq	848.18	91.72	491.20	96.84	93.73	74.70
GWP100 - biogenic	kg CO2-eq	43.47	2.46	25.57	9.01	4.46	1.97
GWP100 - land transf.	kg CO2-eq	3.08	2.33	0.25	0.21	0.27	0.03
GWP100 - CO2 uptake	kg CO2-eq	-191.38	-47.57	-27.43	-111.46	-3.85	-1.07

Tabella 6.1: Indicatori della categoria d'impatto *global warming* della fase di estrazione e di lavorazione delle materie prime calcolati secondo il metodo IPCC.

una fibra di rinforzo di origine naturale è visibile in Figure6.2 e relativamente per lo scafo viene mostrato l'indicatore d'impatto in Figure6.3. Il metodo stima la CO_2 equivalente assorbita durante la vita della pianta affinché possa essere considerato il contributo positivo in termini di riduzione dei gas ad effetto serra. Nel primo grafico si notano i crediti ambientali ottenuti dalle zone di appartenenza del legno richiesto al master e dalla piantagione di lino. Nel secondo grafico si rappresentano gli effetti ambientali dei materiali richiesti alla realizzazione dello scafo. Si osserva che le fibre di lino permettono di assorbire una quota importante di CO_2 .

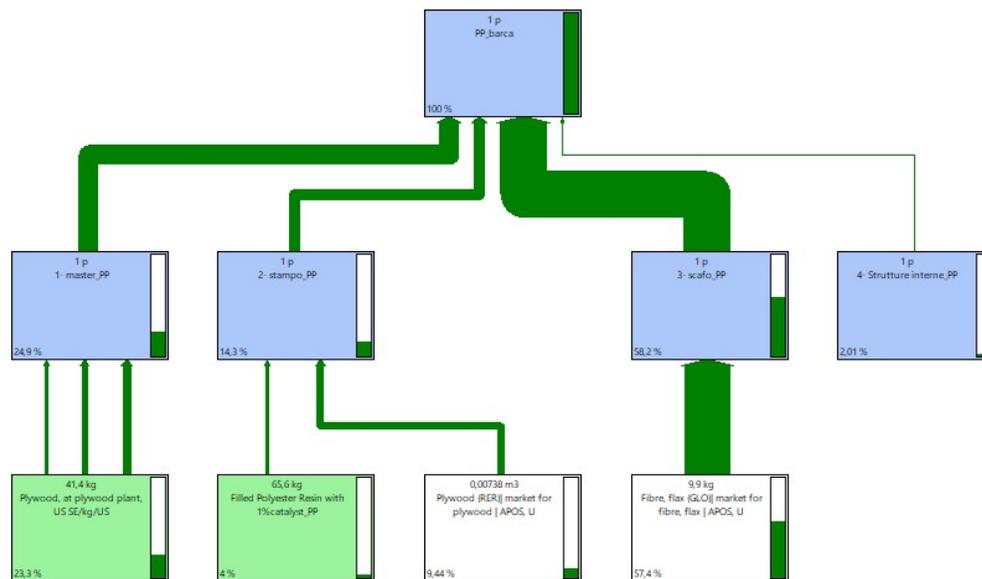


Figura 6.2: Rappresentazione a rete delle quantità percentuali di CO_2eq assorbita dai processi di pre-produzione secondo il metodo IPCC (valore di esclusione a 2%).

Il metodo ReCiPe esposto nel capitolo 4 permette di calcolare gli impatti ambientali su diverse categorie d'impatto. In Figure6.4 e in Table6.2 sono riportati rispettivamente gli indicatori delle categorie scelte.

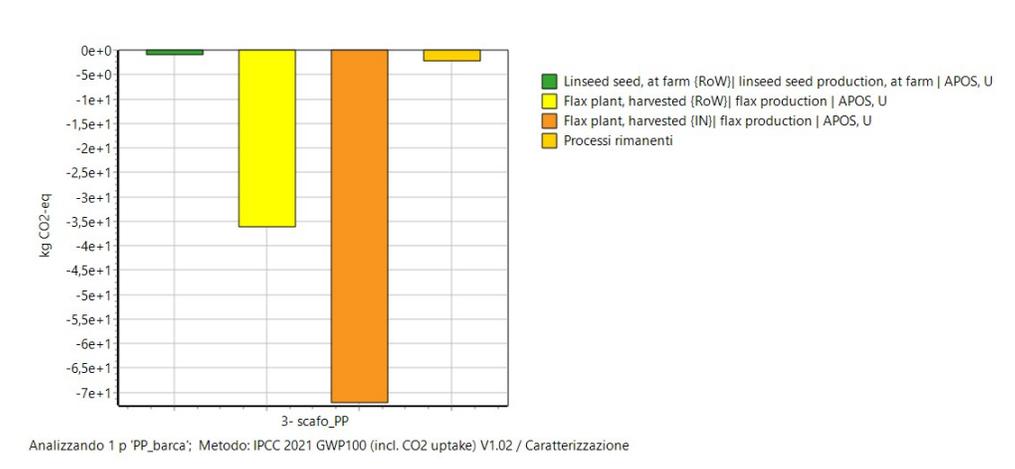


Figura 6.3: Grafico delle quantità percentuali di CO_2eq assorbita dai processi di pre-produzione per i materiali associati allo scafo secondo il metodo IPCC (valore di esclusione a 0.5%).

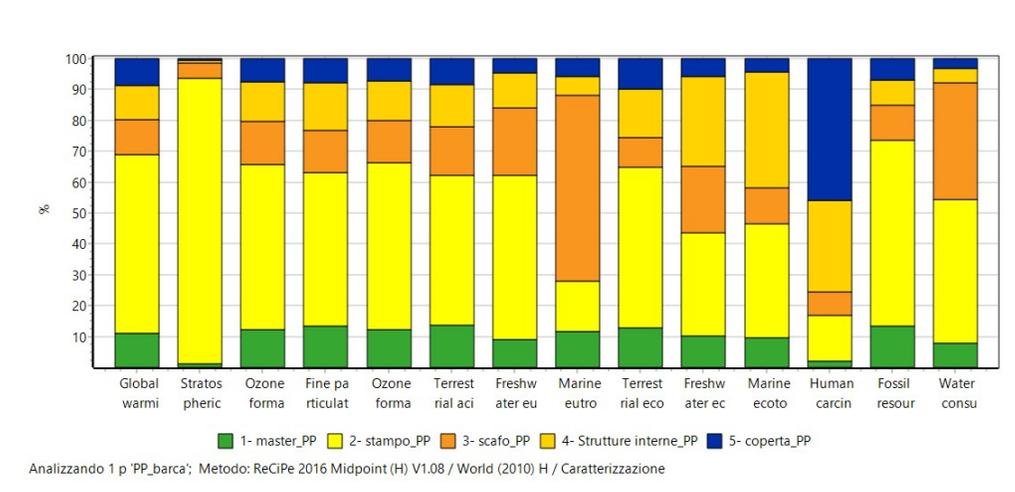


Figura 6.4: Grafico degli impatti percentuali dei processi di pre-produzione secondo il metodo ReCiPe.

Sempre dalla Table6.2 si nota che gli impatti più significativi coinvolgono le seguenti categorie: *global warming*, *terrestrial ecotoxicity*, *fossil resource scarcity* e *Water consumption*. L'indicatore di *eco-tossicità terrestre* dipende principalmente dalla resina (poliestere, vinilestere, o epossidica) richiesta in larga quantità dallo stampo. Sebbene i processi di produzione dell'alluminio rappresentino una fonte

Categoria d'impatto	Unità	Totale	1- master_PP	2- stampo_PP	3- scafo_PP	4- Strutture interne_PP	5- coperta_PP
Global warming	kg CO2 eq	881.98	96.60	510.43	101.83	96.65	76.48
Stratospheric ozone depletion	kg CFC11 eq	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ozone formation, Human health	kg NOx eq	1.78	0.22	0.95	0.24	0.23	0.13
Fine particulate matter formation	kg PM2.5 eq	1.20	0.16	0.60	0.16	0.19	0.09
Ozone formation, Ter. ecosystems	kg NOx eq	1.88	0.23	1.02	0.26	0.24	0.14
Terrestrial acidification	kg SO2 eq	2.98	0.41	1.45	0.47	0.40	0.25
Freshwater eutrophication	kg P eq	0.30	0.03	0.16	0.07	0.03	0.01
Marine eutrophication	kg N eq	0.09	0.01	0.01	0.05	0.01	0.00
Terrestrial ecotoxicity	kg 1,4-DCB	143.30	18.15	74.75	13.76	22.37	14.27
Freshwater ecotoxicity	kg 1,4-DCB	1.61	0.16	0.54	0.35	0.47	0.09
Marine ecotoxicity	kg 1,4-DCB	1.76	0.17	0.65	0.21	0.66	0.08
Human carcinogenic toxicity	kg 1,4-DCB	1.86	0.04	0.27	0.14	0.55	0.85
Fossil resource scarcity	kg oil eq	321.72	43.27	192.89	36.72	26.29	22.55
Water consumption	m3	16.18	1.29	7.52	6.10	0.75	0.52

Tabella 6.2: Indicatori di categoria d'impatto per la fase di pre-produzione secondo il metodo ReCiPe.

d'impatto marginale se confrontati con quanto compete alla resina, giocano comunque un ruolo secondario nell'impatto di eco-tossicità terrestre. La resina domina la voce dell'indicatore di categoria che valuta la scarsità delle risorse fossili, ovvero l'impatto derivante dalla riduzione di risorse fossili rispetto a future estrazioni e a modifiche nelle tecniche di produzione ([27]). Le categorie di eco-tossicità terrestre e di scarsità delle risorse fossili sono anch'esse influenzate dalla quantità di resina termoindurente. I processi richiesti dalla resina poliestere e dalla coltivazione del lino richiedono un incremento del fabbisogno d'acqua causando un impatto sulla categoria *water consumption*. La categoria *global warming* risulta coerente con quanto valutato dal metodo IPCC.

In generale, la Figure 6.4 evidenzia l'impatto prevalente dello stampo su tutte le categorie. L'elemento *coperta* invece domina la categoria *human carcinogenic toxicity* per l'uomo a causa dei rilasci in ambiente derivanti dalla quantità di lamiera d'alluminio richiesta.

6.2 Impatto del ciclo produttivo

La valutazione d'impatto ambientale del ciclo produttivo si riferisce a tutti i processi elementari del sistema prodotto. In esso rientrano anche i trasporti intercorsi tra fornitori e l'ubicazione del sistema stesso, come indicato anche durante la fase d'inventario nel capitolo 5. Si ricorda che la valutazione di questa fase utilizza dati d'inventario primari e dunque risulta limitata alla qualità e completezza di tale procedura. In Figure 6.5 si riporta la valutazione degli impatti secondo il metodo IPCC nella modalità a rete.

La rappresentazione a rete consente di visualizzare facilmente la provenienza degli impatti sulla categoria del riscaldamento globale. I due flussi più interessanti si

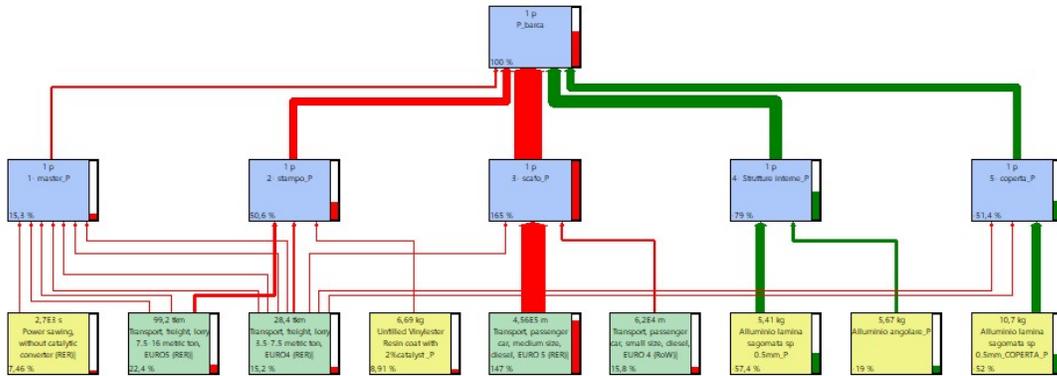


Figura 6.5: Rappresentazione a rete delle emissioni di CO_{2eq} provenienti dai processi di produzione secondo il metodo IPCC (valore di esclusione a 4%).

riferiscono alla voce dei trasporti e agli scarti d'alluminio riciclati. Come si osserva in Figure6.6, i trasporti rappresentano la prima causa d'impatto, mentre il riciclo dell'alluminio permette di evitare emissioni di anidride carbonica nella produzione di altro materiale. La Figure6.3 mostra i risultati di caratterizzazione IPCC degli

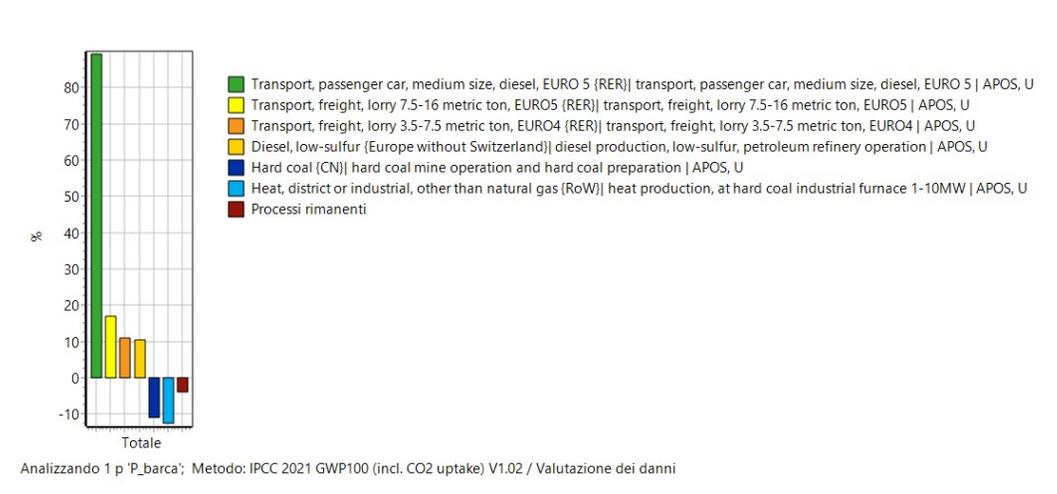


Figura 6.6: Grafico dei principali contributi d'impatto nella fase di produzione secondo il metodo IPCC.

indicatori di categoria. Dal grafico si osserva che le emissioni appartenenti alla sfera fossile sono riconducibili alle operazioni di trasporto richieste per lo scafo. Si evidenzia nuovamente che il riciclo degli scarti dell'alluminio e del PET provenienti dai

Categoria d'impatto	Unità	Totale	1- master_P	2- stampo_P	3- scafo_P	4- Strutture interne_P	5- coperta_P
GWP100 - fossil	kg CO2-eq	85.72	7.22	47.79	154.90	-75.20	-48.98
GWP100 - biogenic	kg CO2-eq	5.49	3.12	0.45	2.33	-0.27	-0.14
GWP100 - land transf.	kg CO2-eq	1.15	1.21	0.02	0.09	-0.10	-0.07
GWP100 - CO2 uptake	kg CO2-eq	-2.64	-1.64	-0.29	-1.82	0.68	0.43

Tabella 6.3: Indicatori della categoria d'impatto *global warming* relativi al ciclo produttivo secondo il metodo IPCC.

processi di lavorazione della coperta e delle strutture interne portano a valori negativi dell'indicatore di categoria. I risultati ottenuti dal metodo ReCiPe in Figure 6.7 e in Table 6.4 descrivono le categorie d'impatto interessate dal ciclo produttivo e quali componenti dell'imbarcazione presentano in percentuale l'influenza più marcata sul valore d'impatto.

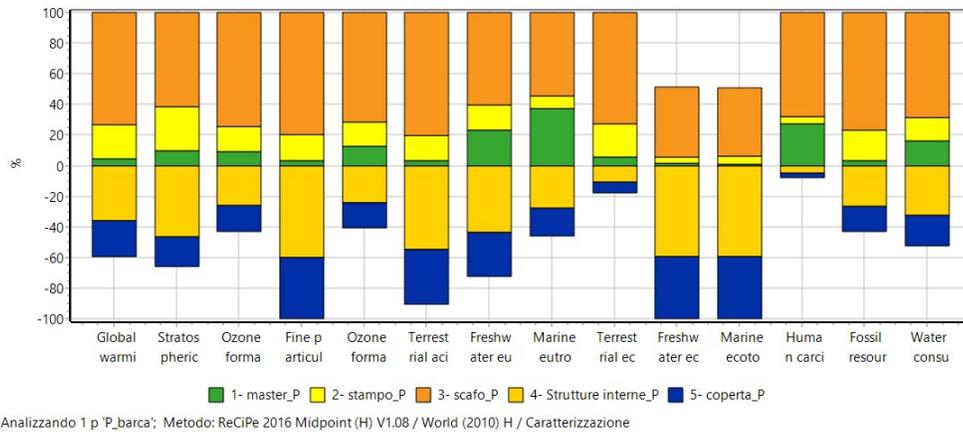


Figura 6.7: Grafico degli impatti percentuali dei processi di produzione secondo il metodo ReCiPe.

Le categorie d'impatto riferite alla formazione di ozono derivano dalle emissioni inquinanti prodotte dai mezzi di trasporto su gomma, quali ossidi di azoto, che seguendo le reazioni fotochimiche in aria. I meccanismi di formazione delle molecole di ozono prodotto dalle emissioni dei veicoli rappresentano un pericolo per la salute umana e ambientale. Inoltre si registra un impatto sulla riduzione di ozono negli strati appartenenti alla stratosfera causato anche in questo caso dal trasporto. Le categorie *freshwater eutrophication*, *freshwater ecotoxicity*, *marine ecotoxicity* sono causate, ad esempio, dai rilasci di sostanze chimiche contenenti fosforo e azoto, dalle emissioni di particolato (SPM), di VAC, o di metalli che finiscono per contaminare le acque dolci e zone marine. Si riscontra un impatto combinato dei processi di trasporto

Categoria d'impatto	Unità	Totale	1- master_P	2- stampo_P	3- scafo_P	4- Strutture interne_P	5- coperta_P
Global warming	kg CO2 eq	85.86	8.87	48.04	156.22	-77.07	-50.20
Stratospheric ozone depletion	kg CFC11 eq	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ozone formation, Human health	kg NOx eq	0.43	0.07	0.12	0.57	-0.20	-0.13
Fine particulate matter formation	kg PM2.5 eq	0.00	0.01	0.04	0.20	-0.15	-0.10
Ozone formation, Ter. ecosystems	kg NOx eq	0.48	0.10	0.13	0.58	-0.20	-0.13
Terrestrial acidification	kg SO2 eq	0.06	0.02	0.10	0.49	-0.33	-0.22
Freshwater eutrophication	kg P eq	0.02	0.01	0.01	0.03	-0.02	-0.02
Marine eutrophication	kg N eq	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Terrestrial ecotoxicity	kg 1,4-DCB	45.95	3.01	12.15	40.75	-6.17	-3.78
Freshwater ecotoxicity	kg 1,4-DCB	-0.58	0.02	0.05	0.54	-0.71	-0.48
Marine ecotoxicity	kg 1,4-DCB	-0.83	0.02	0.08	0.76	-1.01	-0.68
Human carcinogenic toxicity	kg 1,4-DCB	0.18	0.05	0.01	0.13	-0.01	-0.01
Fossil resource scarcity	kg oil eq	36.62	2.18	12.73	49.24	-17.04	-10.49
Water consumption	m3	0.40	0.14	0.12	0.58	-0.28	-0.17

Tabella 6.4: Indicatori di categoria d'impatto per la fase di produzione secondo il metodo ReCiPe.

per i materiali utili allo scafo e dei processi di taglio del compensato per la costruzione del master sulle categorie di eutrofizzazione delle acque dolci e dell'ambiente marino.

6.3 Impatto della fase di manutenzione e di smaltimento

L'impatto di fine vita è stato valutato sulla base delle considerazioni espresse nel paragrafo 2.3 sugli scenari di smaltimento dei componenti del sistema analizzato. Gli scenari valutati sono i seguenti:

- Incenerimento;
- Riciclo.

La soluzione d'incenerimento coinvolge lo scafo, il master e lo stampo considerati tutti a fine vita dopo l'orizzonte temporale di vita utile precedentemente fissato a 7 anni. Lo scenario di riciclo coinvolge tutti i materiali effettivamente riciclabili: alluminio e PET; presenti all'interno dei componenti. Al fine di attuare i due scenari ipotizzati si prevede un processo di separazione dei componenti all'interno di un'apposita struttura che poi indirizzerà i materiali verso il rispettivo processo di trattamento finale. La modellazione della fase di fine vita eseguita attraverso SimaPro dei 5 elementi in esame ha previsto uno scenario per i materiali riciclabili distinto dallo scenario dei restanti materiali. La Figure6.8 riporta la scheda dello scenario di fine vita definito sul software. Il PET e l'alluminio seguono processi di riciclaggio riportati su Ecoinvent e riferiti ad un contesto globale. Le quantità assunte per i processi di riciclo sono presenti in Table6.5. Lo scenario d'incenerimento scelto per i restanti materiali appartiene al contesto nazionale italiano su cui Ecoinvent fornisce

6.3. IMPATTO DELLA FASE DI MANUTENZIONE E DI SMALTIMENTO 73

Input/Output		Parametri	
Nome		Stato	
FINE VITA		Nessuno	
Commento			
Riferimento ad assemblaggio		Quantità fisica	Unità di misura
FV - Barca		1	p
Processi			
Fase d'uso - Manutenzione		1,6	kg
Sorting facility, for construction waste {GLO} market for APOS, U		0,00000002395	p
(Inserisci linea qui)			
Scenari di smaltimento			Percentuale
Municipal solid waste (waste scenario) {IT} treatment of municipal solid waste, incineration APOS, U			87 %
RIFIUTI: RICICLO strutture interne + coperta + parte scafo			13 %
(Inserisci linea qui)			
Disassemblaggi		Percentuale	
(Inserisci linea qui)			
Riusi		Percentuale	
(Inserisci linea qui)			

Figura 6.8: Scheda dello scenario di fine vita dei 5 componenti riportata da SimaPro.

	PET	Alluminio
strutture interne	2.09	11.08
coperta	3.22	10.72
scafo	4.43	
M tot [kg]	9.74	21.80
%	31	69

Tabella 6.5: Quantità di massa definite per i processi di riciclo.

dati d'inventario. In Table6.6 si riassumono le quantità di massa e le percentuali in massa associate alle due tipologie di smaltimento.

I valori di massa riportati in questo paragrafo si riferiscono al computo dei materiali riportati nel capitolo 5. Si osserva che la fase operativa definita dai soli processi di manutenzione è stata considerata insieme alla fase di fine vita del prodotto. La manutenzione del prototipo si ipotizza che richieda un processo di laminazione a mano nel corso dei 7 anni di vita con un apporto di resina epossidica totale di 0.9kg e un rinforzo di fibre di vetro (tipo E) pari a 0.7kg .

In Figure6.9 si rappresenta la rete dei flussi raggruppati valutati secondo il metodo

SCENARI DI SMALTIMENTO:	M [kg]	%
incenerimento	208.7	87
riciclo	31.5	13

Tabella 6.6: Quantità di massa definite per lo scenario di smaltimento a fine vita.

IPCC.

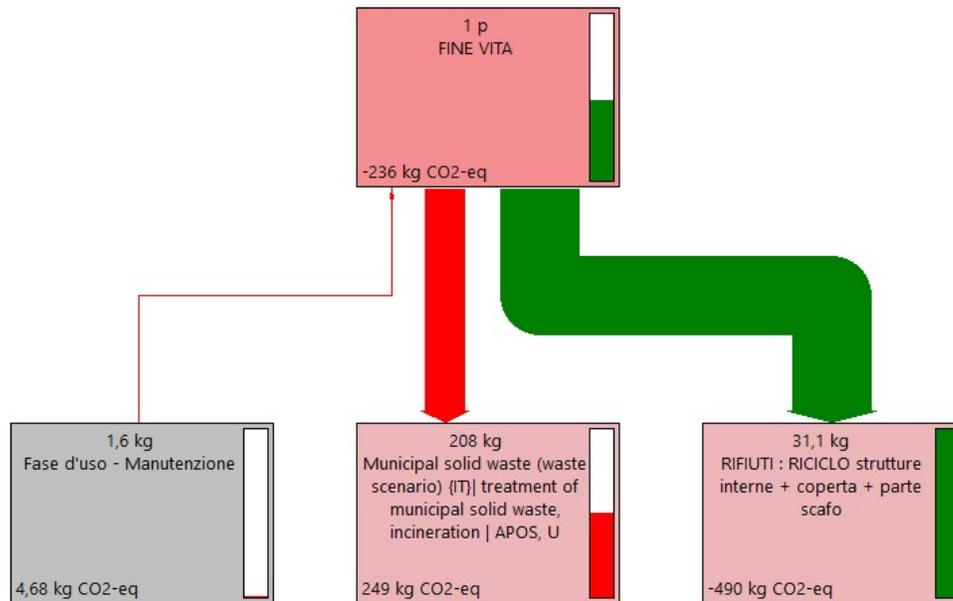


Figura 6.9: Rappresentazione a rete della valutazione d'impatto dei processi di manutenzione e di smaltimento (valore di esclusione dei flussi a 0.1%).

Dalla rete di Figure6.9 l'entità d'impatto del processo di manutenzione richiesta nel corso della vita utile risulta sostanzialmente trascurabile. L'impatto registrato sulla categoria di riscaldamento globale deriva principalmente dallo smaltimento per incenerimento. Si osserva una differenza marginale nei valori di massa coinvolti dai processi di smaltimento dovuti all'inserimento dei dati in SimaPro con un numero di cifre decimali inferiori rispetto ai valori riportati sul foglio di calcolo Excel.

La Table6.7 mostra il valore degli indicatori per le 4 tipologie di emissioni considerate dal metodo IPCC. La parte di CO_2eq emessa in biosfera, ovvero la componente biogenica, e la parte derivata da fonti fossili risultano entrambe fortemente influenzate dall'incenerimento. Si nota che l'utilizzo di materiali riciclabili al termine della vita utile consente di evitare una quota di emissioni di origine fossile tale da compensare con margine la quota causata dall'incenerimento dei materiali non riciclabili. Il grafico di Figure6.10 evidenzia che il processo d'incenerimento è la principale causa d'impatto. Si nota il contributo percentuale sulle emissioni di gas serra dei due scenari di smaltimento scelti ed in particolare quanto incida la soluzione di riciclo al fine di

Categoria d'impatto	Unità	Totale	Fase d'uso - Manutenzione	Sorting facility, for construction waste GLO — market for — APOS, U	Municipal solid waste IT —APOS, U	RIFIUTI : RICICLO strutture int. + coperta + parte scafo
GWP100 - fossil	kg CO2-eq	-393.597	4.657535	0.01	93.08	-491.34
GWP100 - biog.	kg CO2-eq	154.2578	0.084041	0.00	156.52	-2.34
GWP100 - land tr.	kg CO2-eq	-0.59632	0.00244	0.00	0.05	-0.65
GWP100 - CO2 up.	kg CO2-eq	3.567353	-0.06389	0.00	-0.92	4.55

Tabella 6.7: Risultati di caratterizzazione secondo il metodo IPCC.

ridurre complessivamente il valore dell'indicatore di categoria.



Figura 6.10: Valutazione dei danni ambientali sulla categoria *global warming* attraverso il metodo IPCC.

I risultati di caratterizzazione mostrati nel grafico di Figure6.11 e riportati anche in Table6.8 ottenuti attraverso il metodo ReCiPe evidenziano un generale beneficio ambientale ricavato dai processi di riciclaggio sulle categorie d'impatto analizzate. Dai valori degli indicatori di *human carcinogenic toxicity* si nota l'unico contributo d'impatto proveniente dal riciclo ed associato all'alluminio. Tuttavia il valore d'indicatore per questa categoria non risulta eccessivamente critico.

Dalla Table6.8 risulta evidente il contributo ambientale particolarmente positivo dei processi di riciclo sulle categorie: *freshwater eutrophication*, *freshwater ecotoxicity*, *Marine ecotoxicity*.

6.4 Impatto dell'intero ciclo di vita

Il ciclo di vita del prototipo analizzato rappresenta tutte le fasi precedentemente trattate e descrive il modello LCA del sistema prodotto e degli altri sistemi coinvolti

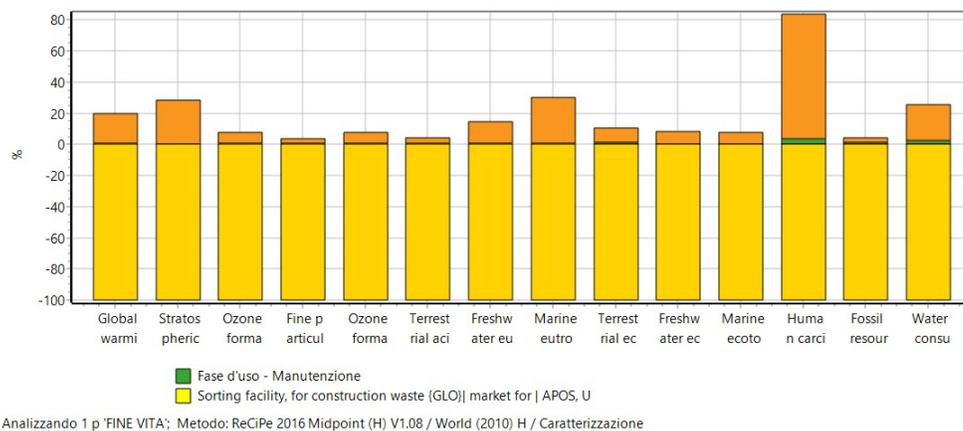


Figura 6.11: Caratterizzazione degli impatti ambientali attraverso il metodo ReCiPe.

Categoria d'impatto	Unità	Totale	Manutenzione	Sorting facility, for construction waste GLO — market for — APOS, U	Municipal solid waste (waste scenario)IT — APOS, U	RIFIUTI : RICICLO strutture int. + coperta + parte scafo
Global warming	kg CO2 eq	-405.23	4.77	0.01	93.52	-503.53
Stratospheric ozone depletion	kg CFC11 eq	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ozone formation, Human health	kg NOx eq	-1.20	0.01	0.00	0.09	-1.30
Fine particulate matter formation	kg PM2.5 eq	-0.94	0.01	0.00	0.03	-0.97
Ozone formation, Ter. ecosystems	kg NOx eq	-1.21	0.01	0.00	0.09	-1.31
Terrestrial acidification	kg SO2 eq	-2.08	0.02	0.00	0.07	-2.17
Freshwater eutrophication	kg P eq	-0.14	0.00	0.00	0.02	-0.16
Marine eutrophication	kg N eq	-0.01	0.00	0.00	0.00	-0.01
Terrestrial ecotoxicity	kg 1,4-DCB	-36.90	0.50	0.00	3.86	-41.25
Freshwater ecotoxicity	kg 1,4-DCB	-4.20	0.01	0.00	0.36	-4.57
Marine ecotoxicity	kg 1,4-DCB	-6.00	0.01	0.00	0.50	-6.50
Human carcinogenic toxicity	kg 1,4-DCB	-0.01	0.00	0.00	0.05	-0.06
Fossil resource scarcity	kg oil eq	-107.55	1.78	0.00	3.06	-112.39
Water consumption	m3	-1.40	0.05	0.00	0.43	-1.88

Tabella 6.8: Indicatori di categoria d'impatto per la fase manutenzione e di fine vita secondo il metodo ReCiPe.

dal momento della *nascita* allo smaltimento. La rete dei flussi riportata in Figure 6.12 riassume la distribuzione dei principali impatti ambientali causati da tutti i processi inclusi nei confini dell'analisi LCA.

La valutazione dei danni espressa dal metodo IPCC evidenzia che le emissioni di gas serra più rilevanti provengono dai processi di pre-produzione. La resina (poliestere) richiesta per i successivi processi di realizzazione dello scafo ha un impatto rilevante sulle prestazioni ambientali complessive del ciclo. Come visto anche dal paragrafo 6.3, lo scenario di smaltimento per incenerimento contribuisce negativamente sull'effetto di riscaldamento globale. Infatti si può osservare dalla rete di Figure 6.12 il flusso derivante dal fine vita dei materiali non riciclati risulta essere in termini percentuali la seconda maggiore fonte d'impatto secondo il metodo IPCC.

Gli indicatori in Table 6.9 presentano dei valori che richiamano quanto osservato nei paragrafi precedenti. L'utilizzo delle fibre di lino scelte come materiale di rinforzo per

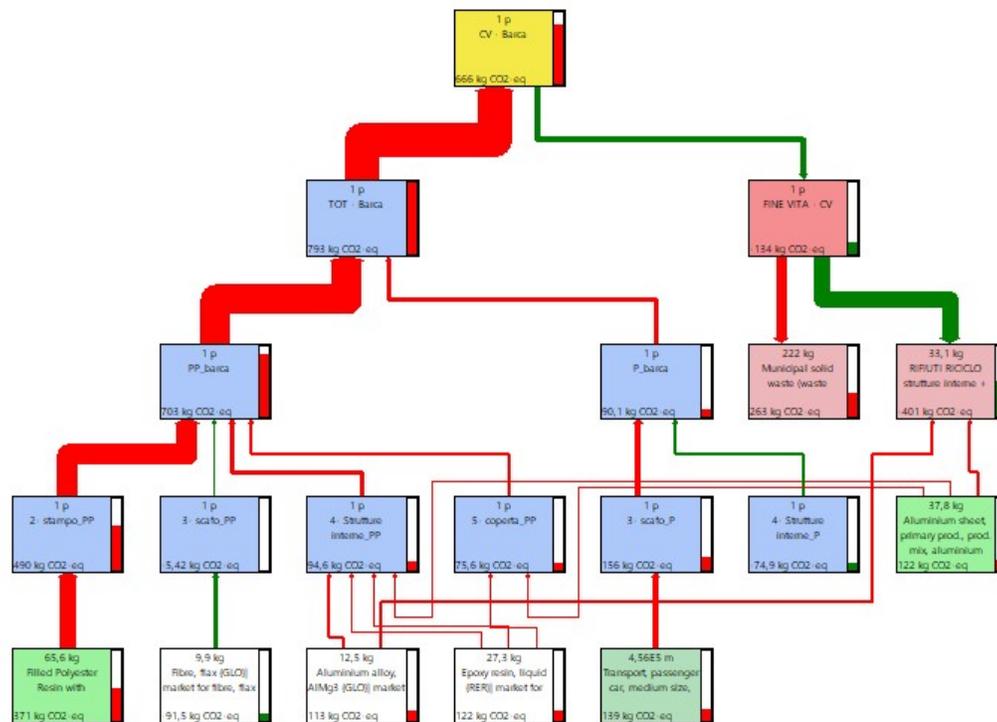


Figura 6.12: Rappresentazione delle emissioni di CO_2eq dell'intero ciclo di vita (valore di esclusione dei flussi a 8%)

lo scafo costituisce una fonte di crediti ambientali non trascurabile sulla categoria *global warming*. L'impatto che proviene dai processi dello stampo è la principale causa di calo generale delle prestazioni ambientali associate alla fase *from cradle to exit gate* dei 5 componenti. La Figure6.14 esprime chiaramente quanto ogni fase del ciclo impatti sull'intera vita del prototipo in esame.

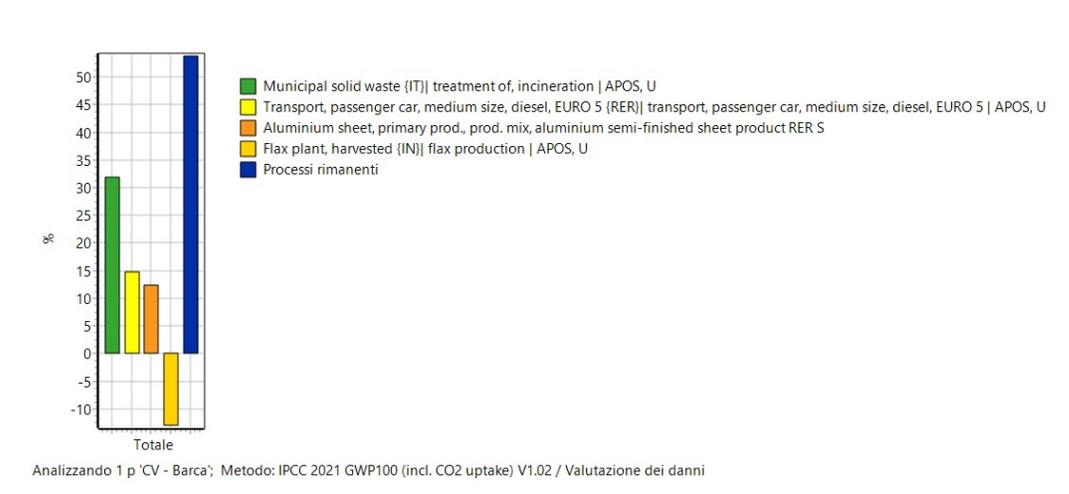
Come indicato anche nel paragrafo 6.2 i trasporti causano un impatto rilevante che si riflette sullo stesso ciclo di vita.

I risultati che riguardano il metodo ReCiPe sono riportati in Table6.10. La colonna associata alla fase di fine vita presenta degli indicatori di categoria che testimoniano l'effetto ambientale positivo del riciclo.

I risultati del metodo ReCiPe ottenuti attraverso la procedure di *normalizzazione* disponibile su SimaPro hanno permesso di identificare quali categorie presentano l'entità d'impatto più significativa. Dalla figura Figure6.15 si osserva un effetto

Categoria d'impatto	Unità	Totale	TOT - Barca	Fase d'uso - Manutenzione	FINE VITA - CV
GWP100 - fossil	kg CO2-eq	517.54	933.91	4.66	-421.02
GWP100 - biogenic	kg CO2-eq	208.77	48.96	0.08	159.73
GWP100 - land transf.	kg CO2-eq	3.61	4.24	0.00	-0.63
GWP100 - CO2 uptake	kg CO2-eq	-190.25	-194.01	-0.06	3.83

Tabella 6.9: Indicatori d'impatto calcolati attraverso il metodo IPCC.

Figura 6.13: Grafico delle principali emissioni di CO_2eq durante l'intero ciclo di vita valutate attraverso il metodo IPCC.

ambientale rilevante sulle emissioni che interessano le categorie: *freshwater eutrophication*, *fossil resource scarcity*, *Human carcinogenic toxicity* e *ozone formation*. Come si è visto nel paragrafo 6.1, l'impatto sulle categorie *freshwater eutrophication* e *fossil resource scarcity* dipende dai processi di pre-produzione secondo le quantità di resina richiesta dallo stampo e marginalmente dallo scafo.

La categoria *Human carcinogenic toxicity* subisce prevalentemente l'impatto delle emissioni causate dai processi di pre-produzione dell'alluminio. Le categorie *ozone formation* sono invece rappresentative dei processi di pre-produzione della resina impiegata nello stampo e dei processi di trasporto associati alla fase di produzione.

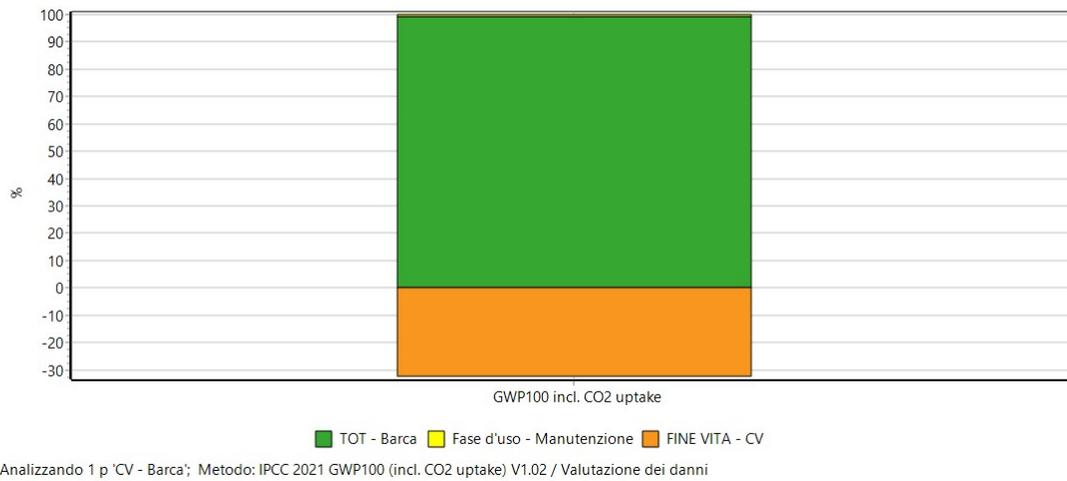


Figura 6.14: Grafico dell'impatto complessivo sulla categoria *global warming* valutato sul ciclo di vita secondo il metodo IPCC.

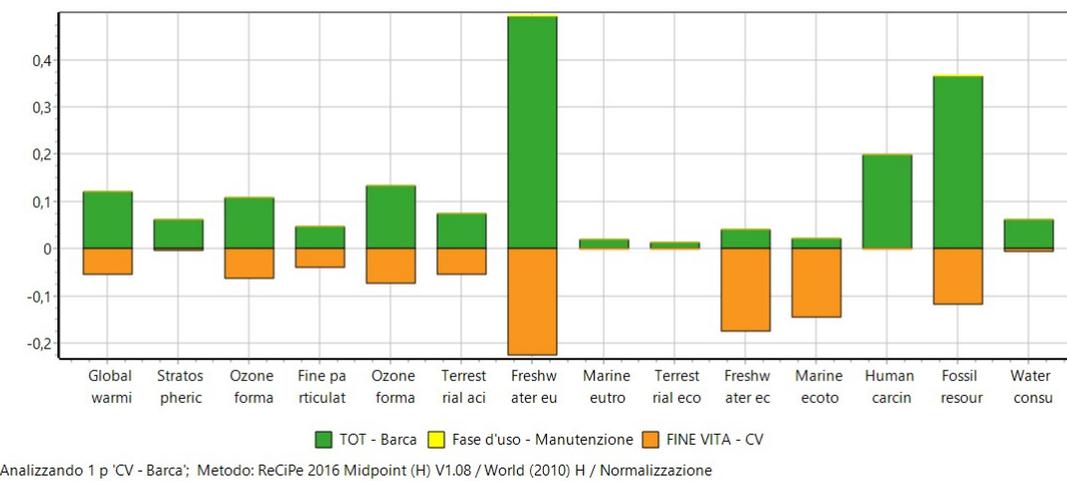


Figura 6.15: Grafico dei risultati di normalizzazione degli impatti ambientali calcolati con il metodo ReCiPe.

Categoria d'impatto	Unità	Totale	TOT - Barca	Manutenzione	FINE VITA - CV
Global warming	kg CO2 eq	539.57	968.29	4.77	-433.49
Stratospheric ozone depletion	kg CFC11 eq	0.00	0.00	0.00	0.00
Ozone formation, Human health	kg NOx eq	0.94	2.22	0.01	-1.29
Fine particulate matter formation	kg PM2.5 eq	0.21	1.20	0.01	-1.00
Ozone formation, Ter. ecosystems	kg NOx eq	1.08	2.37	0.01	-1.29
Terrestrial acidification	kg SO2 eq	0.83	3.04	0.02	-2.23
Freshwater eutrophication	kg P eq	0.17	0.32	0.00	-0.15
Marine eutrophication	kg N eq	0.08	0.09	0.00	-0.01
Terrestrial ecotoxicity	kg 1,4-DCB	150.27	189.22	0.50	-39.45
Freshwater ecotoxicity	kg 1,4-DCB	-3.38	1.03	0.01	-4.42
Marine ecotoxicity	kg 1,4-DCB	-5.37	0.93	0.01	-6.31
Human carcinogenic toxicity	kg 1,4-DCB	2.02	2.04	0.00	-0.01
Fossil resource scarcity	kg oil eq	244.16	358.45	1.78	-116.07
Water consumption	m3	15.11	16.59	0.05	-1.53

Tabella 6.10: Indicatori di categoria d'impatto per l'intero ciclo di vita secondo il metodo ReCiPe.

Capitolo 7

Interpretazione dei Risultati

Lo studio LCA eseguito sul prototipo Alétheia ha valutato l'eco-bilancio di tutte le fasi che interessano il ciclo di vita di un'imbarcazione velica appartenente alla classe R3. L'analisi d'inventario (LCI) ha consentito la stima dei bilanci di massa dei processi elementari interni al ciclo produttivo in modo da definire i flussi associati ai 5 componenti fondamentali prodotti dal sistema in esame. Si riporta la Table7.1 dove si riassumono i valori di massa totale per componenti che rappresentano una prima fonte d'informazione per il team Metis. In relazione ai dati d'inventario si ricava un peso complessivo dell'insieme del prototipo pari a $68.2kg$, costituito da: scafo, strutture interne e coperta; l'armo è escluso. Sarà importante effettuare la misurazione del peso effettivo al fine di ottenere un riscontro sull'accuratezza dei dati raccolti in fase d'inventario.

La fase LCIA di valutazione dell'impatto ambientale del ciclo di vita del prototipo riportata nel precedente capitolo ha evidenziato un valore d'impatto ambientale sulla categoria *global warming* di circa $540kg CO_2eq$. La Table7.2 riassume i valori di

	M_{in} [kg]	M_{usata} [kg]	M_{scarti} [kg]
master	72.8	71.8	1.0
stampo	102.7	96.6	6.1
scafo	35.2	34.5	0.7
strutture interne	19.8	15.1	4.7
coperta	24.8	22.1	2.7
tot.	255.3	240.2	15.1

Tabella 7.1: Valore di massa complessiva per ogni componente realizzato all'interno del ciclo produttivo relativo al prototipo Alétheia.

	Categoria	Unità	Totale	TOT - Barca	Manutenzione	FINE VITA - CV
IPCC 2021 GWP 100	GWP	kg CO2 eq	539.7	793.1	4.7	-258.1
ReCiPe 2016 Midpoint (H)	GWP	kg CO2 eq	539.6	968.3	4.8	-433.5

Tabella 7.2: Potenziale d'impatto sulla categoria *global warming* valutato dal metodo IPCC e dal metodo ReCiPe per il ciclo di vita esaminato.

valutazione d'impatto espressi dai due metodi.

La differenza nei valori dipende dall'insieme delle assunzioni e dei fattori di caratterizzazione impiegati per le emissioni di gas serra, mentre l'orizzonte temporale di valutazione dei danni ambientali risulta pari a 100 anni per entrambi i metodi. La differenza di valutazione dell'impatto calcolato dai due metodi dipende principalmente dall'indicatore associato alla fase *from cradle to gate* dei prodotti (*TOT - Barca*) e alla fase di fine vita (*FINE VITA*). Infatti il metodo IPCC 2021 e il metodo ReCiPe 2016 impiegano delle modalità di valutazione degli impatti distinte. Ciò che risulta importante al fine della correttezza dei risultati è la concordanza dei valori ricavata sull'emissione totale del ciclo di vita, corrispondente a circa $540\text{kg CO}_2\text{eq}$.

7.1 Interpretazione degli impatti dal ciclo dei materiali

La fase di estrazione e lavorazione delle materie prime e la fase di smaltimento dei materiali incidono in modo differente sugli indicatori di categoria e rappresentano le fasi che più condizionano le prestazioni ambientali complessive per il prototipo d'imbarcazione analizzato. Dalla fase LCIA si riscontra che la quantità di resina richiesta per la realizzazione dello stampo è la voce più impattante per la categoria di global warming (secondo metodo IPCC e ReCiPe). Come riporta il grafico in Figure 6.15 la richiesta di resina (poliestere) nei processi di realizzazione dello stampo ha un impatto dominante anche su altre categorie del metodo ReCiPe quali: *fossil resource scarcity*, *stratospheric ozone depletion*, *ozone formation* e *freshwater eutrophication*.

I crediti ambientali riscontrati sulla scelta delle fibre di lino come materiale di origine naturale testimoniano i benefici sull'impatto ambientale provenienti dall'integrazione di scelte più sostenibili senza compromettere la funzionalità del prodotto. Le scelte sostenibili impiegate per lo scafo, fibra di lino e PET riciclato, consentono di mitigare parte degli impatti ambientali associati alla fase *from cradle to gate* e risultano delle alternative valide ai piani di laminazione convenzionali che impiegano fibre sintetiche. Secondo il metodo IPCC, il contributo più rilevante nella fase di

pre-produzione in termini di impatto ambientale positivo deriva dalla fibra di lino che comporta una quota netta di CO_2 pari a $-91.5kg CO_2eq$, corrispondente al 13% di emissioni risparmiate.

La tecnologia della fibra pre-impegnata (*prepreg*) rappresenta un ulteriore fattore di controllo della quantità di resina richiesta per lo scafo che si riflette su minori impatti ambientali. Sebbene si osservi un contributo dei processi di coltivazione delle piantagioni di lino apparentemente non significativo sulla categoria *marine eutrophication*, si consiglia una valutazione d'inventario più accurata in tale contesto. Il PET impiegato come materiale per l'anima strutturale del sandwich composito dello scafo, delle strutture interne e della coperta rappresenta il secondo fattore che ha contribuito al contenimento della quantità di resina richiesta dal ciclo di produzione. Il polietilene tereftalato espanso ha il vantaggio di richiedere una ridotta quantità di resina per raggiungere una buona adesione con gli strati di composito circostanti, come espresso nel capitolo 1. Inoltre i processi di riciclo a fine vita contribuiscono a ridurre gli impatti ambientali.

L'alluminio presente nella coperta e nelle strutture interne ha consentito di aumentare la quota riciclabile dell'assieme del prototipo, tuttavia in fase di pre-produzione si osserva un impatto sulle categorie *terrestrial ecotoxicity*, *Human carcinogenic toxicity* del metodo ReCiPe e la quota di emissioni di CO_2eq da fonte fossile che impatta sulla categoria di *global warming*. L'utilizzo di alluminio riciclato consentirebbe di gestire gli impatti associati anche nei processi di pre-produzione.

7.2 Interpretazione dei risultati di Trasporto

La valutazione degli impatti del ciclo produttivo riportata nel paragrafo 6.2 individua il trasporto come prima causa d'impatto. L'effetto ambientale più significativo di questo processo pesa sulle categorie d'impatto *ozone formation*, *global warming* e *fine particulate matter formation*. Tuttavia, dai risultati di caratterizzazione della fase di produzione si osserva che l'impatto dei trasporti potrebbe non essere l'unico contributo che emergerebbe in seguito ad un'acquisizione più accurata dei consumi previsti nei processi di costruzione dei 5 elementi considerati.

In fine si rimarca che la distanza geografica rispetto ad alcuni fornitori, come nel caso dei materiali utili allo stampo e dello scafo, ha comportato un contributo d'impatto ambientale non trascurabile esteso anche all'intero ciclo di vita. Il grafico di Figure 6.13 evidenzia l'impatto del viaggio effettuato con un mezzo privato per il trasporto dei materiali di fibra pre-impegnata tra Milano (sede del fornitore) e Padova con un'incidenza di circa il 15% delle emissioni totali di CO_2eq associate all'intero ciclo di vita.

7.3 Interpretazione dei risultati di fine vita

Lo scenario d'incenerimento a fine vita costituisce complessivamente il secondo contributo d'impatto per ordine d'importanza, preceduto solo dai processi di pre-produzione e produzione. Il grafico in Figure6.10 evidenzia che la decisione di adottare determinati materiali per realizzare i componenti che compongono l'imbarcazione ha una conseguenza diretta sugli impatti ambientali e sulle alternative di smaltimento. I risultati d'impatto mostrati nel grafico di Figure6.15 e nel grafico di Figure7.1 evidenziano il beneficio dei processi di riciclo nella riduzione degli impatti ambientali e del contenimento delle emissioni di gas ad effetto serra. Si nota che le emissioni di

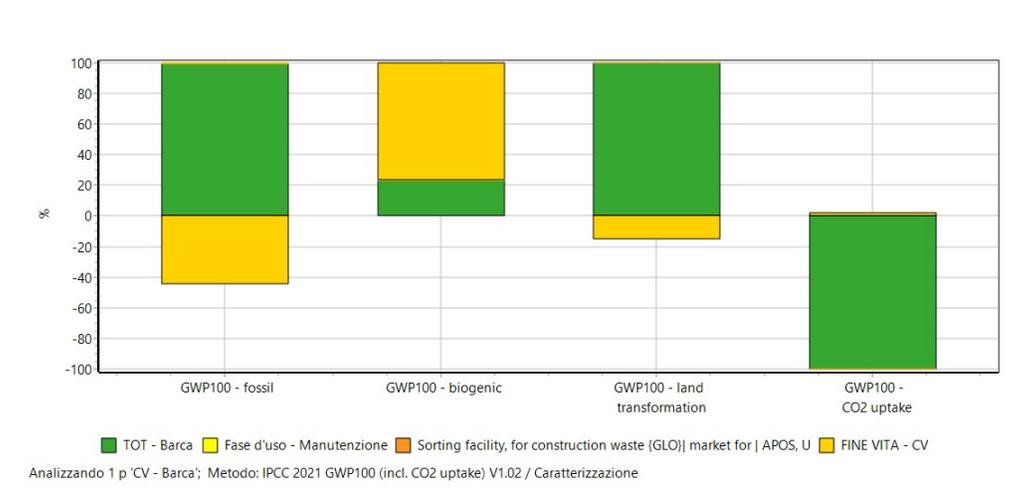


Figura 7.1: Grafico di caratterizzazione degli impatti associata alle 4 categorie di appartenenza delle emissioni di gas serra ricavato dal metodo IPCC per l'intero ciclo di vita.

CO_2eq relative al *global warming* provengono in parte dall'incenerimento dei materiali non riciclabili e rientrano nella sfera di emissioni biogeniche per cui l'ambiente si reputa in grado di assorbire. Dal grafico in Figure7.2 si osserva il contributo d'impatto ambientale dell'incenerimento sul ciclo di vita complessivo valutato dal metodo IPCC.

7.4 Soluzioni di eco-design

L'indagine LCA presentata sul prototipo Alétheia permette di chiarire le possibili scelte di eco-design introdotte nel capitolo 1. Dai risultati dello studio emerge una

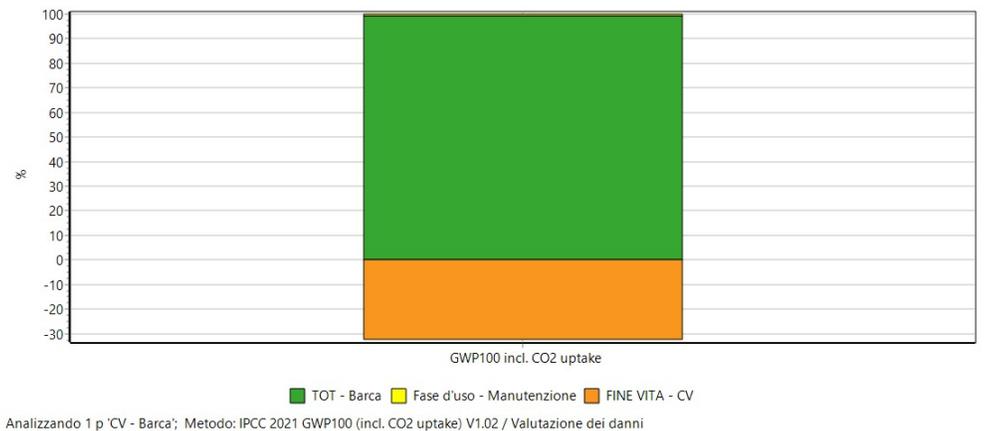


Figura 7.2: Valutazione degli impatti del ciclo di vita complessivo sulla categoria *global warming* secondo il metodo IPCC.

fonte d'impatto principale proveniente dalla fase di estrazione e lavorazione delle materie prime utili alla produzione dello stampo. Inoltre si osserva il beneficio ambientale connesso all'utilizzo delle fibre di lino come alternativa sostenibile valida alle fibre sintetiche (vetro o carbonio).

L'approccio LCA ha permesso di rimarcare l'importanza di integrare già nella fase di progettazione iniziale delle scelte mirate a gestire l'impatto ambientale dello smaltimento a fine vita dei prodotti.

In relazione a quanto espresso si riportano le decisioni progettuali assunte nello sviluppo di Alètheia e i suggerimenti che emergono dall'analisi LCA utili ad incrementare le performance ambientali di un prototipo velico da regata secondo l'ottica di eco-progettazione:

- preferire materiali di origine naturale come la fibra di lino;
- scegliere dei materiali che minimizzino il consumo di resina. L'utilizzo della fibra pre-impregnata e del PET espanso per il sandwich composito si è dimostrata una scelta valida ed efficace sia secondo il metodo LCA sia in termini di leggerezza e quindi di prestazioni del prodotto finale. Si suggerisce di affinare i processi di laminazione manuale adottati per le strutture interne e la coperta al fine ridurre ulteriormente il fabbisogno di resina;
- scegliere dei materiali che minimizzino i rifiuti. L'impiego di materiali riciclati e riciclabili quali PET ed alluminio contribuiscono ad abbattere tutti gli impatti

associati allo smaltimento causati principalmente dal deposito in discarica e dall'incenerimento. L'alluminio ha dimostrato un impatto importante se richiesto come materiale *vergine* quindi il suo utilizzo nella forma riciclata consente di ottenere ulteriori crediti ambientali per il sistema prodotto. La combinazione di più tipologie di materiali riciclabili può risultare una scelta valida al fine di incrementare il contenuto di materiale riciclato e/o riciclabile e di sfruttare le potenzialità ambientali e meccaniche di ognuno di essi;

- potenziare le possibilità di riciclo/riutilizzo attraverso l'implementazione di nuovi metodi, o di materiali che potrebbero contribuire alla riduzione della quota incenerita a fine vita. Il master e lo stampo sono gli elementi che più impattano sull'ambiente nella fase di pre-produzione e l'eventuale riutilizzo consentirebbe un risparmio importante del consumo di risorse e dei rilasci in ambiente.
- prevedere un processo di macinazione meccanica applicabile allo scafo e verificare la possibilità di riutilizzo delle fibre di rinforzo in altre applicazioni non strutturali;
- perfezionare la pianificazione delle operazioni di manutenzione e di controllo previste per l'imbarcazione in modo da estendere ed ottimizzare la durata della vita utile. La sensibilità agli impatti dei materiali compositi viene bilanciata dalla caratteristica di modularità che consente di attuare riparazioni efficaci ed evitare danni che provochino un fine vita anticipato. Si consiglia la ricerca in letteratura di metodi di rilevamento validi nel campo nautico che permettano di localizzare nei materiali compositi eventuali delaminazioni, diffusioni di cricche e in generale punti critici su cui è richiesta una riparazione;
- Privilegiare fornitori che utilizzano mezzi di trasporto sostenibili per il trasferimento dei materiali o che siano localizzati nei pressi della località in cui avviene il processo produttivo.

7.5 Limitazioni e raccomandazioni

Le limitazioni riscontrate nelle fasi previste dallo studio LCA del ciclo di vita del prototipo Alétheia interessano prevalentemente la fase d'inventario. I dati primari ricavati dai documenti di progettazione interni al team Metis hanno permesso di colmare delle lacune temporali derivate dalla discordanza tra il momento d'inizio effettivo di acquisizione dei dati e l'inizio dei lavori. Il problema principale che si è

riscontrato durante tutta la lunga fase di realizzazione dei vari elementi necessari alla costruzione di Alétheia è stato l'applicazione di un metodo efficace di registrazione degli scarti. Si suggerisce per futuri studi LCA di pianificare le modalità di registrazione dei materiali di scarto derivanti dai processi interni ai laboratori dell'ateneo in modo da raggiungere una migliore accuratezza sulla stima dei rifiuti generati attraverso una strategia di acquisizione che non gravi unicamente sugli operatori addetti alle lavorazioni. Un possibile suggerimento potrebbe prevedere la creazione di un reparto interno al team dedicato ai materiali. Infatti i risultati hanno evidenziato l'importanza di adottare un approccio di eco-design nella scelta, così come la catalogazione e la stima delle tempistiche tecniche necessarie ai processi in modo da stilare un piano preliminare del ciclo produttivo utile ai lavori e alla fase d'inventario. Inoltre si suggerisce il coinvolgimento del reparto impegnato nell'interazione con i fornitori al fine di richiedere tempestivamente le informazioni necessarie alla fase d'inventario e consentire un buon livello di accuratezza dei dati primari.

Le limitazioni dello studio interessano in particolare le valutazioni d'impatto dei processi di produzione della fibra pre-impregnata e del processo di reticolazione finale in autoclave. Si richiede un'analisi più approfondita dei processi realizzati dai fornitori in merito ai consumi energetici e ai flussi di materiale che avrebbero migliorato le valutazioni LCA del ciclo produttivo dell'imbarcazione.

La completezza e la qualità dei dati raccolti si riflette in accuratezza di valutazione degli impatti e d'interpretazione dei risultati. Un esempio d'interpretazione poco chiara riscontrata sui risultati dello studio LCA riguarda la difficoltà di stabilire il peso dei trasporti sugli impatti complessivi legati a tutti i processi di produzioni previsti durante la fase del ciclo produttivo. La completezza dei dati d'inventario dei processi interessati nella realizzazione dei 5 elementi dell'imbarcazione permetterebbe la normalizzazione più accurata dei risultati d'impatto *from gate to gate*.

Conclusioni

L'analisi LCA dell'intero ciclo di vita del prototipo da regata Alétheia riportata nell'elaborato di tesi ha consentito d'interfacciarsi all'insieme dei processi coinvolti nel settore nautico attraverso le modalità sistemiche tipiche dell'approccio del *life cycle thinking*. Lo studio *from cradle to grave* dei componenti fondamentali alla realizzazione e al funzionamento di un'imbarcazione di classe R3 su un'orizzonte di vita utile di 7 anni rappresenta un esempio d'applicazione del metodo LCA all'interno di un contesto tecnico e specialistico.

Il lavoro di tesi ha consentito di ampliare il metodo di valutazione attraverso cui il gruppo Metis progetta le imbarcazioni e ricerca i materiali. Si è visto che gli impatti di imbarcazioni a vela privi di sistemi di propulsione si concentrano sui processi a monte del ciclo produttivo. La fase di estrazione e lavorazione delle materie prime dominano l'impatto complessivo dell'intero ciclo di vita per un valore che interessa una quota pari al 130% ($703\text{kg CO}_2\text{eq}$) delle emissioni complessive valutate sulla categoria *global warming* attraverso il metodo IPCC. A fronte degli impatti ambientali registrati nelle prime fasi del ciclo di vita appare evidente che le strategie di scelta dei materiali e dei loro metodi di produzione hanno un peso significativo sulle prestazioni ambientali complessive. La Table 7.3 evidenzia il rapporto tra i rilasci equivalenti in ambiente di gas serra caratterizzati dal metodo IPCC in termini di $\text{kg CO}_2\text{eq}$ e la massa dei prodotti realizzati dal ciclo produttivo (5.11). Il termine *P+PP* (Pre-Produzione e Produzione) e *CV* (Ciclo di Vita) si riferiscono rispettivamente a tutte le emissioni valutate nella fase *from cradle to gate* e *from cradle to grave* rapportate alla massa totale utile dei 5 elementi. Si osserva il decremento delle emissioni specifiche sul dato relativo all'intero ciclo di vita, ancora più evidente se si attua il precedente calcolo

Fattore di emissione	PP + P	Barca (P + PP)	CV	Barca (CV)
kg CO2 eq/kg	3.30	11.6	2.25	7.91

Tabella 7.3: Emissioni specifiche delle fasi di pre-produzione, di produzione e dell'intero ciclo di vita.

sulla base di massa riferita ai componenti utili alla navigazione, ovvero lo scafo, le strutture interne e la coperta, identificati nella tabella con il termine *Barca*. Il forte contributo d'impatto delle materie prime e della loro lavorazione risulta contrapposto al beneficio ambientale ottenuto dai processi di riciclo a fine vita che consentono una riduzione superiore al 30% delle emissioni specifiche complessive.

L'indagine LCA ha consentito di verificare il vantaggio ambientale delle decisioni prese sui materiali da impiegare per la realizzazione dello scafo, delle strutture interne e della coperta. La fibra di lino ha consentito la riduzione complessiva degli impatti della fase di pre-produzione di oltre il 15% con una quota di $105\text{kg } CO_2eq$ assorbita (secondo il metodo di caratterizzazione IPCC). Il grafico in Figure6.2 mostra la riduzione di gas ad effetto serra derivata dall'impiego di fibra naturale di lino.

La tecnologia di produzione delle fibre di rinforzo pre-impregnate rappresenta una soluzione potenzialmente importante in termini di sviluppo tecnologico dei processi di laminazione e di risparmio di risorse di materia prima. La tecnica del *prepreg* permette di velocizzare e facilitare il processo di produzione dei prodotti compositi grazie ad una laminazione più efficiente e facile da gestire. Inoltre il tessuto pre-impregnato garantisce un rapporto preciso resina-fibra garantito dal produttore. L'utilizzo di questa tipologia di tessuto evita i consumi addizionali di resina e gli scarti in fase di laminazione rispetto alle tecniche convenzionali di realizzazione degli scafi.

Lo studio ha evidenziato come la richiesta di materiali di origine chimica per la produzione dello stampo sia il principale motivo d'impatto ambientale del ciclo di estrazione e lavorazione delle materie prime. Dalla rete in Figure6.1 si è riscontrato che la resina (poliestere, vinilestere ed epossidica) provoca $463\text{kg } CO_2eq$ emessi in atmosfera corrispondente a circa il 65% delle emissioni di gas serra che incidono sulla categoria d'impatto di riscaldamento globale nella fase di pre-produzione dei materiali. Il grafico in Figure6.4 chiarisce il contributo ambientale dei materiali richiesti allo stampo nella fase di pre-produzione.

Dal grafico di Figure6.14 e dalla Table6.9 si può notare l'incidenza d'impatto della fase di pre-produzione della resina poliestere e come essa si ripercuota sull'intero ciclo di vita dell'imbarcazione. Gli impatti associati a questo materiale interessano tutte le categorie ambientali del metodo ReCiPe come riporta il grafico di Figure6.15 nel capitolo 6. In particolare si nota un impatto significativo sulle categorie *freshwater eutrophication*, *fossil resource scarcity*, *stratospheric ozone depletion*, *ozone formation* e *global warming*.

Nell'ottica di studio e realizzazione di futuri prototipi i risultati LCA suggeriscono la ricerca di resine di origine naturale, o tipologie di resine termoplastiche in grado di essere riciclate. Si prevede in tal senso la possibilità di riduzione dell'impatto ambientale delle resine. Inoltre questa considerazione si può estendere anche alle imbarcazioni da diporto in risposta alle necessità ambientali di materiali più sostenibili.

La spinta normativa riportata nel 1 verso la tutela ambientale e l'integrazione di un nuovo paradigma di progettazione d'incremento degli standard di sostenibilità e di circolarità dei processi risulta tuttora in via di sviluppo nel panorama Comunitario ed internazionale. Lo scenario di fine vita definito in seguito ad una revisione della letteratura ed esposto nel capitolo 2 ha consentito di modellare secondo l'approccio LCA un processo di smaltimento realistico per i prodotti analizzati.

Il grafico in Figure6.10 riflette i limiti tecnologici riscontrati nei processi di riciclo a fine vita dei materiali compositi, in particolare delle fibre naturali (paragrafo 1.3.4), per cui è stato considerato lo smaltimento per incenerimento. Parallelamente si osservano i crediti ambientali ottenuti attraverso i processi di riciclo che hanno coinvolto l'alluminio e il PET.

Il grafico in Figure6.11 evidenzia la responsabilità dei danni ambientali nello scenario di fine vita attribuito all'incenerimento. Il processo di fine vita scelto per la porzione di scafo priva degli elementi riciclabili (PET), del master e dello stampo ha un impatto sulle categorie relative alle fonti di acqua dolce, ai mari e agli oceani. Tuttavia dallo stessa figura si osserva che gli impatti del processo d'incenerimento sono stati ampiamente contenuti grazie alla soluzione di riciclo. La scelta di incrementare il contenuto di materiali riciclabili attraverso il PET espanso e l'alluminio nella struttura a sandwich composito dello scafo, delle strutture interne e della coperta è risultata vincente per abbattere anche le emissioni in aria di gas clima-alteranti di una quantità doppia rispetto ai $263kg CO_2eq$ attribuiti all'incenerimento (Table6.8).

La caratterizzazione degli impatti ambientali ha segnalato anche la possibilità di scegliere fornitori che certifichino la provenienza del materiale da processi di riciclo in modo da migliorare la sostenibilità dei futuri prototipi del team. Si è osservato che l'alluminio *virgine* presenta nella sua fase di produzione un alto impatto ambientale sulla categoria *human carcinogenic toxicity* e *terrestrial acidification* per via delle emissioni risultanti in ambiente.

L'interpretazione LCA riportata nel 7 enfatizza il beneficio riscontrato nella combinazione di prodotti riciclabili. La riciclabilità dell'alluminio ha permesso di ottenere crediti ambientali significativi, mentre il PET espanso ha contribuito a contenere il peso del prototipo grazie alla ridotta densità del materiale e a ridurre la quantità di rifiuti plastici in ambiente. Inoltre la struttura chimico-fisica a celle chiuse del PET ha consentito di ottenere un risparmio di resina nei processi di laminazione, soprattutto per gli elementi di strutture interne e di coperta. In seguito al lavoro di tesi si raccomanda anche l'introduzione di un aggiornamento al regolamento ([17]) della competizione *1001VELAcup* nei metodi di calcolo del contenuto di materiali riciclati o riciclabili, suggerendo di impiegare il parametro di volume rispetto alla grandezza di massa per evitare di sfavorire materiali riciclabili come il PET che presentano l'ulteriore vantaggio competitivo di del ridotto peso specifico.

La fase d’inventario dell’indagine LCA ha permesso di raccogliere le informazioni circa l’organizzazione e la pianificazione richiesta nella raccolta dei dati primari del ciclo produttivo. In particolare si è riscontrata l’esigenza di migliorare la qualità dei dati per i processi interni ai laboratori su cui si riscontrano scarti non trascurabili ai fini degli obiettivi dell’indagine. Con riferimento al paragrafo 7.5 si suggerisce l’introduzione di un reparto del team dedicato alla tematica LCA che possa interagire con il reparto di progettazione in modo da guidare la scelta dei materiali secondo un approccio di eco-design. Si suggerisce anche l’interazione con il reparto di gestione degli ordini per ottimizzare la strategia di acquisizione dati e la reperibilità delle informazioni dai fornitori.

L’analisi d’inventario effettuata per il prototipo in esame ha individuato nell’interazione tra reparti e la pianificazione dei processi dei punti significativi per ottimizzare lo sforzo di acquisizione dei dati. Le ridotte informazioni reperibili sui processi di reticolazione finale in autoclave e di produzione dei tessuti pre-impregnati non hanno permesso di modellare dal punto di vista LCA il contributo dei processi necessari alla realizzazione dello scafo. L’incremento dei dati primari consentirebbe di chiarire in fase di normalizzazione l’entità d’impatto dei mezzi di trasporto sull’intera fase di produzione dei prodotti e migliorare il grado di dettaglio del modello LCA.

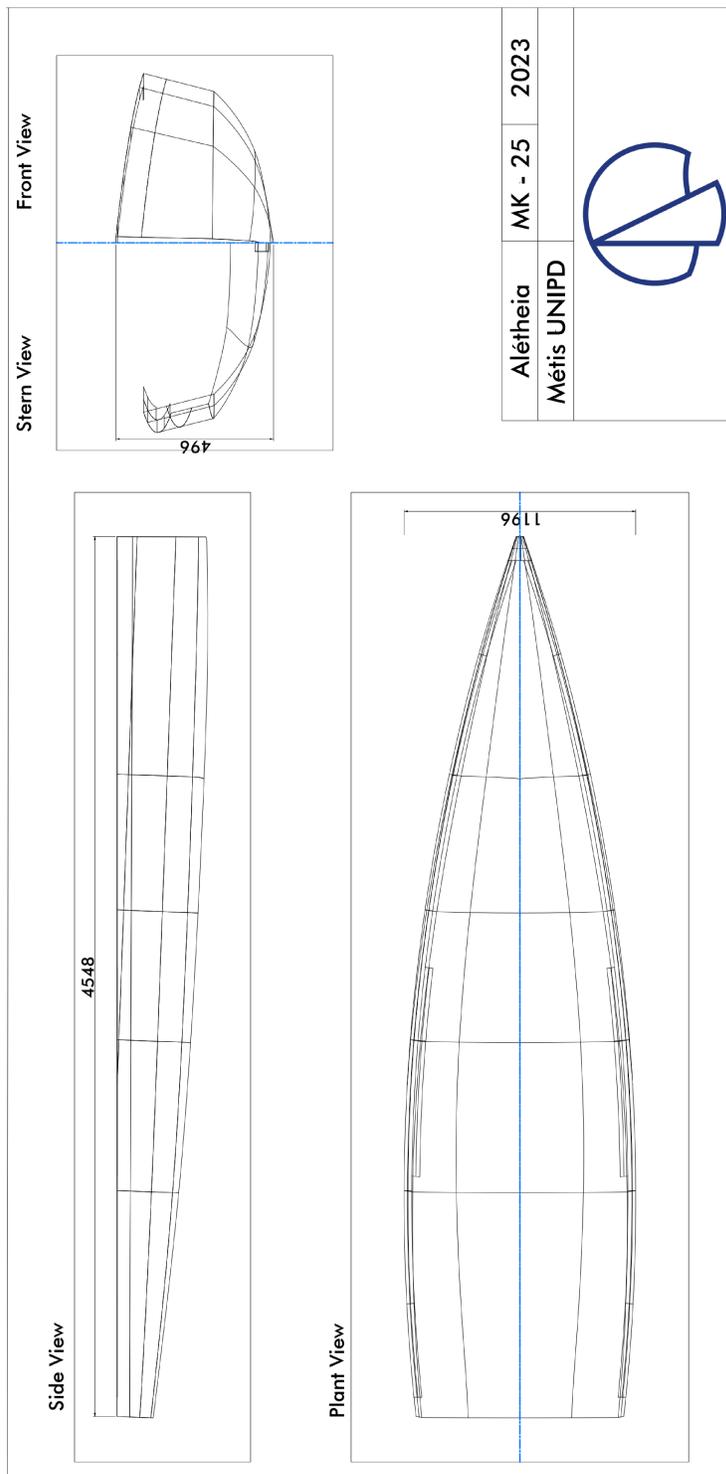
L’elaborato di tesi ha accertato l’applicabilità del metodo LCA all’interno del settore nautico per definire delle informazioni solide su cui basare i possibili interventi in ottica di eco-progettazione e di riduzione degli impatti ambientali.

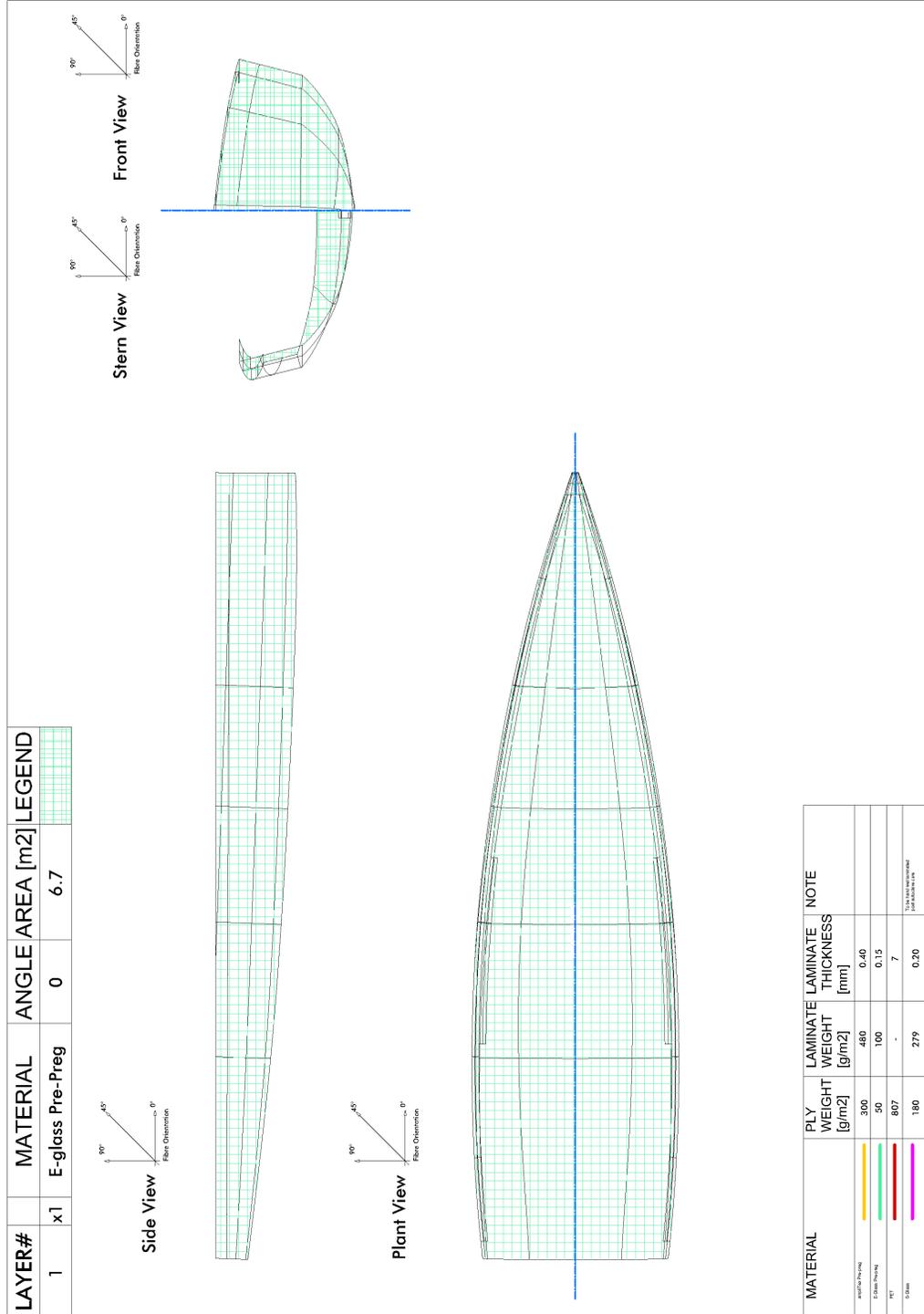
La scelta di attuare un’indagine LCA su *Alétheia*, il primo prototipo velico al mondo realizzato attraverso la tecnologia del lino pre-impregnato, ha permesso di valorizzare l’applicazione LCA e i risultati raggiunti dall’analisi. L’impegno del team Metis nelle tematiche di progettazione e sostenibilità ha dimostrato la fattibilità di sviluppare e realizzare un progetto a ridotto impatto ambientale la cui efficacia anche in termini competitivi è stata testimoniata dalla vittoria del trofeo Maneschi nella competizione *1001VELAcup 2023* conseguita grazie alla combinazione dei risultati progettuali e di regata.

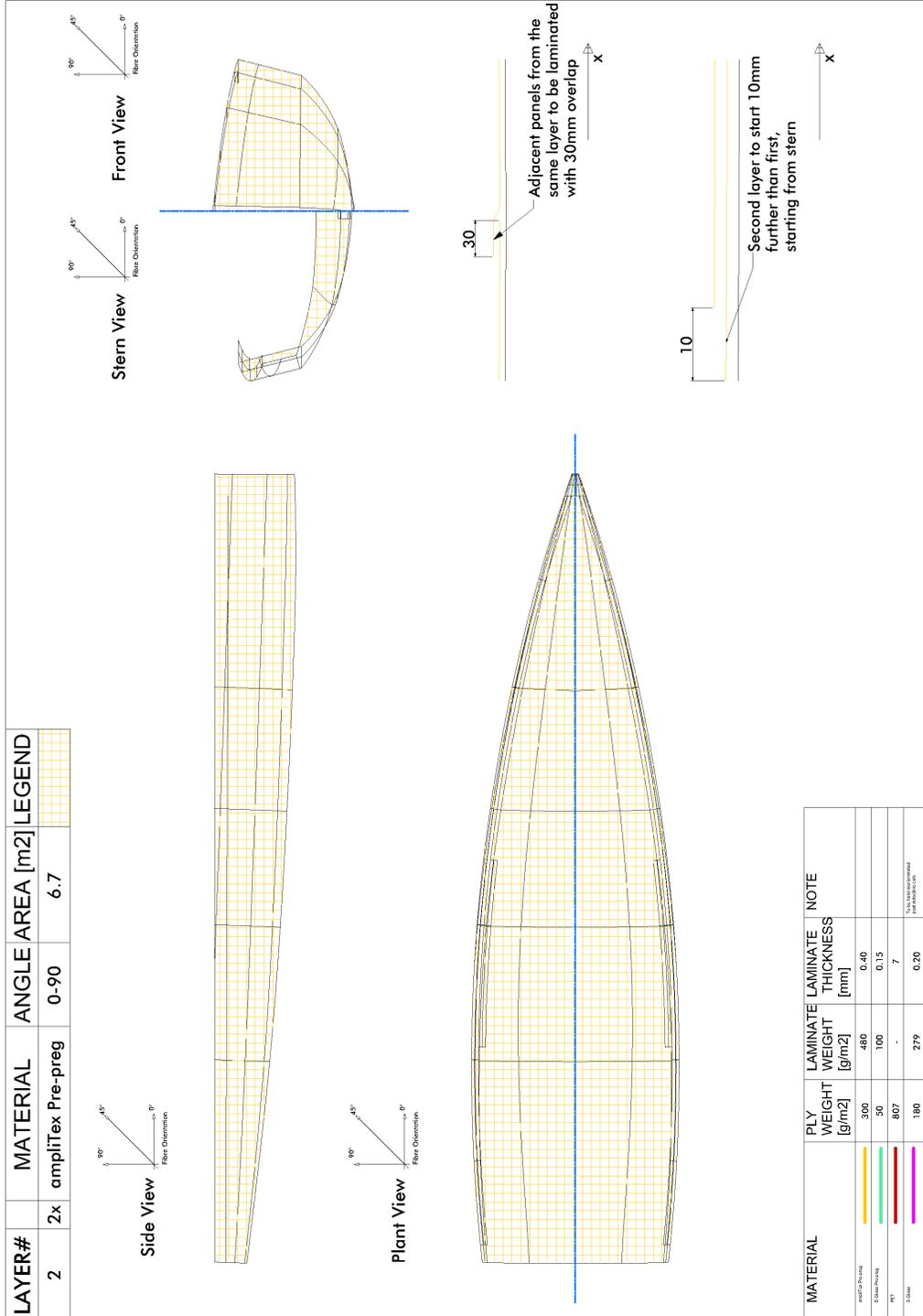
I risultati ottenuti dal presente lavoro di tesi si auspica possano rappresentare una fonte d’informazione funzionale alla diffusione del metodo LCA anche all’interno del settore nautico.

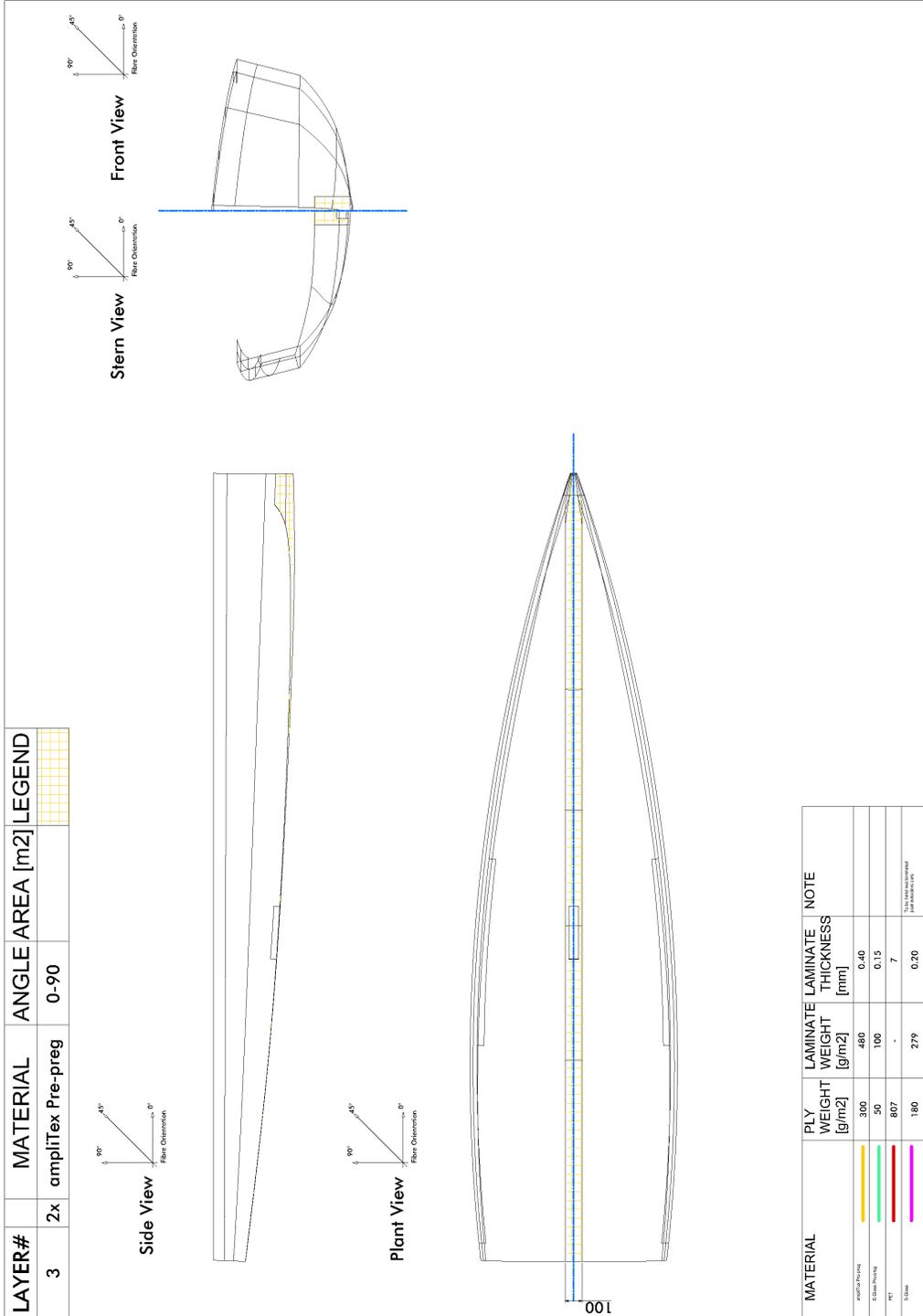
Appendice I

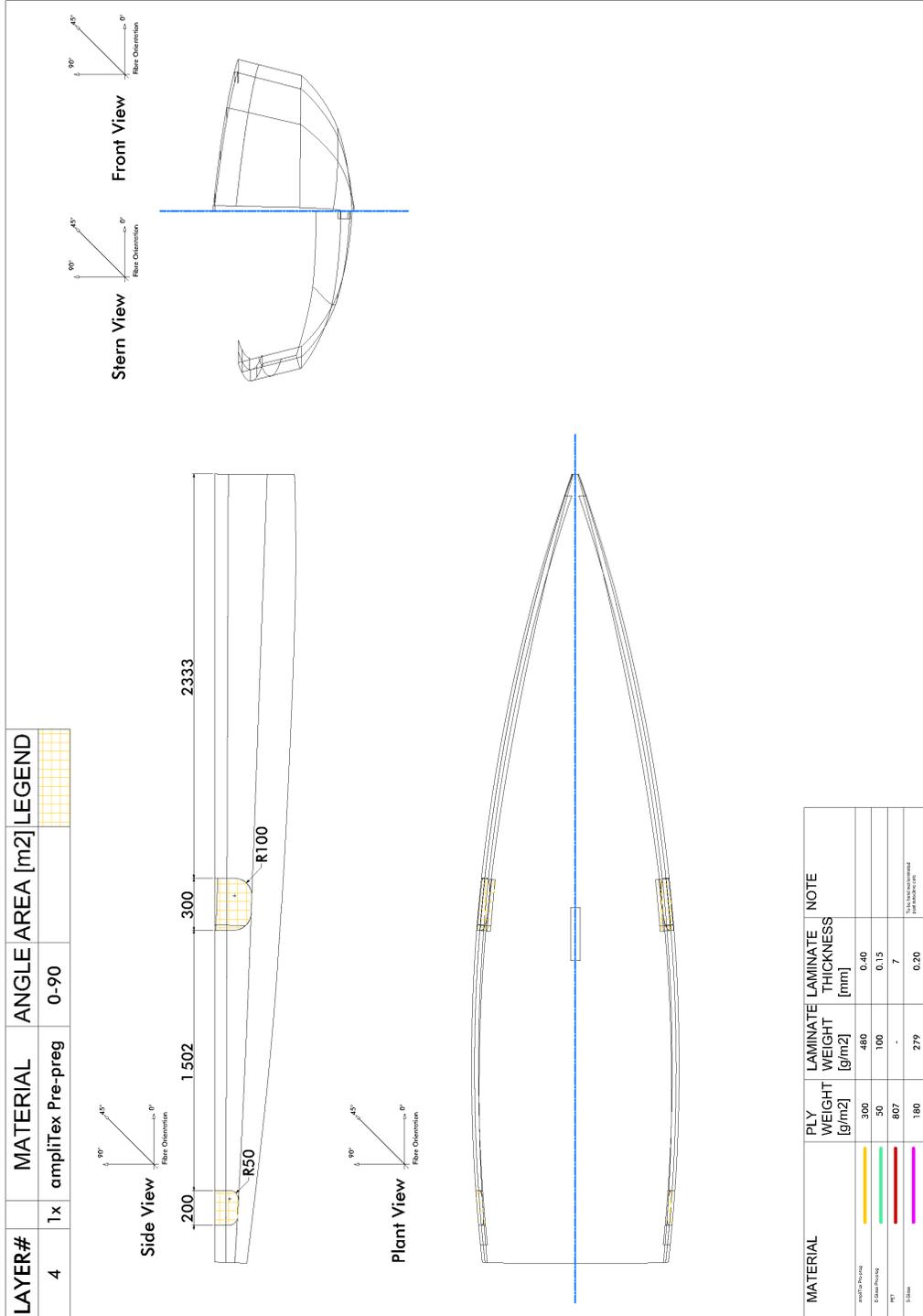
Piano di laminazione dello scafo

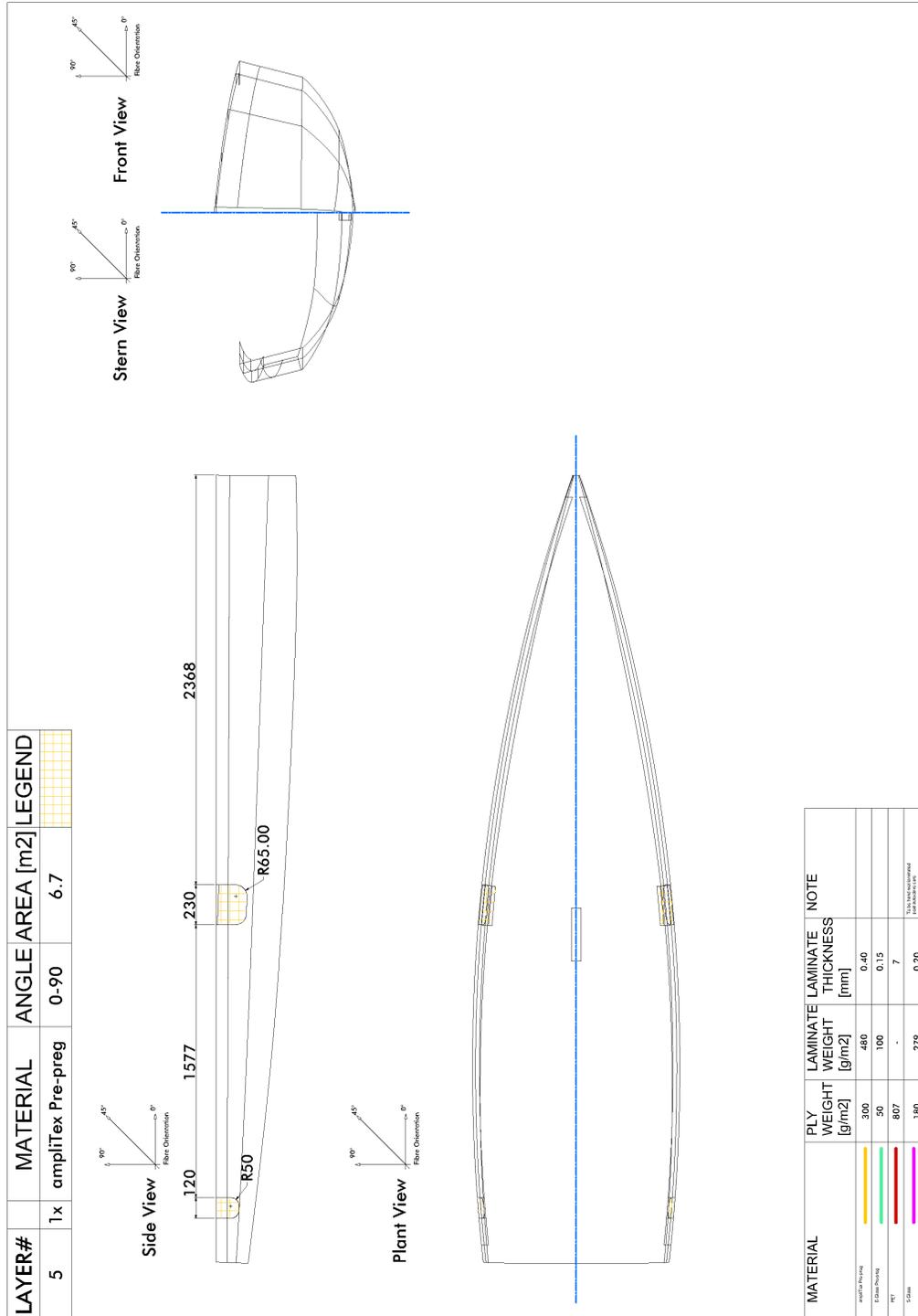


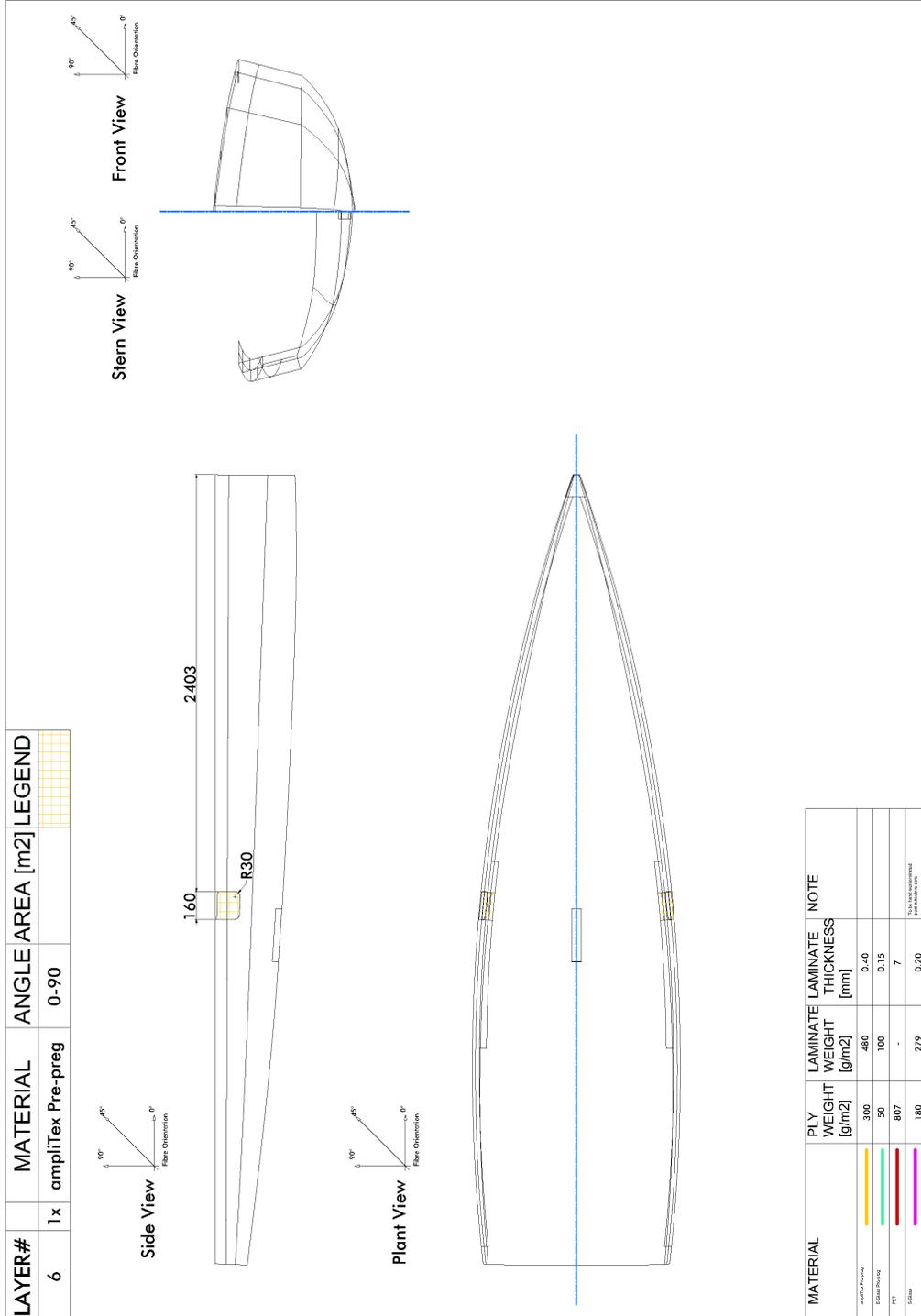


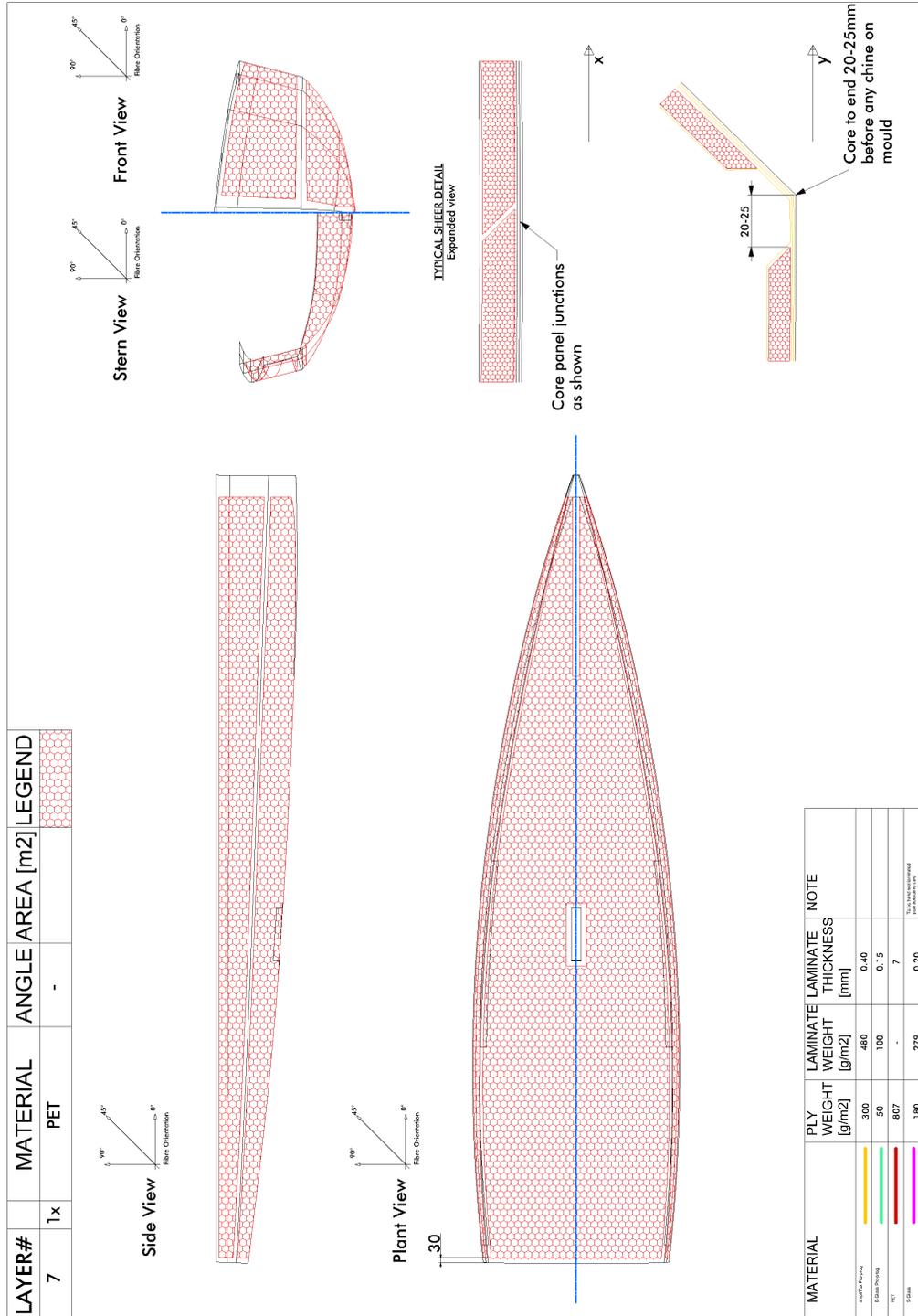


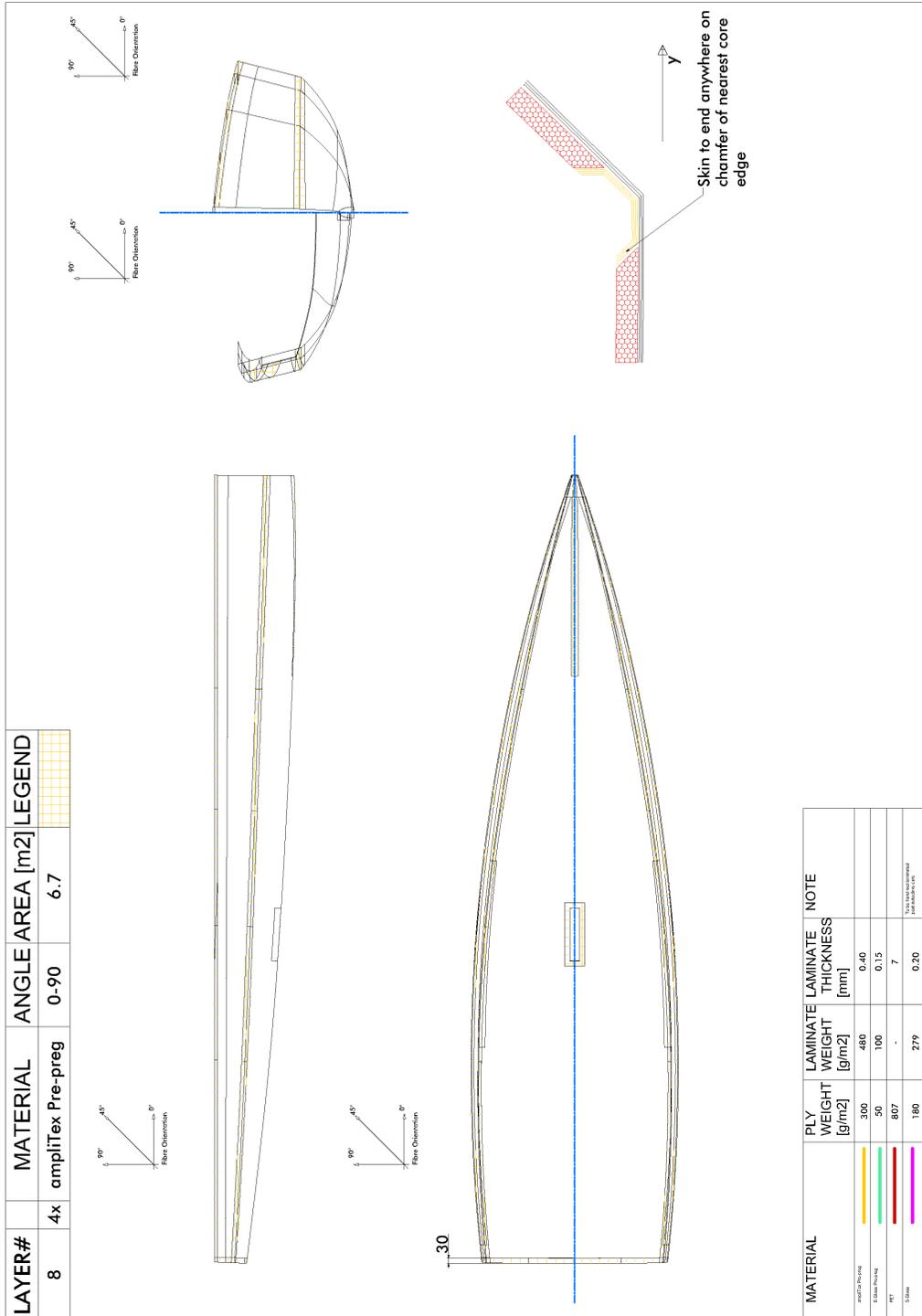


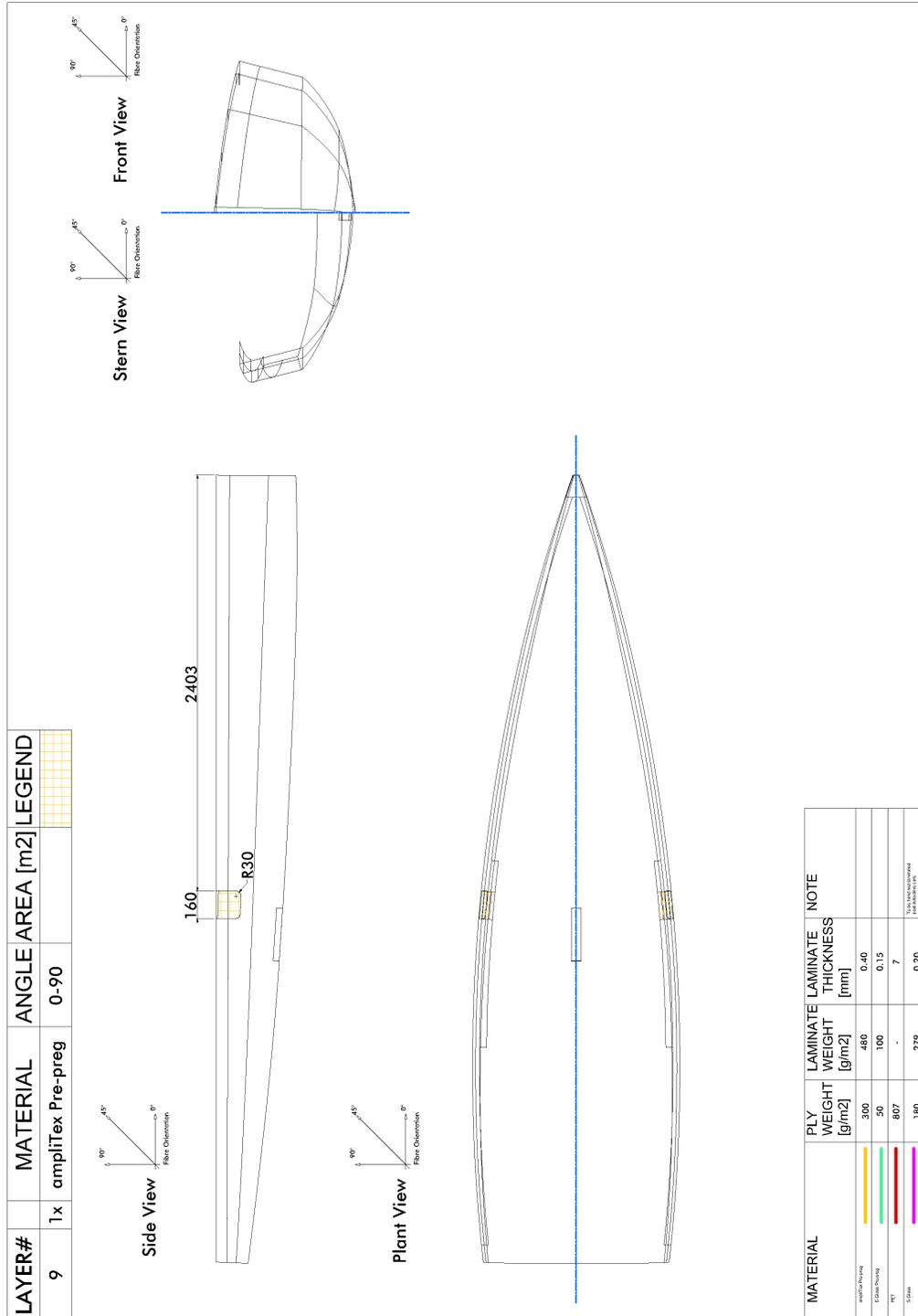


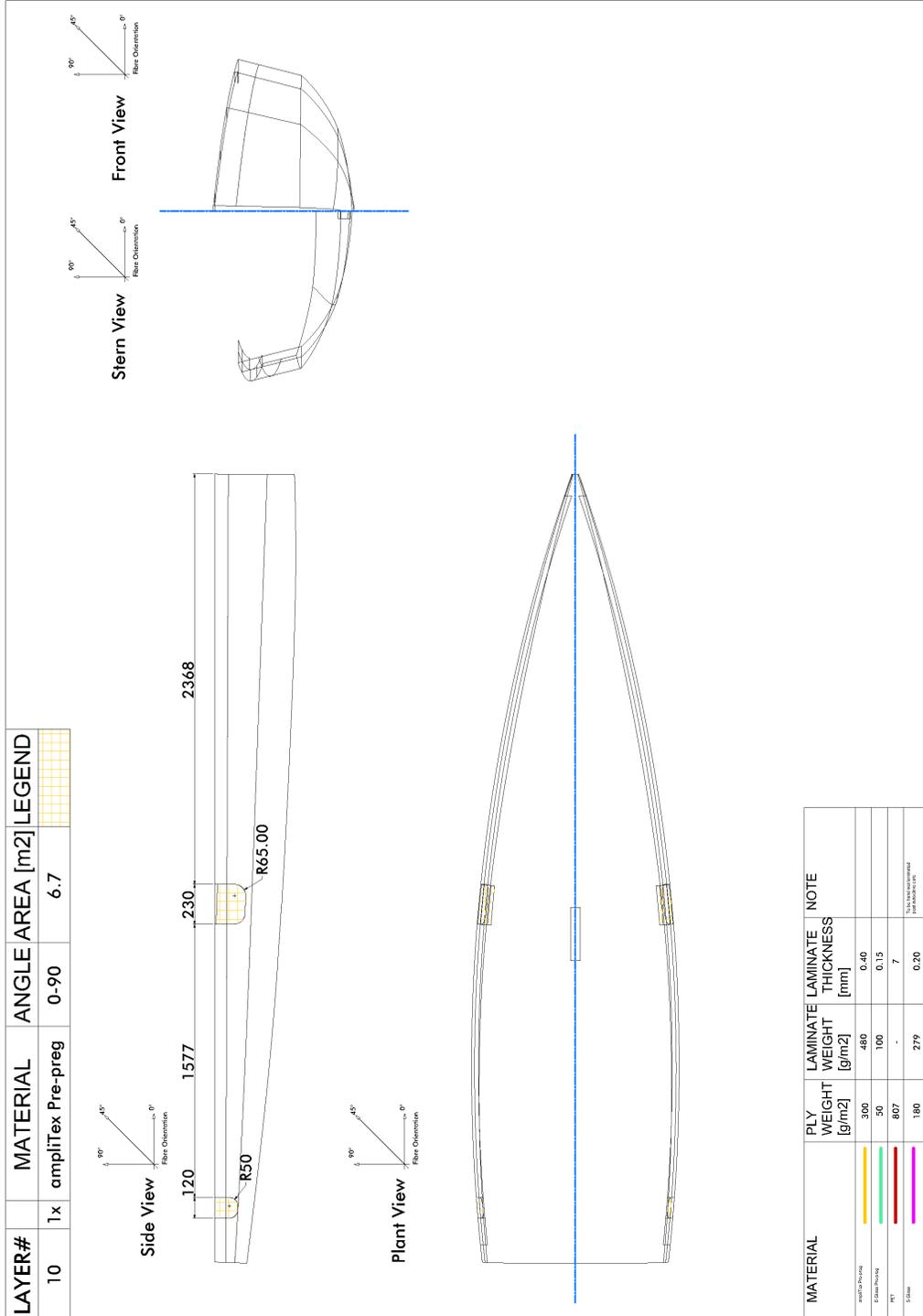


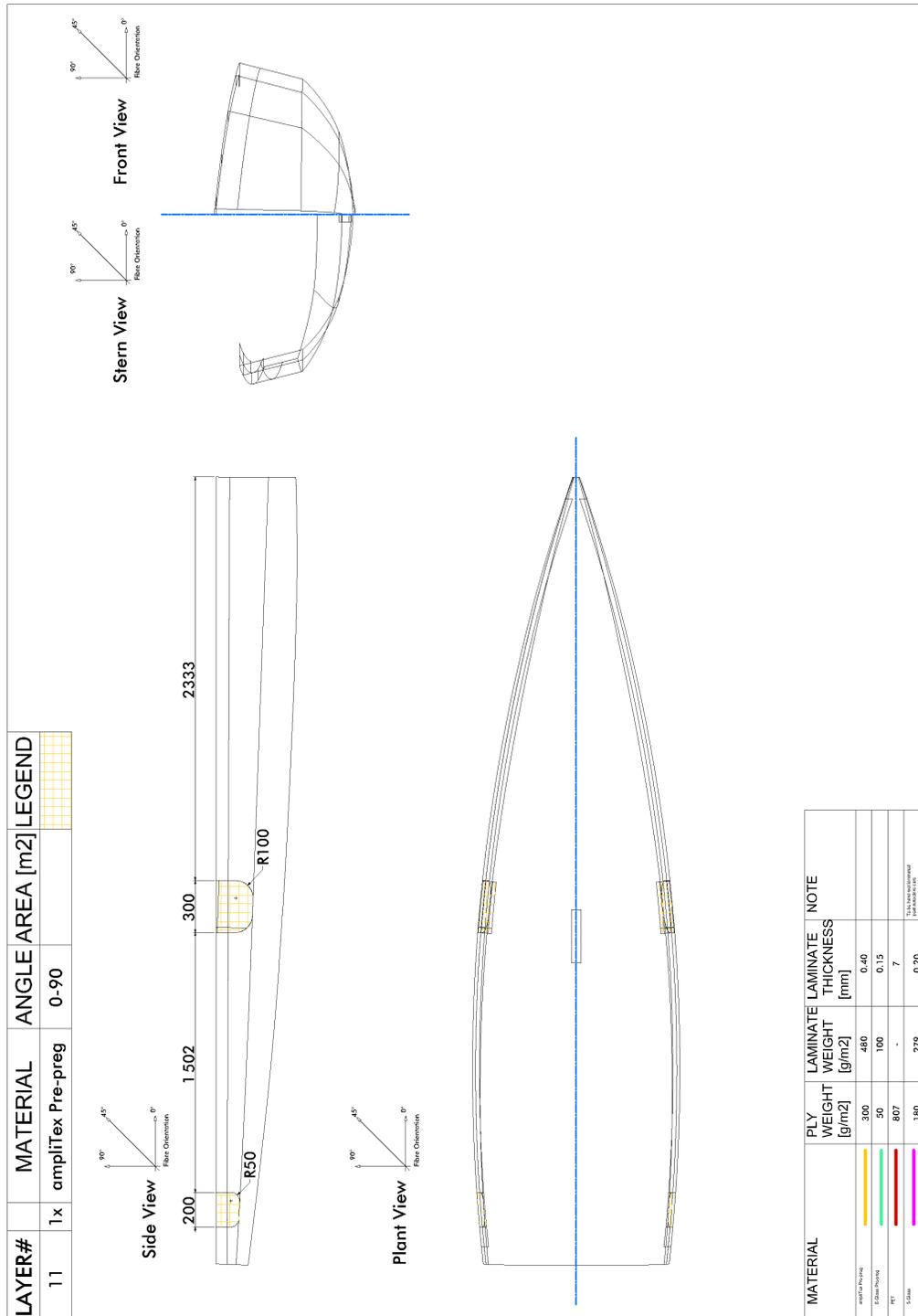


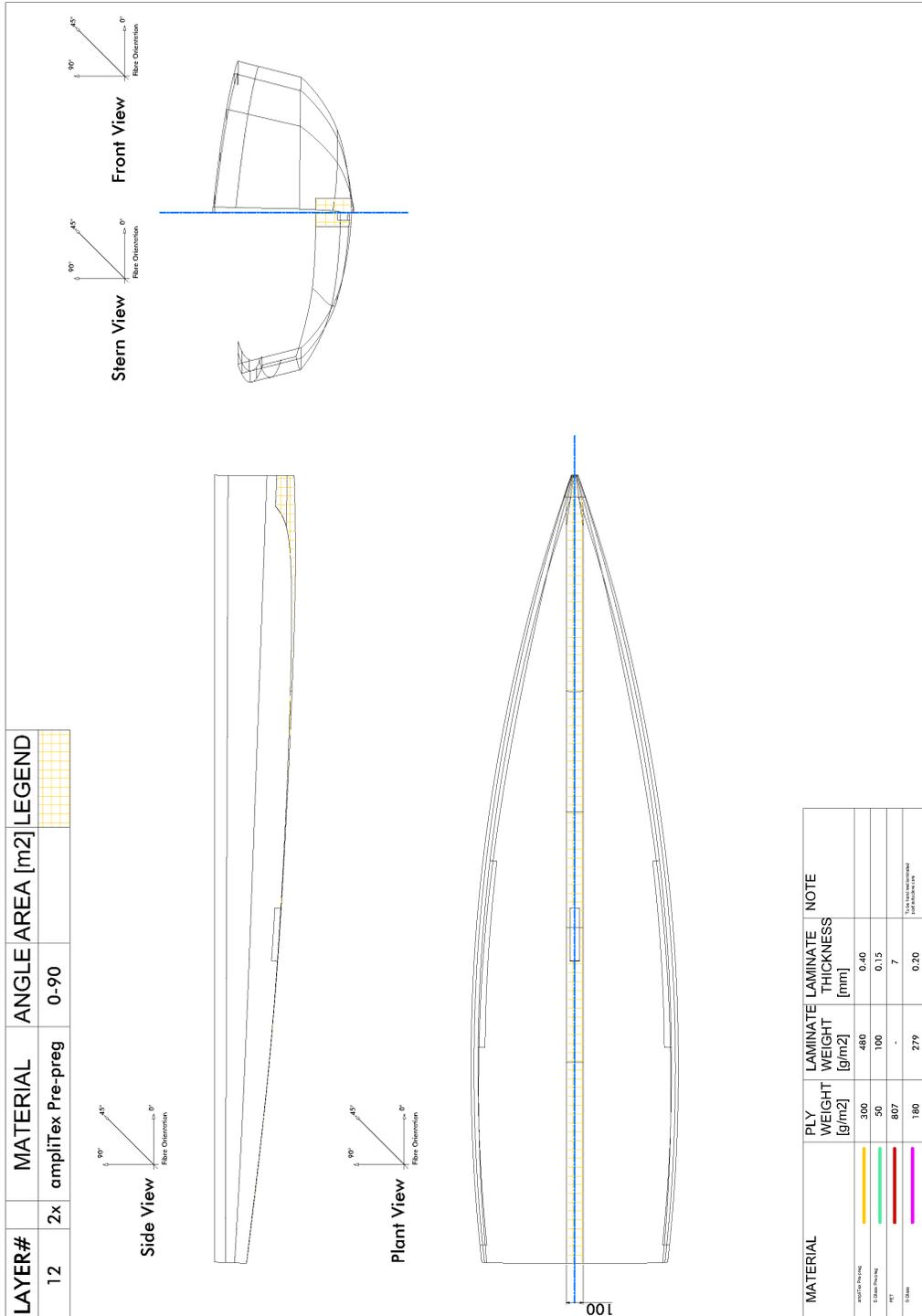


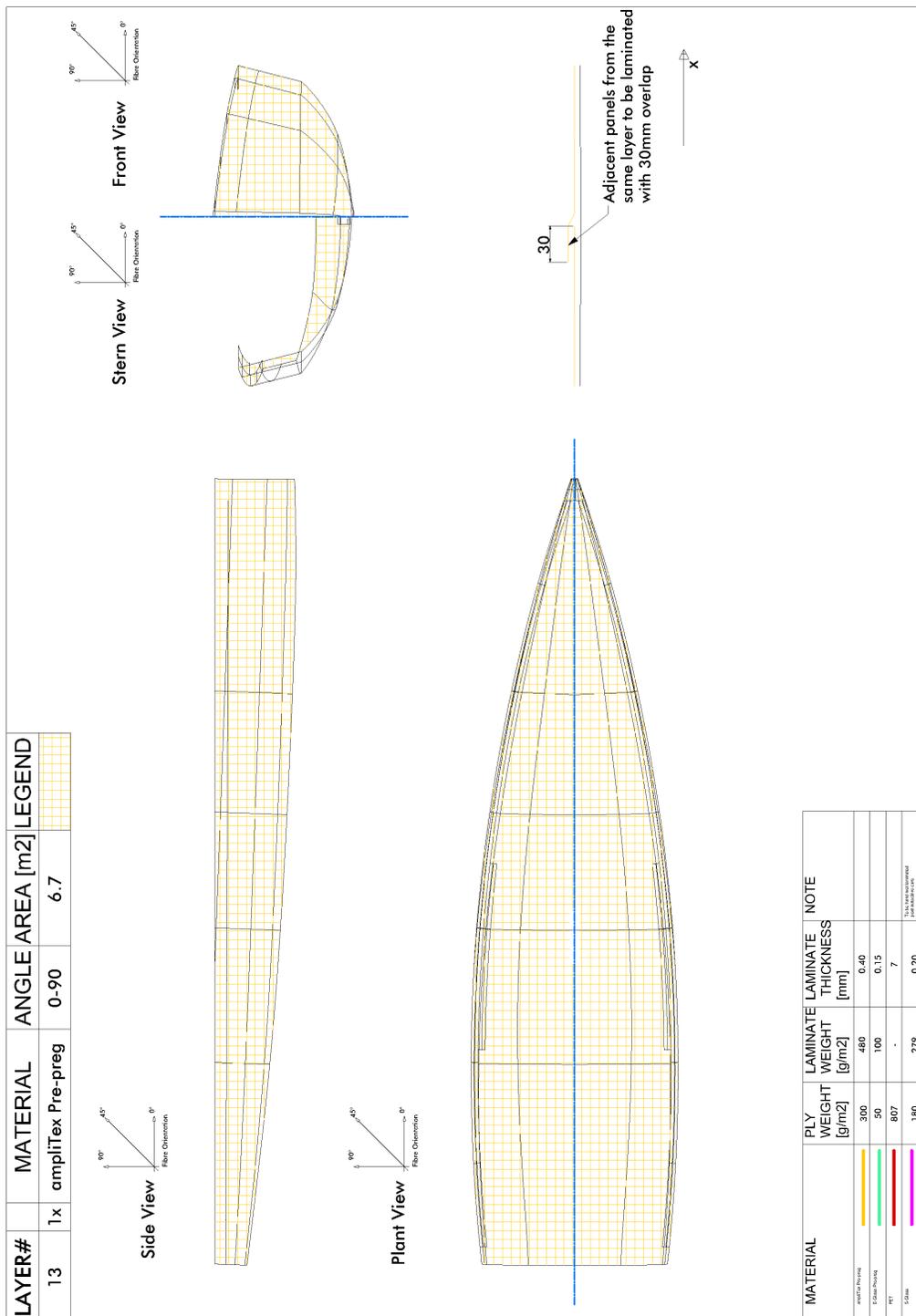


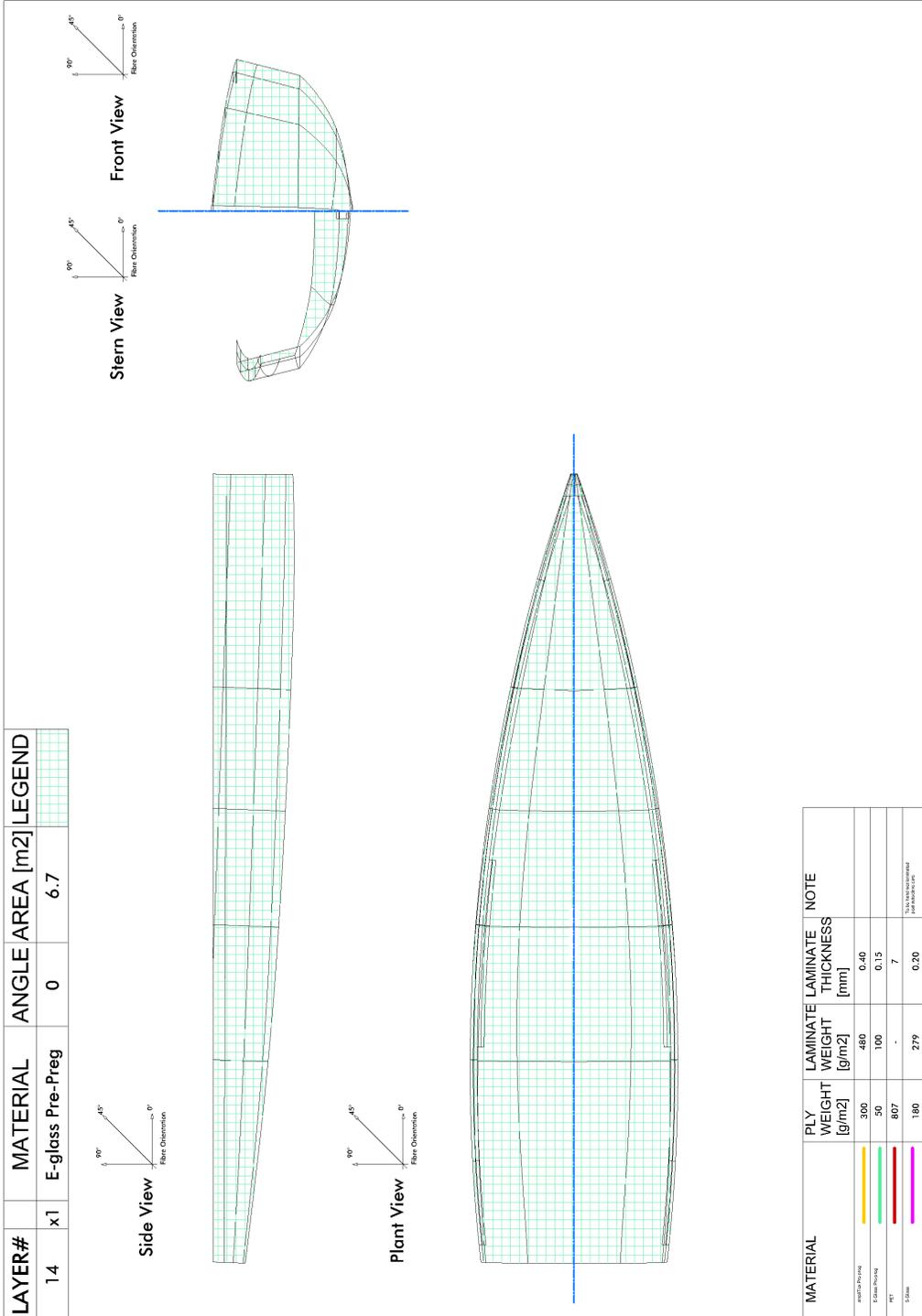












Bibliografia

- [1] Jon A. Skinner Angela Carpenter Tafsir M. Johansson. *Sustainability in the Maritime Domain - Towards Ocean Governance and Beyond*. Springer, 2021.
- [2] José Augusto, Oliveira Diogo, Aparecido Lopes, Silva Fabio, Neves Puglieri, Yovana María e Barrera Saavedra. *Life Cycle Engineering and Management of Products - Theory and Practice*. Springer, 2021. ISBN: 978-3-030-78043-2. DOI: 10.1007/978-3-030-78044-9.
- [3] Riccardo Bergamin. «Progettazione e realizzazione di un'imbarcazione da regata in composito riciclabile». Università degli Studi di Padova, 2018.
- [4] S. Castegnaro, C. Gomiero, C. Battisti, M. Poli, M. Basile, P. Barucco, U. Pizzarello, M. Quaresimin e A. Lazzaretto. «A bio-composite racing sailboat: Materials selection, design, manufacturing and sailing». In: *Ocean Engineering* 133 (2017), pp. 142–150. ISSN: 00298018. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2017.01.017.
- [5] European Commision. *European Green Deal: Agreement reached on cutting maritime transport emissions by promoting sustainable fuels for shipping*. Mar. 2023.
- [6] «Composite GFRP U-Shaped Footbridge». In: *Polish Maritime Research* 24 (s1 apr. 2017), pp. 25–31. ISSN: 20837429. DOI: 10.1515/pomr-2017-0017.
- [7] Ecoinvent. URL: <https://ecoinvent.org/the-ecoinvent-database/system-models/>.
- [8] Commissione Europea. *Proposta di REGOLAMENTO DEL PARLAMENTO EUROPEO E DEL CONSIGLIO che stabilisce il quadro per l'elaborazione delle specifiche di progettazione ecocompatibile dei prodotti sostenibili e abroga la direttiva 2009/125/CE*. 2022. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/?uri=CELEX%3A52022PC0142>.

- [9] Claudio Favi, Federico Campi, Michele Germani e Steve Manieri. «Using design information to create a data framework and tool for life cycle analysis of complex maritime vessels». In: *Journal of Cleaner Production* 192 (ago. 2018), pp. 887–905. ISSN: 09596526. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.04.263.
- [10] P. Gilbert, P. Wilson, C. Walsh e P. Hodgson. «The role of material efficiency to reduce CO2 emissions during ship manufacture: A life cycle approach». In: *Marine Policy* 75 (gen. 2017), pp. 227–237. ISSN: 0308597X. DOI: 10.1016/j.marpol.2016.04.003.
- [11] IMO. *RESOLUTION MEPC.377(80) - 2023 IMO STRATEGY ON REDUCTION OF GHG EMISSIONS FROM SHIPS*. 2023. URL: <https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Environment/Documents/annex/2023%20IMO%20Strategy%20on%20Reduction%20of%20GHG%20Emissions%20from%20Ships.pdf>.
- [12] The British Standards Institution. *halment-Life cycle assessment-Requirements and guidelines*. 2018. ISBN: 9780539008562.
- [13] Walter Klöpffer. *The role of SETAC in the development of LCA*. Apr. 2006. DOI: 10.1065/lca2006.04.019.
- [14] Andrey E. Krauklis, Christian W. Karl, Abedin I. Gagani e Jens K. Jørgensen. *Composite material recycling technology—state-of-the-art and sustainable development for the 2020s*. 2021. DOI: 10.3390/jcs5010028.
- [15] Lars Larsson, Rolf E. Eliasson e Michal Orych. *Principles of yacht design*. A cura di Adlard Coles. fifth. 2022. ISBN: 9781472981929.
- [16] JEC COMPOSITES MAGAZINE. «Composites for mobility». In: (mag. 2020). URL: www.JECcomposites.com.
- [17] Paolo Procesi Massimo Paperini. *Class Rules 1001VELAcup 2023-2024*. 2023. URL: <http://www.1001velacup.eu/regolamento.html>.
- [18] Leonidas Milios, Bledar Beqiri, Katherine A. Whalen e Simon H. Jelonek. «Sailing towards a circular economy: Conditions for increased reuse and re-manufacturing in the Scandinavian maritime sector». In: *Journal of Cleaner Production* 225 (lug. 2019), pp. 227–235. ISSN: 09596526. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.03.330.
- [19] Mehmet Önal e Gökdeniz Neşer. «END-OF-LIFE ALTERNATIVES OF GLASS REINFORCED POLYESTER BOAT HULLS COMPARED BY LCA». In: (2017).

- [20] IMO - International Maritime Organization. URL: <https://www.imo.org/en/About/HistoryOfIMO/Pages/Default.aspx>.
- [21] Giovanni Pagnon. «Progettazione di uno skiff a vela: modelli per hydrofoil e valutazioni della sostenibilit' a ambientale». Università degli Studi di Padova, 2021.
- [22] Steven Phillips, Joris Baets, Larry Lessard, Pascal Hubert e Ignaas Verpoest. «Characterization of flax/epoxy prepregs before and after cure». In: *Journal of Reinforced Plastics and Composites* 32 (11 giu. 2013), pp. 777–785. ISSN: 07316844. DOI: 10.1177/0731684412473359.
- [23] Harilaos N. Psaraftis. *Sustainable shipping: A cross-disciplinary view*. Springer International Publishing, gen. 2019, pp. 1–477. ISBN: 9783030043308. DOI: 10.1007/978-3-030-04330-8.
- [24] Xiaoxia Chen Qi Fang Mélanie Despeisse. «Environmental Impact Assessment of Boatbuilding Process with Ocean Plastic». In: *Procedia CIRP* 90 (2020), pp. 274–279.
- [25] Rezaur Rahman, Chin Mei, Yun Muhammad, Khusairy Bin e Bakri Editors. *Waste Materials in Advanced Sustainable Concrete - Reuse, Recovery and Recycle*. 2022. DOI: 10.1007/978-3-030-98812-8. URL: <https://link.springer.com/bookseries/4288>.
- [26] Parvathy Rajendran, · Nurul, Musfirah Mazlan, Aslina Anjang, Ab Rahman, · Nurulasikin, Mohd Suhadis, · Norizham, Abdul Razak, Mohd Shukur e Zainol Abidin. *A Physical Characterisation for the Preliminary Fabrication of Natural Woven Fabric Prepreg and Their Composites*. 2019. URL: <http://www.springer.com/series/11693>.
- [27] *ReCiPe 2016 v1.1 A harmonized life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level Report I: Characterization*. 2017. URL: www.rivm.nl/en.
- [28] Prमित Kumar Sarkar e Balasubramanian Kandasubramanian. «Metals to polymer composites for submerged hull: a paradigm shift». In: *Polymer-Plastics Technology and Materials* 60.16 (2021), pp. 1785–1819. DOI: 10.1080/25740881.2021.1930048. URL: <https://doi.org/10.1080/25740881.2021.1930048>.
- [29] Crepez Sergio. *Teoria e progetto delle imbarcazioni a vela*. 1986.
- [30] British Standards Institute Staff. *Environmental management. life cycle assessment. principles and framework*. Bsi, 2006. ISBN: 0580489922.
- [31] Tincelin T., Mermier L., Pierson Y., Pelerin E. e Jouanne G. «Ship design and operation for environmental sustainability». In: (mar. 2010).

- [32] «Tension-tension fatigue behaviour of woven flax/epoxy composites». In: *Journal of Reinforced Plastics and Composites* 34 (11 giu. 2015), pp. 857–867. ISSN: 15307964. DOI: 10.1177/0731684415581527.
- [33] Metis Vela UNIPD. «PLYBOOK». In: (2022).
- [34] Xianhui Zhao, Katie Copenhaver, Lu Wang, Matthew Korey, Douglas J. Gardner, Kai Li, Meghan E. Lamm, Vidya Kishore, Samarthya Bhagia, Mehdi Tajvidi, Halil Tekinalp, Oluwafemi Oyedeji, Sanjita Wasti, Erin Webb, Arthur J. Ragauskas, Hongli Zhu, William H. Peter e Soydan Ozcan. «Recycling of natural fiber composites: Challenges and opportunities». In: *Resources, Conservation and Recycling* 177 (feb. 2022). ISSN: 18790658. DOI: 10.1016/j.resconrec.2021.105962.

Ringraziamenti

Un lungo percorso di studi è volto finalmente al termine. Desidero ringraziare profondamente la mia famiglia rimasta sempre al mio fianco in tutti gli anni della mia carriera accademica. Dedico questo importante traguardo ai miei genitori che nonostante i lunghi periodi passati lontano da casa hanno continuato a supportarmi anche nei momenti più complicati; a mia sorella con cui ho condiviso il primo giorno di scuola, le amicizie tra i banchi, le esperienze durante gli anni di università e che dopo tutti questi anni riesce ancora a trovare il modo di sopportarmi.

Ringrazio mio cugino Giuseppe, la persona che per prima mi ha introdotto al mondo velico, compagno di sport e fedele sostenitore.

Un ringraziamento speciale a tutti gli amici e le persone che hanno contribuito ad arricchire i miei anni universitari: fate parte di ricordi che porterò sempre con me. Gli ultimi anni di laurea magistrale mi hanno permesso di raccogliere il frutto di innumerevoli sforzi e di raggiungere un obiettivo tanto significativo. Ringrazio sinceramente Benedetta per avermi saputo sostenere nell'ultimo anno ed essere stata costantemente una fonte d'ispirazione personale. Sono felice di poter condividere questo giorno insieme.

Desidero ringraziare il professore Lazzaretto e tutti i membri del team Metis con i quali ho avuto la fortuna di condividere la passione per la vela e l'esperienza universitaria. Ringrazio particolarmente la professoressa Stoppato per la disponibilità e l'aiuto dimostratomi.